

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Bruno Dorneles de Castro

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES COM
FACES DE ALUMÍNIO E NÚCLEOS POLIMÉRICOS PRODUZIDOS POR
MANUFATURA ADITIVA**

Belo Horizonte
2022

Bruno Dorneles de Castro

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES COM
FACES DE ALUMÍNIO E NÚCLEOS POLIMÉRICOS PRODUZIDOS POR
MANUFATURA ADITIVA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Campos Rubio

Coorientador: Prof. Dr. Frederico de Castro Magalhães

Belo Horizonte
2022

C355d

Castro, Bruno Dorneles de.

Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches com faces de alumínio e núcleos poliméricos produzidos por manufatura aditiva [recurso eletrônico] / Bruno Dorneles de Castro. - 2022.

1 recurso online (193 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Juan Carlos Campos Rubio.

Coorientador: Frederico de Castro Magalhães.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 181-193

Bibliografia: f. 166-180.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Manufatura aditiva – Teses.
3. Transdutores piezoelétricos – Teses. I. Campos Rubio, Juan Carlos.
II. Magalhães, Frederico de Castro. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**"DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES COM NÚCLEOS POLIMÉRICOS
PRODUZIDOS POR MANUFATURA ADITIVA"**

BRUNO DORNELES DE CASTRO

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Juan Carlos Campos Rubio (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Frederico de Castro Magalhães (Coorientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Luciano Machado Gomes Vieira (Departamento de Engenharia de Produção/UFMG), Dr. Paulo Eustáquio de Faria (Departamento de Engenharia de Produção/UFMG), Dr. Rodrigo Teixeira Santos Freire (Universidade Federal de São João del-Rei/UFES) e Dr. Wanderson de Oliveira Leite (Instituto Federal de Minas Gerais/IFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Tese aprovada no dia 16 de maio de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Juan Carlos Campos Rubio, Professor do Magistério Superior**, em 31/05/2022, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico de Castro Magalhaes, Professor do Magistério Superior**, em 31/05/2022, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanderson de Oliveira Leite, Usuário Externo**, em 31/05/2022, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Teixeira Santos Freire, Usuário Externo**, em 31/05/2022, às 19:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Paulo Eustaquio de Faria, Professor do Magistério**



Superior, em 01/06/2022, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Machado Gomes Vieira, Usuário Externo**, em 07/06/2022, às 01:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1464747** e o código CRC **E85BB113**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais essa oportunidade de crescimento e aprendizagem, provendo momentos incríveis em minha vida.

Aos meus pais Ailton e Rosilene e ao meu irmão Breno, por representarem uma sólida base para ter foco, força e fé, e pelos ensinamentos para enfrentar todos os desafios pessoais e profissionais de forma humilde, honesta e responsável.

Aos meus tios, tias, primos e primas, que fazem da minha trajetória um ambiente mais rico, com momentos alternados de lazer e de aprendizado.

À Laísa Triginelli, pelos incondicionais e profundos sentimentos de amor e respeito, que me apoiaram em todas as decisões de forma calorosa e sincera, e pelas referências de cunho intelectual e moral, que me incentivam a melhorar diariamente como ser humano.

A todos os meus amigos, por estarem sempre ao meu lado.

Ao professor e orientador Juan Carlos Campos Rubio, pelo suporte técnico e por ter acreditado em meu potencial durante o curso, influenciando direta e positivamente na minha motivação em superar os desafios encontrados. Ao professor coorientador Frederico de Castro Magalhães, pelo auxílio técnico durante a produção da tese, principalmente nos estudos referentes às análises numéricas.

Aos professores Túlio Hallak Panzera e Rodrigo Teixeira Santos Freire, e também aos demais colaboradores do laboratório do Centro de Inovação e Tecnologia em Compósitos (CITeC), da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), pelo auxílio técnico na realização dos testes mecânicos.

Aos parceiros do mestrado e do doutorado da engenharia mecânica da UFMG, que sempre me auxiliaram na utilização das máquinas e dos equipamentos. Agradecimentos especiais ao

parceiros Aluizio Júnior, Rômulo Maziero e Augusto Moura, pelo admirável sentimento de empatia.

À CAPES, pelo auxílio financeiro durante o curso.

“Sonho que se sonha só, é só um sonho que se sonha só, mas sonho que se sonha junto
é realidade” (Raul Seixas, 1974)

RESUMO

O uso da manufatura aditiva tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de novas estruturas. Isso tem permitido boa relação entre peso e rigidez e alta capacidade de absorção de energia aos materiais estruturais do tipo painel sanduíche, por meio do uso de diferentes formatos celulares de núcleo. Dentro desse contexto, o comportamento mecânico dos painéis sanduíches sob eventos dinâmicos é de grande interesse para diversos setores industriais, o que incentiva também o desenvolvimento de novas formas de monitoramento de integridade estrutural (MIE). Este estudo apresenta o desenvolvimento e a caracterização mecânica de novos painéis sanduíches, com faces de liga de alumínio e núcleos poliméricos fabricados via processo de impressão tridimensional (3D) com PLA (painéis PLAAL) e ABS (painéis ABSAL). O método de impressão por deposição fundida (FDM) foi usado para a produção dos núcleos poliméricos. Quatro tipos de núcleos poliméricos foram investigados: núcleo sólido, *honeycomb* horizontal, corrugado com células em S e *honeycomb* vertical. Os painéis sanduíches PLAAL e ABSAL foram produzidos por compactação a frio, usando adesivo epóxi RenLam® M e chapas tratadas de liga de alumínio 2024-T3. Os painéis foram submetidos a ensaios de flexão, ensaios de impacto Charpy e ensaios balísticos. Para a predição do comportamento dos painéis sob impacto balístico, uma análise experimental, validada numericamente, foi realizada com uma nova plataforma de MIE com sensores piezoelétricos. Os painéis sanduíches PLAAL com núcleos *honeycomb* vertical apresentaram os maiores valores médios para módulo de elasticidade na flexão (18,5 GPa) e resistência à flexão (138 MPa). Por outro lado, os painéis ABSAL com núcleo corrugado em S tiveram maior energia absorvida no impacto Charpy (12,8 J). A análise numérica do impacto balístico mostrou uma maior absorção de energia pelos painéis ABSAL. As simulações foram validadas após a realização experimental, verificando uma alta absorção de energia pelo núcleo *honeycomb* vertical, com fraturas concentradas na região próxima ao impacto, e também uma boa resistência ao impacto pelos painéis ABSAL com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S. Os estudos realizados mostraram que o processo desenvolvido é uma técnica flexível de manufatura para os novos painéis sanduíches, que exibiram propriedades mecânicas superiores ou similares a outros materiais usados na engenharia estrutural.

Palavras-chave: Painéis sanduíches. Manufatura aditiva. Ensaio balísticos. Monitoramento da Integridade Estrutural. Sensores piezoelétricos.

ABSTRACT

The use of additive manufacturing has contributed significantly to the development of new structures. This has allowed high stiffness-to-weight ratio and high energy absorption capacity for sandwich panels, through the use of different cellular core shapes. Within this context, the mechanical behavior of sandwich panels under dynamic events has interested several industrial sectors, which also encourages the development of new models of structural health monitoring (SHM). This study presents the development and mechanical characterization of new sandwich panels, with aluminum alloy sheets and polymeric cores manufactured by a three-dimensional (3D) printing process with PLA (PLAAL panels) and ABS (ABSAL panels). The fused deposition modeling (FDM) method was used for the production of the polymeric cores. Four types of polymeric cores were investigated: solid core, horizontal honeycomb, S-Shape corrugated and vertical honeycomb. PLAAL and ABSAL sandwich panels were produced by cold pressing process, using RenLam® M epoxy adhesive and treated 2024-T3 aluminum alloy sheets. The panels were subjected to bending tests, Charpy impact tests and ballistic tests. To predict the behavior of the panels under ballistic impact, an experimental analysis was numerically validated and performed with a new SHM platform with piezoelectric sensors. PLAAL sandwich panels with vertical honeycomb cores showed the highest mean values for flexural modulus (18.5 GPa) and flexural strength (138 MPa). On the other hand, ABSAL panels with S-Shape corrugated core had higher energy absorbed in the Charpy impact (12.8 J). Numerical analysis of ballistic impact showed greater energy absorption by ABSAL panels. The simulations were validated after the experimental tests, verifying a high energy absorption by the vertical honeycomb core, with concentrated fractures in the region close to the impact, and good impact resistance by ABSAL panels with horizontal honeycomb and S-Shape corrugated cores. The study showed that the process developed is a flexible manufacturing technique for the new sandwich panels, which exhibited superior or similar mechanical properties to other materials used in structural engineering.

Keywords: Sandwich panels. Additive manufacturing. Ballistic tests. Structural Health Monitoring. Piezoelectric sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Configuração típica de uma construção em sanduíche	29
Figura 2.2 – Modos de falhas em painéis sanduíches sob cargas de impacto	30
Figura 2.3 - Laminado Metal-Fibra: exemplo de configuração de compósito multicamadas de fibra/resina/metal do tipo (3/2 lay up)	31
Figura 2.4 – Estrutura química do epóxi: (a) grupo epóxi e (b) resina comercial DGEBA	32
Figura 2.5 – Mecanismo de reforço da resistência ao cisalhamento interlaminar de um FML com lâminas tratadas de alumínio e resina epóxi com fibras de vidro e nanotubos de carbono	34
Figura 2.6 – Compósitos sanduíches com (a) lâminas de liga de alumínio 2024-T3, (b) lâminas de liga de alumínio 2024-T3 e de titânio (Ti-6Al-4V) e (c) faces de liga de alumínio 2024-T3 com núcleo termoplástico de PEEK	35
Figura 2.7 – Simulação numérica do processo de impacto a 380 m/s nos compósitos multicamadas com (a) lâminas de liga de alumínio 2024-T3, (b) lâminas de liga de alumínio 2024-T3 e de titânio (Ti-6Al-4V) e (c) faces de liga de alumínio 2024-T3 com núcleo termoplástico de PEEK.....	36
Figura 2.8 - Processo de manufatura tradicional para estruturas <i>honeycomb</i> metálicas: (a) processo por expansão e (b) processo por conformação para a obtenção de chapas corrugadas.....	37
Figura 2.9 - Padrões celulares típicos em <i>honeycomb</i> : (a) hexagonais, (b) triangulares, (c) quadráticos e (d) circulares	38
Figura 2.10 – Núcleos corrugados com diferentes geometrias celulares, analisados sob cargas de impacto em simulações numéricas	39
Figura 2.11 – Estruturas auxéticas em 2D e 3D: (a) instabilidades por tensões compressivas em estruturas 2D e (b) Redes celulares em 3D com coeficiente de Poisson positivo, quase nulo e negativo, respectivamente, sob tensão de tração.	40
Figura 2.12 – Estrutura <i>honeycomb</i> auxética com coeficiente de Poisson negativo: (a) configuração em <i>honeycomb</i> com células reentrantes em 2D, (b) estrutura em 3D com células reentrantes e (c) célula unitária.....	41

Figura 2.13 – Comportamento mecânico de estruturas auxéticas com células re-entrantes e perfuração em formato de borboleta: (a) registros fotográficos do ensaio experimental e (b) predição numérica usando o critério de falha de von Mises.....	41
Figura 2.14 – Manufatura aditiva pelo método de FDM	43
Figura 2.15 – Estrutura química do ABS e do PLA: (a) monômeros utilizados na produção do ABS, (b) estrutura química do ABS e (c) estrutura química do PLA	44
Figura 2.16 – Ângulo Raster para a deposição das camadas poliméricas, no método de FDM, em relação ao eixo x	44
Figura 2.17 – Unidades celulares para a criação de metamateriais: (a) octeto em treliças, (b) kelvin, (c) octaedro e (d) dodecaedro	46
Figura 2.18 – Metasanduíches impressos em 3D: (a) Curvas de força por deslocamento obtidas em ensaios de flexão, considerando densidades relativas de núcleo de 30% e 50%, (b) modo de falha visualizado experimentalmente (densidade relativa de 30%) e (c) simulações numéricas para análise da concentração da tensão sob esses ensaios.....	47
Figura 2.19 – Unidades celulares baseadas em origami (ângulo de dobramento θ).....	47
Figura 2.20 – Vista isométrica dos modelos inspirados em origami: (a) padrão triangular e (b) padrão retangular	48
Figura 2.21 – Ensaio de compressão dos cubos de PLA com núcleo uniforme e massa de 80,1 g (CP1 – “a”), núcleo não-uniforme e massa de 49,4 g (CP2 – “b”) e núcleo <i>honeycomb</i> e massa de 26,8 g (CP3 – “c”).	49
Figura 2.22 – Configurações dos metamateriais de células hexagonais de PLA sob cargas axiais (a, c) e transversais (b, d) em tração (a, b) e compressão (c, d), considerando um aumento progressivo nas deformações (0% em preto, 3% em azul, 9% em verde, 18% em roxo e 30% em vermelho.	50
Figura 2.23 – Evolução de danos em materiais compósitos laminados, sob fadiga, e sua relação com a vida útil do material	52
Figura 2.24 – Exemplos de sensores para o MIE (a) integrados na estrutura e (b) fixados na parte externa.	53
Figura 2.25 – O sistema de medição: uma abordagem geral.....	54
Figura 2.26 – Aumento da condutividade elétrica em compósitos de matriz éster-vinílica com a adição de nanoplaquetas de grafeno	56
Figura 2.27 - Piezoelectricidade: efeito (a) direito e (b) inverso.....	58

Figura 2.28 – O MIE e suas etapas: (1) ocorrência de falha na estrutura, (2) obtenção de sinais, (3) condicionamento e filtragem dos sinais, (4) identificação e análise do dano e (5) tomada de decisão	60
Figura 2.29 – Técnicas de NDT para uso externo em MIE.....	63
Figura 2.30 – Radiografias com o uso de corante penetrante em compósitos de epóxi e fibras de carbono, denotando trincas (riscos denotados pelas setas vermelhas) com o aumento da taxa de deformação.....	64
Figura 2.31 - Distribuição de amplitude de sinais obtidos por emissão acústica em ensaios de flexão de compósitos laminados (a) sem sensor integrado e (b) com sensor integrado	65
Figura 2.32 – Uso de termografia em compósitos com orifício elíptico central	66
Figura 2.33 – Uso de acelerômetros piezoelétricos na Torre da Basílica de San Pietro, Perugia, Itália: (a) fotografia da torre, (b) posição dos acelerômetros (A1, A2 e A3), na altura de 40,8 m e (c) visão da seção transversal da torre	69
Figura 2.34 – Impacto de um bando de pássaros na região frontal de um avião.....	70
Figura 2.35 – Influência da ponta do impactador no modo de falha do material sob impacto: impactadores do tipo (a) cilíndrico com ponta plana, (b) cilíndrico com ponta semiesférica e (c) paralelepípedo com ponta plana, e (d) formas de propagação de trincas resultantes da variação da ponta do impactador.....	73
Figura 2.36 – Configuração típica de uma plataforma de ensaios balísticos	75
Figura 2.37 – (a) Análise da área de dano (S_d) provocada pelo projétil de alumínio nos compósitos e (b) mapa do deslocamento por tempo no compósito com epóxi reforçado com fibras de carbono, no impacto com projétil gelatinoso a 100 m/s.	76
Figura 2.38 – Processo de penetração balístico de um projétil esférico ao longo do tempo, feita por meio de simulação numérica	78
Figura 3.1 - Configurações de núcleo investigadas para os painéis sanduíches.....	80
Figura 3.2 – Resumo dos ensaios mecânicos realizados no estudo, para a compreensão do comportamento mecânico dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL.....	82
Figura 3.3 – Dimensões das unidades celulares dos núcleos poliméricos impressos em 3D: (a) <i>honeycomb</i> horizontal, (b) corrugado com células em S e (c) <i>honeycomb</i> vertical	84
Figura 3.4 – Impressora 3D Rapman 3.1	85
Figura 3.5 – Dimensões dos corpos de prova para a realização de (a) testes de tração (Tipo I), conforme a norma ASTM D638-14 e de (b) flexão em três pontos, conforme a norma ASTM D790-15 (unidade: mm)	87

Figura 3.6 – Área da seção transversal na região útil, nos corpos de prova de tração dos núcleos em (a) <i>honeycomb</i> horizontal, (b) corrugado com células em S e (c) <i>honeycomb</i> vertical	88
Figura 3.7 – Modelo esquemático dos ensaios de flexão em três pontos com os núcleos poliméricos impressos em 3D, conforme a norma ASTM D790-15.....	89
Figura 3.8 – Ensaios de impacto Charpy com os núcleos poliméricos impressos em 3D: direção de teste de impacto do pêndulo	90
Figura 3.9 – Processo de manufatura dos painéis sanduíches: (a) uso da técnica de FDM para a produção dos núcleos poliméricos e (b) compactação a frio para a obtenção dos painéis sanduíches.....	91
Figura 3.10 – Condições de contorno para a simulação numérica dos ensaios balísticos dos painéis sanduíches (onde V é a velocidade linear e R é a velocidade rotacional).....	95
Figura 3.11 – Plataforma de ensaios balísticos: (a) figura esquemática de projeto e (b) estrutura física com (1) ar comprimido (pressão de 7 bar), (2) medidor de velocidade, (3) posicionamento do corpos de prova, (4) filtro de condicionamento dos sinais e (5) obtenção da sinal pelo osciloscópio	98
Figura 3.12 – Impactador de aço inoxidável AISI 304: (a) modelo geométrico e (b) ponta semiesférica do projétil	99
Figura 3.13 – Configuração das quatro pastilhas piezoelétricas na face dos painéis sanduíches: (a) PZTs, (b) ligação em série e (c) fixação nos painéis.....	100
Figura 4.1 – Ensaios de tração da liga de alumínio 2024-T3: (a) Curvas de tensão por deformação e (b) região de fratura	103
Figura 4.2 – Microscopia óptica da liga de alumínio 2024-T3: (a) material antes do tratamento, (b) e (c) região de transição entre porção de material não tratada e a porção de material tratada com abrasivo e (d) material completamente tratado.....	104
Figura 4.3 – Amplitude da rugosidade na superfície da lâmina de alumínio 2024-T3 não tratada e tratada (análise feita conforme a norma ISO 4288-96).....	105
Figura 4.4 – Ensaios mecânicos do epóxi: (a) curvas de tensão por deformação, obtidas nos ensaios de tração e (b) curvas de força por deslocamento, obtidas nos ensaios de flexão.	106
Figura 4.5 – Ensaios de tração: curvas de tensão por deformação do (a) PLA e do (b) ABS	107
Figura 4.6 – Núcleos poliméricos impressos em 3D, com padrões celulares de preenchimento: (a) núcleo <i>honeycomb</i> horizontal, (b) núcleo corrugado com células em S e (c) núcleo <i>honeycomb</i> vertical (material de filamento: PLA)	108

Figura 4.7 – Curvas de tensão por deformação dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D obtidas nos ensaios de tração: (a) <i>honeycomb</i> horizontal, (b) corrugado em S e (c) <i>honeycomb</i> vertical.....	111
Figura 4.8 – Região de fratura dos núcleos poliméricos celulares nos ensaios de tração: (a) e (b) <i>honeycomb</i> horizontal, (c) e (d) corrugado em S, (e) e (f) <i>honeycomb</i> vertical	113
Figura 4.9 – Curvas de força por deslocamento dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D, obtidas nos ensaios de flexão: (a) <i>honeycomb</i> horizontal, (b) corrugado em S e (c) <i>honeycomb</i> vertical.....	115
Figura 4.10 – Região de fratura dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D nos ensaios de flexão: (a) e (b) <i>honeycomb</i> horizontal, (c) e (d) corrugado em S, (e) e (f) <i>honeycomb</i> vertical	116
Figura 4.11 – Energia absorvida ao impacto Charpy dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	118
Figura 4.12 – Região de fratura dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D nos ensaios de impacto Charpy: (a) <i>honeycomb</i> horizontal, (b) corrugado em S e (c) <i>honeycomb</i> vertical	119
Figura 4.13 – Curvas de força por deslocamento dos painéis sanduíches PLAAL com núcleo (a) sólido, (b) <i>honeycomb</i> horizontal, (c) corrugado com células em forma de S e (d) núcleo <i>honeycomb</i> vertical.....	123
Figura 4.14 – Curvas de força por deslocamento dos painéis sanduíches ABSAL com núcleo (a) sólido, (b) <i>honeycomb</i> horizontal, (c) corrugado com células em forma de S e (d) núcleo <i>honeycomb</i> vertical	124
Figura 4.15 – Modos de falha nos ensaios de flexão dos painéis sanduíches PLAAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em <i>honeycomb</i> horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em <i>honeycomb</i> vertical.....	125
Figura 4.16 – Modos de falha nos ensaios de flexão dos painéis sanduíches ABSAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em <i>honeycomb</i> horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em <i>honeycomb</i> vertical.....	127
Figura 4.17 – Energia média absorvida pelos painéis sanduíches nos ensaios de impacto Charpy, considerando cada condição experimental	128
Figura 4.18 – Modos de falha nos ensaios de impacto Charpy dos painéis sanduíches PLAAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em <i>honeycomb</i> horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em <i>honeycomb</i> vertical	129

Figura 4.19 – Modos de falha nos ensaios de impacto Charpy dos painéis sanduíches ABSAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em <i>honeycomb</i> horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em <i>honeycomb</i> vertical	130
Figura 4.20 – Energia absorvida pelos núcleos poliméricos no impacto balístico dos painéis PLAAL e ABSAL, obtida nas simulações numéricas: núcleos de PLA em (a), (c), (e) e (g) e núcleos de ABS em (b), (d), (f) e (h).....	132
Figura 4.21 – Percentual de energia absorvida pelos painéis PLAAL e ABSAL, na simulação numérica dos ensaios balísticos.....	133
Figura 4.22 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos sólidos produzidos com (a) PLA e (b) ABS	134
Figura 4.23 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos em <i>honeycomb</i> horizontal produzidos com (a) PLA e (b) ABS	135
Figura 4.24 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos corrugados em S produzidos com (a) PLA e (b) ABS.....	135
Figura 4.25 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos em <i>honeycomb</i> vertical produzidos com (a) PLA e (b) ABS.....	136
Figura 4.26 – Formato geométrico da fratura nos núcleos sólidos produzidos com (a) PLA e (b) ABS	136
Figura 4.27 – Formato geométrico da fratura nos núcleos em <i>honeycomb</i> horizontal produzidos com (a) PLA e (b) ABS	138
Figura 4.28 – Formato geométrico da fratura nos núcleos corrugados em S produzidos com (a) PLA e (b) ABS	138
Figura 4.29 – Formato geométrico da fratura nos núcleos em <i>honeycomb</i> vertical produzidos com (a) PLA e (b) ABS	139
Figura 4.30 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos sólidos produzidos com (a) PLA e (b) ABS.....	140
Figura 4.31 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos em <i>honeycomb</i> horizontal produzidos com (a) PLA e (b) ABS.....	141
Figura 4.32 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos corrugados em S produzidos com (a) PLA e (b) ABS	141
Figura 4.33 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos em <i>honeycomb</i> vertical produzidos com (a) PLA e (b) ABS	142
Figura 4.34 – Gráfico de intervalo para análise da área absoluta média do sinal elétrico nos impactos balísticos (intervalos baseados no desvio-padrão).	146

Figura 4.35 – Comportamento típico dos sinais obtidos nos ensaios de impacto balísticos dos painéis sanduíches PLAAL com núcleo (a, b) sólido, (c, d) <i>honeycomb</i> horizontal, (e, f) corrugado em S e (g, h) <i>honeycomb</i> vertical..	148
Figura 4.36 – Comportamento típico dos sinais obtidos nos ensaios de impacto balísticos dos painéis sanduíches ABSAL com núcleo (a, b) sólido, (c, d) <i>honeycomb</i> horizontal, (e, f) corrugado em S e (g, h) <i>honeycomb</i> vertical	149
Figura 4.37 – Região de deformação plástica causada pelo projétil na face dos painéis sanduíches (a) PLAAL e (b) ABSAL.....	151
Figura 4.38 – Modos de falha dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL nos ensaios balísticos (visão lateral)	152
Figura 4.39 Modos de falha dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL nos ensaios balísticos (visão da face do núcleo polimérico oposta ao impacto)	153
Figura 4.40 – Comparação do comportamento sob tração do corpo de prova de PLA impresso em 3D com preenchimento em 45° e com núcleos poliméricos celulares	156
Figura 4.41 – Comparação do comportamento sob flexão entre os núcleos poliméricos celulares de PLA impressos em 3D sem lâminas metálicas e os painéis sanduíches PLAAL, com faces de liga de alumínio 2024-T3.....	158
Figura 4.42 – Comparação das propriedades mecânicas específicas (por massa) dos painéis sanduíche PLAAL e ABSAL: (a) módulo de elasticidade específico por massa (GPa/kg) e (b) resistência à flexão específica por massa (MPa/kg).	159
Figura 4.43 – Comparação das propriedades mecânicas específicas (por massa) dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL: energia absorvida no impacto Charpy (J/kg).	160
Figura 4.44 – Resumo das curvas do sinal de tensão elétrica em amplitude por tempo dos testes balísticos	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Planejamento fatorial completo 2^{14^1}	81
Tabela 3.2 - Propriedades dos materiais do estudo	83
Tabela 3.3 – Parâmetros de impressão 3D dos núcleos poliméricos.....	85
Tabela 3.4 - Dados das malhas geradas no aplicativo numérico	96
Tabela 4.1 - Ensaio de tração da liga de alumínio 2024-T3	102
Tabela 4.2 - Ensaio de tração e flexão dos corpos de prova de epóxi	105
Tabela 4.3 - Ensaio de tração do PLA e do ABS com preenchimento Raster alternado (45°)	107
Tabela 4.4 - ANOVA dos testes mecânicos dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	109
Tabela 4.5 – Resultados dos testes de diferenças de médias, pelo método de Tukey e 95% de confiança.....	110
Tabela 4.6 - Ensaio de tração dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	110
Tabela 4.7 - Ensaio de flexão dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	114
Tabela 4.8 – ANOVA dos resultados dos testes mecânicos dos painéis sanduíches	120
Tabela 4.9 - Resultados dos testes de diferenças de médias nos ensaios dos painéis sanduíches, pelo método de Tukey e 95% de confiança.....	121
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de flexão em três pontos dos painéis sanduíches	122
Tabela 4.11 – Resultado da medição da energia obtida nos testes de impacto	144
Tabela 4.12 – Cálculo da razão entre as medições de força de reação (estudo numérico) e de tensão elétrica (estudo experimental) dos testes de impacto	145
Tabela 4.13 – Resumo dos resultados dos testes mecânicos dos componentes dos painéis sanduíches.....	155
Tabela 4.14 – Resumo dos resultados dos testes mecânicos dos painéis sanduíches.....	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CID	Correlação de imagem digital
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEF	Método dos elementos finitos
MIE	Monitoramento da integridade estrutural
NDT	Ensaio não destrutivo
NTC	Nanotubos de carbono
PEEK	Poli(éter-éter-cetona)
PLA	Poli(ácido láctico)
PVC	Poli(cloreto de vinila)
PVDF	Poli(flúoreto de vinilideno)
PVDF-TrFE	Poli(flúoreto de vinilideno-trifluoroetileno)
PU	Poliuretano
PZT	Titanato de zirconato de chumbo

LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ABSAL_CEL_S	Painel sanduíche com núcleo polimérico de ABS impresso em 3D estruturado em células em forma de S e faces de liga de alumínio 2024-T3
ABSAL_HC_HORIZ	Painel sanduíche com núcleo polimérico de ABS impresso em 3D estruturado em <i>honeycomb</i> hexagonal horizontal e faces de liga de alumínio 2024-T3
ABSAL_HC_VERT	Painel sanduíche com núcleo polimérico de ABS impresso em 3D estruturado em <i>honeycomb</i> hexagonal vertical e faces de liga de alumínio 2024-T3
ABSAL_RASTER45	Painel sanduíche com núcleo polimérico de ABS impresso em 3D com núcleo sólido (preenchimento Raster alternado em 45°) e faces de liga de alumínio 2024-T3
ABSAL	Painel sanduíche com núcleo polimérico de ABS impresso em 3D com faces de liga de alumínio 2024-T3
CEL_S	Núcleo polimérico impresso em 3D, corrugado com células em forma de S
HC_HORIZ	Núcleo polimérico impresso em 3D, estruturado em <i>honeycomb</i> hexagonal horizontal
HC_VERT	Núcleo polimérico impresso em 3D, estruturado em <i>honeycomb</i> hexagonal vertical
PLAAL_CEL_S	Painel sanduíche com núcleo polimérico de PLA impresso em 3D estruturado em células em forma de S e faces de liga de alumínio 2024-T3
PLAAL_HC_HORIZ	Painel sanduíche com núcleo polimérico de PLA impresso em 3D estruturado em <i>honeycomb</i> hexagonal horizontal e faces de liga de alumínio 2024-T3
PLAAL_HC_VERT	Painel sanduíche com núcleo polimérico de PLA impresso em 3D estruturado em <i>honeycomb</i> hexagonal vertical e faces de liga de alumínio 2024-T3

PLAAL_RASTER45	Painel sanduíche com núcleo polimérico de PLA impresso em 3D com núcleo sólido (preenchimento Raster alternado em 45°) e faces de liga de alumínio 2024-T3
PLAAL	Painel sanduíche com núcleo polimérico de PLA impresso em 3D com faces de liga de alumínio 2024-T3
a_1^2	Quadrado do expoente inteiro da grandeza massa
a_2^2	Quadrado do expoente inteiro da grandeza velocidade
ε	Deformação final na tração
σ_f	Tensão máxima na flexão
σ_l	Tensão na face sob flexão
σ_t	Tensão máxima na tração
EA	Percentual de energia absorvida
E_{abs}	Energia absorvida pelo núcleo polimérico
E_c	Energia absorvida ao impacto Charpy
E_f	Módulo de elasticidade na flexão
$E_{máx}$	Energia máxima de impacto
E_t	Módulo de elasticidade na tração
F_s^{ult}	Resistência máxima de cisalhamento no núcleo do painel sanduíche
$u(E_{cp})$	Incerteza-padrão combinada
$u(m)$	Incerteza-padrão relativa à grandeza massa
$u(v)$	Incerteza-padrão relativa à grandeza velocidade
R_a	Parâmetro de rugosidade: desvio aritmético médio
R_z	Parâmetro de rugosidade: soma da altura máxima de pico e da maior profundidade de vale da amostra
R_t	Parâmetro de rugosidade: soma da altura máxima de pico e da maior profundidade de vale da avaliação
R_p	Parâmetro de rugosidade: altura máxima de pico

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	18
LISTA DE NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS	19
1. INTRODUÇÃO	24
1.1 Justificativa	25
1.2 Objetivos	27
1.2.1 Objetivo geral	27
1.2.2 Objetivos específicos.....	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 Painéis sanduíches	29
2.1.1 Compósitos laminados metal/fibra	31
2.1.2 Laminados com núcleos poliméricos.....	35
2.1.3 Compósitos com núcleos celulares.....	37
2.2 Manufatura aditiva	43
2.2.1 O método de FDM.....	43
2.2.2 Manufatura aditiva aplicada a metamateriais mecânicos	46
2.3 Avaliação da integridade estrutural	52
2.3.1 Sistemas de medição no monitoramento de integridade estrutural	55
2.3.2 Aplicação dos sistemas de monitoramento de integridade estrutural na engenharia.....	61
2.3.2.1 Testes radiográficos.....	64
2.3.2.2 Testes eletromagnéticos	65

2.3.2.3 Testes por emissão acústica (AE).....	65
2.3.2.4 Testes de termografia por infravermelho (IRT)	67
2.3.2.5 Testes ópticos	67
2.3.2.6 Testes ultrassônicos (US)	68
2.3.2.7 Testes acústicos e ultrassônicos (A-US).....	68
2.3.2.8 Testes elétricos	69
2.3.2.9 Testes de vibração	70
2.3.3 Análise do efeito do impacto em estruturas.....	71
3. METODOLOGIA	81
3.1 Condições experimentais do estudo	81
3.2 Materiais	83
3.3 Processo de fabricação dos núcleos poliméricos impressos em 3D	84
3.4 Preparação e análise das superfícies das lâminas de liga de alumínio 2024-T3	87
3.5 Caracterização das lâminas de liga de alumínio	87
3.6 Caracterização do adesivo epóxi.....	87
3.7 Caracterização do PLA e do ABS.....	88
3.8 Caracterização dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D.....	89
3.9 Processo de fabricação dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL	91
3.10 Caracterização dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL.....	93
3.10.1 Ensaio de flexão em três pontos dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL.....	94
3.10.2 Ensaio de impacto Charpy nos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL	95
3.10.3 Ensaio de impacto balísticos nos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL	95
3.10.3.1 Análise numérica: uso do método dos elementos finitos	95
3.10.3.2 Estudo experimental: desenvolvimento da instrumentação para o MIE.....	97
3.10.3.3 Avaliação da integridade estrutural e ensaios de impacto balísticos	102
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	103
4.1 Caracterização mecânica dos materiais constituintes dos painéis sanduíches	103
4.1.1 Ensaio de tração e análise da rugosidade superficial na liga de alumínio.....	103

4.1.2 Ensaio de tração e flexão em três pontos no epóxi	106
4.1.3 Ensaio de tração no PLA e no ABS	107
4.2 Caracterização mecânica dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	109
4.2.1 Avaliação geral sobre a impressão em 3D dos núcleos poliméricos celulares	109
4.2.2 Resultados dos ensaios de tração dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	111
4.2.3 Resultados dos ensaios de flexão dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	115
4.2.4.. Resultados dos ensaios de impacto Charpy dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D	118
4.3 Caracterização mecânica dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL	120
4.3.1 Resultados dos ensaios de flexão dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL.....	122
4.3.2 Ensaio de impacto Charpy dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL	129
4.3.3 Ensaio balístico dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL.....	131
4.3.3.1 Análise numérica dos ensaios balísticos.....	131
4.3.3.2 Análise geral sobre o sistema de monitoramento de integridade estrutural para o estudo experimental	143
4.3.3.3 Estudo experimental dos ensaios balísticos	146
4.4 Análise comparativa dos resultados	155
5. CONCLUSÕES	164
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
REFERÊNCIAS	167
APÊNDICE A – TABELAS COM OS VALORES OBTIDOS NOS TESTES MECÂNICOS DO ESTUDO	182

1. INTRODUÇÃO

O constante aumento da competitividade no mercado industrial tem exigido dos processos de manufatura altos níveis de qualidade e confiabilidade, com o objetivo de agregar valor ao produto e fortalecer o relacionamento com o cliente, em uma perspectiva estratégica.

Para a obtenção de um desempenho satisfatório de um produto manufaturado, torna-se imprescindível o correto monitoramento de sua funcionalidade, durante o seu tempo de serviço. Considerando o contexto dos materiais estruturais, um monitoramento da integridade durante seu serviço garante o conhecimento sobre suas reais condições, em termos da capacidade de atendimento à aplicação desejada, o que pode evitar perdas prematuras de componentes, prejuízos financeiros e danos indesejáveis aos usuários envolvidos.

Por esse motivo, o estudo do monitoramento da integridade de estruturas (Monitoramento da Integridade Estrutural – MIE, do inglês *Structural Health Monitoring - SHM*) têm se apresentado como uma técnica promissora em diversos segmentos industriais, por meio de diferentes formas de análise. A indústria aeronáutica, por exemplo, tem utilizado de forma pioneira as tecnologias de MIE, uma vez que falhas estruturais em aeronaves são catastróficas tanto em termos de sua funcionalidade (levam a um completo colapso da aeronave) quanto em termos de valor ao cliente (acidentes aéreos são geralmente fatais aos tripulantes e a segurança é um dos principais fatores que o cliente espera nesse serviço) (MEDEIROS *et al.*, 2018). Dentro desse contexto, a capacidade de resistir a cargas ou impactos dinâmicos é uma propriedade de grande interesse para essas estruturas, pois as aeronaves, durante sua operação, ficam expostas a impactos de diferentes intensidades, e a energia dissipada nesses impactos pode danificar seriamente a estrutura sob diferentes modos, comprometendo sua integridade e sua função. Uma ave ou uma pedra possuem pequena massa, porém quando estão em alta velocidade, adquirem uma alta energia cinética, podendo causar sérios danos à estrutura das aeronaves (KABOGLU *et al.*, 2018).

O monitoramento de estruturas também vem sendo investigado em outros segmentos industriais, como nas indústrias química e petroquímica, principalmente em vasos de alta pressão. Salienta-se que o aumento na demanda de novos combustíveis alternativos, como o gás natural comprimido e o hidrogênio, tem incentivado o uso de sensores que possam detectar defeitos estruturais nesses vasos em estágios iniciais (MUNZKE *et al.*, 2019).

Com relação aos materiais utilizados em aplicações estruturais na engenharia, os materiais compósitos tem se destacado nos últimos anos, sobretudo nos setores aeronáuticos e

automotivos. Suas propriedades mecânicas finais, baseadas em fatores como seus materiais constituintes e a interface entre eles, possibilitam seu emprego em situações nas quais materiais tradicionais não podem ser mais considerados viáveis, em termos de custo e eficiência no desempenho. Por outro lado, o surgimento de materiais compósitos avançados, desenvolvidos para serem empregados em condições de serviço altamente severas, como em ambientes com altíssima temperatura e com exposição a ciclos repetitivos de tensão, tem influenciado na aplicação de materiais inteligentes, como por exemplo aqueles com propriedades piezoelétricas e eletromagnéticas, com o objetivo de identificar falhas em operações (YE *et al.*, 2018; LI, Y. *et al.*, 2018).

Novos desenvolvimentos tanto em processos como em materiais relacionados à manufatura aditiva ou impressão 3D tem surgido, permitindo a fabricação de novos produtos com características específicas tanto de geometria quanto de desempenho. Dentre eles, produtos com variação de propriedades entre o núcleo e as faces surgem, como aqueles que dificilmente poderiam ser produzidos por meio dos processos convencionais de manufatura (ZAHARIA *et al.*, 2020). Verifica-se também que o uso da manufatura aditiva tem possibilitado cada vez mais o desenvolvimento de estruturas inteligentes avançadas, como visto na impressão 4D, com materiais impressos com capacidade de mudança de forma e função em resposta à mudanças de condições como temperatura, luz, eletricidade e água (WU *et al.*, 2018).

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo sobre o desenvolvimento e a fabricação de novos painéis com núcleos celulares, fabricados por manufatura aditiva, e faces de liga de alumínio 2024-T3. Investigou-se também a aplicabilidade de uma plataforma de ensaios balísticos com o uso de sensores piezoelétricos, por meio da intensidade da energia absorvida e da integridade estrutural, em substituição às plataformas de maior complexidade tecnológica de fabricação e de operação.

1.1 Justificativa

A manufatura aditiva é adotada em função de sua flexibilidade de produção, que possibilita a fabricação de componentes com geometrias complexas em alta resolução, e oferece uma maior liberdade de criação de novas estruturas, em termos de projeto, que os processos tradicionais de fabricação (YAO *et al.*, 2020).

Por outro lado, as técnicas de monitoramento de integridade estrutural utilizadas nos últimos anos envolvem, em geral, o uso de equipamentos de alta complexidade tecnológica e de numerosos componentes, o que influencia diretamente no preço final de um determinado

produto ou serviço. Sistemas de MIE ativos, como os sistemas baseados em ondas ultrassônicas e em impedância eletromecânica, utilizam fontes contínuas de excitação no monitoramento estrutural, o que pode envolver um número maior de componentes, além de um maior gasto de energia. Por outro lado, o uso de sistemas de MIE passivos pode possibilitar uma redução no número de transdutores embutidos na estrutura, uma menor quantidade de conexões e, conseqüentemente, menor complexidade (WANG *et al.*, 2020).

Como forma de avaliação da absorção de energia, do modo de falha no impacto e da aplicabilidade de um sistema de MIE, o uso de testes de impacto por queda de peso (*drop weight tests*) e de ensaios de impacto Charpy são utilizados no estudo de materiais compósitos, avaliando o efeito de diferentes intensidades de impacto e a integridade estrutural após esses eventos. O teste de queda de peso é caracterizado por gerar eventos a baixas velocidades de impacto (geralmente entre 3 e 8 m/s) com altos níveis de energia, devido à massa do impactante, que geralmente apresenta valores acima de 1 kg (RAJPUT *et al.*, 2018). Os ensaios de impacto Charpy, por sua vez, também são eventos de impacto com baixas velocidades (em geral, entre 2 e 6 m/s). Por outro lado, ensaios balísticos com velocidades altíssimas de impacto (acima de 100 m/s) e impactadores de baixa massa (comumente abaixo de 100 g) também estão presentes na literatura, apresentando estruturas dotadas de câmeras de altíssima velocidade de captação (XIE *et al.*, 2016; SAFRI *et al.*, 2018). Neste contexto, verificam-se poucos estudos na literatura que retratem, de forma experimental e numérica, o comportamento dinâmico de painéis sanduíches com estruturas impressas em 3D, em testes de impacto com níveis intermediários de energia, em comparação aos ensaios tradicionais.

A partir do exposto, a motivação deste estudo consiste no desenvolvimento e na caracterização de novos painéis sanduíches com núcleos impressos em 3D, que possam ser usados em aplicações estruturais e ainda forneçam soluções eficientes em termos de desempenho mecânico para diferentes setores industriais, tais como componentes secundários para a aeronáutica e o automobilismo. Além disso, constata-se a necessidade de desenvolvimento de um sistema que verifique, de forma simples e eficiente, a intensidade de energia absorvida de um painel sanduíche sob cargas dinâmicas, usando níveis intermediários de energia de impacto e velocidades maiores que as avaliadas pelos ensaios de impacto tradicionais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver e caracterizar um novo tipo de painel estrutural, que permita o monitoramento de sua integridade sob eventos provocadores de deformação. Adicionalmente, os referidos painéis sanduíches tem características particulares de absorção de impacto, por meio do uso de núcleos celulares com geometrias especiais, fabricados pelo processo de manufatura aditiva (impressão 3D).

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor uma metodologia de fabricação de painéis sanduíches com núcleo de PLA ou ABS impresso em 3D e faces metálicas de liga de alumínio 2024-T3;
- Avaliar as propriedades mecânicas e o modo de falha dos materiais constituintes dos painéis sanduíches, por meio de ensaios de tração da liga de alumínio 2024-T3, do PLA e do ABS impresso com uso da técnica de FDM, e também de ensaios de tração e flexão em três pontos da resina epóxi;
- Avaliar a influência da geometria celular no comportamento mecânico das estruturas impressas em 3D, por meio de ensaios de tração, flexão em três pontos e impacto Charpy com os núcleos poliméricos de PLA impressos em 3D, considerando três configurações geométricas de núcleo: *honeycomb* hexagonal horizontal, corrugado com células em S e *honeycomb* hexagonal vertical;
- Desenvolver um sistema de MIE passivo baseado em sensores piezoelétricos ligados em série para aplicação em materiais que sejam expostos a cargas dinâmicas;
- Criar e validar uma plataforma de ensaios dinâmicos de impacto para o estudo da integridade estrutural dos painéis sanduíches, com base no sinal gerado pelos sensores piezoelétricos e nos mecanismos de surgimento e de propagação de danos;
- Caracterizar o comportamento mecânico dos painéis sanduíches com os diferentes tipos de núcleo, por meio de ensaios de flexão em três pontos, ensaios de impacto Charpy e ensaios balísticos;

- Realizar uma análise numérica com os painéis sanduíches sob impacto balístico, apresentando uma discussão sobre a energia absorvida, o modo de falha e os fenômenos que explicam a forma de absorção de energia desses materiais sob eventos dinâmicos;
- Validar os resultados numéricos dos ensaios balísticos por meio de ensaios experimentais usando o sistema de MIE desenvolvido, com base nos sensores piezoelétricos;
- Realizar um estudo comparativo sobre as estruturas impressas em 3D e os painéis sanduíches, investigando as relações de rigidez e de resistência por peso, e de energia específica absorvida no impacto, por meio das propriedades mecânicas específicas dos painéis.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Painéis sanduíches

O conceito estrutural do painel sanduíche surgiu em decorrência de análises realizadas em materiais com faces separadas por uma certa distância, sendo discutido inicialmente por Duleau, em 1820. Contudo, aplicações comerciais desse conceito foram introduzidas somente no século seguinte, no período entre a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), em que adesivos estruturais foram amplamente aceitos na Inglaterra e nos Estados Unidos. A aeronave Mosquito, fabricada pela Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial, representou um marco na história das construções em sanduíche, com o uso de núcleo de madeira balsa entre faces folheadas, largamente usado também em meios de transporte marítimo, devido a sua leveza. A partir da década de 1950, outros materiais foram sendo usados como núcleo, como o poli(cloreto de vinila) (PVC) e o poliuretano (PU). Nas últimas décadas, tem-se verificado uma forte tendência na realização de estudos sobre técnicas de colagem e de revestimento, e também sobre o desenvolvimento de núcleos termoplásticos celulares com propriedades orientadas à estrutura do padrão celular (ZENKERT, 1997).

De acordo com a norma ASTM D3878-15 (2015), as construções em sanduíche são caracterizadas como arranjos estruturais que consistem em três ou mais camadas coladas, compostas por diferentes materiais. Geralmente, possuem duas lâminas de material estrutural relativamente finas, dispostas paralelamente, coladas e separadas por um núcleo, mais leve e mais espesso que as faces, que tem a função de estabilizar as faces e transmitir cargas entre elas. Salienta-se que o uso de adesivos efetivos na ligação entre a face e o núcleo é de fundamental importância na obtenção das propriedades mecânicas desejadas para a estrutura final. A Figura 2.1 mostra um exemplo de configuração de uma construção em sanduíche. Diversos tipos de núcleos vêm sendo investigados na literatura, sobretudo aqueles que possibilitam a contenção de cargas por meio da combinação dos materiais constituintes, como no uso de compósitos poliméricos reforçados com fibras, e por meio de geometrias celulares, nos quais se destacam arranjos geométricos celulares em *honeycomb* (estrutura em favos de mel de abelhas) (SARVESTANI *et al.*, 2018a).

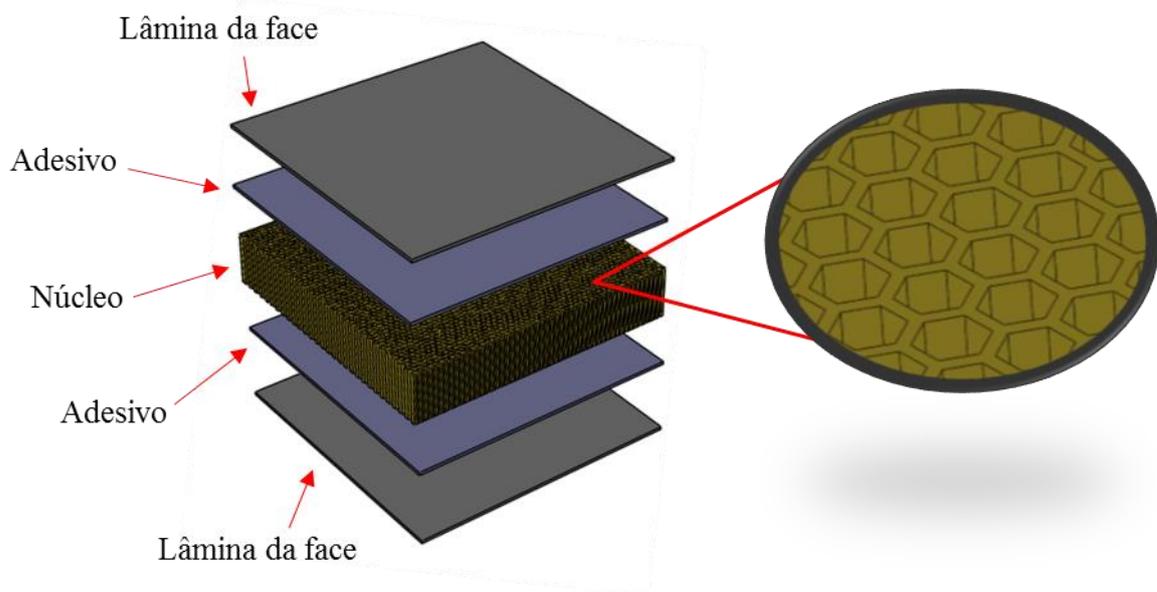


Figura 2.1 – Configuração típica de uma construção em sanduíche.
 Fonte – Adaptado de CALLISTER JR. & RETHWISCH, 2016.

Os painéis sanduíches têm sido utilizados em diversos setores industriais, fornecendo soluções altamente atrativas em termos de peso e rigidez. Nos últimos anos, o desenvolvimento de painéis multifuncionais, combinando propriedades de diferentes naturezas, e materiais com coeficiente de Poisson negativo, que contraem transversalmente quando são axialmente comprimidos, tem ganhado destaque no cenário mundial (LI *et al.*, 2020).

Quando submetidos a uma força de impacto, esses materiais apresentam modos de falhas característicos, como mostra a Figura 2.2. Ruptura nas faces (face impactada e face oposta), esmagamento e cisalhamento do núcleo (deformação plástica e fraturas no núcleo) e delaminações (descolamento entre face e núcleo) são fenômenos de estudo em relação aos mecanismos de absorção de energia desses materiais. Dentre os fatores que influenciam nesses mecanismos, os materiais constituintes e sua interface são amplamente investigados. Xiong *et al.* (2019) afirmam que o núcleo atua principalmente na contenção de cargas de compressão e de cisalhamento e é comumente projetado para minimizar o peso por meio do tipo de material e da distribuição espacial da matéria, preservando a integridade estrutural do painel quando submetido a cargas.

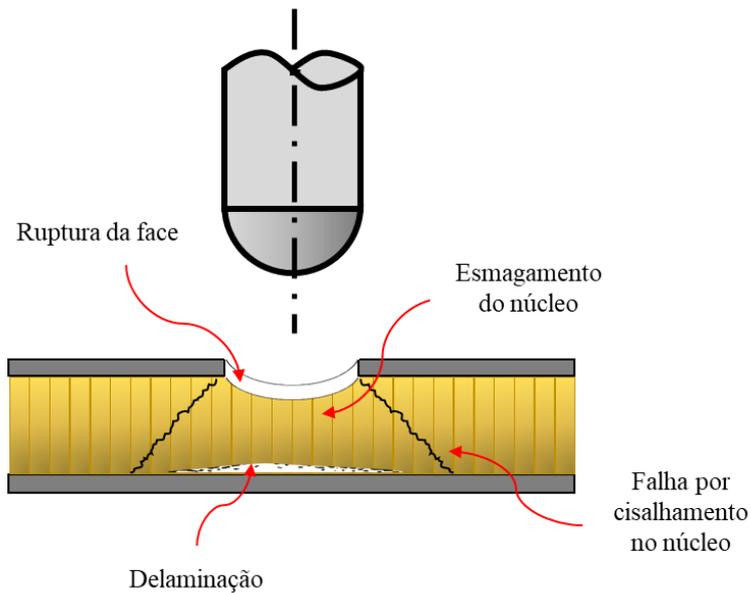


Figura 2.2 - Modos de falhas em painéis sanduíches sob cargas de impacto.
 Fonte – Adaptado de ASTM E 1091-13, 2013.

2.1.1 Compósitos laminados metal/fibra

Constituídos por dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material útil na engenharia, com certas propriedades que os constituintes isoladamente não possuem (ASTM D3878-15, 2015), os materiais compósitos ganharam destaque no cenário industrial do século XX, em substituição a alguns materiais metálicos. A partir de 1960, o interesse em sua produção foi intensificado, devido à possibilidade de combinações de propriedades, respondendo à agressiva necessidade mercadológica de se atender a requisitos de clientes, tanto em termos de qualidade no desempenho quanto na gestão de custos. Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, fibras de carbono e kevlar foram amplamente desenvolvidos a partir de 1960, com aplicações em variados setores industriais, como no automobilismo e na construção civil (CHAWLA, 2012). Nos anos 80 e 90, novas tecnologias foram desenvolvidas e permitiram a criação de compósitos de matriz cerâmica e de matriz metálica, cujas aplicações são verificadas nas indústrias aeroespacial e automobilística. Além disso, nessa mesma época emergiram os primeiros estudos sobre nanocompósitos, que tem contribuído muito, nos últimos anos, para aplicações em componentes na biomedicina e na eletrônica (KUPFER *et al.*, 2015; ASHBY *et al.*, 2012).

Nesse contexto, os compósitos laminados metal-fibra (FML) são estruturas tipo sanduíche constituídas de finas lâminas de ligas metálicas e lâminas de compósitos poliméricos reforçados com fibras, que visam à combinação da alta tenacidade dos metais com a alta

resistência específica dos compósitos poliméricos reforçados com fibras. O potencial desses materiais em termos de propriedades mecânicas é diretamente relacionado com a interface entre os compósitos e os metais (BOON & JOSHI, 2020). Na década de 80, surgiram os primeiros FML que foram de grande interesse da indústria, os laminados com fibras de aramida com resina epóxi e camadas de alumínio (ARALL® – *Aramid Reinforced Aluminum Laminate*) e os laminados com fibras de vidro com resina epóxi e camadas de alumínio (GLARE® - *Glass Reinforced Aluminum Laminate*). Já na década de 90, surgiu o FML com o uso de fibras de carbono, o CARALL (*Carbon Reinforced Aluminum Laminate*), com alta resistência à fadiga mecânica (EL-BAKY & ATTIA, 2020). A Figura 2.3 mostra a típica configuração de um FML com várias camadas de fibra/resina.

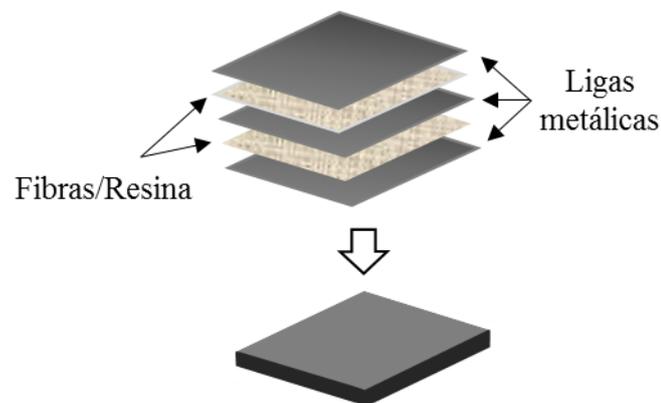


Figura 2.3 - Laminado Metal-Fibra: exemplo de configuração de compósito multicamadas de fibra/resina/metal do tipo (3/2 lay up).

Fonte – Adaptado de VIEIRA, 2018.

O uso de materiais sustentáveis em FML tem sido verificado na literatura nos últimos anos, por meio da substituição das fibras sintéticas de aramida, vidro e carbono, por fibras naturais como linho e sisal, em virtude de propriedades como biodegradabilidade e baixo custo de processamento (MALINGAM *et al.*, 2020). Além disso, o uso de lâminas de compósitos em lugar das lâminas de metal também vem sendo investigado. O trabalho de Al-Hajaj *et al.* (2019) investigou o comportamento de compósitos híbridos com o uso de laminados com fibras de linho (unidirecionais e em *cross-ply 0/90*) e epóxi, compreendidos entre laminados de fibras de carbono tecidas e epóxi em testes de impacto em baixa velocidade (entre 1,5 e 4,3 m/s). Os resultados mostraram modos de falha por delaminação, ruptura de fibras e *pull out* (arrancamento de fibras), e uma maior resistência ao impacto (33%) no caso dos compósitos híbridos com laminados *cross-ply*.

Com relação à adesão interfacial entre as lâminas de compósitos e as lâminas metálicas, diferentes tratamentos abrasivos e químicos têm sido verificados na literatura, garantindo uma ancoragem mecânica ou interações químicas que permitam uma eficiência na transferência de forças entre as lâminas do FML. Nesse contexto, o uso de resina epóxi apresenta vantagens como material adesivo, oferecendo uma combinação de propriedades químicas e mecânicas que permitem uma baixa contração térmica e uma excelente adesão em diversos substratos. É um polímero termofixo que consiste em um anel tricomponente com um átomo de oxigênio em ligação com dois átomos de carbono (Figura 2.4a). Uma das resinas comerciais comumente utilizadas é aquela oriunda da reação de condensação entre a epícloridrina (EPH) e o grupo fenólico do bisfenol A (BPA), chamada diglicidil éter-bisfenol A (DGEBA), cuja estrutura química é apresentada na Figura 2.4b (URIBE, 2017).

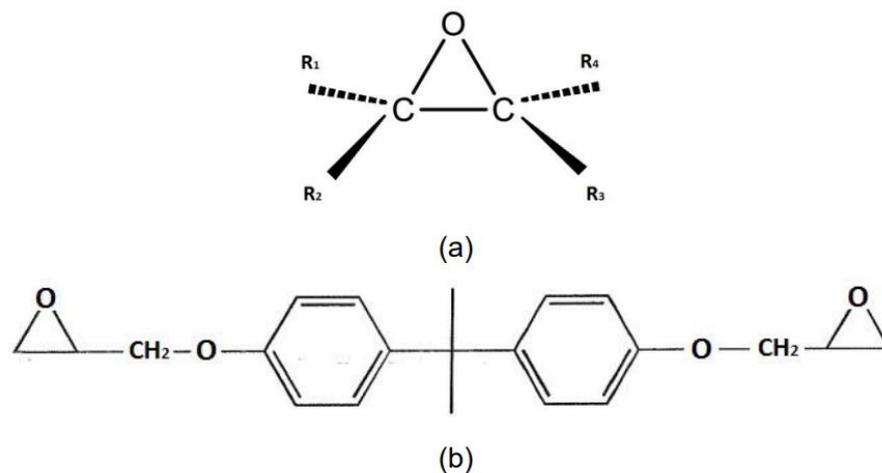


Figura 2.4 - Estrutura química do epóxi: (a) grupo epóxi e (b) resina comercial DGEBA.
Fonte – URIBE, 2017.

Dentre os tratamentos mais comuns em lâminas de alumínio, substratos que possuem boa reatividade para ligações químicas com revestimentos poliméricos, pode-se citar: o uso de água e acetona, para a remoção de impurezas e de gordura; a anodização, que consiste na imersão do metal em um banho de ácido, como o ácido crômico e o ácido sulfúrico; banhos de decapagem, com o uso de soluções alcalinas, baseadas em hidróxido de sódio e ácido nítrico; e tratamentos abrasivos com lixas, que aumentam a área superficial do metal (GONZALEZ-CANCHE *et al.*, 2018). Kaboglu *et al.* (2018) investigaram o comportamento mecânico de FML com lâminas tratadas de ligas de alumínio e lâminas de compósitos com fibras tecidas de vidro e epóxi, com um tratamento nas lâminas metálicas a base de ácido crômico. Os FML com lâminas metálicas tratadas foram comparados a corpos de prova sem o referido tratamento e

mostraram maior rigidez à flexão e menor extensão de área de delaminação em ensaios balísticos, devido ao aumento da adesão interfacial entre os compósitos e as lâminas metálicas. Ameri *et al.* (2021a) desenvolveram compósitos com lâminas de alumínio e lâminas de compósitos com fibras de carbono e epóxi para analisar a vibração livre sob variadas condições experimentais. Os autores realizaram um tratamento nas lâminas metálicas com uma solução de Metil Etil Cetona, água, lixas (granulação 100), hidróxido de sódio (5%, por 10 minutos), novamente água, solução sulfocrômica (por 12 minutos), organosilanos e secagem por 24 horas a 30 °C. O estudo mostrou uma combinação de variados tratamentos para os substratos metálicos de FML, o que tem sido uma premissa importante para aplicações avançadas desses materiais. Salienta-se que os danos causados à saúde humana e ao meio ambiente, no manuseio e no descarte dos produtos químicos, têm sido debatidos na literatura e, por esse motivo, tratamentos mais simples e ambientalmente amigáveis, sem o uso de ácidos, também vem sendo investigados (GONZALEZ-CANCHE *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Com relação aos principais modos de falhas dos FML, cita-se a delaminação, decorrente de falhas interlaminares que reduzem a capacidade de transferência de cargas da estrutura (BOON & JOSHI, 2020). Nesse contexto, o uso de nanopartículas como reforço de resinas vem sendo estudado, a fim de melhorar a resistência ao descascamento (*peeling*) e ao cisalhamento interlaminar desses materiais. Khurram *et al.* (2018) investigaram o uso de nanotubos de carbono de paredes múltiplas, funcionalizados com amina, em matriz epóxi para uso em FML com fibras de vidro e lâminas tratadas de liga de alumínio 2024-T3 (com abrasão usando lixa grão 80 e banhos químicos em soluções de NaOH e ácido crômico, respectivamente), para fortalecer a ligação entre a fibra e a lâmina de alumínio e aumentar a tenacidade à fratura. Foram usados ensaios de cisalhamento em juntas simples, considerando frações mássicas de nanotubos de carbono variando entre 1 e 3%. O uso de infusão a vácuo para a ligação das juntas, combinado a uma concentração de 2% de nanotubos de carbono na resina epóxi, resultou em um aumento de 37% na resistência ao cisalhamento interlaminar das juntas metálicas. O mecanismo de reforço apresentado pelos autores é mostrado na Figura 2.5, em que há um aumento na tenacidade da resina epóxi com a adição dos nanotubos de carbono e um melhor ancoramento mecânico da lâmina polimérica na estrutura porosa das lâminas tratadas de alumínio.

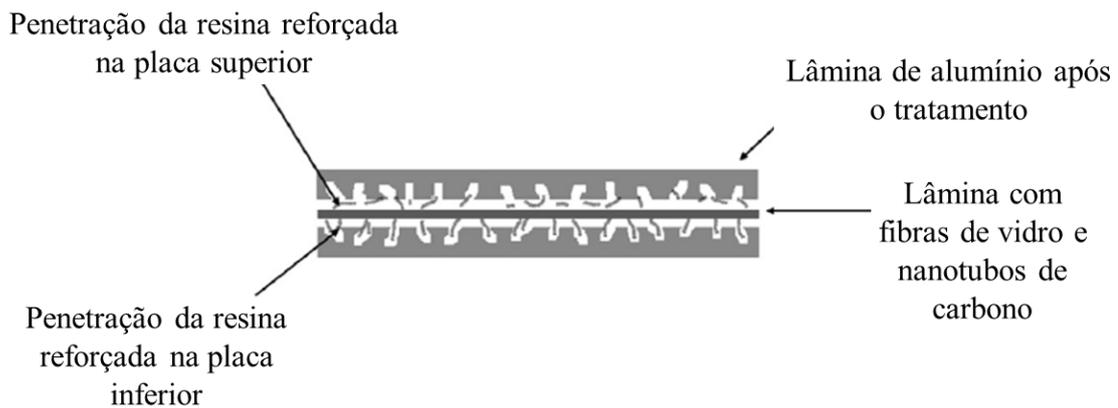


Figura 2.5 - Mecanismo de reforço da resistência ao cisalhamento interlaminar de um FML com lâminas tratadas de alumínio e resina epóxi com fibras de vidro e nanotubos de carbono.

Fonte – KHURRAM *et al.*, 2018.

O avanço tecnológico da manufatura aditiva também tem contribuído para a criação de compósitos avançados. O uso de técnicas de impressão 3D como a deposição por modelagem fundida (FDM) possibilita a inserção de reforços, como nanopartículas metálicas e grafeno, e melhorias em termos de condutividade elétrica e de propriedades mecânicas (WANG *et al.*, 2017). Salom *et al.* (2018) estudaram a inserção de nanoplaquetas de grafeno, funcionalizadas com aminas, em resina epóxi, e usando um teor mássico de 12% em grafeno, obtiveram um aumento de aproximadamente 45% no módulo elástico à tração dos nanocompósitos.

Compósitos ativos inteligentes com memória de forma e capacidade de resposta a estímulos externos, como água e eletricidade, cujo conceito se insere na impressão 4D, têm sido muito investigados, combinando vantagens da impressão 3D, como a capacidade de produção de peças com geometrias complexas, e a possibilidade de combinação de propriedades dos compósitos reforçados com nanopartículas. Dentre os exemplos de aplicação desses materiais impressos em 4D, citam-se polímeros com capacidade de recuperação de danos físicos e com capacidade de armazenamento de energia (WU *et al.*, 2019; FALAHATI *et al.*, 2020).

2.1.2 Laminados com núcleos poliméricos

O uso de polímeros como núcleos em materiais sanduíches é atrativo na engenharia em função da boa absorção de energia tanto por termoplásticos quanto por termorrígidos, além de um menor peso final do compósito, se comparado ao uso de materiais puramente metálicos (AGHCHAI & KHATAMI, 2018). Alguns dos parâmetros que influenciam nas propriedades mecânicas do núcleo são a densidade do material polimérico, a espessura da camada polimérica,

a resistência à penetração e à flexão e a adesão interfacial entre o polímero de núcleo e o material das faces, geralmente feitas de ligas metálicas ou de compósitos reforçados com fibras (AL-HAJAJ *et al.*, 2019).

García-González *et al.* (2015) investigaram a resposta ao impacto em alta velocidade de compósitos sanduíches com núcleo termoplástico de PEEK e faces de liga de alumínio 2024-T3, em comparação com laminados metálicos de liga de alumínio 2024-T3 e núcleo de liga de titânio (Ti-6Al-4V), e de laminados com camadas de liga de alumínio 2024-T3. A Figura 2.6 mostra as configurações dos compósitos multicamadas, considerando os materiais constituintes e a espessura h de cada estrutura.

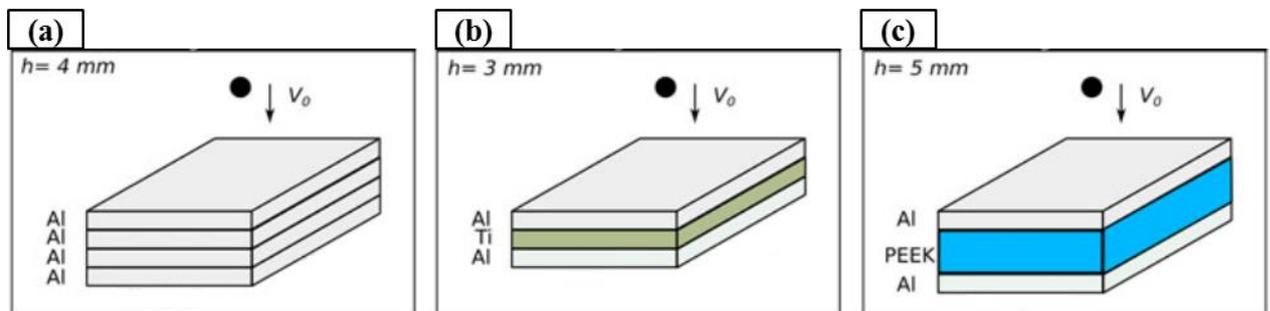


Figura 2.6 - Compósitos sanduíches com (a) lâminas de liga de alumínio 2024-T3, (b) lâminas de liga de alumínio 2024-T3 e de titânio (Ti-6Al-4V) e (c) faces de liga de alumínio 2024-T3 com núcleo termoplástico de PEEK.

Fonte – GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2015.

Foram usados impactadores esféricos com massa de 1,7 g e diâmetro de 7,52 mm, disparados por meio de um atuador pneumático, a velocidades de 250 a 500 m/s. Lasers acoplados a fotodiodos e uma câmera de alta velocidade foram usados para a medição da velocidade. Os resultados indicaram uma maior eficiência na absorção de energia pelos compósitos sanduíches com núcleo de PEEK, em comparação com os compósitos com núcleos metálicos, considerando uma similar densidade em área. Um modo de falha dúctil, com elevada deformação, além de delaminações, foram responsáveis pela alta absorção de energia no impacto pelos painéis de núcleo termoplástico. A Figura 2.7 mostra um estudo numérico com base no método dos elementos finitos (MEF) realizado pelos autores, para uma comparação com os dados experimentais e para a análise do processo de deformação dos compósitos.

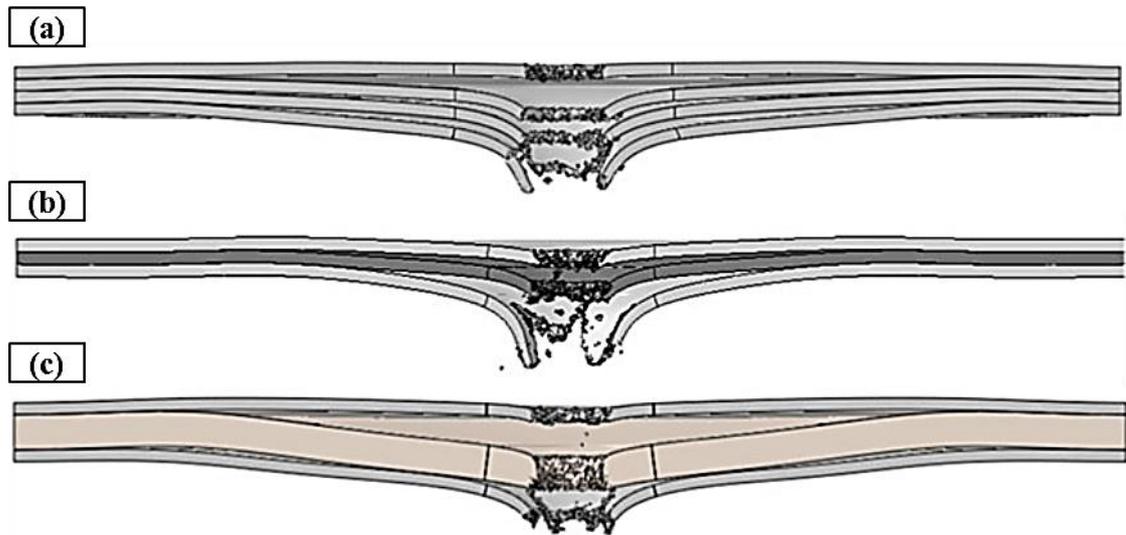


Figura 2.7 - Simulação numérica do processo de impacto a 380 m/s nos compósitos multicamadas com (a) lâminas de liga de alumínio 2024-T3, (b) lâminas de liga de alumínio 2024-T3 e de titânio (Ti-6Al-4V) e (c) faces de liga de alumínio 2024-T3 com núcleo termoplástico de PEEK.

Fonte – GARCÍA-GONZÁLEZ *et al.*, 2015.

O trabalho de CoDyre *et al.* (2018) analisou compósitos sanduíches com núcleo polimérico de espuma de Poli-isocianurato em três diferentes densidades (32 kg/m³, 64 kg/m³ e 96 kg/m³), usando camadas de epóxi reforçado com fibras unidirecionadas de linho como faces, em comparação com compósitos de faces de fibras de vidro. Ensaios de flexão e de compressão axial foram realizados e mostraram que um aumento de 32 kg/m³ para 96 kg/m³ resultou em um ganho de 213% em resistência à flexão dos compósitos com fibra de linho, aumento que foi similar no caso dos compósitos com fibras de vidro. Nos ensaios de compressão axial, o aumento na resistência mecânica, incrementando a densidade de 32 kg/m³ para 96 kg/m³, foi de 196% para os compósitos com fibras de linho, fato que foi verificado em menor escala com os compósitos com fibras de vidro.

2.1.3 Compósitos com núcleos celulares

Uma vasta gama de formas periódicas celulares tem sido considerada para o projeto de núcleos em compósitos sanduíches, ao longo da história. Tradicionalmente, o uso de estruturas celulares em *Honeycomb*, cuja bioinspiração são os favos de mel das abelhas, se destacam devido à boa absorção de forças e ao bom isolamento térmico e acústico. Em 1945, surgiram os primeiros painéis sanduíches feitos totalmente de alumínio, impulsionados pelo avanço tecnológico dos adesivos e pela melhor compreensão do fenômeno da cura desses polímeros.

Para a produção desses painéis sanduíches, podem-se usar processos de expansão de placas, com a cura de um adesivo sobre pressão à temperatura elevada, ou processos de conformação de chapas para corrugar o material, em que lâminas metálicas são corrugadas e empilhadas com o uso de adesivos (BITZER, 1997; WANG, Z. *et al.*, 2018). A Figura 2.8 mostra um exemplo esquemático desses processos utilizados para a fabricação de uma estrutura *Honeycomb* com células hexagonais, evidenciando a direção W (expansão), a direção L (rede) e a direção T (paralela à abertura das células).

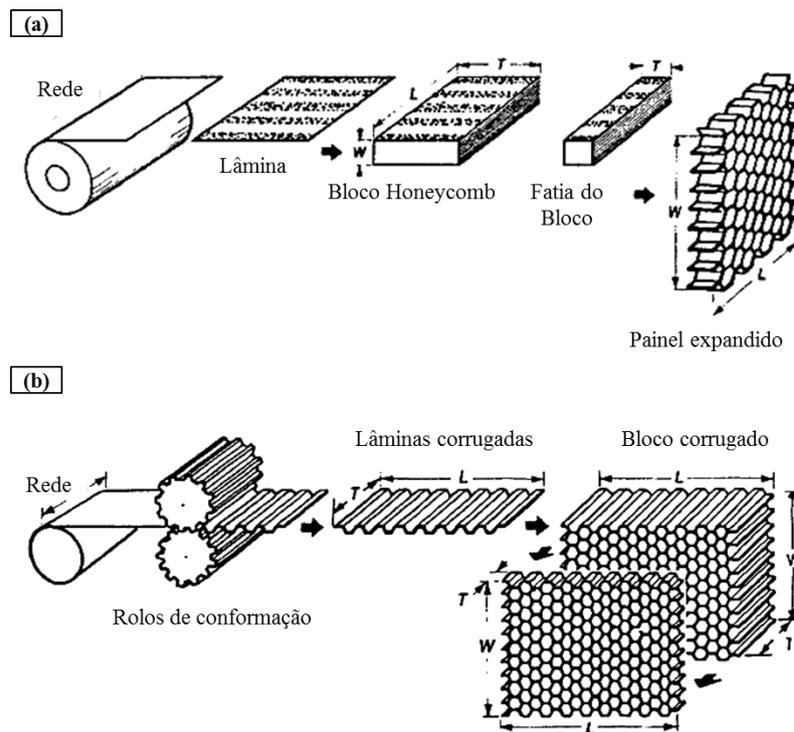


Figura 2.8 - Processo de manufatura tradicional para estruturas *honeycomb* metálicas: (a) processo por expansão e (b) processo por conformação para a obtenção de chapas corrugadas.

Fonte – WANG, Z. *et al.*, 2018; BITZER, 1997.

Estudos mostram que a geometria de núcleo do painel sanduíche pode influenciar diretamente na absorção de energia em solicitações mecânicas. Estruturas *honeycomb* fornecem propriedades mecânicas baseadas nas configurações das células unitárias, como tamanho da célula e espessura da parede celular, e não apenas do material da estrutura. Em busca de melhorias em propriedades mecânicas como capacidade de absorção de energia, relação resistência-peso e relação rigidez-peso, o desenvolvimento e a caracterização mecânica de novas estruturas em *honeycomb* com diferentes configurações unitárias de células foram impulsionados e difundidos no mundo. Células unitárias como as triangulares, quadráticas e

circulares (Figura 2.9) têm sido largamente investigadas sob diferentes condições de serviço. Além disso, diversos materiais têm sido empregados para a produção dessas estruturas, com destaque para os metais, os polímeros e os compósitos, com processamentos que permitem a criação de unidades celulares em escalas micrométricas e até nanométricas, incentivando aplicações avançadas em áreas como a engenharia e a medicina (QI *et al.*, 2021).

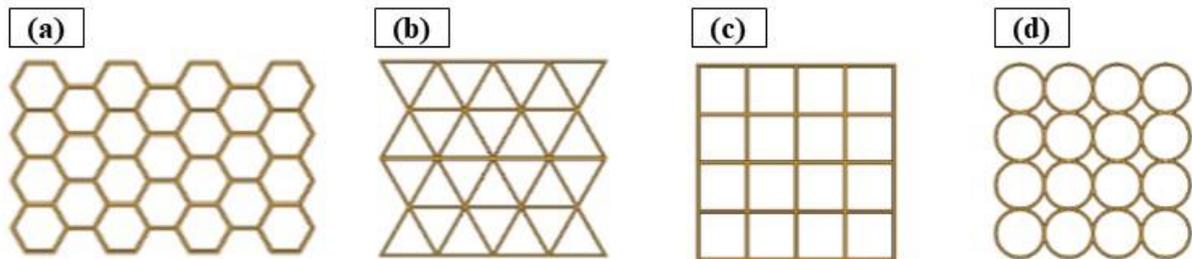


Figura 2.9 - Padrões celulares típicos em *honeycomb*: (a) hexagonais, (b) triangulares, (c) quadráticos e (d) circulares.

Fonte – QI *et al.*, 2021.

Wang *et al.* (2021) analisaram o comportamento mecânico de painéis sanduíches de núcleo *honeycomb* com células hexagonais em ensaios de impacto de baixa velocidade, por meio de estudos experimentais e numéricos. Usando ligas de alumínio na produção da estrutura (A3003-H19 para núcleo e A5083-H321 para faces) e resina epóxi para a adesão entre as faces e o núcleo, os autores avaliaram diferentes ângulos de impacto (entre 15° e 75° , em relação à direção da espessura do painel), com o uso de um pêndulo e uma massa de impacto de 300 g. O estudo experimental validou o estudo numérico, mostrando que a resistência do painel sanduíche é diretamente proporcional ao aumento da espessura da parede das células hexagonais.

O estudo de Rong *et al.* (2018) investigou cinco tipos de núcleos corrugados feitos de liga de alumínio (Figura 2.10), a partir de ensaios de compressão e de impacto por queda de peso (velocidade de 1,76 m/s e energia de 20 J), por métodos experimentais e numéricos. Os autores verificaram que os núcleos com menor área de conexão entre a forma celular e as faces, apresentaram descolamentos e mais danos em eventos com baixos níveis de energia. Os núcleos corrugados trapezoidais apresentaram melhores resultados em termos de absorção de energia. Em eventos de impacto com maior energia (50 J), os painéis foram completamente penetrados e não houve uma clara influência do tipo de núcleo na absorção de energia.

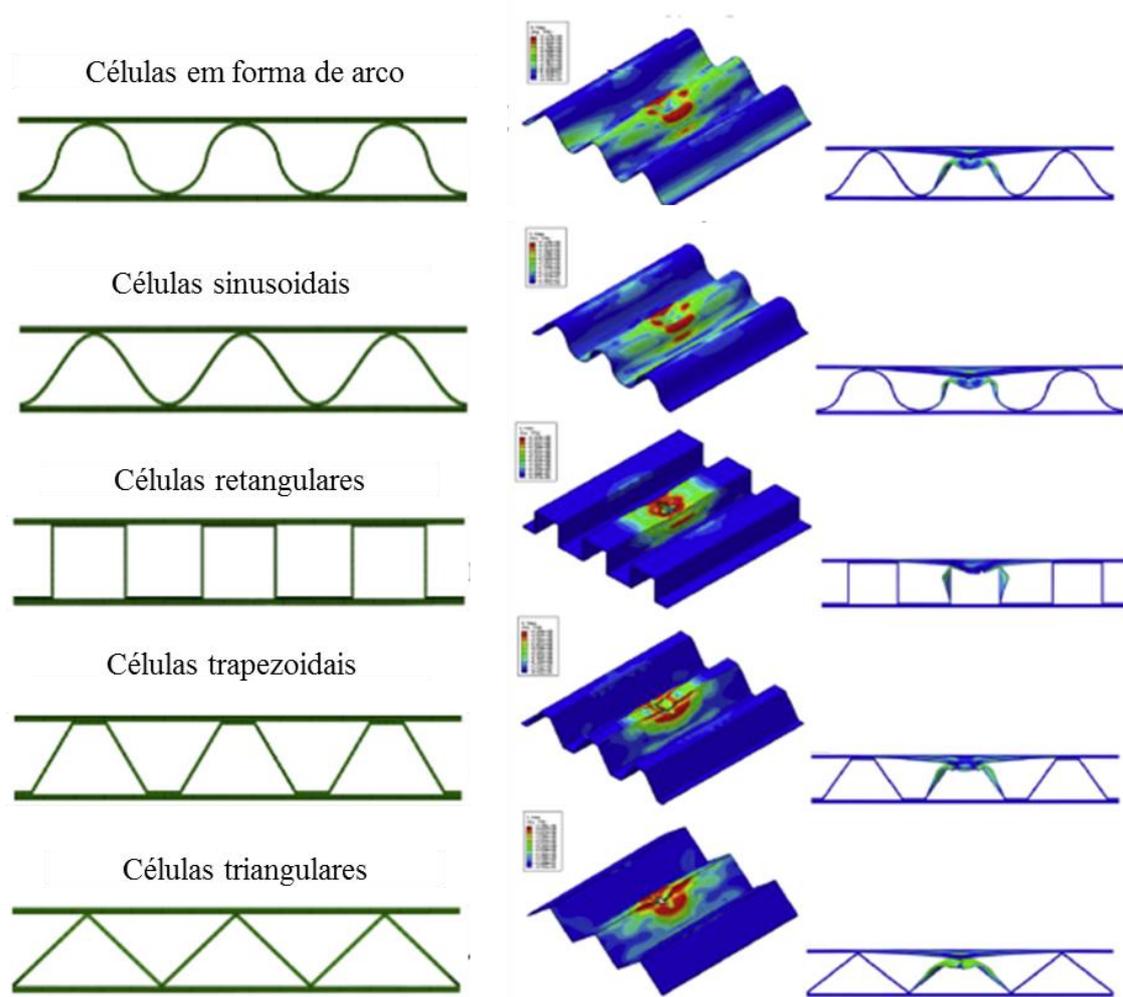


Figura 2.10 - Núcleos corrugados com diferentes geometrias celulares, analisados sob cargas de impacto em simulações numéricas.

Fonte – RONG *et al.*, 2018.

A partir de 1980, estruturas mais avançadas em termos de desempenho mecânico começaram a ser investigadas, como estruturas em *honeycomb* reentrante, estruturas com quiralidade (células que não possuem simetria, quando espelhadas) e modelos baseados em origamis (WU *et al.*, 2019). Notadamente, materiais com comportamento auxético vem sendo muito investigados por meio da possibilidade de criação de estruturas celulares versáteis, cuja característica se dá pela contração transversal em caso de compressão axial, ou expansão transversal em caso de tração axial. Esse comportamento pode fornecer melhorias em termos de módulo de cisalhamento, resistência à indentação, tenacidade e capacidade de absorção de energia, o que leva ao interesse de aplicação nas indústrias automotiva, militar e aeroespacial (LI, T. *et al.*, 2018). A Figura 2.11 mostra o comportamento auxético de estruturas em 2D e 3D, sob tensões de compressão e de tração.

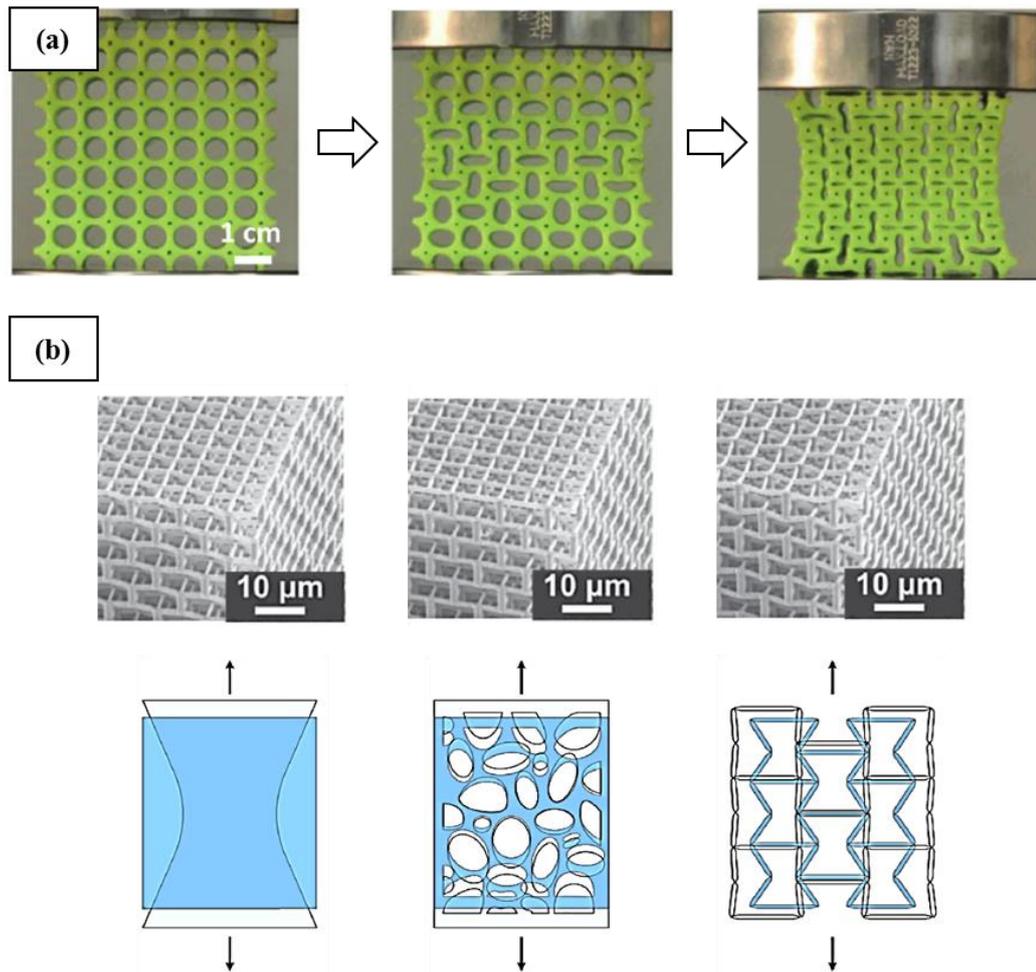


Figura 2.11 - Estruturas auxéticas em 2D e 3D: (a) instabilidades por tensões compressivas em estruturas 2D e (b) Redes celulares em 3D com coeficiente de Poisson positivo, quase nulo e negativo, respectivamente, sob tensão de tração.

Fonte – SURJADI *et al.*, 2019.

Nas últimas décadas, com o advento da manufatura aditiva, o projeto e o desenvolvimento de núcleos poliméricos com novos padrões celulares periódicos obteve avanços em termos de flexibilidade de produção, uma vez que o uso de modelos CAD e a precisão das impressoras 3D possibilitaram a investigação de geometrias complexas para uso em estruturas de núcleo em compósitos sanduíches. Nesse contexto, o uso de estruturas celulares impressas em 3D com coeficiente de Poisson negativo representam uma eficiente forma de aumentar a resistência ao impacto de painéis sanduíche. O comportamento dinâmico dessas estruturas sob impacto é diretamente relacionado com os parâmetros geométricos da microestrutura celular, o que pode ser investigado mais facilmente com o uso de manufatura aditiva. Diversas estruturas auxéticas têm sido propostas e investigadas na literatura, como aquelas com células reentrantes em 3D (YANG *et al.*, 2015), como mostra a Figura 2.12.

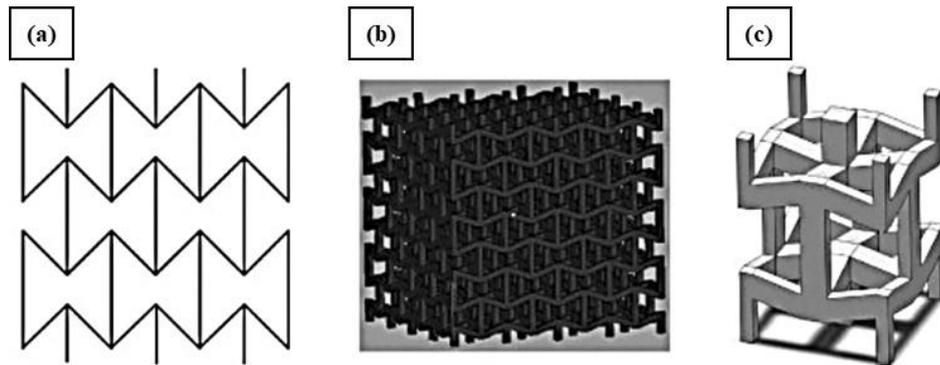


Figura 2.12 – Estrutura auxética em *honeycomb* com coeficiente de Poisson negativo: (a) configuração em *honeycomb* com células reentrantes em 2D, (b) estrutura em 3D com células reentrantes e (c) célula unitária.

Fonte – YANG *et al.*, 2015.

O trabalho de Li *et al.* (2020) apresenta uma estrutura com coeficiente de Poisson negativo, composta por um tipo de célula reentrante em 3D com formato de perfuração em borboleta, e avalia a relação entre os parâmetros geométricos e o comportamento mecânico sob compressão desses materiais, em um estudo experimental e um estudo numérico. No estudo experimental, os autores usaram a impressão 3D para a fabricação das peças de poliuretano termoplástico (TPU). Para a simulação numérica, o software Abaqus® foi adotado. A deformação dessas estruturas a uma carga de compressão denota claramente o comportamento auxético, como mostra a Figura 2.13. Percebe-se uma clara contração transversal com a carga de compressão axial, o que é obtido tanto pelo ensaio experimental do material impresso em 3D quanto pela predição numérica da deformação, usando o critério de falha de von Mises, considerando três estágios do ensaio.

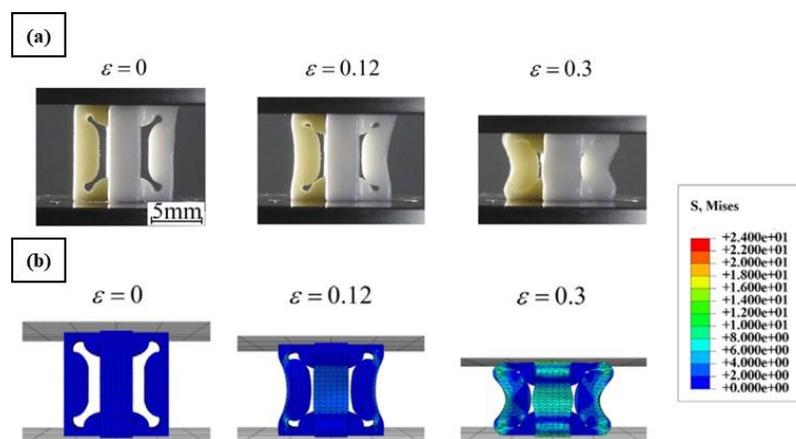


Figura 2.13 – Comportamento mecânico de estruturas auxéticas com células reentrantes e perfuração em formato de borboleta: (a) registros fotográficos do ensaio experimental e (b) predição numérica usando o critério de falha de von Mises.

Fonte – LI *et al.*, 2020.

2.2 Manufatura aditiva

De forma geral, a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, é um termo ligado ao conceito de prototipagem rápida, que é usado industrialmente para criar rapidamente a representação de peças, antes de seu lançamento ou comercialização final. O princípio básico da manufatura aditiva é a fabricação de um modelo gerado por um sistema tridimensional de desenho assistido por computador (CAD 3D), que busca a simplificação no processo de produção de objetos 3D complexos por meio de alterações no *software* CAD. A fabricação das peças nesse processo ocorre por meio da adição de material em camadas, em que cada camada é uma seção transversal fina da peça derivada do *software* CAD original. Salienta-se que, em termos comerciais, a manufatura aditiva é considerada recente, pois a primeira tecnologia comercial de manufatura aditiva foi introduzida pela patente aprovada em 1986, concedida a Charles Hull. Sua empresa 3D Systems, fundada também em 1986, produziu um equipamento que permitia a fabricação de peças plásticas com o uso de fotopolímeros, em um processo chamado de Estereolitografia (SLA). Já em 1989, Scott Trump patenteou a tecnologia de modelagem por deposição fundida (FDM), fundando a empresa Stratasys, sendo atualmente um dos métodos mais utilizados para a fabricação de peças plásticas impressas em 3D (GIBSON *et al.*, 2015). Nos últimos anos, aplicações de materiais impressos em 3D na eletrônica, na biomedicina, na construção civil e em outros setores industriais vem sendo investigadas (WANG *et al.*, 2017).

2.2.1 O método de FDM

O método de manufatura aditiva por FDM consiste no uso de um cabeçote móvel, em que um filamento de material termoplástico é aquecido até uma temperatura próxima ao seu ponto de fusão e é depositado por meio de extrusão, seguindo uma direção predefinida no projeto, se solidificando logo após a extrusão. Esse método é caracterizado pelo uso de materiais termoplásticos de impressão, geralmente pouco ou não tóxicos e de baixo custo, que são processados em equipamentos também considerados de baixo custo, em relação aos outros métodos de impressão existentes. A Figura 2.14 mostra um esquema que exemplifica o processo de deposição de material plástico nesse método (BIKAS *et al.*, 2016).

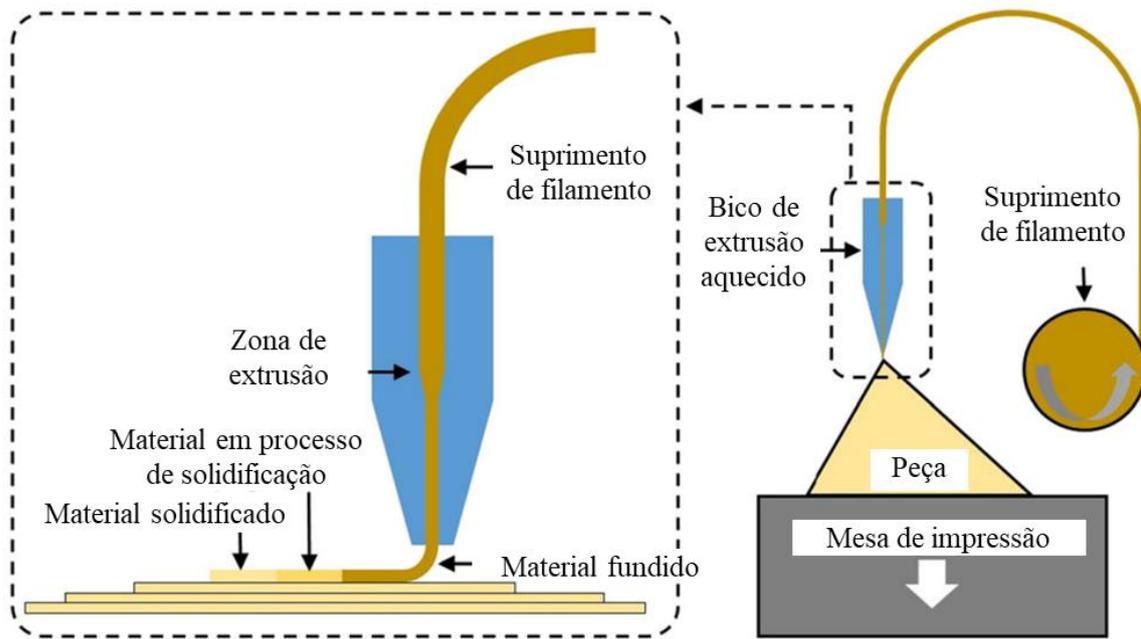


Figura 2.14 – Manufatura aditiva pelo método de FDM.
Fonte – Adaptado de BIKAS *et al.*, 2016.

Considerando as recentes tecnologias de manufatura aditiva com o uso do método de FDM, o ABS e o PLA se destacam como materiais termoplásticos para filamentos utilizados nesses processos. O ABS, um copolímero composto pelos monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno, é um termoplástico de fácil manuseio para impressão 3D que exibe alta tenacidade, alto ponto de fusão, alta durabilidade (MAZZANTI *et al.*, 2019). Por outro lado, o PLA é um biopolímero termoplástico cujos monômeros podem ser produzidos a partir de matéria-prima renovável não-tóxica. O uso desse material apresenta vantagens como a biocompatibilidade (uso favorável em aplicações medicinais) e a economia de energia na produção, se comparado a outros plásticos de origem fóssil (FARAH *et al.*, 2016). A Figura 2.15 mostra a estrutura química desses dois materiais termoplásticos.

Para a manufatura aditiva de peças utilizando o método de FDM, além da influência das propriedades mecânicas do material de filamento, diversos parâmetros de fabricação tem sido investigados na literatura, onde se incluem a espessura de camada, a velocidade de impressão, as temperaturas do bico de extrusão e da mesa de deposição, a orientação da impressão e o tipo de preenchimento das peças. Com relação à orientação da impressão e ao tipo de preenchimento das peças, salienta-se que a direção da deposição de filamento para a construção de uma camada constituinte da seção transversal da peça influencia fortemente nas propriedades mecânicas do material, levando à necessidade de se considerar um comportamento ortotrópico para essas peças (SOMIREDDY *et al.*, 2018).

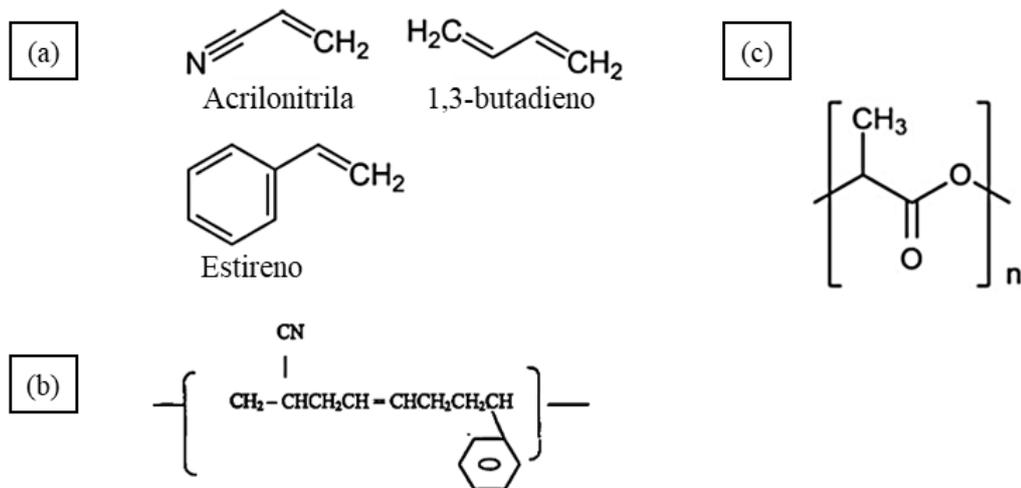


Figura 2.15 – Estrutura química do ABS e do PLA: (a) monômeros utilizados na produção do ABS, (b) estrutura química do ABS e (c) estrutura química do PLA.
Fonte – Adaptado de VILLANI, 2021.

Para o preenchimento dessas peças com a deposição de filamentos, o ângulo de varredura ou ângulo Raster é um parâmetro importante que define a trajetória a ser percorrida pelo bico para a produção de cada camada. A Figura 2.16 mostra alguns ângulos usados para a definição desse parâmetro, que é determinante para as propriedades mecânicas da peça final (MARTINS, 2021). Além de investigações sobre os parâmetros usados em preenchimentos totalmente sólidos, estudos sobre o uso de preenchimentos celulares também tem ganhado destaque nos últimos anos, permitindo o desenvolvimento de estruturas mais leves e com boas propriedades mecânicas específicas.

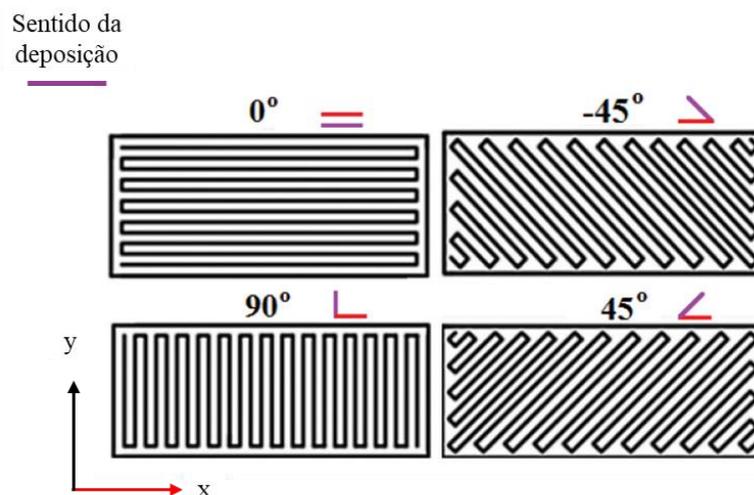


Figura 2.16 – Ângulo Raster para a deposição das camadas poliméricas, no método de FDM, em relação ao eixo x.
Fonte – Adaptado de MARTINS, 2021.

2.2.2 Manufatura aditiva aplicada a metamateriais mecânicos

Estudos recentes mostram a aplicabilidade do ABS e do PLA no desenvolvimento de metamateriais mecânicos impressos em 3D pelo método de FDM, que possuem estruturas projetadas para a obtenção de propriedades especiais, com base em suas arquiteturas, ao invés dos materiais constituintes. Dentre as propriedades de destaque desses materiais, cujas estruturas celulares podem ser em 2D ou 3D, pode-se citar as propriedades auxéticas e a absorção de vibrações. Também são verificados na literatura estudos que evidenciam o uso de metamateriais como estruturas inovadoras em núcleos de compósitos sanduíches (WANG, H., *et al.*, 2020; BODAGHI *et al.*, 2017). Além disso, os metamateriais também estão incluídos na impressão 4D, com materiais responsivos a estímulos, com memória de forma e mudança de função ao longo do tempo (LIU *et al.*, 2018).

O uso de estruturas bioinspiradas tem sido uma das estratégias promissoras para o projeto de metamateriais mecânicos. Com microarquiteturas inspiradas em materiais naturais, os materiais sintetizados podem oferecer aplicações relevantes, com estruturas de alta tenacidade e baixa densidade (LIBONATI & BUEHLER, 2017). Gu *et al.* (2017) combinaram a manufatura aditiva, a simulação numérica e testes de queda de peso para a investigação da hierarquia de microarquiteturas bioinspiradas em conchas, e atestaram que o mecanismo responsável pela resistência ao impacto da concha é a criação de caminhos para o desvio de trincas, o que possibilita o uso dessa hierarquia estrutural em equipamentos, como armaduras e capacetes.

Já Panda *et al.* (2018) realizaram um estudo experimental para investigar os efeitos dos parâmetros de design de estruturas de ABS em *honeycomb* (estrutura em formato de favos de mel) impressas em 3D, pelo método de FDM. A espessura e o tamanho da célula em formato hexagonal foram influentes na rigidez e na resistência à compressão, em que aumentando-se o tamanho da célula de 5 mm (com espessura da parede celular de 1 mm) para 17,5 mm (com espessura da parede celular de 3 mm), tem-se um aumento de 380% na rigidez à compressão e 172% na resistência à compressão.

Ainda, Truskiewicz *et al.* (2021) investigaram o comportamento mecânico de metamateriais impressos em 3D de PLA, ABS e poliamida 12 (PA12), por meio de testes de compressão. Quatro unidades celulares foram investigadas: octeto de treliças, kelvin, octaedro e dodecaedro (Figura 2.17). Os metamateriais de PLA apresentaram maiores cargas máximas na fratura por compressão (até 74% superiores), porém os metamateriais de ABS e de PA12

foram os que mais absorveram energia durante o ensaio (com base na área sob a curva de tensão por deformação).

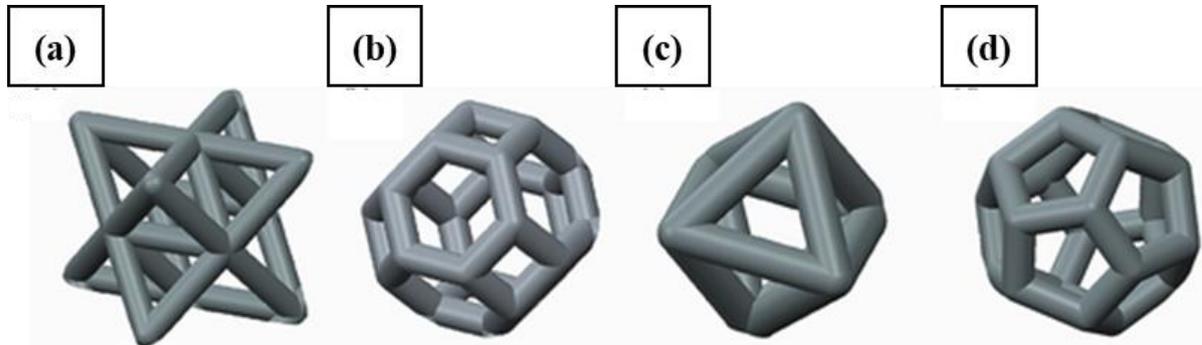


Figura 2.17 – Unidades celulares para a criação de metamateriais: (a) octeto em treliças, (b) kelvin, (c) octaedro e (d) dodecaedro.

Fonte – TRUSZKIEWICZ *et al.*, 2021.

Da mesma forma, Sarvestani *et al.* (2018b) desenvolveram estruturas em sanduíche arquitetadas por impressão 3D de PLA. Os autores denominaram essas estruturas de metasanduíches, com o objetivo de alcançar uma alta rigidez, alinhada a um baixo peso, e uma boa capacidade de absorção de energia. Três tipos de células de núcleo foram analisadas: células cúbicas, de octetos e do tipo Isomax (combinação entre células cúbica e octeto). Análises experimentais e numéricas (sem o uso de critério de falha) foram realizadas para a avaliação das propriedades mecânicas de impacto sob baixa velocidade e de flexão quase-estática. A densidade relativa de núcleo de 30%, com uma distância entre vãos, no ensaio de flexão, de três vezes a espessura do material, para células de octeto, resultaram em um material com maior absorção de energia na flexão. Os metasanduíches com células Isomax e cúbicas, com densidade relativa de núcleo de 50%, e uma distância entre vãos de 1,8 vezes a espessura do material, alcançaram a maior capacidade de absorção de energia quase-estática entre os metamateriais. A Figura 2.18 mostra alguns dos resultados dos ensaios de flexão dos metasanduíches de 30 mm de espessura, mostrando falhas por flambagem do núcleo (células Isomax e octeto) e na região entre face superior e núcleo (células cúbicas). No caso dos ensaios de impacto em baixa velocidade, os metamateriais com células de octetos se destacaram, obtendo a maior capacidade de absorção de energia.

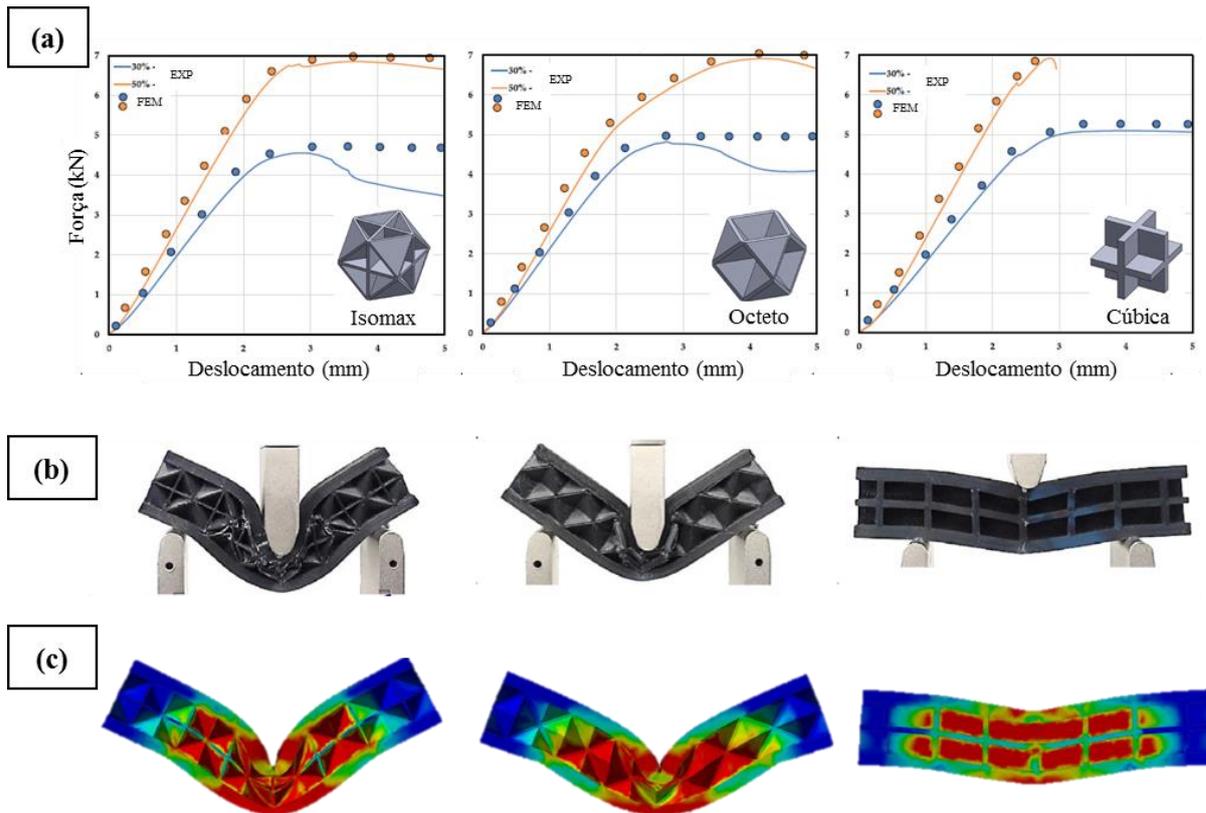


Figura 2.18 – Metasanduíches impressos em 3D: (a) Curvas de força por deslocamento obtidas em ensaios de flexão, considerando densidades relativas de núcleo de 30% e 50%, (b) modo de falha visualizado experimentalmente (densidade relativa de 30%) e (c) simulações numéricas para análise da concentração da tensão sob esses ensaios. Fonte - SARVESTANI *et al.*, 2018b.

Kshad *et al.* (2019) usaram o método de FDM para a criação de núcleos de PLA para painéis sanduíches, com base em três diferentes mosaicos de origami do tipo Ron-Resch (Figura 2.19), analisando a variação do ângulo de dobramento das unidades celulares (15° , 30° e 60°). Ensaio de compressão e de impacto por queda de peso (impactador de 1,104 kg) foram usados para a avaliação das propriedades mecânicas desses materiais. Nos ensaios de impacto, duas faces de policarbonato foram adicionadas, coladas nos núcleos com resina epóxi. Além disso, uma simulação numérica desses ensaios, com o uso do software Ansys®, também foi realizada. Os autores concluíram que a força no impacto diminuiu com o aumento do ângulo de dobragem dos origamis, obtendo valores máximo e mínimo de forças de 3,9 kN e 2,3 kN, respectivamente.

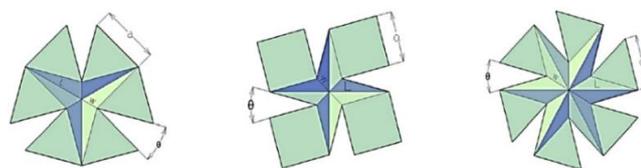


Figura 2.19 – Unidades celulares baseadas em origami (ângulo de dobramento θ). Fonte - KSHAD *et al.*, 2019.

Wickeler e Naguib (2020) também avaliaram as propriedades mecânicas de metamateriais baseados em modelos de origami, em padrões triangulares e retangulares (Figura 2.20), feitos de PLA com o uso de FDM. Os autores obtiveram, por meio de testes de compressão, um faixa de módulo de elasticidade específico na compressão (razão entre o módulo elástico e a massa do material), compreendida entre 594 MPa/kg e 926 MPa/kg, sendo maior que a verificada nos modelos do tipo Ron-Resch (entre 15 e 365 MPa/kg). Nos ensaios de impacto por queda de peso, a estrutura retangular mostrou uma maior absorção de energia ao impacto (verificada pela força de impacto captada, menor em até 50%), comparada à estrutura triangular, o que foi comprovado pela múltiplas fraturas encontradas na estrutura retangular.

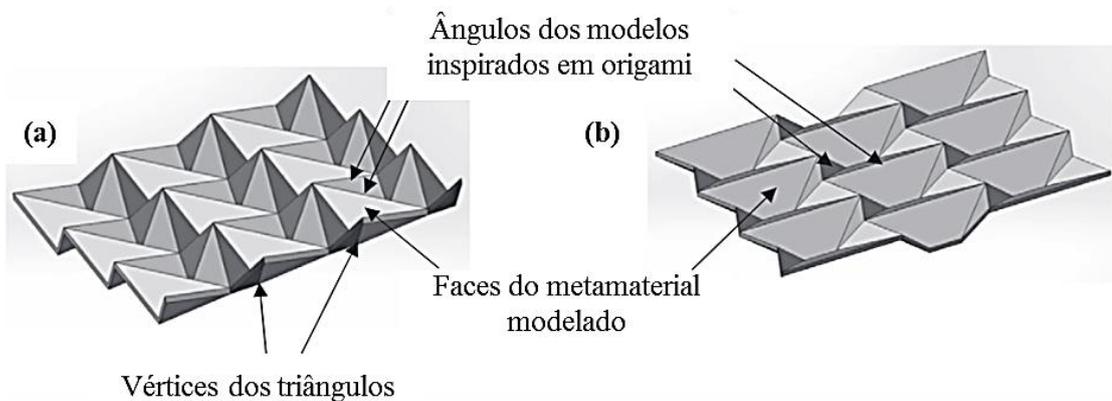


Figura 2.20 – Vista isométrica dos modelos inspirados em origami: (a) padrão triangular e (b) padrão retangular.

Fonte – WICKELER & NAGUIB, 2020.

Paczos *et al.* (2018) estudaram a resposta à compressão de cubos de PLA impressos em 3D (aresta de 50 mm), com densidade de núcleo uniforme, não-uniforme e do tipo *honeycomb*. O maior módulo de elasticidade na compressão foi verificada para o sanduíche mais uniforme (758 MPa), que também apresentou a maior massa (80,1 g), notadamente acima que a estrutura mais leve estudada, com núcleo de *honeycomb* (26,8 g), que teve um módulo de elasticidade na compressão de 156 MPa. A Figura 2.21 mostra as curvas de força por deslocamento dos ensaios de compressão desses cubos, em que apenas propriedades absolutas foram analisadas.

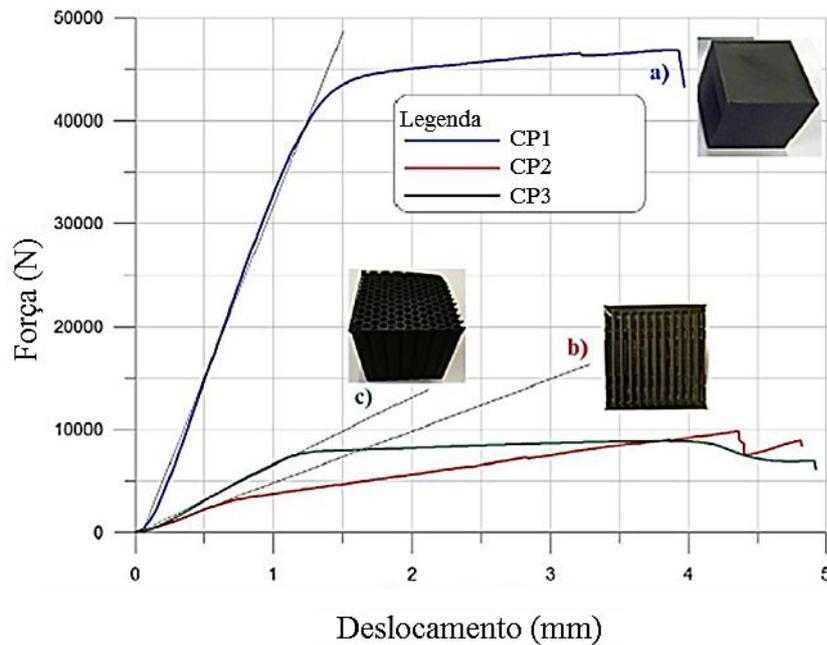


Figura 2.21 – Ensaio de compressão dos cubos de PLA com núcleo uniforme e massa de 80,1 g (CP1 – “a”), núcleo não-uniforme e massa de 49,4 g (CP2 – “b”) e núcleo *honeycomb* e massa de 26,8 g (CP3 – “c”).

Fonte – PACZOS *et al.*, 2018.

Bodaghi *et al.* (2017) investigaram metamateriais de PLA, produzidos por FDM, por meio de testes de tração e compressão com células nas direções axiais e transversais. O estudo avaliou as propriedades mecânicas de metamateriais com células unitárias de paralelogramos e hexágonos regulares. Os experimentos mostraram que a forma da unidade celular, a direção, o tipo e a magnitude da carga mecânica aplicada tem efeitos significantes na resposta do material. A Figura 2.22 mostra a deformação de estruturas hexagonais tipo *honeycomb*, sob tensões de tração e compressão, em carregamentos axiais e transversais aos hexágonos.

Rebello *et al.* (2019) analisaram a resposta não linear de estruturas de núcleo de PLA em *honeycomb* (11 cm de espessura), fabricadas pela técnica de FDM (espessura de camada em 0,1 mm), com faces de alumínio coladas com fitas dupla-face, para compreender a capacidade de absorção de energia desses materiais como materiais de sacrifício. Os autores evidenciam a aplicabilidade desses materiais na mitigação de cargas explosivas, na função de um núcleo triturável, garantindo uma compressão uniforme. Ensaio experimentais, com o uso de compressão dinâmica, e numéricos, usando o software Ansys LS-DYNA® e considerando os materiais constituintes como elásticos, foram realizados em painéis de núcleo em PLA e faces de alumínio, usando densidades relativas de 5%, 7,5% e 10% (razão entre a densidade do material celular e a densidade do material constituinte). Os resultados mostraram que a

densidade relativa da estrutura *Honeycomb* influencia diretamente na capacidade de esmagamento e flambagem das paredes celulares.

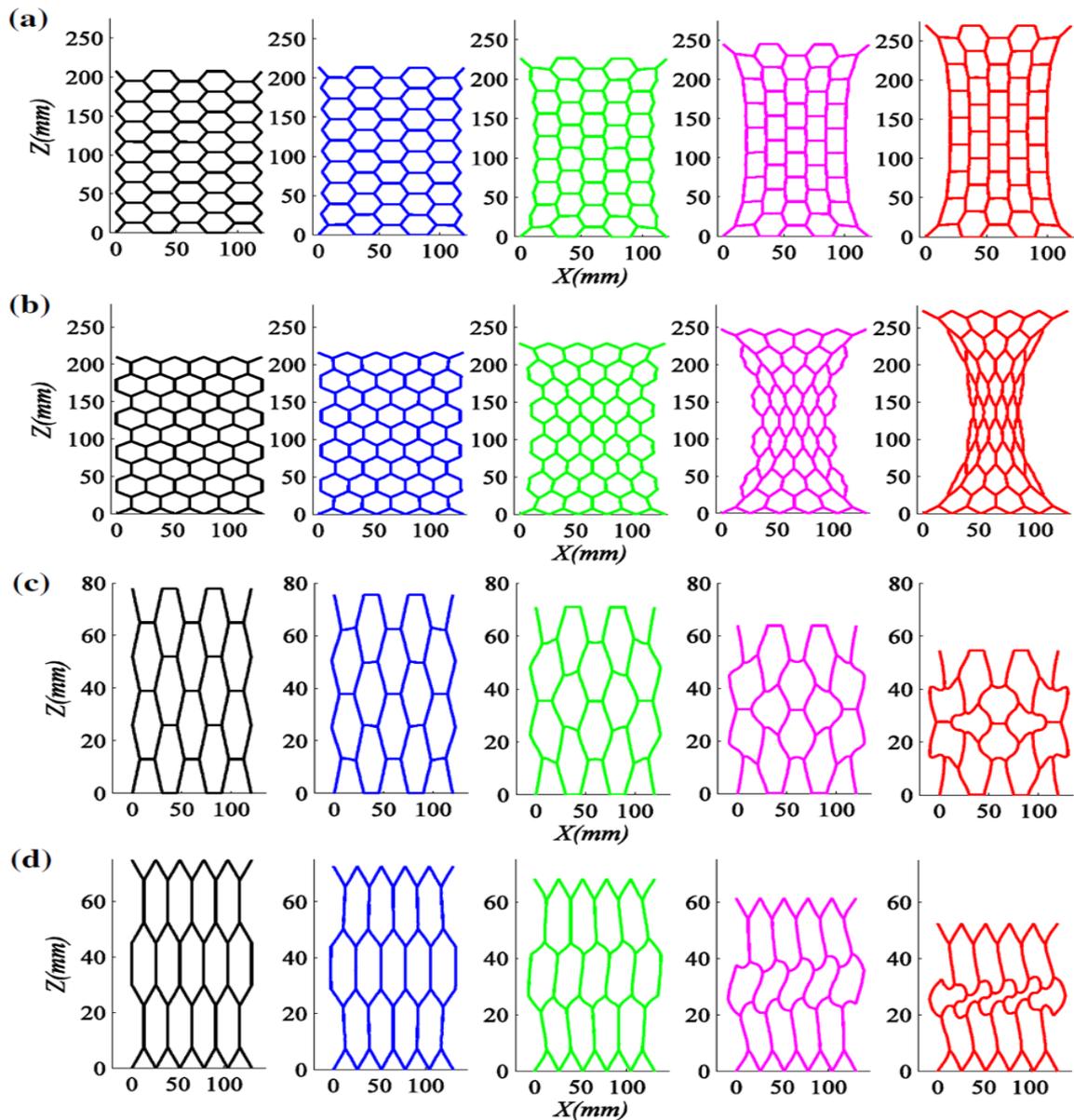


Figura 2.22 – Configurações dos metamateriais de células hexagonais de PLA sob cargas axiais (a, c) e transversais (b, d) em tração (a, b) e compressão (c, d), considerando um aumento progressivo nas deformações (0% em preto, 3% em azul, 9% em verde, 18% em roxo e 30% em vermelho).

Fonte - BODAGHI *et al.*, 2017.

A combinação de termoplásticos, como o PLA e o ABS impressos em 3D, com faces metálicas por meio de adesivos, remete a uma necessidade de se investigar a interação mecânica e química entre esses materiais, a fim de garantir uma boa transferência de cargas. Na literatura, a maioria dos trabalhos tem investigado tratamentos que reduzem a rugosidade superficial dos

componentes impressos em 3D, como forma de melhorar o acabamento superficial do objeto. Por outro lado, uma alta rugosidade superficial para esses termoplásticos é geralmente alcançadas por meio de uma escolha adequada dos parâmetros de impressão. Yang *et al.* (2020) investigaram a hidrofobicidade de superfícies de componentes de PLA e de ABS impressos em 3D, com o uso de um revestimento nanocerâmico a base de flúor. Os autores afirmam que o revestimento tem a capacidade de diminuir a energia livre superficial, porém os parâmetros de espessura de camada e tipo de preenchimento influenciam diretamente na rugosidade superficial do componente impresso e devem ser também investigados. Essa combinação favorece o intertravamento mecânico e a afinidade química desses materiais em contato com adesivos, como o epóxi. Baran e Erbil (2019) investigaram os principais métodos utilizados na literatura para modificar a superfície do PLA e destacaram a hidrólise alcalina, a polimerização radicalar por transferência de átomo, o uso de luz ultravioleta e de plasma. Segundo os autores, novas investigações sobre a molhabilidade, a energia livre superficial e os grupos funcionais desses componentes devem permitir progressos efetivos na indústria da manufatura aditiva.

Através dos estudos encontrados na literatura, referentes à combinação de compósitos sanduíches e de metamateriais mecânicos, como painéis sanduíches produzidos com impressão 3D, percebe-se que há um amplo campo de possibilidades de estruturas celulares a serem usadas como núcleos em compósitos sanduíches. A modelagem e a investigação de novas estruturas celulares podem levar à obtenção de painéis sanduíches com propriedades mecânicas únicas, permitindo a diminuição do peso total da estrutura e a garantia de um desempenho apropriado na aplicação do material final produzido.

2.3 Avaliação da integridade estrutural

Os sistemas de monitoramento de integridade estrutural (MIE) podem ser usados em ambientes caracterizados por degradações progressivas nas estruturas presentes e podem ser úteis em função das variações nas condições operacionais da estrutura, eventos acidentais e inconformidades ocorridas no projeto da estrutura. O uso de técnicas de MIE tem como principal objetivo monitorar o estado de uma estrutura, com base em sua vida útil e na eficiência durante a operação (MEDEIROS *et al.*, 2018).

A aplicação de materiais compósitos, por exemplo, requer um adequado MIE para compreender os possíveis modos de falhas presentes, em virtude do surgimento de danos internos à estrutura. Com uma exposição à fadiga mecânica, por exemplo (Figura 2.23), os

compósitos laminados podem apresentar, em um primeiro estágio, uma rápida perda de rigidez, que resulta em trincas e fraturas na matriz. Num estágio posterior, os danos evoluem lentamente, de forma constante, com redução significativa de rigidez e surgimentos de falhas como descolamento entre matriz e fibras e delaminações. Num terceiro estágio, a rigidez cai de forma imediata e a falha final do compósito é verificada, com a ruptura das fibras de reforço (DUCHENE *et al.*, 2018).

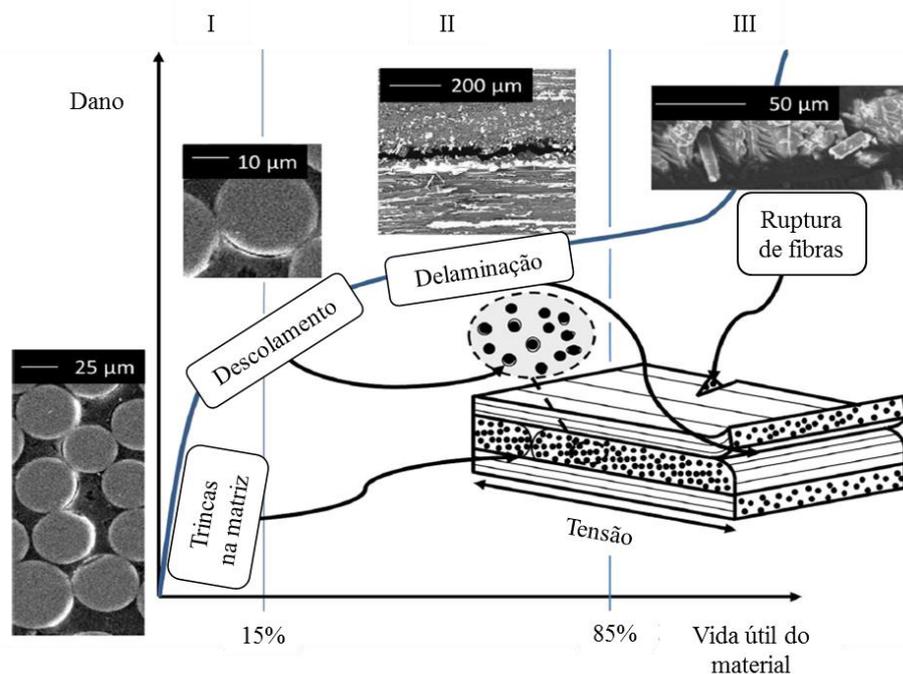


Figura 2.23 – Evolução de danos em materiais compósitos laminados, sob fadiga, e sua relação com a vida útil do material.

Fonte – DUCHENE *et al.*, 2018.

Apesar de a inspeção visual ser a técnica mais simples e tradicional de MIE, avanços tecnológicos referentes ao desenvolvimento de novos materiais compósitos impulsionaram o surgimento de novas técnicas de avaliação estrutural, em função da natureza heterogênea e da forma particular de absorção de energia apresentada por cada material compósito. Na indústria aeronáutica, por exemplo, sistemas robustos de MIE tem sido largamente empregados, visando à obtenção de melhorias na relação entre custo e facilidade de inspeção, além da busca pela máxima eficiência em processos de manutenção e operação (CRIVELLI *et al.*, 2015; SELVA *et al.*, 2013).

Nos últimos anos, pode-se observar uma clara tendência da aplicação de técnicas de ensaios não destrutivos (NDT) usando sensores integrados à estrutura. O uso dessas técnicas em MIE tem oferecido a possibilidade de um monitoramento contínuo da estrutura sem a

necessidade de interromper seu funcionamento, além de uma maior sensibilidade a danos, por ser parte da própria estrutura. Por outro lado, com relação ao uso de técnicas de NDT com sensores fixados na parte externa da estrutura, dentre as principais vantagens sobre o antecessor, pode-se citar o fato de ser menos intrusivo no material e de influenciar em menor escala as propriedades mecânicas do componente. Dentre as desvantagens, cita-se a dificuldade na instrumentação na superfície da estrutura e a necessidade de paralisação da operação para esse procedimento, acarretando em atrasos na operação (TULOUP *et al.*, 2019). A Figura 2.24 mostra um exemplo de sensores integrados à estrutura, com a inserção de fitas de Poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF) em tecidos de fibras de carbono (JUNG & CHANG, 2019), e também um exemplo de sensores fixados externamente à estrutura, com o uso de nanocompósitos de negro de fumo (CB, do inglês “*Carbon Black*”) e PVDF (CB/PVDF), e de pastilhas piezoelétricas de Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT, do inglês “*Lead zirconate titanate*”) coladas na superfície (LIU *et al.*, 2017). A produção dessas estruturas inteligentes tem se tornado uma ótima alternativa para implementar o MIE, trazendo ganhos em termos de facilidade e de custo de inspeção, pois melhora as operações de desmontagem de componentes e reduz o tempo de manutenção e de paradas na funcionalidade da estrutura. Diante desse contexto, a seguir são apresentados uma conceituação sobre os sistemas de medição e suas características, e as principais técnicas para o MIE, utilizadas nos últimos anos, com base em estudos científicos realizados recentemente.

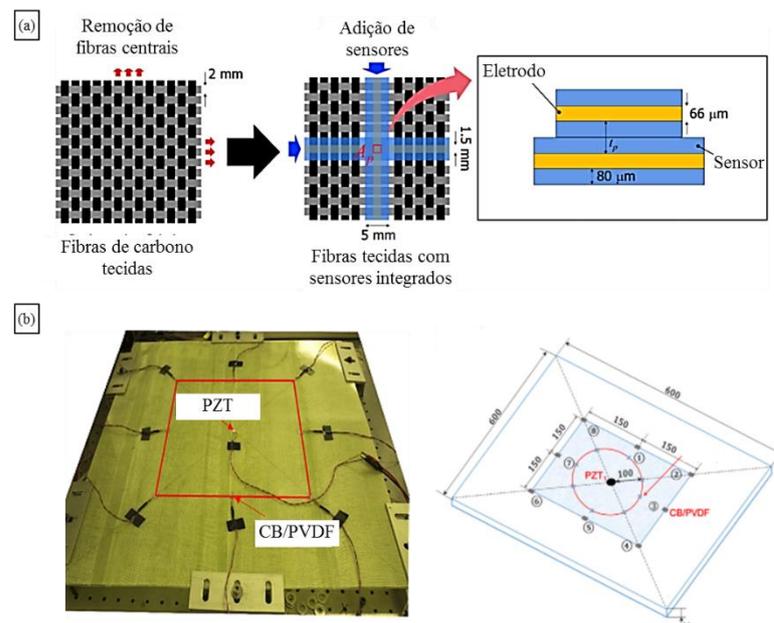


Figura 2.24 – Exemplos de sensores para o MIE (a) integrados na estrutura e (b) fixados na parte externa.

Fonte – JUNG & CHANG, 2019; LIU *et al.*, 2017.

2.3.1 Sistemas de medição no monitoramento de integridade estrutural

A capacidade de medição é uma das principais necessidades para a tomada de decisão na engenharia. Uma medição adequada de uma determinada variável permite a análise de fatores que influenciam no comportamento de um sistema físico, culminando em melhorias pontuais nos processos e em ganhos estratégicos em termos de custos e qualidade com as operações envolvidas na análise.

No contexto da física, um sistema de medição é basicamente uma ferramenta que possibilita a quantificação de uma variável física medida, composta basicamente por quatro estágios (Figura 2.25): (1) Estágio de sensor-transdutor; (2) Estágio de condicionamento de sinal; (3) Estágio de saída; e (4) Estágio de controle de realimentação. O sensor capta a variável que está sendo medida e o transdutor converte a informação detectada em um sinal, cuja natureza pode ser do tipo elétrica, mecânica, ou de outra característica. Este sinal detectado é condicionado para uma magnitude desejada, através de procedimentos como ampliações e filtragens de ruídos. Após o condicionamento, o sinal tratado é direcionado ao estágio de saída, no qual há a indicação ou o registro da saída, se utilizando de um determinado dispositivo, como mostradores, escalas graduadas e unidades computacionais de armazenamento. Por fim, para o uso de sistemas de medição em controle de processos, há também o estágio de controle de realimentação, que conta com um controlador que interpreta o sinal medido e possibilita uma tomada de decisão (FIGLIOLA & BEASLEY, 2007).

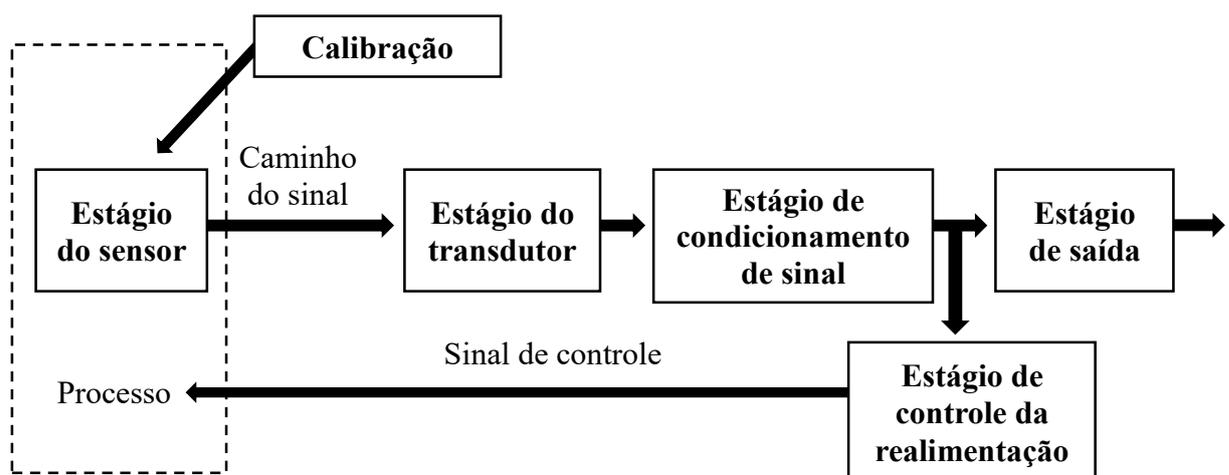


Figura 2.25 - O sistema de medição: uma abordagem geral.
Fonte - Adaptado de FIGLIOLA & BEASLEY, 2007.

Com relação à interação entre as etapas que compõem os sistemas de medição, nos últimos anos, verifica-se o uso de tecnologias baseadas em sensores e atuadores sem fio (*wireless*), embutidos nos materiais, e auto perceptivos, com o uso de nanomateriais (LI, Y. *et al.*, 2018). Apesar da maior praticidade no que se refere à instrumentação, a busca pela redução de interferências pode ser considerada um dos desafios mais importantes nessas redes sem fio e sem ponto de acesso comum (JAOUA *et al.*, 2014). Dentre as aplicações mais comuns desses tipos de sensores e atuadores avançados, ressaltam-se aquelas voltadas para a indústria farmacêutica, como estudado por Sinha (2017), que investigou o uso de materiais piezoelétricos na liberação controlada de medicamentos em uma micromembrana, por meio de campos magnéticos de radiofrequência.

Li, Y. *et al.* (2018) investigaram a adição de nanomateriais em polímeros, buscando uma capacidade de autopercepção de ondas ultrassônicas. Uma rede de sensoriamento embutida, formada com nanopartículas de grafeno, otimizadas e difundidas em polímeros reforçados com fibras, em que o efeito de tunelamento quântico pode ser disparado localmente quando as ondas ultrassônicas atravessam os compósitos. A rede de detecção difusa possibilita a aquisição de ondas ultrassônicas em qualquer local dos compósitos, evitando o uso de transdutores ultrassônicos convencionais que devem ser conectados externamente ou incorporados internamente aos compósitos. Com uma nanoestrutura otimizada, o sistema se mostrou eficiente com ondas ultrassônicas de até 500 kHz. Os autores testaram ondas ultrassônicas em um laminado de fibra de vidro/epóxi e observaram que não há discrepância com os sinais obtidos com sensores piezoelétricos convencionais. O estudo destaca a nova geração de polímeros funcionais, com capacidade de MIE, sem o uso de sensores externos. A minimização de uso de cabos e fios, a redução na penalidade de peso/volume para os compósitos originais e uma baixa degradação mecânica dos compósitos foram consideradas vantagens notáveis, trazendo um novo conceito de MIE, em que os autores classificam como “MIE livre de sensores” (*SHM sensor-free*).

O estudo de Tamburrano *et al.* (2013), por exemplo, relatou o uso de extensômetros avançados, com sensores de deformação baseados em nanofios semicondutores (como ZnO, Si ou ZnSnO₃), que mostraram notáveis efeitos piezorresistivos. Os autores investigaram nanocompósitos de matriz éster-vinílica com grafeno, como sendo uma alternativa aos materiais inteligentes convencionais, principalmente devido às propriedades elétricas superiores dos nanotubos de carbono (NTC). A Figura 2.26 mostra os resultados obtidos para condutividade elétrica em função do aumento de teor mássico de grafeno no compósito. Sem a adição dos nanomateriais, a condutividade elétrica do compósito ficou em torno de 10^{-11} S/m, valor próximo

ao encontrado tradicionalmente para polímeros, e com a adição de apenas 4% em peso de grafeno, uma condutividade elétrica de aproximadamente 10 S/m foi encontrada, valor que ainda se encontra abaixo das ligas metálicas, cujos valores são próximos à 10^7 S/m (CALLISTER JR. & RETHWISCH, 2016).

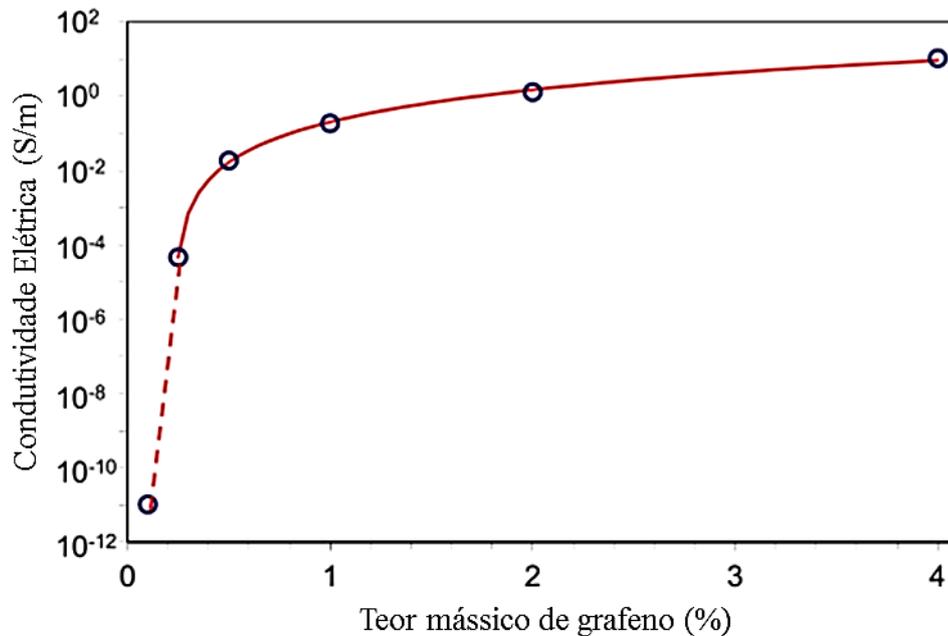


Figura 2.26 – Aumento da condutividade elétrica em compostos de matriz éster-vinílica com a adição de nanoplaquetas de grafeno.

Fonte - Adaptado de TAMBURRANO *et al.*, 2013.

Além da nanotecnologia, os sistemas de medição também têm se utilizado dos avanços tecnológicos alcançados por meio da manufatura aditiva. A confecção de compostos eletroativos com o uso do processo de manufatura aditiva pelo método de FDM tem se tornado um campo promissor no que se refere às novas tecnologias de MIE (KIM *et al.*, 2017). De acordo com Kalsoom *et al.* (2016), esses materiais podem ser compostos com resinas termoplásticas, como o Poli(ácido láctico) (PLA) e o Acrilonitrila butadieno estireno (ABS), reforçados com partículas de materiais como NTC e CB, exibindo propriedades mecânicas e elétricas aplicáveis na engenharia.

Yang *et al.* (2019) formularam um filamento de PLA com adição de NTC para o uso no processo de FDM, e verificaram que a adição de 6% em peso de NTC resultou em um material 64,12 % mais resistente à tração e 29,29 % mais resistente à flexão. Além disso, a resistividade elétrica variou entre $1 \times 10^{12} \Omega/m^2$ (filamento de PLA sem NTC) e $1 \times 10^2 \Omega/m^2$ (PLA com teor mássico de 8% em NTC). Os autores também enfatizaram que uma menor velocidade de preenchimento, uma maior temperatura de fusão e uma maior espessura nas camadas contribuíram positivamente para a excelente condutividade elétrica do composto. Por outro lado,

Kwok *et al.* (2017) construíram circuitos e sensores de temperatura utilizando um filamento de polipropileno com negro de fumo (PP + CB), por meio do processo de FDM. Segundo os autores, as propriedades elétricas alcançadas por esses compósitos são estáveis sob exposição de luz solar por um mês e não sofrem degradação na resistência elétrica quando usados em uma tensão de 12 V (corrente alternada) por sete dias. O estudo mostrou a potencial aplicabilidade desses materiais em sistemas de detecção.

Com relação à aquisição de sinais em sistemas de MIE, salienta-se que o uso de materiais piezoelétricos tem se destacado nos últimos anos, devido às suas exclusivas funções integradas de detecção e acionamento, ampla faixa de frequência, rápida resposta, processo de preparação simples, facilidade de processamento e custo comercialmente competitivo (SELVA *et al.*, 2013). Sensores baseados em materiais piezoelétricos podem ser aplicados em diversas áreas da engenharia, acoplados tanto externa quanto internamente a uma estrutura, sendo capazes de detectar danos em alta frequência de vibração numa escala local, indicando o surgimento de falhas estruturais (CHEN & XUE, 2018).

A piezoelectricidade é uma propriedade que certos materiais possuem de gerar eletricidade através de uma pressão mecânica. Descoberta por Jacques e Pierre Curie em 1880, este efeito é linear e reversível, em que a magnitude da polarização do elemento piezoelétrico é dependente da magnitude da tensão elétrica durante o processo de polarização (TULOUP *et al.*, 2019). Este fenômeno ocorre em função da separação espontânea de carga dentro de certas estruturas cristalinas, causado pelo deslocamento de uma nuvem de elétrons com relação aos centros atômicos individuais, gerando um dipolo elétrico (CHEN *et al.*, 2019). Quando esses materiais sofrem compressão e tração, geram tensões de polaridade oposta, proporcionais às cargas aplicadas, o que caracteriza o efeito piezoelétrico direto (Figura 2.27a). Por outro lado, em caso de exposição dos cristais a um campo elétrico, esses cristais apresentam uma variação no comprimento conforme a polaridade do campo, proporcionalmente à sua força, caracterizando o efeito piezoelétrico inverso (Figura 2.27b) (CASTRO *et al.*, 2016).

A principal vantagem dos sensores piezoelétricos, em relação aos sensores de deformação tradicionais, é a sua alta sensibilidade sob deformações, que podem ser avaliadas com a carga ou a corrente elétrica gerada pelo material e a diferença de potencial entre os eletrodos do sensor piezoelétrico (SAPPATI & BHADRA, 2018).

As pastilhas piezoelétricas com designação comercial PZT, formadas à base de zirconato-titanato de chumbo $[Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3]$, pertencem à classe dos dielétricos e são amplamente utilizados na engenharia. Materiais piezoelétricos sintéticos, por exemplo, podem ser produzidos através de polarização de um substrato apropriado mediante aplicação de um

forte campo elétrico a temperaturas elevadas (RAMOS, 2006). Vários tipos de materiais têm propriedades piezoelétricas, como os polímeros PVDF e seus copolímeros, ou cerâmicas, como o PZT e o titanato de bário, podendo apresentar variadas formas como filmes, discos, fibras, pós, entre outras (TULOUP *et al.*, 2019; BAI *et al.*, 2014).

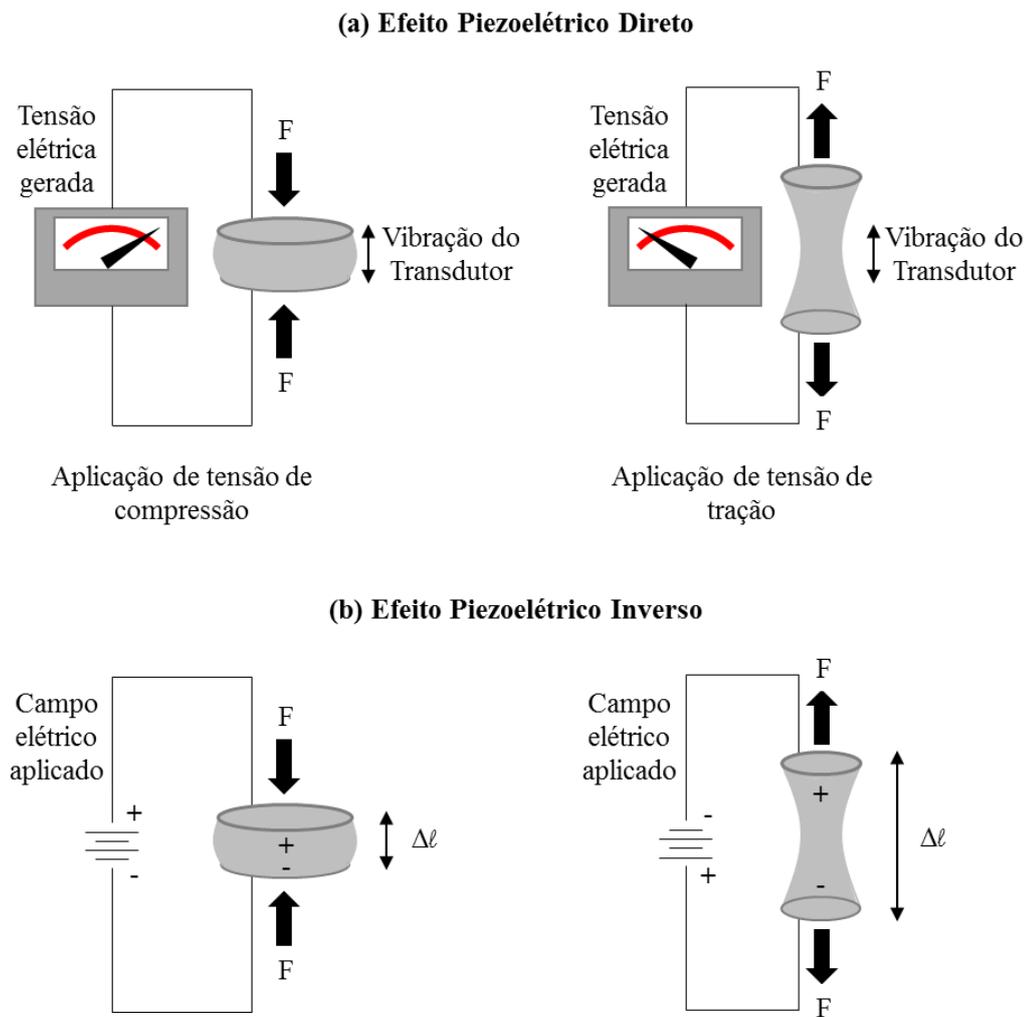


Figura 2.27 – Piezoeletricidade: efeito (a) direto e (b) inverso.
Fonte - Adaptado de RAZZINI, 2017.

Estudos recentes mostram a aplicação dos materiais piezoelétricos no campo dos sistemas microeletromecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* - MEMS), onde o acoplamento entre seu comportamento elétrico e mecânico pode ser usado em coletores de energia, explorando tanto o seu efeito direto (sensores) quanto o seu efeito inverso (atuadores). Tais sistemas, podem captar pequenas magnitudes de energia, como vibrações ambientais e são fontes potenciais para substituir baterias ou fiações complexas em microssensores e

microssistemas, colhendo no próprio local monitorado, a energia necessária para cumprir suas tarefas, e formando sistemas e redes de sensores autônomos (GAFFORELLI *et al.*, 2015).

Por outro lado, verifica-se também uma tendência de uso de materiais piezoelétricos como biossensores, embutidos no corpo de seres vivos, a fim de verificar deslocamentos e danos a biocomponentes, como próteses. Nesse caso, uma preocupação com a toxicidade do material piezoelétrico ao corpo humano vem sendo considerada, culminando na preferência de uso de piezoelétricos sem chumbo, como o Titanato de Bário (BaTiO_3) (QIAN *et al.*, 2020; GRINBERG *et al.*, 2019). Vatlin *et al.* (2020) investigaram a influência de filmes piezoelétricos, feitos a partir de policaprolactona, poli(3-hidroxi-butarato), PVDF e PVDF-TrFE - poli(fluoreto de vinilideno-trifluoroetileno), no crescimento de bactérias *Escherichia Coli*. Os autores encontraram uma inibição do crescimento dessas bactérias, por meio de estímulos mecânicos nas amostras piezoelétricas com o uso de ultrassom. Chernozem *et al.* (2019) também avaliaram o uso de piezoelétricos na medicina, afirmando que os estímulos elétricos gerados por esses materiais contribuem para o crescimento do tecido ósseo, influenciando na migração, na adesão e na secreção celular.

Com relação ao MIE, as pastilhas ou cápsulas de PZT tem sido muito utilizadas em métodos de análise por impedância eletromecânica, por emissão acústica e por ondas ultrassônicas guiadas, devido à facilidade de uso, ao bom desempenho como transdutor e ao baixo custo de aquisição (FIBOREK *et al.*, 2018; MEMMOLO *et al.*, 2018). As pastilhas PZT são facilmente encontradas no mercado, o que favorece a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias de instrumentação e de medição. Geralmente, essas pastilhas consistem em um disco de cerâmica piezoelétrica, aderida a uma placa de latão e revestida com uma película de metal que atua como eletrodo (CASTRO, 2016).

O estudo de Memmolo *et al.* (2018) retratou uma das maiores preocupações da indústria aeronáutica nos últimos anos, que é a avaliação e o controle de danos causados por impactos dinâmicos em estruturas aeronáuticas feitas com materiais compósitos. Os autores usaram pastilhas PZT para a excitação e a detecção de ondas ultrassônicas em compósitos, feitos com epóxi e fibras de carbono, e verificaram que o método é capaz de detectar e localizar danos com precisão, assim como delinear a extensão e a gravidade de problemas interfaciais em compósitos.

2.3.2 Aplicação dos sistemas de monitoramento de integridade estrutural na engenharia

De forma geral, o processo de monitoramento da integridade de uma estrutura visa o aumento de sua vida útil, por meio de um acompanhamento contínuo de sua “saúde”, ou seja, sua capacidade de executar as funções projetadas e esperadas durante sua operação. Nesses sistemas de monitoramento, uma rede de sensores projetada e posicionada adequadamente, incorporada interna ou externamente na estrutura sob inspeção, pode permitir a obtenção das informações desejadas que garantem o seu correto funcionamento (LI, Y. *et al.*, 2018).

A necessidade de se obter eficiência no MIE está ligada a fatores altamente estratégicos, que influenciam diretamente no custo final de uma determinada estrutura, como por exemplo, o uso de estruturas mais leves e com menor impacto ambiental, que tem se tornado um fator crucial para a diminuição contínua de gastos energéticos nos setores aeronáuticos e automobilísticos. Além disso, o aumento progressivo do uso de materiais compósitos laminados e de compósitos estruturais tipo sanduíche tem provocado uma maior demanda de MIE e cada vez mais com maior desempenho, uma vez que materiais podem sofrer danos não detectados por meio de inspeção visual (MITRA *et al.*, 2019).

A Figura 2.28 apresenta um sistema típico de MIE. Esses sistemas são compostos por um processo cíclico e contínuo que, conforme surgem danos na estrutura (Etapa 1), sinais são obtidos pelo sistema de sensoriamento (Etapa 2), e são direcionados a um sistema de condicionamento (Etapa 3). Em um outro momento, ocorre a aquisição desses dados filtrados, que permite a identificação do dano na estrutura (Etapa 4), servindo como base para a tomada de decisão (Etapa 5).



Figura 2.28 – O MIE e suas etapas: (1) ocorrência de falha na estrutura, (2) obtenção de sinais, (3) condicionamento e filtragem dos sinais, (4) identificação e análise do dano e (5) e tomada de decisão.

Fonte - CASTRO *et al.*, 2019a.

Diante da necessidade da correta inspeção estrutural, diversas técnicas para o MIE vem sendo desenvolvidas e aprimoradas. Um dos setores industriais que mais tem investido no desenvolvimento e na aplicação de novas tecnologias de MIE é a aeronáutica. Isso pode ser explicado pelo fato de que inspeções diárias são procedimentos imprescindíveis para a operação das aeronaves e representam um alto custo. Nesse mesmo contexto, os impactos ocasionados por objetos e corpos, como aves ou pedras de granizo, podem causar danos internos não visíveis a olho nu, que reforçam a necessidade de métodos robustos para o monitoramento da integridade dessas estruturas (CASTRO *et al.*, 2019a).

Com relação às técnicas utilizadas no MIE, elas podem variar conforme o fator de análise, como no objetivo (detecção, localização, identificação e quantificação da gravidade do dano ou prognóstico da vida útil remanescente da estrutura) e na forma de monitoramento (intrusivas, que são embutidas no interior do produto, ou externas, instrumentadas na superfície externa do produto). O uso de técnicas de ensaios não destrutivos, ou seja, que não culminem na destruição do objeto de análise, e que possibilitem a avaliação do início e da progressão de um determinado evento ou dano no material, tem sido mais eficiente para o MIE de materiais compósitos (DUCHENE *et al.*, 2018).

Quando se trata de avaliar o dano em uma estrutura, existem duas abordagens gerais para o MIE: a abordagem global, em que as mudanças nas propriedades vibracionais de uma estrutura causadas por danos são medidas e analisadas em um esforço para detectar e caracterizar o dano; e a abordagem local, em que a detecção e a caracterização do estado de dano de estruturas de compósitos é frequentemente realizada usando a propagação de ondas ultrassônicas (SHI *et al.*, 2014). Por sua vez, Medeiros *et al.* (2018) também enfatizam essas abordagens e afirmam que a caracterização de danos pode ser considerada em quatro níveis, que são a identificação (detecção), a localização e a extensão do dano e a resistência residual:

- Para a identificação do dano, técnicas baseadas em vibração têm se destacado, principalmente no campo da engenharia aeronáutica, para estabelecer características dinâmicas de estruturas vibratórias, como análise modal (como frequências naturais e modo de amortecimento);
- Para a localização dos danos, as técnicas como a interferometria óptica e a termografia no infravermelho têm sido amplamente usadas;
- Para a compreensão da extensão dos danos, técnicas semelhantes às utilizadas para a localização dos danos são usadas;

- Para a avaliação da resistência residual, geralmente efetua-se um estudo para avaliar a resistência mecânica da estrutura com o uso de diferentes e sucessivas energias de impacto. Esses testes tem como objetivo avaliar a capacidade de um elemento estrutural continuar desempenhando suas funções após sofrer um determinado impacto.

Sensores embutidos na estrutura do compósito possibilitam ganhos em termos de tempo e custo, evitando a interrupção do funcionamento da estrutura para operações de manutenção. Neste sentido, Balaji e Sasikumar (2017) propuseram um sistema de MIE baseado na incorporação de fibras de vidro revestidas com óxido de grafeno reduzido em compósitos de epóxi reforçados com fibras de vidro. A deformação induzida e o grau de dano acumulado nos compósitos, após a aplicação de uma força uniaxial, foram investigados. Os resultados foram baseados na resposta piezorresistiva das fibras revestidas, que pode ser explicada pela teoria da percolação e do efeito de tunelamento quântico. A teoria da percolação se aplica à formação de uma rede de condução entre as nanopartículas condutoras, e seu limiar é uma concentração crítica de peso de nanopartículas, na qual as fibras revestidas terão maior probabilidade de ter uma melhor condutividade elétrica. Já o efeito de tunelamento quântico pode ser explicado pela transferência de elétrons entre partículas através de um material isolante (no caso, a matriz epóxi). Uma tensão constante de 5 V foi fornecida durante os ensaios de tração, para medir a variação na resistência elétrica do material. Duas sondas foram anexadas às fibras revestidas para a captação de corrente e de tensão elétrica e possibilitaram um monitoramento on-line da estrutura.

A Figura 2.29 mostra os principais tipos de NDT usados no MIE, considerando sensores externos. Para o MIE com sensores internos à estrutura, testes elétricos, ópticos, térmicos e acústicos se destacam na literatura (TULOUP *et al.*, 2019, SELVA *et al.*, 2013).

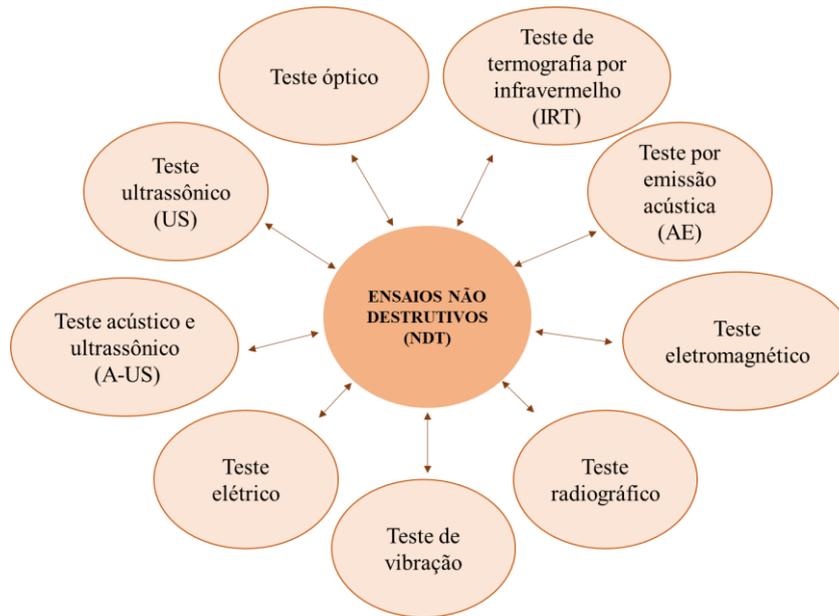


Figura 2.29 – Técnicas de NDT para uso externo em MIE.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

2.3.2.1 Testes radiográficos

Dentre os testes radiográficos, a radiografia convencional é amplamente abordada na literatura e consiste no uso de um feixe de raios-X penetrante para escanear a estrutura interna de materiais compósitos. Uma projeção do feixe atenuado em um filme sensível a raios X ou um escaneamento digital forma uma imagem em 2D, chamada de radiografia. Ela representa uma cartografia de atenuação de raios-X causada por mudanças na densidade eletrônica ao longo da direção do feixe. A radiografia pode ser usada para detectar danos em laminados compósitos, como rachaduras interlaminares e delaminação, e permite principalmente a detecção de fissuras que evoluem no plano transversal à direção do feixe (DUCHENE *et al.*, 2018). Guild *et al.* (2006) investigaram a existência de rachaduras intralaminares em compósitos de epóxi reforçados com fibras de carbono, por meio de radiografias (raios-X). Os autores realizaram ensaios de tração (velocidade de 0,5 mm/min) e testes de fadiga mecânica. Os corpos de prova foram entalhados e o comprimento da fissura em função do número do ciclo foi monitorado usando radiografias, com o uso de um corante penetrante. Foram verificadas rachaduras (setas vermelhas na Figura 2.30) tanto próxima quanto longe dos entalhes, como mostra a Figura 2.30, com radiografias em compósitos $[0_2/75_4]_s$, numa progressão da taxa de deformação em 0,1%.

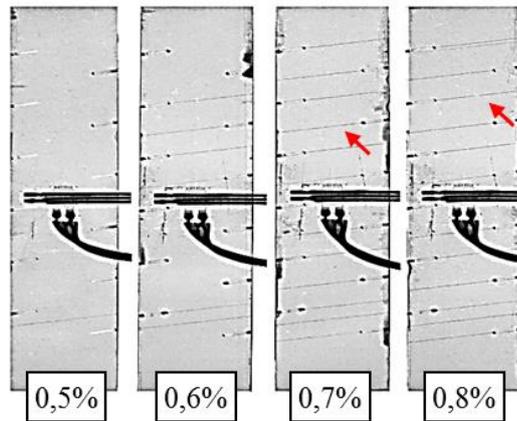


Figura 2.30 – Radiografias com o uso de corante penetrante em compósitos de epóxi e fibras de carbono, denotando trincas (riscos denotados pelas setas vermelhas) com o aumento da taxa de deformação.

Fonte - GUILD *et al.*, 2006.

2.3.2.2 Testes eletromagnéticos

Com relação à utilização de testes eletromagnéticos para o MIE, Li, Z. *et al.* (2018) forneceram uma visão abrangente das técnicas de micro-ondas atualmente disponíveis, destinadas à MIE em compósitos poliméricos com fibra de carbono. Os autores enfatizaram, inicialmente, a influência das propriedades eletromagnéticas dos compósitos de fibra de carbono na eficiência do teste. A alta condutividade das fibras de carbono faz com que haja a reflexão da maior parte da energia do sinal incidente. A resina epóxi, por outro lado, é dielétrica, e seu fator de perda é insignificante (pouca energia é absorvida no material), sendo transparente à radiação de micro-ondas. No trabalho, foram caracterizados métodos de autodetecção (o compósito como um condutor em um circuito, com qualquer dano causando perturbação ao sistema), de indução a curta distância (baseada na lei de Faraday de indução eletromagnética e em correntes parasitas), de ressonância a curta distância (mudanças na frequência de ressonância, em casos de descontinuidades na superfície) e de detecção a longa distância (absorção de radiação). Os autores também afirmam que micro-ondas também podem ser usadas em conjunto com outros NDT, como a técnica de termografia no infravermelho.

2.3.2.3 Testes por emissão acústica (AE)

De acordo com Crivelli *et al.* (2015), a técnica de emissão acústica, largamente verificada na literatura, é classificada como passiva, uma vez que não requer que sinais sejam emitidos (isto é, não introduz energia na estrutura) para detectar danos. Ela apenas aguarda que

os sinais, originados dentro do material por algum dano ou processo de liberação de energia, sejam devidamente registrados. Isso pode representar uma vantagem, uma vez que não exige a varredura contínua da estrutura ou o registro contínuo de dados em busca de um defeito potencial. Porém, pode também representar uma desvantagem, pois não fornece informações sobre a estrutura quando ela não está carregada, ao contrário de outras técnicas de ensaios não destrutivos (como a radiografia e o ultrassom). Ela baseia-se na observação de que os materiais, quando submetidos a algum tipo de dano, liberam energia na forma de ondas elásticas curtas e transitórias na faixa de ultrassom (100-1000 kHz). Tais ondas propagam-se na estrutura através do material e de sua superfície e, finalmente, dissipam-se devido a vários fenômenos, podendo ser gravadas por meio de sensores apropriados, como os sensores piezoelétricos. Masmoudi *et al.* (2015) investigaram a influência de vários sensores piezoelétricos integrados internamente em compósitos estruturais (laminados e sanduíches), com o uso da técnica de emissão acústica, e associaram os sinais obtidos pelos sensores aos principais modos de falha presentes na estrutura, após testes de flexão e compressão. A técnica de emissão acústica possibilitou a localização do defeito, assim como a caracterização dos materiais por meio da relação entre o sinal obtido pelos sensores e o dano visualizado após os testes mecânicos. A Figura 2.31 mostra a amplitude dos sinais obtidos nos testes de flexão de corpos de prova sem sensor (Figura 2.31a) e com sensor integrado (Figura 2.31b). Pontos em rosa denotam falhas por fraturas na matriz, pontos em azul denotam descolamentos entre matriz e fibras, pontos verdes denotam fraturas em fibras e pontos vermelhos denotam delaminação.

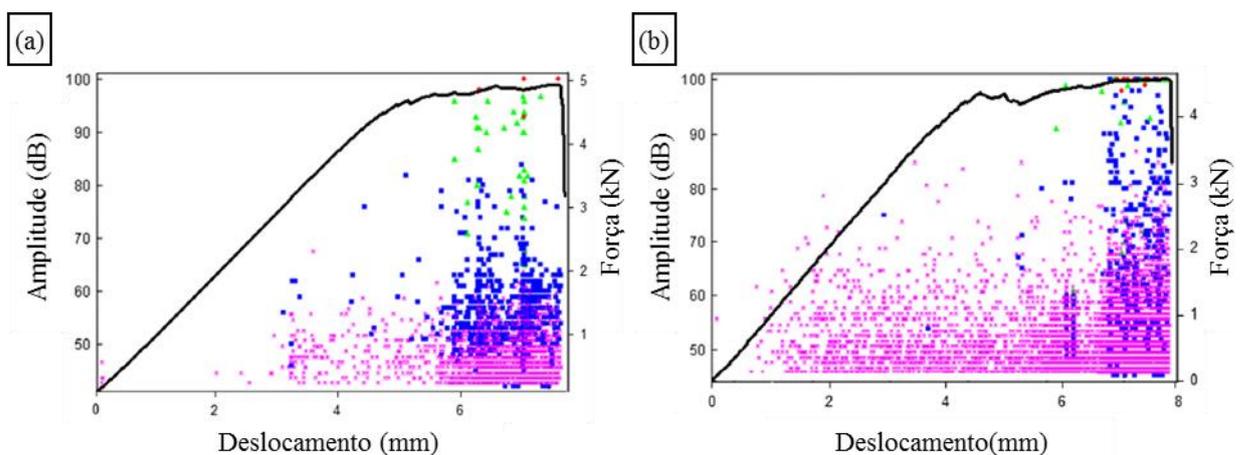


Figura 2.31 – Distribuição de amplitude de sinais obtidos por emissão acústica em ensaios de flexão de compósitos laminados (a) sem sensor integrado e (b) com sensor integrado.

Fonte – Adaptado de MASMOUDI *et al.*, 2015.

2.3.2.4 Testes de termografia por infravermelho (IRT)

A técnica de termografia por infravermelho, por sua vez, se mostra uma solução eficaz e econômica de NDT, pois quando há uma carga mecânica cíclica em um material compósito, ocorre naturalmente uma determinada variação em sua temperatura. Essa técnica pode ser aplicada tanto no modo passivo como no modo ativo. No modo passivo, os materiais estão em uma temperatura diferente em relação aos materiais circundantes. No modo ativo, precisa-se de um estímulo externo para induzir uma variação de temperatura superficial. A termografia passiva tem um caráter qualitativo, enquanto que a termografia ativa permite que análises qualitativas e quantitativas sejam realizadas (MUC *et al.*, 2018). O trabalho de Stawiarski (2018) investigou o método de propagação de ondas na superfície do material em conjunto com a termografia por infravermelho, a fim de observar a evolução do dano por fadiga em compósitos de epóxi e fibras de vidro, com furo elíptico no centro. A técnica de medição ativa de *Pitch-catch* foi empregada adotando transdutores piezoelétricos na superfície do material. Os posicionamentos do atuador piezoelétrico e dos sensores foram escolhidos com base na análise de falha progressiva pelo método dos elementos finitos. O uso da termografia por infravermelho possibilitou a detecção do início do dano e do monitoramento permanente na estrutura, sem utilizar algoritmos e softwares complexos. A Figura 2.32 mostra a distribuição de temperatura em um compósito com furo elíptico, a partir do teste de fadiga com 270000 ciclos.

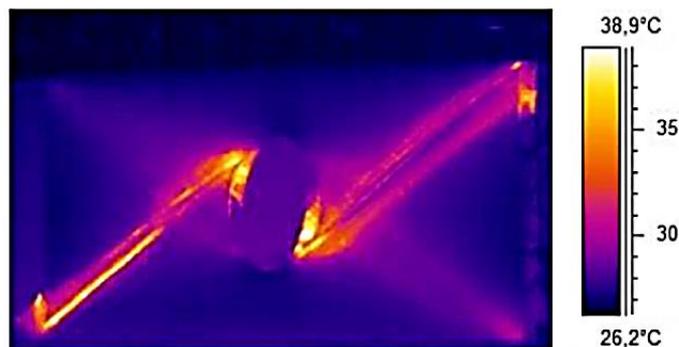


Figura 2.32 – Uso de termografia em compósitos com orifício elíptico central.
Fonte – Adaptado de STAWIARSKI *et al.*, 2018.

2.3.2.5 Testes ópticos

Com relação aos testes ópticos, inspeções baseadas nas técnicas de interferometria holográfica, interferometria por padrão de *Speckle* e de correlação de imagem digital (CID) são amplamente usadas para medições de campo total. As técnicas por interferometria oferecem

alta sensibilidade em função do curto comprimento de onda do laser (próximo de $0,5 \mu\text{m}$) combinado com métodos de identificação de fase, porém necessitam de equipamentos complexos e de alto custo. Por outro lado, técnicas sem interferometria, como a CID, são menos sensíveis, pois dependem da resolução espacial do sistema de observação, como sensores de câmeras (BRUNO, 2018). A técnica por CID é usada para medir deformações de campo inteiro no plano (2D) ou fora do plano (3D) na superfície de uma amostra sob condições de cargas estáticas ou dinâmicas. Através dessa técnica, mapas de deformação macroscópicos podem ser obtidos. Softwares que auxiliam a CID estão cada vez mais confiáveis em relação a outras técnicas de medição de deformação, como a fotoelasticidade (DUCHENE *et al.*, 2018). Destaca-se também a incorporação de sensores de fibra óptica, que possibilitam a detecção de deformação e temperatura de estruturas. Vários tipos de tecnologias avançadas de sensoriamento baseadas em sensores de fibra óptica foram desenvolvidos para esse propósito, como as técnicas baseadas no interferômetro Fabry-Perot, no espalhamento Brillouin e em redes de Bragg em fibras ópticas (VALVONA *et al.*, 2017).

2.3.2.6 Testes ultrassônicos (US)

Os testes ultrassônicos têm se destacado no MIE de compósitos, com um uso constante de materiais piezoelétricos. Essa técnica necessita que os transdutores piezoelétricos atuem nos modos ativo e passivo para gerar e receber ondas ultrassônicas, a fim de detectar e localizar defeitos na estrutura. O trabalho de Tripathi *et al.* (2019) enfatiza que a inspeção ultrassônica é eficaz na identificação de danos em estruturas, porém apresenta problemas quanto à classificação dimensional dos danos semelhantes. Com base em pastilhas PZT, os autores usaram uma nova abordagem não convencional com o uso de aprendizagem de máquina (com o algoritmo do k-vizinho mais próximo) que forneceu até 98% de precisão de classificação dos danos semelhantes (até $100 \mu\text{m}$ em diâmetro), enquanto que os convencionais que usam séries temporais de dados não costumam atingir 70% de precisão nesse quesito.

2.3.2.7 Testes acústicos e ultrassônicos (A-US)

O uso concomitante de testes acústicos e ultrassônicos (*acousto-ultrasonics testing*) têm sido estudado nos últimos anos, ganhando destaque em termos de custo, resolução, detectabilidade e praticidade. Dentro desse contexto, Liu *et al.* (2017) usaram um nanocompósito com CB e PVDF como um sensor ultrassônico de alta largura de banda em um

sistema de MIE ativo-passivo. Os nanossensores, juntamente com wafers de PZT, foram fixados em superfícies de compósitos de epóxi reforçado com fibras de vidro. Foram realizados testes de queda de peso (energia de $6,3 \times 10^{-3}$ J), induzindo vibração de baixa frequência (2000 Hz) através de ondas por emissão acústica (modo passivo), a ondas ultrassônicas guiadas de até 400 kHz (modo ativo), com alta fidelidade e sensibilidade, além de uma rápida resposta. De acordo com os autores, devido às diferentes filosofias desses dois tipos de sensores (um efeito piezoelétrico pelo wafer de PZT, e um efeito piezorresistivo induzido pelo efeito de tunelamento do sensor nanocompósito desenvolvido), diferentes métodos de aquisição de sinal foram adotados. Os resultados mostraram uma boa aplicabilidade do sensor nanocompósito na identificação de danos na localização de impacto (usando ondas de baixa frequência pela técnica de emissão acústica) e avaliação quantitativa de danos (usando ondas guiadas de ultrassom de alta frequência).

2.3.2.8 Testes elétricos

Com relação aos testes elétricos, Tallman *et al.* (2014) afirmam que a tomografia por impedância elétrica se destaca como sendo um eficiente método de geração de imagens. Essa técnica tem um alto potencial para o MIE por ser de baixo custo e denotar mudanças de condutividade em termos espaciais, além de requerer medições pouco invasivas e poder ser usada praticamente on-line. Os autores investigaram compósitos de epóxi reforçados com nanofibras de carbono (1% em peso), criando matrizes de autodeteção que possibilitaram o mapeamento de danos, por meio da técnica de tomografia por impedância elétrica (imagens de distribuição de condutividade elétrica, com base na comparação entre a tensão elétrica obtida analítica e experimentalmente) e da análise da influência de efeitos térmicos na variação da condutividade elétrica (efeito de tunelamento). Os autores salientaram o potencial da técnica no MIE de compósitos, porém ressaltaram que a não uniformidade na dispersão das nanofibras de carbono pode influenciar nos resultados.

A técnica de impedância eletromecânica também tem sido largamente usada no MIE de compósitos. Selva *et al.* (2013) apresentaram um método de MIE para detecção e localização de danos em compósitos de epóxi reforçados com fibras de carbono, usando transdutores piezoelétricos como sensores modais de alta frequência. Segundo os autores, a técnica de impedância eletromecânica possui vantagens como a capacidade de detectar danos incipientes usando transdutores piezoelétricos não intrusivos e baixo custo de aplicação. Além disso, métricas de dano foram usadas para quantificar e detectar mudanças entre o espectro de

impedância eletromecânica de estruturas intactas e danificadas. Por meio de ensaios de impacto por queda de peso, os compósitos foram submetidos a uma energia de 20 J. Simulações numéricas foram usadas para criar vários cenários de danos. O espectro de impedância resultante foi usado para construir um banco de dados composto de vários indicadores, capaz de estimar a localização de danos previamente detectados, por meio de redes neurais probabilísticas.

2.3.2.9 Testes de vibração

Por fim, a técnica baseada em vibrações é voltada para a detecção de parâmetros modais, tipicamente frequências naturais, cujas estimativas são continuamente extraídas dos dados de monitoramento, com o uso de técnicas de análise modal de saída automatizada. De acordo com Tsogka *et al.* (2017), o uso dessa técnica tem sido muito empregada no setor da construção civil, com aplicações também na geofísica, para detectar variações na velocidade com que ondas se propagam na crosta terrestre, a partir de gravações de ruído sísmico. A Figura 2.33 mostra o sistema de monitoramento de vibrações da torre da Basílica de San Pietro, em Perugia (Itália), que possui três acelerômetros uniaxiais piezoelétricos de alta sensibilidade, fixados na base do cúspide da torre.

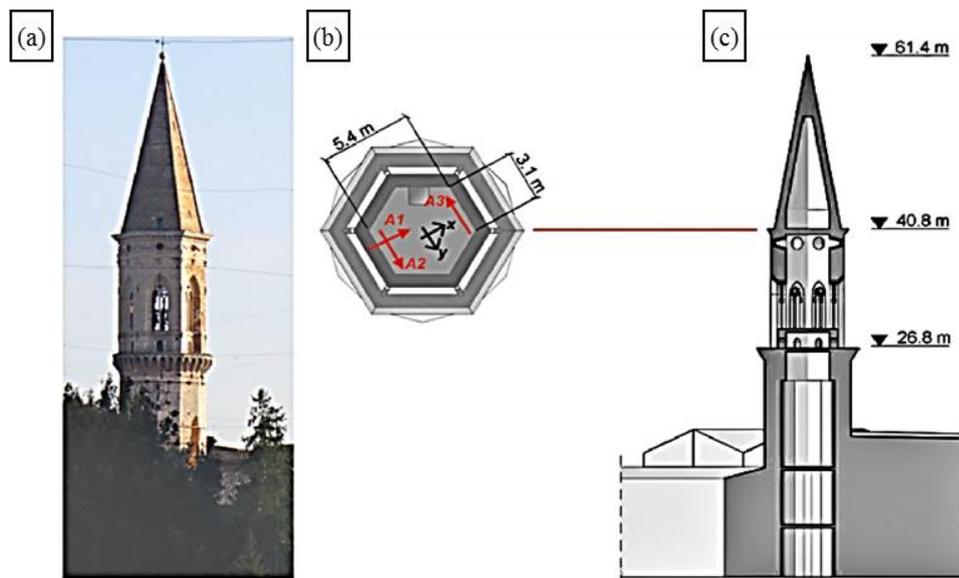


Figura 2.33 – Uso de acelerômetros piezoelétricos na Torre da Basílica de San Pietro, Perugia, Itália: (a) fotografia da torre, (b) posição dos acelerômetros (A1, A2 e A3), na altura de 40,8 m e (c) visão da seção transversal da torre.

Fonte - TSOGKA *et al.*, 2017.

As técnicas de ensaios não destrutivos apresentadas possuem características particulares que devem ser cuidadosamente analisadas, com base no tipo de material a ser avaliado e no investimento necessário para a instrumentação do teste ou do monitoramento contínuo. Salienta-se que a técnica baseada em vibrações possibilita um estudo para a análise da absorção de energia de impacto em painéis sanduíches, com base no uso de transdutores piezoelétricos, avaliando o amortecimento do impacto, com base na variação da amplitude da tensão elétrica gerada.

2.3.3 Análise do efeito do impacto em estruturas

A energia de impacto tem sido profundamente estudada na engenharia, sobretudo pela constante exposição de estruturas a cargas dinâmicas. Nesse contexto, o interesse em materiais compósitos por setores industriais como a aeronáutica, o automobilismo e a construção civil, tem incentivado um avanço tecnológico nas análises sobre o efeito do impacto em estruturas, sob diferentes intensidades (WAGNER *et al.*, 2018; KAZEMI-KHASRAGH *et al.*, 2018).

As aeronaves, por exemplo, estão constantemente expostas a choques mecânicos e, ao mesmo tempo, usam materiais estruturais cada vez mais leves, devido ao emprego de materiais compósitos. A substituição de materiais homogêneos (como estruturas metálicas) por materiais microscopicamente heterogêneos pode trazer ganhos em termos de economia energética, porém, reforça a necessidade de investigação dos fenômenos do impacto, que ocorrem em cada um de seus materiais constituintes e na relação interfacial entre eles. Colisões com pássaros e com pedras de granizo podem trazer danos à estrutura de uma aeronave e podem passar despercebidos em uma inspeção visual (JUNG & CHANG, 2019). A Figura 2.34 mostra o dano causado por um bando de pássaros, resultante de um choque na região frontal de um avião.



Figura 2.34 – Impacto de um bando de pássaros na região frontal de um avião.
Fonte - BBC UK, 2015.

No estudo dos materiais compósitos poliméricos, o comportamento mecânico é extremamente dependente da deformação, da taxa de deformação e da temperatura, devido à sua natureza viscoelástica. Polímeros podem sofrer fraturas no modo frágil ou dúctil, além da possibilidade de haver uma transição dúctil-frágil, em função de mudanças na temperatura, na taxa de deformação, no tamanho da amostra e no modo de aplicação da carga. Um material com elevada tenacidade (habilidade que um material possui em absorver energia sem fraturar) é definido como dúctil, pois apresentam uma fratura dúctil, e materiais com baixa tenacidade são denominados frágeis, apresentando uma fratura frágil (CANEVAROLO JÚNIOR, 2004; CALLISTER JR & RETHWISCH, 2016). Por isso, a previsão da resposta ao impacto global e ao impacto local dinâmicos em estruturas de materiais compósitos é essencial durante a fase de projeto (PLAGIANAKOS & PAPADOPOULOS, 2014).

Na literatura, são verificadas diversas metodologias de ensaios para o estudo do impacto em materiais compósitos poliméricos. Garcia *et al.* (2000) consideram os ensaios de impacto Charpy e Izod como os mais padronizados, podendo inclusive determinar se o material possui ou não uma transição dúctil-frágil com o decréscimo da temperatura e, em caso positivo, em que faixa de temperatura isso ocorre. Os ensaios de Impacto Charpy e Izod são realizados por meio de uma carga aplicada como um impacto instantâneo, transmitida a partir de um martelo pendular balanceado, liberado de uma altura fixa. Esses testes são realizados a baixas velocidades, o que interfere diretamente no modo de falha do material. A energia cinética alcançada pelos pêndulos nesses testes é comumente compreendida entre 2,7 e 22 J (LOKENSGARD, 2013).

Além dos testes com o uso de pêndulo (Charpy e Izod), o ensaio de impacto por queda de peso (*drop weight test*) é também amplamente utilizado para a avaliação da energia absorvida ao impacto, sobretudo no estudo de materiais compósitos. Nesses ensaios, um objeto impactante de grande massa é liberado verticalmente e transdutores fornecem dados relativos à energia, força e deflexão. Este teste é comumente classificado como um teste de impacto de baixa velocidade (RAHMAN *et al.*, 2018; LIANG *et al.*, 2015).

Em tempos recentes, diversos trabalhos com ensaios de impacto por queda de peso em materiais compósitos podem ser verificados na literatura, envolvendo análises tanto quantitativas quanto qualitativas. A partir disso, percebe-se um grande volume de estudos que considera uma faixa de energia de impacto compreendida entre 2 e 25 J, com impactadores atingindo velocidades entre 3 e 8 m/s, apresentando massas acima de 1 kg (ZHU & CHAI, 2012; QUARESIMIN *et al.*, 2013; AGAYEV & OZDEMIR, 2019; JUNG & CHANG, 2019). Esses valores são geralmente justificados pela importância de se analisar a integridade do

material após a realização do impacto, destacando os danos pouco visíveis que ocorrem internamente à estrutura e sua resistência residual, em detrimento de energias que levem ao completo colapso da estrutura. Salienta-se também que os testes por queda de peso são utilizados para a validação de sistemas de MIE, simulando possíveis danos que uma estrutura feita de um dado material pode sofrer durante a sua operação.

Jálon *et al.* (2018) realizaram ensaios de impacto por queda de peso em biocompósitos de matriz de PLA reforçada com linho, usando uma máquina Ceast Fractovis 6875 (Instron). Foram testados impactadores de ponta semiesférica, diâmetros de 12,7 mm e 20 mm, com massas de 3,76 kg e 3,815 kg. A energia de impacto variou entre 3,8 J e 10 J, para verificar diferentes modos de fraturas. Buscou-se não alcançar a energia para a perfuração dos corpos de prova, produzindo assim danos pouco visíveis, que acarretam na diminuição da resistência residual do material. Segundo os autores, deve-se considerar o comportamento plástico e a influência da taxa de deformação para prever o comportamento dinâmico dos biocompósitos. Além disso, os autores alertam para uma lacuna na literatura, relacionada à ausência da inclusão do comportamento viscoplástico em modelos preditivos usando o método de elementos finitos (MEF).

O estudo de Xin *et al.* (2019) traz uma aplicação comum dos testes por queda de peso, que é a avaliação do modo de falha de compósitos sanduíches, após a solicitação mecânica de impacto. Os autores analisaram a influência do formato da ponta do impactador, da velocidade de impacto e da espessura das camadas que compõem um painel de espuma de alumínio e epóxi, nas curvas de força por tempo, força por deslocamento, energia por tempo e a energia absorvida. Uma máquina Instron Ceast 9350 foi usada para os testes de queda de peso, nas quais impactadores foram lançados em velocidades de 5 a 8 m/s. Os autores testaram três tipos de impactadores (tipo cilíndrico com ponta plana, tipo cilíndrico com ponta semiesférica e tipo paralelepípedo com ponta plana) e concluíram que a ponta do impactador influenciou diretamente no modo de falha do painel, fenômeno evidenciado pela Figura 2.35. As pontas planas provocaram trincas próximas às arestas do plano da ponta do impactador, enquanto que a ponta semiesférica gerou trincas próximas à região central da ponta, provocando fraturas radiais na parte inferior do material. O aumento da velocidade de impacto, por sua vez, influenciou na redução do tempo de duração do impacto e no aumento da taxa de crescimento da absorção de energia.

Bělský e Kadlec (2019) realizaram ensaios de impacto por queda de peso em painéis sanduíches com faces de tecidos de fibras de carbono impregnados com epóxi e núcleos de *honeycomb* (Nomex®) e de espuma polimérica (Airex®). Usando dois tipos de impactadores

(diâmetros de 12,7 e 25,4 mm), energias de impacto entre 2,5 e 15 J foram alcançadas. Os autores verificaram danos visíveis e não visíveis (detectados com o auxílio de NDT como ultrassom C-scan), nos quais delaminações, fraturas na matriz, fraturas nas fibras, descolamentos, flambagem do núcleo e trincas foram destaques.

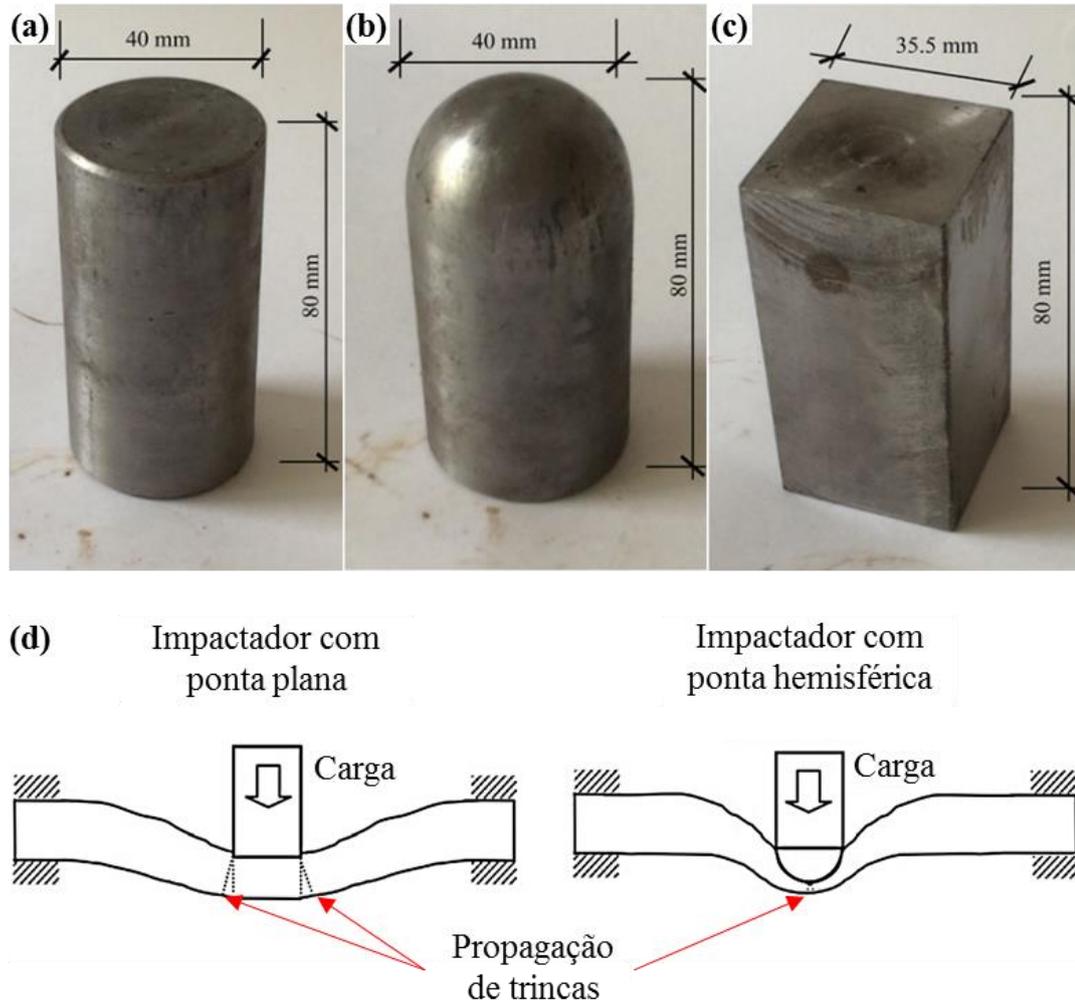


Figura 2.35 – Influência da ponta do impactador no modo de falha do material sob impacto: impactadores do tipo (a) cilíndrico com ponta plana, (b) cilíndrico com ponta semiesférica e (c) paralelepípedo com ponta plana, e (d) formas de propagação de trincas resultantes da variação da ponta do impactador.

Fonte - XIN *et al.*, 2019.

O fenômeno do impacto em uma estrutura, quando verificado em altas velocidades, se caracteriza como um choque dinâmico que requer uma análise particular com relação aos mecanismos de danos e que pode levar o material a um colapso prematuro se comparado ao projetado, durante sua vida útil (WANG *et al.*, 2015). Especialmente em estruturas poliméricas, de acordo com Lemaitre e Desmorat (2010), falhas dinâmicas envolvem altas taxas de

deformação, cujos efeitos estão ligados à viscoplasticidade desses materiais. A penetração de impactadores em altas velocidades envolvem zonas de cisalhamento adiabático, instabilidades térmicas e plásticas, e altos gradientes de tensões.

Existem diversas abordagens que diferenciam ensaios de impacto sob baixa e alta velocidade, porém não há um consenso. Os estudos de Richardson e Wisheart (1996) afirmaram que velocidades acima de 10 m/s já são considerados eventos de alta velocidade, pois já evidenciam fenômenos peculiares e característicos nos corpos de prova. Silva (2006), por sua vez, considerou que velocidades a partir de 11 m/s caracterizam eventos de alta velocidade, como o contato de fragmentos e pedras na fuselagem e em partes de aeronaves, em operações de aterrissagem. Wang *et al.* (2016) já considera uma outra classificação, em que velocidades até 10 m/s são de baixa velocidade, entre 10 m/s e 50 m/s são de média velocidade e velocidades entre 50 e 1000 m/s são de alta velocidade. Os autores salientam que há uma notável lacuna de estudos experimentais sobre impacto em médias velocidades, ao contrário do verificado para testes de impacto em baixas (uso de queda de peso e pêndulos) e altas velocidades (balísticos com choques explosivos), considerando a classificação proposta.

De uma forma geral, testes de impacto balísticos em materiais compósitos estão associados, na literatura, a plataformas providas de armas ou pistolas a gás, possibilitando o disparo de projéteis de baixa massa (geralmente abaixo de 100 g) a altas velocidades. Diversos estudos mostram que as velocidades verificadas nesses ensaios são maiores que as encontradas nos ensaios de impacto com uso de pêndulos e por queda de peso (MOALLEMZADEH *et al.*, 2017; KAZEMI-KHASRAGH *et al.*, 2018; WAGNER *et al.*, 2018; TIRILLÒ *et al.*, 2017).

Cantwell e Morton (1989) e Yashiro *et al.* (2013) relatam diferenças na deformação do alvo em ensaios de impacto em baixa e alta velocidade, sendo que no segundo há uma deformação mais localizada (energia dissipada em um menor área adjacente ao ponto de impacto). Olsson (2003) afirma que diferenças na massa do impactador denotam alterações na resposta do corpo, em que impactadores de maiores massas afetam mais as condições de contorno, e aqueles de menores massas geram uma resposta controlada por onda que considera, em menor grau, as condições de contorno do alvo.

A Figura 2.36 mostra um esboço de uma típica plataforma dotada de uma arma a gás, em ensaios do tipo balístico. A arma a gás é usada para o disparo de impactadores cilíndricos com pontas geometricamente específicas, que atingem um corpo de prova na forma de placas retangulares. Medidores de velocidade são usados para quantificar a energia cinética de impacto. Por fim, transdutores possibilitam a aquisição dos dados e posteriores análises quantitativas e qualitativas do teste.

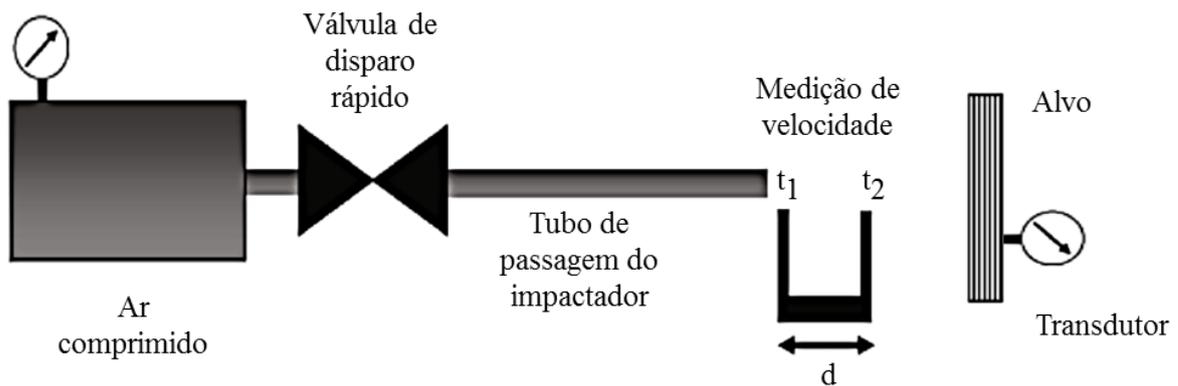


Figura 2.36 – Configuração típica de uma plataforma de ensaios balísticos.
 Fonte - Adaptado de AZEVEDO, 2017.

Com relação à forma de estudo da resposta ao impacto de um determinado material, Justo (1996) afirma que a complexidade de um ensaio de impacto sob alta velocidade pode ser melhor compreendida por meio de estudos experimentais, analíticos e numéricos. As três formas de estudo tem sido utilizadas nos últimos anos (KABOGLU *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2017; TIRILLÒ *et al.*, 2017).

Kazemi-Khasragh *et al.* (2018) utilizaram ensaios de impacto em alta velocidade para analisar a resposta ao impacto de compósitos de epóxi reforçados com fibras de basalto e nanoplaquetas de grafeno. Os testes ocorreram em uma plataforma balística com o uso de uma pistola a gás, cuja velocidade de impacto foi fixada em 116 m/s. Foram utilizados projéteis cilíndricos de alumínio com ponta cônica, massa de 27 g, lançados em corpos de prova de tamanho 130 x 130 mm². A energia absorvida pelos compósitos variou entre 84 e 104 J. No estudo, foram verificadas falhas relacionadas à problemas de adesão interfacial nas condições sem a adição de grafeno, gerando fenômenos como delaminação e fraturas de fibras.

Liu *et al.* (2019) investigaram o comportamento sob impacto de compósitos de fibras de carbono tecidas impregnadas com resinas de poli(éter-éter-cetona) (PEEK) e epóxi. Testes balísticos foram realizados com uso de gás hélio pressurizado, que resultou no lançamento de dois tipos de projéteis: um projétil cilíndrico gelatinoso, de ponta plana e 20 g de massa, e um projétil de alumínio, de ponta semiesférica, com 28 g de massa. Por meio de uma válvula de disparo rápido, os projéteis percorreram uma barra de três metros, alcançando velocidades entre 42 e 100 m/s, pelo projétil gelatinoso, e entre 30 e 77 m/s, pelo projétil de alumínio. Duas câmeras de alta velocidade, com taxa máxima de 39000 quadros por segundo, foram usadas para a obtenção do histórico de deformação da placa nos ensaios, possibilitando o uso da técnica de CID em 3D. Além disso, a área de dano foi quantitativamente estimada, como mostra a Figura 2.37.

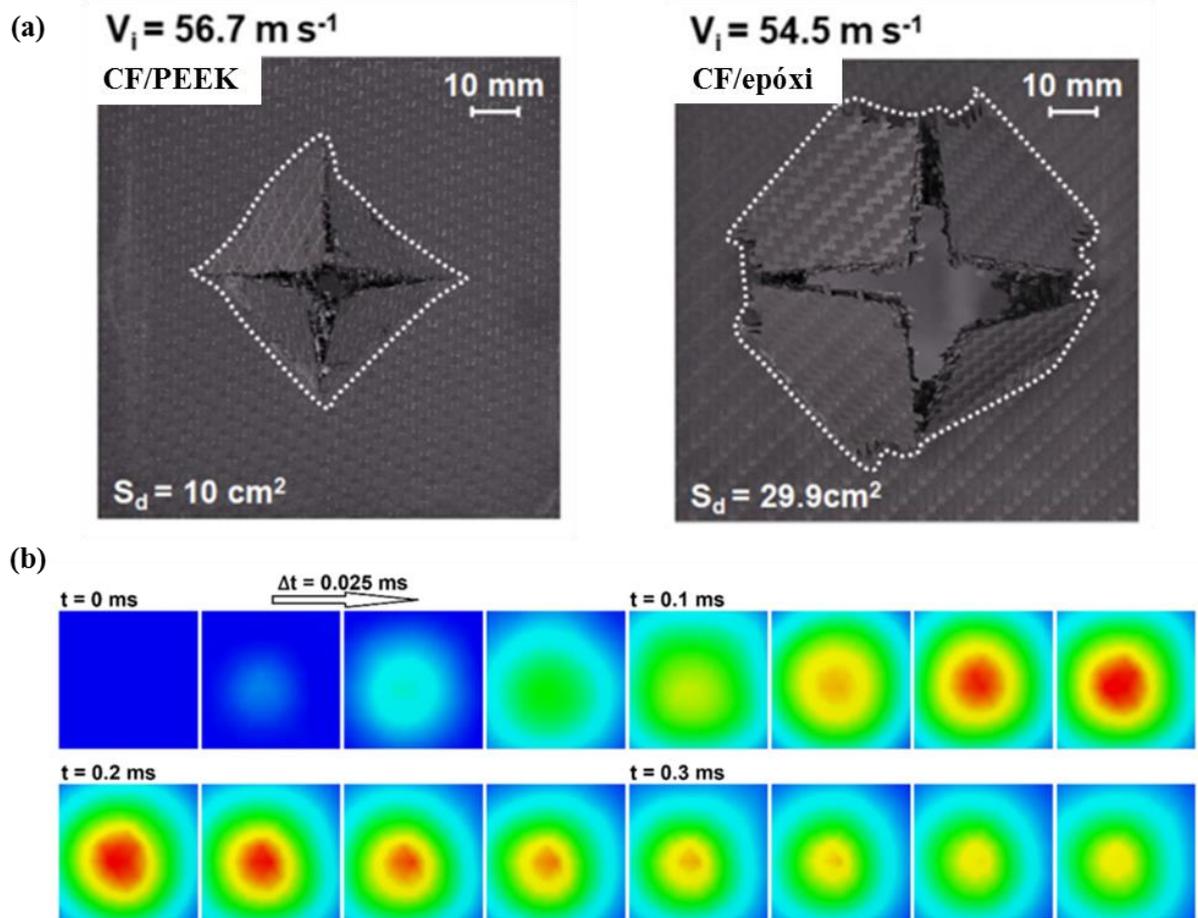


Figura 2.37 – (a) Análise da área de dano (S_d) provocada pelo projétil de alumínio nos compósitos e (b) mapa do deslocamento por tempo no compósito com epóxi reforçado com fibras de carbono, no impacto com projétil gelatinoso a 100 m/s. Fonte - LIU *et al.*, 2019.

Com relação aos estudos experimentais de impacto sob alta velocidade encontrados na literatura, nos últimos anos, verifica-se o uso de tecnologias de alto custo, como o uso de células de cargas de alta sensibilidade e de câmeras de alta velocidade (com altas taxas de quadros por segundo). Esses fatores aumentam consideravelmente o custo total necessário para a aquisição ou para a construção dessas plataformas. Além disso, o conhecimento prévio, em termos de resistência e rigidez mecânica, do tipo de material a ser testado pela plataforma, pode otimizar os custos, uma vez que evita investimentos desnecessários em termos de capacidade de geração de energia de impacto e de sensibilidade na captação dos sinais. Nesse contexto, o uso da abordagem numérica com base no MEF mostra-se bastante útil, considerando um cuidado com o estudo de refinamento de malhas para a redução do custo operacional da análise.

Soriano (2009) afirma que o MEF é a mais eficiente ferramenta numérica de resolução de equações diferenciais com condições de contorno e pode ser utilizado para a compreensão da progressão de falhas nos materiais. O uso concomitante dos métodos experimentais e

numéricos são comuns em estudos de ensaios de impacto de materiais compósitos, pois são importantes na etapa de projeto de uma determinada estrutura, desde a análise de um peça de um componente até a estrutura final desejada. A simulação numérica possibilita uma diminuição nos custos com experimentos destrutivos, visto que a previsão do comportamento de um material pode ser feita de forma computacional.

Wang *et al.* (2015) utilizaram o MEF para investigar numericamente a deformação por impacto de painéis de tecido de aramida de múltiplas camadas anguladas e a absorção de energia em diferentes construções de painéis. Usando o software Abaqus®, os autores estudaram a distribuição das deformações dentro das camadas do painel. Fatores como a velocidade de impacto (até 540 m/s), a construção do painel e o número de camadas foram levados em conta nas simulações. As previsões numéricas evidenciaram a influência da orientação das camadas na capacidade de absorção de energia dos painéis de tecido de múltiplas camadas. Com a utilização de painéis com fibras tramadas em diferentes direções, houve um aumento de até 20% na capacidade de absorção de energia, em comparação com o painel alinhado em uma só direção, dependendo do número de camadas no painel. A sequência de empilhamento de camadas também desempenhou um papel importante na absorção da energia.

Zhang *et al.* (2017) implementaram um modelo de três células unitárias para simular o processo de penetração de projéteis sob alta velocidade em compósitos de epóxi e fibras de carbono trançadas em 3D, a fim de estudar a resistência balística e os mecanismos de danos no impacto. Foram adotados os critérios de Tsai-Wu e von Mises para a iniciação de danos nos fios e na matriz, respectivamente. A simulação numérica foi realizada com o auxílio do software Abaqus®, por meio do método dos elementos finitos, investigando três diferentes células unitárias. Projéteis rígidos de formatos esféricos (8 mm de diâmetro) e cilíndricos (8 mm de diâmetro e 16 mm de comprimento) foram usados, com uma velocidade de impacto de 400 m/s. Os autores concluíram que o processo de penetração ocorreu em três períodos: perfuração para abertura, fratura no fio subjacente à superfície frontal e propagação do dano pelo período de penetração do projétil. Assim, os principais modos de falhas identificados foram a fratura axial do fio, forças trativas e compressivas na direção transversal ao fio, falhas por tensões de cisalhamento e trincas na matriz. Outros pontos importantes alcançados no estudo foram a relação quase linear entre a velocidade residual e a velocidade de impacto do projétil, e a relação de aumento da energia absorvida pela placa com o aumento da velocidade de impacto (de forma não linear), o que confere confiabilidade à simulação. A Figura 2.38 mostra o comportamento do compósito sob impacto do projétil esférico.

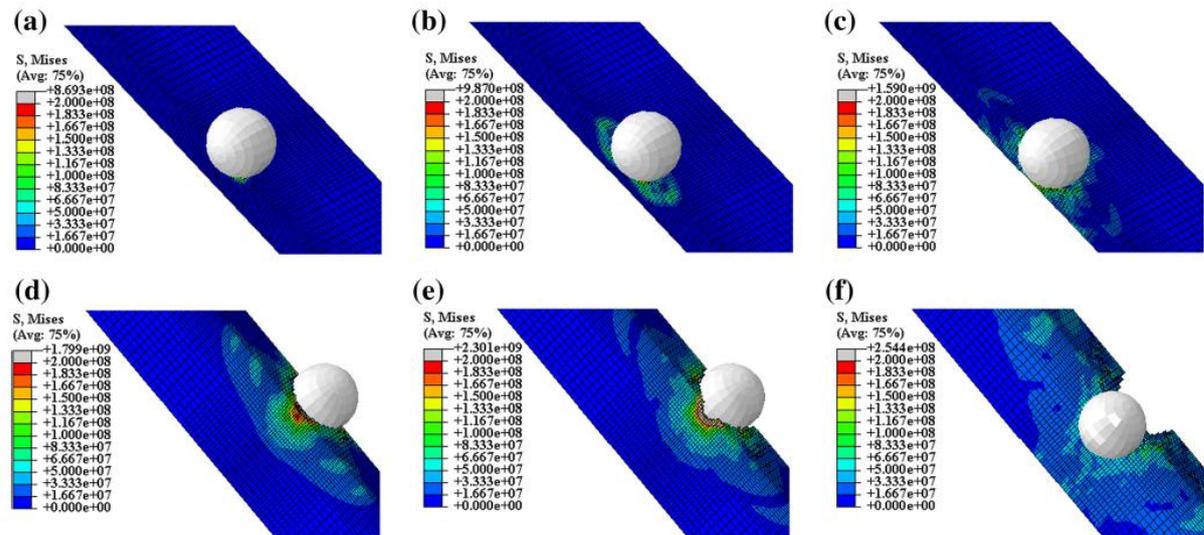


Figura 2.38 – Processo de penetração balístico de um projétil esférico ao longo do tempo, feita por meio de simulação numérica.

Fonte - ZHANG *et al.*, 2017.

Heimbs *et al.* (2014) avaliaram as propriedades de impacto em alta velocidade em compósitos de epóxi e fibras de carbono, pré-carregados em tração e compressão, utilizando estudos experimentais e numéricos. Foi utilizada uma pistola a gás para o lançamento de esferas de aço (30 mm de diâmetro e 110 g de massa), que atingiram velocidades aproximadas de 50 m/s, gerando a perfuração da placa (espessura de 2 mm). Posteriormente, foram utilizadas esferas de mármore (25 mm de diâmetro e 21 g de massa), que reproduzem o impacto de detritos de pistas, não ocasionando a perfuração e favorecendo a análise dos danos à estrutura do compósito nesse tipo de evento (velocidades entre 49 e 92 m/s, com energia cinética entre 25 e 80 J). Com a ajuda de um escaneamento ultrassônico (ultrassom C-scan), foi possível compreender a relação entre a área de dano e a energia no impacto, considerando as pré-cargas aplicadas. A deflexão do ponto central em função do tempo, no momento do impacto, para os dois tipos de pré-carga, também foram estimados (na velocidade de 50 m/s). Com relação à simulação numérica, os autores procuraram investigar a capacidade do MEF de prever o dano por impacto e a influência da pré-carga aplicada, contando com o auxílio do software Abaqus®. Nos resultados, os autores encontraram uma concordância entre as metodologias experimental e numérica, concluindo que rachaduras na matriz e delaminações são os danos mais frequentes nos compósitos, em caso de médias velocidades, com rebote do projétil. Além disso, os autores concluíram que a pré-carga de tração levou à redução da extensão das delaminações nos compósitos, em função de uma menor deflexão da placa no impacto. Com a pré-carga de compressão, a extensão das delaminações nos compósitos foi maior, pois houve uma maior deflexão da placa com o impacto realizado.

Os estudos comprovam a aplicabilidade dos ensaios de impacto na validação do desenvolvimento de sistemas de MIE e também na caracterização de materiais estruturais, como os painéis sanduíches, sob eventos dinâmicos. A partir dos estudos encontrados na literatura, o uso de técnicas de ensaios não destrutivos em conjunto com a aplicação de novos materiais inteligentes podem fornecer soluções eficazes para a detecção de danos em uma estrutura, otimizando processos de monitoramento de estruturas.

3. METODOLOGIA

O presente capítulo detalhará o planejamento fatorial para a fabricação e a caracterização mecânica dos materiais do estudo, assim como o processo de desenvolvimento do sistema de avaliação da integridade estrutural. Os parâmetros de impressão 3D dos núcleos poliméricos e da fabricação dos painéis sanduíches serão apresentados a fim de correlacionar as variáveis de estudo com os testes mecânicos realizados.

3.1 Condições experimentais do estudo

Um planejamento fatorial completo do tipo 2^{14} foi realizado para analisar o efeito e as interações entre os fatores “tipo de material do núcleo” e “configuração do núcleo” nas propriedades mecânicas dos painéis sanduíches. O fator “tipo de material do núcleo” foi investigado em dois níveis, usando filamentos poliméricos de PLA e de ABS. Por outro lado, o fator experimental “configuração do núcleo” foi investigado sob quatro níveis: um nível de referência representado pelo núcleo sólido (RASTER_45), com preenchimento Raster $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ (alternado em 45°), e três padrões celulares de núcleo: (i) *honeycomb* horizontal, com células hexagonais na direção perpendicular ao plano principal (HC_HORIZ); (ii) corrugado com células em forma de S na direção perpendicular ao plano principal (CEL_S); (iii) *honeycomb* vertical, com células hexagonais na direção paralela ao plano principal (HC_VERT). A Figura 3.1 mostra um esboço dessas estruturas celulares de núcleo. Os projetos foram modelados com o uso do software SolidWorks®, versão 2018.

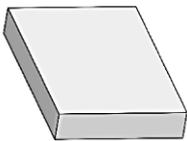
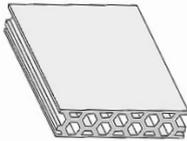
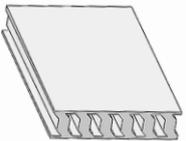
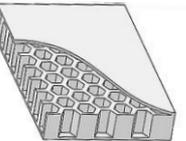
Configuração do núcleo	Preenchimento sólido (Raster alternado em 45°) (RASTER_45)	<i>Honeycomb</i> horizontal (HC_HORIZ)	Corrugado com células em forma de S (CEL_S)	<i>Honeycomb</i> vertical (HC_VERT)
Modelo tridimensional				

Figura 3.1 – Configurações de núcleo investigadas para os painéis sanduíches.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Para a caracterização dos materiais constituintes dos painéis sanduíches, foram testados corpos de prova de liga de alumínio 2024-T3 (ensaios de tração), de resina epóxi (ensaios de tração e de flexão em três pontos), de PLA e de ABS impressos em 3D (ensaios de tração), com preenchimento Raster alternado em 45°. A diferença no comportamento mecânico das configurações celulares de núcleo foi investigada por meio de corpos de prova de PLA impressos em 3D (estruturas celulares puramente poliméricas), que foram submetidos a ensaios de tração, de flexão em três pontos e de impacto Charpy. Foram considerados 10 (dez) corpos de prova para cada condição em cada ensaio (uma amostra com cinco corpos de prova mais uma réplica de mesmo tamanho). As massas de todos os corpos de prova fabricados são encontradas na seção de Apêndice deste trabalho.

O planejamento fatorial completo foi feito com oito condições experimentais, com o intuito de investigar o comportamento mecânico dos painéis sanduíches PLAAL (com núcleo polimérico de PLA) e ABSAL (com núcleo polimérico de ABS), como mostra a Tabela 3.1. Para a caracterização mecânica desses materiais, foram realizados ensaios de flexão em três pontos, impacto Charpy e ensaios balísticos. Nos testes de flexão em três pontos e de impacto Charpy, 10 (dez) corpos de prova, considerando uma amostra de 5 (cinco) corpos de prova mais uma réplica de mesmo tamanho, foram analisados para cada condição experimental, totalizando 80 (oitenta) corpos de prova para a análise de cada teste.

Tabela 3.1
Planejamento fatorial completo 2⁴¹

Nomenclatura da condição experimental	Fator “Tipo de material do núcleo”	Fator “Configuração do núcleo”
PLAAL_RASTER45	PLA	Núcleo sólido
PLAAL_HC_HORIZ	PLA	<i>Honeycomb</i> horizontal
PLAAL_CEL_S	PLA	Corrugado em S
PLAAL_HC_VERT	PLA	<i>Honeycomb</i> vertical
ABSAL_RASTER45	ABS	Núcleo sólido
ABSAL_HC_HORIZ	ABS	<i>Honeycomb</i> horizontal
ABSAL_CEL_S	ABS	Corrugado em S
ABSAL_HC_VERT	ABS	<i>Honeycomb</i> vertical

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Nos ensaios de impacto balísticos, um estudo numérico foi realizado para avaliar a absorção de energia e o modo de falha dos painéis sanduíches sob os eventos dinâmicos. Os ensaios experimentais foram realizados e comparados com o modelo numérico proposto, por meio da avaliação do amortecimento ao impacto, com o uso de sensores piezoelétricos e do modo de falha, a partir dos mecanismos de absorção de energia dos painéis sanduíches. Nesses ensaios, 6 (seis) painéis foram avaliados para cada condição, (uma amostra de três corpos de prova mais uma réplica de mesmo tamanho), totalizando 48 (quarenta e oito) corpos de prova. A Figura 3.2 mostra um resumo dos ensaios mecânicos realizados no presente trabalho.

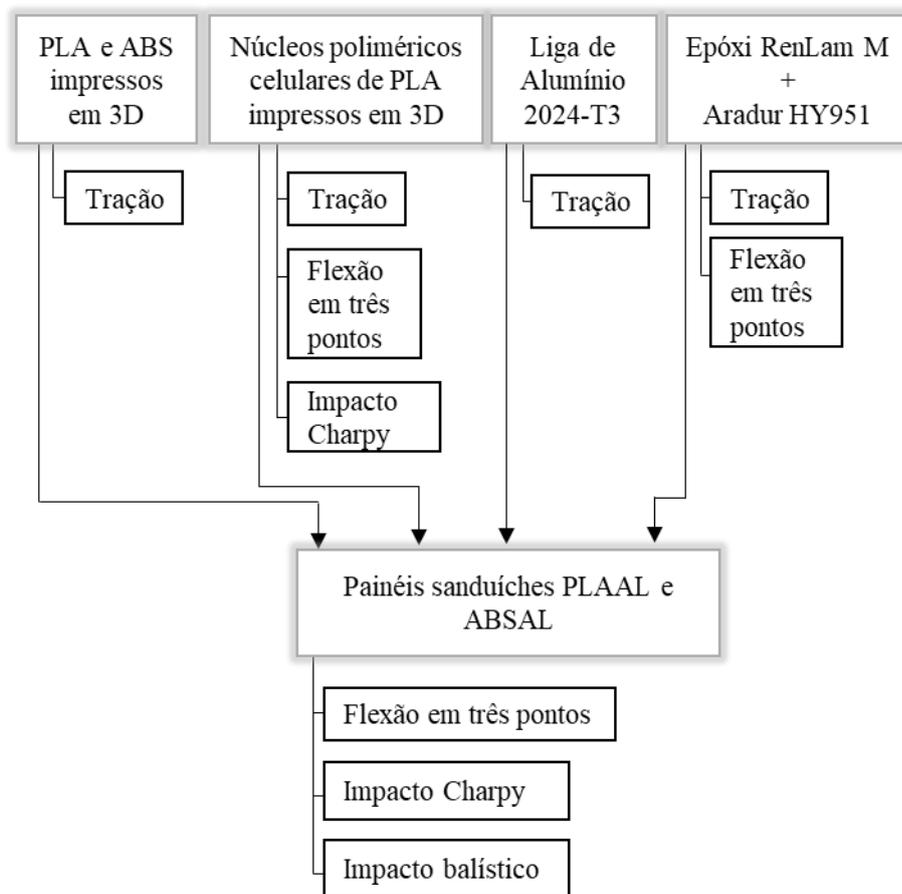


Figura 3.2 – Resumo dos ensaios mecânicos realizados no estudo, para a compreensão do comportamento mecânico dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

3.2 Materiais

A matéria-prima usada para a impressão 3D dos núcleos poliméricos foram filamentos de PLA (sem pigmentação) e de ABS (preto), providos pela empresa 3DLAB®. As chapas metálicas utilizadas como faces (lâminas externas) dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

foram de liga de alumínio 2024-T3, com espessura aproximada de 0,4 mm, fornecidas pela empresa Alto Parts®. Essa liga possui amplas aplicações, sobretudo na indústria aeronáutica (EKREM & AVCI, 2018; QAISER *et al.*, 2015). Por fim, para a anexação das faces aos núcleos poliméricos, foi utilizado um adesivo epóxi RenLam® M e um endurecedor Aradur® HY 951, fornecidos pela empresa Huntsman (Brasil). A proporção entre resina epóxi e endurecedor usada foi de 10 partes de endurecedor para cada 100 partes de resina, conforme especificações do fornecedor. As principais propriedades desses materiais são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2
Propriedades dos materiais do estudo

Propriedade	PLA impresso em 3D	ABS impresso em 3D	Liga de alumínio 2024- T3	Epóxi
Densidade (g/cm ³)	1,24	1,04	2,78	1,14
Módulo de elasticidade na tração (GPa)	1,90 – 4,35	1,36 – 2,20	48 - 73	1,3
Coefficiente de Poisson	0,33	0,37	0,33	0,35
Limite de resistência à tração (MPa)	14 – 70	29 - 33,79	353 - 482	18 - 50
Alongamento na ruptura (%)	3,69	7,08	7,5	3,4

Fonte – 3D LAB (2021); SU *et al.*, 2019; REBELO *et al.*, 2019; AMERI *et al.*, 2021b; SILVA, 2006; VIEIRA, 2018; HUNTSMAN, 2014; RIBEIRO JÚNIOR, 2019.

3.3 Processo de fabricação dos núcleos poliméricos impressos em 3D

A Figura 3.3 mostra as dimensões das unidades celulares que compõem os núcleos poliméricos, modelados geometricamente no software SolidWorks 2018® e convertidos para o formato STL. A estrutura de *honeycomb* horizontal teve um diâmetro interno de 2 mm, no círculo inscrito no hexágono regular, e paredes celulares de espessura 0,8 mm. O núcleo com estrutura corrugada em S teve um espaçamento padrão entre células de 1,6 mm e espessura da célula de 1,8 mm. Por fim, o núcleo de estrutura *honeycomb* vertical apresentou hexágonos regulares com círculos inscritos de diâmetro 2,5 mm e parede celular de espessura 0,8 mm. As dimensões foram definidas experimentalmente, com base no intuito de obter massas aproximadas para os três núcleos poliméricos, uma vez que este atributo influencia diretamente no resultado do teste mecânico do corpo de prova.

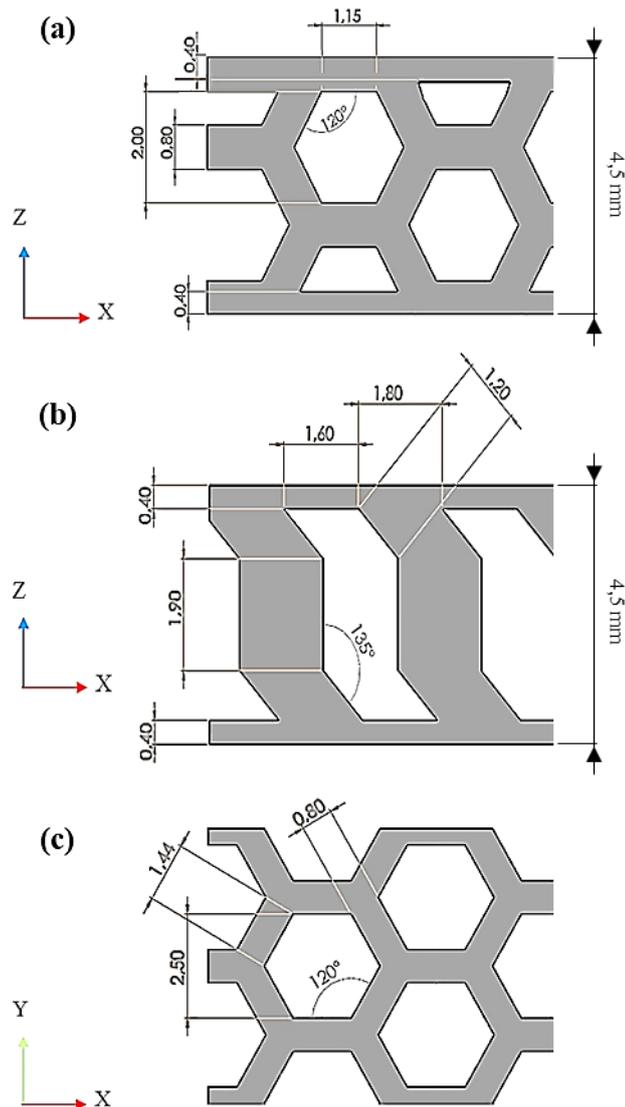


Figura 3.3 – Dimensões das unidades celulares dos núcleos poliméricos impressos em 3D: (a) *honeycomb* horizontal, (b) corrugado com células em S e (c) *honeycomb* vertical. Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Após a criação dos modelos em 3D dos núcleos, o software Repetier-Host® 2.1.6 foi usado, provendo uma interface entre o software de modelagem (CAD) e a impressora 3D. Os núcleos de PLA e de ABS foram fabricados por meio do método de modelagem por deposição fundida (FDM), com o uso de uma impressora 3D Rapman 3.1 da BFB-Bits From Bytes (Figura 3.4), para a impressão do PLA, e de uma impressora Black Aluminum da Tec3D®, para a impressão do ABS. O fatiamento dos arquivos STL e a geração da trajetória da máquina foram realizadas com o uso do software CuraEngine®.

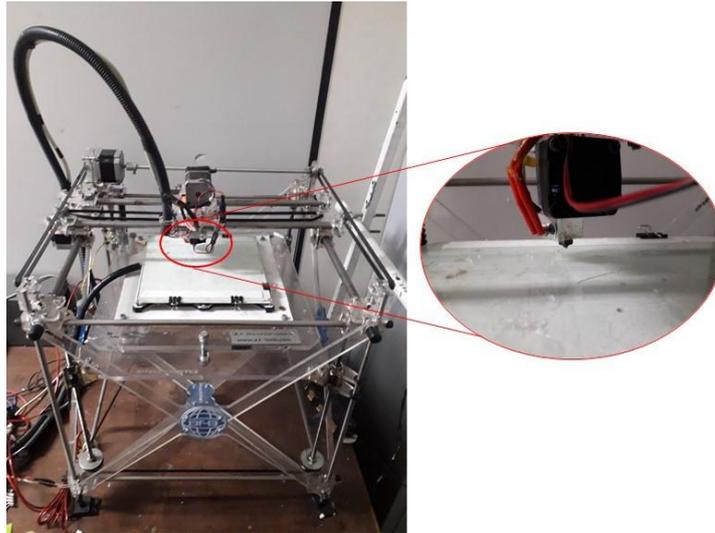


Figura 3.4 – Impressora 3D Rapman 3.1.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Tabela 3.3 traz as especificações dos parâmetros usados para as impressões em 3D dos núcleos poliméricos do presente estudo. Todos os corpos de prova poliméricos usados nos ensaios mecânicos apresentaram uma espessura total de aproximadamente 4,5 mm. Esses materiais foram impressos com um total de 22 camadas, sendo a primeira camada configurada para 0,3 mm e as restantes para 0,2 mm de espessura. Os núcleos poliméricos foram feitos sob a forma de estruturas em que as camadas 1 e 2 configuraram a face de base do núcleo, e as camadas 21 e 22 configuraram a face de topo do núcleo, com preenchimentos do tipo Raster alternado em 45° e um contorno linear duplo (configuração padrão do software de fatiamento para a deposição das bordas de cada camada).

Tabela 3.3
Parâmetros de impressão 3D dos núcleos poliméricos

Parâmetro	Especificação
Orientação de fabricação	Plano
Diâmetro do bico (mm)	0,4
Espessura da camada (mm)	0,2
Número de camadas	22
Temperatura de extrusão para o PLA (°C)	210
Temperatura da mesa para o PLA (°C)	55
Temperatura de extrusão para o ABS (°C)	235
Temperatura da mesa para o ABS (°C)	110
Velocidade de impressão (mm/s)	50
Diâmetro do filamento (mm)	1,75
Densidade de preenchimento (%)	100

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

3.4 Preparação e análise das superfícies das lâminas de liga de alumínio 2024-T3

A lâminas de liga de alumínio foram submetidas a um tratamento, com o intuito de melhorar a adesão desse material com o adesivo epóxi. As lâminas foram previamente tratadas com o uso de detergente e água, para a retirada de sujeira grosseira. Posteriormente, as lâminas passaram por um processo de tratamento mecânico por abrasão com o uso de uma lixa 320, a fim de aumentar a rugosidade superficial da lâmina metálica e para a retirada de impurezas e da camada de óxido resultante do processo de passivação (QAISER *et al.*, 2015; RODRIGUEZ, 2003). Novamente, uma limpeza com água e detergente foi realizada e, por fim, usou-se acetona (C_3H_6O) para uma limpeza das lâminas metálicas.

Com o uso de um microscópio Olympus CX31, foi analisada a superfície da lâmina antes e após o tratamento, a fim de visualizar os efeitos gerados pelo tratamento na liga de alumínio. Foram realizadas também análises de rugosidade superficial em chapas da liga de alumínio 2024-T3 com e sem o tratamento adotado. Foi usado um rugosímetro Taylor Hobson, modelo Precision Surtronic 25, e obtidas três medições dos parâmetros de rugosidade R_a (desvio aritmético médio), R_z (soma da altura máxima de pico e da maior profundidade de vale da amostra), R_t (soma da altura máxima de pico e da maior profundidade de vale da avaliação) e R_p (altura máxima de pico), cujo procedimento foi realizado conforme a norma ISO 4288-96.

3.5 Caracterização das lâminas de liga de alumínio

Corpos de prova do tipo folha (*Sheet-type*) com as chapas da liga de alumínio 2024-T3 foram submetidos a ensaios de tração, com base na norma ASTM E8/E8M-16 (2016). Um seção útil de largura de 12,5 mm, uma velocidade de 2 mm/min e uma distância entre garras de 100 mm, foram adotados nos ensaios. O módulo de elasticidade na tração (E_t), o limite de escoamento, a tensão máxima na tração (σ_t) e a deformação final (ϵ) foram obtidos nesses ensaios.

3.6 Caracterização do adesivo epóxi

A resina epóxi foi caracterizada por meio de ensaios de tração e de flexão em três pontos. Os ensaios de tração seguiram a norma ASTM D638-14 (2014), com corpos de prova do tipo I (Figura 3.5a), uma espessura (h) de 3,5 mm e velocidade de ensaio de 5 mm/min. Os ensaios de flexão, por sua vez, foram realizados em conformidade com a norma ASTM D790-15

(2015), com corpos de prova retangulares de dimensões 127 x 12,7 mm e espessura h de 3 mm (Figura 3.5b), distância entre vãos de 48 mm e uma velocidade de deslocamento do pino central de 2 mm/min.

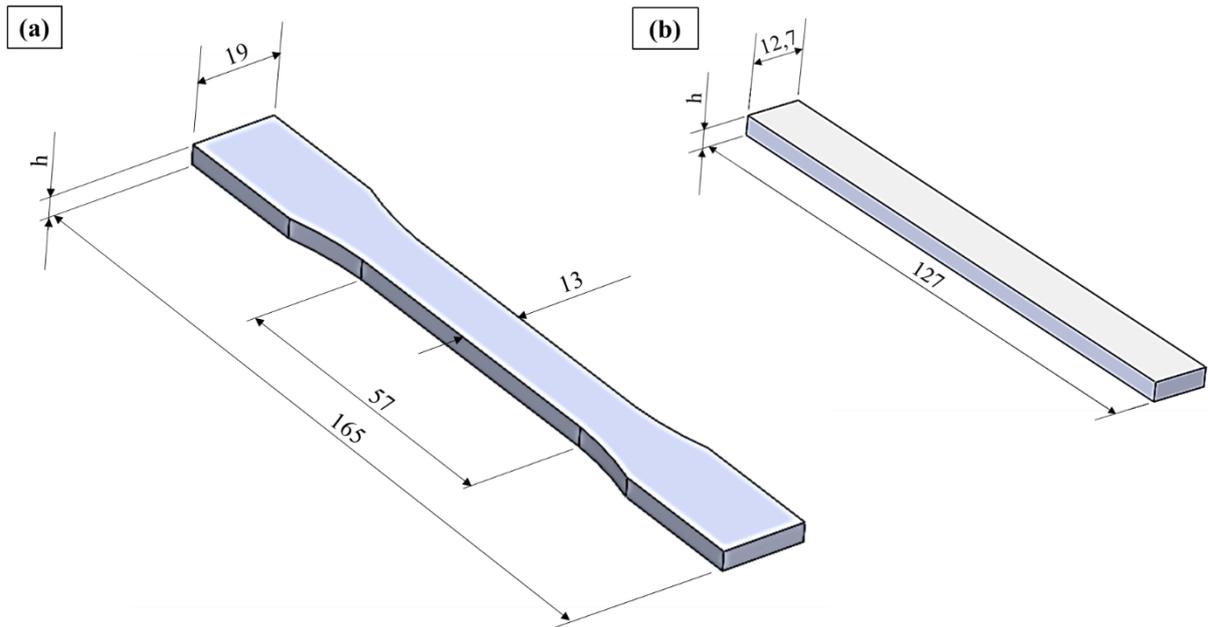


Figura 3.5 – Dimensões dos corpos de prova para a realização de (a) testes de tração (Tipo I), conforme a norma ASTM D638-14 e de (b) flexão em três pontos, conforme a norma ASTM D790-15 (unidade: mm).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

3.7 Caracterização do PLA e do ABS

Foram realizados ensaios de tração em corpos de prova de PLA e de ABS impressos em 3D com preenchimento Raster (45°) e dois contornos lineares. Esses parâmetros de preenchimento são configurações fornecidas como padrão pelo software de fatiamento e são largamente investigados na literatura (YAO *et al.*, 2020). Por esses motivos, foram adotados como referência para os núcleos sólidos deste trabalho. Os ensaios foram realizados com base na norma ASTM D638-14 (2014), com corpos de prova de espessura de 4,5 mm, a uma velocidade de ensaio de 5 mm/min. Para evitar o esmagamento dos corpos de prova pelas garras da máquina de ensaios, uma fina camada de epóxi foi adicionada nas extremidades dos corpos de prova (região de fixação pelas garras da máquina). O módulo de elasticidade na tração (E_t), a resistência máxima na tração (σ_t) e a deformação final (ϵ) foram obtidos por meio desses ensaios.

3.8 Caracterização dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

A caracterização do comportamento mecânico dos núcleos impressos em 3D foi realizada com o objetivo de investigar o efeito das configurações celulares internas nas estruturas poliméricas integradas (sem faces metálicas de revestimento). Para a análise dessa variável, o PLA foi adotado como o material de parâmetro e somente as configurações com núcleos celulares foram consideradas. Foram realizados ensaios de tração, de flexão em três pontos e de impacto Charpy, em que uma máquina universal de ensaios da Shimadzu AG-X (célula de 100 kN) foi usada para os testes de tração e flexão, e uma máquina XXJ-50 Series foi usada para os testes de impacto Charpy. O software Trapezium® versão 1.2.6 foi usado para a obtenção dos dados nos testes mecânicos e o software Minitab® 17 foi usado para a análise estatística dos resultados, que inclui estatísticas descritivas (média, desvio-padrão e coeficiente de variação), análises de variância (ANOVA) com um fator (“Tipo de núcleo celular”) e testes de diferenças de médias pelo método de Tukey (análise com base nas duas médias amostrais obtidas em cada condição experimental). Além disso, o software Origin® 2017 foi adotado para a geração dos gráficos com os resultados dos ensaios.

Com base na norma ASTM D638-14 (2014), corpos de prova do tipo I (Figura 3.5a), com espessura de 4,5 mm, foram avaliados em ensaios de tração a uma velocidade de 5 mm/min, para a obtenção das propriedades de módulo de elasticidade na tração (E_t), resistência máxima na tração (σ_t) e deformação final (ϵ). Igualmente aos corpos de prova de PLA com núcleo sólido (preenchimento Raster alternado em 45°), uma fina camada de epóxi foi depositada nas extremidades dos corpos de prova (regiões de fixação das garras da máquina de teste). A Figura 3.6 mostra a distribuição mássica (região em cinza) na seção transversal da região útil dos três tipos de corpo de prova, com largura de 13 mm. A área da seção (A_s), calculada com o uso do software SolidWorks 2018®, também é apresentada.

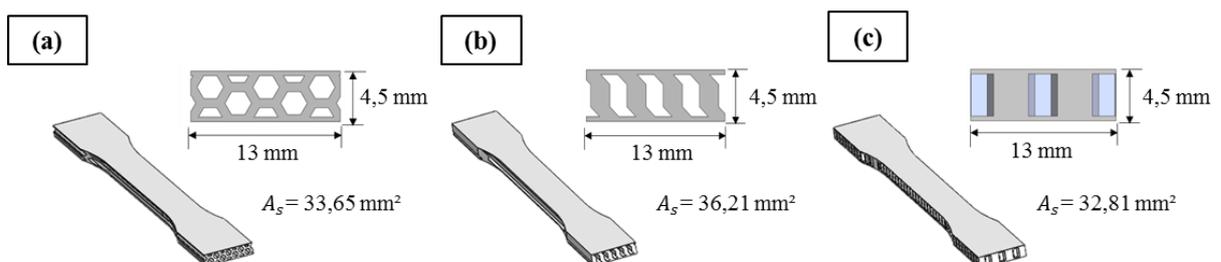


Figura 3.6 – Área da seção transversal na região útil, nos corpos de prova de tração dos núcleos em (a) *honeycomb* horizontal, (b) corrugado com células em S e (c) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Os ensaios de flexão em três pontos, por sua vez, foram realizados com base na norma ASTM D790-15 (2015), conforme configuração exposta na Figura 3.5b. Os corpos de prova tiveram uma espessura de 4,5 mm, e foram ensaiados com uma distância entre vãos (L) de 72 mm, com o deslocamento do pino central de 2 mm/min. Adicionalmente, foram fabricados e ensaiados dez corpos de prova de PLA impressos em 3D com núcleo sólido, como materiais de referência. A Figura 3.7 mostra a configuração esquemática do teste de flexão em três pontos.

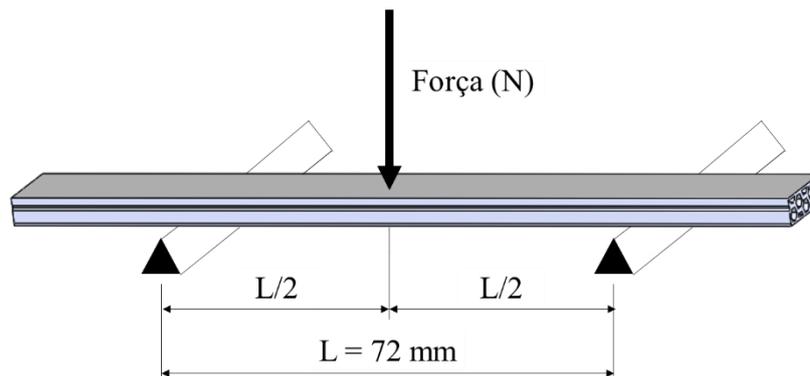


Figura 3.7 – Modelo esquemático dos ensaios de flexão em três pontos com os núcleos poliméricos impressos em 3D, conforme a norma ASTM D790-15.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

As propriedades obtidas nesses ensaios foram o módulo de elasticidade na flexão (E_f), a tensão máxima na flexão (σ_f) e o deslocamento (mm). O módulo de elasticidade na flexão (E_f) e a tensão máxima na flexão (σ_f) foram calculados com base nas EQ. 3.1 e EQ. 3.2, presentes na norma ASTM D790-15 (2015):

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (3.1)$$

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

Onde L é a distância entre os vãos (mm), m é a inclinação da tangente da curva força-deslocamento (na porção inicial), b é a largura do corpo de prova (mm), d é a espessura do corpo de prova (mm) e P é a carga máxima (N).

Por fim, os ensaios de impacto Charpy foram realizados em corpos de prova com dimensões 80 x 10 x 4,5 mm (Figura 3.8), conforme as normas ISO 179-1 (2001) e ASTM D6110-10 (2010). Uma velocidade de 3,8 m/s e uma energia de impacto de 15 J foram aplicadas

na direção normal ao plano, com o objetivo de obter a energia absorvida no impacto do pêndulo. Assim como nos ensaios de flexão, dez corpos de prova de PLA com núcleo sólido foram impressos e ensaiados como material de referência.

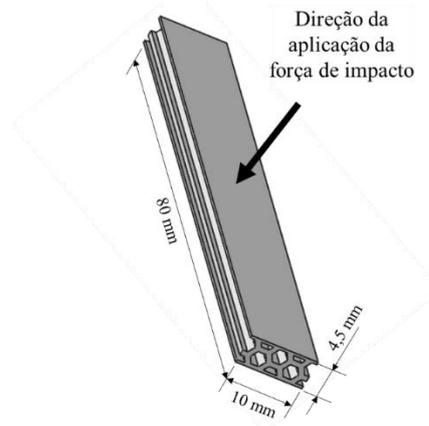


Figura 3.8 – Ensaio de impacto Charpy com os núcleos poliméricos impressos em 3D: direção de teste de impacto do pêndulo.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

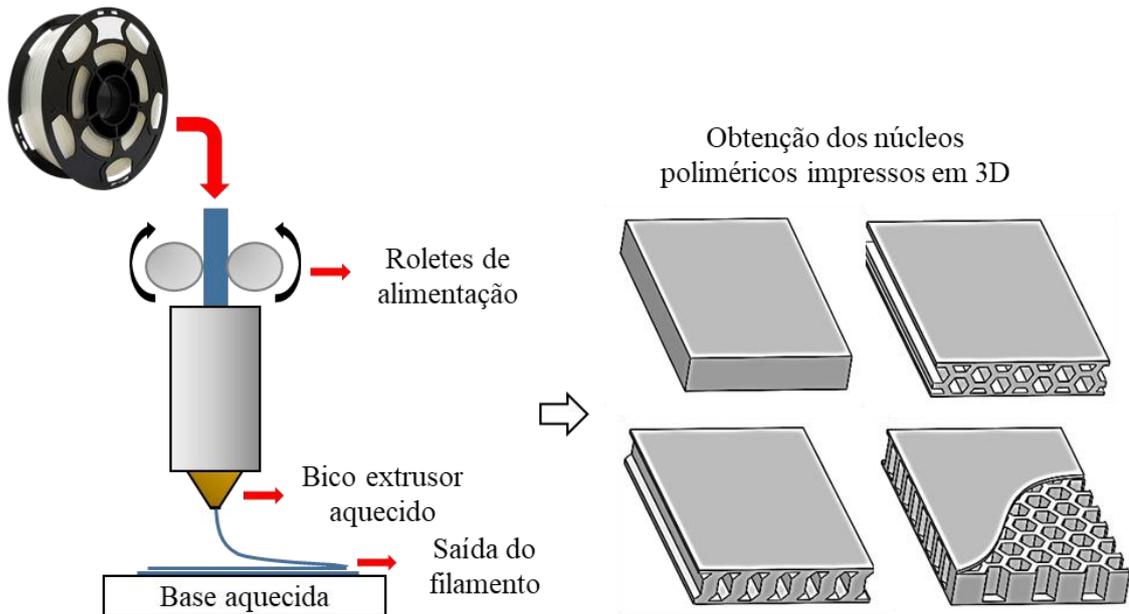
3.9 Processo de fabricação dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

A Figura 3.9 mostra o processo completo de manufatura dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL, feitos com núcleos poliméricos impressos em 3D e faces de liga de alumínio 2024-T3, e fabricados nas dimensões 150 x 100 mm². Os núcleos poliméricos foram fabricados pelo processo de FDM (Figura 3.9a), com uma massa média final de $51 \pm 3,2$ g, para núcleos de PLA, e de $41 \pm 3,7$ g, para núcleos de ABS (as médias consideram os valores das massas obtidas com os três tipos celulares de núcleo). Após essa etapa, o processo de tratamento das lâminas de liga de alumínio 2024-T3 foi realizado, em que cada lâmina, após o ajuste dimensional e o tratamento, apresentou uma massa média final de aproximadamente 18 g. Com base na norma ASTM E865-12 (2012), uma proporção de adesivo de 0,48 kg/m² foi usada em cada face, alcançando uma massa final de adesivo de aproximadamente 8 g por face, considerando a dimensão do painel. Para a homogeneização do adesivo, uma mistura manual entre resina e endurecedor foi executada por um período de 5 (cinco) minutos. Após a deposição do adesivo na superfície da lâmina metálica, foi considerado um período de até 3 (três) horas antes da colagem de uma das faces do núcleo. Esse período foi definido por meio de experimentos preliminares e com base na literatura (MELO *et al.*, 2016), como o intuito de garantir a adequada fixação da primeira lâmina de alumínio, a partir do aumento da viscosidade da mistura. Além disso, a adesão parcial das lâminas foi necessária devido à alta fluidez inicial do

adesivo, o que leva a uma grande evasão de adesivo pelas bordas do núcleo polimérico e, ao mesmo tempo, gera porosidades na interface entre lâmina e núcleo.

a Impressão 3D: Uso da técnica de FDM

Filamento de PLA



b Processo de compactação a frio

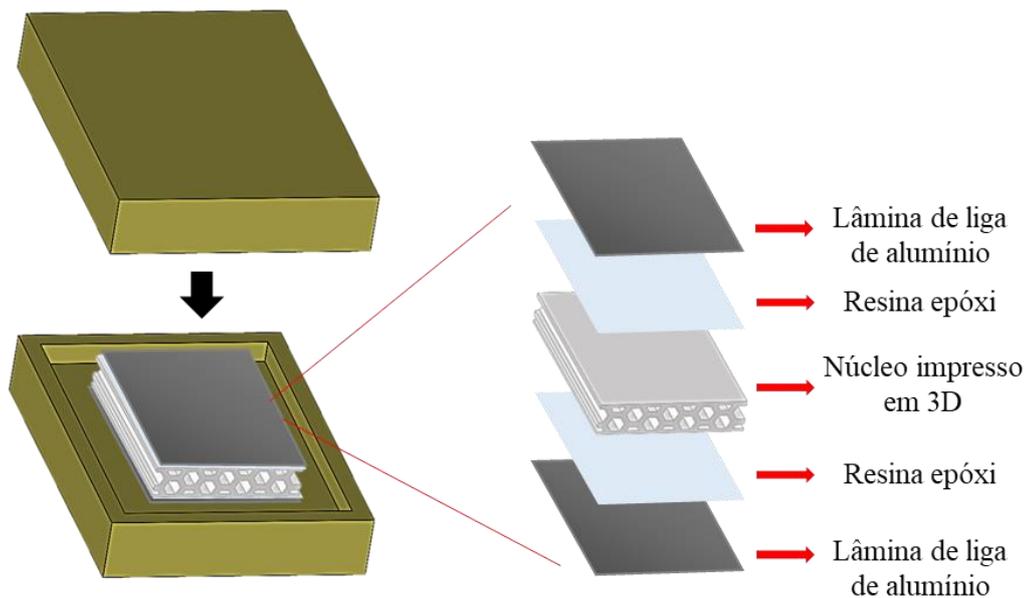


Figura 3.9 – Processo de manufatura dos painéis sanduíches: (a) uso da técnica de FDM para a produção dos núcleos poliméricos (b) compactação a frio para a obtenção dos painéis sanduíches.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Para a adequada adesão entre núcleo e faces, os painéis sanduíches foram compactados por meio de compressão a frio (Figura 3.9b), evitando uma possível degradação térmica do núcleo polimérico. A temperatura de 25 ± 2 °C (natural do ambiente de fabricação) foi escolhida em função das propriedades térmicas dos polímeros, uma que vez em torno de 60 °C, o PLA já exhibe transição vítrea. A adesão entre a primeira lâmina anexada e o núcleo polimérico (na face de topo do núcleo impresso, última camada impressa) foi realizada por meio de uma compressão de aproximadamente 1,25 MPa, suficiente para a compactação simultânea das primeiras faces de dois painéis, com um intervalo de 24 horas. Após esse período, a segunda lâmina, com adesivo preparado por meio do mesmo procedimento anteriormente citado, foi prontamente anexada (na face de base do núcleo impresso, primeira camada impressa), usando a mesma intensidade de compressão, considerando um período de 48 horas, culminando na etapa final de fabricação de dois painéis. Para a completa cura do adesivo e para a avaliação de suas propriedades mecânicas, um período de 7 (sete) dias foi considerado (a partir da anexação da segunda lâmina). Por meio do procedimento e dos materiais usados, uma espessura média de 5,5 mm foi obtida nos painéis sanduíches. As massas médias dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL com núcleos celulares foram de, respectivamente, $100 \pm 2,7$ g e $85 \pm 3,5$ g. Dessa forma, a fração mássica de núcleo polimérico nos painéis sanduíches PLAAL foi de, aproximadamente, 51%. No caso dos painéis ABSAL, essa fração foi de, aproximadamente, 48%.

3.10 Caracterização dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Os painéis sanduíches PLAAL e ABSAL foram caracterizados por meio de ensaios de flexão em três pontos, ensaios de impacto Charpy e ensaios balísticos. Uma máquina universal de ensaios Shimadzu AG-X (célula de carga 100 kN) e uma máquina XXJ-50 foram usadas para os testes de flexão em três pontos e impacto Charpy, respectivamente.

Com relação aos ensaios balísticos, uma análise numérica foi feita com o objetivo de avaliar a energia absorvida e o modo de falha dos materiais. Para validar o modelo numérico proposto, uma nova plataforma de ensaios foi desenvolvida para a realização de um estudo experimental, a fim de avaliar a absorção de energia e o modo de falha dos painéis sanduíches e o analisar o sistema de monitoramento da integridade estrutural (MIE) projetado. Os softwares Trapezium® 1.2.6, Minitab® 17 e Origin 2017 foram usados para as análises dos resultados.

3.10.1 Ensaios de flexão em três pontos dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Os ensaios de flexão em três pontos dos painéis foram realizados com base nas normas ASTM C393/C393M-16 (2016) e ASTM D7250/D7250M-16. Os corpos de prova tiveram dimensões retangulares de 140 x 18 mm e uma espessura de aproximadamente 5,5 mm, e foram cortados com o uso de uma morsa vertical e uma serra circular com disco diamantado extra fino. Uma velocidade de deslocamento do pino central de 6 mm/min e uma distância entre vãos de 90 mm foram adotadas nos ensaios. A massa média obtida nos corpos de prova com núcleos celulares foi de $15,3 \pm 1$ g para os painéis de núcleo de PLA e $15,2 \pm 0,8$ g para os painéis de núcleo de ABS. A partir das normas, foram obtidas as propriedades de resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (F_s^{ult}) e a tensão na face (σ_l), calculadas com base na EQ. 3.3 e na EQ 3.4, respectivamente.

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(d+c)b} \quad (3.3)$$

$$\sigma_l = \frac{P_{max}S}{2t(d+c)b} \quad (3.4)$$

Onde P_{max} é a máxima força antes da falha (N), d é a espessura do sanduíche (mm), c é a espessura do núcleo (mm), b é a largura do sanduíche (mm), S é a distância entre os vãos de suporte (mm) e t é a espessura da lâmina de face (mm).

Conforme a norma ASTM C393/C393M-16 (2016), os resultados de tensão na face levam em considerações falhas por cisalhamento no núcleo e entre núcleo e face, portanto não caracterizam a resistência máxima da face. A tensão máxima na face é calculada com base na força máxima aplicada. A norma ainda atesta que testes preliminares devem ser realizados, a fim de que o sistema de análise seja conhecido, para que a taxa de velocidade do ensaio seja adequada e a distância entre os suportes seja curta o suficiente, de forma a obter as falhas desejadas.

Além disso, as propriedades de módulo de elasticidade na flexão (E_f), tensão máxima na flexão (σ_f) e deslocamento (mm) também foram obtidas, seguindo a norma ASTM D790-15 (2015).

3.10.2 Ensaios de impacto Charpy nos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados em corpos de prova com dimensões 80 x 10 x 5,5 mm, em acordo com as normas ISO 179-1 (2001) e ASTM D6110-10 (2010). Com o impacto do pêndulo na direção paralela ao plano do painel, uma velocidade de 3,8 m/s e uma energia de impacto de 15 J, buscou-se obter a energia absorvida no impacto (J) e a energia absorvida específica por massa (J/kg).

3.10.3 Ensaios de impacto balísticos nos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

3.10.3.1 Análise numérica: uso do método dos elementos finitos

A análise numérica foi realizada com base no método dos elementos finitos (MEF), usando o programa de simulação Ansys LS-DYNA 2021 R2®, que permite simular a resposta mecânica de materiais sob carregamento dinâmico, ou seja, sob altas forças em curtos períodos de tempo (ANSYS, 2021). As simulações numéricas foram realizadas com o objetivo de prever o comportamento mecânico dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL sob impacto balístico. Dessa forma, foram obtidas a absorção de energia do núcleo polimérico dos painéis em cada condição experimental, o tamanho e a forma geométrica do dano causado no núcleo, a distribuição das tensões nas faces metálicas dos painéis e as forças de reação no impacto.

O modelo numérico proposto com as condições de contorno é apresentado na Figura 3.10. Os painéis sanduíches foram constituídos com as duas faces metálicas de liga de alumínio 2024-T3, definidas com um comportamento elasto-plástico, e núcleos de PLA ou ABS, com comportamento frágil. Com relação às condições de contato, adotou-se para o contato entre o projétil e face metálica, e também para o contato entre os suportes e as faces metálicas, um atrito coulombiano de 0,2, considerando um contato metal/metal a frio. Para a conexão entre as faces metálicas e os núcleos poliméricos, esse coeficiente foi de 0,8.

O projétil e os suportes foram definidos como corpos rígidos, conforme mostram as restrições de movimento da Figura 3.10. A distância entre os suportes na face metálica de contato com projétil foi de 130 mm e a distância entre os cilindros na face metálica oposta ao impacto foi de 110 mm. A velocidade usada para o projétil foi de 15,8 m/s e a energia cinética alcançada foi de 19 J. Esses parâmetros foram definidos com base em testes preliminares com a plataforma desenvolvida experimentalmente. A energia foi calculada a partir de sucessivas medições de velocidade em um cronógrafo XCORTECH X32000.

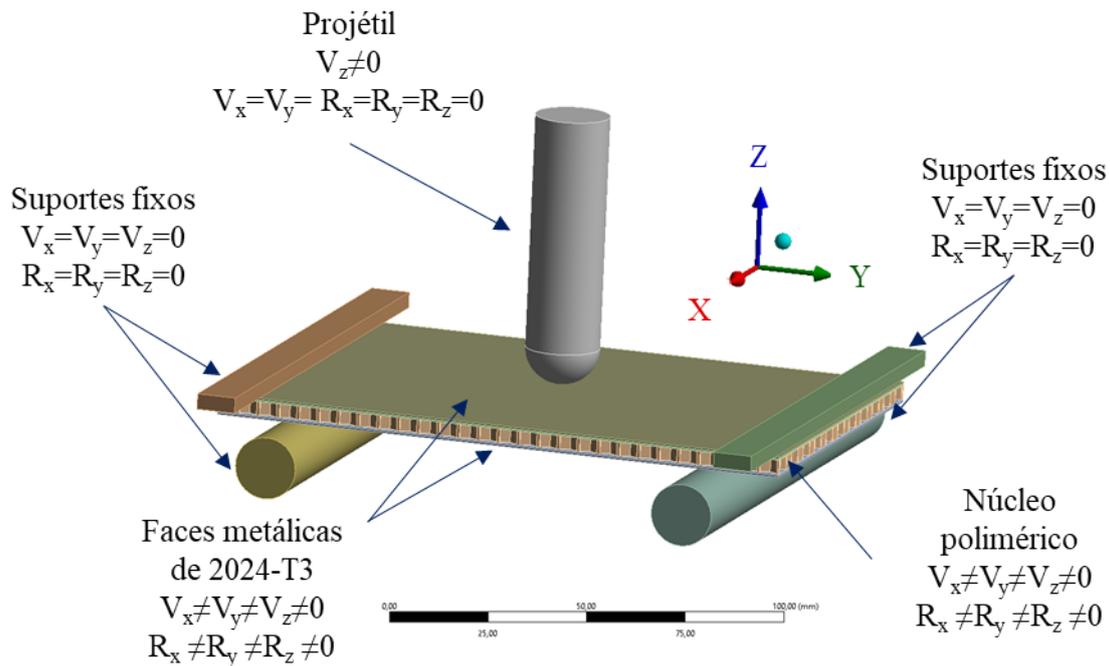


Figura 3.10 – Condições de contorno para a simulação numérica dos ensaios balísticos dos painéis sanduíches (onde V é a velocidade linear e R é a velocidade rotacional).
 Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Em relação ao comportamento mecânico dos materiais envolvidos no núcleo, foram utilizados os resultados obtidos nos ensaios experimentais de tração. Os coeficientes de Poisson foram definidos de acordo com os trabalhos de Rebelo *et al.* (2019), Ameri *et al.* (2021b), e Maleki e Chakherlou (2018), sendo respectivamente 0,33 para o material PLA, 0,37 para o material ABS e 0,33 para a liga de alumínio 2024-T3. Para descrever o comportamento mecânico das chapas de alumínio, foram usadas as propriedades mecânicas disponíveis na biblioteca do software numérico e os seguintes parâmetros para o modelo da equação de estado linear (Shock EOS linear) na carga de impacto: coeficiente de Gruneisen de 2, parâmetro C_1 de $5,32 \times 10^6$ mm/s, parâmetro S_1 de 1,3380 e parâmetro quadrático S_2 de 0. Estes parâmetros permitem aumentar a precisão no comportamento do material durante uma carga dinâmica de alta deformação (SOYDAN *et al.*, 2018). Para prever a fratura frágil dos núcleos impressos, foi adotado o critério de falha de máxima tensão normal, em que o material falha quando a tensão principal máxima atinge a tensão máxima que o material suporta na tração uniaxial (GHANDRIZ *et al.*, 2020), ensaio que foi realizado experimentalmente neste trabalho.

Para discretizar os corpos envolvidos no modelo numérico proposto, diferentes tipos de malha e elementos foram testados. Após as avaliações dos resultados numéricos, optou-se pelos elementos hexaédricos de segunda ordem, com tamanho de 1 mm. A Tabela 3.4 mostra os dados

das malhas refinadas com base no número de elementos e de nós para cada um dos domínios geométricos. Percebe-se um grande número de elementos e de nós nas malhas geradas para os núcleos celulares, o que implica em um custo computacional mais alto para a discretização do domínio geométrico, em comparação com os núcleos sólidos (RIVERA *et al.*, 2020).

Tabela 3.4
Dados das malhas geradas no aplicativo numérico

Domínio geométrico	Número de nós	Número de elementos
Chapas de alumínio 2024-T3	3750	1700
Núcleo sólido	3750	1700
Núcleo <i>honeycomb</i> horizontal	149333	97050
Núcleo corrugado em S	137108	95850
Núcleo <i>honeycomb</i> vertical	29976	13286

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A partir dos resultados numéricos, foram geradas curvas de energia em função do tempo para a análise da absorção de energia pelos núcleos dos painéis. Através dos gráficos gerados, foi possível avaliar a evolução da energia máxima de impacto (a parcela da energia cinética total que é transferida para o núcleo polimérico, no momento do impacto), a energia absorvida e dissipada (energia no estágio estabilizado, ao final da curva) e a energia rejeitada (energia devolvida, sendo a diferença entre a energia máxima de impacto e a energia absorvida). Assim, o percentual de energia absorvida no impacto (EA) foi calculada com base na EQ. 3.5:

$$EA = \frac{E_{abs}}{E_{m\acute{a}x}} \quad (3.5)$$

Onde $E_{m\acute{a}x}$ representa a energia máxima de impacto e E_{abs} representa a energia absorvida pelo núcleo polimérico impresso.

3.10.3.2 Estudo experimental: desenvolvimento da instrumentação para o MIE

O sistema de MIE desenvolvido foi baseado no uso de uma rede de sensores piezoelétricos em série atuando no modo passivo. Para a validação desse sistema e também dos

ensaios numéricos, uma plataforma física de ensaios de impacto balísticos foi desenvolvida e testada com os painéis PLAAL e ABSAL. Com o uso de ar comprimido (pressão de 7 bar), foi usado um sistema de acionamento de disparo rápido, construído com o uso de uma válvula solenoide, para a contenção e a liberação rápida do ar da câmara. Assim, o projétil é disparado e percorre uma distância de 400 mm até o corpo de prova. O impacto do projétil ocorre na região central do corpo de prova, a fim de prover uma dissipação de energia mais uniforme. Dois cilindros, fixados por molas e grampos a uma estrutura cúbica rígida, foram montados para engastar os corpos de prova, evitando uma projeção inesperada do mesmo. Uma distância de 110 mm entre os centros dos eixos dos cilindros fixadores foi adotada para o projeto. O movimento de rotação, e as molas e os grampos de fixação dos cilindros, possibilitam graus de liberdade para a deflexão dos corpos de prova. Os sensores piezoelétricos, por sua vez, foram fixados na superfície dos painéis sanduíches (sensores externos de MIE), na face oposta ao impacto. A fixação dos sensores foi realizada com o uso de cianoacrilato e silicone em pasta, considerando um tempo de cura de 24 horas, após uma pré-limpeza da superfície com acetona. A instrumentação usada para os ensaios (Figura 3.11) envolveu, basicamente, o uso de um atuador pneumático, um medidor de velocidade, sensores piezoelétricos, um filtro de sinais e um osciloscópio.

A Figura 3.12 mostra as dimensões do projétil usado, obtidas por meio da usinagem (torneamento) de uma barra cilíndrica, fornecida pela empresa Villares Metal®. Segundo a empresa, o aço fornecido possui uma dureza de 195 HBW, limite de escoamento (0,2%) de 352 MPa e resistência à tração de 579 MPa. A massa do projétil foi obtida com o uso de uma balança SF-400C de precisão 0,01 g.

As velocidades alcançadas pelo projétil no impacto dos painéis PLAAL e ABSAL, foram medidas por meio do cronógrafo, para a obtenção da velocidade média de disparo. A energia de impacto gerada foi calculada por meio da EQ. 3.6 (ASTM D7136/D7136M-15, 2015).

$$E_{cp} = \frac{mv^2}{2} \quad (3.6)$$

Onde E_{cp} é a energia de impacto (J), v é a velocidade de impacto (m/s) e m é a massa do impactador (kg).

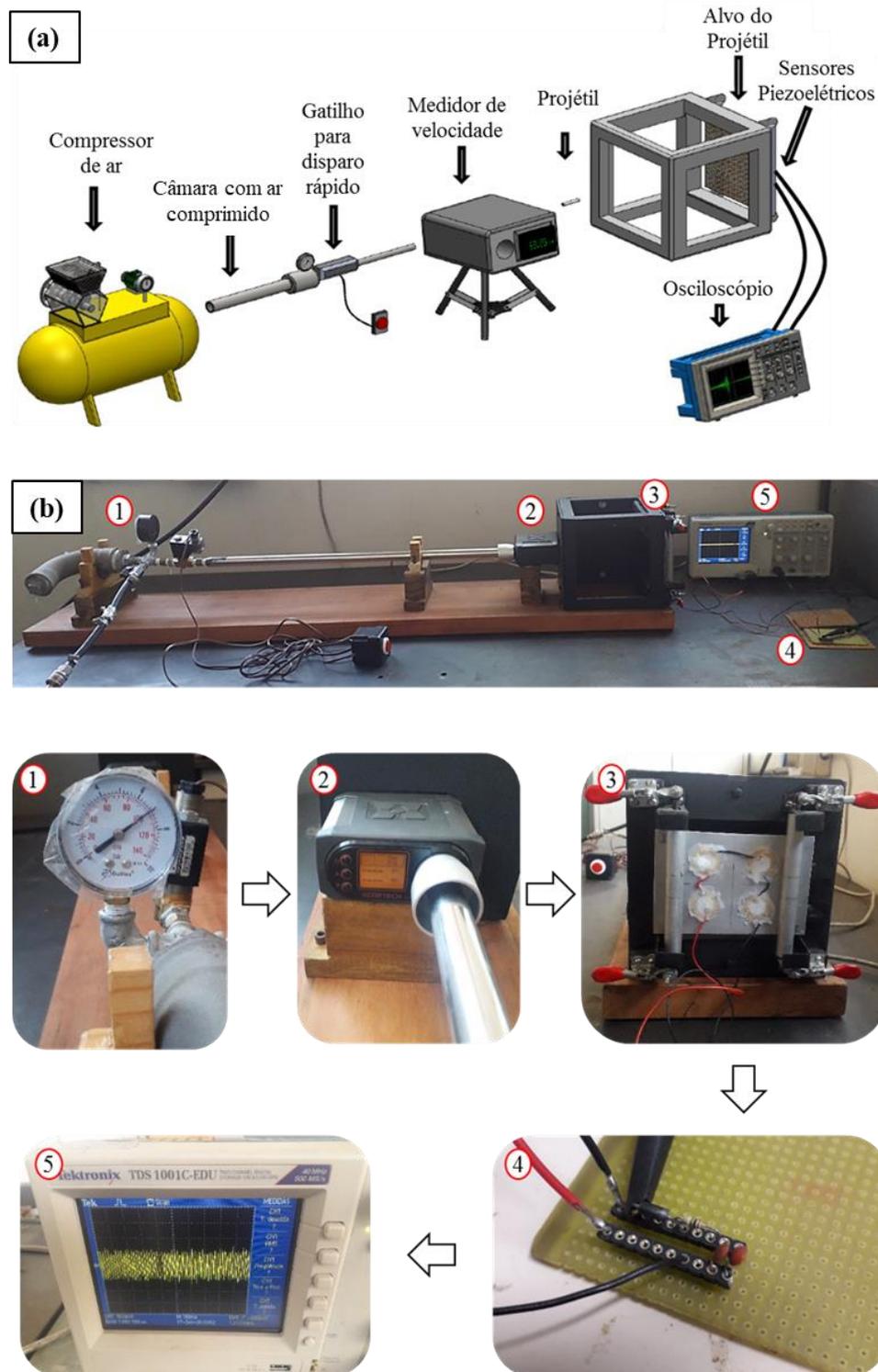


Figura 3.11 – Plataforma de ensaios balísticos: (a) figura esquemática de projeto e (b) estrutura física com (1) ar comprimido (pressão de 7 bar), (2) medidor de velocidade, (3) posicionamento do corpos de prova, (4) filtro de condicionamento dos sinais e (5) obtenção da sinal pelo osciloscópio.

Fonte: Adaptada de CASTRO *et al.*, 2019b.

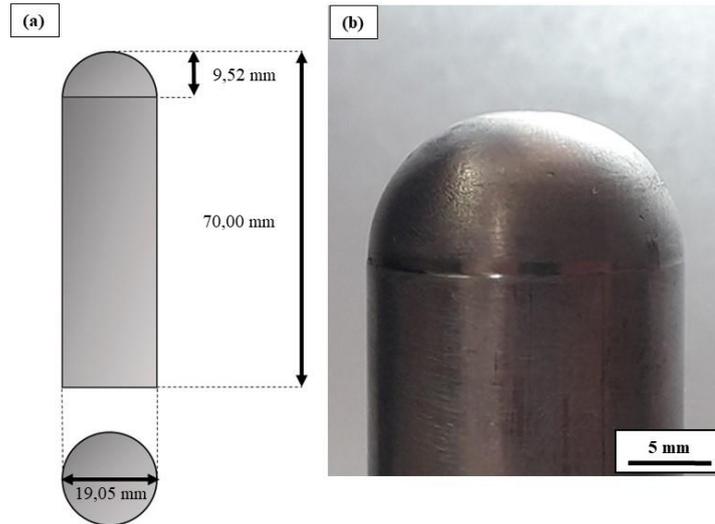


Figura 3.12 – Impactador de aço inoxidável AISI 304: (a) modelo geométrico e (b) ponta semiesférica do projétil.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A energia de impacto E_{cp} foi obtida através de uma medição indireta. Um cálculo da incerteza-padrão combinada foi realizada com base nas incertezas-padrão relativas a cada uma das grandezas de entradas, por meio da EQ. 3.7 (ALBERTAZZI & SOUSA, 2018):

$$\left(\frac{u(E_{cp})}{E_{cp}}\right)^2 = a_1^2 \left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + a_2^2 \left(\frac{u(v)}{v}\right)^2 \quad (3.7)$$

Onde $u(E_{cp})$ é a incerteza-padrão combinada, $u(m)$ representa a incerteza-padrão relativa à grandeza massa, $u(v)$ é a incerteza-padrão relativa à grandeza velocidade, a_1^2 é o quadrado do expoente inteiro da grandeza massa e a_2^2 é o quadrado do expoente inteiro da grandeza velocidade.

A tensão elétrica obtida pelos transdutores piezoelétricos foi submetida a um condicionamento de sinais com base em um circuito elétrico de baixo custo, montado experimentalmente. Quatro pastilhas de PZT, com 27 mm de diâmetro externo, 20 mm de diâmetro interno, espessura total de aproximadamente 0,5 mm e peso individual de aproximadamente 1,05 g, foram conectadas em série, criando um canal de detecção de danos na estrutura (Figura 3.13). As pastilhas foram fixadas radialmente ao alvo de impacto simulado (ponto central da placa), a uma distância de aproximadamente 20 mm. Os piezoelétricos podem ser vistos como amortecedores eletromecânicos que fornecem informações sobre o fluxo de energia, em um determinado local da estrutura (GUYOMAR *et al.*, 2009). De acordo com Dezfouli *et al.* (2013), o posicionamento dos sensores piezoelétricos influencia diretamente na

magnitude da tensão de saída, o que auxilia na identificação do local de um defeito na estrutura, após um determinado choque mecânico. A partir desse pressuposto, uma série de canais compostos por transdutores nessa configuração pode auxiliar na detecção e na identificação da localização de um dano na estrutura, por meio do monitoramento simultâneo de todos os canais presentes na estrutura. Para a análise da consistência do modelo proposto e da proporcionalidade dos sinais de tensão elétrica gerados pelos sensores, em comparação com a força de reação obtida nas simulações numéricas, calculou-se a razão entre os picos máximos e a duração dos pulsos gerados nas duas grandezas, considerando as condições experimentais.

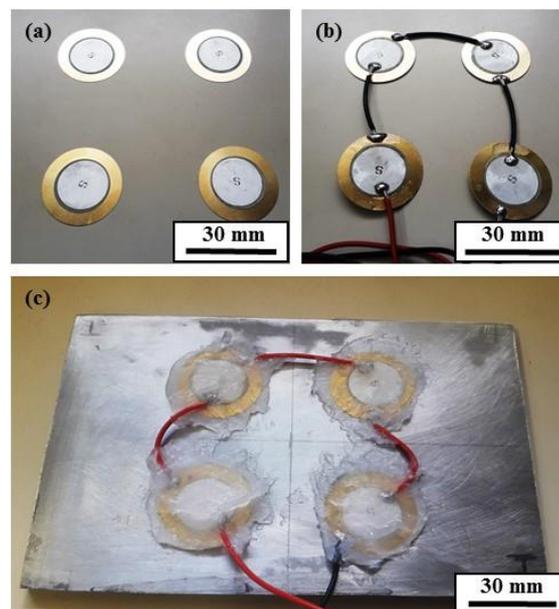


Figura 3.13 – Configuração das quatro pastilhas piezoelétricas na face dos painéis sanduíches: (a) PZTs, (b) ligação em série e (c) fixação nos painéis.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Atuando no modo direto, as pastilhas piezoelétricas apresentam uma polarização de cargas com base no tipo de tensão mecânica que lhe é aplicada. No presente trabalho, a parte positiva da pastilha foi conectada em série com o fio terra da sonda do osciloscópio. O terminal negativo da pastilha piezoelétrica foi ligado a um diodo IN4003, a um resistor de $1\text{ M}\Omega$ em série e a dois capacitores em paralelo com capacitância equivalente de 200 pF , caracterizando um filtro passa-baixa. Com o uso desse circuito, que foi definido com base em testes preliminares, os sinais apresentaram um menor nível de ruído, melhorando a visualização do resultado da medição.

Para a obtenção e a discretização do sinal obtido, com base no transdutor piezoelétrico, foi utilizado um osciloscópio TDS 1001C-EDU, com uma taxa de amostragem de $2,5\text{ kS/s}$, para

a representação da tensão elétrica gerada no domínio do tempo. Foram analisados os valores de tensão pico-a-pico, tensão máxima positiva, tensão máxima negativa e a absorção de energia no impacto, verificada por meio da relação entre a propagação de energia (danos causados e oscilações no corpo de prova) e a área de sinal gerada pelo canal de transdutores. Um valor mínimo de amplitude da tensão elétrica foi definido para a obtenção de um gráfico relacionado a danos (*trigger* para o início da captação dos dados, em um impacto de determinada intensidade), com base em uma amplitude que fosse, no mínimo, superior à tensão de pico do sinal do ruído, o que denota uma alteração estrutural.

Além disso, uma calibração foi realizada, com o intuito de prever o comportamento do ruído gerado antes e após a anexação dos piezoelétricos no circuito. Tal calibração foi essencial para a identificação de falhas na soldagem dos fios nas pastilhas piezoelétricas e na integridade do circuito. Um valor máximo de amplitude de 1 V pico-a-pico, com a simples ligação do circuito após o posicionamento do corpo de prova no equipamento, foi definido como imprescindível para o prosseguimento dos ensaios. Experimentalmente, foi verificado que valores acima desse limite evidenciam interferências no sinal captado no ensaio e comprometem a veracidade dos resultados.

3.10.3.3 Avaliação da integridade estrutural e ensaios de impacto balísticos

Uma análise sobre a aplicabilidade da plataforma desenvolvida foi realizada, com base nos principais pilares que compõem um sistema de MIE. Através dos ensaios de impacto, os danos foram registrados e discutidos, com o intuito de validar as simulações numéricas e evidenciar a aplicabilidade do sistema de MIE. Além disso, a análise teve como objetivo evidenciar a potencialidade do sistema de avaliar as características de uma estrutura de forma on-line, por meio de informações obtidas pela plataforma em operação.

Os ensaios de impacto balísticos foram realizados nos painéis sanduíches nas dimensões de fabricação (150 x 100 x 5,5 mm). As bordas dos painéis fabricados, constituídas de uma pequena porção de resina, expelida em função do processo de compactação, foram retiradas. Salienta-se que não foi utilizado qualquer entalhe para facilitar a propagação das trincas, o que pressupõe que a energia de impacto foi utilizada tanto para a criação quanto para a propagação das trincas nos corpos de prova.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos, com o uso da metodologia descrita no capítulo anterior, da caracterização mecânica dos painéis sanduíches e de seus materiais constituintes, isoladamente. Além disso, o capítulo apresenta o desempenho do sistema desenvolvido para o monitoramento da integridade estrutural dos painéis sanduíches. Os fenômenos presentes no estudo são detalhados e discutidos por meio de análises quantitativas e qualitativas, englobando também comparações com trabalhos semelhantes presentes na literatura discutida.

4.1 Caracterização mecânica dos materiais constituintes dos painéis sanduíches

4.1.1 Ensaios de tração e análise da rugosidade superficial na liga de alumínio

A caracterização mecânica da liga de alumínio 2024-T3, por meio dos ensaios de tração (sem extensômetro), é apresentada na Tabela 4.1. Os corpos de prova apresentaram valores médios de módulo de elasticidade (44,75 MPa), resistência à tração (433,40 MPa) e deformação final (7,29%) próximos a valores encontrados em trabalhos na literatura, como descrito nos estudos de Silva (2006) e Vieira (2018).

Tabela 4.1
Ensaios de tração da liga de alumínio 2024-T3

Liga de alumínio 2024-T3	E_t (GPa)	Limite de escoamento (MPa)	σ_t (MPa)	ε (%)
Média	44,75	281,61	433,40	7,29
Desvio-padrão	0,77	12,11	28,52	1,01
Coeficiente de variação	2%	4%	7%	14%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.1a mostra exemplos de curvas de tensão por deformação da liga de alumínio 2024-T3. Foi verificado um comportamento elástico até uma tensão média próxima à 282 MPa (limite de escoamento 0,2%) e, a partir disso, uma notável deformação plástica ocorre. Com um alongamento médio de 7,29%, uma ruptura dúctil da chapa é visualizada. Um perfil de trinca na direção diagonal foi predominante na ruptura da chapa, como mostra a Figura 4.1b. O

comportamento mecânico dessas chapas metálicas também foi investigado por Vieira (2018), que encontrou resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo.

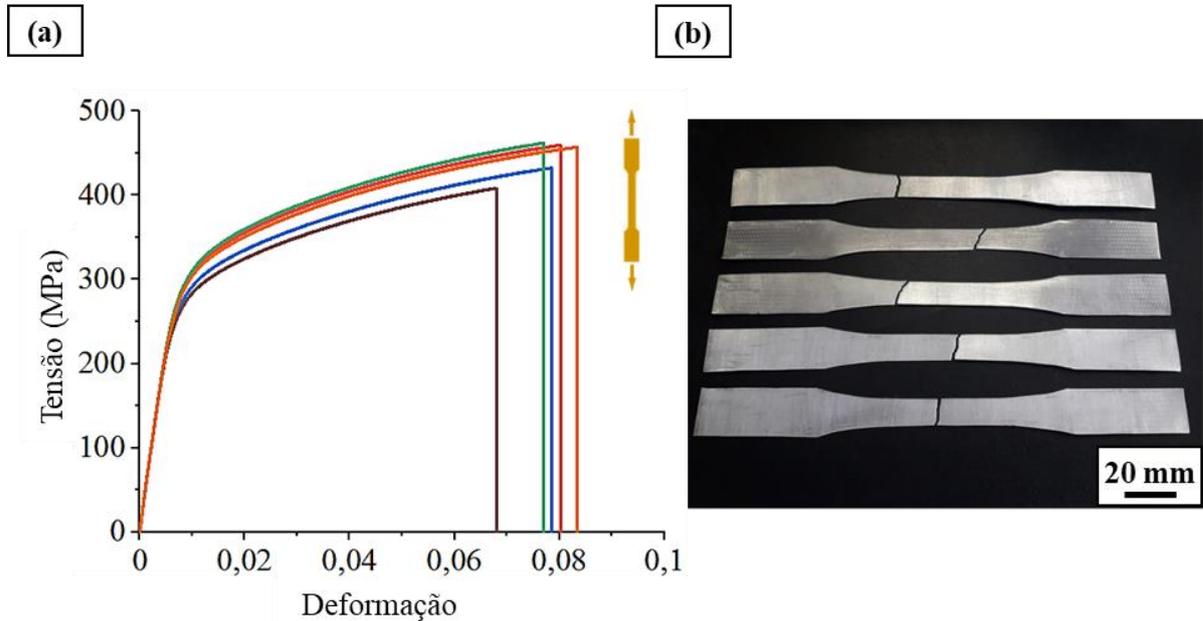


Figura 4.1 – Ensaio de tração da liga de alumínio 2024-T3: (a) Curvas de tensão por deformação e (b) região de fratura.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Com relação à análise da rugosidade superficial da liga de alumínio, foi verificado que o tratamento utilizado nas chapas retirou a polidez da liga, como mostra a Figura 4.2, um exemplo que destaca uma zona de transição entre regiões não tratadas e tratadas de liga de alumínio, por meio da presença de sulcos provocados pelo tratamento abrasivo e alterações na rugosidade superficial da chapa metálica. O tratamento nas chapas teve como objetivo melhorar a adesão desses materiais com o adesivo epóxi, retirando as impurezas e a camada de óxido passivo, que ocorre devido à alta afinidade do alumínio com o oxigênio. Essa camada aumenta a estabilidade química da liga, o que não favorece a adesão interfacial com a resina de epóxi (OLIVEIRA, 2018).

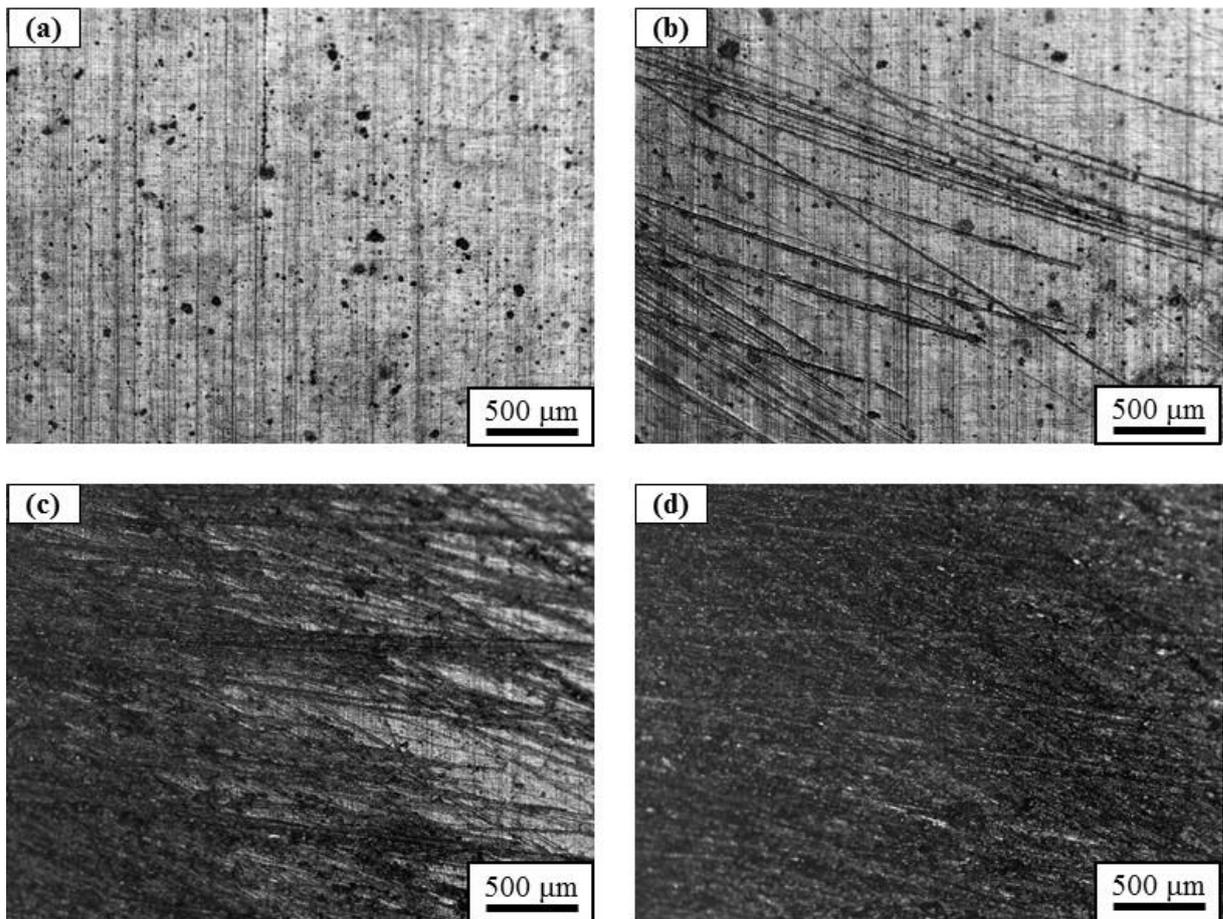


Figura 4.2 – Microscopia óptica da liga de alumínio 2024-T3: (a) material antes do tratamento, (b) e (c) região de transição entre porção de material não tratada e a porção de material tratada com abrasivo e (d) material completamente tratado.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Com relação aos valores obtidos na análise da rugosidade superficial das chapas, percebe-se que o tratamento aumenta as amplitudes dos parâmetros de rugosidade, o que aumenta o ancoramento mecânico do substrato. Um melhor intertravamento mecânico da chapa com a resina impacta positivamente na transferência de forças no painel sanduíche (LEVY NETO & PARDINI, 2016). A Figura 4.3 mostra os aumentos percentuais dos parâmetros com o uso do tratamento na chapa.

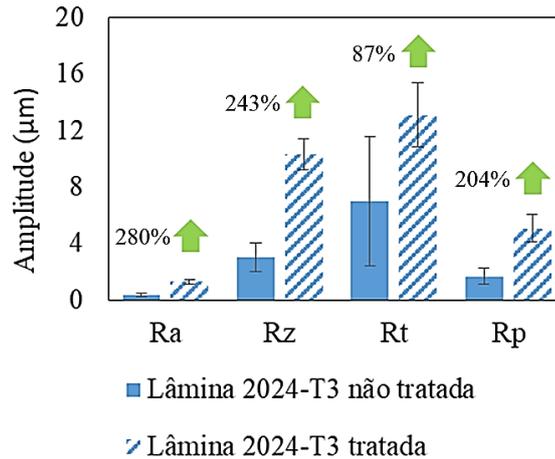


Figura 4.3 – Amplitude da rugosidade na superfície da lâmina de liga de alumínio 2024-T3 não tratada e tratada (análise feita conforme a norma ISO 4288-96).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.1.2 Ensaio de tração e flexão em três pontos no epóxi

Os resultados dos ensaios de tração e de flexão dos corpos de prova de epóxi são apresentados na Tabela 4.2. Os módulos de elasticidade médios na tração (E_t) e na flexão (E_f) foram de 1,71 GPa e de 2,19 GPa. A tensão máxima, por sua vez, alcançou valores médios de 36,93 MPa e de 75,07 MPa, nos ensaios de tração (σ_t) e flexão (σ_f), respectivamente. Os estudos de Ferreira (2017) e de Oliveira (2018) também investigaram as propriedades de tração e flexão da resina Renlam M com endurecedor Aradur HY 951 na proporção 100:10 em peso, e obtiveram valores próximos aos encontrados nos testes de tração e flexão deste estudo.

Tabela 4.2
Ensaio de tração e flexão dos corpos de prova de epóxi

Resina epóxi	Ensaio de Tração			Ensaio de Flexão		
	E_t (GPa)	σ_t (MPa)	ϵ (%)	E_f (GPa)	σ_f (MPa)	Deslocamento (mm)
Média	1,71	36,93	3,45	2,19	75,07	6,35
Desvio-padrão	0,22	3,41	0,40	0,20	5,32	0,70
Coefficiente de variação	13%	9%	12%	9%	7%	11%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

As típicas curvas de tensão por deformação do epóxi podem ser observadas por meio da Figura 4.4a. Uma transição pouco aparente entre o regime elástico e o regime plástico é observada, com uma baixa deformação final e uma fratura de natureza frágil. As curvas de força por deslocamento, por sua vez, obtidas nos ensaios de flexão, podem ser visualizadas por meio

da Figura 4.4b. Um deslocamento médio de pino central de 6,35 mm foi verificado, e um perfil de fratura no centro do corpo de prova (região de contato com o pino da máquina), com a propagação de trincas na direção transversal ao seu comprimento, caracterizou o comportamento típico na fratura desses materiais sob os ensaios de flexão.

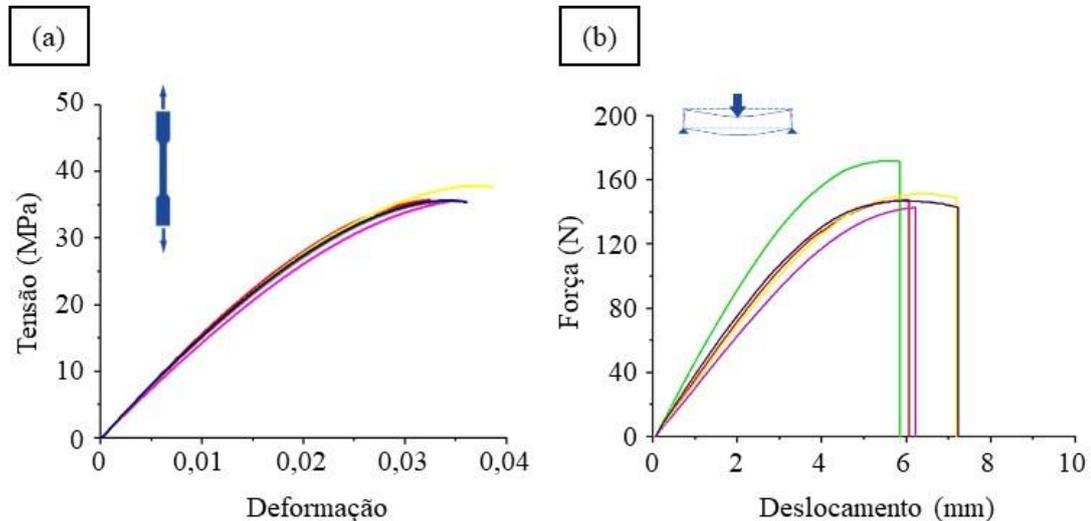


Figura 4.4 – Ensaios mecânicos do epóxi: (a) curvas de tensão por deformação, obtidas nos ensaios de tração e (b) curvas de força por deslocamento, obtidas nos ensaios de flexão.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.1.3 Ensaios de tração no PLA e no ABS

A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados com os corpos de prova de PLA e de ABS, com camadas impressas em 3D usando preenchimento Raster alternado em 45° , com contorno linear duplo. Os valores obtidos nesse ensaios foram próximos a outros resultados obtidos na literatura, com o uso de manufatura aditiva para a fabricação dos corpos de prova (SARVESTANI *et al.*, 2018b; TSOUKNIDAS *et al.*, 2016). Os estudos de Chacón *et al.* (2017) e de Caminero *et al.* (2018) atestam que a resistência à tração do PLA impresso com o uso do método de FDM varia entre 15,5 e 72,2 MPa, e que o módulo de elasticidade na tração está entre 2,02 e 3,55 GPa e a deformação na ruptura se situa entre 0,5 e 9,2 %. Da mesma forma, os valores obtidos para o ABS também estão compreendidos entre a faixa de resultados encontrados na literatura, como mostram os estudos de Samykano *et al.* (2019) e de Galeja *et al.* (2020). Os ensaios de tração validaram a integridade dos filamentos de PLA e de ABS, e a qualidade dos componentes produzidos com o uso do método de FDM, para a criação dos núcleos poliméricos impressos em 3D.

Tabela 4.3
Ensaio de tração do PLA e do ABS com preenchimento Raster alternado (45°)

Material impresso		E_t (GPa)	σ_t (MPa)	ϵ (%)
PLA	Média	2,74	56,13	3,03
	Desvio-padrão	0,16	1,16	0,40
	Coeficiente de variação	6%	2%	13%
ABS	Média	1,57	30,58	4,63
	Desvio-padrão	0,08	1,25	0,29
	Coeficiente de variação	5%	4%	6%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.5 mostra exemplos típicos de curvas de tensão por deformação do PLA e do ABS, obtidos nos ensaios de tração. Os corpos de prova de PLA apresentaram uma fratura frágil no ensaio de tração (Figura 4.5a), com fraturas progressivas das camadas de filamentos. Por outro lado, o ABS (Figura 4.5b) teve uma menor rigidez na tração que o PLA, e apresentou uma menor carga máxima na tração e uma maior deformação plástica até a fratura. Pela área sob a curva do gráfico, percebe-se uma maior tenacidade do ABS. Com relação ao mecanismo de falha, cita-se a influência da orientação dos filamentos extrudados no processo de impressão 3D, em que materiais com preenchimento Raster alternado em 45° sofrem fraturas tanto na seção transversal dos filamentos extrudados (*in-layer*) quanto na ligação entre filamentos (*inter-layer*) (YAO *et al.*, 2020). Lanzotti *et al.* (2015) afirmam que planos de cisalhamento são criados com base em ligações descontínuas entre filamentos impressos. Dessa forma, falhas dúcteis ocorrem em planos paralelos às superfícies de fratura, as quais são deslocadas umas das outras.

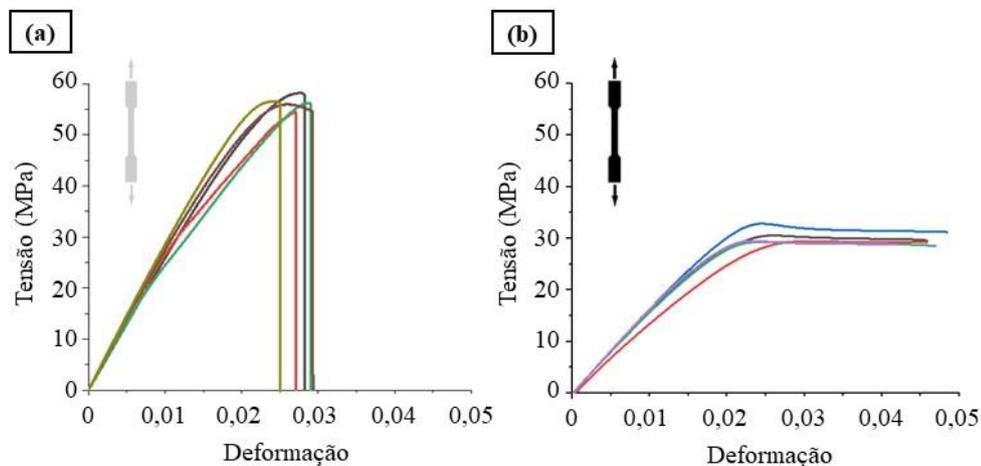


Figura 4.5 – Ensaio de tração: curvas de tensão por deformação do (a) PLA e do (b) ABS.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.2 Caracterização mecânica dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

4.2.1 Avaliação geral sobre a impressão em 3D dos núcleos poliméricos celulares

A Figura 4.6 mostra a arquitetura dos núcleos poliméricos impressos em 3D com padrões celulares de preenchimento, obtidos a partir do método de FDM. Os projetos impressos alcançaram uma notável consistência, uma vez que apresentaram boa ligação entre os filamentos impressos, além de uma baixa variabilidade de massa. Os núcleos impressos com desvios a esses preceitos foram prontamente descartados. Salienta-se que a forma de deposição do filamento também influencia diretamente nesse quesito, como mostra o trabalho de Chacón *et al.* (2017), que verificou uma maior resistência à tração e à flexão de materiais impressos em 3D na forma de deposição por planos na direção longitudinal.

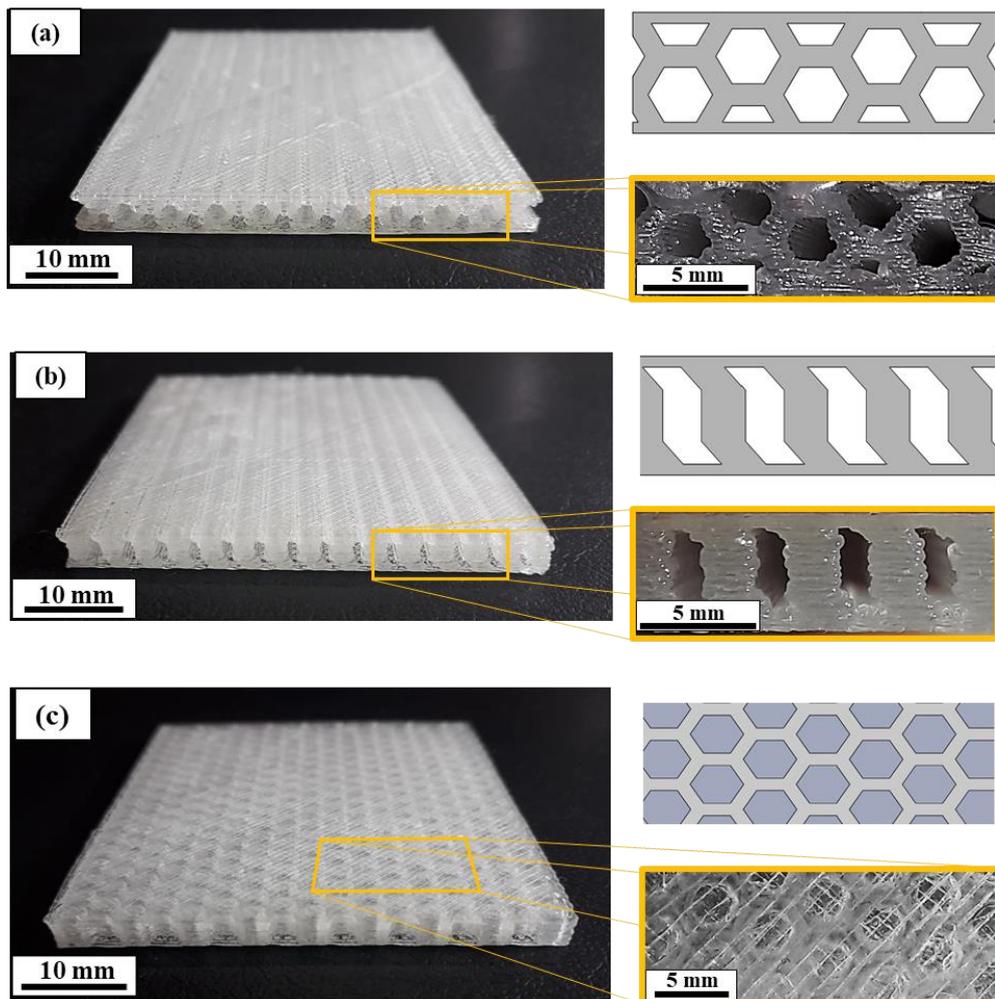


Figura 4.6 – Núcleos poliméricos impressos em 3D, com padrões celulares de preenchimento: (a) núcleo *honeycomb* horizontal, (b) núcleo corrugado com células em S e (c) núcleo *honeycomb* vertical (material de filamento: PLA).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Tabela 4.4 mostra o resultado da análise de variância dos testes mecânicos, com o intuito de observar se houve diferença nas médias amostrais obtidas para cada propriedade analisada nos ensaios, considerando o fator “tipo de núcleo celular”. Nos casos em que o p-valor se mostra menor que o nível de significância ($\alpha = 0,05$), constata-se que as médias das condições amostrais para a propriedade analisada são significativamente diferentes. Os pressupostos de normalidade dos resíduos e de homocedasticidade (variância constante) foram analisados, respectivamente, pelos testes de Anderson-Darling (AD) e de Bartlett, em que um p-valor maior que o nível de significância denota que os pressupostos foram atendidos. O valor de R^2 ajustado denota o grau de explicação da variabilidade dos dados (ajuste do modelo aos dados).

Tabela 4.4
ANOVA dos testes mecânicos dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

Fonte de variação	Variáveis de resposta (p-valor)				
	Ensaio de tração		Ensaio de flexão		Ensaio de impacto Charpy
	E_t	σ_t	E_f	σ_f	E_c
Fator “Tipo de núcleo celular”	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,01</u>	<u>0,00</u>
Anderson-Darling	0,440	0,809	0,248	0,856	0,943
Bartlett	0,539	0,361	0,848	0,439	0,235
R^2 (adj) (%)	96,02	97,68	95,66	94,25	97,19

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A análise de variância denotou diferenças significativas entre as médias amostrais de todas as propriedades analisadas. Os pressupostos de normalidade de resíduos e de homocedasticidade foram seguidos, validando os modelos ajustados, considerando 95% de confiança. Para um melhor entendimento sobre quais médias amostrais são realmente diferentes, com base em uma determinada propriedade, usou-se o teste de Tukey, que é apresentado na Tabela 4.5. Os agrupamentos mostraram uma alta anisotropia dos núcleos poliméricos, uma vez que a direção de deposição dos filamentos teve efeito significativo nas médias amostrais obtidas nos testes mecânicos. Por isso, os núcleos poliméricos com células fora do plano (núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado com células em S) diferiram estatisticamente da condição com células no plano (núcleo *honeycomb* vertical) em quase todas as propriedades, exceto para módulo de elasticidade na flexão.

Tabela 4.5
Resultados dos testes de diferenças de médias, pelo método de Tukey e 95% de confiança

Tipo de núcleo celular	Tração		Flexão		Impacto Charpy
	E_t	σ_t	E_f	σ_f	E_c
HC_HORIZ	A	A	A	A	A
CEL_S	A	A	B	A	A
HC_VERT	B	B	B	B	B

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.2.2 Resultados dos ensaios de tração dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

A Tabela 4.6 mostra os valores obtidos nos ensaios de tração dos núcleos poliméricos celulares de PLA impressos em 3D. Uma superioridade nos valores médios de módulo de elasticidade na tração (E_t) e de tensão máxima na tração (σ_t) para as configurações de núcleo *honeycomb* horizontal e corrugado em S foi verificada. Essa diferença, já denotada pelo teste de Tukey, se explica pelo forte comportamento anisotrópico dos filamentos depositados no núcleo, uma vez que as células depositadas em alinhamento com a direção do teste fornece ao painel uma maior resistência. Salienta-se também que as propriedades fora do plano são geralmente maiores que no plano, mesmo para materiais isotrópicos. Os núcleos em *honeycomb* vertical, por sua vez, apresentaram deformações internas nas paredes celulares que geram concentradores de tensões, devido aos ângulos de suas células. O estudo de Bodaghi *et al.* (2017) também investigou as propriedades mecânicas de painéis de PLA com células hexagonais verticais e mostrou uma forte influência da relação entre a forma de disposição da célula e a direção da carga aplicada na resistência final da estrutura, tanto sob tensões trativas quanto sob tensões compressivas.

Tabela 4.6
Ensaio de tração dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

Tipo de núcleo celular		E_t (GPa)	σ_t (MPa)	ϵ (%)
<i>Honeycomb</i> horizontal	Média	2,76	43,23	2,46
	Desvio-padrão	0,24	5,24	0,33
	Coefficiente de variação	9%	12%	13%
Corrugado com células em S	Média	2,69	47,38	2,44
	Desvio-padrão	0,23	5,10	0,34
	Coefficiente de variação	9%	11%	14%
<i>Honeycomb</i> vertical	Média	1,27	16,06	2,82
	Desvio-padrão	0,10	1,81	0,35
	Coefficiente de variação	8%	11%	12%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.7 mostra exemplos de curvas de tensão em função da deformação dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D. Alguns corpos de prova com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugados em S mostraram um fenômeno de ruptura progressiva dos filamentos, o que é denotado por variações acentuadas (picos e vales) ao longo dessas curvas (círculos pontilhados em Figura 4.7). Com o aumento da tensão imposta, as camadas vão se rompendo gradativamente, até o colapso final do corpo de prova.

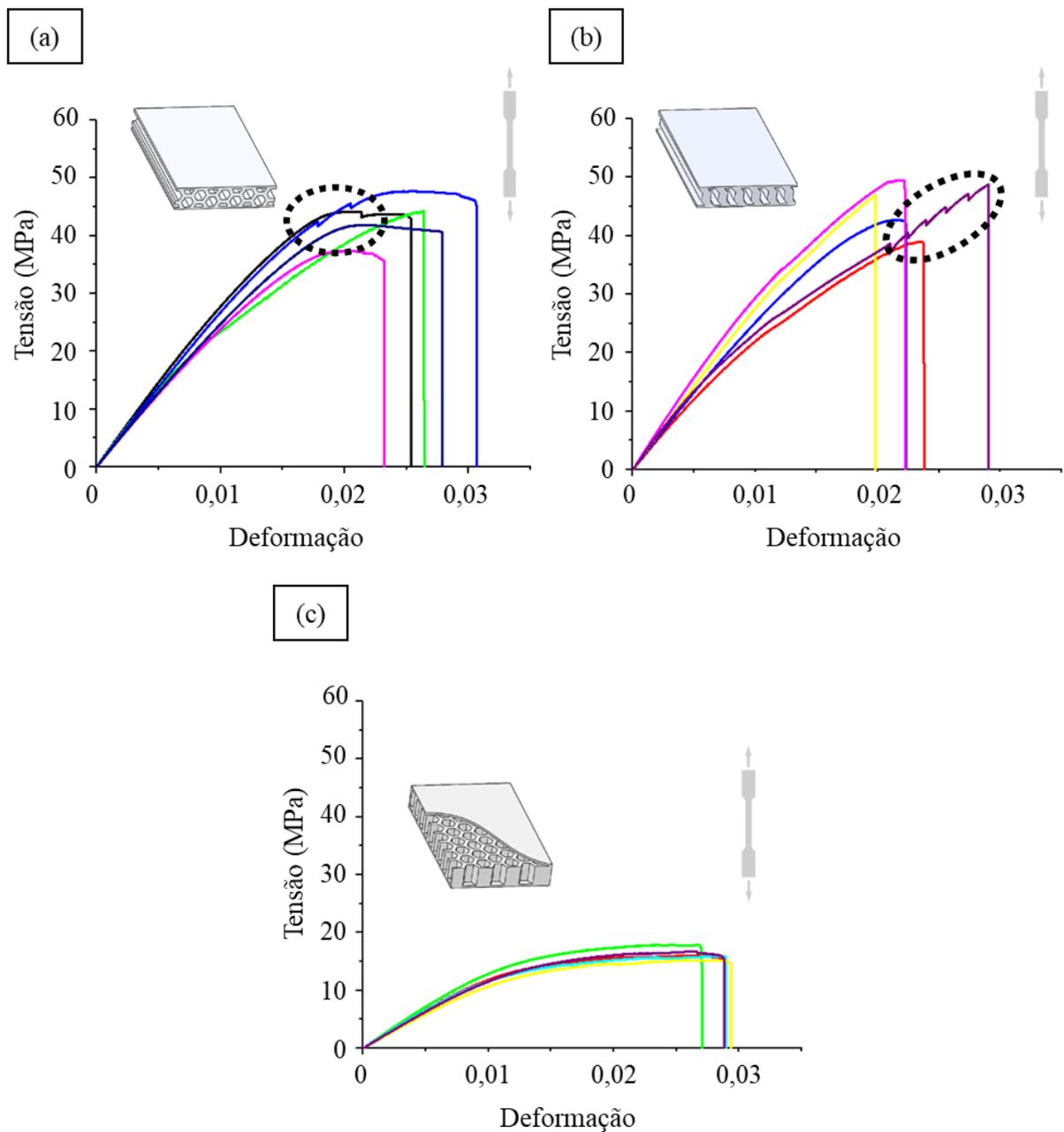


Figura 4.7 – Curvas de tensão por deformação dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D obtidas nos ensaios de tração: (a) *honeycomb* horizontal, (b) corrugado em S e (c) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Nos núcleos com configuração *honeycomb* vertical, devido à natural tendência de estiramento das células, uma menor força é necessária para gerar a deformação do corpo de prova. Percebe-se, também, uma região da curva em que uma tensão quase constante, em um determinado nível, causa uma deformação contínua no material. Após esse fenômeno, quando alcançado o alongamento máximo das células com regiões concentradoras de tensão, o material se rompe. Adicionalmente, salienta-se que a grande diferença verificada no comportamento mecânico dos núcleos em *honeycomb* vertical, em comparação com as outras configurações, é explicada por uma influência do processo de impressão 3D. Isso ocorre em função da deposição de filamento impresso sobre a região interna das células (vazios), pois a lacuna existente entre as paredes celulares recebe o filamento extrudado de forma menos regular, criando possíveis pontos de concentração de tensão e influenciando negativamente na resistência do objeto impresso. Esse efeito, verificado principalmente na primeira camada superior à seção celular, é resultante de diversos parâmetros como a tamanho da célula hexagonal (distância entre as paredes celulares), a velocidade de impressão (quanto menor a velocidade de impressão, maior será a tendência de deposição de material nessas lacunas) e a espessura da camada (quanto mais fina a camada, maior a probabilidade de concentração de tensão nesses pontos) (PANDA *et al.*, 2018).

A Figura 4.8 mostra o modo de fratura dos núcleos poliméricos celulares nos ensaios de tração. Uma fratura de perfil frágil é observada, de forma semelhante à verificada nos ensaios de tração do PLA preenchido em Raster alternado em 45°. Além disso, não houve, macroscopicamente, uma deformação plástica evidente. Esses resultados eram esperados, em função do modo de fratura do PLA, material adotado na análise. O descolamento de camadas nos corpos de prova que apresentaram, na região de fratura, um perfil mais heterogêneo (setas azuis na Figura 4.8b e na Figura 4.8f), gera valores mais baixos de módulo de elasticidade e de resistência à tração. A partir disso, percebe-se que quanto melhor a adesão entre as camadas impressas e quanto maior a resistência entre camadas, mais uniformemente o material impresso se comporta frente às tensões, devido à melhor distribuição de energia na estrutura. Quanto à propagação de trincas, houve uma predominância na direção diagonal ao plano de ruptura. Uma falha de ligação entre os filamentos faz com que o material perca em rigidez, e a resistência ligada aos filamentos mais alinhados à direção da tensão uniaxial de tração são influentes devido à anisotropia. Após a tensão máxima de resistência, o material se rompe de forma instantânea, com uma tensão máxima muito próxima à tensão de ruptura. Chacón *et al.* (2017) também explicam esse fenômeno, uma vez que as camadas com orientação transversal, perpendiculares à carga de tração uniaxial, apresentam falhas de ligação entre camadas (*inter-*

layer) decorrentes do processo de fusão, e a boa adesão entre camadas é significativamente influente na resistência à tração. No caso das camadas com filamentos em paralelo à direção de carregamento, falhas pela ruptura de filamentos (*in-layer*) são evidentes, uma vez que esses filamentos resistem à maior parte da carga aplicada.

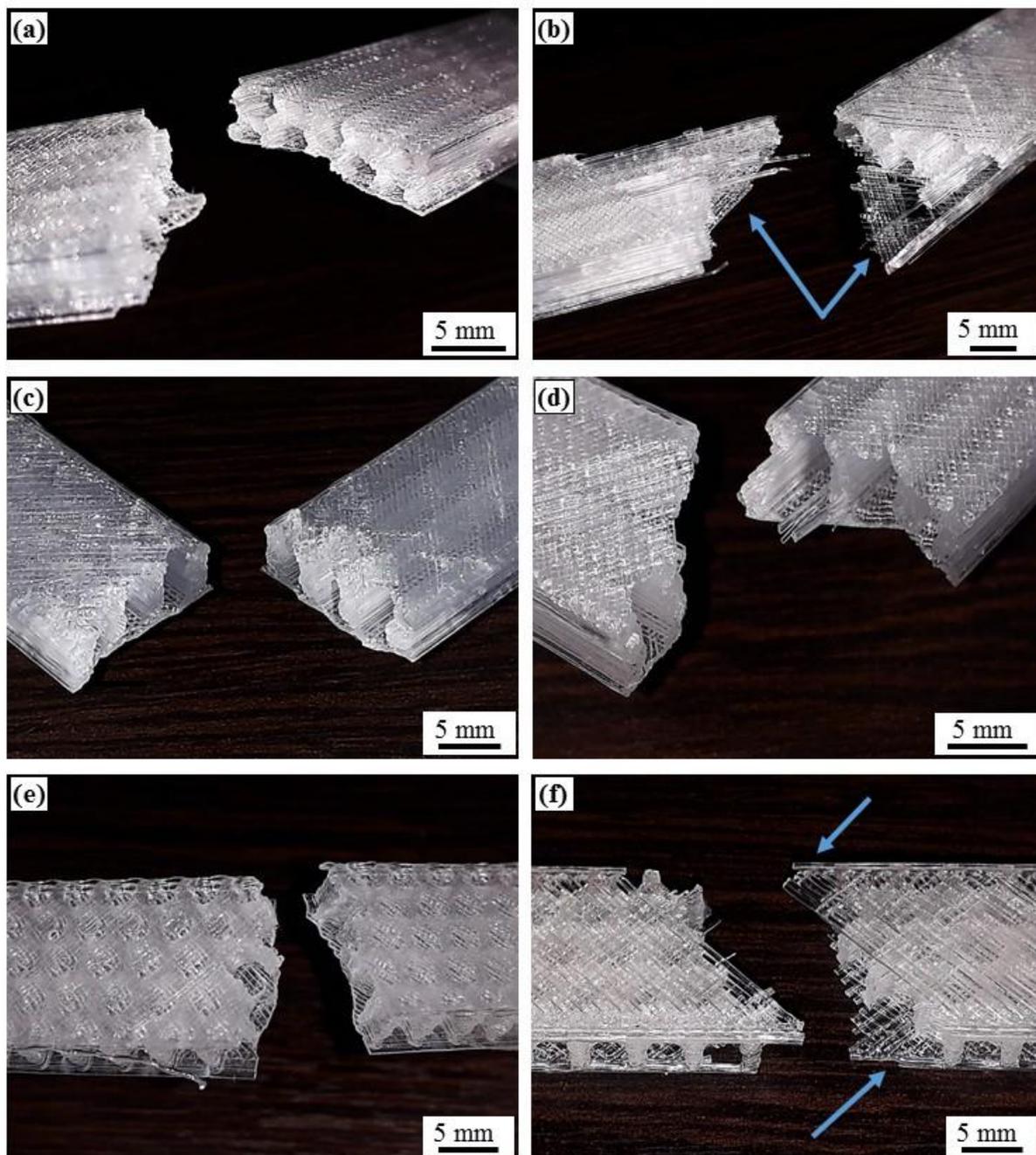


Figura 4.8 – Região de fratura dos núcleos poliméricos celulares nos ensaios de tração: (a) e (b) *honeycomb* horizontal, (c) e (d) corrugado em S, (e) e (f) *honeycomb* vertical.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.2.3 Resultados dos ensaios de flexão dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

A Tabela 4.7 mostra os resultados dos ensaios de flexão dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D. O valor médio de módulo de elasticidade na flexão (E_f) foi maior para o núcleo em *honeycomb* horizontal e os valores médios para resistência à flexão (σ_f) foram semelhantes para os núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S. Por outro lado, os núcleos em *honeycomb* vertical apresentaram uma baixa rigidez e uma menor carga necessária para a fratura. Com relação ao deslocamento máximo do pino central da máquina de teste, não houve diferenças significativas entre as amostras.

Tabela 4.7
Ensaio de flexão dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

Tipo de núcleo celular		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	Deslocamento (mm)
<i>Honeycomb</i> horizontal	Média	2,23	46,32	8,07
	Desvio-padrão	0,21	5,46	0,60
	Coefficiente de variação	10%	12%	7%
Corrugado com células em S	Média	1,90	43,44	8,29
	Desvio-padrão	0,12	1,82	0,67
	Coefficiente de variação	7%	4%	8%
<i>Honeycomb</i> vertical	Média	1,73	29,81	7,82
	Desvio-padrão	0,10	1,97	1,00
	Coefficiente de variação	6%	7%	13%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.9 apresenta exemplos das curvas de força por deslocamento dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D, obtidas nos ensaios de flexão. Uma maior absorção de energia pelos núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S é notada, em função da área sob a curva força-deslocamento do gráfico. Este desempenho pode ser explicado pelas propriedades de tração do conjunto de filamentos longitudinais que fornecem melhores propriedades de tração que as paredes celulares que compõem as células hexagonais arquitetadas verticalmente. Similarmente aos ensaios de tração, o desempenho inferior dos corpos de prova com núcleos em *honeycomb* vertical pode ser explicado pela impressão da camada superior às células verticais, que pode ter gerado pontos de concentração de tensão, em função do tamanho da célula hexagonal. Por fim, uma maior rigidez pelos núcleos em *honeycomb* horizontal pode ser explicada pela combinação da rede de filamentos que compõem as paredes celulares e da equilibrada distribuição de massa por unidade de área.

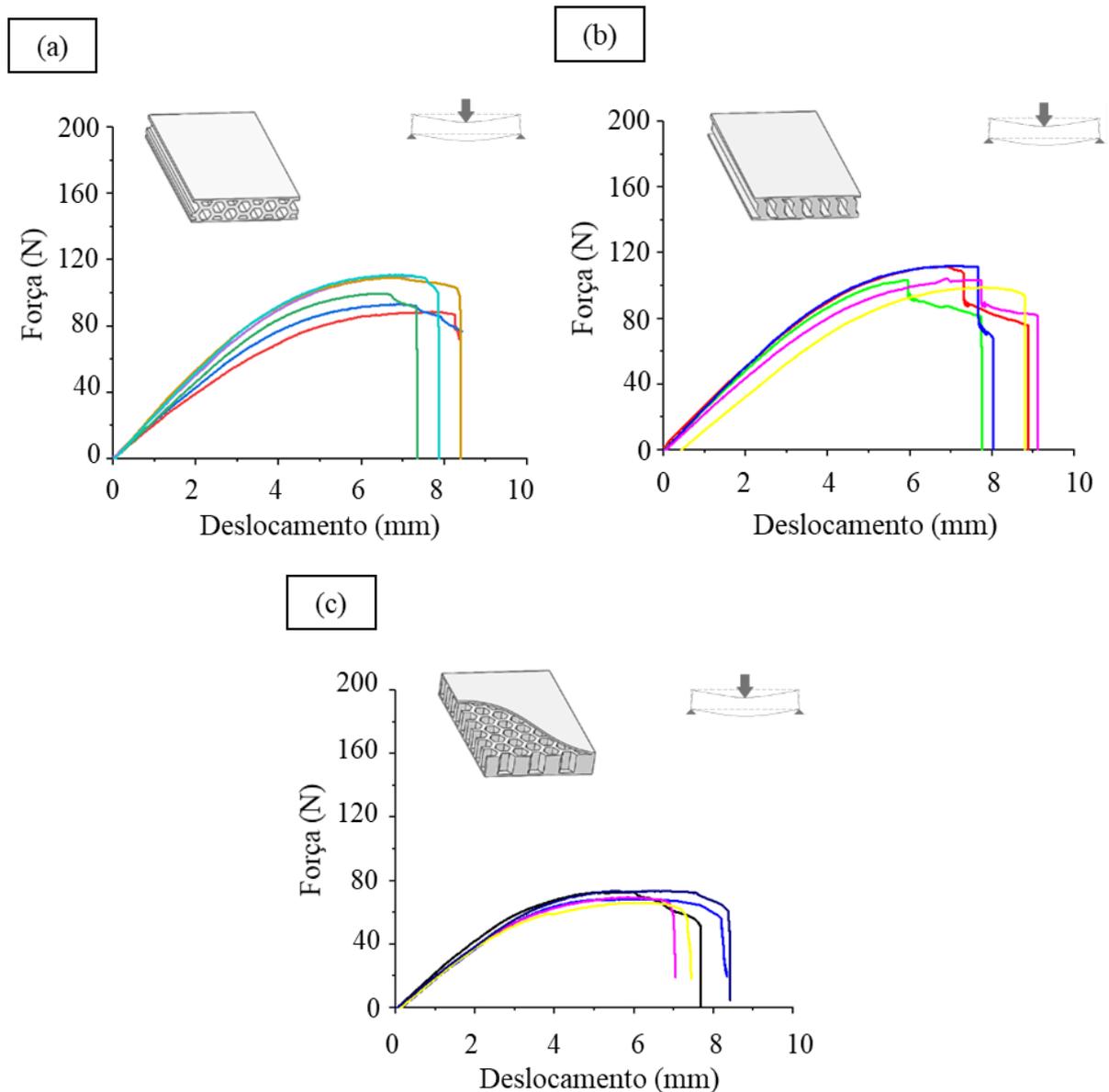


Figura 4.9 – Curvas de força por deslocamento dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D, obtidas nos ensaios de flexão: (a) *honeycomb* horizontal, (b) corrugado em S e (c) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A ruptura progressiva de filamentos nos corpos de prova com núcleo em *honeycomb* horizontal também é verificada, por meio de variações nas curvas que denotam a ruptura final do material em pontos posteriores à força máxima registrada. Nos núcleos em *honeycomb* vertical, a carga foi suportada em um baixo regime elástico por meio das faces plásticas de topo e de base (camadas de face e topo, impressas em 45°). Gomez-Gras *et al.* (2018) afirmam que estruturas de PLA podem sofrer fraturas dúcteis e frágeis, diante de solicitações mecânicas, e o tipo de preenchimento presente na região de concentração da tensão influencia diretamente em seu comportamento. Os filamentos podem absorver a carga, por meio da nucleação e da

propagação de trincas, porém quando há maior espaçamento entre eles, camadas mais externas do corpo de prova podem apresentar notável deformação plástica antes da fratura.

A região de fratura dos núcleos poliméricos celulares nos ensaios de flexão pode ser visualizada na Figura 4.10. As fraturas foram concentradas na região central do corpo de prova (local de contato com o pino central), levando à ruptura (fratura frágil) completa do material ou gerando trincas em camadas.

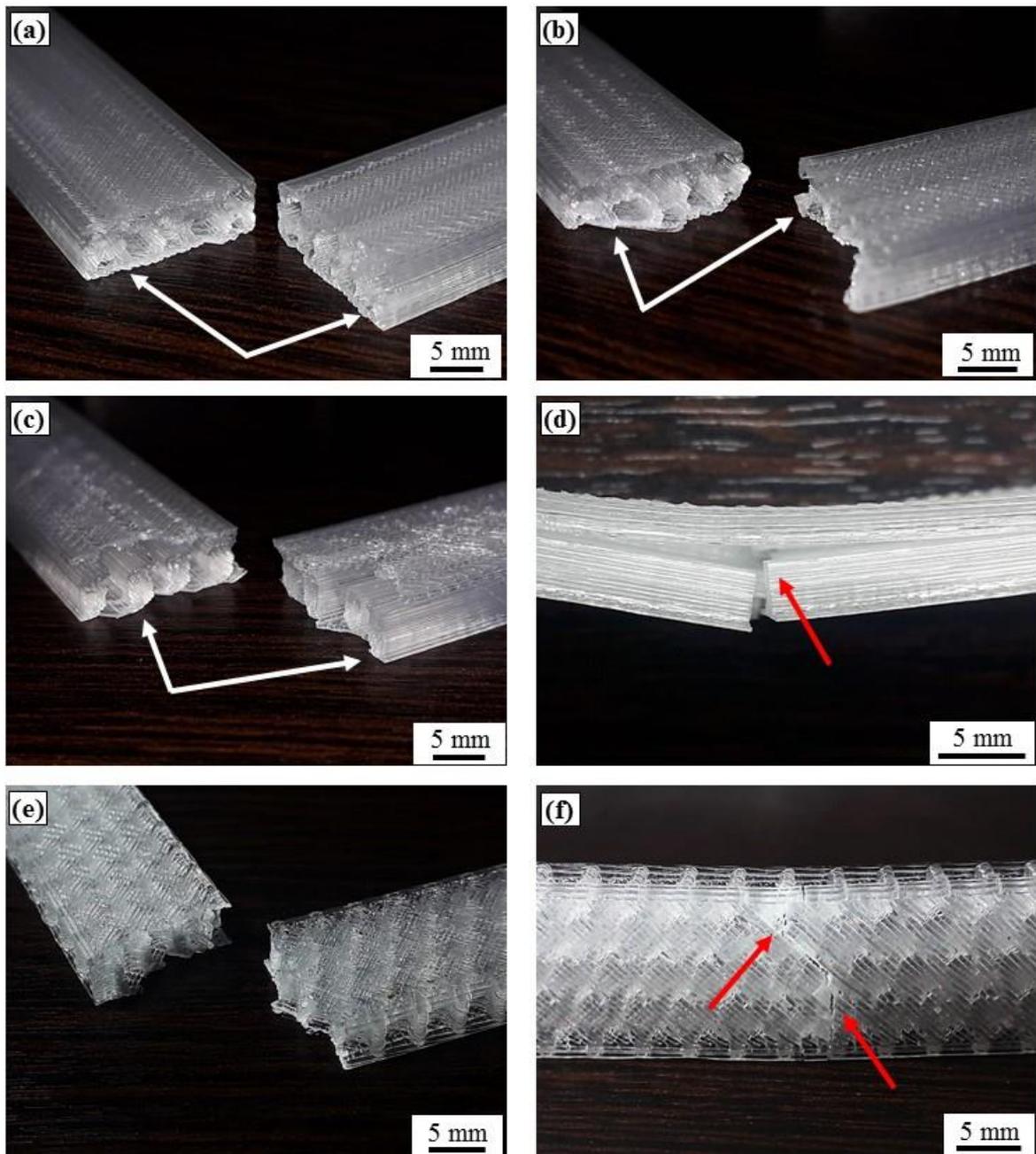


Figura 4.10 – Região de fratura dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D nos ensaios de flexão: (a) e (b) *honeycomb* horizontal, (c) e (d) corrugado em S, (e) e (f) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Além disso, microdeformações plásticas por tensões trativas na região adjacente à origem das trincas, na face inferior do corpo de prova, denotadas pela alteração de cor (perfil mais opaco, setas brancas na Figura 4.10a, 4.10b e 4.10c) e decorrentes de alterações moleculares, também foram visualizadas nesses ensaios. A partir dessas deformações, trincas foram se propagando verticalmente (seção transversal) no sentido da face de topo. A ocorrência de trincas sem uma ruptura total do corpo de prova foi verificada nas três condições, como mostram as Figura 4.10d e Figura 4.10f (setas vermelhas), exigindo uma carga de mesma magnitude que nos casos em que houve ruptura completa. Esse fenômeno evidencia a absorção de energia em outras direções, além da normal ao plano, que pode levar ao descolamento entre camadas de filamentos de PLA. Nos ensaios de flexão com núcleos em *honeycomb* vertical, diferentemente das outras condições, a presença de trincas sem a ruptura total ocorreu majoritariamente. Esses núcleos, que possuem uma maior densidade de ligações entre filamentos, também apresentaram microdeformações nas regiões próximas das trincas, porém em menor área, o que mostra uma maior probabilidade de propagação de trincas na direção vertical do corpo de prova.

4.2.4 Resultados dos ensaios de impacto Charpy dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D

Os ensaios de impacto Charpy indicaram a energia absorvida ao impacto (E_c) por cada condição experimental. A Figura 4.11 mostra os valores de energia absorvida (E_c) no impacto Charpy, obtidos nesses ensaios. Houve uma maior absorção de energia nos núcleos em *honeycomb* horizontal ($0,58 \pm 0,05$ J) e corrugado em S ($0,54 \pm 0,03$ J) que aqueles com núcleo *honeycomb* vertical ($0,44 \pm 0,05$ J). A diferença percentual na energia absorvida foi de até 32% maior, em valores médios, para os núcleos com filamentos longitudinais.

Os resultados mostraram maior transferência de energia pela rede de filamentos longitudinais da estrutura, o que também foi visualizado nos ensaios de tração e de flexão em três pontos. Nesses testes, tensões de compressão são impostas à superfície de topo do material. Essas tensões causam uma deflexão global da estrutura, e tendem a apresentar uma propagação rápida de tensões cisalhantes, que levam à ruptura do material.

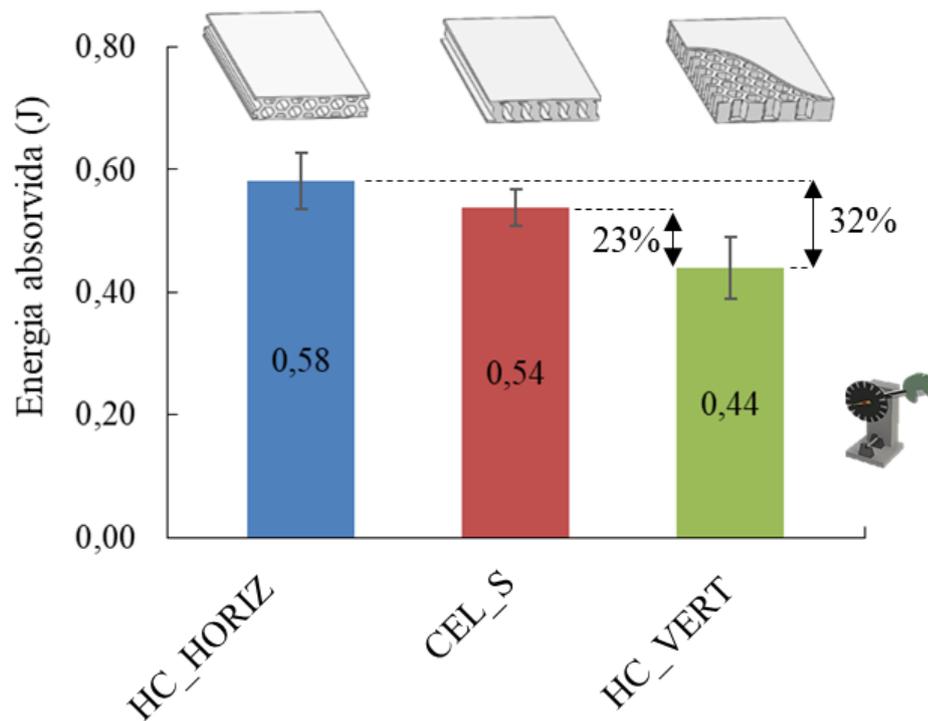


Figura 4.11 – Energia absorvida ao impacto Charpy dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Nos ensaios de impacto Charpy, um modo de fratura frágil foi verificado em todas as condições. Uma ruptura heterogênea de camadas pode ser visualizada (setas vermelhas na Figura 4.12), onde percebe-se que a trinca é propagada na direção do impacto do pêndulo, porém de forma irregular. Além disso, a forma de posicionamento do corpo de prova para o impacto do pêndulo influencia diretamente nos valores obtidos para energia absorvida, devido a efeitos inerciais. Descolamentos de filamentos foram visualizados (setas azuis na Figura 4.12), demonstrando uma propagação de energia na região interfacial entre filamentos. No caso dos núcleos em *honeycomb* vertical, devido à alta presença de ligações entre filamentos depositados e processo de descolamento desses filamentos, a ruptura ocorre com menor absorção global de energia (menor área de dano).

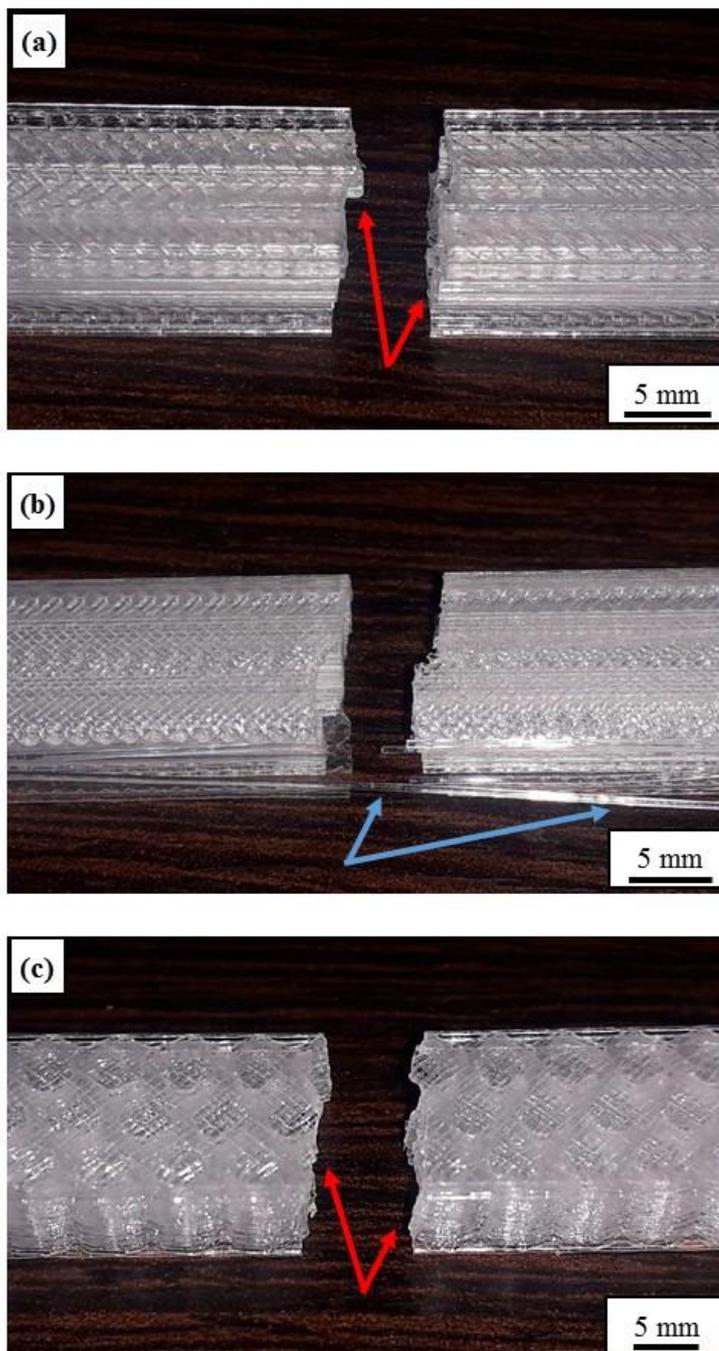


Figura 4.12 – Região de fratura dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D nos ensaios de impacto Charpy: (a) *honeycomb* horizontal, (b) corrugado em S e (c) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.3 Caracterização mecânica dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Para analisar a influência do material e da configuração do núcleo polimérico impresso em 3D nas propriedades de flexão, impacto Charpy e impacto balístico dos painéis sanduíches, foram realizadas análises de variância dos resultados obtidos (Tabela 4.8). A interação entre os

fatores “tipo de material do núcleo” (TMN) e “configuração do núcleo” (CN) mostrou significativo efeito no comportamento sob flexão dos corpos de prova, com base no módulo de elasticidade na flexão (E_f), resistência à flexão (σ_f), deslocamento máximo, tensão na face (σ_l) e resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (F_s^{ult}). Além disso, a interação entre os fatores também foi significativa na energia absorvida média no impacto Charpy e na área absoluta do sinal de tensão elétrica gerado nos impactos balísticos. Os p-valores encontrados nos testes de Anderson-Darling e de Bartlett atestaram que os pressupostos de normalidade dos resíduos e de homocedasticidade foram garantidos.

Tabela 4.8
ANOVA dos resultados dos testes mecânicos dos painéis sanduíches

Fonte de variação	Variáveis de resposta (p-valor)						
	Ensaio de flexão					Ensaio de impacto Charpy	Ensaio balísticos
	E_f	σ_f	Deslocamento	σ_l	F_s^{ult}	E_c	Área absoluta do sinal
Fator “Tipo de material do núcleo” (TMN)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fator “Configuração do núcleo” (CN)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Interação TMN*CN	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>	<u>0,00</u>
Anderson-Darling	0,690	0,838	0,268	0,996	0,928	0,817	0,414
Bartlett	0,481	0,807	0,156	0,264	0,368	0,216	0,089
R ² (adj) (%)	99,01	99,16	99,02	98,44	98,88	98,56	99,29

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Tabela 4.9, por sua vez, mostra os agrupamentos obtidos nos testes de Tukey, que demonstraram uma forte influência das propriedades anisotrópicas desses núcleos e também do tipo de material na absorção e na transferência de cargas. Os agrupamentos mostraram, nos ensaios de flexão, uma superioridade no valores médios dos painéis sanduíches PLAAL com núcleo em *honeycomb* vertical, com maior rigidez e resistência máxima na flexão. Por outro lado, nos ensaios de impacto Charpy, os painéis ABSAL tiveram maior absorção de energia que os painéis PLAAL, independentemente do tipo de núcleo (exceto para os painéis com núcleo *honeycomb* vertical, que tiveram um desempenho equivalente). Nos ensaios balísticos, maiores áreas absolutas de sinal foram obtidas pelos painéis PLAAL com células fora do plano (núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S).

Tabela 4.9
Resultados dos testes de diferenças de médias nos ensaios dos painéis sanduíches, pelo método de Tukey e 95% de confiança

Condição Experimental	Ensaio de flexão					Ensaio de impacto Charpy	Ensaio balístico
	E_f	σ_f	Deslocamento	σ_1	F_s^{ult}	E_c	Área absoluta do sinal
PLAAL_RASTER45	B	B	BCD	B	B	CD	C
PLAAL_HC_HORIZ	C	BC	A	BC	B	C	A
PLAAL_CEL_S	C	CD	A	C	C	C	A
PLAAL_HC_VERT	A	A	BC	A	A	D	B
ABSAL_RASTER45	D	B	CD	B	B	B	BC
ABSAL_HC_HORIZ	DE	DE	B	D	CD	B	D
ABSAL_CEL_S	E	E	CD	D	D	A	B
ABSAL_HC_VERT	D	D	D	CD	C	CD	B

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.3.1 Resultados dos ensaios de flexão dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

A Tabela 4.10 apresenta os resultados dos ensaios de flexão dos painéis sanduíches. Os corpos de prova com núcleo de PLA em *honeycomb* vertical apresentaram os maiores valores de módulo de elasticidade (E_f), resistência à flexão (σ_f), tensão na face (σ_1) e de resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (F_s^{ult}). Por outro lado, os resultados de deslocamento foram menores para essa condição. Esses resultados evidenciam a influência do comportamento anisotrópico dos núcleos poliméricos impressos em 3D nos painéis sanduíches, sob as cargas de flexão em três pontos. Essa diferença de comportamento nos núcleos celulares não foi verificada nos painéis ABSAL, indicando também a influência das propriedades mecânicas do material de núcleo na resposta a esse estímulo. Além disso, os painéis PLAAL com núcleos celulares apresentaram maiores valores médios em módulo de elasticidade na flexão e em resistência à flexão que os painéis ABSAL. Isso pode ser explicado pela maior rigidez do PLA, em comparação ao ABS, e pela capacidade de absorção de energia dos painéis PLAAL até o surgimento de uma delaminação, diretamente relacionada à resistência ao cisalhamento na região interfacial entre as chapas metálicas e o núcleo. Com relação aos valores médios para tensão na face e resistência máxima ao cisalhamento no núcleo, houve um destaque para os painéis com núcleo em *honeycomb* vertical, devido à melhor distribuição espacial de porção polimérica, como suporte na absorção da força pelo núcleo, diante da tensão de flexão (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Tabela 4.10
Resultados dos ensaios de flexão em três pontos dos painéis sanduíches

Condição experimental		E_f (GPa)	σ_f (MPa)	Deslocamento (mm)	σ_l (MPa)	F_s^{ult} (MPa)
PLAAL_RASTER45	Média	16,05	75,45	2,09	408,89	3,63
	Desvio-padrão	1,03	10,52	0,15	56,90	0,51
	Coefficiente de variação	6%	14%	7%	14%	14%
PLAAL_HC_HORIZ	Média	13,96	70,15	5,71	370,86	3,48
	Desvio-padrão	1,72	9,39	0,75	49,23	0,45
	Coefficiente de variação	12%	13%	13%	13%	13%
PLAAL_CEL_S	Média	14,32	60,56	5,05	339,12	2,62
	Desvio-padrão	1,44	4,67	0,71	48,88	0,21
	Coefficiente de variação	10%	8%	14%	14%	8%
PLAAL_HC_VERT	Média	18,54	138,04	2,34	694,25	5,61
	Desvio-padrão	1,67	10,10	0,23	62,87	0,66
	Coefficiente de variação	9%	7%	10%	9%	12%
ABSAL_RASTER45	Média	9,87	73,53	1,72	415,47	3,69
	Desvio-padrão	1,23	8,69	0,20	48,03	0,43
	Coefficiente de variação	13%	12%	11%	12%	12%
ABSAL_HC_HORIZ	Média	8,51	49,36	2,57	264,31	2,35
	Desvio-padrão	0,78	6,86	0,32	38,47	0,34
	Coefficiente de variação	9%	14%	12%	15%	15%
ABSAL_CEL_S	Média	7,33	44,06	1,81	235,56	1,98
	Desvio-padrão	0,75	4,15	0,14	22,19	0,18
	Coefficiente de variação	10%	9%	8%	9%	9%
ABSAL_HC_VERT	Média	9,04	55,45	1,65	300,55	2,67
	Desvio-padrão	1,07	7,21	0,20	39,48	0,35
	Coefficiente de variação	12%	13%	12%	13%	13%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.13 traz as curvas típicas de força por deslocamento dos painéis sanduíches PLAAL. Os painéis sanduíches PLAAL com núcleo *honeycomb* vertical (Figura 4.13c) suportaram uma maior força, apresentando uma fratura abrupta no núcleo após à perda da rigidez, que se dá por tensões de flexão, suportada majoritariamente pelas faces, e de cisalhamento, suportado majoritariamente pelos núcleos, denotando um comportamento típico de painéis sanduíches sob carregamentos quase-estáticos (MORADA *et al.*, 2017). Além disso, um comportamento de absorção de energia parecido foi verificado nas curvas da condição com

núcleo sólido. Contudo, salienta-se que o mecanismo de falha observado nessa condição foi diferente (descolamento de faces). Os painéis com células em *honeycomb* horizontal ou corrugadas em S, por sua vez, suportaram um maior deslocamento do pino central até a falha final, uma vez que o núcleo sofre uma deflexão gradativa e as fraturas locais ocorrem progressivamente, o que é denotado pelas variações acentuadas das forças, ao longo das curvas. Os filamentos alinhados na direção perpendicular à tensão vão se rompendo até a perda da rigidez global do compósito. Esse comportamento denotou uma maior área sob a curva força por deslocamento, o que indica maior absorção de energia para esses núcleos.

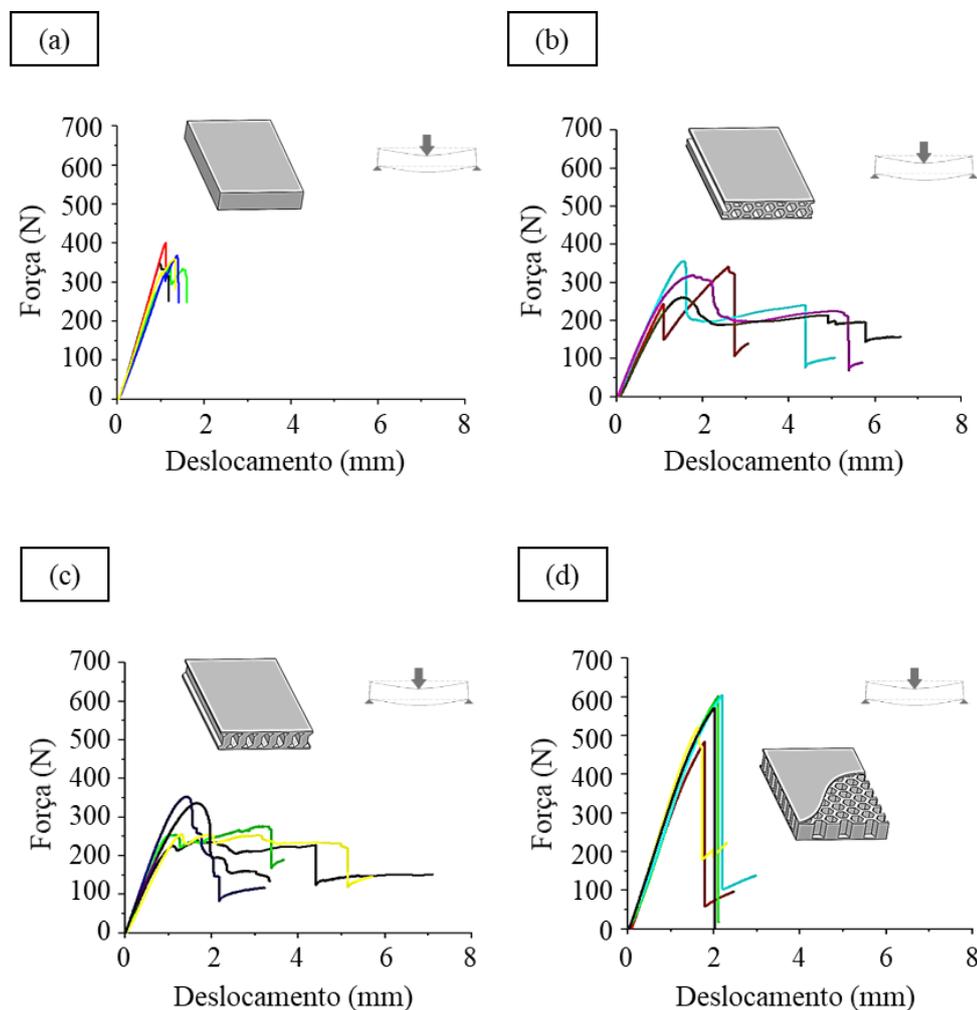


Figura 4.13 – Curvas de força por deslocamento dos painéis sanduíches PLAAL com núcleo (a) sólido, (b) *honeycomb* horizontal, (c) corrugado com células em forma de S e (d) núcleo *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.14, por outro lado, apresenta as curvas típicas de força em função do deslocamento dos painéis sanduíches ABSAL. Foram verificados menores valores médios das

forças máximas suportadas nesses ensaios, em comparação com os painéis PLAAL. Contudo, a presença de fraturas localizadas nos painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S também é notada. A ocorrência desse fenômeno indica uma maior absorção de energia por essas condições experimentais, o que pode ser verificado pela maior área sob a curva de força em função do deslocamento. As tensões de flexão induzem à deflexão global desses painéis, que gera a ocorrência de múltiplos pontos de cisalhamento, até um limite máximo em que a estrutura entra em colapso (SARVESTANI *et al.*, 2018b).

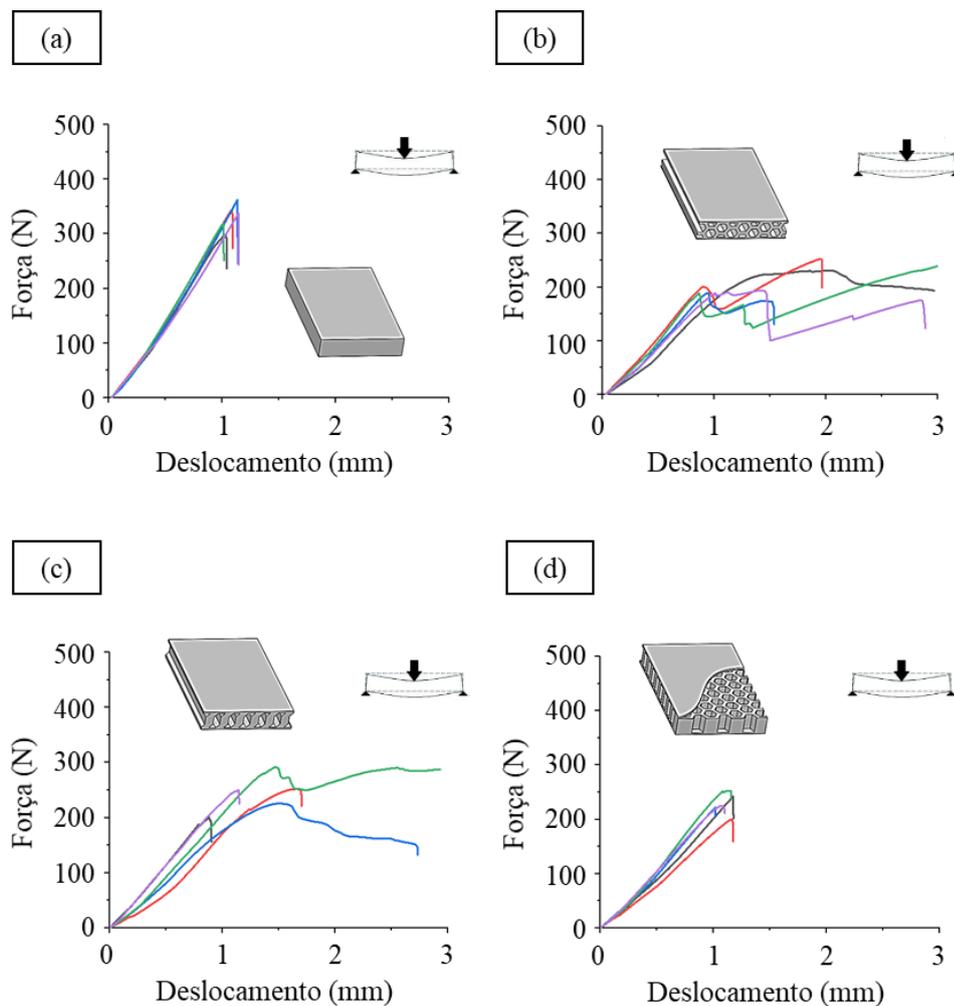


Figura 4.14 – Curvas de força por deslocamento dos painéis sanduíches ABSAL com núcleo (a) sólido, (b) *honeycomb* horizontal, (c) corrugado com células em forma de S e (d) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Os painéis ABSAL com núcleo sólido e com núcleo em *honeycomb* vertical, por sua vez, resistiram à carga de flexão dentro do regime elástico até superar a resistência interfacial entre as faces metálicas e o núcleo, levando ao surgimento e a propagação de trincas, onde o

material falha e sofre uma fratura total. Os comportamentos dos corpos de prova mostram uma clara influência da arquitetura celular na rigidez global do material, sendo verificados tanto nos painéis PLAAL quanto nos painéis ABSAL.

O modo de fratura dos painéis PLAAL nos ensaios de flexão em três pontos é ilustrado na Figura 4.15. Foram verificadas falhas por delaminação (setas amarelas), fraturas no núcleo (setas vermelhas) e deformação plástica na chapas metálicas (setas azuis). Os painéis com núcleos sólido de PLA apresentaram falhas por delaminação e por tensões trativas na região oposta ao pino central de carga (Figura 4.15a). A partir disso, as trincas se propagam de forma irregular até a face superior do painel (zona de tensões compressivas, provenientes da tensão normal). Nesse processo, o controle feito para a porosidade da estrutura impressa e possíveis defeitos decorrentes do processo de deposição do filamento do núcleo podem influenciar no descolamento entre camadas poliméricas (TSOUKNIDAS *et al.*, 2016).

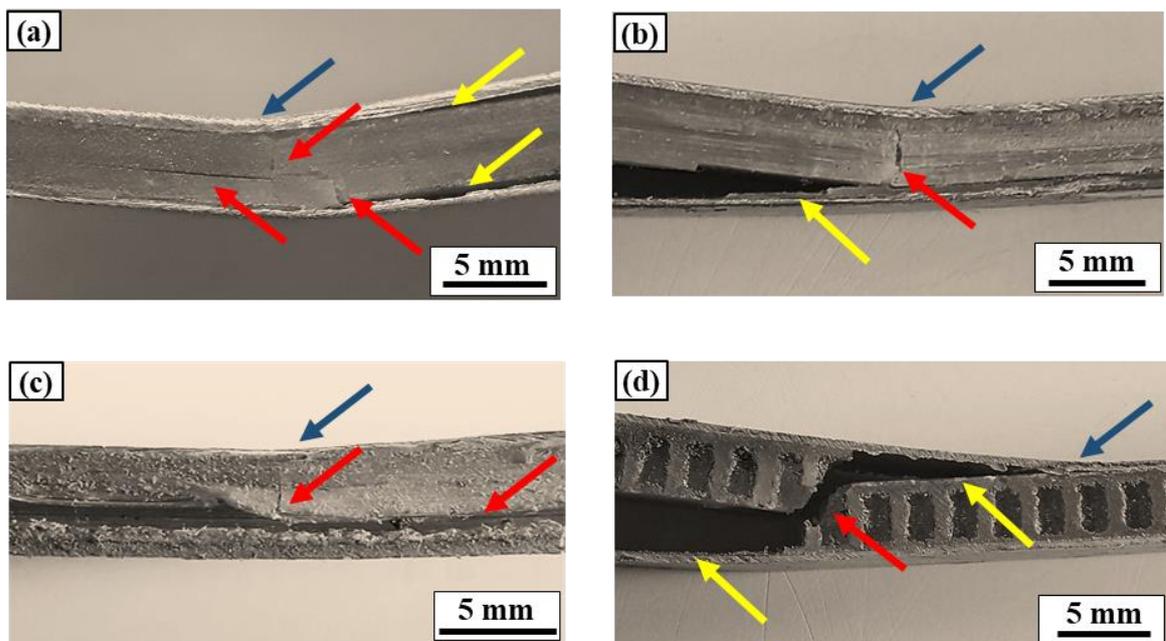


FIGURA 4.15 – Modos de falha nos ensaios de flexão dos painéis sanduíches PLAAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em *honeycomb* horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

No caso dos painéis PLAAL com núcleo em *honeycomb* horizontal (Figura 4.15b) e corrugado em S (Figura 4.15c), as instabilidades nas regiões angulares das células foram determinantes na absorção de energia, uma vez que representam pontos de concentração de tensões. Assim, sucessivas fraturas de natureza frágil do núcleo de PLA são causadas, o que permitem um maior deslocamento da máquina, que cessa pela delaminação e consequente falha

global da estrutura. Além disso, a propagação progressiva de trincas em planos perpendiculares à espessura do corpo de prova, em função de tensões cisalhantes na própria porção polimérica, também foi verificada (Figura 4.15b).

Os painéis com núcleos em *honeycomb* vertical apresentaram uma maior rigidez à flexão, com uma falha por cisalhamento no núcleo e delaminação parcial por falhas coesivas (Figura 4.15d). Uma propagação de trincas na direção diagonal ao deslocamento da máquina, que gera uma falha instantânea do material, além de um descolamento parcial entre a face oposta à carga e o núcleo polimérico, foram detectados nesses painéis. Ma *et al.* (2020) realizaram testes de flexão em três pontos em painéis sanduíches com núcleo *honeycomb* vertical e verificaram um modo de falha semelhante. Segundo os autores, o cisalhamento no núcleo é o modo de falha predominante nessas estruturas sob essas tensões, e uma consequente delaminação da face inferior pode ser verificada. De acordo com Morada *et al.* (2017), o processo de ruptura desses materiais por cisalhamento no núcleo, em testes de flexão, se dá por um esmagamento inicial no núcleo, imediatamente abaixo da face superior, devido a tensões de compressão. Posteriormente, o material sofre uma deformação por cisalhamento devido à ligação interfacial entre núcleo e face e a trinca no núcleo se propaga abruptamente de uma face para outra. Por fim, salienta-se que a adição de chapas de liga de alumínio como faces para os painéis sanduíches PLAAL com núcleo em *honeycomb* vertical permitiu um melhor equilíbrio entre as tensões normais ao plano do corpo de prova e as tensões de cisalhamento resultantes no material, permitindo um melhor desempenho desses painéis em comparação aos testes de flexão com o núcleo polimérico sem as faces metálicas.

A Figura 4.16 mostra o modo de falha dos painéis ABSAL, com núcleo polimérico de ABS. Nesses painéis, houve a predominância de deformação plástica e de fraturas internas no núcleo, além de deformação das faces metálicas (setas azuis) e delaminação (setas amarelas). Os painéis ABSAL com núcleo sólido, diante da tensão normal, apresentaram uma pequena deflexão com alta resistência à deformação plástica, que precedeu um descolamento entre face e núcleo em regiões centrais (Figura 4.16a). Essa absorção de energia pressupõe a forte influência da ductilidade do ABS no processo de transferência de energia desses painéis (JOSEPH *et al.*, 2021). Além disso, o efeito da ligação interfacial entre a resina e o núcleo e entre a resina e as chapas também influenciam na rigidez alcançada por esses painéis.

No caso dos painéis ABSAL com núcleo em *honeycomb* horizontal, fraturas no núcleo (setas vermelhas) foram verificadas, em conjunto com a deformação das faces metálicas e o descolamento parcial entre núcleo e a chapa metálica (Figura 4.16b). Assim como ocorreu nos painéis PLAAL com essa configuração de núcleo, ocorreram fraturas sucessivas até a perda

total da integridade da estrutura e da capacidade de transferência de energia entre faces e núcleo. Nos painéis ABSAL com núcleo corrugado em S (Figura 4.16c), esse fenômeno também ocorreu, porém em menor proporção, sendo caracterizado por alta deformação plástica e o descolamento de uma das faces.

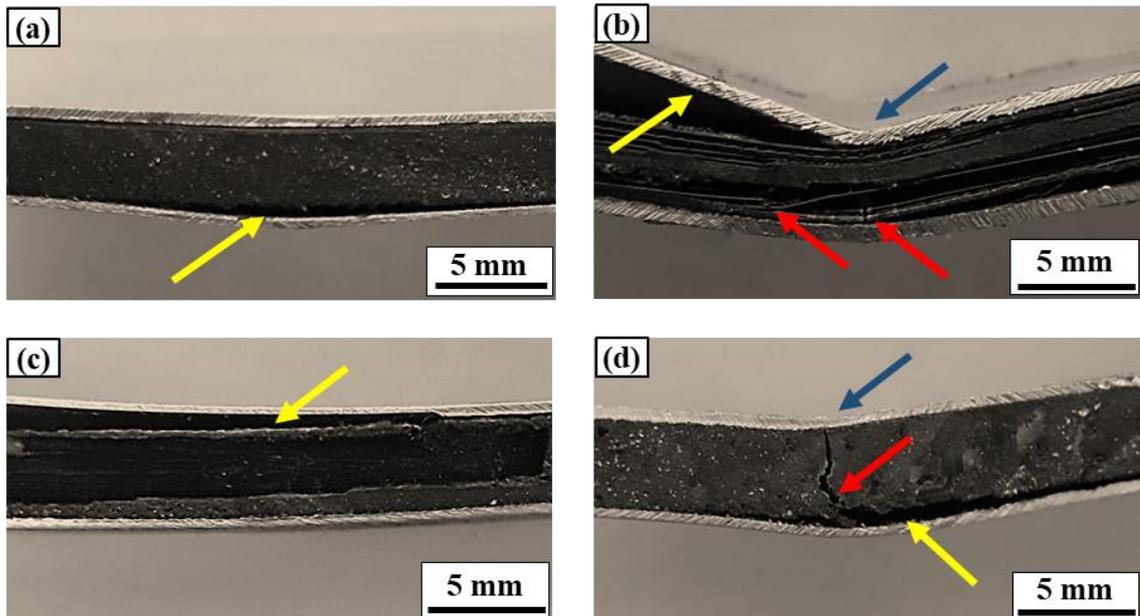


Figura 4.16 – Modos de falha nos ensaios de flexão dos painéis sanduíches ABSAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em *honeycomb* horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Por outro lado, os painéis ABSAL com núcleo em *honeycomb* vertical apresentaram falha semelhante à apresentada pelos painéis PLAAL com essa configuração de núcleo, caracterizada pelo cisalhamento do núcleo com uma propagação de trincas em direções bem definidas, entre as faces metálicas (Figura 4.16d). Os resultados mostram que a configuração de núcleo *honeycomb* vertical tende a apresentar falhas abruptas, com forte presença de tensões cisalhantes, independente da natureza frágil ou dúctil do núcleo impresso em 3D. Falhas em núcleos de painéis sanduíches com a configuração *honeycomb* vertical podem ocorrer pelo cisalhamento do núcleo ou pela falha local resultante da indentação. As falhas por cisalhamento ocorrem por tensões de cisalhamento e são dependentes de fatores como os parâmetros geométricos das células, densidade de núcleo e as cargas direcionadas aos suportes. As falhas por indentação, por sua vez, causam o esmagamento do núcleo e são dependentes da área de contato com as paredes celulares. Por fim, salienta-se que para painéis sanduíches simétricos, cargas por flexão geram tensões iguais de tração (lado oposto ao deslocamento do pino) e de

compressão (lado de contato com o pino de deslocamento), com uma zona neutra compreendida no centro (ANANDAN *et al.*, 2018).

4.3.2 Ensaios de impacto Charpy dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

A Figura 4.17 mostra os resultados de energia absorvida no impacto Charpy, para cada condição experimental. Os painéis sanduíches ABSAL tiveram maior absorção de energia que os painéis sanduíches PLAAL (com exceção para os painéis com núcleo *honeycomb* vertical, onde os valores foram equivalentes), o que evidencia a influência da maior tenacidade do ABS, em comparação ao PLA (CHAIKEAW & SRIKULKIT, 2018). Os menores valores médios de energia absorvida foram obtidos pelos painéis com núcleos *honeycomb* vertical ($3,96 \pm 0,42$ J e $4,82 \pm 0,53$ J para núcleos de PLA e de ABS, respectivamente). Por outro lado, maiores valores de energia absorvida foram obtidos pelos painéis com núcleo de ABS corrugado em S ($12,79 \pm 1,58$ J). Nesses painéis, verifica-se uma propagação de tensões mais distribuída ao longo da seção longitudinal. Quando as trincas se propagam na direção transversal (direção do impacto do pêndulo), a falha ocorre em uma área de dano menor e leva à falha prematura da ligação entre o núcleo e a face.

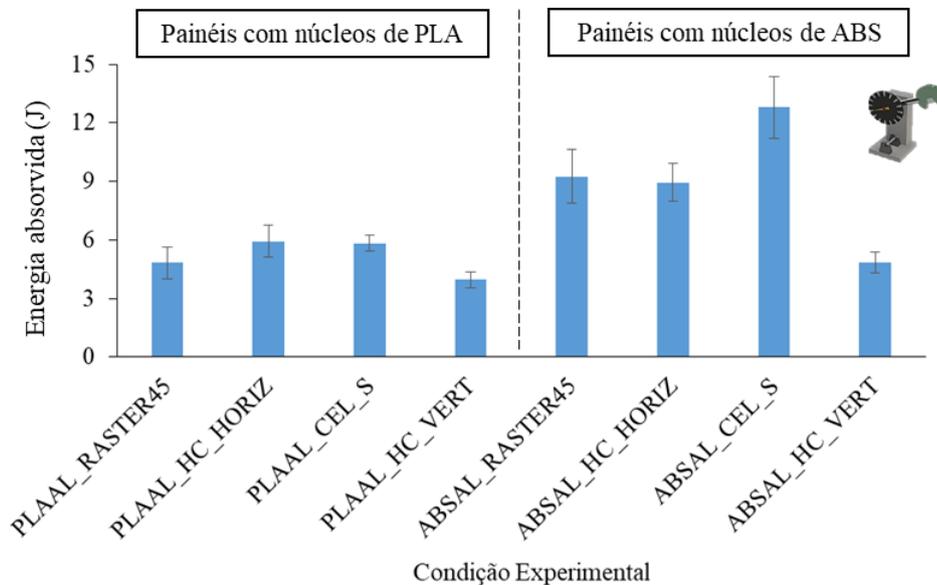


Figura 4.17 – Energia média absorvida pelos painéis sanduíches nos ensaios de impacto Charpy, considerando cada condição experimental.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Conforme mostram as Figura 4.18 e Figura 4.19, o modo de falha dos painéis sanduíches nos ensaios de impacto Charpy foi caracterizado pela ocorrência de delaminação (setas

amarelas), cisalhamento do núcleo (setas vermelhas) e de deformação plástica (setas azuis) ou ruptura (setas brancas) nas faces metálicas. Os painéis com núcleo sólido de PLA e ABS (Figura 4.18a e 4.19a) apresentaram delaminação e cisalhamento do núcleo, com baixa absorção global de energia (na direção longitudinal do núcleo). Nesses painéis, verifica-se claramente a influência do padrão de preenchimento Raster alternado em 45°, na propagação da trinca na direção transversal. A fratura frágil do PLA e a propagação de energia na ligação entre face e núcleo levam à nucleação da trinca na direção do impacto, o que explica a menor absorção global de energia dos painéis PLAAL, em comparação com os painéis ABSAL. Além disso, podem ocorrer falhas na ligação entre face e núcleo devido à falta de intertravamento mecânico ou problemas na ligação química intermolecular. Odessa *et al.* (2020) formularam uma abordagem analítica não linear para a investigação do mecanismo dinâmico de delaminação interfacial em painéis sanduíches e apontaram que a relação entre a instabilidade nesta interface tanto em análises estáticas quanto dinâmicas não é totalmente esclarecida na literatura.

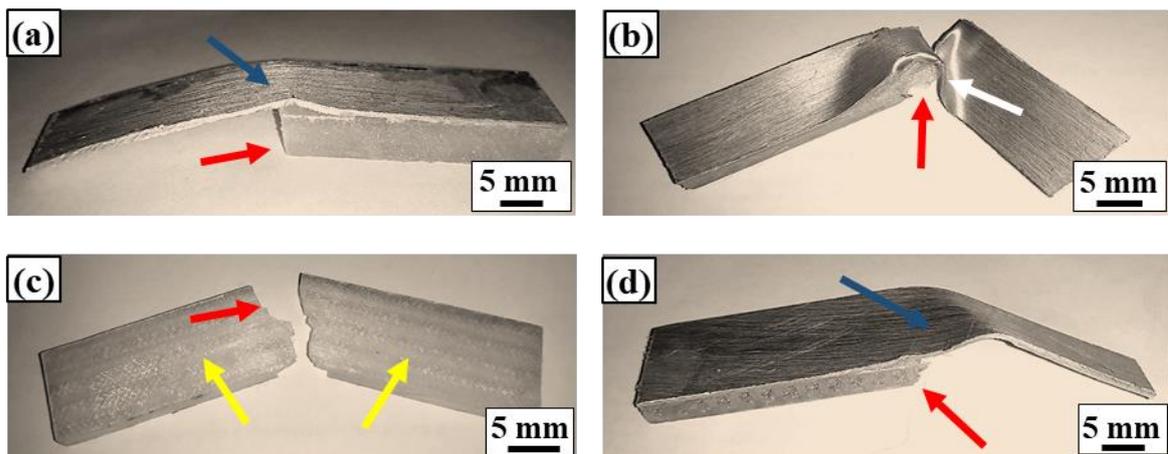


Figura 4.18 – Modos de falha nos ensaios de impacto Charpy dos painéis sanduíches PLAAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em *honeycomb* horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Painéis com núcleo de ABS em *honeycomb* horizontal mostraram um perfil de propagação de trincas diferente em comparação ao núcleo sólido. Estas estruturas são submetidas a tensões de tração na parte oposta ao pêndulo e intensa deformação plástica nos filamentos longitudinais, sem a ruptura completa do núcleo (setas verdes na Figura 4.19b). Uma falha semelhante foi observada nos painéis com núcleos de ABS corrugados em S, mostrando o efeito do comportamento dúctil do ABS (Figura 4.19c), fato que não foi observado nos painéis PLAAL com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S (Figura 4.18b e Figura 4.18c).

Verificou-se também uma forte deformação plástica nos revestimentos metálicos (setas azuis na Figura 4.18a, 4.18d, 4.19a e 4.19d) e, em alguns casos, uma fratura parcial do revestimento metálico (setas brancas na Figura 4.18b e 4.19c). Por outro lado, os painéis com núcleos de PLA e de ABS em *honeycomb* vertical (Figura 4.18d e 4.19d) apresentaram uma ruptura no núcleo com propagação de tensão concentrada na direção do movimento do pêndulo. Isso acarreta na fratura transversal dos filamentos que compõem a parede celular vertical, em que a espessura de material atingida pelo pêndulo é decisivamente influente na resistência global da estrutura (ÖZEN *et al.*, 2020).

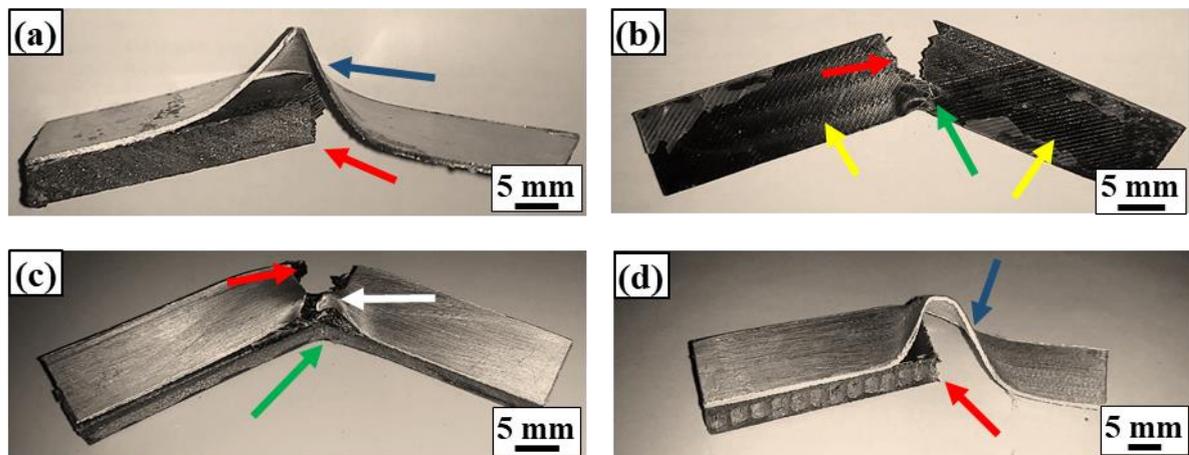


Figura 4.19 – Modos de falha nos ensaios de impacto Charpy dos painéis sanduíches ABSAL: (a) núcleo sólido, (b) núcleo em *honeycomb* horizontal, (c) núcleo corrugado em S, (d) núcleo em *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.3.3 Ensaios balísticos dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

4.3.3.1 Análise numérica dos ensaios balísticos

O uso de simulações numéricas permitiu a obtenção da capacidade de absorção de energia no impacto balístico pelos diferentes componentes constituintes dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL. Assim, investigou-se o percentual de energia absorvida pelos núcleos poliméricos de PLA e de ABS desses painéis, a partir do impacto do projétil com energia cinética inicial de 19 J e velocidade de 15,8 m/s (Figura 4.20). No momento do impacto, a energia cinética é gradualmente dissipada na estrutura polimérica até um certo limite. A energia não absorvida (rebatida) representa a diferença entre o pico de energia máxima de impacto e o nível de energia no regime permanente do gráfico (Figura 4.20), ao final da curva de energia

por tempo. A energia que é absorvida se dissipa majoritariamente em falhas, como deformação plástica e fraturas, enquanto que a energia rebatida se reflete em energia elástica (SARVESTANI *et al.*, 2018b). Nos painéis PLAAL, o núcleo sólido de PLA (Figura 4.20a) apresentou uma maior energia máxima de impacto (5,7 J) em um tempo de 0,17 ms. Nas estruturas poliméricas com núcleos celulares de PLA, a energia máxima de impacto ocorreu com diferentes intervalos de tempos. O núcleo em *honeycomb* vertical (Figura 4.20g) obteve maior energia máxima de impacto (2,05 J). Por outro lado, o núcleo em *honeycomb* horizontal (Figura 4.20c) obteve a menor energia máxima (aproximadamente 1,24 J, para um tempo de 0,11 ms).

Na comparação dos materiais, o núcleo sólido de ABS (Figura 4.20b) apresentou uma energia máxima de impacto de 6,16 J, com 8,07 % a mais que o núcleo sólido de PLA. Na análise dos núcleos celulares de ABS, a maior energia de impacto foi encontrada nos núcleos em *honeycomb* vertical (Figura 4.20h), com um pico de 4,18 J. Os gráficos de energia em função do tempo mostraram que, a partir de 0,5 ms, há uma tendência de estabilização das energias, indicando a transformação da energia cinética inicial de impacto em energia de deformação plástica nas chapas de alumínio.

Em ambos os materiais, os núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S se mostraram mais resistentes quanto à absorção da energia cinética proveniente do projétil. Além disso, a energia a ser transferida para a deformação plástica das faces dos painéis com esses núcleos, verificada a partir do estágio permanente do gráfico (diferença entre o pico de energia máximo e o valor no regime de estabilização, após o tempo de 1,5 ms) é menor que a verificada nos painéis com núcleos em *honeycomb* vertical. Salienta-se que os suportes de fixação dos corpos de prova também absorvem parte da energia total, porém esta parcela não será discutida neste trabalho.

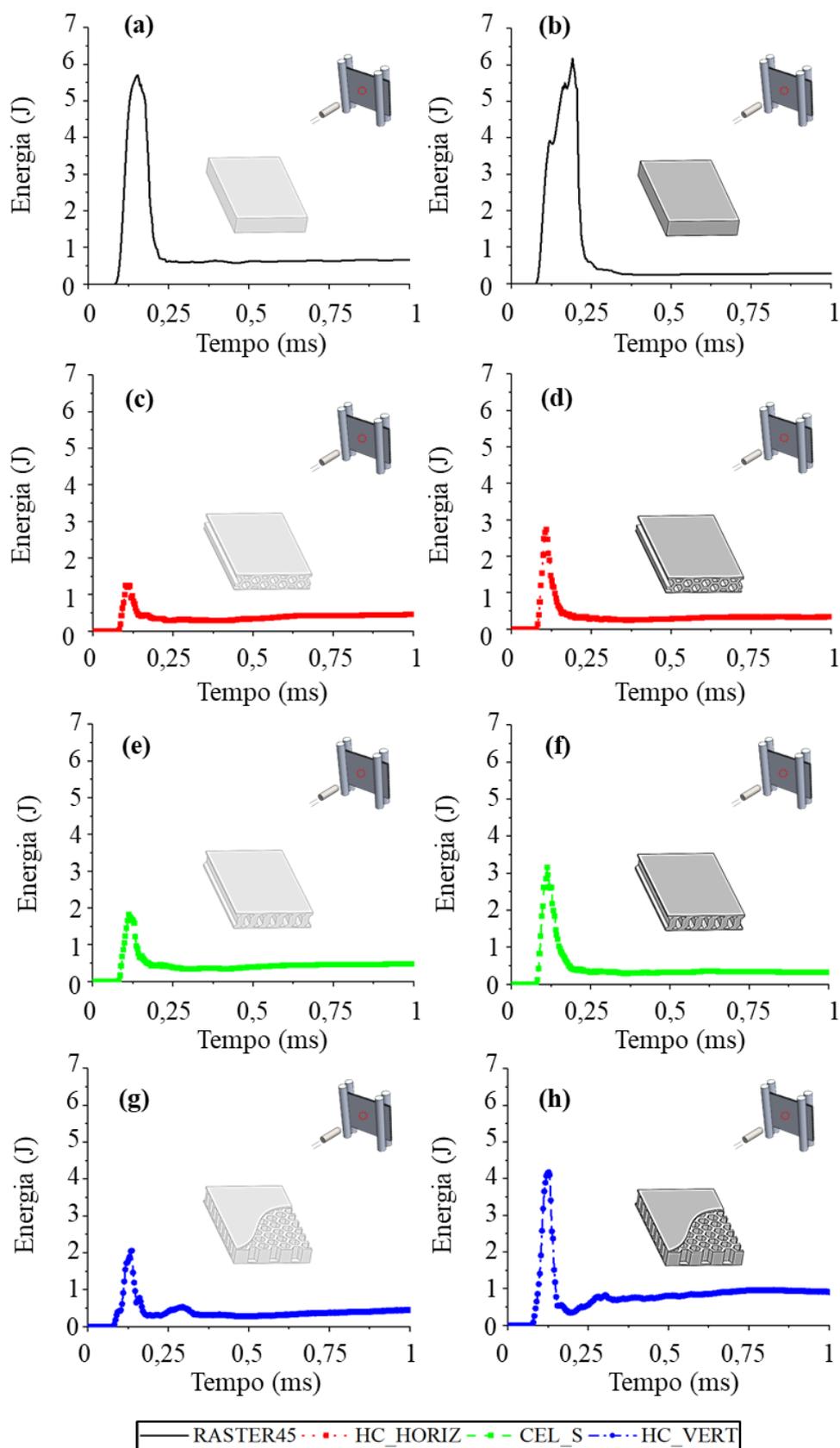


Figura 4.20 – Energia absorvida pelos núcleos poliméricos no impacto balístico dos painéis PLAAL e ABSAL, obtida nas simulações numéricas: núcleos de PLA em (a), (c), (e) e (g) e núcleos de ABS em (b), (d), (f) e (h).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.21 mostra o percentual de energia absorvida pelos núcleos dos painéis PLAAL e ABSAL. Dentre as configurações celulares, os painéis com núcleos corrugados em S apresentaram os menores percentuais de energia absorvida (32% para núcleo de PLA e 10% para núcleo de ABS). Em comparação com os núcleos sólidos, maiores valores percentuais foram verificados para os núcleos celulares, indicando maior capacidade de absorção e uma tendência maior de dissipação de energia em deformação plástica e fraturas nesses núcleos. Além disso, os núcleos de ABS, em comparação com os núcleos de PLA, tiveram menor energia dissipada, o que promove o retorno da maior parte da energia cinética imposta, aos outros componentes da estrutura. Essa energia é repassada por meio de oscilações (vibrações) às chapas metálicas, podendo superar a resistência ao cisalhamento da ligação interfacial, ocasionando delaminação (KABOGLU *et al.*, 2018). Para a completa avaliação dos mecanismos de falha oriundos da dissipação desses percentuais de energia, torna-se necessária uma avaliação conjunta entre a análise numérica e experimental, com o intuito de avaliar a eficiência na transferência de cargas entre os componentes dos painéis.

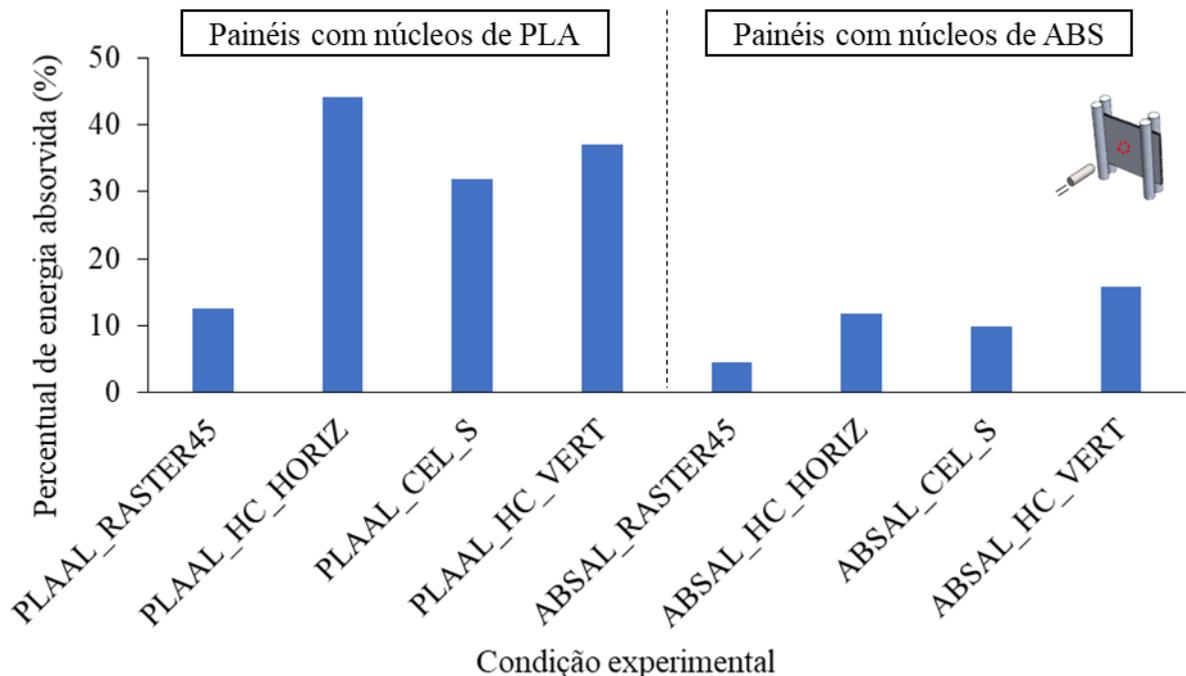


Figura 4.21 – Percentual de energia absorvida pelos painéis PLAAL e ABSAL, na simulação numérica dos ensaios balísticos.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Para a análise da absorção de energia das chapas de liga de alumínio 2024-T3, foram obtidas as distribuições de tensão máxima nas chapas metálicas de contato com o impacto, para cada tipo de painel sanduíche (Figuras 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25). Usando o ABS como material

de núcleo, constatou-se que as tensões desenvolvidas na área de impacto da face metálica de contato com o projétil foram ligeiramente menores, quando comparados aos painéis com núcleo de PLA, indicando que o material ABS tende a apresentar uma maior absorção global de energia ao impacto. Para os núcleos celulares, as tensões desenvolvidas na área de impacto foram entre 15 e 20 MPa maiores que os painéis com núcleos sólidos. Em termos dos materiais empregados no núcleo, a maior diferença entre as tensões foi de, aproximadamente, 4,45 MPa para o núcleo em *honeycomb* vertical, seguido das configurações *honeycomb* horizontal (1,69 MPa), núcleo sólido (1,54 MPa) e corrugado em S (1,16 MPa), respectivamente. A concentração de tensões em uma área bem definida é responsável pela delaminação entre a face metálica de contato com o projétil e a face metálica oposta ao impacto, considerando todas as configurações de núcleo investigadas. Assim, considerando os tipos de núcleos investigados, as tensões desenvolvidas na área de impacto da face metálica de contato com o projétil foram superiores à resistência à tração dos materiais PLA (~ 56 MPa) e ABS (~ 31 MPa), indicando fraturas nos núcleos.

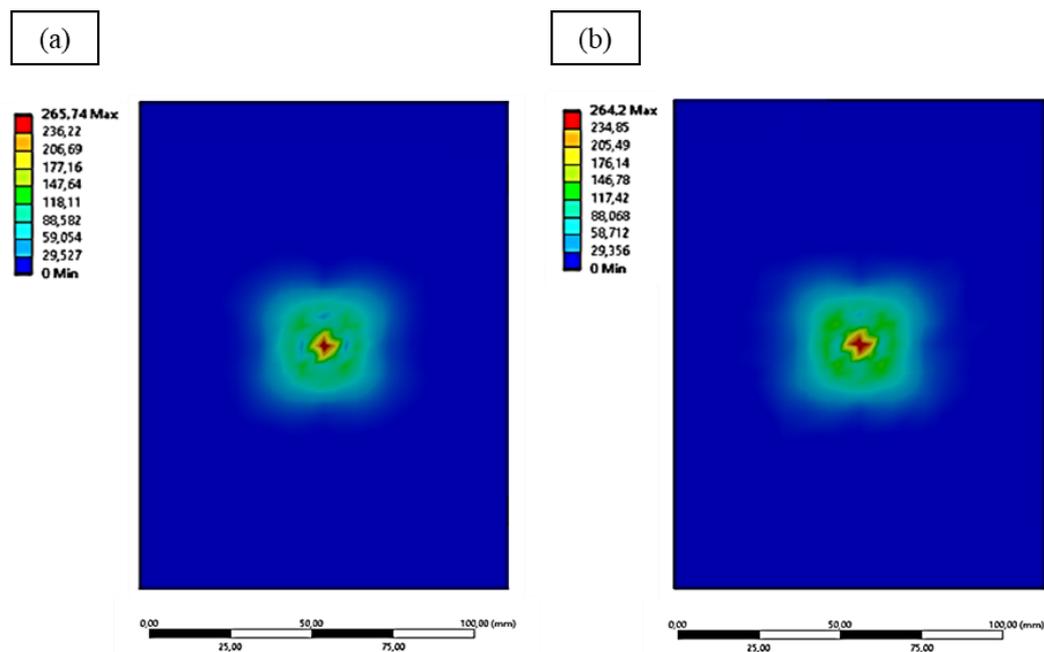


Figura 4.22 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos sólidos produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

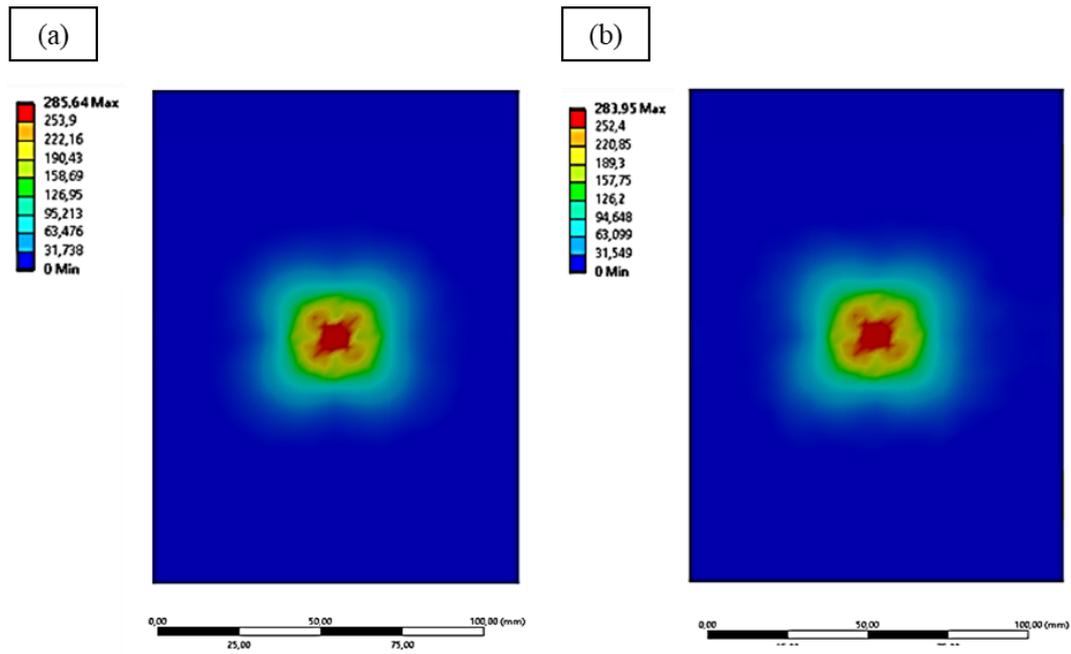


Figura 4.23 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos em *honeycomb* horizontal produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

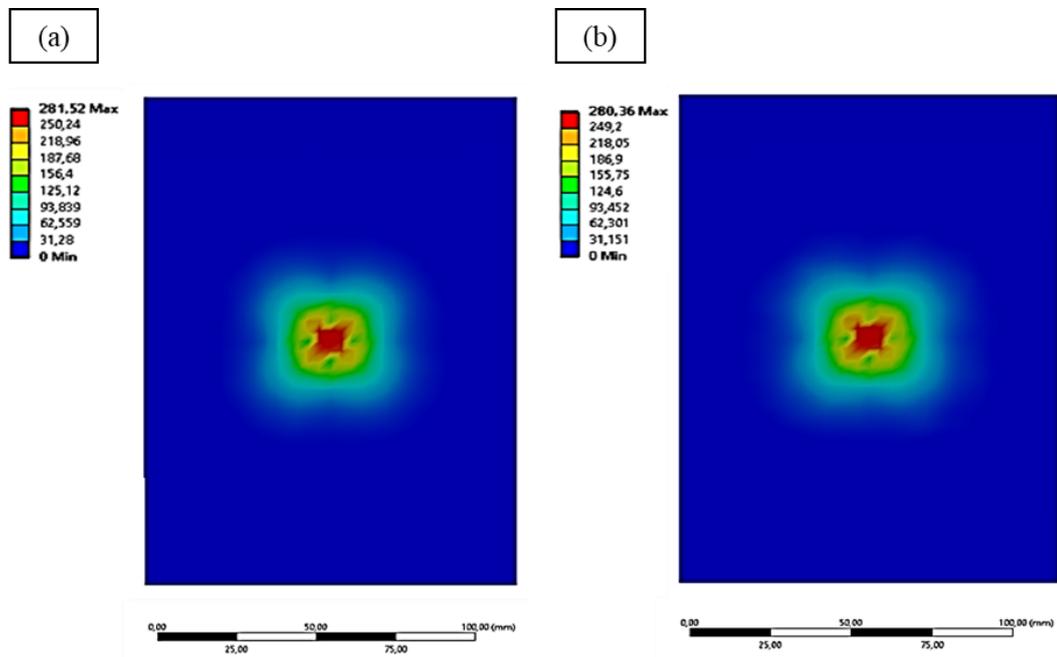


Figura 4.24 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos corrugados em S produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

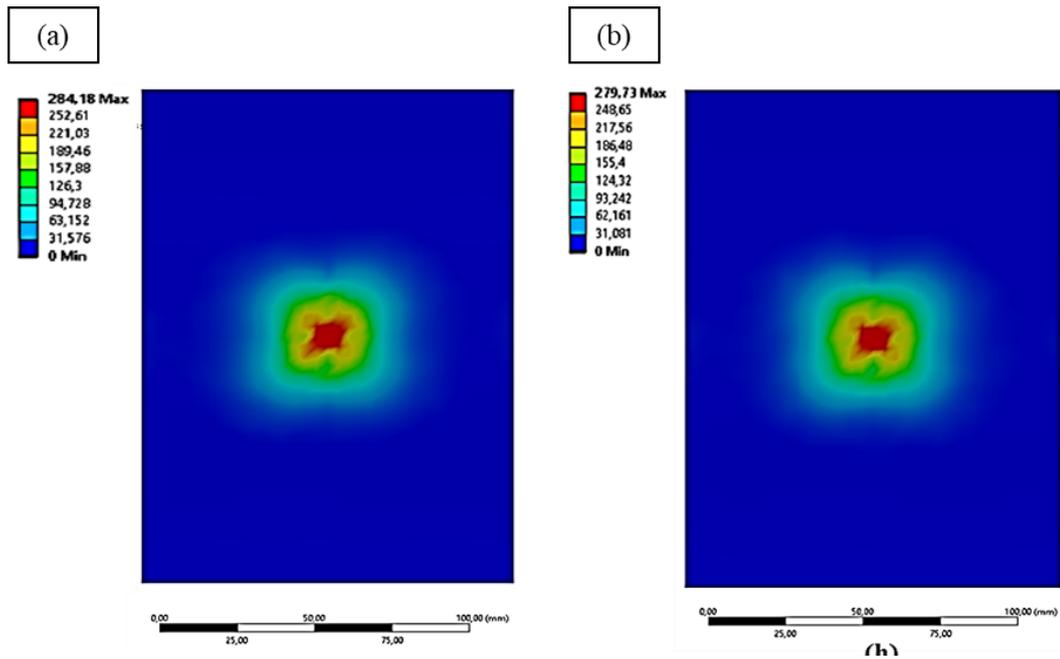


Figura 4.25 – Distribuição de tensões na face metálica de contato com o impacto do projétil, considerando núcleos em *honeycomb* vertical produzidos com (a) PLA e (b) ABS. Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

O perfil geométrico da fratura nos núcleos dos painéis PLAAL e ABSAL também foi investigado numericamente, cujos resultados mostraram a influência das geometrias celulares dos núcleos nos formatos das regiões fraturadas. Nos painéis com núcleos sólidos, as fraturas tenderam a apresentar uma formato mais circular, com um maior raio verificado pelo núcleo sólido de ABS (Figura 4.26). Este raio fraturado em maior dimensão contribuiu para uma maior dissipação da força de impacto, o que resulta em menores tensões na face metálica de contato com o projétil. De acordo a simulação, no ponto de máxima tensão da face metálica de contato com o impacto, há a fratura do núcleo sólido para ambos os materiais (Figura 4.26a e 4.26b).

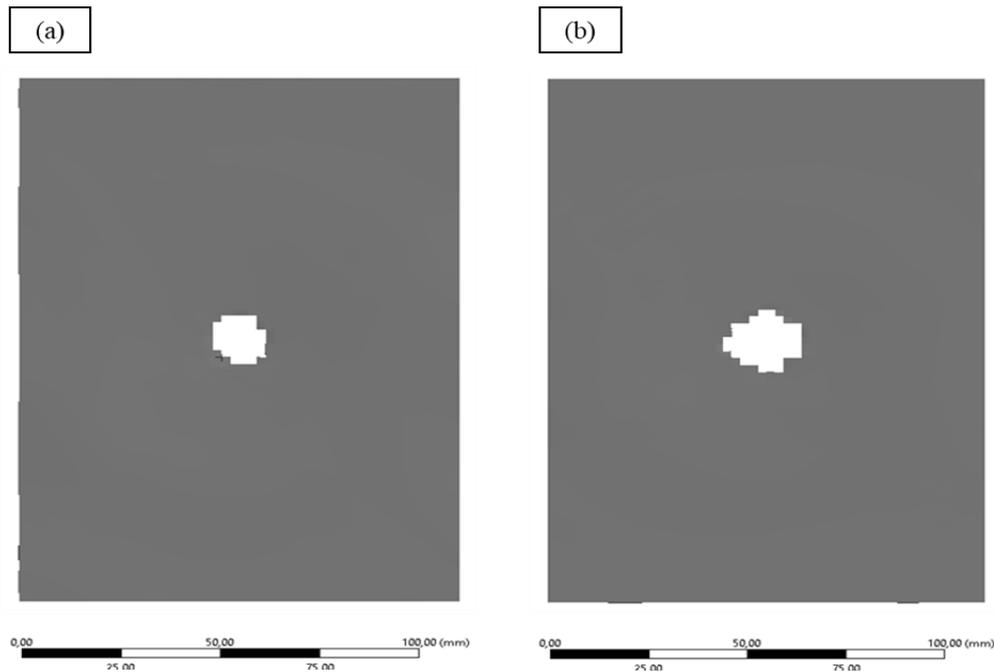


Figura 4.26 – Formato geométrico da fratura nos núcleos sólidos produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Para os painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S, onde a direção de extrusão das células é perpendicular à direção de impacto, houve uma alteração significativa no formato da região de fratura, em relação às demais geometrias de núcleo. Ao invés de uma região fraturada em formato circular, houve a ocorrência de uma região fraturada com o formato de um losango. Dentro desse contexto, o painel com núcleo em *honeycomb* horizontal apresentou um losango mais simétrico para a região da fratura (Figura 4.27), em relação ao painel com núcleo corrugado em S (Figura 4.28). No entanto, a área de dano foi maior para o núcleo corrugado em S, indicando uma maior dissipação da força de impacto (SARVESTANI *et al.*, 2018a). Assim como nos painéis com núcleos sólidos de PLA e ABS, no ponto da máxima tensão da face metálica de contato com o projétil, pressupõe-se a fratura total dos núcleos.

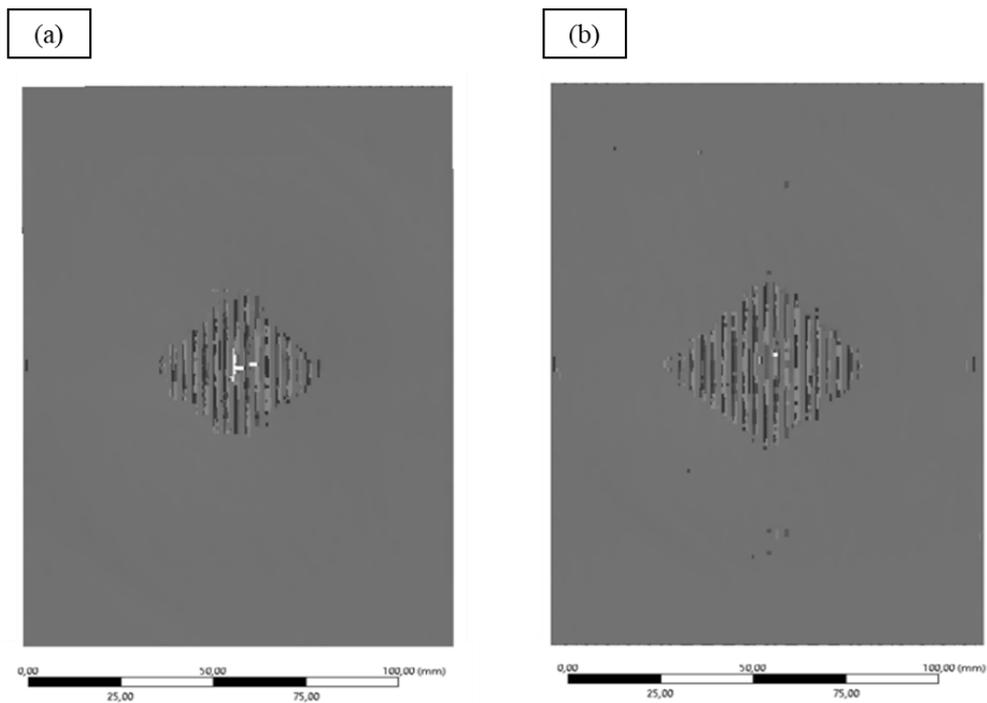


Figura 4.27 – Formato geométrico da fratura nos núcleos em *honeycomb* horizontal produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

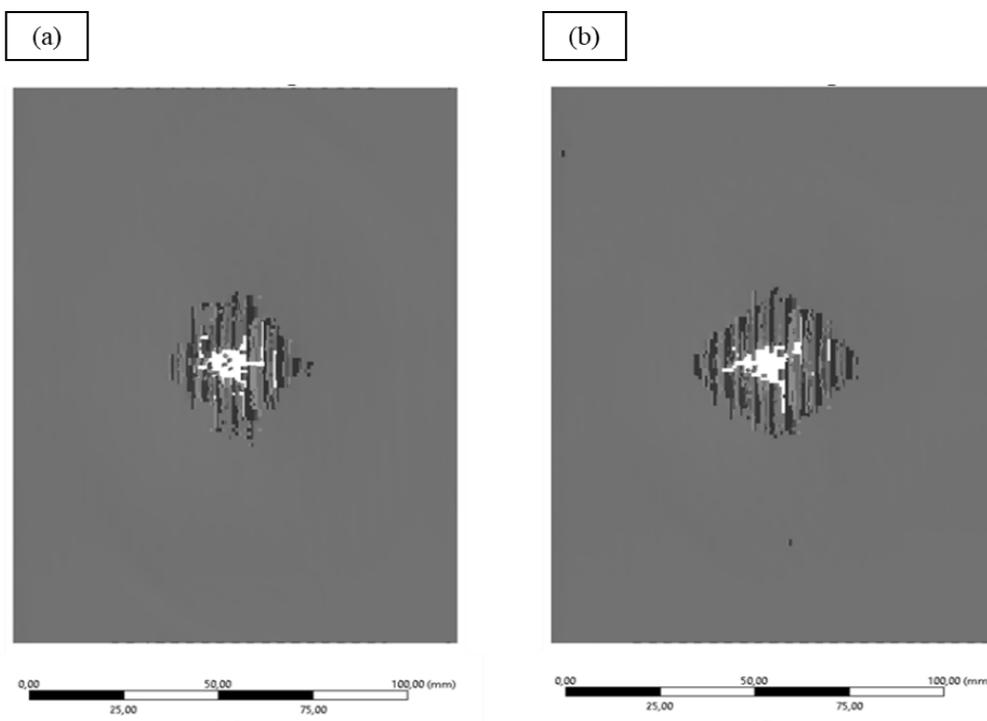


Figura 4.28 – Formato geométrico da fratura nos núcleos corrugados em S produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Em relação aos painéis com núcleo em *honeycomb* vertical (Figura 4.29), verificou-se, numericamente, que houve uma distribuição de tensões entre as células verticais, para a dissipação da força de impacto. Além disso, novamente a área fraturada do núcleo de ABS foi maior do que a verificada no núcleo de PLA, predizendo que o material ABS é menos susceptível à deformação plástica na face metálica oposta ao impacto. Quanto ao perfil da fratura desse núcleo, salienta-se que a nucleação e a propagação de trincas são influenciadas por fatores como a rigidez da face metálica de contato com o impacto, a resistência ao cisalhamento na interface entre núcleo e face e resistência ao esmagamento do núcleo, que interferem na capacidade de transferência de energia pelas células hexagonais verticais (MORADA *et al.*, 2017).

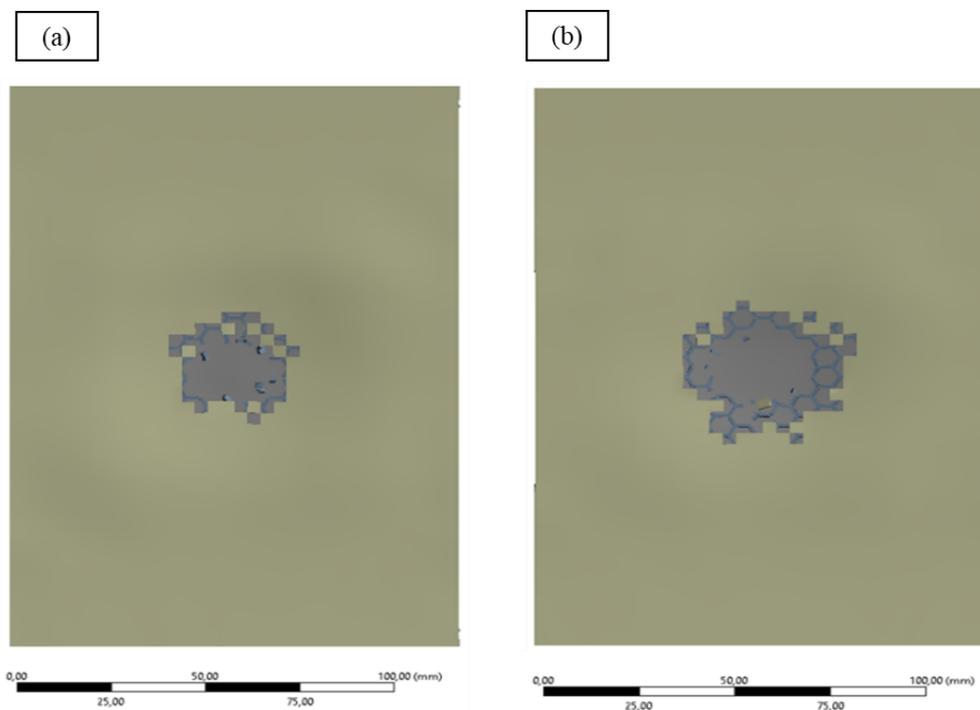


Figura 4.29 – Formato geométrico da fratura nos núcleos em *honeycomb* vertical produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

As Figuras 4.30, 4.31, 4.32 e 4.33 mostram a distribuição das tensões nas faces metálicas (opostas ao impacto) dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL. Em termos de valores de tensão, o painel sanduíche com núcleo de ABS em *honeycomb* horizontal mostrou-se mais eficiente, pois apresentou o menor valor de tensão (1,05 MPa) concentrado em uma pequena área. Além dessa configuração, o painel com núcleo de ABS corrugado em S também mostrou um bom desempenho (1,88 MPa). Em comparação com as outras configurações, percebe-se novamente que as direções de extrusão dos modelos geométricos propostos influenciaram tanto

no aspecto da área da fratura quanto na distribuição de tensões da face metálica oposta ao impacto. A configuração de núcleo em *honeycomb* vertical, usando o material PLA, foi a condição que apresentou maior tensão (7,87 MPa) na transferência de força para a face metálica oposta ao impacto. Essa máxima tensão coincidiu com as maiores tensões na região de impacto da face metálica de contato com o impactador.

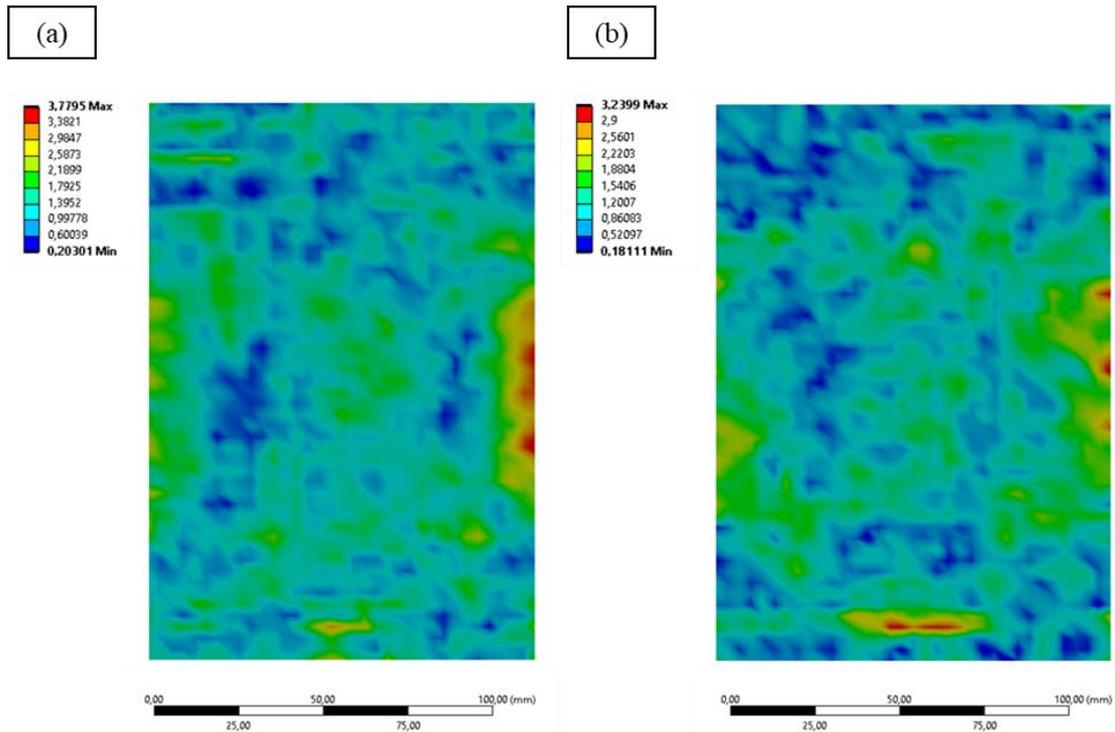


Figura 4.30 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos sólidos produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

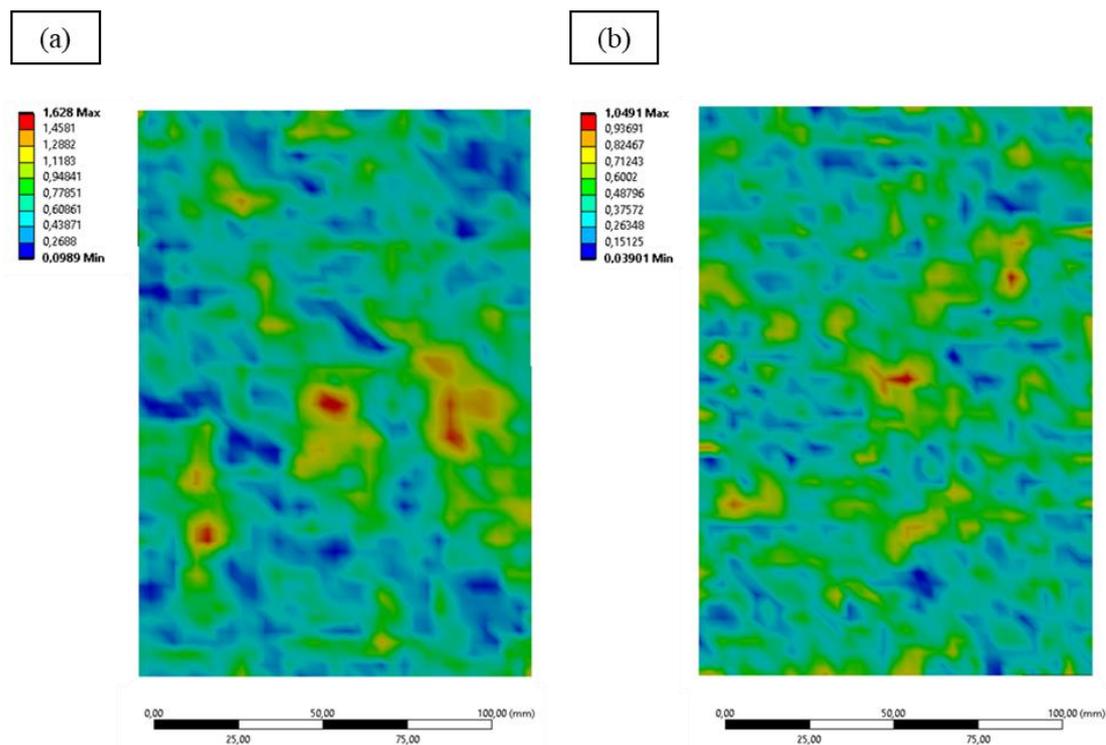


Figura 4.31 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal produzidos com (a) PLA e (b) ABS.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

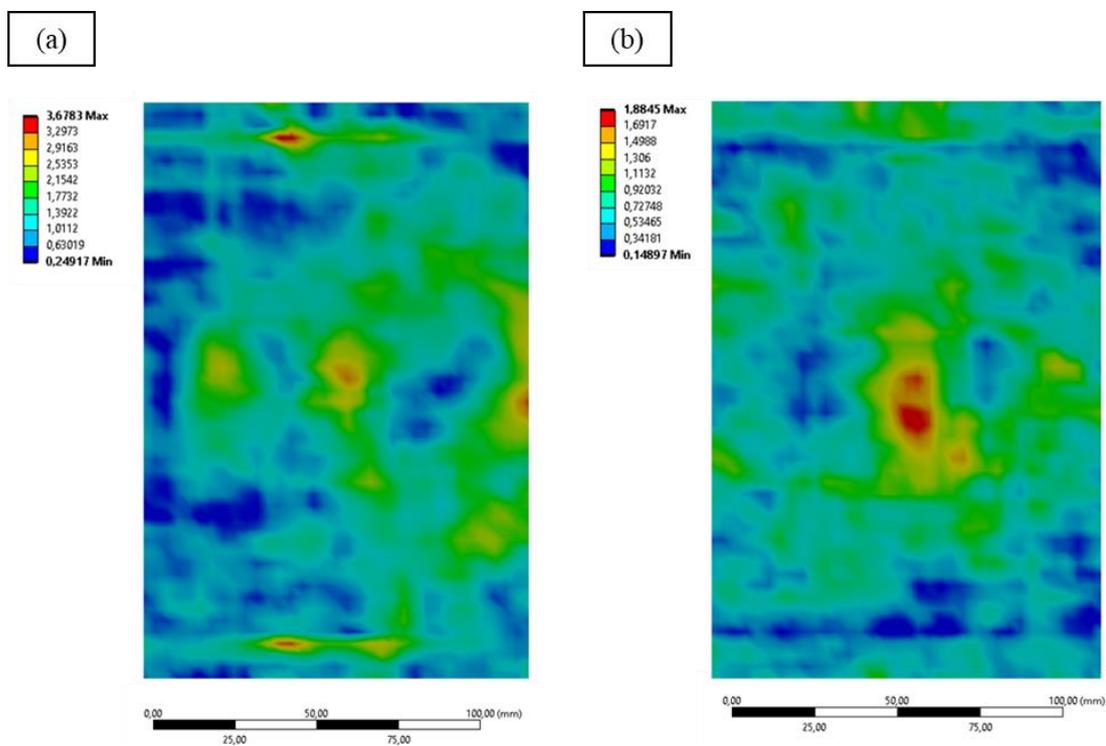


Figura 4.32 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos corrugados em S produzidos com (a) PLA e (b) ABS.
Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

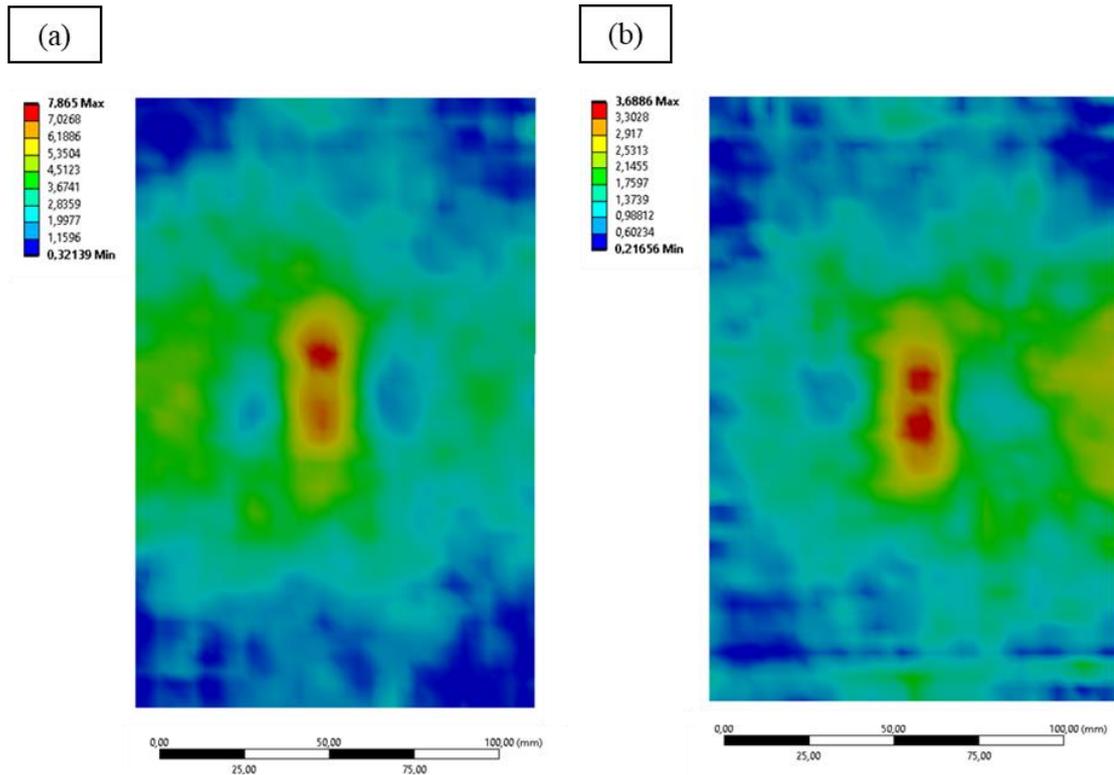


Figura 4.33 – Distribuição de tensões na face metálica oposta ao impacto do projétil, nos painéis com núcleos em *honeycomb* vertical produzidos com (a) PLA e (b) ABS.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.3.3.2 Análise geral sobre o sistema de monitoramento de integridade estrutural para o estudo experimental

O sistema de MIE usado para as solicitações mecânicas de altas taxas de deformação, desenvolvido para a comprovação dos resultados obtidos nas simulações numéricas, evidenciou diferenças no comportamento dos painéis PLAAL e ABSAL, em comparação com os ensaios de flexão (quase-estáticos). Esse sistema se mostrou aplicável em painéis sanduíches, trazendo uma compreensão sobre a relação entre a intensidade do impacto, o modo de falha resultante e o sinal gerado pelos sensores piezoelétricos. A configuração espacial dos piezoelétricos e o sinal gerado no modo passivo possibilita uma extrapolação do modelo para estruturas de maior porte, auxiliando na detecção do dano, e fornecendo um prognóstico da vida útil da estrutura.

A aplicabilidade industrial do modelo neste trabalho, para a obtenção dessas informações, pode ser explicada com base no trabalho de Wang, Y., *et al.* (2020), que investigou o uso de redes de sensores piezoelétricos com fios de transmissão de sinal compartilhados, no MIE de estruturas para aeronaves. Com o uso de sensores piezoelétricos em série, dispostos de forma matricial em uma estrutura, pode-se formar canais específicos de

sensibilidade à tensão mecânica. Com o monitoramento isolado desses canais (cada canal sendo um conjunto de sensores piezoelétricos em série), pode-se detectar danos através da variação da tensão elétrica captada dentro do canal e entre dois ou mais canais, o que também fornece a informação da posição (localização) do dano. Por fim, usando um conhecimento prévio da estrutura, na absorção de energia em solicitações de impacto sob diferentes intensidades, em termos da relação de modo de falha e de sinal gerado, pode-se prever a intensidade do dano na estrutura e as possíveis consequências negativas desse dano em sua funcionalidade. A partir disso, torna-se possível também estimar a vida útil da estrutura, em termos de propriedades mecânicas.

Os testes experimentais alcançaram uma velocidade máxima de 15,85 m/s e uma energia de impacto máxima de 19,4 J nos impactos balísticos, considerando todos os ensaios com os painéis PLAAL e ABSAL. A energia de impacto média obtida nos ensaios experimentais foi próxima àquela verificada nos testes preliminares, usada como parâmetro de entrada no software usado nas simulações numéricas, mostrando um bom desempenho em repetibilidade e reprodutibilidade pelo sistema de medição de velocidade. A Tabela 4.11 mostra o valor médio obtido em velocidade do projétil nos testes, para o cálculo do resultado da medição da energia de impacto. A velocidade obtida por esse projétil está acima dos valores usuais encontrados em ensaios de baixa velocidade, como os de queda de peso e de ensaio de impacto Charpy (RAJPUT *et al.*, 2018; XIN *et al.*, 2019, ASTM D6110-14, 2014). Além disso, uma deformação plástica, na forma da ponta hemisférica do projétil, foi visualizada na região de impacto, o que evidencia o fenômeno de propagação de ondas mecânicas na direção de disparo do projétil, causando uma notável deflexão local. Este fenômeno também é influenciado pelo tipo de engaste do corpo de prova, que denota o grau de liberdade de movimento do corpo de prova e de amortecimento de parte da energia pela estrutura da plataforma (parte constituída de molas e grampos). Suvorov e Dvorak (2005) investigaram a resposta dinâmica de painéis sanduíches com núcleos de *honeycomb* de alumínio, com indentações de impactadores em velocidades entre 10 e 20 m/s (massa de 15,4 g). Os autores salientam que o impacto de objetos com velocidades nesse intervalo deve considerar a deformação local e global do painel sanduíche, e que fatores como a localização do ponto de impacto, em relação aos suportes da amostra, e a energia cinética transmitida pelo indentador são determinantes na resposta da amostra. Além disso, a indentação e a conseqüente deformação plástica causada pelo impactador são características peculiares de um evento dinâmico, em comparação a um evento quase-estático.

Tabela 4.11
Resultado da medição da energia obtida nos testes de impacto

Massa do projétil (kg)	Velocidade média do projétil (m/s)	Energia cinética de impacto (J)
0,154 ± 0,00001	15,3 ± 0,33	18,1 ± 0,80

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A partir das simulações numéricas de cada condição experimental, foram obtidos os módulos do vetor resultante das forças de reação na face metálica, oposta ao impacto do projétil, onde foram posicionados os sensores piezoelétricos, nos ensaios experimentais. A Tabela 4.12 mostra os valores que denotam a razão entre o pico máximo de força e o pico máximo de amplitude de tensão elétrica, e também os valores que denotam a razão entre a duração de tempo (até a estabilização) do pulso de força gerado na simulação numérica e o pulso de tensão elétrica gerado nos ensaios experimentais, para cada condição experimental. Os resultados mostram uma consistência entre a proporção média ($12,99 \pm 1,62$ N/V) dos picos de força de reação e os picos de tensão elétrica, validando a configuração adotada para os sensores piezoelétricos no modelo experimental. Além disso, a razão entre a duração dos pulsos ($0,17 \pm 0,02$) evidencia a influência do filtro de condicionamento dos sinais aplicado nos ensaios experimentais, que aumentam a duração do pulso com boa repetibilidade e reprodutibilidade. Os fatores obtidos podem servir como base de conversão entre as grandezas de força resultante de reação e de tensão elétrica, contribuindo para o estudo do comportamento mecânico de outras condições experimentais, com o uso desse sistema de medição.

Por fim, salienta-se que não houve a perfuração completa dos painéis sanduíches em nenhuma condição e o projétil foi prontamente rebatido após o impacto, não havendo um novo contato, o que mostra uma boa proteção antipenetração dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL, diante da energia cinética testada. Por outro lado, testes balísticos preliminares com os núcleos poliméricos impressos em 3D sem a anexação das faces mostraram uma perfuração completa desses materiais, evidenciando a importância do uso de faces densas, rígidas e resistentes, em relação ao material de núcleo, para a adequada absorção de energia desses materiais sob eventos dinâmicos.

Tabela 4.12

Cálculo da razão entre as medições de força de reação (estudo numérico) e de tensão elétrica (estudo experimental) dos testes de impacto

	Pico máximo			Duração do pulso		
	Força de reação (N)	Tensão elétrica (V)	Razão (N/V)	Tempo para a força de reação (s)	Tempo para a tensão elétrica (s)	Razão entre os tempos
PLAAL_RASTER45	1487,88	101,20	14,70	2,30	13,20	0,17
PLAAL_HC_HORIZ	1591,76	107,60	14,79	1,70	13,60	0,13
PLAAL_CEL_S	1554,59	112,40	13,83	2,20	14,80	0,15
PLAAL_HC_VERT	1503,81	113,00	13,31	3,30	16,60	0,20
ABSAL_RASTER45	1341,79	97,60	13,75	2,30	12,40	0,19
ABSAL_HC_HORIZ	1218,45	116,67	10,44	2,00	13,20	0,15
ABSAL_CEL_S	1245,67	110,67	11,26	2,30	14,00	0,16
ABSAL_HC_VERT	1034,38	87,60	11,81	3,30	18,80	0,18
Média			12,99			0,17
Desvio-padrão			1,62			0,02
Coeficiente de variação (%)			13%			14%

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

4.3.3.3 Estudo experimental dos ensaios balísticos

A área absoluta do sinal elétrico, calculada pela integral absoluta do sinal, em termos de amplitude por tempo, representa uma medida diretamente proporcional à força aplicada nos sensores piezoelétricos (quanto maior a força, maior é a amplitude do sinal gerado). A Figura 4.34 apresenta o gráfico de intervalo com as médias das amplitudes de sinal obtidas por cada condição experimental nos testes balísticos. A variabilidade dos valores para cada condição experimental foi denotada, no gráfico, pelo desvio-padrão amostral. Os painéis com núcleos de ABS apresentaram melhor absorção global de energia, como foi verificado nos testes de impacto Charpy. Por outro lado, os painéis com núcleos de PLA apresentaram falhas frágeis com rápida nucleação e propagação de macrotrincas (JOSEPH *et al.*, 2021). Considerando o efeito piezoelétrico direto, os testes revelaram que os painéis sanduíches com núcleos de PLA corrugados em S e em *honeycomb* horizontal apresentaram os maiores valores médios de área absoluta integrada de amplitude de sinal ($4,16 \pm 2,21$ V.s e $3,54 \pm 1,69$ V.s, respectivamente). Os painéis de PLA com núcleo em *honeycomb* vertical, por sua vez, não apresentaram os mesmos resultados, indicando que a forma de propagação da energia entre as células hexagonais desses painéis influenciou na transferência de cargas entre o núcleo e a face e culminou em uma menor intensidade de vibrações nos sensores. Esse fato também pode ser influenciado pela alta

incidência de ligações entre filamentos impressos em 3D para a formação das células hexagonais verticais, o que favorece o surgimento de concentradores de tensão no plano do impacto (XIE *et al.*, 2020).

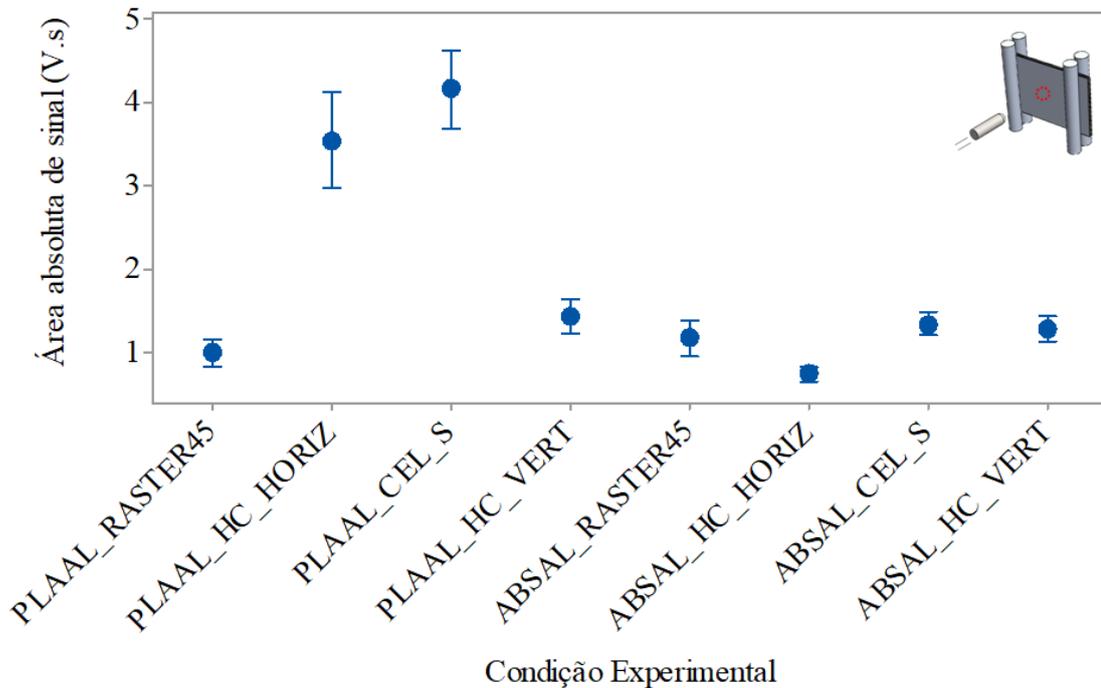


Figura 4.34 – Gráfico de intervalo para análise da área absoluta média do sinal elétrico nos impactos balísticos (intervalos baseados no desvio-padrão).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Com relação aos painéis ABSAL, os valores médios de área absoluta de sinal para os núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S não foram igualmente expressivos, em comparação com os painéis PLAAL. Isso evidencia uma interação entre o material PLA, de natureza frágil, e as configurações com células depositadas com filamentos longitudinais, que promove uma maior vibração dos sensores e conseqüentemente em uma maior geração de altas amplitudes de sinais elétricos. Esses resultados podem ser explicados pelo comportamento de absorção de energia pelo núcleo de ABS. Conforme já discutido a partir dos resultados das simulações numéricas, parte da energia absorvida pelos núcleos se reflete em mecanismos de falha, como deformações e fraturas, dependendo do arranjo geométrico do núcleo (SARVESTANI *et al.*, 2018a). Assim, os baixos valores médios da área absoluta integrada de sinais para os painéis com núcleos ABS mostram que essa energia é dissipada em maiores áreas de dano, com baixa concentração de tensão mecânica na região mais sensível de detecção dos sensores (baixa amplitude de sinal).

As Figura 4.35 e Figura 4.36 mostram os típicos sinais obtidos nos ensaios de impacto balísticos, em gráficos de amplitude de tensão elétrica gerada pelo domínio do tempo, no intervalo de interesse da análise das oscilações. Os testes mostraram que os painéis sanduíches apresentaram um maior número de oscilações em amplitude elétrica nos primeiros 30 ms de vibração, após a captação do primeiro pico de tensão, o que se deve à alta taxa de deformação do ensaio de impacto realizado. Para a suavização das curvas, os sinais foram filtrados com o uso do método de Savitzky-Golay, que utiliza uma regressão polinomial local e é eficiente na preservação da altura e da largura dos picos (ORIGIN, 2020). A partir dos gráficos, percebe-se a dominância de picos positivos máximos no início do sinal, que acionam o disparo (*trigger*) para a captação da tensão elétrica, pelo osciloscópio. Os sinais denotaram pouca diferença entre os valores médios de pico-a-pico de tensão elétrica, mostrando uma ligeira superioridade nos valores obtidos nos ensaios dos painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugados em forma de S. Salienta-se que a porção de região interna do núcleo afetada diretamente pelo projétil influencia na amplitude dos picos máximos de tensão elétrica, e que quanto maior a tensão elétrica de pico resultante, mais solicitados foram os quatro sensores em série. Como o diâmetro do projétil é maior que a dimensão de cada uma das lacunas das células projetadas, o impacto pode atingir, aleatoriamente, diferentes regiões das paredes celulares. Lee *et al.* (2010) investigaram ensaios de impacto em painéis sanduíches com núcleos em *honeycomb* hexagonal e encontraram diferenças significativas na absorção de energia nos casos em que o impactador atinge uma área mais preenchida de núcleo (paredes das células) e quando uma área interna da célula hexagonal (centro da célula) é atingida.

Maiores áreas em relação à linha central são visualizadas nos painéis sanduíches com núcleos de PLA em *honeycomb* horizontal e corrugados em S (setas pretas nas Figura 4.35 e Figura 4.36), sendo destacáveis abaixo da linha central do gráfico (amplitudes no sentido negativo do eixo vertical), no intervalo entre 10 e 30 ms, denotando altas deflexões como resposta ao impacto. Nos sinais obtidos com os painéis PLAAL com núcleo em *honeycomb* vertical e em todas as configurações de núcleo dos painéis ABSAL, esse fenômeno não foi tão evidente, devido às diferentes direções de propagação de energia apresentadas nessas condições experimentais.

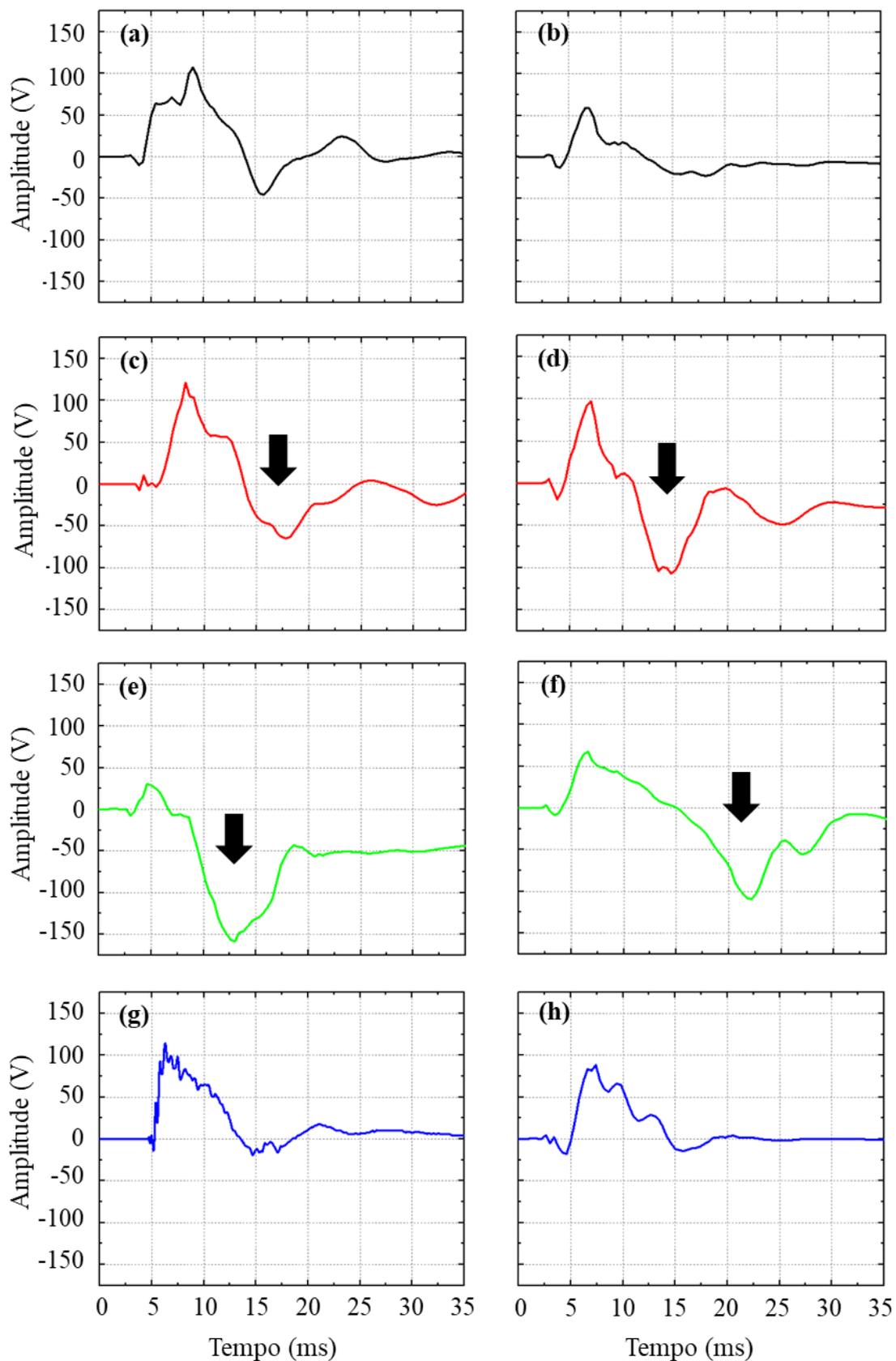


Figura 4.35 – Comportamento típico dos sinais obtidos nos ensaios de impacto balísticos dos painéis sanduíches PLAAL com núcleo (a, b) sólido, (c, d) *honeycomb* horizontal, (e, f) corrugado em S e (g, h) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

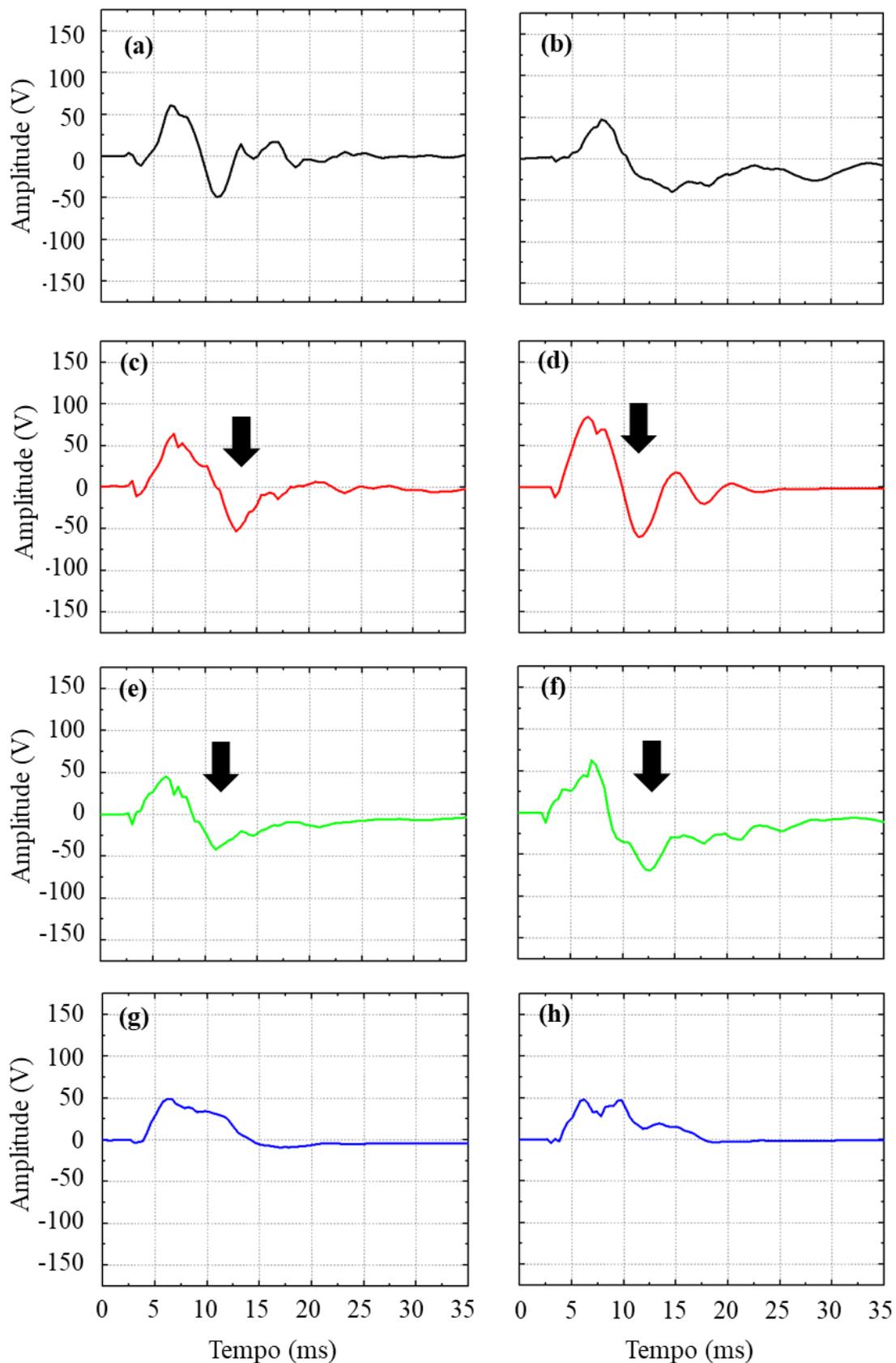


Figura 4.36 – Comportamento típico dos sinais obtidos nos ensaios de impacto balísticos dos painéis sanduíches ABSAL com núcleo (a, b) sólido, (c, d) *honeycomb* horizontal, (e, f) corrugado em S e (g, h) *honeycomb* vertical.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

As diferenças entre a capacidade de absorção de energia dos painéis PLAAL e ABSAL nos ensaios balísticos podem ser discutidas com a comparação entre os sinais obtidos pelos sensores e os modos de falha apresentados pelos corpos de prova. Dentre os mecanismos de danos comuns para painéis sanduíches, pode-se citar a deformação plástica dos revestimentos por indentação, a delaminação, o esmagamento do núcleo e o cisalhamento do núcleo (IVAÑEZ *et al.*, 2020). É importante mencionar também que as propriedades mecânicas dos materiais do núcleo (falha dúctil do ABS e falha frágil do PLA) afetam fortemente a capacidade de absorção de energia desses painéis sob carregamento dinâmico (BRISCHETTO *et al.*, 2018).

Com o impacto do projétil, ocorre uma notável deformação plástica na região da face metálica frontal do painel, o que gera a propagação de tensões no núcleo, a partir desse ponto (Figura 4.37). Salienta-se que as deformações plásticas nas faces metálicas, com o formato da ponta do projétil, foram similares para todas as condições experimentais. A partir disso, essas tensões levaram a trincas em direções radiais, verificadas em função de ondas de tensão compressivas que formam um cone na direção da espessura, denotando fissuras por cisalhamento nas direções diagonais, em relação à espessura, dos núcleos poliméricos. Em seguida, as tensões cisalhantes superam a resistência interfacial entre a face oposta ao impacto e o núcleo, gerando delaminação e deformação plástica nessa face. A forma de engaste usada também influencia no grau de descolamento da face, uma vez que o grau de liberdade para a vibração do painel pode levar a altas tensões na interface lâmina-núcleo. As falhas na região interfacial podem ser tanto de natureza coesiva (falha por cisalhamento na camada de adesivo) ou adesiva (falhas na aderência entre o adesivo e os substratos de núcleo e de face). A partir dos ensaios, verificou-se nos corpos de prova a presença de boa quantidade de resina alocada na superfície das faces, o que sugere a necessidade de melhorias na ligação interfacial das superfícies impressas em 3D. Tratamentos e revestimentos em superfícies de PLA impressas em 3D têm sido investigados na literatura para aumentar a energia livre de superfície e controlar a hidrofobicidade do PLA, como deposição eletroquímica, corrosão química, sol-gel, entre outros (YANG *et al.*, 2020; BARAN & ERBIL, 2019). Por outro lado, para melhorar a adesão entre a liga metálica e a resina epóxi, diferentes tratamentos químicos, como a anodização e banhos de decapagem com uso de soluções alcalinas, têm sido explorados na literatura (KABOGLU *et al.*, 2018; GONZALEZ-CANCHE *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2020).

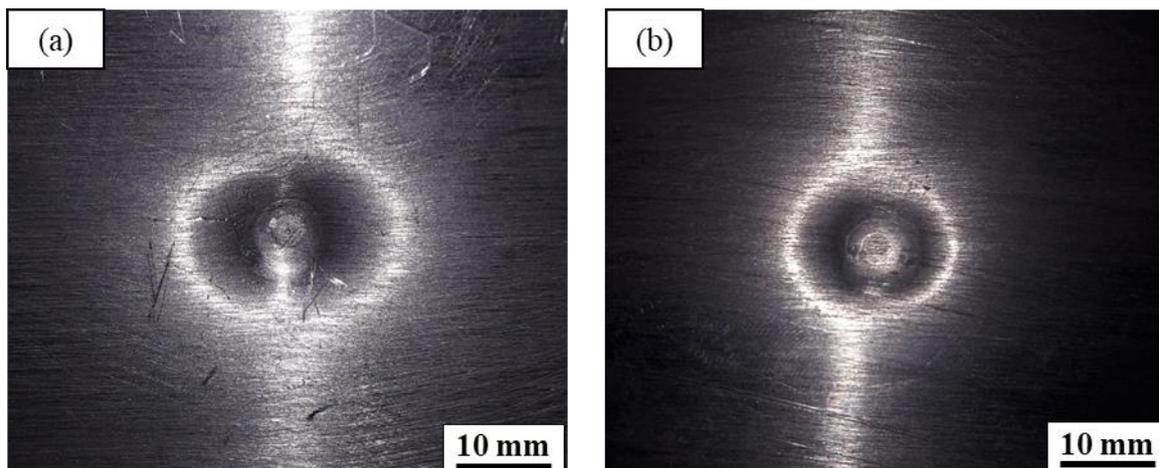


Figura 4.37 – Região de deformação plástica causada pelo projétil na face dos painéis sanduíches (a) PLAAL e (b) ABSAL.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

As Figuras 4.38 e 4.39 mostram os modos de falha dos núcleos para cada painel sanduíche investigado nos testes balísticos, considerando a visão lateral e a visão da face de núcleo oposta ao impacto (os círculos vermelhos na Figura 4.39 indicam a área oposta ao alvo do projétil). Relacionando os modos de falha aos sinais elétricos das Figuras 4.35 e 4.36, maiores amplitudes de sinal representam a ocorrência de macrotrincas no núcleo polimérico (fratura frágil), que se propagam em áreas próximas aos sensores e podem ser observadas em painéis com núcleos de PLA em *honeycomb* horizontal e corrugado em S (Figura 4.38c e Figura 4.38e). Os painéis com núcleos sólidos apresentaram trincas propagadas de acordo com a orientação da camada impressa (preenchimento Raster alternado em 45°). Por outro lado, os painéis sanduíches com núcleo *honeycomb* vertical apresentaram uma trajetória para a propagação de trincas fortemente concentrada na direção transversal, no plano de deslocamento do projétil, caracterizando uma baixa capacidade global de absorção de energia para esses painéis, tanto com núcleos de PLA quanto com núcleos de ABS (Figura 4.39g e Figura 4.39h). Esses resultados, em comparação com as simulações numéricas, mostraram problemas na transferência de tensões em função de falhas na ligação interfacial entre o núcleo e a faces metálicas, gerando delaminação e uma fratura prematura por tensões trativas, com evidentes concentrações de tensão. Além disso, os resultados experimentais explicam o percentual de energia absorvida pelos núcleos dos painéis, obtido nas simulações numéricas, sendo principalmente caracterizado pelos mecanismos de falhas de deformação plástica e fraturas para os painéis PLAAL. Com relação aos painéis ABSAL, a energia não dissipada no núcleo

promove a geração de tensões cisalhantes nas interfaces entre as chapas e o núcleo, o que provoca delaminação no painel.

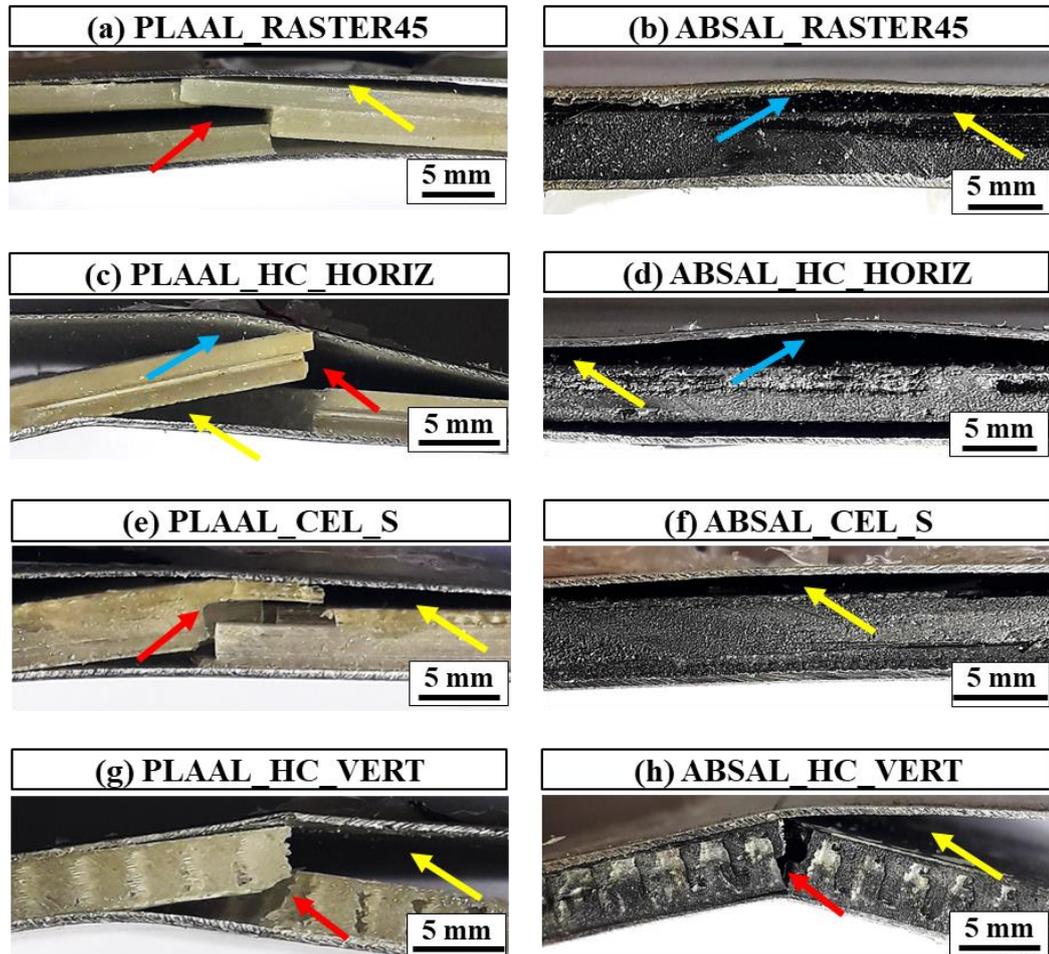


FIGURA 4.38 – Modos de falha dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL nos ensaios balísticos (visão lateral)

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

De acordo com a Figura 4.39, verifica-se uma propagação radial de trincas dos painéis sanduíches com arranjos de filamentos longitudinais (núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S), evidenciando a melhor dissipação global de energia desses painéis, embora a extensão e a escala de trincas e fraturas sejam dependentes do modo de fratura do material polimérico de núcleo (TIRILLÒ *et al.*, 2017). Sarvestani *et al.* (2018b) verificou que esse fenômeno também ocorre em impactos por queda de peso (baixas velocidades), em um nível de energia semelhante (20 J) e usando um impactador de 12 kg, em painéis sanduíches de PLA, com células em *honeycomb* hexagonal horizontal e vertical. Os autores também verificaram uma superioridade na absorção de energia pelas estruturas em *honeycomb* hexagonal horizontal, devido a um dano menos localizado na região de impacto.

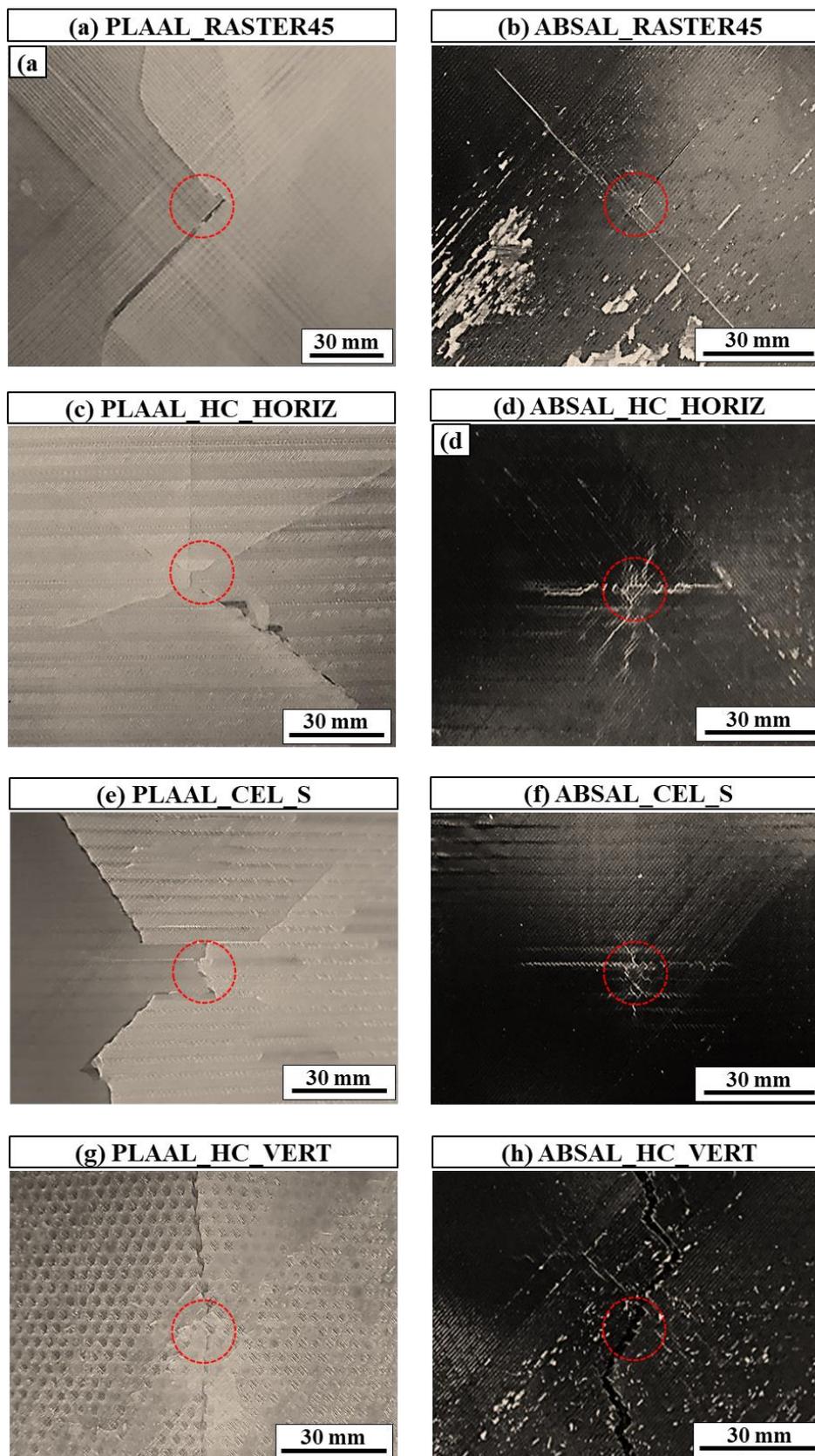


FIGURA 4.39 – Modos de falha dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL nos ensaios balísticos (visão da face do núcleo polimérico oposta ao impacto)

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Por fim, ressalta-se que os painéis sanduíches com núcleo corrugado em S possuem células que oferecem um grau de liberdade em função de uma pequena alteração de forma (parte da célula inclinada em 45°). Com o esmagamento do núcleo, parte da energia tende a ser convertida em deformações de suas células. Contudo, os principais mecanismos de falha para esse tipo de núcleo também foram o cisalhamento no núcleo e a delaminação da face oposta ao impacto. De acordo com Tirillò *et al.* (2017), ensaios dinâmicos de impacto em compósitos sanduíches tendem a ter, no momento de contato com o projétil, uma ruptura por compressão e cisalhamento até uma certa espessura do material, e após esse limiar, a espessura restante irá ser submetida a um modo de ruptura por tração e cisalhamento, que é o mecanismo responsável pela delaminação da face oposta ao impacto e pela fratura do núcleo em sua superfície oposta ao impacto. Kazemi-Khasragh *et al.* (2018) afirmam que, em eventos dinâmicos de impacto em materiais compósitos, a resistência à compressão é solicitada para a indentação do impactador e a resistência à flexão é determinante para evitar a penetração.

4.4 Análise comparativa dos resultados

A Tabela 4.13 apresenta um resumo das médias encontradas para as propriedades mecânicas dos componentes dos painéis sanduíches do presente trabalho, a partir dos testes realizados. O uso dos núcleos celulares de PLA impressos em 3D, em substituição ao preenchimento com camadas alternadas em 45°, gerou uma redução de aproximadamente 48% na massa total dos corpos de prova usados nos ensaios de tração. Contudo, as propriedades de módulo de elasticidade (E_t) e de resistência à tração (σ_t) não foram severamente afetadas no uso dos núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S, em comparação com o uso do núcleo sólido de PLA, com preenchimento Raster alternado em 45° (RASTER45), como mostra a Figura 4.40.

Tabela 4.13
Resumo dos resultados dos testes mecânicos dos componentes dos painéis sanduíches

Tipo de Material	Ensaio de Tração			Ensaio de Flexão			Ensaio de Impacto Charpy
	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação final (%)	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento máximo (mm)	Energia absorvida (J)
Liga de alumínio 2024-T3	44,75 (0,77)	433,40 (28,52)	7,29 (1,01)	-	-	-	-
Resina Epóxi	1,71 (0,22)	36,93 (3,41)	3,45 (0,40)	2,19 (0,20)	75,07 (5,32)	6,35 (0,70)	-
Núcleo polimérico sólido (ABS)	1,57 (0,08)	30,58 (1,25)	4,63 (0,29)	-	-	-	-
Núcleo polimérico sólido (PLA)	2,74 (0,16)	56,13 (1,16)	3,03 (0,40)	2,30 (0,13)	74,30 (2,41)	17,04 (3,13)	0,90 (0,13)
Núcleo polimérico - <i>honeycomb</i> horizontal (PLA)	2,76 (0,24)	43,23 (5,24)	2,46 (0,33)	2,23 (0,21)	46,32 (5,46)	8,07 (0,60)	0,58 (0,05)
Núcleo polimérico - corrugado em S (PLA)	2,69 (0,23)	47,38 (5,10)	2,44 (0,34)	1,90 (0,12)	43,44 (1,82)	8,29 (0,67)	0,54 (0,03)
Núcleo polimérico - <i>honeycomb</i> vertical (PLA)	1,27 (0,10)	16,06 (1,81)	2,82 (0,35)	1,73 (0,10)	29,81 (1,97)	7,82 (1,00)	0,44 (0,05)

Nota: os valores entre parênteses representam o desvio-padrão das observações.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Tabela 4.14, por sua vez, mostra o resumo dos resultados dos ensaios mecânicos dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL. Com relação à adição das chapas metálicas nos núcleos poliméricos celulares para a produção dos painéis sanduíches, verificou-se, com base no material PLA, que os painéis PLAAL demonstraram propriedades mecânicas superiores aos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D sem as faces metálicas. Foram encontrados aumentos na resistência mecânica e, principalmente, na rigidez da estrutura, em função da adição das chapas tratadas de liga de alumínio 2024-T3 e do processo de fabricação por compactação a frio, com o uso de resina epóxi. Os resultados e os modos de falha nos testes

mecânicos mostraram que houve uma boa transferência de cargas entre as chapas e o núcleo, e que cada componente contribuiu significativamente para a contenção das tensões.

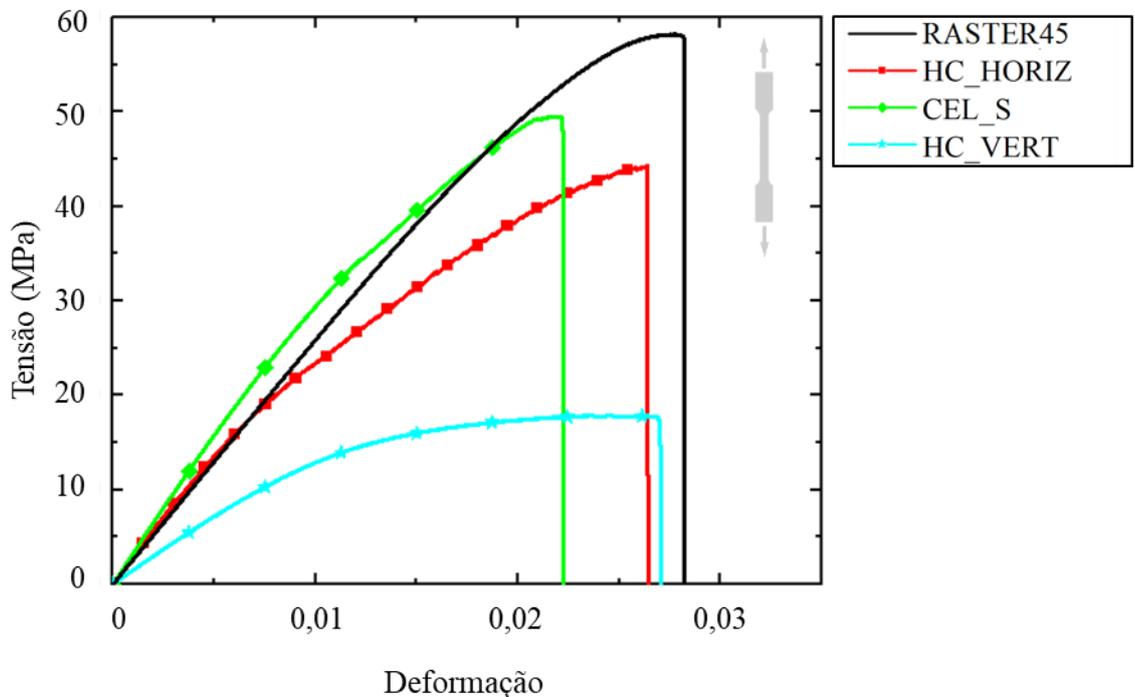


Figura 4.40 – Comparação do comportamento sob tração do corpo de prova de PLA impresso em 3D com preenchimento em 45° e com núcleos poliméricos celulares.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Os painéis sanduíches PLAAL com núcleo em *honeycomb* horizontal (PLAAL_HC_HORIZ) apresentam maiores módulos de elasticidade na flexão (526%) e resistência à flexão (51%), e menor deslocamento na flexão (diminuição de 29%) que os núcleos poliméricos impressos em 3D, com a referida geometria celular, sem o uso das chapas metálicas (HC_HORIZ). No caso dos painéis sanduíches PLAAL com núcleo corrugado em S (PLAAL_CEL_S), esse aumento foi de 654% e de 39%, para módulo de elasticidade na flexão e resistência à flexão, respectivamente, e a diminuição no deslocamento na flexão foi de 39%, comparado ao núcleo corrugado em S sem chapas (CEL_S). Por fim, a combinação das lâminas metálicas com os núcleos poliméricos em *honeycomb* vertical (PLAAL_HC_VERT) gerou expressivos aumentos de 972% no módulo de elasticidade na flexão e de 363% na resistência à flexão, e uma diminuição de 70% no deslocamento final, em comparação com a estrutura polimérica isoladamente (HC_VERT).

Tabela 4.14
Resumo dos resultados dos testes mecânicos dos painéis sanduíches

Tipo de painel sanduíche	Ensaio de Flexão					Ensaio de impacto Charpy	Ensaio balístico
	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Energia absorvida (J)	Área absoluta do sinal (V.s)
Painel sanduíche PLAAL – núcleo sólido	16,05 (1,03)	75,45 (10,52)	2,09 (0,15)	408,89 (56,90)	3,63 (0,51)	4,82 (0,83)	0,98 (0,51)
Painel sanduíche PLAAL - núcleo <i>honeycomb</i> horizontal	13,96 (1,72)	70,15 (9,39)	5,71 (0,75)	370,86 (49,23)	3,48 (0,45)	5,93 (0,81)	3,54 (1,69)
Painel sanduíche PLAAL - núcleo corrugado em S	14,32 (1,44)	60,56 (4,67)	5,05 (0,71)	339,12 (48,88)	2,62 (0,21)	5,83 (0,42)	4,16 (2,21)
Painel sanduíche PLAAL - núcleo <i>honeycomb</i> vertical	18,54 (1,67)	138,04 (10,10)	2,34 (0,23)	694,25 (62,87)	5,61 (0,66)	3,96 (0,42)	1,32 (0,71)
Painel sanduíche ABSAL – núcleo sólido	9,87 (1,23)	73,53 (8,69)	1,72 (0,20)	415,47 (48,03)	3,69 (0,43)	9,24 (1,38)	1,17 (0,89)
Painel sanduíche ABSAL - núcleo <i>honeycomb</i> horizontal	8,51 (0,78)	49,36 (6,86)	2,57 (0,32)	264,31 (38,47)	2,35 (0,34)	8,94 (0,96)	1,04 (0,77)
Painel sanduíche ABSAL - núcleo corrugado em S	7,33 (0,75)	44,06 (4,15)	1,81 (0,14)	235,56 (22,19)	1,98 (0,18)	12,79 (1,58)	1,33 (0,65)
Painel sanduíche ABSAL - núcleo <i>honeycomb</i> vertical	9,04 (1,07)	55,45 (7,21)	1,65 (0,20)	300,55 (39,48)	2,67 (0,35)	4,82 (0,54)	1,27 (0,71)

Nota: os valores entre parênteses representam o desvio-padrão das amostras.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 4.41 evidencia, resumidamente, as alterações visualizadas no comportamento dos núcleos poliméricos celulares impressos em 3D, com a adição das lâminas metálicas para a formação dos painéis sanduíches.

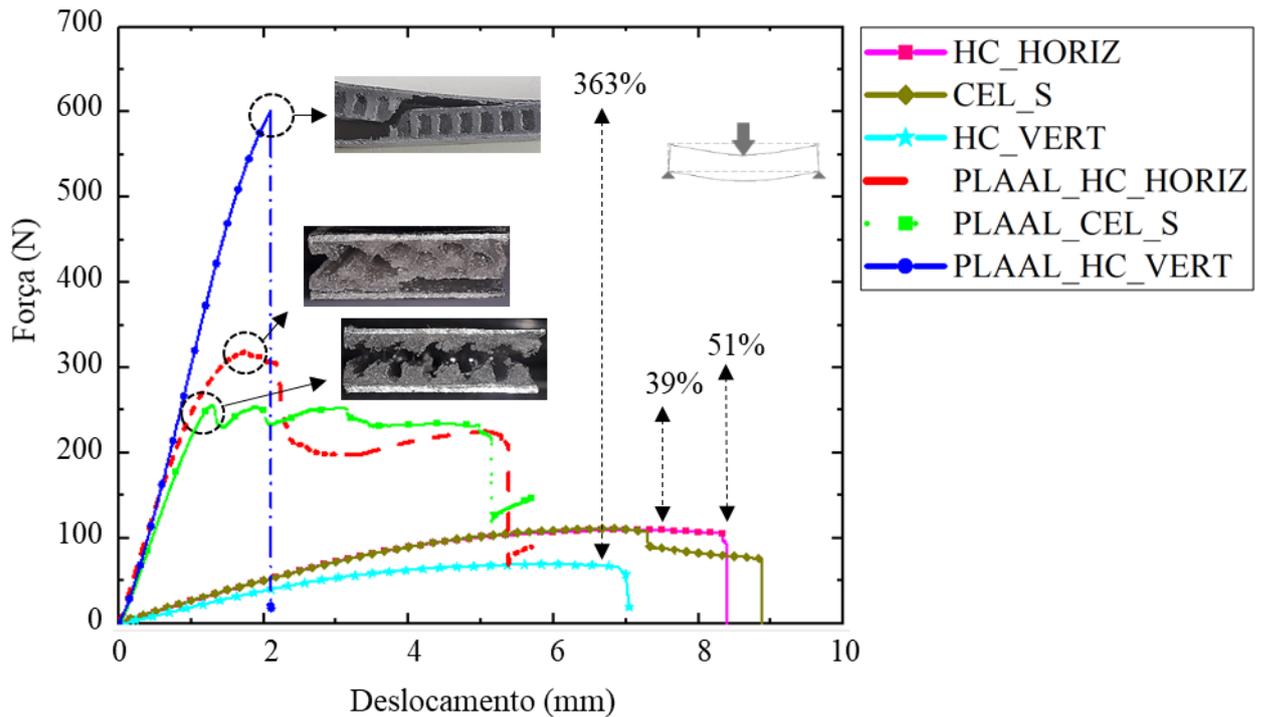


Figura 4.41 – Comparação do comportamento sob flexão entre os núcleos poliméricos celulares de PLA impressos em 3D sem lâminas metálicas e os painéis sanduíches PLAAL, com faces de liga de alumínio 2024-T3.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Para a análise da influência da redução de peso dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL, com a substituição de núcleos sólidos por núcleos celulares mais leves, foram investigadas as propriedades específicas de módulo de elasticidade específico por massa (GPa/kg) e resistência à flexão específica por massa (MPa/kg), obtidos a partir dos ensaios de flexão, e também a energia específica absorvida por massa (J/kg), obtida nos ensaios de impacto Charpy. A investigação dessas propriedades mecânicas por massa para painéis com núcleos celulares tem sido largamente investigada na literatura, como mostram os estudos de Wickeler e Naigub (2020), Yan *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2016), que também investigaram a redução no peso de estruturas, sem perdas consideráveis em rigidez e resistência mecânica.

A Figura 4.42 mostra as propriedades mecânicas específicas dos painéis PLAAL e ABSAL. O uso de núcleos celulares nos painéis PLAAL proporcionou aumentos no módulo de elasticidade específico por massa, em comparação com o núcleo sólido de PLA, sendo de 17%, 22% e 62% para os núcleos em *honeycomb* horizontal, corrugado em S e *honeycomb* vertical, respectivamente.

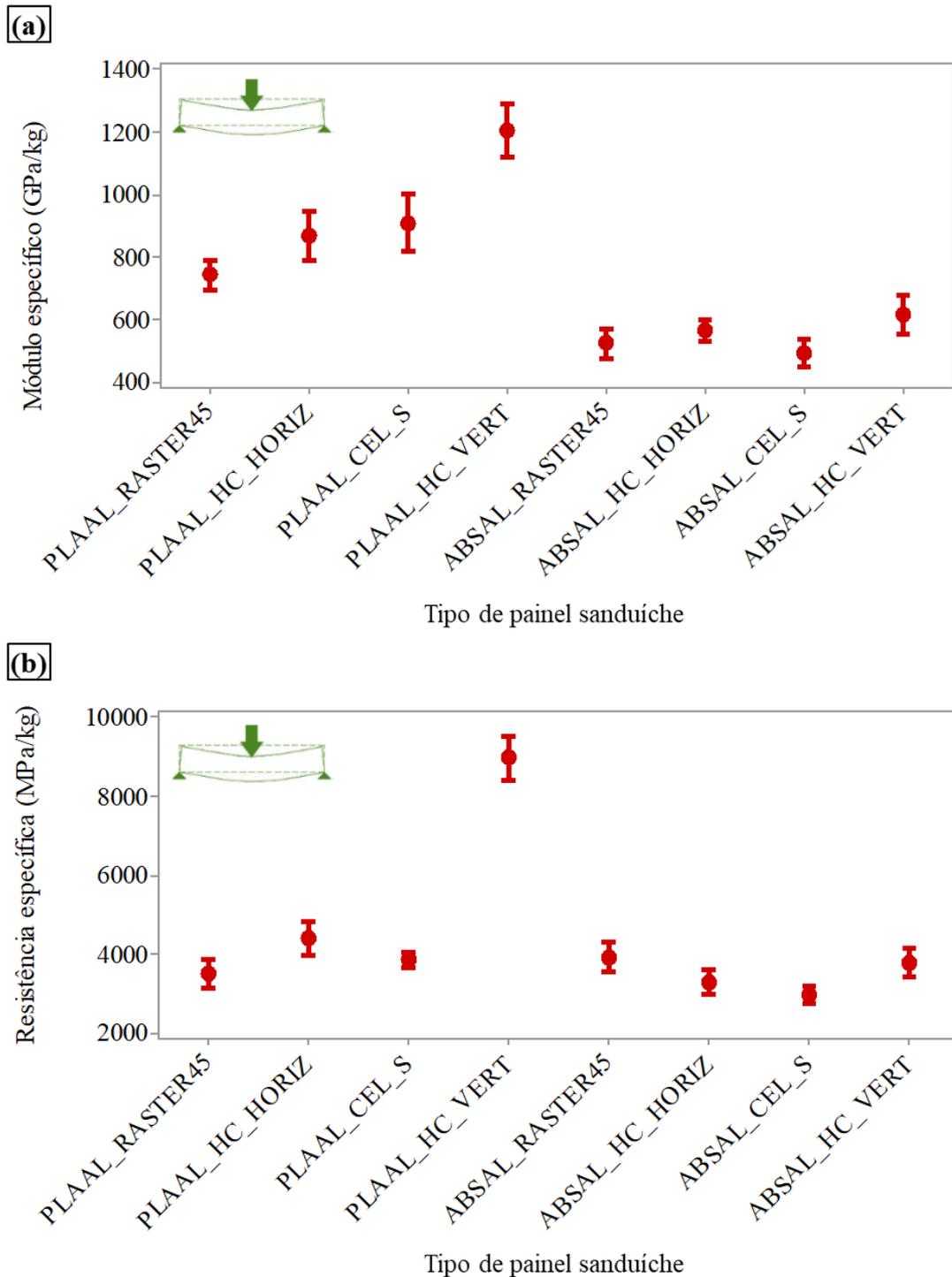


Figura 4.42 – Comparação das propriedades mecânicas específicas (por massa) dos painéis sanduíche PLAAL e ABSAL: (a) módulo de elasticidade específico por massa (GPa/kg) e (b) resistência à flexão específica por massa (MPa/kg).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Com relação aos painéis ABSAL, esses aumentos não foram tão expressivos, com destaque apenas para os painéis com núcleos em *honeycomb* vertical (aumento de 18%, em comparação com os painéis de núcleo sólido de ABS). Com relação à resistência à flexão específica por massa, os painéis PLAAL com núcleos celulares mostraram aumentos de 25%,

10% e de 157%, para os núcleos em *honeycomb* horizontal, corrugado em S e em *honeycomb* vertical, respectivamente, tendo como referência os painéis PLAAL de núcleo sólido de PLA. Nos painéis ABSAL com núcleo *honeycomb* vertical, salienta-se que essa propriedade específica foi similar à condição com núcleo sólido de ABS.

Nos ensaios de impacto Charpy dos painéis PLAAL, a energia específica absorvida (Figura 4.43) foi maior para os painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal (64%), corrugados em S (57%) e em *honeycomb* vertical (19%), em comparação com os painéis de núcleo sólido de PLA. Nos painéis ABSAL com núcleos celulares, houve aumento de energia específica absorvida nos painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal (23%) e corrugados em S (63%), em relação aos painéis de núcleos sólidos de ABS. Esses resultados mostram um aumento na capacidade de absorção de energia específica dessas estruturas celulares em eventos dinâmicos, em que a redução de massa é compensada pela arquitetura de núcleo, sem apresentar perdas consideráveis em propriedades mecânicas.

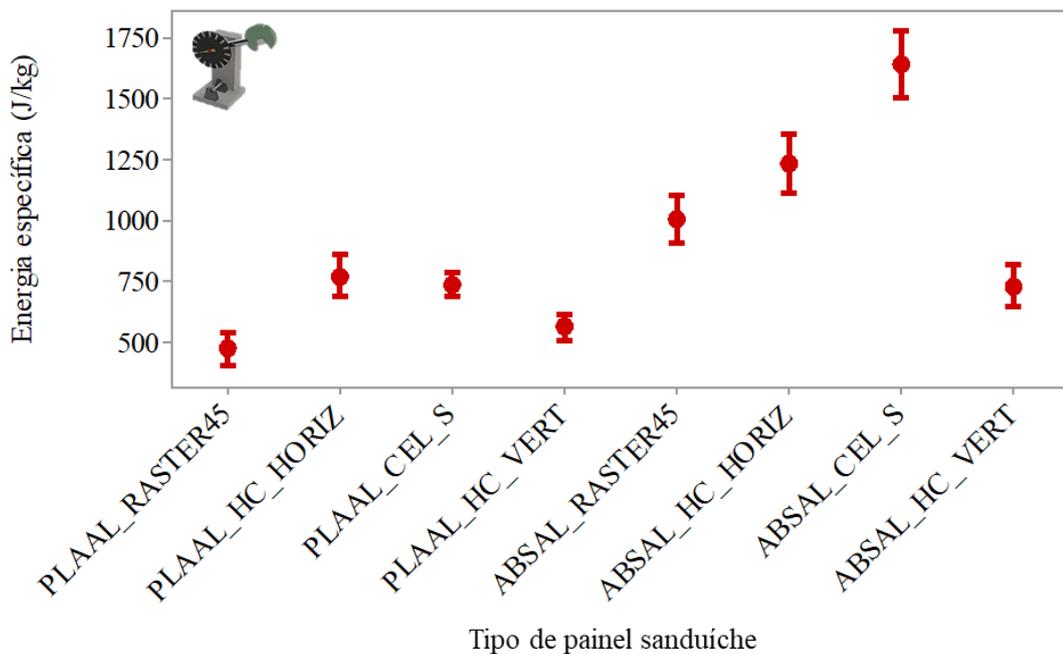


Figura 4.43 – Comparação das propriedades mecânicas específicas (por massa) dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL: energia absorvida no impacto Charpy (J/kg).

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

O sistema de monitoramento da integridade estrutural dos painéis denotou, sob a energia de impacto exercida, deformação plástica nas faces, danos por cisalhamento do núcleo e delaminações na face oposta ao impacto. A forma de propagação da energia que, em ensaios com altas deformações, ocorre por meio de ondas compressivas mais concentradas, se

comparado aos ensaios de impacto com menores taxas de deformação, foi denotada de forma diferente para cada tipo de núcleo, conforme mostra a Figura 4.44, que apresenta exemplos típicos de sinal de cada uma das condições. Ensaios preliminares mostraram uma total penetração do projétil nos núcleos poliméricos sem a adição de lâminas metálicas. Por outro lado, os painéis PLAAL e ABSAL demonstraram uma boa resistência antipenetração e o instantâneo rebote do projétil, evidenciando uma boa absorção de energia com o uso das lâminas metálicas.

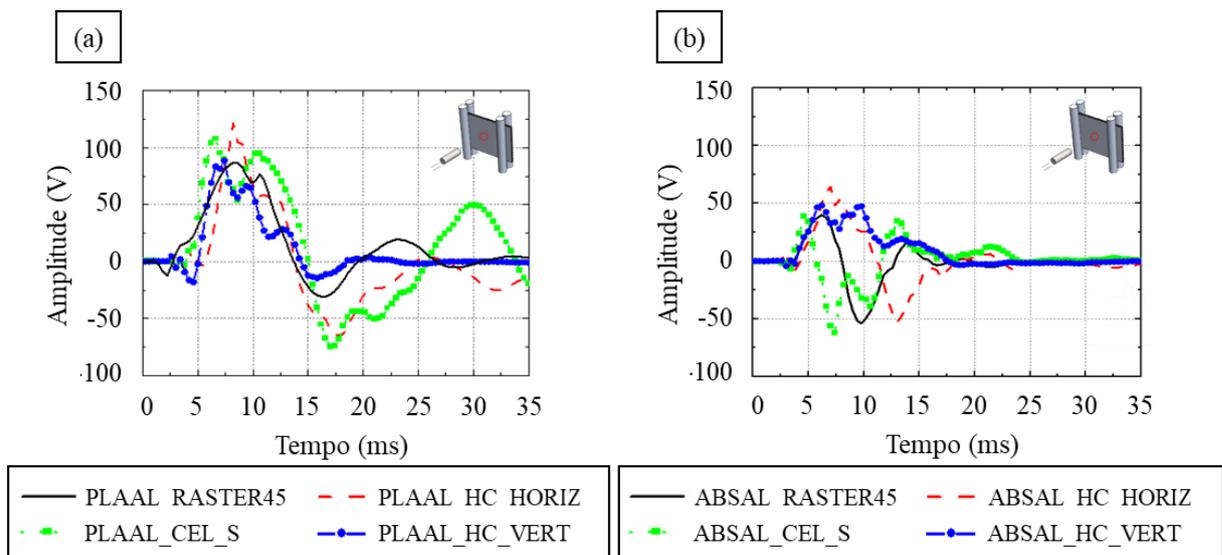


Figura 4.44 – Resumo das curvas do sinal de tensão elétrica em amplitude por tempo dos testes balísticos.

Fonte – Elaborada pelo próprio autor.

Por fim, os resultados experimentais dos ensaios balísticos foram condizentes com os ensaios de impacto Charpy e validaram as simulações numéricas, indicando uma maior tenacidade para os painéis ABSAL, considerando todos os tipos de núcleo. Na análise numérica, os painéis ABSAL apresentaram uma maior parcela de absorção de energia cinética no impacto, maiores áreas de danos nos núcleos e menores pontos de concentração de tensão nas faces metálicas. No estudo experimental, isso se refletiu em uma tendência de dissipação global de energia na direção longitudinal do painel, com sinais de menor amplitude e falhas por deformação plástica, microtrincas e delaminação. Por outro lado, os sinais de maiores amplitudes foram verificados nos painéis PLAAL, com os núcleos em *honeycomb* horizontal (PLAAL_HC_HORIZ) e corrugados em S (PLAAL_CEL_S), que apresentaram fraturas frágeis que levaram à excitação dos sensores, por meio de trincas em direções mais próximas à direção transversal do painel. Salienta-se que um fenômeno diferente foi visualizado nos painéis

PLAAL e ABSAL com núcleo em *honeycomb* vertical. Descolamentos entre o núcleo e a face metálica, alinhados à baixa capacidade de deflexão desse núcleo polimérico, resultaram no surgimento e na propagação de trincas na direção transversal dos painéis, dividindo o núcleo na seção central e caracterizando uma alta dissipação de energia com uma falha catastrófica da estrutura. Por fim, atesta-se que os ensaios experimentais denotaram fraturas nos núcleos de PLA e de ABS, fato que foi previsto nas simulações numéricas, pois a concentração de tensão excedeu a resistência máxima desses materiais poliméricos.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a caracterização de novos painéis sanduíches com o uso de manufatura aditiva para a produção dos núcleos poliméricos. Ao final do estudo, foi possível alcançar as seguintes conclusões:

- A metodologia de fabricação dos painéis sanduíches se mostrou eficiente, possibilitando a transferência de tensões entre as faces metálicas e os núcleos poliméricos impressos em 3D.
- Maiores médias para módulo de elasticidade e resistência à tração foram obtidas pelos núcleos de PLA impressos em 3D com células em *honeycomb* horizontal (117% e 169%, respectivamente) e corrugado em S (112% e 195%, respectivamente), em comparação com os núcleos em *honeycomb* vertical. Nos ensaios de flexão, as duas configurações também se destacaram, com maiores valores médios em módulo de elasticidade na flexão (até 29% maior) e de resistência à flexão (até 55% maior). Nos ensaios de impacto Charpy, uma maior absorção de energia pelos núcleos em *honeycomb* horizontal (até 32% maior) foi encontrada, em comparação com os núcleos celulares corrugados em S e em *honeycomb* vertical.
- Os ensaios de flexão em três pontos dos painéis sanduíches mostraram uma maior rigidez e uma maior carga máxima na flexão para os painéis PLAAL, com destaque para a configuração de núcleo em *honeycomb* vertical, que tiveram os maiores valores médios de módulo de elasticidade na flexão (18,5 GPa) e de resistência à flexão (138 MPa). Por outro lado, as áreas sob as curvas de força em função do deslocamento denotaram maior energia absorvida pelos painéis com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S.
- Os ensaios de impacto Charpy denotaram maiores valores de energia absorvida para os painéis ABSAL, que apresentaram maior tenacidade que os painéis PLAAL. Os painéis ABSAL com núcleo corrugado em S apresentaram maior energia absorvida (12,8 J), com menor tendência de fratura completa do núcleo.
- Os painéis ABSAL apresentaram maior tenacidade que os painéis PLAAL, o que foi verificado tanto nos ensaios de impacto Charpy quanto nos ensaios balísticos. Contudo, os painéis com núcleos em *honeycomb* vertical, para ambos os materiais, tiveram altos pontos de concentração de tensão e baixa capacidade de restrição na propagação de

trincas, sofrendo forte influência de problemas na ligação interfacial entre o núcleo e as faces metálicas.

- Os sinais obtidos pelos sensores nos ensaios balísticos mostraram que os painéis sanduíches PLAAL com núcleos em *honeycomb* horizontal e corrugado em S apresentaram uma maior amplitude de vibrações, o que evidencia a influência da fratura frágil do PLA e do mecanismo de falha desses núcleos, com filamentos longitudinais e trincas propagadas em direção aos sensores.
- Os estudos experimentais dos ensaios balísticos mostraram boa correlação com as simulações numéricas, indicando a ausência de perfurações completas nos painéis a partir de uma velocidade de disparo de 15,8 m/s e uma energia de impacto aproximada de 19 J. Além disso, menores áreas de danos e maiores concentrações de tensão foram previstas e comprovadas experimentalmente no impacto balístico dos painéis PLAAL.
- O sistema de MIE desenvolvido se mostrou viável para a detecção de solicitações mecânicas dinâmicas, com uma boa sensibilidade a oscilações provocadas pelo impacto de um objeto. A configuração dos sensores se mostrou apta para a extrapolação do modelo proposto para aplicações comerciais.
- As propriedades específicas evidenciaram a viabilidade de emprego dos núcleos celulares impressos em 3D nos painéis sanduíches, em substituição aos núcleos sólidos, criando estruturas com menor massa, menor quantidade de material e menor tempo de fabricação, com excelentes razões de rigidez por massa e resistência por massa.
- Os resultados mostraram que a manufatura aditiva pode ser usada para substituir outros processos convencionais de fabricação de peças plásticas, em que a produção de geometrias celulares de núcleo é considerada complexa. Contudo, a produção de peças em um alto volume ainda é um desafio, devido ao tempo de impressão das peças.
- Os painéis sanduíches demonstraram um comportamento mecânico de potencial uso em componentes secundários do setor automobilístico, de construção civil, entre outros setores industriais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do presente trabalho, as seguintes investigações são sugeridas para a continuidade da pesquisa e para a obtenção de melhorias no desempenho dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL:

- Investigação sobre o uso de tratamentos mecânicos e químicos nas superfícies das faces de alumínio e dos núcleos impressos em 3D.
- Estudo numérico e experimental sobre o comportamento mecânico dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL sob impacto balístico com velocidades mais altas.
- Caracterização térmica e química dos painéis sanduíches, para a ampliação das possibilidades de aplicação desses materiais.
- Investigação no uso de partículas metálicas condutoras para a construção de painéis PLAAL e ABSAL inteligentes, para o monitoramento da integridade estrutural com sensores integrados na estrutura.
- Caracterização mecânica dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL com outras geometrias celulares de núcleo.

REFERÊNCIAS

3D LAB. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D.** Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

AGAYEV, S.; OZDEMIR, O. Fabrication of high density polyethylene composites reinforced with pine cone powder: mechanical and low velocity impact performances. **Materials Research Express**, v. 9, p. 045312, 2019.

AGHCHAI, A. J.; KHATAMI, S. Experimental and numerical formability investigation of FML sheets with glass fiber reinforced core. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 3881-3891, 2018.

AL-HAJAJ, Z.; SY, B. L.; BOUGHERARA, H.; ZDERO, R. Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix. **Composite Structures**, v. 208, p. 346–356, 2019.

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** Barueri: Editora Manole, 2018.

AMERI, B.; MORADI, M.; TALEBITOOTI, R. Effect of *Honeycomb* Core on Free Vibration Analysis of Fiber Metal Laminate (FML) Beams Compared to Conventional Composites. **Composite Structures**, v. 261, p. 113281, 2021a.

AMERI, B.; TAHERI-BEHROOZ, F.; ALIHA, M. R. M. Evaluation of the geometrical discontinuity effect on mixed-mode I/II fracture load of FDM 3D-printed parts. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 113, p. 102953, 2021b.

ANANDAN, S.; DHALIWAL, G.; GANGULY, S.; CHANDRASHEKHARA, K. Investigation of sandwich composite failure under three-point bending: Simulation and experimental validation. **Journal of Sandwich Structures & Materials**, v. 22, p. 1838-1858, 2018.

ANSYS. **Ansys LS-DYNA Multiphysics Solver.** 2022. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna>. Acesso em 31 jan. 2022.

ASHBY, M. F., SHERCLIFF, H., CEBON, D. **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASTM C393/C393M-16. **Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure,** ASTM International, 2016.

ASTM D3878-18. **Standard Terminology for Composite Materials,** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D6110-10. **Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics,** ASTM International, 2010.

ASTM D638-14. **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**. ASTM International, 2014.

ASTM D7136/D7136M-15. **Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event**, ASTM International, 2015.

ASTM D7250/D7250M-16. **Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness**, ASTM International, 2016.

ASTM D790-15. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. ASTM International, 2015.

ASTM E8/E8M-16. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. ASTM International, 2016.

ASTM E865-12. **Standard Specification for Structural Film Adhesives for *Honeycomb* Sandwich Panels**. ASTM International, 2012.

ASTM E1091-13. **Standard Specification for Nonmetallic *Honeycomb* Core for Use in Shelter Panels**. ASTM International, 2013.

AZEVEDO, C. M. D. **Estudo da resistência de compósitos poliméricos de fibra de vidro-E e Kevlar 49 após sofrerem impacto de baixa velocidade**. 2017. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BAI, S.; LI, X.; XIE, Z.; ZHOU, Z.; OU, J. A Wireless Fatigue Monitoring System Utilizing a Bio-Inspired Tree Ring Data Tracking Technique. **Sensors**, v. 14, p. 4364-4383, 2014.

BALAJI, R.; SASIKUMAR, M. Graphene based strain and damage prediction system for polymer composites. **Composites: part A**, v. 103, p. 48-59, 2017.

BARAN, E. H.; ERBIL, H. Y. Surface Modification of 3D Printed PLA Objects by Fused Deposition Modeling: A Review. **Colloids and interfaces**, v. 3, p. 43, 2019.

BBC UK. **When a plane collides with a flock of birds it can be messy**. 2015. Disponível em: <<http://www.bbc.co.uk/newsbeat/article/32623212/when-a-plane-collides-with-a-flock-of-birds-it-can-be-messy>>. Acesso em 25 out. 2019.

BĚLSKÝ, P.; KADLEC, M. Capability of non-destructive techniques in evaluating damage to composite sandwich structures. **International Journal of Structural Integrity**, v. 10, n. 3, p. 356-370, 2019.

BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P.; CHRYSOLOURIS, G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 83, p. 389-405, 2016.

BITZER, T. ***Honeycomb* Technology: materials, design, manufacturing, applications and testing**. Springer Science and Business Media Dordrecht, 1997.

BODAGHI, M.; DAMANPACK, A. R.; HU, G. F.; LIAO, W. H. Large deformations of soft metamaterials fabricated by 3D printing. **Materials & Design**, v. 131, p. 81-91, 2017.

BOON, Y. D.; JOSHI, S. C. A review of methods for improving interlaminar interfaces and fracture toughness of laminated composites. **Materials Today Communications**, v. 22, p. 100830, 2020.

BRISCHETTO, S.; FERRO, C. G.; TORRE, R.; MAGGIORE, P. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and *honeycomb* cores. **Curved and Layered Structures**, v. 5, p. 80-94, 2018.

BRUNO, L. Mechanical characterization of composite materials by optical techniques: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 104, p. 192-203, 2018.

CALLISTER JR, W. D., RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAMINERO, M. A.; CHACÓN, J. M.; GARCÍA-MORENO, I.; RODRÍGUEZ, G. P. Impact damage resistance of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. **Composites: part B**, v. 148, p. 93-103, 2018.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Técnicas de Caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004.

CANTWELL, W. J.; MORTON, J. Comparison of the low and high velocity impact response of CFRP. **Composites**, v. 20, p. 545-551, 1989.

CASTRO, B.; CLERICE, G.; RAMOS, C.; ANDREOLI, A.; BAPTISTA, F.; CAMPOS, F.; ULSON, J. Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors. **Sensors**, v. 16, p. 1266, 2016.

CASTRO, B. D.; CAMPOS RUBIO, J. C. Metodologias avançadas de monitoramento de integridade estrutural (SHM) em materiais compósitos: uma revisão bibliográfica. **Anais..** In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2019a.

CASTRO, B. D.; MAGALHÃES, F. C.; CAMPOS RUBIO, J. C. Ensaios de impacto em alta velocidade em materiais compósitos com o uso de sensores piezoelétricos. **Anais..** In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2019b.

CHACÓN, J. M.; CAMINERO, M. A.; GARCÍA-PLAZA, E.; NÚÑEZ, P. J. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials and Design**, v. 124, p. 143-157, 2017.

CHAIKEAW, C.; SRIKULKIT, K. Preparation and Properties of Poly(lactic Acid)/PLA-g-ABS Blends. **Fibers and Polymers**, v. 19, p. 2016-2022, 2018.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**, 3. ed. Nova York: Springer, 2012.

CHEN, B.; LI, H.; TIAN, W.; ZHOU, C. PZT Based Piezoelectric Sensor for Structural Monitoring. **Journal of Electronic Materials**, v. 48, p. 2916-2923, 2019.

CHEN, Y.; XUE, X. Advances in the Structural Health Monitoring of Bridges Using Piezoelectric Transducers. **Sensors**, v. 18, p. 1-24, 2018.

CHERNOZEM, R. V.; SURMENEVA, M. A.; SHKARINA, S. N.; LOZA, K.; EPPLE, M.; ULBRICHT, M.; CECÍLIA, A.; KRAUSE, B.; BAUMBACH, T.; ABALYMOV, A. A.; PARAKHONSKIY, B. V.; SKIRTACH, A. G.; SURMENEV, R. A. Piezoelectric 3-D Fibrous Poly(3-hydroxybutyrate)-Based Scaffolds Ultrasound-Mineralized with Calcium Carbonate for Bone Tissue Engineering: Inorganic Phase Formation, Osteoblast Cell Adhesion, and Proliferation. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 11, p. 19522–19533, 2019.

CODYRE, L.; MAK, K.; FAM, A. Flexural and axial behaviour of sandwich panels with bio-based flax fibre-reinforced polymer skins and various foam core densities. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 20, p. 595-616, 2018.

CRIVELLI, D.; GUAGLIANO, M.; EATON, M.; PEARSON, M.; AL-JUMAILI, S.; HOLFORD, K.; PULLIN, R. Localisation and identification of fatigue matrix cracking and delamination in a carbon fibre panel by acoustic emission. **Composites: Part B**, v. 74, p. 1-12, 2015.

DEZFOULI, M. M. S.; HASSAN, M. R.; RUSLAN, M. H.; MAT, S.; BAKHTYAR, B. Experimental and Theoretical Investigations of the Impact Localization of a Passive Smart Composite Plate Fabricated Using Piezoelectric Materials. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2013, p. 1-12, 2013.

DUCHENE, P.; CHAKI, S.; AYADI, A.; KRAWCZAK, P. A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. **Journal of Materials Science**, v. 53, p. 7915-7938, 2018.

EKREM, M.; AVCI, A. Effects of polyvinyl alcohol nanofiber mats on the adhesion strength and fracture toughness of epoxy adhesive joints. **Composites: Part b**, v. 138, p. 256-264, 2018.

EL-BAKY, M. A. A.; ATTIA, M. A. Experimental study on the improvement of mechanical properties of GLARE using nanofillers. **Polymer Composites**, v. 41, p. 4130–4143, 2020.

FALAHATI, M.; AHMADVAND, P.; SAFAEE, S.; CHANG, Y.-C.; LIU, Z.; CHEN, R.; LI, L., LIN, Y. Smart polymers and nanocomposites for 3D and 4D printing. **Materials Today**, in press, 2020.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. **Advanced Drug Delivery Reviews**, v. 107, p. 367-392, 2016.

FERREIRA, B. T. **Compósitos híbridos reforçados com fibras de sisal/vidro e micropartículas de sílica**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2017.

FIBOREK, P.; MALINOWSKI, P. H.; KUDELA, P.; WANDOWSKI, T.; OSTACHOWICZ, W. M. Time-domain spectral element method for modelling of the electromechanical impedance of disbanded composites. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 29, n. 16, p. 3214 - 3221, 2018.

FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. **Teoria e Projeto para Medições Mecânicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GAFFORELLI, G.; ARDITO, R.; CORIGLIANO, A. Improved one-dimensional model of piezoelectric laminates for energy harvesters including three dimensional effects. **Composite Structures**, v. 127, p. 369-381, 2015.

GALEJA, M.; HEJNA, A.; KOSMELA, P.; KULAWIK, A. Static and Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed ABS as a Function of Raster Angle. **Materials**, v. 13, 2020.

GHANDRIZ, R.; HART, K.; LI, J. Extended finite element method (XFEM) modeling of fracture in additively manufactured polymers. **Additive Manufacturing**, v. 31, p. 100945, 2020.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GARCÍA-GONZÁLEZ, D.; RODRÍGUEZ-MILLÁN, M.; VAZ-ROMERO, A.; ARIAS, A. High impact velocity on multi-layered composite of polyether ether ketone and aluminium. **Composites Interfaces**, v. 22, n. 8, p. 705-715, 2015.

GIBSON, I.; ROSEN D.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2. Ed. Nova York: Springer, 2015.

GOMEZ-GRAS, G.; JEREZ-MESA, R.; TRAVIESO-RODRIGUEZ, J. A.; LLUMAFUENTES. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. **Materials and Design**, v. 140, p. 278-285, 2018.

GONZALEZ-CANCHE, N. G.; FLORES-JOHNSON, E. A.; CORTES, P.; CARRILLO, J. G. Evaluation of surface treatments on 5052-H32 aluminum alloy for enhancing the interfacial adhesion of thermoplastic-based fiber metal laminates. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 82, p. 90-99, 2018.

GRINBERG, D.; SIDDIQUE, S. LE, M-Q.; LIANG, R.; CAPSAL, J-F.; COTTINET, P-J. 4D Printing Based Piezoelectric Composite for Medical Applications. **Journal of Polymer Science**, v. 57, pp. 109-115, 2019.

GU, G. X.; TAKAFFOLI, M.; BUEHLER, M. J. Hierarchically Enhanced Impact Resistance of Bioinspired Composites. **Advanced Materials**, v. 29, p. 1700060, 2017.

GUILD, F. J.; VRELLOS, N.; DRINKWATER, B. W.; BALHI, N.; OGIN, S. L.; SMITH, P. A. Intra-laminar cracking in CFRP laminates: observations and modelling. **Journal of Materials Science**, v. 41, pp. 6599-6609, 2006.

GUYOMAR, D.; LALLART, M.; MONNIER, T.; WANG, W.; PETIT, L. Passive impact location estimation using piezoelectric sensors. **Structural Health Monitoring**, v. 8, n. 5, p. 357-367, 2009.

HEIMBS, S.; BERGMANN, T.; SCHUELER, D.; TOSO-PENTECÔTE, N. High velocity impact on preloaded composite plates. **Composite Structures**, v. 111, p. 158–168, 2014.

HUNTSMAN. Araldite® LY 1553 / Aradur® 943 / HY 951 / 956. 2014. Disponível em: <https://www.maxepoxi.com.br/pdf/renlam_ly1553_ad943_ad951_ad956.pdf>. Acesso em 05 fev. 2020.

ISO 179-1. **Plastics – Determination of Charpy impact properties**, International Organization for Standardization, 2001.

IVAÑEZ, I.; SÁNCHEZ-SAEZ, S.; GARCIA-CASTILLO, S.K.; BARBERO, E.; AMARO, A. REIS, P. N.B. High-velocity impact behaviour of damaged sandwich plates with agglomerated cork core. **Composite Structures**, v. 248, p. 112520, 2020.

JÁLON, E.; HOANG, T.; RUBIO-LÓPEZ, A.; SANTIUSTE, C. Analysis of low-velocity impact on flax/PLA composites using a strain rate sensitive model. **Composite Structures**, v. 202, p. 511-517, 2018.

JAOUA, N.; DUFLOS, E.; VANHEEGHE, P.; CLAVIER, L.; SEPTIER, F. Joint estimation of state and noise parameters in a linear dynamic system with impulsive measurement noise: Application to OFDM. **Digital Signal Processing**, v. 35, p. 21-26, 2014.

JOSEPH, A.; MAHESH, V.; MAHESH, V. Effect of loading rates on the in-plane compressive properties of additively manufactured ABS and PLA-based hexagonal *honeycomb* structures. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, p. 1-22, 2021.

JUNG, K-C.; CHANG, S-H. Performance evaluation of smart grid fabrics comprising carbon dry fabrics and PVDF ribbon sensors for structural health monitoring. **Composites: Part B**, v. 163, p. 690-701, 2019.

JUSTO, J. M. C. F. **Estudo do comportamento ao impacto de alta velocidade de estruturas em materiais compósitos**. 1996. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1996.

KABOGLU, C.; MOHAGHEGHIAN, I.; ZHOU, J.; GUAN, Z.; CANTWELL, W.; JOHN, S.; BALCMAN, B. R. K.; KINLOCH, A. J.; DEAR, J. P. High-velocity impact deformation and perforation of fibre metal laminates. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 6, p. 4209-4228, 2018.

KALSOOM, U.; NESTERENKO, P. N.; PAULL, B. Recent developments in 3D printable composite materials. **RSC Advances**, v. 6, p. 60355, 2016.

KAZEMI-KHASRAGH, E.; BAHARI-SAMBRAN, F.; HOSSEIN SIADATI, M.; ESLAMI-FARSANI, R. High Velocity Impact Response of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Graphene Nanoplatelets. **Fibers and Polymers**, v.19, p. 2388-2393, 2018.

KHURRAM, A. A.; HUSSAIN, R.; AFZAL, H.; AKRAM, A.; SUBHANNI, T. Carbon nanotubes for enhanced interface of fiber metal laminate. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 86, p. 29-34, 2018.

KIM, H.; TORRES, F. WU, Y.; VILLAGRAN, D.; LIN, Y.; TSENG, T.-L. Integrated 3D printing and corona poling process of PVDF piezoelectric films for pressure sensor application. **Smart Materials and Structures**, v. 26, p. 085027, 2017.

KSHAD, M. A. E.; POPINIGIS, C.; NAGUIB, H. E. 3D printing of Ron-Resch-like origami cores for compression and impact load damping. **Smart Materials and Structures**, v. 28, p. 015027, 2019.

KUPFER, V. L.; JAERGER, S.; WYPYCH, F. Nanocompósitos de poli(álcool vinílico) contendo materiais híbridos mimetizando o pigmento Azul Maya. **Polímeros**, v. 25, p. 77-88, 2015.

KWOK, S. W.; GOH, K. H. H.; TAN, Z. D.; TAN, S. T. M.; TJIU, W. W. SOH, J. Y.; NG, Z. J. G. CHAN, Y. Z.; HUI, H. K.; GOH, K. E. J. Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. **Applied Materials Today**, v. 9, p. 167-175, 2017.

LANZOTTI, A.; GRASSO, M.; STAIANO, G.; MARTORELLI, M. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. **Rapid Prototyping Journal**, v. 21, n. 5, p. 604-617, 2015.

LEE, I. T.; SHI, Y.; AFSAR, A. M.; OCHI, Y.; BAE, S. I.; SONG, J. I. Low Velocity Impact Behavior of Aluminum *Honeycomb* Structures. **Advanced Composite Materials**, v. 19, p. 19-39, 2010.

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

LEMAITRE, J.; DESMORAT, R. **Engineering Damage Mechanics**. Paris: Springer, 2010.

LI, D.; GAO, R.; DONG, L.; LAM, W-K.; ZHANG, F. A novel 3D re-entrant unit cell structure with negative Poisson's ratio and tunable stiffness. **Smart Materials and Structures**, v. 29, p. 045015, 2020.

LI, T.; CHEN, Y.; HU, X.; LI, Y.; WANG, L. Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. **Materials & Design**, v. 142, p. 247-258, 2018.

LI, Y.; LIAO, Y.; SU, Z. Graphene-functionalized polymer composites for self-sensing of ultrasonic waves: An initiative towards “sensor-free” structural health monitoring. **Composites Science and Technology**, v. 168, p. 203-213, 2018.

LI, Z.; HAIGH, A.; SOUTIS, C.; GIBSON, A. Principles and Applications of Microwave Testing for Woven and Non-Woven Carbon Fibre-Reinforced Polymer Composites: a Topical Review. **Applied Composite Materials**, v. 25, p. 965-982, 2018.

LIANG, S.; GUILLAUMAT, L.; GNING, P-B. Impact behaviour of flax/epoxy composite plates. **International Journal of Impact Engineering**, v. 80, p. 56-64, 2015

LIBONATI, F.; BUEHLER, M. J. Advanced Structural Materials by Bioinspiration. **Advanced Engineering Materials**, v. 19, n. 5, p. 1600787, 2017.

LIU, J.; LIU, H.; KABOGLU, C.; KONG, X.; DING, Y.; CHAI, H.; BLACKMAN, B. R. K.; KINLOCH, A.; DEAR, J. P. The Impact Performance of Woven-Fabric Thermoplastic and Thermoset Composites Subjected to High-Velocity Soft- and Hard-Impact Loading. **Applied Composite Materials**, v. 26, p. 1389-1410, 2019.

LIU, M.; ZENG, Z.; XU, H.; LIAO, Y.; ZHOU, L.; ZHANG, Z.; SU, Z. Applications of a nanocomposite-inspired in-situ broadband ultrasonic sensor to acousto-ultrasonics-based passive and active structural health monitoring. **Ultrasonics**, v. 78, p. 166-174, 2017.

LIU, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, F.; LAN, X.; LENG, J.; LIU, S.; JIA, X.; COTTON, C.; SUN, B.; GU, B.; CHOU, T-S. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed laminated Miura-origami structures subjected to compressive loading. **Composites: Part B**, v. 153, p. 233-242, 2018.

LOKENS GARD, E. **Plásticos Industriais: teoria e aplicações**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

MA, M.; YAO, W.; JIANG, W.; JIN, W.; CHEN, Y.; LI, P. Fatigue Behavior of Composite Sandwich Panels Under Three Point Bending Load. **Polymer Testing**, v. 91, p. 106795, 2020.

MALEKI, H. N.; CHAKHERLOU, T. N. A new method for repairing aircraft structures containing aluminum alloy 2024-T3 using a combination of composite patch and bolt clamping. **Journal of Composite Materials**, v. 52, p. 4203–4218, 2018.

MALINGAM, S. D.; FENG, N. L.; KHOON, L. C.; SHEIKH, S. H.; FADZULLAH, M.; MUSTAFA, Z.; SUBRAMONIAN, S. The Influences of Fibre Parameters on the Tensile and Flexural Response of Lightweight Thermoplastic Kenaf Fibre Reinforced Metal Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 17, p. 966-978, 2020.

MARTINS, J. F. R. **Estudo do efeito do tipo de preenchimento no comportamento mecânico de peças fabricadas por Fused Deposition Modelling usando o compósito PLA-fibra de carbono**. 2021, 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal do Paraná, 2021

MASMOUDI, S.; MAHI, A. E.; TURKI, S. Use of piezoelectric as acoustic emission sensor for in situ monitoring of composite structures. **Composites: Part B**, v. 80, p. 307-320, 2015.

MAZZANTI, V.; MALAGUTTI, L.; MOLLICA, F. FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. **Polymers**, v. 11, p. 1094, 2019.

MEDEIROS, R.; VANDEPITTE, D.; TITA, V. Structural health monitoring for impact damaged composite: a new methodology based on a combination of techniques. **Structural Health Monitoring**, v. 17, p. 185-200, 2018.

MELO, A. B. L.; PAIVA, L. F. L.; DOS SANTOS, J. C.; DA SILVA, L. J.; PANZERA, T. H.; FREIRE, R. T. S. A Statistical Analysis of Epoxy Polymer Reinforced with Micro Ceramic Particles. **Journal of Research Updates in Polymer Science**, v. 5, p. 108-133, 2016.

MEMMOLO, V.; MONACO, E.; BOFFA, N. D.; MAIO, L.; RICCI, F. Guided wave propagation and scattering for structural health monitoring of stiffened composites. **Composite Structures**, v. 184, p. 568-580, 2018.

MITRA, N.; PATRA, A.; MONDAL, S.; DATTA, P. K. Interfacial delamination crack profile estimation in polymer foam-cored sandwich composites. **Engineering Structures**, v. 189, p. 635-643, 2019.

MOALLEMZADEH, A. R.; SABET, A. R.; ABEDINI, H. Mechanical and morphological study of polymer composite plates having different fiber surface treatments with particular response to high velocity projectile impact. **Iranian Polymer Journal**, v. 26, p. 229-238, 2017.

MORADA, G.; VADEAN, A.; BOUKHILI, R. Failure mechanisms of a sandwich beam with an ATH/epoxy core under static and dynamic three-point bending. **Composite Structures**, v. 176, p. 281-293, 2017.

MUC, A.; BARSKI, M.; CHWAL, M.; ROMANOWICZ, P.; STAWIARSKI, A. Fatigue damage growth monitoring for composite structures with holes. **Composite Structures**, v. 189, p. 117-126, 2018.

MUNZKE, D.; KRAUS, D.; EISERMANN, R.; KÜBLER, S.; SCHUKAR, M.; NAGEL, L.; HICKMANN, S.; TRAPPE, V. Distributed fiber-optic strain sensing with millimeter spatial resolution for the structural health monitoring of multiaxial loaded GFRP tube specimens. **Polymer Testing**, v. 80, p. 106085, 2019.

ODESSA, I.; FROSTIG, Y.; RABINOVITCH, O. Dynamic interfacial debonding in sandwich panels. **Composites: part B**, v. 185, p. 107733, 2020.

OLSSON, R. Closed form prediction of peak load and delamination onset under small mass impact. **Composites Structures**, v. 59, p. 341–349, 2003.

OLIVEIRA, P. R. **Investigação das propriedades físico-mecânicas de painéis estruturais constituídos de alumínio e resíduos poliméricos termoplásticos**. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2018.

OLIVEIRA, P. R.; SANTOS, J. C.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; FERREIRA, B. T.; PANZERA, T. H.; SCARPA, F. Eco-friendly Sandwich Panel Based on Recycled Bottle Caps Core and Natural Fibre Composite Facings. **Fibers and Polymers**, v. 12, p. 1798-1807, 2020.

OLIVEIRA, P. R.; MAY, M.; PANZERA, T. H.; SCARPA, F.; HIEMAIER, S. Reinforced biobased adhesive for eco-friendly sandwich panels. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 98, p. 102550, 2020.

ORIGIN. **Smoothing**. 2020, Disponível em: <https://www.originlab.com/doc/Origin-Help/Smoothing>. Acesso em: 27 Nov. 2020.

ÖZEN, I.; ÇAVA, K.; GEDIKLI, H.; ALVER, Ü.; ASLAN, M. Low-energy impact response of composite sandwich panels with thermoplastic *honeycomb* and reentrant cores. **Thin-Walled Structures**, v. 156, p. 106989, 2020.

PACZOS, P.; WICHNIAREK, R.; MAGNUCKI, K. Three-point bending of sandwich beam with special structure of the core. **Composite Structures**, v. 201, p. 676-682, 2018.

PANDA, B.; LEITE, M.; BISWAL, B. B.; NIU, X.; GARG, A. Experimental and numerical modelling of mechanical properties of 3D printed *honeycomb* structures. **Measurement**, v. 116, p. 495-506, 2018.

PLAGIANAKOS, T. S.; PAPADOPOULOS, E. G. Low-energy impact response of composite and sandwich composite plates with piezoelectric sensory layers. **International Journal of Solids and Structures**, v. 51, p. 2713-2727, 2014.

QAISER, H.; UMAR, S.; NASIR, A.; SHAH, M.; NAUMAN, S. Optimization of interlaminar shear strength behavior of anodized and unanodized ARALL composites fabricated through VARTM process. **International Journal of Material Forming**, v. 8, p. 481-493, 2015.

QI, C.; JIANG, F.; YANG, S.; Advanced *honeycomb* designs for improving mechanical properties: A review. **Composites: Part B**, v. 227, p. 109393, 2021.

QIAN, S.; QIN, L.; HE, J.; ZHANG, N.; QIAN, J.; MU, J.; GENG, W.; HOU, X.; CHOU, X. A lead-free stretchable piezoelectric composite for human motion monitoring. **Materials Letters**, v. 261, p. 127119, 2020.

QUARESIMIN, M.; RICOTTA, M.; MARTELLO, L.; MIAN, S. Energy absorption in composite laminates under impact loading. **Composites: Part B**, v. 44, p. 133-140, 2013.

RAHMAN, A.S.; MATHUR, V.; ASMATULU, R. Effect of nanoclay and graphene inclusions on the low-velocity impact resistance of Kevlar-epoxy laminated composites. **Composites Structures**, v. 187, p. 481-488, 2018.

RAJPUT, M. S.; BURMAN, M.; SEGALINI, A.; HALLSTRÖM, S. Design and evaluation of a novel instrumented drop-weight rig for controlled impact testing of polymer composites. **Polymer Testing**, v. 68, p. 446-455, 2018.

RAMOS, C. A. X. **Materiais compósitos inteligentes**. 2006. 324 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2006.

RAZZINI, A. H. **Localização de impactos em materiais compósitos**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2017.

REBELO, H. B.; LECOMPTE, D.; CISMASIU, C.; JONET, A.; BELKASSEM, B.; MAAZOUN, A. Experimental and numerical investigation on 3D printed PLA sacrificial *honeycomb* cladding. **International Journal of Impact Engineering**, v. 131, p. 162-173, 2019.

RIBEIRO JUNIOR, A. H.; GOMEZ, J. E.; HALE, D. W.; TONATTO, M. L. P.; PANZERA, T. H.; THOMAS, C.; SCARPA, F. Evaluation of the stiffening mechanism based on micro-sized particle inclusions in laminated composites. **Materials Research**, v. 22, 2019.

RICHARDSON, M. O. W.; WISHEART, M. J. Review of low-velocity impact properties of composite materials. **Composites: Part A**, v. 27, p. 1123-1131, 1996.

RIVERA, P. F.; MAGALHÃES, F. C.; MORENO, A.; CAMPOS RUBIO, J. Assessment of the Highest Stress Concentration Area Generated on the Mandibular Structure Using Meshless Finite Elements Analysis. **Bioengineering**, v. 7, p. 142, 2020.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. 2003. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

- RONG, Y.; LIU, J.; LUO, W.; HE, W. Effects of geometric configurations of corrugated cores on the local impact and planar compression of sandwich panels. **Composites: Part B**, v. 152, p. 3234-335, 2018.
- SAFRI, S. N. A.; SULTAN, M. T. H.; JAWAID, M.; JAYAKRISHNA, K. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. **Composites: Part B**, v. 133, p. 112-121, 2018.
- SALOM, C.; PROLONGO, M. G.; TORIBIO, A.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, A. J.; DE CÁRCER, A. Mechanical properties and adhesive behavior of epoxy-graphene nanocomposites. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 84, p. 119-125, 2018.
- SAMYKANO, M.; SELVAMANI, S. K.; KADIRGAMA, K.; NGUI, W. G.; KANAGARAJ, G.; SUDHAKAR, K. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, p. 2779-2796, 2019.
- SARVESTANI, H. Y.; AKBARZADEH, A. H.; NIKNAM, H.; HERMENEAM, K. 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. **Composite Structures**, v. 200, p. 886-909, 2018a.
- SARVESTANI, H. Y.; AKBARZADEH, A. H.; MIRBOLGHASEMI, A.; HERMENEAN, K. 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. **Materials and Design**, v. 160, p. 179-193, 2018b.
- SAPPATI, K. K.; BHADRA, S. Piezoelectric Polymer and Paper Substrates: A Review. **Sensors**, v. 18, p. 3605, 2018.
- SELVA, P.; CHERRIER, O.; BUDINGER, V.; LACHAUD, F.; MORLIER, J. Smart monitoring of aeronautical composites plates based on electromechanical impedance measurements and artificial neural networks. **Engineering Structures**, v. 56, p. 794-804, 2013.
- SHI, J-X.; NATSUKI, T.; LEI, X-W.; NI, Q-Q. Wave propagation in the filament-wound composite pipes conveying fluid: Theoretical analysis for structural health monitoring applications. **Composites Science and Technology**, v. 98, p. 9-14, 2014.
- SILVA, R. A. **Processamento e caracterização de compósitos híbridos fibra/metal**. 2006. 285f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 2006.
- SINHA, D. Wireless actuation of piezoelectric coupled micromembrane using radio frequency magnetic field for biomedical applications. **Journal of Applied Physics**, v. 121, p. 134501, 2017.
- SOMIREDDY, M.; CZEKANSKI, A.; SINGH, C. V. Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM. **Materials Today Communications**, v. 15, p. 143-152, 2018.
- SORIANO, H. L. **Elementos finitos: formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

SOYDAN, A. M.; TUNABOYLU, B.; ELSABAGH, A. G.; SARI, A. K.; AKDENIZ, R. Simulation and Experimental Tests of Ballistic Impact on Composite Laminate Armor. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2018, 2018.

STAWIARSKI, A. The nondestructive evaluation of the GFRP composite plate with an elliptical hole under fatigue loading conditions. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 112, p. 31-43, 2018.

SU, S.; KOPITZKY, R.; TOLGA, S.; KABASCI, S. Polylactide (PLA) and Its Blends with Poly(butylene succinate) (PBS): A Brief Review. **Polymers**, v. 11, p. 1193, 2019.

SURJADI, J. U.; GAO, L. DU, H.; LI, X.; XIONG, X.; FANG, N. X.; LU, Y. Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications. **Advanced Engineering Materials**, v. 21, p. 1800864, 2019.

SUVOROV, A. P.; DVORAK, G. J. Dynamic Response of Sandwich Plates of Medium-velocity Impact. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 7, p. 395-412, 2005.

TALLMAN, T.N.; GUNGOR, S.; WANG, K.W.; BAKIS, C.E. Damage detection and conductivity evolution in carbon nanofiber epoxy via electrical impedance tomography. **Smart Materials and Structures**, v. 23, 2014.

TAMBURRANO, A.; SARASINI, F.; DE BELLIS, G.; ALOIA, A. G. D.; SARTO, M. S. The piezoresistive effect in graphene-based polymeric composites. **Nanotechnology**, v. 24, 2013.

TIRILLÒ, J.; FERRANTE, L.; SARASINI, F.; LAMAPANI, L.; BARBERO, E.; SÁNCHEZ-SÁEZ, S.; VALENTE, T.; GAUDENZI, P. High velocity impact behaviour of hybrid basalt-carbon/epoxy composites. **Composite Structures**, v. 168, p. 305-212, 2017.

TRIPATHI, G.; ANOWARUL, H.; AGARWAL, K.; PRASAD, D. K. Classification of Micro-Damage in Piezoelectric Ceramics Using Machine Learning of Ultrasound Signals. **Sensors**, v. 19, p. 4216, 2019.

TRUCZKIEWICZ, E.; THALHAMER, A.; ROSSEGGER, M.; VETTER, M.; MEIER, G.; ROSSEGGER, E.; FUCHS, P.; SCHLÖGL, S.; BERER, M. Mechanical behavior of 3D-printed polymeric metamaterials for lightweight applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 139, p. 51618, 2021.

TSOGKA, C.; DASKALAKIS, E.; COMANDUCCI, G.; UBERTINI, F. The Stretching Method for Vibration-Based Structural Health Monitoring of Civil Structures. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 32, p. 288-303, 2017.

TSOUKNIDAS, A.; PANTAZOPOULOS, M.; KATSOUKIS, I.; FASNAKIS, D.; MAROPOULOS, S.; MICHAILIDIS, N. Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling. **Materials and Design**, v. 102, p. 41-44, 2016.

TULOUP, C.; HARIZI, W.; ABOURA, Z.; MEYER, Y.; KHELLIL, K.; LACHAT, R. On the use of in-situ piezoelectric sensors for the manufacturing and structural health monitoring of polymer-matrix composites: A literature review. **Composite Structures**, v. 215, p. 127-149, 2019.

URIBE, B. E. B. **Desenvolvimento e caracterização de laminados compósitos hierárquicos epóxi-carbono e epóxi-vidro contendo nanocelulose interfacial**. 2017. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

VALVONA, F.; TOTI, J.; GATTULLI, V.; POTENZA, F. Effective seismic strengthening and monitoring of a masonry vault by using Glass Fiber Reinforced Cementitious Matrix with embedded Fiber Bragg Grating sensors. **Composites: Part B**, v. 113, p. 355-370, 2017.

VATLIN, I. S.; CHERNOZEM, R. V.; TIMIN, A. S.; CHERNOVA, A. P.; PLOTNIKOV, E. V.; MUKHORTOVA, Y. R.; SURMENEVA, M. A.; SURMENEV, R. A. Bacteriostatic Effect of Piezoelectric Poly-3-Hydroxybutyrate and Polyvinylidene Fluoride Polymer Films under Ultrasound Treatment. **Polymers**, v. 12, p. 1-7, 2020.

VIEIRA, L. M. G. **Desenvolvimento e caracterização das propriedades de laminados metal/fibra**. 2018. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

VILLANI, D. **Desenvolvimento de um simulador antropomórfico de pescoço-tireoide tecido-equivalente impresso em 3D para aplicações multidisciplinares**. 2021. 103 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2021.

WAGNER, T.; HEIMBS, S.; FRANKE, F.; BURGER, U.; MIDDENDORF, P. Experimental and numerical assessment of aerospace grade composites based on high-velocity impact experiments. **Composite Structures**, v. 204, p. 142-152, 2018.

WANG, H.; RAMAKRISHNAN, K. R.; SHANKAR, K. Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores. **Materials and Design**, v. 99, p. 68-82, 2016.

WANG, H.; ZHANG, Y.; LIN, W.; QIN, Q-H. A novel two-dimensional mechanical metamaterial with negative Poisson's ratio. **Computational Materials Science**, v. 171, p. 109232, 2020.

WANG, X.; JIANG, M.; ZHOU, Z.; GOU, J.; HUI, D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. **Composites: part B**, v. 110, p. 442-458, 2017.

WANG, Y.; QIU, L.; LUO, Y.; DING, R.; JIANG, F. A piezoelectric sensor network with shared signal transmission wires for structural health monitoring of aircraft smart skin. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 141, p. 106730, 2020.

WANG, Y.; CHEN, X.; YOUNG, R.; KINLOCH, I.; WELLS, G. A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels. **Composites: part B**, v. 68, p. 259-265, 2015.

WANG, Z.; LI, Z.; ZHOU, W.; HUI, D. On the influence of structural defects for *honeycomb* structure. **Composites: part B**, v. 142, p. 183-192, 2018.

WANG, Z.; WANG, X.; LIU, K.; ZHANG, J.; LU, Z. Crashworthiness index of *honeycomb* sandwich structures under low-speed oblique impact. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 208, p. 106683, 2021.

WICKELER, A. L.; NAGUIB, H. E. Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling. **Materials and Design**, v. 186, p. 108242, 2020.

WU, J.-J.; HUANG, L.-M.; ZHAO, Q.; XIE, T. 4D Printing: History and Recent Progress. **Chinese Journal of Polymer Science**, v. 36, p. 563-575, 2018.

WU, W.; HU, W.; QIAN, G.; LIAO, H.; XU, X.; BERTO, F. Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. **Materials and Design**, v. 180, p. 107950, 2019.

XIE, W.; ZHANG, W.; KUANG, N.; LI, D.; HUANG, W.; GAO, Y.; YE, N.; GUO, L.; REN, P. Experimental investigation of normal and oblique impacts on CFRPs by high velocity steel sphere. **Composites: part B**, v. 99, p. 483-492, 2016.

XIE, S.; JING, K.; ZHOU, H.; LIU, X. Mechanical properties of Nomex *honeycomb* sandwich panels under dynamic impact. **Composite Structures**, v. 235, p. 111814, 2020.

XIN, Y.; YAN, H.; CHENG, S.; LI, H. Drop weight impact tests on composite sandwich panel of aluminum foam and epoxy resin. **Mechanics of Advanced Materials and Structures**, 2019.

XIONG, J.; DU, Y.; MOUSANEZHAD, D.; ASL, M. E.; NORATO, J.; VAZIRI, A. Sandwich Structures with Prismatic and Foam Cores: a review. **Advanced Engineering Materials**, v. 21, p. 1800036, 2019.

YAN, L.; ZHU, K.; CHEN, N. ZHENG, X.; QUARESIMIN, M. Energy-absorption characteristics of tube-reinforced absorbent *honeycomb* sandwich structure. **Composite Structures**, v. 255, p. 112946, 2021.

YANG, H.; JI, F.; LI, Z.; TAO, S. Preparation of Hydrophobic Surface on PLA and ABS by Fused Deposition Modeling. **Polymers**, v. 12, p. 1539, 2020.

YANG, L.; HARRYSON, O.; WEST, H.; CORMIER, D. Mechanical properties of 3D re-entrant *honeycomb* auxetic structures realized via additive manufacturing. **International Journal of Solids and Structures**, v. 69-70, p. 475-490, 2015.

YANG, L.; LI, S.; ZHOU, X.; LIU, J.; LI, Y. YANG, M.; YUAN, Q.; ZHANG, W. Effects of carbon nanotube on the thermal, mechanical, and electrical properties of PLA/CNT printed parts in the FDM process. **Synthetic Metals**, v. 253, p. 122-130, 2019.

YAO, T.; YE, J.; DENG, Z.; ZHANG, K.; MA, Y.; OUYANG, H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. **Composites: part B**, v. 188, p. 107894, 2020.

YASHIRO, S.; OGI, K.; NAJAMURA, T.; YOSHIMURA, A. Characterization of high-velocity impact damage in CFRP laminates: Part I – Experiment. **Composites: part A**, v. 48, p. 93-100, 2013.

YE, J.; CAI, H.; WANG, Y.; JING, Y.; SHI, B.; QIU, Y.; CHEN, X. Effective mechanical properties of piezoelectric–piezomagnetic hybrid smart composites. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 29, p. 1711-1723, 2018.

ZAHARIA, S.M.; ENESCU, L. A.; POP, M. A. Mechanical Performances of Lightweight Sandwich Structures Produced by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing. **Polymers**, v. 12, p. 1740, 2020.

ZENKERT, D. **The Handbook of Sandwich Construction**. 1 ed. 1997.

ZHANG, C.; CURIEL-SOSA, J. L.; DUODU, E. A. Finite element analysis of the damage mechanism of 3D braided composites under high-velocity impact. **Journal of Materials Science**, v. 52, p. 4658-4674, 2017.

ZHU, S.; CHAI, G. B. Low-velocity impact response of fibre–metal laminates – Experimental and finite element analysis. **Composites Science and Technology**, v. 72, p. 1793-1802, 2012.

APÊNDICE A – TABELAS COM OS VALORES OBTIDOS NOS TESTES MECÂNICOS DO ESTUDO

- Ensaio de tração da liga de alumínio 2024-T3

Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Limite de escoamento (MPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)
I	1	45,07	283,10	441,78	7,33%
	2	44,70	290,47	459,43	8,02%
	3	44,61	272,31	432,31	7,85%
	4	45,23	297,09	462,01	7,71%
	5	45,61	275,56	412,77	5,74%
II (Réplica)	6	43,30	262,48	376,66	7,24%
	7	43,73	287,05	461,43	8,33%
	8	44,61	264,92	408,12	6,80%
	9	45,81	292,99	422,40	5,49%
	10	44,80	290,15	457,14	8,34%
Média		44,75	281,61	433,40	7,29%
Desvio-padrão		0,77	12,11	28,52	1,01%
Coefficiente de variação (%)		2%	4%	7%	14%

- Ensaio de tração e flexão do epóxi

Ensaio de tração - Epóxi				
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)
I	1	1,99	40,78	3,31%
	2	1,60	35,79	3,24%
	3	1,64	38,05	3,97%
	4	2,05	43,78	3,46%
	5	1,41	31,57	3,53%
II (Réplica)	6	1,49	35,74	3,53%
	7	1,59	37,89	3,86%
	8	1,62	35,61	3,53%
	9	1,72	35,70	3,60%
	10	1,99	34,41	2,50%
Média		1,71	36,93	3,45%
Desvio-padrão		0,22	3,41	0,40%
Coefficiente de variação (%)		13%	9%	12%

Ensaio de flexão - Epóxi				
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)
I	1	2,30	82,15	7,11
	2	2,22	75,11	6,07
	3	2,46	77,77	5,85
	4	2,19	73,87	5,04
	5	2,28	63,58	6,02
II (Réplica)	6	2,04	77,35	6,22
	7	2,09	80,08	7,19
	8	1,78	69,43	6,13
	9	2,12	76,48	6,69
	10	2,46	74,86	7,22
Média		2,19	75,07	6,35
Desvio-padrão		0,20	5,32	0,70
Coefficiente de variação (%)		9%	7%	11%

- Ensaio de tração do PLA e do ABS

Corpos de prova de PLA					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)	Massa (g)
I	1	2,60	58,22	2,60%	14,7
	2	2,76	54,53	3,10%	14,3
	3	2,74	54,24	2,83%	14,0
	4	2,58	56,31	2,71%	14,5
	5	2,52	56,87	3,93%	14,4
II (Réplica)	6	2,99	56,06	2,91%	14,6
	7	2,91	56,94	2,70%	14,7
	8	2,80	56,00	3,16%	14,7
	9	2,89	56,55	2,93%	14,7
	10	2,62	55,62	3,39%	14,7
Média		2,74	56,13	3,03%	14,52
Desvio-padrão		0,16	1,16	0,40%	0,23
Coefficiente de variação (%)		6%	2%	13%	2%

Corpos de prova de ABS					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)	Massa (g)
I	1	1,63	30,54	4,59%	11,3
	2	1,41	29,41	4,84%	10,9
	3	1,63	32,84	5,13%	11,4
	4	1,57	29,27	4,62%	11,1
	5	1,64	29,48	4,11%	10,9
II (Réplica)	6	1,58	30,95	4,33%	11,3
	7	1,59	29,99	4,51%	11,2
	8	1,63	32,49	4,62%	11,2
	9	1,54	30,91	4,95%	11,1
	10	1,44	29,93	4,63%	11,3
Média		1,57	30,58	4,63%	11,17
Desvio-padrão		0,08	1,25	0,29%	0,17
Coefficiente de variação (%)		5%	4%	6%	2%

- Ensaio de tração dos núcleos poliméricos de PLA impressos em 3D

Núcleo honeycomb hexagonal horizontal (HC_HORIZ)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)	Massa (g)
I	1	3,04	46,76	2,22%	7,7
	2	3,16	52,21	2,43%	7,7
	3	2,98	44,19	2,54%	7,6
	4	2,64	33,60	1,87%	7,3
	5	2,83	44,27	2,64%	7,5
II (Réplica)	6	2,79	47,70	3,07%	7,5
	7	2,58	42,29	2,42%	7,5
	8	2,59	37,32	2,32%	7,3
	9	2,62	41,86	2,79%	7,6
	10	2,41	42,10	2,26%	7,6
Média		2,76	43,23	2,46%	7,54
Desvio-padrão		0,24	5,24	0,33%	0,13
Coefficiente de variação (%)		9%	12%	13%	2%

Núcleo corrugado com células em S (CEL_S)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)	Massa (g)
I	1	2,69	51,07	2,42%	8,0
	2	2,49	51,52	2,39%	7,9
	3	2,32	55,51	3,11%	7,7
	4	2,60	39,01	2,56%	7,6
	5	2,59	41,16	2,38%	7,7
II (Réplica)	6	3,07	42,69	2,16%	7,8
	7	2,83	49,55	2,24%	8,1
	8	2,84	46,99	2,03%	8,2
	9	2,94	47,47	2,23%	8,0
	10	2,50	48,79	2,91%	8,2
Média		2,69	47,38	2,44%	7,92
Desvio-padrão		0,23	5,10	0,34%	0,21
Coefficiente de variação (%)		9%	11%	14%	3%

Núcleo honeycomb hexagonal vertical (HC_VERT)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Tensão máxima na tração (MPa)	Deformação final (%)	Massa (g)
I	1	1,28	14,72	3,33%	7,6
	2	1,38	16,04	2,90%	7,0
	3	1,18	17,87	2,71%	7,4
	4	1,26	15,62	2,80%	7,3
	5	1,39	15,84	2,90%	7,3
II (Réplica)	6	1,15	18,89	3,22%	7,1
	7	1,37	15,22	2,94%	7,0
	8	1,24	17,31	2,23%	7,4
	9	1,32	12,38	2,28%	7,6
	10	1,12	16,68	2,89%	7,5
Média		1,27	16,06	2,82%	7,32
Desvio-padrão		0,10	1,81	0,35%	0,23
Coefficiente de variação (%)		8%	11%	12%	3%

- Ensaio de flexão dos núcleos poliméricos de PLA impressos em 3D

Núcleo sólido de PLA (RASTER45)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Massa (g)
I	1	2,32	74,54	17,78	8,7
	2	2,29	72,74	15,55	8,8
	3	2,38	74,01	14,17	8,8
	4	2,21	72,04	18,24	8,8
	5	2,61	75,04	14,85	9,2
II (Réplica)	6	2,25	74,13	17,20	9,0
	7	2,34	78,44	14,36	8,8
	8	2,17	74,46	24,45	8,7
	9	2,30	77,42	14,79	9,0
	10	2,15	70,15	19,04	8,7
Média		2,30	74,30	17,04	8,85
Desvio-padrão		0,13	2,41	3,13	0,15
Coefficiente de variação (%)		6%	3%	18%	2%

Núcleo honeycomb hexagonal horizontal (HC_HORIZ)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Massa (g)
I	1	2,21	55,63	7,28	5,7
	2	2,01	44,98	8,43	5,7
	3	2,26	38,26	8,71	5,4
	4	2,16	40,91	7,34	5,3
	5	2,35	45,14	8,39	5,5
II (Réplica)	6	1,86	44,86	8,39	5,4
	7	2,16	45,52	8,99	5,7
	8	2,58	47,66	7,86	5,6
	9	2,50	55,17	7,67	5,5
	10	2,18	45,09	7,59	5,5
Média		2,23	46,32	8,07	5,53
Desvio-padrão		0,21	5,46	0,60	0,14
Coefficiente de variação (%)		10%	12%	7%	3%

Núcleo corrugado com células em S (CEL_S)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Massa (g)
I	1	1,97	42,93	9,20	5,5
	2	2,03	45,77	8,87	5,5
	3	1,82	42,43	7,76	5,5
	4	2,08	45,95	8,03	5,6
	5	1,85	42,54	8,37	5,5
II (Réplica)	6	2,01	42,75	9,12	5,4
	7	1,67	40,64	8,81	5,3
	8	1,81	42,12	7,80	5,2
	9	1,91	45,85	7,42	5,3
	10	1,84	43,45	7,56	5,2
Média		1,90	43,44	8,29	5,40
Desvio-padrão		0,12	1,82	0,67	0,14
Coefficiente de variação (%)		7%	4%	8%	3%

Núcleo honeycomb hexagonal vertical (HC_VERT)					
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Massa (g)
I	1	1,79	29,90	7,69	5,4
	2	1,78	32,48	9,10	5,4
	3	1,84	33,29	6,03	5,5
	4	1,69	28,11	8,34	5,4
	5	1,67	28,76	6,85	5,4
II (Réplica)	6	1,65	28,49	7,05	5,4
	7	1,66	27,11	7,44	5,4
	8	1,91	31,00	9,12	5,7
	9	1,65	30,22	8,42	5,4
	10	1,63	28,77	8,12	5,4
Média		1,73	29,81	7,82	5,44
Desvio-padrão		0,10	1,97	1,00	0,10
Coefficiente de variação (%)		6%	7%	13%	2%

- Ensaio de impacto Charpy nos núcleos poliméricos de PLA impressos em 3D

Amostra	Corpo de prova	RASTER45		HC_HORIZ		CEL_S		HC_VERT	
		Massa (g)	Energia absorvida (J)						
I	1	4,28	0,87	3,1	0,61	3,0	0,53	2,9	0,49
	2	4,56	1,02	3,0	0,57	3,2	0,54	3,0	0,43
	3	4,55	0,79	3,1	0,59	3,0	0,57	3,0	0,48
	4	4,53	0,87	3,0	0,51	3,2	0,53	3,0	0,41
	5	4,49	1,02	3,0	0,62	3,1	0,53	2,9	0,42
II (Réplica)	6	4,63	1,02	3,1	0,49	3,2	0,49	3,0	0,36
	7	4,13	0,72	3,1	0,61	3,0	0,54	3,0	0,49
	8	4,08	0,72	2,9	0,57	3,2	0,59	3,0	0,47
	9	4,46	0,87	3,1	0,61	3,2	0,49	3,0	0,46
	10	4,52	1,09	3,1	0,61	2,8	0,54	2,9	0,36
Média		4,42	0,90	3,04	0,58	3,06	0,54	3,01	0,44
Desvio-padrão		0,18	0,13	0,07	0,05	0,12	0,03	0,02	0,05
Coefficiente de variação (%)		4%	14%	2%	8%	4%	6%	1%	12%

- Ensaio de flexão em três pontos dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Painel sanduíche PLAAL com núcleo sólido (PLAAL_RASTER45)

Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	16,76	93,71	2,09	508,07	4,52	21,68
	2	17,20	71,17	2,00	384,78	3,42	20,76
	3	15,07	77,03	1,88	418,96	3,72	22,86
	4	16,31	62,05	1,98	336,87	2,99	22,34
	5	14,22	88,46	1,92	477,89	4,25	21,40
II (Réplica)	6	15,51	76,14	2,10	414,14	3,68	23,87
	7	15,49	71,95	2,25	388,71	3,46	20,65
	8	17,00	81,22	2,13	439,90	3,91	20,83
	9	17,32	59,96	2,34	324,76	2,89	21,50
	10	15,63	72,83	2,23	394,84	3,51	21,23
Média		16,05	75,45	2,09	408,89	3,63	21,71
Desvio-padrão		1,03	10,52	0,15	56,90	0,51	1,03
Coefficiente de variação (%)		6%	14%	7%	14%	14%	5%

**Painel sanduíche PLAAL com núcleo honeycomb hexagonal horizontal
(PLAAL_HC_HORIZ)**

Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	16,17	84,99	4,70	447,67	3,98	16,6
	2	11,55	72,28	5,12	381,91	3,39	16,0
	3	14,39	73,58	5,05	276,97	2,46	15,6
	4	15,56	78,73	5,70	377,45	3,36	16,9
	5	13,66	54,57	6,96	401,83	3,41	16,9
II (Réplica)	6	12,23	59,32	6,58	304,28	3,57	16,6
	7	12,81	77,49	5,06	362,68	3,32	16,2
	8	16,01	70,76	6,32	377,17	3,92	16,1
	9	15,12	62,28	6,12	369,92	3,43	14,8
	10	12,14	67,46	5,51	408,69	3,97	15,3
Média		13,96	70,15	5,71	370,86	3,48	16,10
Desvio-padrão		1,72	9,39	0,75	49,23	0,45	0,68
Coefficiente de variação (%)		12%	13%	13%	13%	13%	4%

Painel sanduíche PLAAL com núcleo com células em S (PLAAL_CEL_S)

Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	13,69	59,21	6,16	323,78	2,33	16,4
	2	14,60	62,28	5,39	402,48	2,72	16,3
	3	13,32	52,98	5,36	274,76	2,88	15,9
	4	12,80	62,49	4,29	323,66	2,44	15,4
	5	15,91	59,75	5,70	309,88	2,28	14,8
II (Réplica)	6	12,75	56,84	3,87	291,57	2,88	16,4
	7	17,09	55,40	5,38	435,37	2,75	14,4
	8	15,51	66,85	5,15	346,52	2,59	16,9
	9	14,01	67,37	4,30	326,91	2,61	15,5
	10	13,57	62,45	4,90	356,23	2,72	16,6
Média		14,32	60,56	5,05	339,12	2,62	15,86
Desvio-padrão		1,44	4,67	0,71	48,88	0,21	0,82
Coefficiente de variação (%)		10%	8%	14%	14%	8%	5%

Painel sanduíche PLAAL com núcleo honeycomb hexagonal vertical (PLAAL_HC_VERT)							
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	16,13	135,19	2,45	591,99	6,25	15,3
	2	16,58	154,43	2,10	702,82	5,56	15,1
	3	19,81	139,51	2,74	800,71	6,44	14,8
	4	16,85	123,42	2,39	696,55	5,69	16,1
	5	20,19	124,82	2,29	640,13	4,54	15,8
II (Réplica)	6	17,97	151,88	2,67	638,21	5,67	16,2
	7	20,66	132,94	2,02	775,23	6,05	15,7
	8	20,22	138,14	2,25	680,84	4,50	15,0
	9	18,99	136,55	2,14	691,94	6,01	15,4
	10	17,97	143,54	2,40	724,05	5,41	15,0
Média		18,54	138,04	2,34	694,25	5,61	15,44
Desvio-padrão		1,67	10,10	0,23	62,87	0,66	0,49
Coefficiente de variação (%)		9%	7%	10%	9%	12%	3%

Painel sanduíche ABSAL com núcleo sólido (ABSAL_RASTER45)							
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	8,27	70,79	1,89	398,83	3,55	18,17
	2	11,03	73,09	2,06	414,29	3,68	19,00
	3	11,13	81,50	1,84	458,30	4,07	18,92
	4	8,76	66,40	1,39	377,67	3,36	19,36
	5	9,98	63,08	1,55	356,28	3,17	18,69
II (Réplica)	6	9,87	74,08	1,57	417,37	3,71	18,09
	7	11,87	70,56	1,68	399,97	3,56	19,70
	8	9,32	83,95	1,65	472,07	4,20	17,90
	9	8,27	63,26	1,73	359,79	3,20	20,26
	10	10,21	88,55	1,88	500,14	4,45	19,24
Média		9,87	73,53	1,72	415,47	3,69	18,93
Desvio-padrão		1,23	8,69	0,20	48,03	0,43	0,75
Coefficiente de variação (%)		13%	12%	11%	12%	12%	4%

**Painel sanduíche ABSAL com núcleo honeycomb hexagonal horizontal
(ABSAL_HC_HORIZ)**

Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	9,49	44,73	2,88	236,36	2,10	14,45
	2	7,72	52,95	2,55	278,42	2,47	14,07
	3	8,49	49,22	2,77	260,69	2,32	15,44
	4	8,22	43,59	2,91	229,12	2,04	14,03
	5	7,92	44,35	1,97	234,63	2,09	14,36
II (Réplica)	6	8,00	60,87	2,34	329,45	2,93	15,08
	7	8,37	44,45	2,20	241,46	2,15	16,43
	8	7,65	47,62	2,62	259,00	2,30	15,34
	9	9,72	61,43	2,89	333,79	2,97	16,13
	10	9,49	44,36	2,59	240,18	2,13	15,65
Média		8,51	49,36	2,57	264,31	2,35	15,10
Desvio-padrão		0,78	6,86	0,32	38,47	0,34	0,85
Coefficiente de variação (%)		9%	14%	12%	15%	15%	6%

Painel sanduíche ABSAL com núcleo com células em S (ABSAL_CEL_S)

Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	7,76	47,24	1,68	247,92	2,20	14,07
	2	6,95	47,92	1,93	252,74	2,17	14,78
	3	7,84	46,24	1,85	244,19	1,91	15,47
	4	6,82	39,08	1,85	205,63	2,00	14,34
	5	8,65	42,94	1,65	226,40	1,86	14,36
II (Réplica)	6	6,41	48,77	2,04	264,05	1,83	14,75
	7	6,72	39,09	1,88	211,72	1,81	15,08
	8	8,09	37,66	1,63	203,97	2,28	14,84
	9	7,55	44,23	1,69	240,42	1,81	15,64
	10	6,55	47,44	1,93	258,55	1,92	16,79
Média		7,33	44,06	1,81	235,56	1,98	15,01
Desvio-padrão		0,75	4,15	0,14	22,19	0,18	0,79
Coefficiente de variação (%)		10%	9%	8%	9%	9%	5%

Painel sanduíche ABSAL com núcleo honeycomb hexagonal vertical (ABSAL_HC_VERT)							
Amostra	Corpo de prova	Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	Resistência à flexão (MPa)	Deslocamento (mm)	Tensão na face (MPa)	Resistência máxima ao cisalhamento no núcleo (MPa)	Massa (g)
I	1	10,43	54,32	1,48	295,10	2,62	14,77
	2	8,26	63,74	1,99	345,92	3,07	14,31
	3	10,61	49,89	1,71	269,53	2,40	14,20
	4	8,00	66,27	1,88	360,22	3,20	14,87
	5	8,43	49,22	1,65	266,86	2,37	14,98
II (Réplica)	6	8,83	45,12	1,77	243,76	2,17	15,14
	7	7,75	61,90	1,75	335,60	2,98	14,41
	8	8,41	60,30	1,37	326,01	2,90	15,27
	9	10,32	49,27	1,49	266,48	2,37	13,54
	10	9,32	54,42	1,43	295,99	2,63	16,07
Média		9,04	55,45	1,65	300,55	2,67	14,76
Desvio-padrão		1,07	7,21	0,20	39,48	0,35	0,69
Coefficiente de variação (%)		12%	13%	12%	13%	13%	5%

- Ensaio de impacto Charpy dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Painéis sanduíches PLAAL									
Amostra	Corpo de prova	PLAAL_RASTER45		PLAAL_HC_HORIZ		PLAAL_CEL_S		PLAAL_HC_VERT	
		Massa (g)	Energia absorvida (J)	Massa (g)	Energia absorvida (J)	Massa (g)	Energia absorvida (J)	Massa (g)	Energia absorvida (J)
I	1	11,42	4,77	7,54	6,45	7,91	5,61	7,56	4,32
	2	10,96	3,87	7,38	4,67	7,86	6,02	7,01	3,87
	3	9,77	6,15	7,56	5,87	8,53	6,28	7,19	4,47
	4	10,23	3,57	8,63	5,03	8,64	5,57	7,51	3,42
	5	9,73	6,00	7,39	5,47	8,80	5,70	7,05	3,86
II (Réplica)	6	9,91	5,25	7,32	7,30	7,65	5,85	7,59	3,42
	7	11,39	4,65	7,69	5,70	7,67	6,40	6,88	4,56
	8	9,72	4,20	8,17	6,75	7,19	5,25	6,59	4,23
	9	10,88	4,92	7,94	6,50	7,59	6,32	7,38	3,76
	10	10,07	4,82	8,04	5,55	8,15	5,30	6,51	3,65
Média		10,41	4,82	7,77	5,93	8,00	5,83	7,13	3,96
Desvio-padrão		0,69	0,83	0,42	0,81	0,52	0,42	0,39	0,42
Coefficiente de variação (%)		7%	17%	5%	14%	7%	7%	5%	11%

Painéis sanduíches ABSAL									
Amostra	Corpo de prova	ABSAL_RASTER45		ABSAL_HC_HORIZ		ABSAL_CEL_S		ABSAL_HC_VERT	
		Massa (g)	Energia absorvida (J)	Massa (g)	Energia absorvida (J)	Massa (g)	Energia absorvida (J)	Massa (g)	Energia absorvida (J)
I	1	9,18	11,50	6,45	8,20	7,73	13,95	6,72	4,32
	2	10,00	9,50	6,77	9,30	7,61	9,75	7,00	4,47
	3	8,59	8,25	6,84	8,70	7,55	12,90	7,22	4,17
	4	9,20	9,70	7,58	7,55	7,80	13,05	7,25	5,52
	5	8,94	8,40	8,57	9,20	7,95	12,75	7,16	4,62
II (Réplica)	6	9,44	10,76	8,03	8,85	7,52	10,95	7,14	4,38
	7	9,67	10,20	7,06	9,95	7,96	14,85	6,08	5,59
	8	9,16	7,85	7,50	7,50	7,71	14,70	5,95	5,45
	9	8,70	9,28	7,09	10,20	8,02	12,15	6,41	5,05
	10	9,11	7,00	7,20	9,90	7,99	12,80	6,01	4,62
Média		9,20	9,24	7,31	8,94	7,78	12,79	6,69	4,82
Desvio-padrão		0,42	1,38	0,63	0,96	0,19	1,58	0,53	0,54
Coefficiente de variação (%)		5%	15%	9%	11%	2%	12%	8%	11%

- Ensaio de impacto balístico dos painéis sanduíches PLAAL e ABSAL

Painéis sanduíches PLAAL								
Condição experimental	Amostra	Corpo de prova	Velocidade de impacto (m/s)	Energia de impacto (J)	Tensão pico-a-pico (V)	Tensão de pico positiva (V)	Tensão de pico negativa (V)	Área absoluta de sinal (V.s)
PLAAL_RASTER45	I	1	15,18	17,8	222	168	54	1,10
	I	2	14,90	17,1	120	88	32	1,54
	I	3	14,99	17,3	128	76	52	1,29
	II	4	15,30	18,0	76	16	60	0,27
	II	5	15,80	19,2	136	88	48	1,25
	II	6	14,95	17,2	140	86	54	0,44
PLAAL_HC_HORIZ	I	1	15,76	19,1	108	76	32	2,35
	I	2	15,50	18,5	232	122	110	2,87
	I	3	15,65	18,9	288	152	136	5,28
	II	4	15,25	17,9	172	104	68	2,50
	II	5	15,42	18,3	94	82	12	2,16
	II	6	15,75	19,0	114	78	36	6,08
PLAAL_CEL_S	I	1	15,85	19,4	264	86	178	8,37
	I	2	15,30	18,0	202	74	128	2,36
	I	3	15,44	18,4	130	66	64	3,06
	II	4	15,29	18,0	290	190	100	2,70
	II	5	15,75	19,1	164	68	96	4,30
	II	6	14,78	16,8	108	94	14	4,18
PLAAL_HC_VERT	I	1	15,04	17,4	214	176	38	0,98
	I	2	15,66	18,9	70	40	30	2,42
	I	3	15,65	18,9	130	92	38	1,05
	II	4	15,82	19,3	222	144	78	1,97
	II	5	15,70	19,0	148	102	46	0,63
	II	6	15,60	18,8	140	114	26	0,88

Painéis sanduíches ABSAL								
Condição experimental	Amostra	Corpo de prova	Velocidade de impacto (m/s)	Energia de impacto (J)	Tensão pico-a-pico (V)	Tensão de pico positiva (V)	Tensão de pico negativa (V)	Área absoluta de sinal (V.s)
ABSAL_RASTER45	I	1	15,01	17,4	152	46	106	2,43
	I	2	14,83	16,9	158	74	84	0,39
	I	3	15,02	17,4	168	86	82	0,73
	II	4	15,67	18,9	112	64	48	1,93
	II	5	15,30	18,0	110	84	26	0,18
	II	6	15,20	17,8	190	62	128	1,35
ABSAL_HC_HORIZ	I	1	14,71	16,7	332	248	74	0,73
	I	2	15,19	17,8	204	54	150	0,64
	I	3	15,53	18,6	224	148	76	0,74
	II	4	15,43	18,3	382	254	128	2,60
	II	5	15,20	17,8	148	70	78	0,87
	II	6	15,10	17,6	216	124	92	0,66
ABSAL_CEL_S	I	1	15,01	17,4	206	134	72	0,58
	I	2	14,58	16,4	182	98	84	2,21
	I	3	15,38	18,2	248	140	108	1,22
	II	4	15,60	18,8	242	122	120	0,70
	II	5	14,90	17,1	100	58	42	1,93
	II	6	15,20	17,8	200	112	88	1,34
ABSAL_HC_VERT	I	1	14,84	17,0	140	90	50	1,71
	I	2	15,63	18,8	116	86	30	0,40
	I	3	15,40	18,3	274	190	84	1,03
	II	4	15,40	18,3	116	100	16	0,64
	II	5	14,80	16,9	84	74	10	1,52
	II	6	15,10	17,6	152	88	64	2,31