

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E GESTÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO, TECNOLOGIAS E
SOCIEDADE

AMANDA DE CÁSSIA TOLEDO ALMEIDA BRAGA

**PROJETO, PROTOTIPAGEM E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE
METAMATERIAIS MECÂNICOS USADOS NO CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE
UM CANOTE DE BICICLETA**

ITAJUBÁ - MG

2026

AMANDA DE CÁSSIA TOLEDO ALMEIDA BRAGA

**PROJETO, PROTOTIPAGEM E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE
METAMATERIAIS MECÂNICOS USADOS NO CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE
UM CANOTE DE BICICLETA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade, com linha de pesquisa em Desenvolvimento e Tecnologias, pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

Orientador: Jesús Antonio García Sánchez

Coorientadora: Jeniffer de Nadea

ITAJUBÁ - MG

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**COORDENAÇÃO DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO, TECNOLOGIAS E SOCIEDADES**

ATA Nº 1

Às dez horas do dia vinte e oito de janeiro de dois mil vinte e seis, no(a) Online: <https://meet.google.com/amt-oage-uzk>, foram abertos os Trabalhos de Defesa Pública de Dissertação de Mestrado intitulada "PROJETO, PROTOTIPAGEM E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE METAMATERIAIS MECÂNICOS USADOS NO CONTROLE DE VIBRAÇÕES DE UM CANOTE DE BICICLETA", do(a) candidato(a) AMANDA DE CÁSSIA TOLEDO ALMEIDA BRAGA, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre(a) em Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade, na Área de Concentração: Desenvolvimento, Tecnologias e Sociedade. A Comissão Examinadora foi composta pelos(as) doutores(as): JESUS ANTONIO GARCIA SANCHEZ do(a) UNIFEI, 1º(a) Examinador(a) - Orientador(a) e Presidente da Sessão. JENIFFER DE NADAE do(a) UNIFEI, 2º(a) Examinador(a); RAFAEL SILVA CAPAZ do(a) UNIFEI, 3º(a) Examinador(a); YOVANA MARÍA BARRERA SAAVEDRA do(a) UFSCAR, 4º(a) Examinador(a); Conforme Art. 54 da Norma de Programas de Pós-Graduação da UNIFEI, instalados os trabalhos de Defesa Pública de Dissertação seguiram-se as seguintes fases: Apresentação dos demais membros da banca pelo(a) presidente; chamada do(a) candidato(a) e leitura do título do trabalho a ser defendido; exposição oral do conteúdo do trabalho pelo(a) candidato(a); e arguição do(a) candidato(a) por cada examinador(a). Feito isso, foi suspensa a Sessão de Defesa para início da Sessão de Julgamento. Durante a mesma, os examinadores atribuíram ao(à) candidato(a) os seguintes conceitos: 1º(a) Examinador(a) "A"; 2º(a) Examinador(a) "A"; 3º(a) Examinador(a) "A"; 4º(a) Examinador(a) "A" sendo o(a) candidato(a) considerado(a) APROVADO(A). Voltando à Sessão de Defesa Pública de Dissertação, o(a) presidente convocou o(a) candidato(a) e proclamou o resultado final, apresentou seus agradecimentos e encerrou a sessão. Os trabalhos foram encerrados às treze horas do dia vinte e oito de janeiro de dois mil vinte e seis e, para que tudo constasse, foi lavrada a presente ata, a qual foi lida, aprovada e assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dra. YOVANA MARÍA BARRERA SAAVEDRA, UFSCAR

Examinadora Externa à Instituição

Dr. RAFAEL SILVA CAPAZ, UNIFEI

Examinador Externo ao Programa

Dra. JENIFFER DE NADAE, UNIFEI

Coorientador(a)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
COORDENAÇÃO DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO, TECNOLOGIAS E SOCIEDADES

Dr. JESUS ANTONIO GARCIA SANCHEZ, UNIFEI

Examinador Interno

AMANDA DE CÁSSIA TOLEDO ALMEIDA BRAGA

Mestranda



Emitido em 11/02/2026

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 1/2026 - PPG-DTECS (11.45.10)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 13/02/2026 14:08)

JENIFFER DE NADAE

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

IEPG (11.42)

Matrícula: ###150#6

(Assinado digitalmente em 11/02/2026 13:44)

JESUS ANTONIO GARCIA SANCHEZ

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

IEM (11.41)

Matrícula: ###056#4

(Assinado digitalmente em 11/02/2026 11:46)

RAFAEL SILVA CAPAZ

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

IRN (11.40)

Matrícula: ###485#3

(Assinado digitalmente em 11/02/2026 16:36)

AMANDA DE CÁSSIA TOLEDO ALMEIDA BRAGA

DISCENTE

Matrícula: 2024#####6

(Assinado digitalmente em 11/02/2026 12:10)

YOVANA MARÍA BARRERA SAAVEDRA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.718-##

Visualize o documento original em <https://sipac.unifei.edu.br/documentos/> informando seu número: **1**, ano: **2026**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **11/02/2026** e o código de verificação: **f80692bdd2**

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

A autora do manuscrito acima identificado, declara que:

1. Uso de Ferramentas de Inteligência Artificial Generativa:

Em caso afirmativo, responda e/ou marque as caixas correspondentes referentes ao uso de Inteligência Artificial Generativa durante o desenvolvimento desta pesquisa:

Ferramenta(s): ChatGPT

Propósito(s):

- Revisão de linguagem:** melhoria da gramática, ortografia, clareza e estilo do texto.
- Geração de texto:** criação de rascunhos, sugestões ou partes específicas do conteúdo, devidamente revisadas pelos autores.
- Análise de dados:** processamento e interpretação inicial de conjuntos de dados.
- Visualização de dados ou imagens:** auxílio na geração ou refinamento de figuras, gráficos ou ilustrações.
- Sugestões metodológicas:** fornecimento de recomendações ou ideias para aprimorar abordagens de pesquisa.
- Outros (especificar):**

2. Autoria e Supervisão Humana:

- A utilização de ferramentas de inteligência artificial foi exclusivamente para os propósitos acima declarados. Toda supervisão, validação e autoria intelectual do manuscrito são de responsabilidade dos autores humanos.

3. Conformidade com Princípios Éticos:

- O uso das ferramentas de IA seguiu práticas éticas e não incluiu atividades como fabricação de dados, plágio, manipulação de figuras ou qualquer prática que comprometa a integridade científica.

4. Transparência:

Declaro que as informações acima são completas e verdadeiras. Caso seja identificada qualquer inconsistência ou uso inadequado, aceito que o manuscrito seja submetido a investigação e, se necessário, rejeitado ou retratado.

Assinatura da autora:

Assinatura do orientador:



Dedico esse trabalho aos meus pais, que me ensinam, continuamente, a persistir em meus sonhos e que dedicaram grande parte de suas vidas a mim e ao meu irmão para proporcionar o mais precioso bem: o estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela oportunidade de viver, pela força e pelas bênçãos. Ao meu orientador, Jesús Antonio García Sánchez, e a minha coorientadora, Jeniffer de Nadae, pelas instruções, ajuda e suporte nas ideias para realização desse trabalho, elaborado em conjunto.

Agradeço aos meus pais, Luciana de Cássia Toledo e Armando Régis Almeida Braga, por serem a base em minha vida, apoiarem minhas decisões e meus sonhos e por terem me mostrado, dentre tantos ensinamentos, a importância do estudo, amor e respeito. Ter vocês ao meu lado, excepcionais professores, é a mais valiosa dádiva que possuo. Ao meu irmão, Igor de Kássius Toledo Almeida Braga, pelos conselhos, confiança e exemplo, sendo o irmão mais velho, a quem me espelho. À minha estimada Vó Cida, que no auge de seus 94 anos, fez e faz parte do meu crescimento, seja por seu olhar atento e profundo ou quando me alimentava com afeto ou por suas receitas.

Ao meu amado, Fernando Léo Bueno de Oliveira e Silva, que partilha sua rotina, frustrações, alegrias e conquistas. Agradeço a paciência, motivação, companheirismo e por acreditar em mim. Aos amigos que trilhei nessa jornada, sou grata pelas risadas, conversas e por permanecerem comigo, mesmos que distantes, sempre presentes, seja por uma mensagem, videochamada ou para uma noite de encontro, pizza e afins.

Ao a(U)mor canino, que continuamente está presente na minha vida de modo singelo e genuíno, agradeço a minha amada Madona. Àqueles que, de alguma maneira, contribuíram para minha formação, seja nesse ou em outro plano, e que estarão sempre em meus pensamentos, meus sinceros “muito obrigada”.

“Sei que não me resta muito tempo. Já é crepúsculo. Não tenho medo da morte. O que sinto é tristeza. O mundo é muito bonito! Gostaria de ficar por aqui... Escrever é o meu jeito de ficar por aqui. Cada texto é uma semente. Depois que eu me for, elas ficarão. Quem sabe se transformarão em árvores! Torço para que sejam ipês amarelos...”

- Rubem Alves (A Eternidade Numa Hora)

RESUMO

Metamateriais (MMs) são estruturas artificiais projetadas para exibir propriedades únicas não disponíveis na natureza. O estudo tem como objetivo geral desenvolver um metamaterial (MM) mecânico chiral atenuador de vibrações em um canote de bicicleta, através de modelagem computacional, fabricação de um protótipo por impressão 3D e avaliação do ciclo de vida (ACV). Foram examinados dois tipos de sistemas de amortecimento em canotes. O primeiro, corresponde a um modelo convencional (CC) com amortecimento integrado, já disponível no mercado. O segundo, refere-se a um *design* em MM (CMM), projetado com a mesma funcionalidade. Adicionalmente, foi proposto um modelo otimizado do CMM (CMMot) com redução de X% massa total da peça, com o intuito de avaliar eventuais vantagens associadas ao menor uso de material e energia para fabricação. A geometria do CMM possui célula unitária do tipo arco central (CACs), isto é, apresenta trechos retos nas extremidades e curvatura côncava no trecho intermediário, permitindo concentração de deformação nessa região. Através da modelagem computacional, elaboraram-se as três geometrias e, em seguida, construiu-se, por meio de impressão 3D, o CMM em fusão seletiva a *laser* (SLM) com aço 316L. Em seguida, performou-se uma ACV comparativa dos insumos derivados dos processos de manufatura dos canotes. Os resultados na simulação numérica indicaram que, enquanto o CC obteve um deslocamento máximo em Z de 20,47 mm, o CMM respondeu com um valor significativamente inferior, de $2,55 \times 10^{-4}$ mm e o CMMot de $2,41 \times 10^{-4}$ mm, indicando o potencial promissor dos MMs na mitigação de vibrações. Em relação a ACV, o CMMot possuiu desempenho superior ao CMM original, com reduções de, aproximadamente, 32% em todas as categorias de impacto avaliadas. Contudo, o CC ainda apresenta menor impacto ambiental total, mesmo quando fontes de energia renováveis são utilizadas no CMM. Os efeitos negativos do CMM estão concentrados principalmente na eletricidade utilizada durante a manufatura aditiva. Sob o ponto de vista ambiental e estrutural, o CMM representa um significativo avanço técnico, mas ainda depende de melhorias no processo para ampliar sua viabilidade sustentável. A pesquisa contribui para a literatura ao abordar a integração entre MMs e ACV, área ainda pouco explorada, e reforça a necessidade de estudos futuros que envolvam uma abordagem do tipo *cradle-to-grave*, validações experimentais e estratégias de escalonamento produtivo.

Palavras-chave: Metamateriais chirais; ACV; impressão 3D; SLM; aço inox 316L; canote.

ABSTRACT

Metamaterials (MMs) are artificial structures designed to exhibit unique properties not available in nature. The aim of this study is to develop a chiral mechanical metamaterial (MM) to attenuate vibrations in a bicycle seatpost, using computational modeling, fabrication of a prototype by 3D printing, and life cycle assessment (LCA). Two types of seatposts damping systems were examined. The first one corresponds to a conventional model (CC) with integrated damping, already available on the market. The second one refers to a MM design (CMM), developed with the same functionality. Additionally, an optimized model of the CMM (CMMot) was proposed with a reduction in the total mass of the component, in order to evaluate any advantages associated with the reduced use of material and energy for manufacturing. The geometry of the CMM has a central arch-type unit cell (CACs), i.e., it has straight sections at the ends and concave curvature in the intermediate section, allowing the concentration of deformation in this region. Through computer modeling, the three geometries were designed, and then the CMM was constructed using 3D printing in selective laser melting (SLM) with 316L steel. Next, a comparative LCA was performed on the inputs derived from the manufacturing processes of the seatposts. The results of the numerical simulation indicated that, while the CC obtained a maximum displacement in Z of 20.47 mm, the CMM responded with a significantly lower value of 2.55×10^{-4} mm and the CMMot of 2.41×10^{-4} mm, indicating the promising potential of MMs in vibration mitigation. With regard to LCA, CMMot performed better than the original CMM, with reductions of approximately 32% in all impact categories evaluated. However, CC still has a lower total environmental impact, even with the use of renewable energy sources. The negative effects of CMM are mainly related to the electricity consumed during additive manufacturing. From an environmental and structural point of view, CMM represents a significant technical advance, but it still depends on improvements in the process to increase its sustainable viability. The research contributes to the literature by addressing the integration between MMs and LCA, an area that has been little explored, and reinforces the need for future studies involving a cradle-to-grave approach, experimental validations, and production scaling strategies.

Keywords: Chiral metamaterials; LCA; 3D printing; SLM; 316L stainless steel; seatpost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do canote na bicicleta.....	21
Figura 2: Linha do tempo elencando os principais avanços na pesquisa sobre MMs.....	24
Figura 3: Tipologia dos MMs mecânicos. Em a) MM auxético. Em b) MM em rede/malha. Em c) MM origami. Em d) MM pentamodal. Em e) MM chiral. Em f) MM biomimético. Em g) MM multifuncional eletromagnético e mecânico.....	28
Figura 4: MM auxético. Em a) geometria da célula de MM em planta e em vista em 3D. Em b) MM auxético durante a compressão ao longo das direções X e Y	30
Figura 5: Célula unitária do MM mecânico em rede. Em a) célula em SC. Em b) célula em SCO	31
Figura 6: MM origami com células trapezoidais da classe <i>Arc-Morph</i> . Em a) vista em perspectiva. Em b) vista frontal.....	32
Figura 7: Esquema MM pentamodal. Em a) geometria da célula unitária. Em b) painel em sanduíche. Em c) representação da conexão das juntas e diâmetro "d"	33
Figura 8: Esquema do MM chiral. Em a) duas células 2D do tipo tetra-chiral. Em b) tubo cilíndrico com multicamadas tetra-chirais.....	35
Figura 9: MM biomimético. Em a) estrutura anatômica da almofada da pata de um cachorro. Em b) vista microscópica (formato favo de mel). Em c) representação esquemática do funcionamento do mecanismo de amortecimento presente na pata	36
Figura 10: Esquema do MM multifuncional. Em a) arranjo geométrico do MM em um conjunto alinhado/zíper. Em b) célula unitária zíper (disposição horizontal). Em c) célula unitária alinhada (disposição vertical)	37
Figura 11: Etapas de uma ACV	39
Figura 12: Estágios do ciclo de vida e fronteiras do sistema.....	40
Figura 13: Esquema de um processo multifuncional com a geração de dois coprodutos (A e B). As setas tracejadas representam fluxos elementares.	42

Figura 14: Procedimentos utilizados para resolver a multifuncionalidade (subdivisão, expansão do sistema e alocação)	44
Figura 15: Divisão das categorias de impactos e estágios associados (<i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>) ..	45
Figura 16: Procedimento metodológico da pesquisa	51
Figura 17: Canote convencional com amortecimento da marca Zoom. Em a) Vista frontal e lateral do canote. Em b) Elementos do canote.....	53
Figura 18: Desenho técnico do canote convencional com amortecimento (em mm).....	54
Figura 19: Simplificações utilizadas na etapa de simulação numérica	55
Figura 20: Construção da malha para o CC.....	56
Figura 21: Etapas da simulação no Ansys	57
Figura 22: Curva aceleração <i>versus</i> tempo para um canote de bicicleta	58
Figura 23: Condições de contorno para o CC.....	59
Figura 24: Geometria do metamaterial (em mm). Em a) Dimensões da célula unitária. Em b) Disposição da célula unitária na base de apoio	61
Figura 25: Geometria do CMM.....	62
Figura 26: Construção da malha para o CMM	63
Figura 27: Condições de contorno para o CMM	64
Figura 28: Geometria do metamaterial otimizado (em mm). Em a) Dimensões da célula unitária. Em b) Disposição da célula unitária na base de apoio	65
Figura 29: Construção da malha para o CMM otimizado	66
Figura 30: Impressora OmniSint-160. Em a) Vista frontal da impressora 3D. Em b) Interior do equipamento	67
Figura 31: Passo a passo do processo de impressão	68

Figura 32: Divisão do CMM para impressão. Em a) Vista isométrica. Em b) Vista frontal	69
Figura 33: Divisão do CMM otimizado para impressão. Em a) Vista isométrica. Em b) Vista frontal	69
Figura 34: Arredondamento dos vãos entre as CACs.....	70
Figura 35: Protótipo do CMM fabricado por impressão 3D. Em a) Impressão final do CMM em quatro partes. Em b) Impressão parcial dos módulos do CMM	71
Figura 36: Fronteiras do sistema em estudo	73
Figura 37: Distribuição das tensões de von Mises para o CMM.....	81
Figura 38: Distribuição das tensões de von Mises para o CMM otimizado.....	82
Figura 39: Análise modal dos seis primeiros modos de vibração do CC	83
Figura 40: Análise modal dos seis primeiros modos de vibração do CMM.....	84
Figura 41: Análise modal dos seis primeiros modos de vibração do CMM otimizado.....	85
Figura 42: Deformações máximas totais no eixo Z. Em a) Em todo o corpo do CC. Em b) Em todo o corpo do CMM. Em c) Em todo o corpo do CMM otimizado	86
Figura 43: Deslocamentos máximos em Z para o CC e CMM	87
Figura 44: Percentual de contribuição dos insumos para o CC	88
Figura 45: Percentual de contribuição dos insumos para o CMM e CMM otimizado	90
Figura 46: Análise comparativa do percentual de contribuição entre o CC e CMM.....	92
Figura 47: Percentual de contribuição entre os cenários em estudo para o CMM Fonte: Autoria própria.....	94
Figura 48: Percentual de contribuição entre os cenários em estudo para o CMMot.....	96
Figura 49: Comportamento de um feixe em um meio contentando materiais "canhotos" (reflexão) e materiais "destros" (refração).....	122

Figura 50: Configuração do equipamento utilizado para estudar o efeito da radiação eletromagnética em um objeto metálico	123
Figura 51: Aparato para direcionar ondas de rádio linearmente polarizadas	124
Figura 52: Esquema dos dispositivos propostos. Em a) matriz de esferas condutoras dispostas aproximadamente na forma de uma lente convexa. Em b) rede de esferas suportadas por placas de espuma simulando o efeito de uma lente	125
Figura 53: Estrutura periódica composta por infinitos fios metálicos finos dispostos em uma estrutura cúbica simples, unidos nos cantos da estrutura	126
Figura 54: Diagrama representando os SRRs. Em a) Vista em planta de um anel seccionado e suas distâncias. Em b) Cada anel seccionado é composto por duas folhas finas de metal por uma distância “d” da folha anterior	127
Figura 55: Diagrama de um SRR quadrado: cada célula unitária tem seis SRR de cobre e duas tiras de fios acoplados em placas finas de fibra de vidro	128
Figura 56: Vista superior da amostra de metamaterial com índice de refração efetivo e gradiente espacial constante, dispostos em placas de circuito contendo SRRs padronizados	129
Figura 57: Trajetória dos raios dentro do espaço (verde claro) contendo o objeto camuflado (verde escuro) para emergir no lado oposto sem se desviar de seu curso original.....	130
Figura 58: Demonstração da compressibilidade negativa quando um objeto é submetido a uma força de tração	131
Figura 59: Estruturas em origami. Em a) padrão Miura-ori elaborado a partir de elementos de paralelogramo. Em b) padrão Ron Resch elaborado a partir de elementos triangulares.....	131
Figura 60: Representação do metamaterial pentamodal. Em a) estrutura na forma de diamante em vista isométrica. Em b) MM impresso por meio de manufatura aditiva e sua visualização microscópica.....	132
Figura 61: Metamateriais em padrões <i>honeycomb</i> . Em a) Geometria hexagonal irregular. Em b) Geometria reentrante. Em c) Geometria chiral.....	133

Figura 62: Demonstração da aplicação do metamaterial origami para o primeiro estágio de um VLM-1. Em a) Localização do trem de pouso. Em b) haste do trem de pouso com a inserção do metamaterial 134

Figura 63: Ilustração do MM mecânico flexível desenvolvido em material PLA 135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das ideias fundamentais dos artigos apresentados	50
Tabela 2: Propriedades mecânicas dos materiais.....	56
Tabela 3: Inventário de dados para o CC.....	75
Tabela 4: Inventário de dados para o CMM e CMM otimizado.....	77
Tabela 5: Definição das categorias de impactos ambientais - ReCiPe Midpoint (H) 2014.....	79
Tabela 6: Análise dos impactos ambientais relativos ao CC	88
Tabela 7: Análise dos impactos ambientais relativos ao CMM e CMM otimizado	90
Tabela 8: Análise comparativa dos impactos ambientais entre o CC, CMM e CMM otimizado	92
Tabela 9: Análise de sensibilidade dos impactos ambientais relativos ao CMM	94
Tabela 10: Análise de sensibilidade dos impactos ambientais relativos ao CMMot.....	95

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS DA PESQUISA	22
3. REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1 Conceitos básicos e classificação dos metamateriais	23
3.1.1 Fundamentos e tipologia dos metamateriais mecânicos.....	26
3.2 Definições e etapas da avaliação do ciclo de vida.....	38
3.2.1 Aplicabilidade da ACV em sistemas de fabricação por impressão 3D	48
4. METODOLOGIA	51
4.1 Modelagem e simulação numérica	52
4.2 Prototipagem e impressão 3D.....	67
4.3 Avaliação do ciclo de vida.....	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
5.1 Simulação numérica	80
5.2 Avaliação do ciclo de vida.....	87
6. CONCLUSÕES	98
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE A - Desenvolvimento histórico dos metamateriais	122
APÊNDICE B - Desenho técnico do parafuso.....	136
APÊNDICE C - Desenho técnico do elastômero.....	137
APÊNDICE D - Desenho técnico da peça de plástico.....	138
APÊNDICE E - Desenho técnico da mola	139

APÊNDICE F - Desenho técnico do canote (externo)	140
APÊNDICE G - Desenho técnico do canote (interno)	141
APÊNDICE H - Desenho técnico do canote convencional com amortecimento	142

1. INTRODUÇÃO

O interesse em metamateriais (MMs) é crescente, especialmente em estruturas e materiais compósitos que incorporam características físicas únicas, não encontradas naturalmente (Engheta; Ziolkowski, 2006). De maneira geral, um metamaterial (MM) é um material criado artificialmente (Banerjee, 2023), projetado para adquirir propriedades únicas ou múltiplas não disponíveis na natureza, através da combinação de vários elementos dispostos em padrões repetitivos (Brûlé; Enoch; Guenneau, 2020). A pesquisa em MMs começou no campo eletromagnético, mas se expandiu para abranger muitos outros domínios físicos, sendo eles: acústica, termodinâmica, mecânica clássica, sismologia e transporte de massa (Holliman *et al.*, 2022). Considerando que se trata de um campo em consolidação na engenharia, é fundamental explorar sua complexidade e promover novas abordagens que integrem aspectos sociais, ambientais e tecnológicos.

No que diz respeito ao campo da mecânica, os MMs mecânicos referem-se a um grupo de estruturas artificiais com determinadas propriedades mecânicas incomuns, tais como: coeficiente de Poisson negativo, módulo de cisalhamento nulo, expansão térmica próxima de zero, alta resistência e alta tenacidade simultâneas, características anormais de propagação de ondas acústicas/elásticas, entre outras (Yuan *et al.*, 2021). Tais características são decorrentes da geometria de suas subunidades e não da composição do material (Yu *et al.*, 2018). Ainda que possuam notável performance em termos funcionais e estruturais, observa-se uma escassez de estudos na literatura compreendendo quais as consequências ambientais decorrentes da geração desse novo produto. Por este motivo, faz-se necessário o uso de instrumentos que tenham a intenção de atestar os efeitos resultantes da utilização de tecnologias alternativas no meio ambiente. Nesse contexto, destaca-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta para analisar os impactos potenciais ao longo das etapas do ciclo de vida dos MMs.

De maneira simplificada, a ACV é o nome dado a metodologia utilizada para quantificar e analisar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço, abrangendo desde a extração das matérias-primas até o descarte final (Heijungs, 2024). Trata-se de uma avaliação detalhada dos insumos e processos envolvidos ao longo da cadeia de produção, incluindo o consumo de energia durante a fabricação, a queima de combustíveis no transporte, as emissões associadas ao uso do produto, os impactos gerados no seu destino final, como reciclagem, incineração ou aterro, dentre outros (Pati, 2022). Como uma ferramenta de gerenciamento ambiental, a ACV é empregada para auxiliar a identificação dos

possíveis “pontos críticos ambientais” (*hotspots*) – etapas com maior contribuição para os impactos ambientais totais –, fornecendo informações relevantes para a tomada de decisões, as quais podem trazer vantagens ecológicas (Khoo; Tan, 2022).

Sendo assim, a técnica de ACV pretende identificar qual processo causa o menor impacto ambiental e de que maneira ele pode ser modificado para reduzir um impacto ambiental específico de interesse, seja de modo global ou em cada estágio de seu ciclo de vida (Curran, 2016). Além disso, busca-se compreender como as mudanças para a utilização de outros produtos/serviços podem afetar os impactos ambientais ao longo de todas as fases envolvidas na sua confecção. Nesse contexto, ao aplicar a ACV em MMs, a intenção será examinar os impactos associados à sua manufatura, visto que não se trata de um novo tipo de material, em termos de composição química, mas sim de um material já existente (como o aço, borracha, cimento, madeira etc) cuja funcionalidade resulta da ordenação espacial de sua estrutura ao invés das substâncias que o compõem.

No que tange a ACV dos MMs, a grande maioria dos estudos está voltada para a elaboração do mecanismo MM ao invés da investigação dos possíveis benefícios ou malefícios ambientais associados ao seu uso e geração. Até o momento, não há estudos diretamente voltados à ACV de MMs, o que revela uma lacuna relevante na literatura. Por outro lado, há pesquisas que comparam os impactos ambientais de diferentes métodos de fabricação, especialmente entre processos convencionais (como corte, usinagem, soldagem) e processos baseados em manufatura aditiva (MA)/impressão 3D. De forma geral, a MA envolve a fabricação de uma peça por meio da adição de material camada por camada (Conner *et al.*, 2014), sendo vistos como processos ecológicos pois utilizam apenas o material necessário para cada peça, ao contrário da usinagem tradicional que frequentemente resulta em um desperdício significativo (Campbell *et al.*, 2011).

As tecnologias de impressão 3D permitem a produção de estruturas com total liberdade geométrica, tanto na escala de projeto quanto em *designs* complexos (Ge *et al.*, 2017), reduzem os impactos ao longo do ciclo de vida do produto, diminuem a necessidade de ferramentas especiais durante a fabricação e o desperdício de material (Peng *et al.*, 2018). Além disso, a MA permite o desenvolvimento de um modelo físico (protótipo), similar ao dispositivo final, mesmo que em escala reduzida. A criação de protótipos auxilia na identificação de possíveis riscos e falhas, permitindo ajustes antes da implementação final, reduzindo a probabilidade de problemas após o lançamento, melhorando a confiabilidade do produto e refinando a

usabilidade e a funcionalidade (Miranda, 2023). Contudo, ainda que os avanços nas técnicas de MA tenham facilitado a fabricação de estruturas sofisticadas, cabe identificar as consequências diretas desses processos.

Tendo em vista as ideias apresentadas, o presente estudo tem como foco a análise estrutural e ambiental de um canote de bicicleta a partir de um modelo convencional (CC) com amortecimento, já disponível no mercado, e outro com estrutura de metamaterial (CMM). Além disso, também foi realizado um modelo otimizado do CMM (CMMot), isto é, considerando a redução da massa total da peça, visando melhorar a eficiência de material, diminuir o uso de energia e à diminuição dos impactos ambientais associados. O canote representa a conexão entre o quadro da bicicleta e o selim (assento/banco), Figura 1. Enquanto trabalhos anteriores representaram o canote apenas como um tubo de seção vazada, não foram identificados estudos que explorassem o uso de MMs nesse componente.



Figura 1: Localização do canote na bicicleta

Fonte: Autoria própria

O CMM foi projetado para mitigar vibrações longitudinais, no eixo do tubo, redirecionando-as horizontalmente, uma vez que tais excitações são as principais responsáveis pelas perturbações ao qual uma bicicleta é submetida durante o deslocamento sobre o solo (Pelland-Leblanc *et al.*, 2014), ocasionando desconforto ao usuário. Ademais, a aplicação da ACV permite quantificar os impactos ambientais dos insumos envolvidos, possibilitando um estudo integrando desempenho estrutural e sustentabilidade ambiental. Finalmente, o trabalho tem a intenção de responder a seguinte pergunta: em que medida o canote de metamaterial apresenta desempenho estrutural e ambiental superior quando comparado ao canote convencional?

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

A pesquisa tem como objetivo geral desenvolver um MM mecânico chiral atenuador de vibrações em um canote de bicicleta, dispendo-se de modelagem computacional, fabricação de um protótipo por impressão 3D e avaliação do ciclo de vida. O intuito é melhorar o conforto ao usuário para a mobilidade urbana e avaliar as etapas do processo de produção que causam algum tipo de prejuízo a esfera ecológica. Espera-se projetar uma célula unitária do tipo arco central (CAC) capaz de redirecionar e dissipar as vibrações mecânicas ao longo da estrutura. Propõe-se verificar se o CMM apresenta menores deslocamentos longitudinais em comparação ao CC, evidenciando um comportamento estrutural mais eficiente na mitigação dos efeitos dinâmicos decorrentes da interação com o solo.

Para atingir o propósito principal, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Registrar o conceito dos MMs, bem como as definições e elementos de uma ACV;
- Analisar estudos anteriores de ACV comparando manufatura convencional (MC) e MA;
- Realizar a modelagem computacional de um MM chiral aplicado ao canote de bicicleta (CMM) e desenvolver um modelo do CMM otimizado visando à redução da massa total da peça;
- Elaborar uma ACV comparativa de um canote convencional (CC) e do CMM e avaliar os impactos ambientais associados aos seus processos produtivos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente tópico busca trazer os conceitos associados às temáticas dos MMs e ACV. O trajeto percorrido se inicia com as classificações e aplicações por trás do que se entende por MMs e as etapas necessárias para a concepção de uma ACV. Pretende-se fundamentar uma base teórica necessária para a construção dos capítulos posteriores.

3.1 Conceitos básicos e classificação dos metamateriais

Um importante avanço científico na eletromagnética e na óptica modernas foi a concepção e a implementação prática de materiais artificiais com permissividade elétrica, permeabilidade magnética e índice de refração negativos, também conhecidos como “duplo-negativos” ou “canhotos” ou, simplesmente, “metamateriais de índice de refração negativa” (Tsakmakidis; Baskourelou; Wartak, 2022). O percurso histórico dos MMs é datado desde 1898 com a pesquisa de Bose (1898) sobre polarização da luz, e sua evolução permeia por diversas áreas da ciência. A Figura 2 ilustra a cronologia, os diversos autores e suas contribuições científicas ao longo dos anos. Para mais detalhes, foi elaborado o Apêndice A com a sequência de eventos acerca dos MMs.

1898	Bose: Alteração do plano de polarização de ondas eletromagnéticas a partir de uma estrutura metálica torcida.
1914	Lindman: Aplicação de espirais de fio de cobre para demonstrar a rotação do plano de uma onda linearmente polarizada (efeito da chiralidade).
1948	Kock: Fabricação de lentes metálicas com atraso, de maneira periódica, para operar em qualquer faixa de comprimento de onda.
1968	Veselago: Uso de materiais “canhotos” (LHM) para obter propriedades eletromagnéticas negativas e o possível desenvolvimento de sistemas de refração incomuns.
1996	Pentry et al.: Proposição de uma rede cúbica simples periódica para a redução da frequência do plasma para o espectro infravermelho ou GHz (Primeira Revolução dos Metamateriais).
1999	Pentry et al.: Construção dos ressonadores de anel seccionados (SRRs) que respondem à radiação de micro-ondas como se tivessem uma permeabilidade magnética efetiva.
2001	Shelby et al.: Manipulação dos SRRs com fios de cobre em bandas de transmissão em frequências de 8-12 GHz, reduzindo suas dimensões geométricas e corroborando algumas das previsões de Veselago.
2005	Smith et al.: Demonstração do índice de refração efetivo com gradiente espacial constante a partir de SRRs em placas de circuito (Segunda Revolução dos Metamateriais).
2006	Pendry; Schurig; Smith; Leonhardt: Investigação da camuflagem eletromagnética por um MM cuja função é desviar os raios que atingem um objeto, guiá-los ao redor do mesmo e retorná-los à sua trajetória original.
2012	Nicolaou & Motter: Proposição de material com variações negativas de compressibilidade (metamateriais volumétricos), isto é, sofre contração quando tensionado ou expansão quando pressionado.
2014	Lu et al.; Silverberg et al.: Utilização de padrões de origami rígido para obtenção de um coeficiente de Poisson ambos negativo e positivo (Miura-ori) e resistência à flambagem compressiva (Ron Resch).
2017	Hedayati; Leeflang; Zadpoor: Exploração das potencialidades dos metamateriais pentamodais para o aumento do módulo de Young e da tensão de escoamento.
2019	Kumar et al.: Construção de MM em padrões de favos de mel (hexagonais irregulares, reentrantes e chirais) para melhoria na eficiência e na absorção energética.
2021	Dionísio; Sánchez; Silva: Confeção de um MM origami repetitivo para absorver e atenuar cargas de impacto em um trem de pouso em comparação com uma estrutura clássica.
2024	Wang et al.: Design e manufatura de metamateriais mecânicos flexíveis com propriedades elásticas ajustáveis em comparação com materiais em formato de “estrelas conectadas”.

Figura 2: Linha do tempo elencando os principais avanços na pesquisa sobre MMs

Fonte: Autoria própria

MMs consistem em estruturas projetadas artificialmente que exibem propriedades não convencionais além das propriedades intrínsecas de seus materiais constituintes (Lee, Geon *et al.*, 2023) que não ocorrem em materiais naturais (Contreras *et al.*, 2024). Normalmente, esses materiais são moldados em padrões repetitivos, com dimensões menores do que os comprimentos de onda com os quais foram projetados para manipular (Di Barba; Wiak, 2022). Na maioria dos casos, é o tamanho, a forma ou a geometria específica do MM que dão origem às suas propriedades exclusivas e desejadas, podendo ser usados para manipular a luz, as ondas eletromagnéticas, o som ou até mesmo as propriedades mecânicas e gravitacionais da matéria (Abdullah; Xiao; Amaya, 2021). Eles têm atraído a atenção das comunidades científicas nos últimos 20 anos, devido a sua possível aplicabilidade nas telecomunicações, radares e defesa, nanolitografia com luz, microeletrônica, imagens clínicas etc (Tsakmakidis; Baskourelis; Wartak, 2022), representando um novo campo de pesquisa interdisciplinar.

São várias as categorias dos MMs: MMs piezoelétricos, eletromagnéticos, terahertz, acústicos, absorvedores (Valipour *et al.*, 2021), térmicos, mecânicos (Kumar, Rakesh *et al.*, 2022), dentre outros, são tipos diferentes nele englobados. Em termos gerais, o aspecto central dos MMs piezoelétricos está no projeto de sistemas artificiais que diversificam os modos de deformação e ampliam o desempenho piezoelétrico em sensores, controle de vibração, conversão de energia etc (Gao *et al.*, 2025). No caso dos MMs eletromagnéticos, ao alterar a forma geométrica, o tamanho e a disposição espacial das células unitárias, a resposta eletromagnética pode ser ajustada para manipular a amplitude, a fase, a polarização, a frequência, o vetor e a forma de onda e outros graus de liberdade das ondas eletromagnéticas (You *et al.*, 2023). Os MMs terahertz (THz) correspondem as ondas eletromagnéticas na faixa de 0.1 - 10 THz com características personalizáveis para obter amplas larguras de banda, aplicações em radiação THz, sensoriamento e comunicações sem fio além do 5G, dentre outras (Degl'Innocenti; Lin; Navarro-Cía, 2022). Os MMs acústicos são estruturados para produzir índices anômalos de reflexão e refração que não são encontrados em materiais convencionais, a fim de manipular as ondas acústicas (Ji; Huber, 2022).

Já os MMs térmicos, foram implementados para controlar o fluxo de calor de maneiras alternativas, sendo utilizado como manto térmico (eliminando o gradiente térmico), concentrador térmico (aumentando o fluxo de calor), rotador (alterando a direção do gradiente de temperatura), dentre outros (Sklan; Li, 2018). Finalmente, os MMs mecânicos são compostos projetados racionalmente, visando à obtenção de comportamentos elásticos e o desenvolvimento de vantagens funcionais mecânicas para além de sua composição qualitativa

e/ou quantitativamente (Craster *et al.*, 2023). Conforme apontado no Apêndice A, a pesquisa em torno dos MMs mecânicos passou a ser explorada por volta de 2012 com o trabalho de Nicolaou & Motter (2012), representando um campo de investigação recente, com pouco mais de uma década. Assim, dentre as ramificações existentes nos MMs, o foco do presente estudo são os MMs mecânicos. Eles se referem a um tipo de MM com características exclusivas baseadas em sua estrutura (Yu *et al.*, 2018), como, por exemplo, massa negativa, rigidez negativa ou coeficiente de Poisson negativo (Valipour *et al.*, 2021). Eles dão origem a novos materiais por meio da otimização da estrutura das células, podendo ser ajustadas para atender a requisitos específicos (Chen, Zhaochang *et al.*, 2023), levando-os para os campos de armazenamento de energia, biomedicina, sensores, robótica etc (Chen, Yuan; Mai; Ye, 2023).

Os recentes progressos observados no campo da MA/impressão 3D impulsionaram a fabricação de MMs mecânicos, promovendo também um rigoroso controle sobre sua microarquitetura (de Jonge; Kolken; Zadpoor, 2019) permitindo elaboração de mecanismos programáveis, desenvolvimento de implantes ou próteses, eletrônicos portáteis, *design* de roupas e calçados inteligentes, entre outros (Krushynska *et al.*, 2023). Portanto, o estudo e emprego dos MMs mecânicos é de relevante interesse, tendo em vista sua vasta gama de aplicações, inter-relação entre múltiplas áreas, possibilidade de redução de resíduos em sua fabricação (através da impressão 3D), além da elaboração de um projeto adequado, permitindo atender as respostas mecânicas necessárias, com o auxílio de modelagens computacionais, preparação de protótipos e ensaios experimentais. Nos próximos tópicos, serão discutidas algumas funções desses MMs, bem como investigações anteriores que foram realizadas nesse campo. A ideia é apresentar as características possíveis de serem obtidas variando a estrutura física e adequá-las ao projeto de vibrações.

3.1.1 Fundamentos e tipologia dos metamateriais mecânicos

Tradicionalmente, os MMs mecânicos estão intimamente relacionados a quatro constantes elásticas: módulo de *Young* ou módulo de elasticidade (E), módulo de elasticidade ao cisalhamento (G), módulo de *bulk* (K) e coeficiente de Poisson (ν), no qual E e G indicam a rigidez de um material, K a compressibilidade (Yu *et al.*, 2018) e ν a deformação transversal de um material por meio da sua contração lateral pelo alongamento longitudinal. As propriedades mecânicas determinam o comportamento dos materiais quando forças ou cargas são aplicadas, no qual a resposta do material a essa força depende do tipo de conexão, do arranjo estrutural,

do tipo de tensão, da forma como ela é aplicada, entre outros (Tanzi; Farè; Candiani, 2019). Com o intuito de otimizar essas propriedades ou de obter características não encontradas usualmente, a aplicação desses MMs torna-se promissora. O objetivo é conceber e produzir de maneira eficaz meios artificiais personalizados com características mecânicas distintas de seus constituintes para obter, por exemplo, materiais efetivamente mais resistentes, rígidos ou leves (Christensen *et al.*, 2015).

Sendo caracterizado como um campo ainda em crescimento, os MMs mecânicos apresentam diversas tipologias. Dentre as várias classificações existentes na literatura (Chen, Baocai *et al.*, 2021; Jiao *et al.*, 2023; Nian *et al.*, 2024; Yu *et al.*, 2018; Zheng *et al.*, 2023), podemos destacar os: MMs mecânicos auxéticos, em rede/malha, origami, pentamodais, chirais, biomiméticos e multifuncionais. De maneira simplificada, os MMs mecânicos auxéticos são projetados para exibir propriedades de coeficiente de Poisson negativo em um nível macro, que descreve o valor negativo da quantidade relativa de deformação lateral e axial de um material (Gu *et al.*, 2025) sob carga de tração e compressão. Já os MMs mecânicos em rede/malha (*lattice metamaterial*), representam materiais celulares com um arranjo periódico de células em duas ou três dimensões (Abad; Khanoki; Pasini, 2013). Para que uma rede seja considerada e atue como um material, o número de células unitárias deve ser suficientemente grande para que a escala de comprimento da carga aplicada seja maior do que seus elementos de rede; caso contrário, ela se comportaria como uma estrutura em vez de um material (Surjadi *et al.*, 2019).

Em relação aos MMs mecânicos baseados em origamis (ou kirigamis: arte japonesa de cortar papéis), são projetados com a introdução de dobras em materiais constituídos por finas camadas, no qual os vincos permitem a rotação de elementos próximos e afetam a energia elástica durante a dobragem e o desdobraimento, conferindo propriedades cinéticas e mecânicas programáveis (Zhai; Wu; Jiang, 2021). Já os MMs mecânicos pentamodais são caracterizados por uma matriz de elasticidade de ordem seis, na qual cinco dos seis autovalores são nulos ou tendem a zero, permitindo que o material suporte cinco modos de deformação infinitesimal (deformações muito pequenas) e apenas uma única tensão (Yu *et al.*, 2018). Eles são sólidos artificiais com propriedades elásticas que se aproximam daquelas dos líquidos isotrópicos, também chamados de meta-líquidos (Kadic *et al.*, 2013). Fenomenologicamente, os MMs pentamodais passam por processos de deformação nos quais o volume permanece constante (Barchiesi; Spagnuolo; Placidi, 2019). No que diz respeito aos MMs chirais, sua terminologia (*chir*: mãos) pode ser facilmente compreendida por uma associação a assimetria de nossas mãos

quando espelhadas e, então, sobrepostas (Kondepudi; Kouichi, 2006). Portanto, a chiralidade se refere a imagens espelhadas não sobrepostas (Gal, 2019). Assim, elementos chirais não têm centro-simetria ou simetria rotacional (Akhmetshin *et al.*, 2024).

No caso dos MMs biomiméticos ou MMs bio-inspirados, como o nome sugere, são materiais cuja geometria é inspirada por meio da observação de elementos da natureza como no caso de asas de borboleta (Rodríguez *et al.*, 2018), morfologias de estruturas cranianas de mamíferos (Li, Tiantian; Li, 2024), arranjo de fibras de bambu (Yin *et al.*, 2025), dentre outros. Por último, os MMs mecânicos multifuncionais requerem a integração de diferentes tipos de componentes de MMs em um sistema para alcançar as funcionalidades que são impossíveis para um único tipo de metamaterial (Jiao *et al.*, 2023). No projeto de estruturas ou dispositivos multifuncionais, os elementos básicos necessários incluem o *design* direto das propriedades mecânicas através da tipologia do MM, a forma da estrutura de acordo com a finalidade desejada, o projeto da integridade e da capacidade de suporte de carga e a adequação ambiental (Yuan *et al.*, 2021). As alíneas “a” a “g” trarão exemplos de aplicações dos MMs mecânicos vistos acima. A Figura 3, traz algumas ideias da forma geométrica das tipologias citadas.

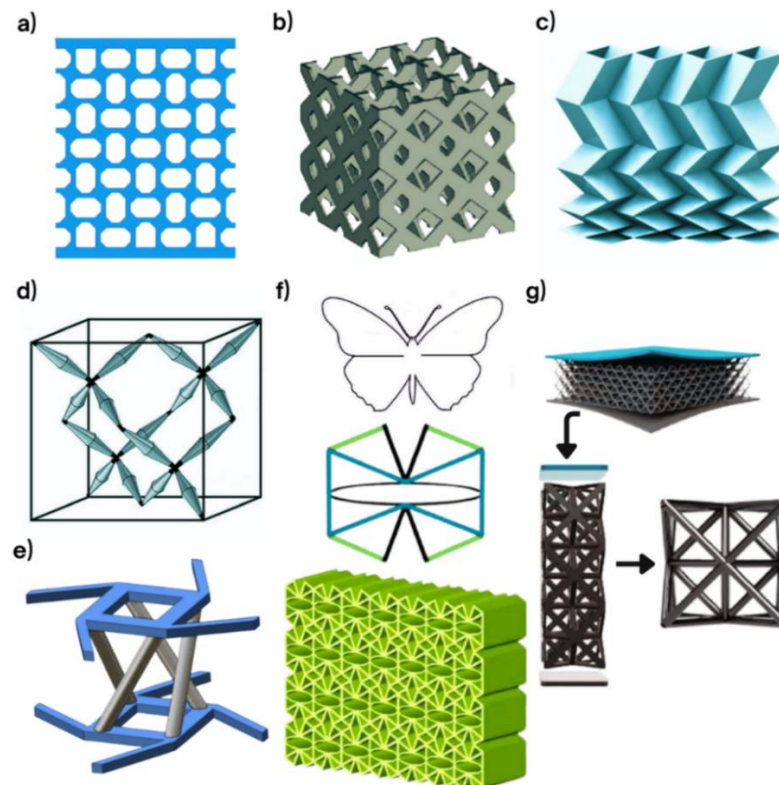


Figura 3: Tipologia dos MMs mecânicos. Em a) MM auxético. Em b) MM em rede/malha. Em c) MM origami. Em d) MM pentamodal. Em e) MM chiral. Em f) MM biomimético. Em g) MM multifuncional eletromagnético e mecânico

Fonte: Adaptado de Uddin *et al.* (2025, p. 5), Zhao *et al.* (2025, p. 3), Zhao *et al.* (2023, p. 2), Cheng; Liang; Chu (2024, p. 3), Fu; Liu; Hu (2018, p. 118), Alomarah; Yuan; Ruan (2023, p. 2), Lim *et al.* (2024, p. 2)

a) MMs mecânicos auxéticos

Li et al. (2024) estudaram MMs auxéticos para obter materiais com capacidade de absorção de energia e coeficiente de Poisson negativo, parametrizando as dimensões da célula, isto é, variando sua espessura, comprimento e distância entre determinados pontos. O mecanismo de deformação e as características de compressão no plano são examinados por meio de métodos experimentais e de simulação numérica por *software* de elementos finitos. A Figura 4 ilustra o modelo geométrico utilizado e suas variáveis. As placas superior e inferior foram modeladas como corpos rígidos analíticos em 3D, enquanto o MM foi modelado como um corpo deformável em 3D. Eles utilizam uma técnica de impressão 4D de fotocura LCD (*liquid crystal display*) para fabricar as amostras com alta precisão e o material usado foi uma resina fotossensível com capacidade de armazenamento de forma, de modo que os MMs fabricados possuíam efeito de memória de forma.

Nos ensaios de compressão, os corpos de prova exibiram Poisson negativo, sendo mais evidente quando submetidos à compressão na direção X do que na direção Y. Os resultados indicaram que o mecanismo de deformação dominante durante a compressão no plano é a deformação por flexão, o que evita a ocorrência de oscilação de tensão durante o processo de deformação. Além disso, os MMs preparados pela tecnologia de impressão 4D podem ser transformados de uma configuração para outra, por meio de um banho de água quente na peça, sendo programáveis e reconfiguráveis, expandindo sua faixa de aplicação. Os autores pontuaram que os valores numéricos (*software*) e experimentais (ensaios) apresentaram algumas discrepâncias devido a eventuais defeitos de fabricação (assincronia na deformação) em comparação com o modelo de elemento finito ideal.

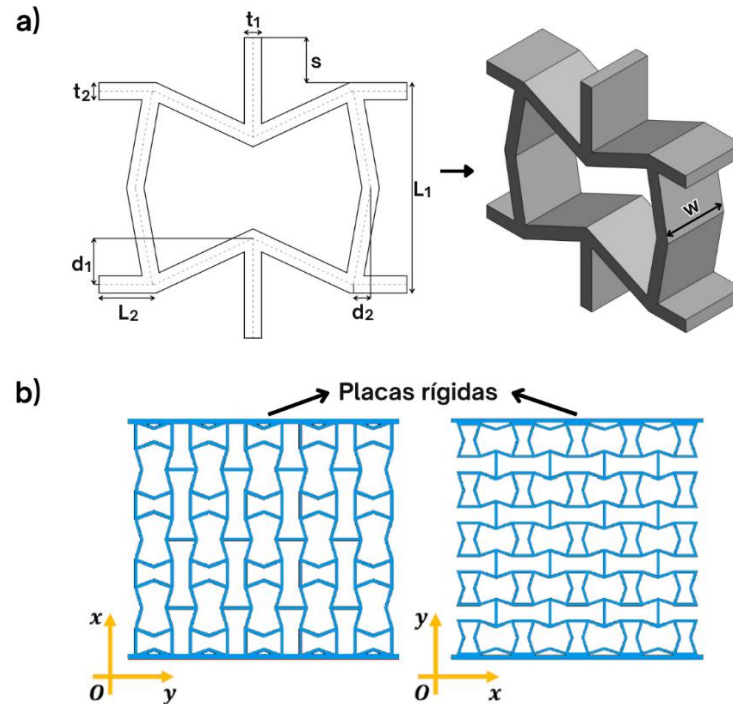


Figura 4: MM auxético. Em a) geometria da célula de MM em planta e em vista em 3D. Em b) MM auxético durante a compressão ao longo das direções X e Y

Fonte: Adaptado de Li et al. (2024, p. 3)

b) MMs mecânicos em rede/malha

Baishya; Muthu; Khanikar (2024) projetaram uma rede/malha de melhor desempenho, analisando as propriedades mecânicas dos MMs em rede mais comumente estudados, aplicando diferentes topologias de células unitárias. Ao investigar estudos anteriores para compreender os mecanismos de deformações fundamentais nas malhas, uma nova geometria foi projetada e desenvolvida para superar as propriedades daquelas existentes. O *design* do MM se concentrou, principalmente, para obter um melhor desempenho no módulo de elasticidade, na resistência ao escoamento e na capacidade de absorção de energia. A motivação foi obter um módulo elástico mais alto do que o da malha cúbica simples (SC). Foram avaliadas as características mecânicas quase-estáticas e a deformação por meio de simulações de elementos finitos e através de testes mecânicos para corroborar os resultados numéricos.

A nova geometria incluía a adição de oito placas inclinadas à célula unitária da placa SC, como elementos de reforço estrutural, para aumentar a densidade de energia de deformação, além de furos para melhorar a qualidade da impressão. A célula unitária resultante é chamada de placa SC-octaédrica (SCO) e tem as mesmas dimensões e densidade relativa (40%) que as

da célula unitária da placa SC. A Figura 5 demonstra a disposição da célula SC (objeto de referência) e da SCO. A estrutura da célula SC e da SCO foi fabricada usando fusão em leito de pó com múltiplos jatos (*multi-jet powder bed fusion*) e o material de base foi o PA12 (poliamida 12). Como resultado, a estrutura proposta superou a estrutura SC apresentando um módulo de elasticidade 18,1% maior, resistência ao escoamento 28,0% maior e capacidade de absorção de energia de 23,37% maior. Desse modo, as placas SCO tem potencial para aplicações leves que exigem alta rigidez e alta resistência.

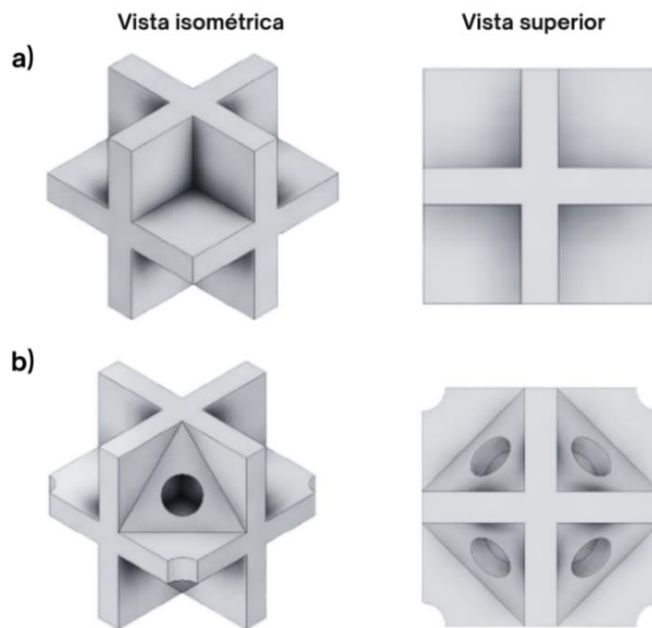


Figura 5: Célula unitária do MM mecânico em rede. Em a) célula em SC. Em b) célula em SCO

Fonte: Adaptado de Baishya; Muthu; Khanikar (2024, p. 3)

c) MMs mecânicos origami

O trabalho de McInerney et al. (2025) buscou expandir a investigação das formas de origami baseadas em paralelogramos para obter mosaicos mais genéricos com tesselações quase-cilíndricas, em vez de quase-planas, dispondo-se de mosaicos com base em trapézio (TBO) rigidamente dobrável. O objetivo foi analisar como o MM se comportaria sob deformações em larga escala, em toda a extensão do origami, mas com pouca energia envolvida. Os autores desenvolveram uma classe de padrões de vinco de origami denominada de *Arc-Morph*, exibindo duas isometrias lineares, ao invés de uma isometria rígida e duas isometrias não rígidas como é usualmente utilizada, que preservam a geometria quase cilíndrica enquanto alteram seu raio, altura e eixo de simetria, Figura 6.

Foram realizados experimentos em escala laboratorial para uma amostra fabricada em polipropileno a partir de uma máquina de fresagem CNC (controle numérico computadorizado) para validar as formulações analíticas. Os resultados indicaram que para as deformações de baixa energia em larga escala dos origamis TBO, foram identificados que a geometria pode ser empregada primordialmente para o controle dos modos de cisalhamento e modo de oscilação volumétrica (expansão/contração) das superfícies e que a atribuição de montanhas/vales (vincos para cima ou para baixo) desempenham um papel fundamental no comportamento da estrutura em sua altura-raio da mesma forma em origamis baseado em paralelogramo controlando o coeficiente de Poisson. Assim, a pesquisa oferece novos *insights* no *design* de MMs origamis.

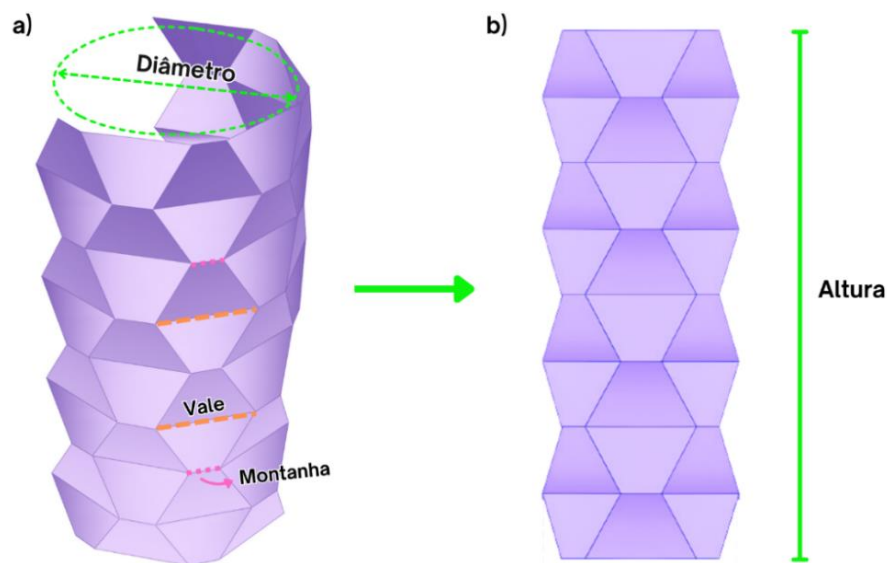


Figura 6: MM origami com células trapezoidais da classe *Arc-Morph*. Em a) vista em perspectiva. Em b) vista frontal

Fonte: Adaptado de McInerney et al. (2025, p. 5)

d) MMs mecânicos pentamodais

Guo et al. (2023) demonstraram novos arranjos de MMs pentamodais, ao agrupá-los em uma disposição em “sanduíche” (em camadas), com duas placas de reforço na parte superior e inferior, afetando a resposta elástica da estrutura geral, tornando-a distinta de trabalhos prévios. Dentre os parâmetros que influenciam diretamente a eficiência desses MMs, pode-se citar, especialmente, o diâmetro d das conexões dos vincos, representando o menor tamanho que limita a fabricação, carecendo de impressão de ultraprecisão e de alto custo. Em termos de *design* e fabricação, os estudos dos pentamodais se concentraram principalmente na estrutura clássica do tipo diamante e na rede cúbica clássica de face centrada (FCC). Entretanto, a relação

de compressão e cisalhamento mostrava-se muito limitada. Dessa forma, os autores compararam uma geometria convencional de FCC (S-FCC-PM1) com duas configurações de MMs pentamodais do tipo cúbica simples (SC), denominadas de S-SC-PM2 e S-SC-PM3 (*sandwich-simple cubic-pentamodal*), Figura 7.

Foram fabricadas amostras por meio de fusão seletiva a *laser* (*selective laser melting*, SLM) e o pó de Nylon PA2200 foi escolhido como material de base. Como resultado, as estruturas propostas apresentaram taxas extremamente altas de compressão e cisalhamento, tanto nas análises numéricas em elementos finitos, quanto nos em ensaios experimentais, verificando a validade mutuamente. Assim, o estudo superou as limitações da relação entre compressão e cisalhamento e do tamanho crucial d de fabricação, a partir de impressão de baixo custo, permitindo o uso de MMs pentamodais para aplicações práticas. Quando comparados às estruturas sanduíche convencionais, que se concentram em baixa densidade, alta rigidez e alta resistência, os MMs pentamodais sanduíche oferecem aplicações como o controle de vibração, isolamento mecânico seletivo, biomateriais porosos, além de sistemas de proteção sísmica passiva (Guevara-Corzo *et al.*, 2022).

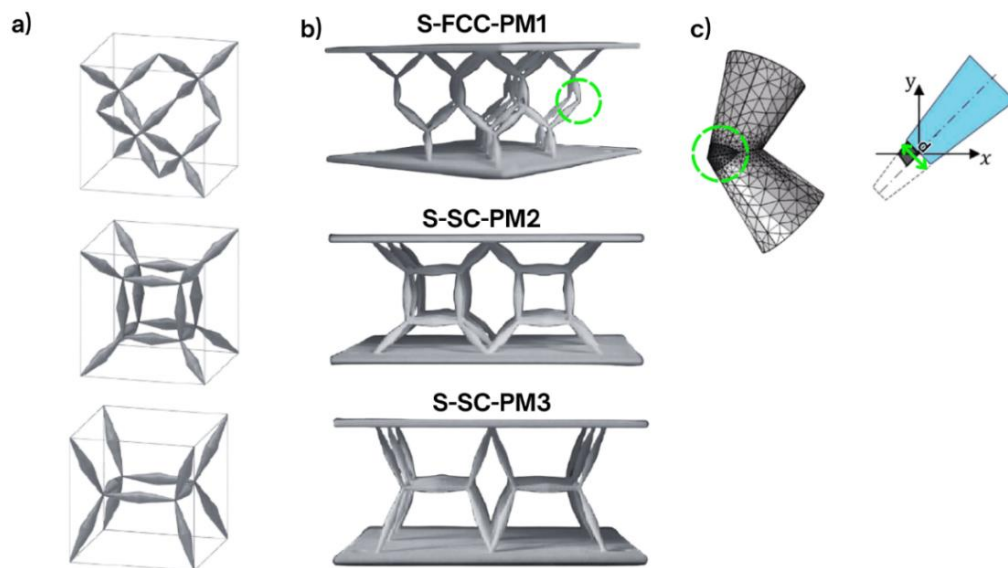


Figura 7: Esquema MM pentamodal. Em a) geometria da célula unitária. Em b) painel em sanduíche. Em c) representação da conexão das juntas e diâmetro "d"

Fonte: Adaptado de Guo et al. (2023, p. 2-3)

e) MMs mecânicos chirais

Wang et al. (2021) investigaram o desempenho de MMs tetra-chirais (quatro conexões) para alcançar maiores valores de rigidez. Eles integraram um sistema 2D do tipo fita-mola (*tape spring*), que se dobra facilmente, a um tubo cilíndrico multicamadas para ajustar de forma parametrizável a rigidez, por meio da alteração dos valores geométricos, Figura 8. Foram realizados estudos analíticos, computacionais e experimentais. O tubo cilíndrico tetra-chiral dispunha de duas conexões axiais mola-fita e duas planas. Uma carga de deslocamento compressivo uniaxial foi aplicada na parte superior do tubo, enquanto a parte inferior permaneceu fixa. O MM foi fabricado com nylon (PA12) usando uma impressora 3D de sinterização seletiva a laser (*selective laser sintering*). O desempenho estrutural pode ser programado alterando-se principalmente a espessura e o ângulo de torção da estrutura multicamadas.

Constatou-se que a incorporação de um arranjo fita-mola nos tubos cilíndricos apresentou acoplamento de compressão-torção – as duas deformações ocorrem simultaneamente –, características de deformação de multiestabilidade¹ e alto módulo de elasticidade, possibilitando a expansão dos cenários de aplicação. Estruturas com multiestabilidade têm muitas propriedades, como absorção de energia, isolamento de vibração e reconfiguração de forma. Além disso, a presença de uma seção transversal curva promove alta rigidez, podendo ser dobrada em outro estado estável. Consequentemente, os MMs chirais podem ser utilizados em muitos campos, como aeroespacial, fabricação de automóveis, equipamentos médicos, dentre outros. Ainda que aceitável, houve uma certa discrepância entre as simulações e os resultados experimentais devido a problemas como a porosidade na impressão 3D, que resulta em defeitos estruturais.

¹ Em termos simples, a multiestabilidade é a capacidade de um sistema de atingir vários estados estáveis sob as mesmas condições externas (Albert; Robeva, 2015). Portanto, um MM multiestável pode adquirir várias formas (flexionar, rotacionar etc) e permanecer neste estado de maneira estável, sem a presença de uma força constante.

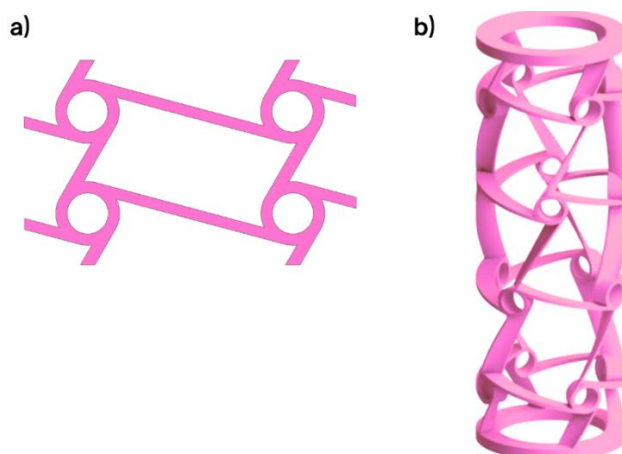


Figura 8: Esquema do MM chiral. Em a) duas células 2D do tipo tetra-chiral. Em b) tubo cilíndrico com multicamadas tetra-chirais

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2021, p. 2, 4)

f) MMs mecânicos biomiméticos

Tan et al. (2023) avançaram na pesquisa sobre as propriedades de rigidez negativa nos MMs mecânicos ao se inspirarem na estrutura interna das almofadas de cães e gatos, presentes em suas patas. Como consequência da evolução, as almofadas das patas têm boa capacidade de amortecimento, sendo flexíveis e com um formato convexo macroscópico, se assemelhando a uma estrutura de favo de mel. A partir de *software* de elementos finitos, ensaios experimentais e com a fabricação de amostras por meio do método de moldagem por gelificação² (*gel-casting method*) com poliuretano termoplástico, os autores projetaram um novo MM mecânico com rigidez negativa (NSMM) com maior capacidade de adaptação a formatos e propriedades de dissipação de energia programáveis, como é possível ver pela Figura 9. As propriedades mecânicas do NSMM podem ser programadas com o ajuste da cavidade de ar presente em sua estrutura.

Os NSMMs propostos foram comparados com materiais tradicionais típicos de absorção de energia, como o plástico bolha e a esponja. Eles apresentaram melhor absorção e dissipação de energia do que o plástico bolha e se aproximaram e até superaram as do material esponjoso. Além disso, foram realizados experimentos de impacto a fim de analisar o desempenho de

² Esse processo consiste na geração um gel que é depositado em um molde apropriado, se solidificando e sendo removido do molde sob condições controladas e seco para produzir um espécime com propriedades mecânicas excepcionais (Yüzbaşı; Graule, 2021).

amortecimento das amostras. O coeficiente de amortecimento do plástico bolha permaneceu praticamente constante, o da esponja aumentou gradualmente com a energia de impacto e os NSMMs possuíram maior coeficiente de amortecimento relativo, independentemente da variação da energia de impacto. Portanto, o MM desenvolvido mantém quase todas as vantagens dos NSMMs tradicionais, podendo ser ajustável, mais fácil de dobrar, sendo utilizado desde o empacotamento de mercadorias, proteção contra impactos em tênis esportivos, até mesmo como isoladores de vibração.

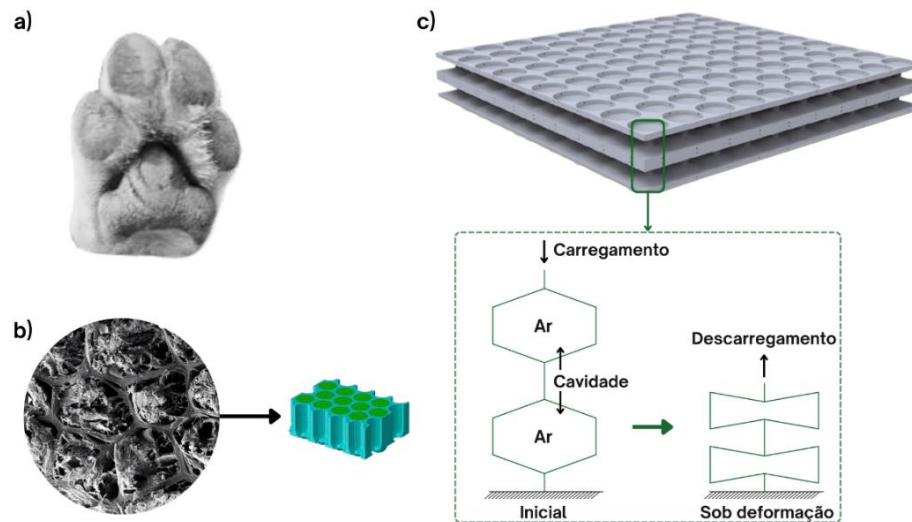


Figura 9: MM biomimético. Em a) estrutura anatômica da almofada da pata de um cachorro. Em b) vista microscópica (formato favo de mel). Em c) representação esquemática do funcionamento do mecanismo de amortecimento presente na pata

Fonte: Adaptado de Tan et al. (2023, p. 2) e Miao et al. (2017, p. 1890, 1895)

g) MMs mecânicos multifuncionais

Por último, inspirados pela variação do padrão origami Miura-ori, Lin et al. (2020) exploraram MMs multifuncionais para produzir, simultaneamente, dispositivos em microescala que tivessem a capacidade de recuperação de formato sem que houvesse a falha prematura causada por concentrações de tensão nas junções dos membros. A arquitetura específica de origami baseia-se no acoplamento de tubos de Miura-Ori em um conjunto alinhado/“zíper” que pode ser desdobrado nas direções X e Y mas não na direção Z, impedindo que a estrutura se dobrasse quando comprimida, Figura 10. Os autores projetaram dois tipos de geometrias (A e B), variando o ângulo inicial ao qual eram dobradas, a partir de dois tubos espelhados de Miura-Ori. Os MMs foram fabricados por meio de escrita direta a *laser 3D* (*3D direct laser writing - DLW*).

Os resultados tanto em elementos finitos quanto analíticos, apontaram que a configuração A apresentou fortes propriedades mecânicas anisotrópicas (variam em diferentes direções), coeficiente de Poisson negativo, capacidade de restauração do formato e maior rigidez ao longo da direção Z. Já a configuração B, exibiu auxeticidade reversível, isto é, o sinal do coeficiente de Poisson apresentou alteração durante a deformação. As características anisotrópicas e de auxeticidade podem ser aproveitadas para interagir com a orientação de ondas mecânicas, ao amortecimento de vibrações e à absorção de energia. Vale ressaltar que o efeito multifuncional pode ser derivado de diversas geometrias (chiral, auxética, biomimética etc), de diversas funções (flambagem, torção, camuflagem acústica etc) ou uma junção de ambos.

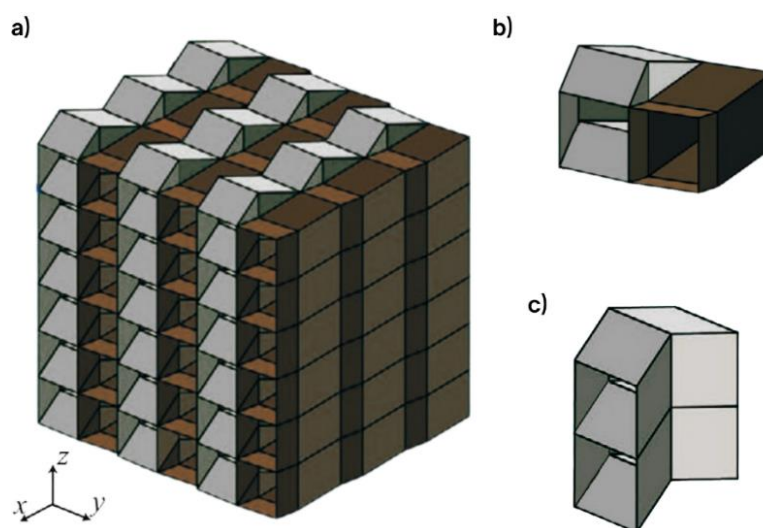


Figura 10: Esquema do MM multifuncional. Em a) arranjo geométrico do MM em um conjunto alinhado/zíper. Em b) célula unitária zíper (disposição horizontal). Em c) célula unitária alinhada (disposição vertical)

Fonte: Adaptado de Lin et al. (2020, p. 2)

Tendo em vista as tipologias introduzidas, é possível identificar que os tópicos envolvendo os MMs mecânicos se concentram principalmente em, mas não se limitam a: absorção energética, amortecimento ou dissipação de perturbações na estrutura, aumento da rigidez, capacidade de resiliência de formato, possibilidade de conceber geometrias para resistir a diversos esforços e habilidades de deformabilidade sem atingir a falha do material. Assim, dentre as diversas características expostas, aquela que se adequa de maneira coesa a proposta é a aplicação de um MM chiral que atue como um mitigador de vibrações, a partir do redirecionamento das ondas. A ideia é que este MM converta as perturbações verticais (longitudinais) em horizontais, evitando suas transmissões ao selim e, conseqüentemente, oferecendo maior conforto ao ciclista.

3.2 Definições e etapas da avaliação do ciclo de vida

A avaliação do ciclo de vida teve seu início na década de 1960, quando as preocupações com as limitações de matérias-primas e recursos energéticos despertaram o interesse em encontrar maneiras de contabilizar o uso de energia e de recursos (Vigon *et al.*, 1994). Um fato marcante no percurso histórico³ da ACV, foi quando a empresa Coca-Cola financiou um estudo para comparar o consumo de recursos e as liberações ambientais associadas a diferentes tipos de embalagens de refrigerante (Jensen *et al.*, 1997). Desde então, diversos líderes globais do setor e institutos educacionais – tanto individualmente quanto em conjunto com organizações como UNEP (*United Nations Environment Programme*), USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), IVL (*Swedish Environmental Research Institute*), EU (*European Union*), Universidade de Chalmers, Universidade de Leiden, dentre outros –, têm desempenhado um papel relevante no tema e ajudado a desenvolver normas juntamente com a Organização Internacional de Normalização (ISO) (Pati, 2022).

A ACV possibilita estimar os impactos ambientais cumulativos resultantes de todos os estágios do ciclo de vida do produto/serviço, muitas vezes incluindo impactos não considerados em análises mais tradicionais, como a extração de matéria-prima, o transporte de material ou o descarte final do produto (EPA, 2006). A metodologia da ACV segue as normas ISO 14040:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) e ISO 14044:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*). No Brasil, as normas foram transcritas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a NBR ISO 14040:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura) e NBR ISO 14044:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações). A NBR ISO 14040:2009 estabelece as etapas nas quais um estudo de ACV é composto, sendo elas: (a) definição de objetivo e escopo, (b) análise de inventário, (c) avaliação de impactos e (d) interpretação (ABNT, 2009a), Figura 11.

³ Uma cronologia completa do desenvolvimento da ACV pode ser encontrada em Pati (2022).

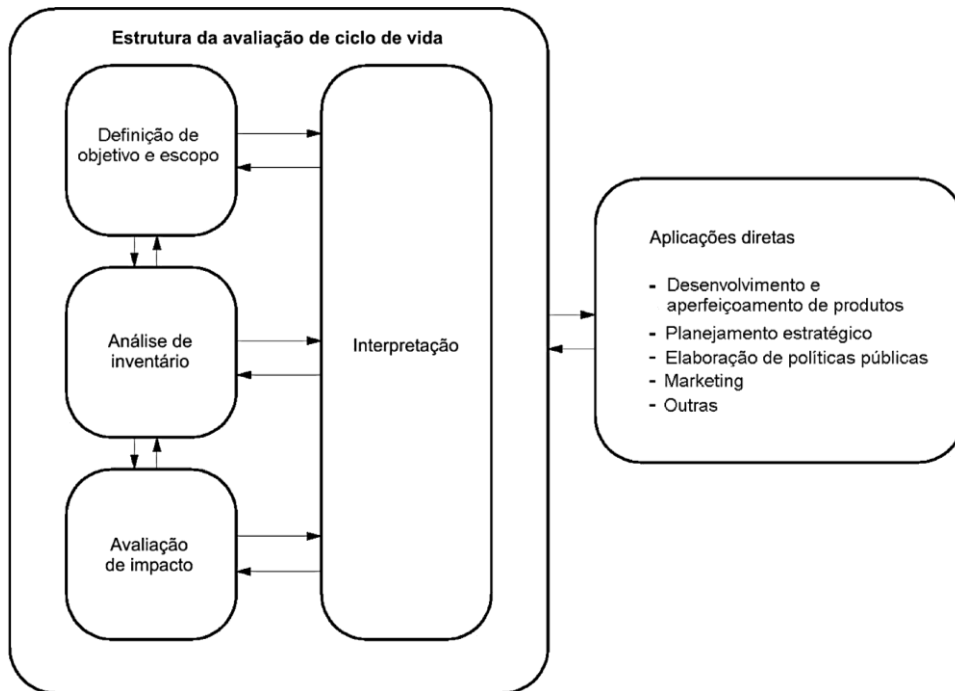


Figura 11: Etapas de uma ACV

Fonte: ABNT (2009a, p. 8)

a) Definição de objetivo e escopo

A primeira etapa de uma ACV é a delimitação de seu objetivo e a caracterização de seu escopo. O objetivo do estudo é formulado em termos da pergunta exata, do público-alvo e da aplicação pretendida, já o escopo do estudo é definido em termos de cobertura temporal, geográfica e tecnológica, e o nível de sofisticação do estudo em relação ao seu objetivo (Guinee *et al.*, 2002). Aqui são definidas a função, a unidade funcional, os fluxos de referência e as fronteiras do sistema. A função é determinada em termos do uso final de um sistema de produto específico ou de uma necessidade ou meta final, isto é, para qual propósito servirá. A unidade funcional é a tradução das especificações do produto, mencionando seu desempenho esperado, incluindo a magnitude da função, sua qualidade e sua duração (Leroy-Parmentier; Wiche; Sonnemann, 2024). Já o fluxo de referência, corresponde a quantificação das saídas de processos, em um dado sistema de produto, necessárias para realizar a função expressa pela unidade funcional (ABNT, 2009a).

Em relação às fronteiras, definem os processos elementares a serem incluídos no sistema (ABNT, 2009a), ou seja, estabelece os fluxos que estão sendo fornecidos por outros sistemas de produtos e as contribuições ambientais que entram (da natureza) ou saem (para a natureza). Elas podem ser delimitadas como sendo (Dicks; Hent, 2015):

- Do berço ao túmulo (*Cradle-to-grave*): leva em conta todos os estágios do ciclo de vida que descrevem um processo, desde a aquisição de recursos, a fabricação, o uso e o descarte, além de todas as etapas de transporte.
- Do berço ao portão de fábrica (*Cradle-to-gate*): considera-se desde a produção da matéria-prima até a fabricação do produto final. Usualmente é utilizado para comparar processos na mesma empresa.
- Do portão de fábrica ao portão fábrica (*Gate-to-gate*): representa um ciclo de vida parcial que exclui o estágio de aquisição de matéria-prima, limitando-se geralmente a um único processo em uma única instalação de fabricação.
- Do portão de fábrica ao túmulo (*Gate-to-grave*): avaliam-se apenas os estágios do ciclo de vida que se encontram após a fabricação do produto, isto é, seu uso, descarte e a reciclagem.
- Do berço ao berço (*Cradle-to-cradle*): geralmente chamado de sistema de ciclo fechado (*closed-loop*), ocorre quando a etapa de descarte no fim da vida útil do produto é um processo de reciclagem, reutilização, remanufatura etc.

A Figura 12 traz a visualização dessas fronteiras.

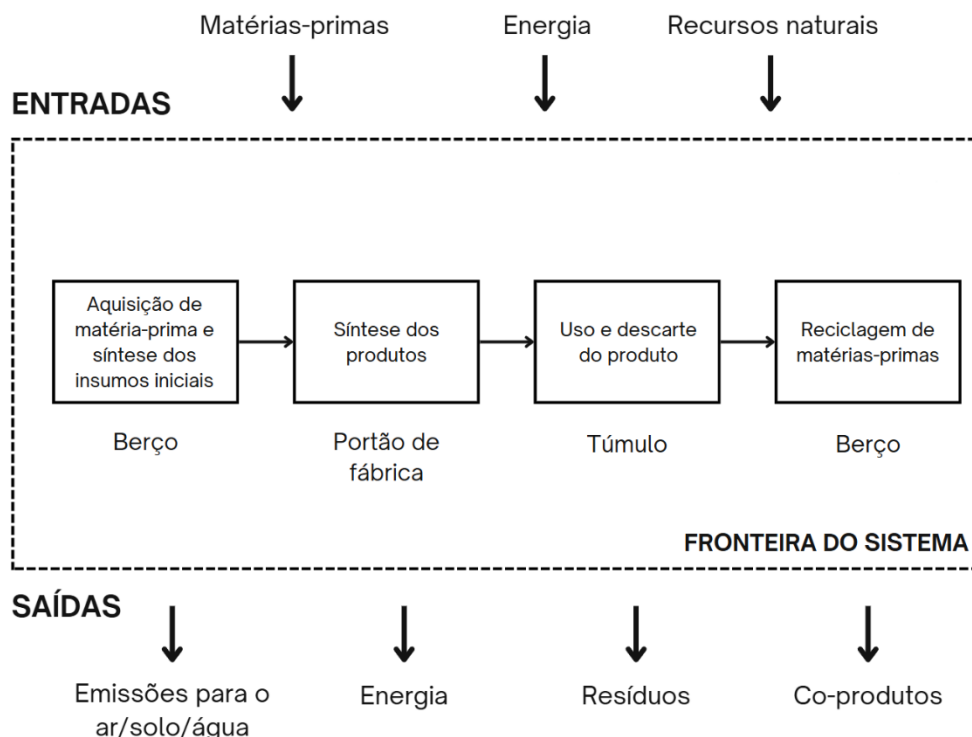


Figura 12: Estágios do ciclo de vida e fronteiras do sistema

Fonte: Adaptado de Dicks & Hent (2015, p. 83)

Dentre as nomenclaturas mencionadas acima, a NBR ISO 14040:2009 estabelece que um sistema de produto corresponde a um conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto. Os processos elementares são ligados uns aos outros por fluxos de produtos intermediários e/ou de resíduos para tratamento, a outros sistemas de produto por fluxos de produtos e ao meio ambiente por fluxos elementares. Os fluxos elementares incluem o uso de recursos e as emissões para o ar, água e solo associados ao sistema. Já os fluxos de produtos compreendem as entradas ou saída de produtos provenientes de um sistema de produto ou com destino a um outro sistema de produto (ABNT, 2009a). Além disso, no escopo do projeto deve-se identificar a tipologia da ACV, isto é, se ela será uma análise atribucional ou consequential. De acordo com Ekvall (2020), a análise atribucional fornece uma estimativa da parcela de impacto ambiental global pertencente ao produto estudado, enquanto a análise consequential fornece uma estimativa de como a produção e o uso do objeto de estudo afetam os ônus ambientais globais.

b) Análise de inventário

A segunda etapa consiste na fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV). Trata-se de um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo, necessários para o alcance dos objetivos em questão (ABNT, 2009b). O ICV inclui três etapas: i) uma cadeia de suprimentos que mostra matérias-primas, processos de fabricação, transportes, usos e gestão de resíduos; ii) os dados⁴ para entrada de material produtos e subprodutos, resíduos sólidos, emissões atmosféricas, para a água e solo; e iii) o cálculo das quantidades relevantes em relação à unidade funcional (Has, 2024). Embora alguns dados de ICV relativos a estágios centrais do ciclo de vida sejam medidos e coletados diretamente, há uma grande quantidade de informações

⁴ Os dados devem contemplar ainda alguns requisitos de qualidade, como: a cobertura temporal, a cobertura geográfica, a cobertura tecnológica, sua precisão/variabilidade, a completeza (porcentagem dos fluxos), a representatividade com relação a amostra de interesse, a consistência no que se refere a metodologia adotada, a reprodutibilidade dos resultados relatados no estudo, as fontes dos dados e as incertezas das informações (ABNT, 2009b).

sobre os processos situados em etapas mais a montante ou a jusante da cadeia que são derivadas de bancos de dados genéricos de ICV (Viere, 2019), como, por exemplo, o Ecoinvent⁵.

Em princípio, uma ACV deve rastrear todos os processos do ciclo de vida de um sistema de produto. No entanto, na prática, isso é impossível, e alguns fluxos devem ser estimados de forma aproximada ou cortados e posteriormente desconsiderados, chamados de “critérios de corte” (*cut-off*) (Guinee *et al.*, 2002). Os critérios de corte se referem à omissão de estágios não relevantes do ciclo de vida e são quantificados em relação à porcentagem de impactos ambientais que se estima que sejam excluídos por meio do corte – por exemplo, “95%” refere-se ao corte de cerca de 5% do impacto ambiental total ou de uma determinada categoria de impacto (ILCD, 2010). Ainda segundo o *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD), se um processo oferece mais de uma função, ou seja, fornece vários bens e/ou serviços (coprodutos), ele é considerado multifuncional (Figura 13), sendo necessário definir os fluxos do sistema de produto que devem ser destinados à unidade funcional produzida.

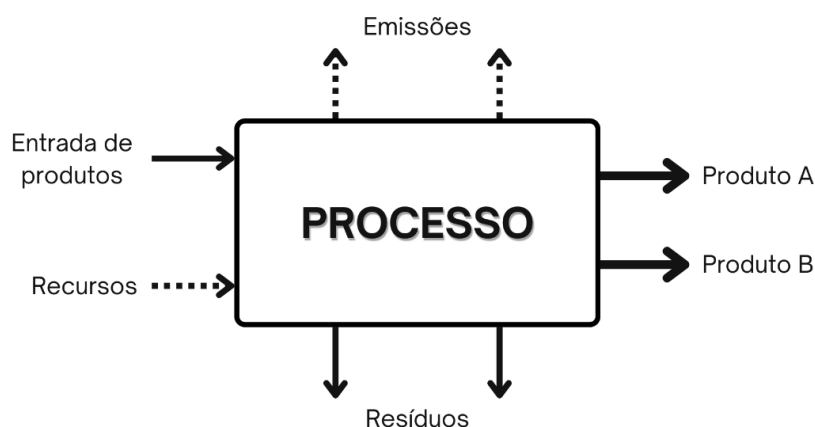


Figura 13: Esquema de um processo multifuncional com a geração de dois coprodutos (A e B). As setas tracejadas representam fluxos elementares.

Fonte: Adaptado de ILCD (2010, p. 73)

Para resolver a questão da multifuncionalidade, a NBR ISO 14040:2009 determina que o procedimento de alocação deve ser adotado (ABNT, 2009a). Contudo, a NBR ISO

⁵ De acordo com (Weidema *et al.*, 2013), a base de dados Ecoinvent compreende informações sobre o inventário do ciclo de vida que abrangem todas as atividades econômicas. Cada conjunto de dados descreve uma atividade ao nível do processo unitário. Esses conjuntos de dados estão interligados, de modo em que todos os insumos intermediários de bens e serviços para um processo unitário, como o consumo de eletricidade, a demanda por matérias-primas ou o uso de máquinas e equipamentos, estejam ligados a outros processos unitários que fornecem esses bens e serviços intermediários.

14044:2009 reitera que é conveniente evitar a alocação, se possível, por meio da abordagem de subdivisão de processos (primeira opção) ou expansão do sistema (segunda opção) (ABNT, 2009b). A subdivisão consiste em decompor o processo em subprocessos monofuncionais com entradas e saídas que podem ser atribuídas a coprodutos individuais – por exemplo, quando os dados operacionais são fornecidos como uma “caixa preta” (*black box*), mas os coprodutos individuais podem ser rastreados até processos separados dentro da instalação (Curran, 2015). No caso da expansão do sistema ou substituição, é matematicamente equivalente a creditar ao sistema de produto estudado a produção evitada da função(ões) secundária que, alternativamente, teria sido produzida e entregue em outro lugar do sistema – por exemplo, ao adicionar outra função para que o sistema seja comparável ou subtraindo funções não necessárias, substituindo-as por outras equivalentes (Bjørn *et al.*, 2018).

Caso não seja possível realizar os procedimentos de subdivisão ou expansão do sistema, a alocação deve então ser executada (última opção). A alocação refere-se ao seccionamento dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto (ABNT, 2009b), imputando os encargos ambientais do ciclo de vida em cada coproduto. Usualmente, a alocação pode ser mássica ou econômica, mas outras unidades de referência podem ser utilizadas. A alocação por massa requer que todas as entradas e saídas sejam divididas de acordo com a proporção de massa dos coprodutos formados – por exemplo, se um processo unitário com dois coprodutos A e B gerar X kg de A e Y kg de B por unidade funcional, então o total de todas as emissões, consumo de energia e materiais auxiliares atribuídos a A pode ser calculado por $Z = X/(X+Y)$ e aqueles associados a B igual a $1-Z$ (Klöpffer; Grahl, 2014). A alocação por valor econômico segue o mesmo princípio daquela por valor mássico, no entanto, deve ser usada com cautela, pois as flutuações no preço dos coprodutos podem alterar os resultados e as conclusões de uma análise, mesmo que não haja alteração na relação física entre eles (Sauer, 2012). A Figura 14 ilustra as abordagens mencionadas que podem ser utilizadas para solucionar a multifuncionalidade.

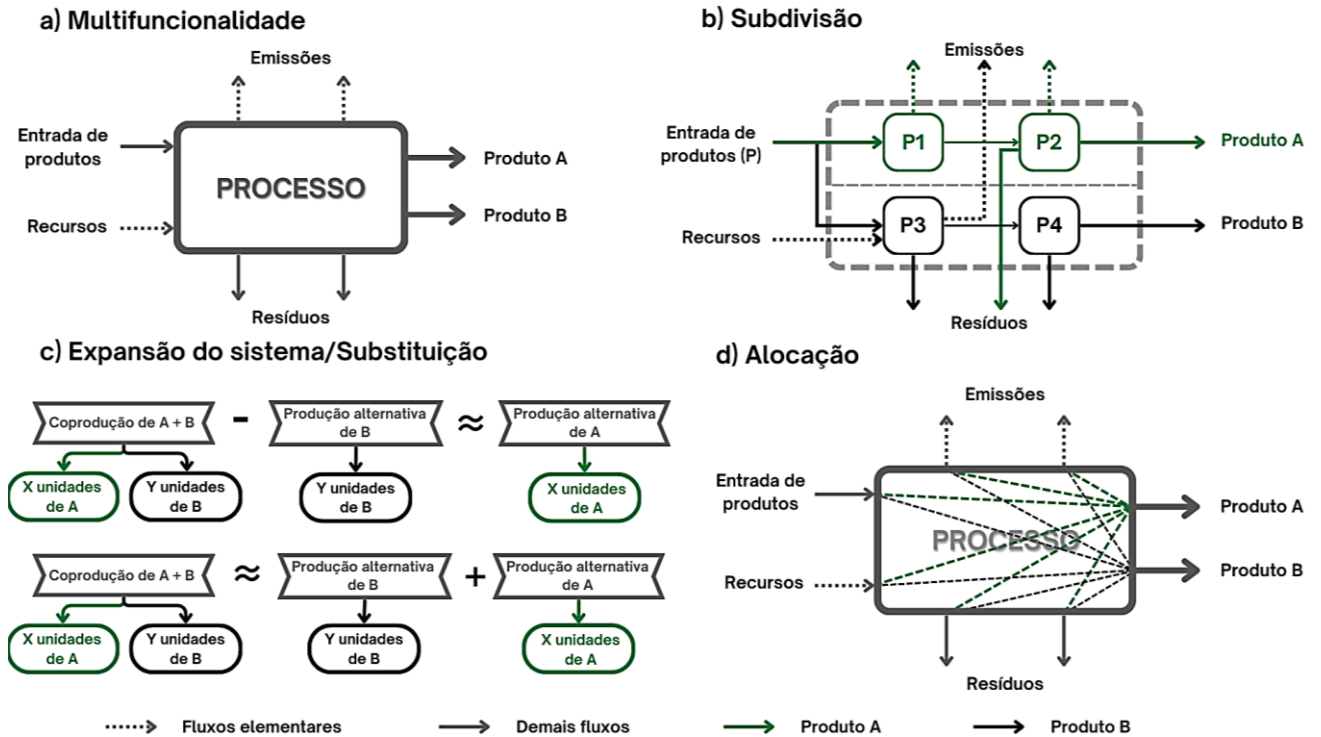


Figura 14: Procedimentos utilizados para resolver a multifuncionalidade (subdivisão, expansão do sistema e alocação)

Fonte: Adaptado de ILCD (2010, p. 73, 76, 79-80)

c) Avaliação de impactos

A terceira etapa corresponde a avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV). O objetivo da AICV é “prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando ao melhor entendimento de sua significância ambiental” (ABNT, 2009a). Ela pretende avaliar a magnitude da contribuição de cada fluxo elementar para um impacto no meio ambiente, de modo que, por exemplo, 1 kg de metano emitido no ar não terá o mesmo impacto na mudança climática que 1 kg de CO₂, mesmo que as quantidades emitidas sejam as mesmas (1 kg), uma vez que o metano é um gás de efeito estufa (GEE) mais potente (Rosenbaum *et al.*, 2018). Assim, uma lista de categorias de impacto é definida e são selecionados modelos para relacionar as interações ambientais a indicadores adequados, podendo ser agrupados e ponderados para incluir os critérios desejados (Guinee *et al.*, 2002).

A AICV apresenta ainda dois tipos de abordagem: *midpoint* ou *endpoint*. Enquanto um indicador *midpoint* associa os resultados do ICV às categorias de impacto sem alcançar a avaliação final do dano ambiental (menor grau de incerteza), os indicadores *endpoint*

contemplam a compreensão do efeito final para a sociedade, como danos à saúde humana, aos ecossistemas e aos recursos naturais (maior grau de incerteza) (Pavan; Mendes, 2024). Além disso, a NBR ISO 14044:2009 atribui três elementos obrigatórios na fase de AICV (ABNT, 2009b):

- i. *seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização*: deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao sistema de produto, levando em consideração o objetivo e escopo.
- ii. *correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação)*: organiza e combina os resultados do ICV que sejam exclusivos para uma ou mais categoria (s) de impacto. Algumas das categorias de impacto podem ser vistas pela Figura 15.
- iii. *cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização)*: envolve a conversão dos resultados do ICV para unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos dentro da mesma categoria de impacto utilizando fatores de caracterização.



Figura 15: Divisão das categorias de impactos e estágios associados (*midpoint* e *endpoint*)

Fonte: Adaptado de ILCD (2010, p. 108)

Por fim, alguns elementos optativos também podem ser utilizados em uma AICV, com o intuito de auxiliar na posterior interpretação e demonstração dos resultados, sendo eles (EPA, 2006):

- *normalização*: normaliza os resultados do indicador da categoria dividindo-os por um valor de referência selecionado, como uma média, um valor mais alto etc;
- *agrupamento*: atribui categorias de impacto em um ou mais conjuntos para facilitar a interpretação dos resultados em determinadas áreas de importância;
- *ponderação*: atribui pesos ou valores relativos às diferentes categorias de impacto com base em sua importância ou relevância percebida.

d) Interpretação

A última etapa consiste na interpretação dos resultados obtidos no ICV e na AICV. Sua função é garantir deduções apropriadas e possíveis de serem sustentadas pelas conclusões, além de oferecer uma explicação correta dos resultados no contexto da estrutura metodológica escolhida e da base de dados utilizada (Grahl; Gensch, 2023). Ela pode ser dividida em três principais fases interligadas, sendo elas: a identificação de problemas significativos, como estágios críticos do processo ou categorias de impacto; confirmação/invalidação de suposições e avaliação de seus impactos nos resultados, considerando completeza, sensibilidade e consistência⁶; e conclusão do estudo, limitações e recomendações (ABNT, 2009b; Leroy-Parmentier; Wiche; Sonnemann, 2024). A fase de interpretação, portanto, não costuma acrescentar novos parâmetros aos procedimentos de cálculo, mas é dedicada a diferentes tipos de cruzamento de dados, principalmente no que concerne a realização de uma análise de incerteza e sensibilidade (Heijungs, 2024).

A análise de incerteza é necessária quando há um nível de imprecisão resultante da natureza esparsa e inexata das informações disponíveis no banco de dados, além das suposições

⁶ A completeza assegura que todas as informações relevantes e os dados necessários para a interpretação estejam disponíveis e completos. A sensibilidade avalia a confiabilidade dos resultados, verificando de que forma eles são afetados por incertezas nos dados, métodos de alocação ou indicadores de categoria. Por fim, a consistência determina se foram aplicadas/analizadas de forma consistente as diferenças na qualidade dos dados, as diferenças regionais e/ou temporais, as regras de alocação e fronteira do sistema e os elementos da avaliação de impacto (ABNT, 2009b).

simplificadas do modelo, como os critérios de corte (Soares *et al.*, 2013). Existem vários tipos de abordagens para lidar com a incerteza, sendo elas (Heijungs; Huijbregts, 2004):

- *abordagem científica*: através de pesquisas, realização de testes de laboratório ou a inserção de outros parâmetros relevantes no modelo de caracterização;
- *abordagem construtivista*: inserindo partes interessadas (*stakeholders*), realizando discussões e votando em um fator de caracterização de consenso;
- *abordagem jurídica*: obedecendo aos órgãos oficiais (como a ISO ou a USEPA);
- *abordagem estatística*: usando métodos de estatística, como a análise de Monte Carlo⁷, para determinar intervalos de confiança e outros indicadores de robustez.

Com relação a análise de sensibilidade, ela pode ser feita por meio de uma espécie de cenário “e se”, em que o valor de diferentes parâmetros de entrada é alterado sistematicamente por meio simulações (por exemplo, simulações de Monte Carlo) (Jensen *et al.*, 1997). Atualmente, há dois tipos principais de métodos, chamados de análise de sensibilidade local⁸ e análise de sensibilidade global. Enquanto a análise local tem como objetivo investigar como uma pequena perturbação em torno de um valor de entrada afeta o valor de saída, a análise global estuda os efeitos de diferentes fatores de entrada variando em uma ampla faixa de incerteza (Wei *et al.*, 2015).

Finalmente, tendo em vista todo esse aporte teórico que culminou na explicação das etapas necessárias para realizar uma ACV, o próximo tópico buscará demonstrar os resultados obtidos em trabalhos anteriores relativos a estudos de ACV comparativa em sistemas tradicionais de fabricação e técnicas de manufatura por impressão 3D, com enfoque no emprego do aço 316L.

⁷ O método Monte Carlo faz uma amostragem aleatória dos valores de variáveis incertas com base na análise probabilística e combina com o método de avaliação de impacto predeterminado para simular, de modo a obter resultados de avaliação de impacto ambiental estatisticamente significativos, refletindo como as incertezas nos dados influenciam os resultados finais (Sun; Ertz, 2020).

⁸ A maioria dos estudos utiliza a análise de sensibilidade local, sendo dividida em “análise de perturbação” (*one-at-a-time*), isto é, um subconjunto dos parâmetros de entrada é alterado um de cada vez para verificar a influência nos resultados, ou em “análises de cenário”, no qual um cenário-base é alterado para avaliar potenciais mudanças induzidas nos resultados (Groen *et al.*, 2014; Saade; Gomes; Silva, 2024).

3.2.1 Aplicabilidade da ACV em sistemas de fabricação por impressão 3D

Em relação aos trabalhos anteriores, conforme já mencionado, dada a ausência de estudos que investiguem a ACV aplicada diretamente a canotes de bicicleta ou a estruturas em MMs, optou-se por concentrar a análise na etapa de manufatura aditiva SLM, enquanto principal processo de fabricação envolvido no desenvolvimento do CMM. Desse modo, Wang et al. (2020) e Peng et al. (2020) investigaram a fabricação de uma válvula hidráulica por aço inox 316L a partir do método de fusão seletiva a *laser* e por manufatura convencional (MC), do berço ao portão de fábrica. Os resultados implicaram que a válvula feita por SLM possui um percentual de impacto ambiental 37,42% menor, podendo chegar a 54% menor com um *design* da peça otimizada, tornando-a mais leve. A eletricidade e a preparação do pó foram os maiores responsáveis pelos impactos.

Guarino; Ponticelli; Venettacci (2020) avaliaram o ciclo de vida da manufatura de arruelas planas em aço 316L a partir de SLM em comparação ao corte a *laser* por CO₂ (CL). Apesar do processo SLM permitir a obtenção de componentes com melhor desempenho mecânico, com um aumento de 15% e 48% na resistência à tração e na dureza, a avaliação dos impactos mostrou que o CL é cerca de 2,5 vezes mais ecológico. O item crítico para o processo SLM é o consumo de eletricidade, que representou mais de 87% do impacto global, seguido pela produção do pó metálico através do processo de atomização por água, com um impacto de cerca de 81%. Uma importante ressalva ocorre em relação ao esgotamento de minerais, que são maiores para o CL devido à possibilidade de reutilizar diretamente uma quantidade maior de material dentro do processo SLM, limitando assim a quantidade total de matérias-primas consumidas.

Swetha et al. (2022) avaliaram o ciclo de vida de dois componentes mecânicos utilizados em uma bicicleta (*sprocket adapter* - adaptador de roda dentada) e em um automóvel (*tie rod* - barra de direção). Em ambos os casos os elementos foram confeccionados por manufatura convencional por fresagem CNC e manufatura aditiva por SLM, com e sem otimização topológica (OT). Adotou-se um limite do sistema do portão de fábrica ao portão de fábrica, sendo o pó de alumínio (para o adaptador de roda dentada) e o pó de aço (para a barra de direção) os materiais empregados na etapa de MA. Dessa forma, para as duas peças fabricadas, respectivamente, a MA com OT tem um impacto 70% e 25% menor na saúde humana e 75% e 28% menor no ecossistema e nos recursos, em comparação com a MC e a MA sem OT. É

importante ressaltar que os resultados por SLM foram obtidos diretamente pelo *software* de impressão 3D.

Kokare; Oliveira; Godina (2023) compararam os impactos ambientais e econômicos associados à produção de uma hélice marítima a partir de fresamento CNC subtrativo puro, manufatura aditiva por arco de arame (WAAM) e fusão seletiva a *laser*. Os autores apontaram que o WAAM apresenta um impacto ambiental cerca de 2,5 vezes e 3,4 vezes menor do que as abordagens de fresamento CNC puro e SLM, respectivamente, devido às melhores eficiências de eletricidade e material. O mesmo ocorreu na avaliação econômica, no qual o WAAM demonstrou menor custo de produção do que os demais métodos utilizados. Além disso, foi destacado que adoção de fontes de energia mais limpas pode diminuir o impacto ambiental geral das técnicas investigadas, principalmente no que tange à adoção da SLM.

Ramadugu et al. (2024) observaram o ciclo de vida de componentes automotivos fabricados por SLM com pó de alumínio e manufatura convencional por fresagem CNC, sendo a fronteira do sistema do berço ao portão de fábrica. Eles demonstraram que a peça fabricada pela MC tem 14,53% menos danos ambientais quando comparadas a SLM, sem otimização. Contudo, ao partir para a fase de otimização, reduzindo a massa da peça, o método SLM demonstrou 21,31% menos danos ambientais em relação a MC. A energia consumida para a fabricação do produto por fusão seletiva a *laser* e para a fabricação do pó de alumínio foram as principais causas da pegada ambiental. Os autores destacaram que os resultados dos impactos ambientais podem variar dependendo da condição escolhida para otimização, ou seja, condições de carga, geometria do componente e material.

Por último, Rizk et al. (2025) utilizaram indicadores de sustentabilidade, a partir da metodologia da ACV, comparando o processo de MA de fusão a *laser* em leito de pó (FALP) com a técnica convencional de usinagem CNC. Os autores utilizaram uma peça cilíndrica genérica de liga de titânio e a fronteira do sistema foi do berço ao portão de fábrica. Eles analisaram três tipos cenários: (i) sem redução na massa da peça; (ii) com redução de 20% na massa da peça confeccionada por FALP; e (iii) considerando o cenário (ii) mais a fase de uso, assumindo que a peça fazia parte de uma aeronave de longo curso. Para o primeiro cenário, a avaliação mostrou que, em termos ambientais, a MC é mais sustentável do que a MA. Contudo, para o segundo cenário, a MA apresentou melhores resultados do que a MC, não apenas reduzindo o uso de material, mas também diminuindo o consumo de energia na produção e fabricação de materiais. Já no terceiro cenário, a MC saiu em vantagem em relação a MA.

Sendo assim, conclui-se, de forma geral, que os trabalhos anteriores que investigaram o ciclo de vida dos processos de manufatura convencional, como, por exemplo, a fresagem CNC, em comparação a técnica de manufatura aditiva de fusão seletiva a *laser*, demonstraram que a otimização geométrica da peça, com conseqüente redução de massa e consumo de eletricidade, pode beneficiar positivamente as cargas ambientais associadas ao processo SLM. Apesar da técnica possuir vantagens em fabricação de peças complexas, sendo capaz inclusive de melhorar aspectos mecânicos, sua principal desvantagem concentra-se no consumo de fontes energéticas; no qual uma alternativa viável seria o uso de energias limpas. Por fim, uma síntese das principais ideias expostas anteriormente pode ser vista pela Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das ideias fundamentais dos artigos apresentados

Título do artigo	Autores	Ano	Contribuições científicas
<i>Life cycle assessment of selective-laser melting-produced hydraulic valve body with integrated design and manufacturing optimization: A cradle-to-gate study</i>	Peng <i>et al.</i>	2020	Confecção de uma válvula hidráulica em aço inox 316L por fusão seletiva a <i>laser</i> (SLM) <i>versus</i> manufatura convencional (MC). A SLM apresenta 37,42% menos impacto ambiental do que a MC.
<i>Environmental assessment of Selective Laser Melting compared with Laser Cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production</i>	Guarino; Ponticelli; Venettacci	2020	Desenvolvimento de arruelas planas por meio de corte a <i>laser</i> por CO ₂ (CL) e SLM. A técnica CL apresenta-se 2,5 vezes mais ecológica. Contudo, o processo SLM se demonstrou benéfico no consumo de matérias-primas.
<i>Comparative study on life cycle assessment of components produced by additive and conventional manufacturing process</i>	Swetha <i>et al.</i>	2022	Impressão de dois componentes mecânicos por MC e manufatura aditiva (MA), com e sem otimização. Em ambas as peças, respectivamente, a MA com otimização teve um impacto 75% e 28% menor no ecossistema e nos recursos, em comparação com os outros processos.
<i>A LCA and LCC analysis of pure subtractive manufacturing, wire arc additive manufacturing, and selective laser melting approaches</i>	Kokare; Oliveira; Godina	2023	Projeto de uma hélice marítima a partir de fresamento CNC, MA por arco de arame (WAAM) e SLM. O método WAAM possui 3,4 vezes menos impactos do que a SLM. A adoção de fontes de energias limpas pode favorecer a SLM.
<i>Environmental life cycle assessment of na automobile component fabricated by additive and conventional manufacturing</i>	Ramadugu <i>et al.</i>	2024	Fabricação de um componente automotivo através de fresagem CNC e SLM. A MC apresentou 14,53% menos danos ambientais. Contudo, ao reduzir a massa da peça, o método SLM demonstrou 21,31% menos danos ambientais em relação a fresagem CNC.
<i>Comparative sustainability assessment of laser powder bed fusion additive manufacturing and conventional machining for Ti-6Al-4V: A multi-criteria decision-making approach</i>	Rizk <i>et al.</i>	2025	Utilização de indicadores de sustentabilidade, a partir da metodologia da ACV, em uma peça por usinagem CNC e SLM. Somente no cenário onde há a redução de 20% na massa do componente a MA possui vantagem em relação a MC.

Fonte: Autoria própria

4. METODOLOGIA

Quanto à abordagem, o trabalho abrangeu aspectos quantitativos e qualitativos. O percurso metodológico misto, portanto, teve um caráter exploratório e descritivo, compreendendo pesquisa bibliográfica e documental. O intuito foi reunir os principais conceitos que norteiam os metamateriais e a ferramenta de avaliação do ciclo de vida. A natureza da pesquisa foi básica, com pretensão generalista, buscando alcançar realidades diversas ao aplicar um estudo que possa ser reproduzido em várias localidades. Assim, buscou-se analisar as vibrações que são transmitidas ao selim de uma bicicleta por meio de um canote convencional (CC) com um sistema de amortecimento integrado em comparação a um canote de metamaterial (CMM).

Os procedimentos incluem modelagem e simulação numérica através dos *softwares* SolidWorks, versão 2019, e Ansys Inc, versão 2023 R1, prototipagem do CMM em impressora 3D metálica e avaliação do ciclo de vida comparativa dos processos de fabricação com o uso do *software* OpenLCA. Adicionalmente, foi proposto um modelo otimizado do CMM com redução da massa total da peça, com o intuito de avaliar eventuais vantagens associadas ao menor uso de material. Finalmente, uma síntese dos resultados é realizada, verificando se a estrutura de MM apresenta desempenho ambiental mais favorável em comparação ao modelo convencional. Buscando facilitar a visualização das etapas do presente trabalho, os subtópicos abaixo apresentam a descrição da execução do projeto. Um fluxograma englobando a estruturação da pesquisa pode ser visto pela Figura 16.

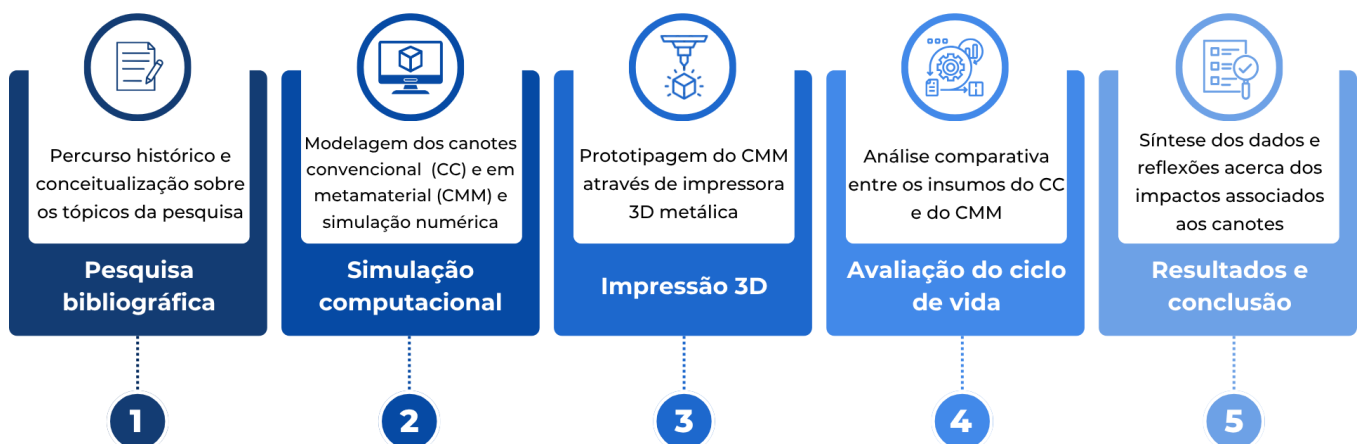


Figura 16: Procedimento metodológico da pesquisa

Fonte: Autoria própria

4.1 Modelagem e simulação numérica

Este tópico visa explicitar os detalhes da análise computacional do canote de bicicleta convencional com amortecimento, já existente no mercado, e do modelo com *design* em metamaterial. Dessa maneira, a seção divide-se em dois momentos, sendo o primeiro relativo as geometrias, parâmetros e configurações utilizadas no CC e, o segundo, com as especificações para o CMM e seu modelo otimizado.

a) Canote convencional com amortecimento (CC)

A primeira etapa da modelagem consistiu em construir a geometria no *software* SolidWorks, tendo em vista que o programa permite elaborar com mais facilidade a projeção de elementos complexos, como furos, roscas, entre outros. Para o CC, procurou-se artigos no Google Acadêmico, na plataforma Scopus e no Google Patents, que apresentassem as dimensões e componentes presentes na peça. Contudo, não foi possível encontrar esses dados, visto que os artigos que analisavam o desempenho de um canote, em sua maioria, utilizavam somente um tubo com seção vazada para representá-lo, e as patentes não disponibilizavam os detalhes de suas medidas, nem das partes integrantes. Dessa forma, foi necessário adquirir a peça. O canote obtido foi aquele da marca Zoom, modelo SPS-405. As informações disponibilizadas pelo fabricante são, somente, o diâmetro externo de 27,2 mm, o comprimento total de 350 mm e o material do corpo do canote em liga de alumínio 6061-T6 categoria aeroespacial.

Para determinar os demais componentes, desmontou-se a peça e, com um auxílio de um paquímetro universal manual da marca MTX, mediu-se os componentes presentes internamente e identificou-se visualmente e em consulta a literatura (Ashby, 2017) os materiais que poderiam ser correspondentes. Logo, os elementos que constituem o CC são: um parafuso em alumínio 6061-T6, um elastômero (borracha sintética) em EPDM (Etileno Propileno Dieno Terpolímero), uma peça em plástico poliamida (escolheu-se a poliamida 6, ou nylon 6), uma mola helicoidal em aço inox 316L, o corpo externo do canote em alumínio 6061-T6 e o tubo interno do mesmo material. É importante destacar que algumas simplificações foram adotadas geometricamente para viabilizar a análise numérica, como filetes, encaixes secundários e detalhes não estruturais. As propriedades do material, contatos e restrições foram mantidas para preservar a fidelidade do comportamento mecânico global.

A Figura 17 e Figura 18 ilustram o canote, seus componentes e principais dimensões. O encaixe canote-selim, presente na parte superior do desenho, possui 50 mm de altura e não foi considerado, visto que o enfoque se deu no comportamento interno do canote, seu sistema de amortecimento e os esforços nos componentes. Assim, o comprimento total do CC ficou estabelecido como sendo de 300 mm. Mais detalhes serão vistos na sequência. O detalhamento das peças individuais pode ser visto nos Apêndices de B a H. A próxima etapa foi a exportação do CC para o *software* Ansys Inc. para prosseguir com as simulações.

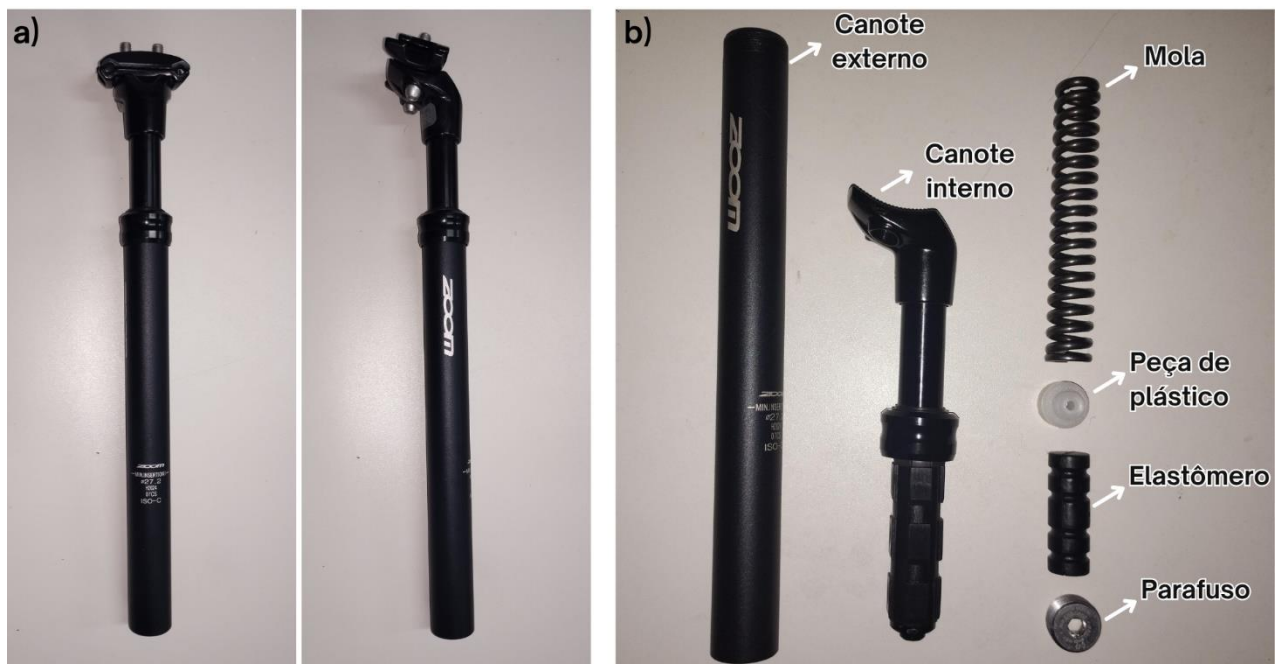


Figura 17: Canote convencional com amortecimento da marca Zoom. Em a) Vista frontal e lateral do canote. Em b) Elementos do canote

Fonte: Autoria própria

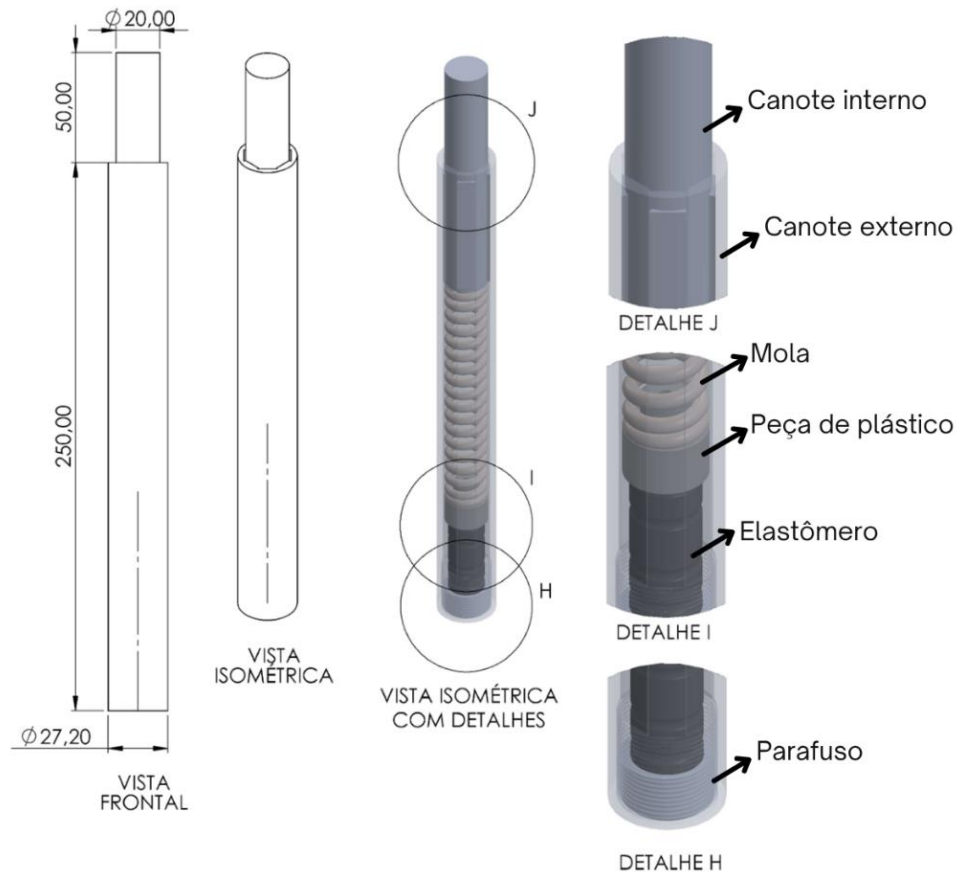


Figura 18: Desenho técnico do canote convencional com amortecimento (em mm)

Fonte: Autoria própria

Em relação a configuração da simulação, alguns ajustes foram necessários no CC. Tal geometria foi inicialmente projetada com todos os componentes internos a fim de estimar a massa e os materiais de cada peça para a ACV. No entanto, para fins de simulação numérica em *software* de elementos finitos, foram feitas algumas modificações na peça com a intenção de reduzir o tempo de processamento computacional e melhorar a qualidade da malha. Especificamente, o parafuso foi substituído por uma condição de pré-tensão equivalente na face superior do elastômero, representando sua função compressiva no sistema. A peça plástica intermediária foi eliminada, adotando-se o contato direto entre o elastômero e a mola, já que sua influência estrutural é mínima no comportamento global. Para isso, o diâmetro do elastômero passou a ser de 20 mm, promovendo melhor contato com a mola.

Além disso, na face inferior do canote interno que está conectada a mola, removeu-se a extrusão com diâmetro menor, permanecendo uma face simplesmente plana. A parte externa do canote interno foi considerada cilíndrica, removendo suas extrusões laterais projetadas para se encaixarem na geometria octaédrica do canote externo. O mesmo ocorreu com o elastômero, que possuía originalmente uma seção com diâmetro variável, passando a ter um perfil cilíndrico

constante. O canote externo, por sua vez, não foi incluído no modelo, pois sua função era predominantemente de suporte e não interferia diretamente no mecanismo de amortecimento. Desse modo, o arranjo observado concentrou-se nos elementos essenciais ao funcionamento do sistema amortecedor, isto é, canote interno-mola-elastômero. O canote foi inclinado a 17° (BSI, 2005) em relação ao seu eixo vertical (primeiro quadrante), conforme especificado pela norma inglesa BS EN 14766:2005 (*Mountain-bicycles – Safety requirements and test methods*). Os contatos entre as faces canote interno-mola e mola-elastômero foram estabelecidos como sendo do tipo fixados (*bonded*). A Figura 19 ilustra as mudanças adotadas no CC.

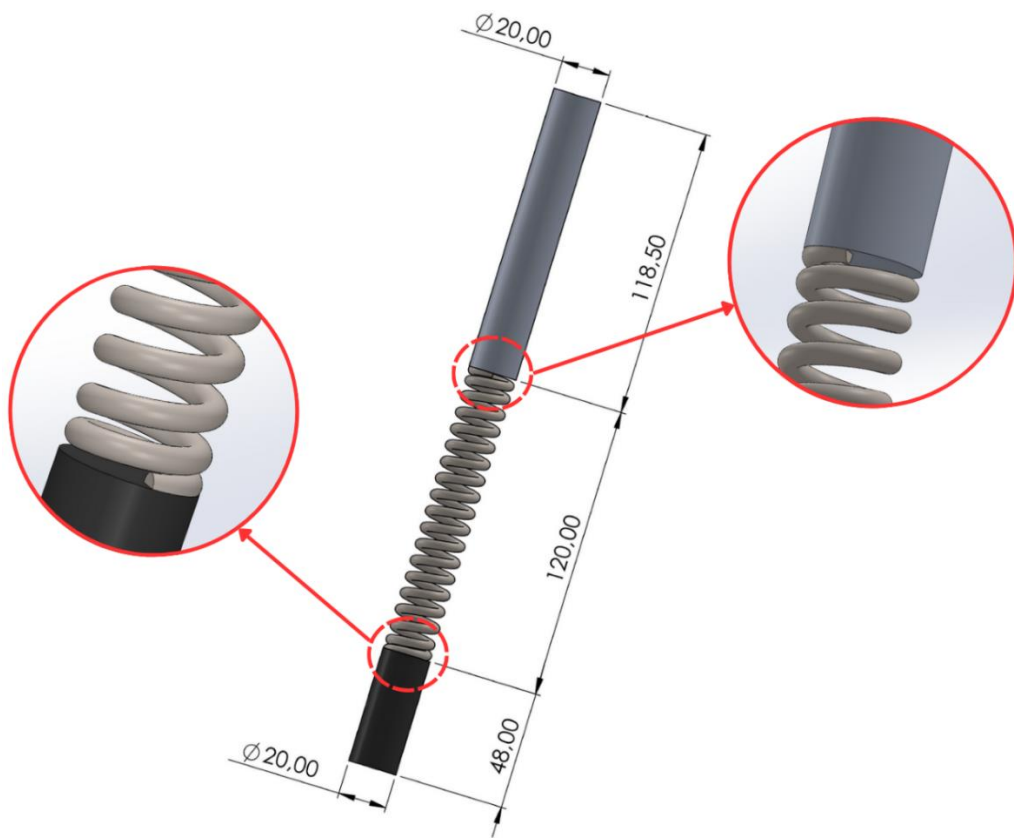


Figura 19: Simplificações utilizadas na etapa de simulação numérica

Fonte: Autoria própria

Para as propriedades dos materiais, foram atribuídos, em sua maioria, com base naquelas disponíveis na biblioteca do SolidWorks. Contudo, no caso do elastômero, o material EPDM continha apenas a densidade especificada. Por isso, foi necessário complementar as informações para estabelecer seu módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν). Zirnstein; Schulze; Schartel (2019) definiram que o EPDM possui E igual a 6,73 MPa. Já Alexopoulos et al. (2024) afirmaram que coeficiente de Poisson para todos os compostos de borracha é próximo de 0,50. Sendo assim, adotou-se um valor de ν igual a 0,49. As propriedades dos materiais estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos materiais

Componente	Material	Densidade - ρ (kg/m ³)	Módulo de elasticidade - E (MPa)	Coefficiente de Poisson - ν
Canote interno	Alumínio 6061-T6	2700	69000	0,330
Mola	Aço inox 316L	8027	82000	0,265
Elastômero	EPDM	1180	6,73	0,490

Fonte: Autoria própria

Partindo para a configuração da malha, foram refinados os tamanhos dos elementos conforme a geometria, a sensibilidade das regiões e a importância funcional de cada componente na resposta mecânica do sistema. Na mola helicoidal, devido à sua geometria complexa e ao fato de ser o principal componente responsável pelo comportamento elástico do sistema, foi aplicado uma dimensão de malha (*body sizing*) de 1 mm. Como o canote interno e o elastômero possuem geometrias regulares e com menor grau de detalhamento, foi utilizada uma configuração de malha global com tamanho de elemento de 2 mm. Ao total, foram gerados 230.532 nós e 110.228 elementos, Figura 20.

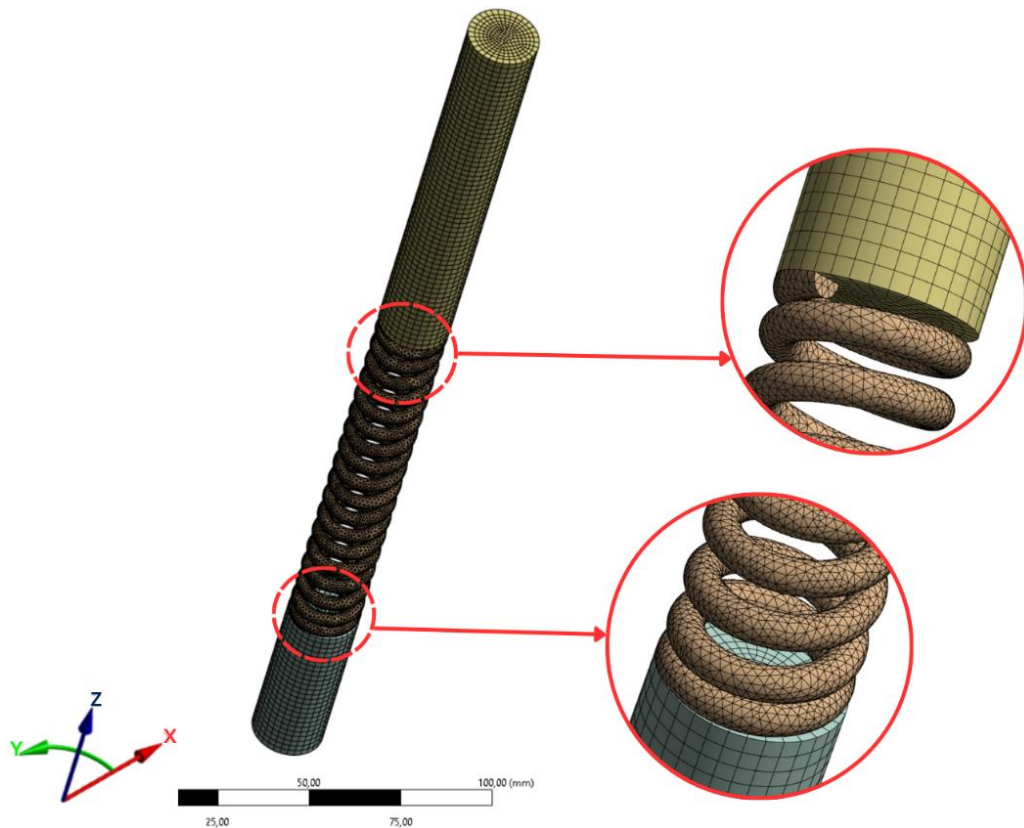


Figura 20: Construção da malha para o CC

Fonte: Autoria própria

Os modelos de análise empregados no Ansys tem início com uma análise estática estrutural (*static structural*), para definir as condições de contorno, sucedida por uma análise modal⁹ (*modal analysis*), para identificar os principais modos que a peça vibra e entender a resposta dinâmica do sistema quando submetido a excitações externas. Por último, performou-se uma análise transiente (*transient structural*), responsável por investigar o comportamento da estrutura a partir de cargas variáveis no tempo, Figura 21. O sinal utilizado nessa última etapa foi uma aceleração vertical provenientes dos estudos de Manilal (2019), no qual foram realizadas medições de aceleração nos principais pontos de interação da bicicleta com o usuário, especificamente no canote e no guidão. O intuito foi utilizar uma carga realista e representativa do carregamento dinâmico a que o sistema está submetido durante o uso. O sinal da aceleração aplicada pode ser visto pela Figura 22.

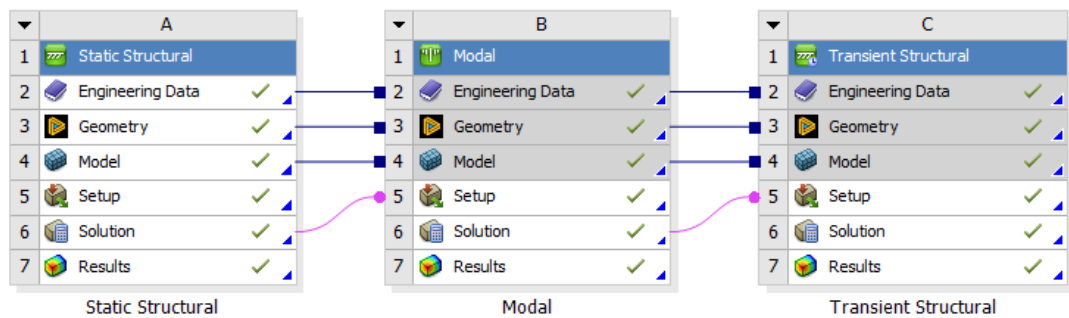


Figura 21: Etapas da simulação no Ansys

Fonte: Autoria própria

⁹ De modo geral, a análise modal é o processo de determinar as características dinâmicas inerentes de um sistema nas formas de frequências naturais, fatores de amortecimento e formas modais (Au, 2017). Essas características regem a resposta de uma estrutura sob cargas dinâmicas, desempenhando um papel importante na investigação e no projeto (Au, 2017). Sendo assim, a análise modal investiga os modos de vibração e as frequências naturais da estrutura.

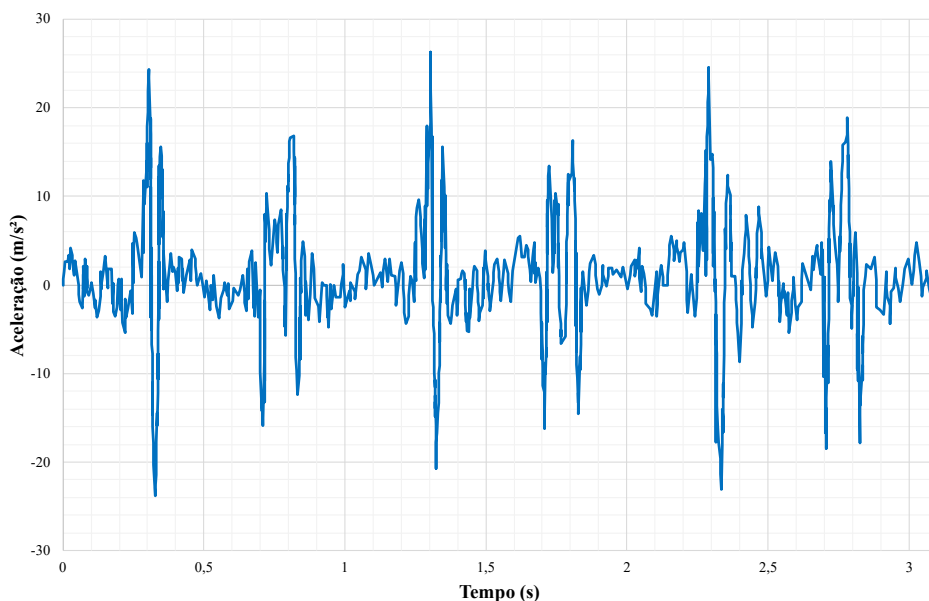


Figura 22: Curva aceleração *versus* tempo para um canote de bicicleta

Fonte: Adaptado de Manilal (2019, p. 23)

Por conta da inclinação estabelecida, foi empregado um sistema de coordenadas cilíndricas, garantindo o alinhamento das restrições com o eixo longitudinal do CC. Assim, para as condições de contorno, definiu-se um suporte fixo na base do elastômero, correspondendo ao encaixe ao quadro da bicicleta, um deslocamento nulo na direção radial (X) na face lateral do canote interno, mantendo livre a direção tangencial (Y) e axial (Z). A mesma restrição foi aplicada no eixo (*edge*) da mola. Para o elastômero, restringiu-se apenas o deslocamento em Y, devido a sua natureza mais flexível e deformável, permitindo movimentação nas demais direções. Além disso, foi imposto um deslocamento prescrito de 1 mm na direção Z na face superior do elastômero, livre nas direções X e Y, com o objetivo de simular o efeito compressivo originalmente exercido pelo parafuso.

Ademais, uma força de 1200 N e um momento de 84000 Nmm foram aplicados na face superior do canote interno¹⁰, conforme especificado na seção 4.14.7 da norma inglesa BS EN 14766:2005, que define os parâmetros de carregamento para avaliação de desempenho mecânico e critérios de falha estrutural (BSI, 2005). Essas cargas representam o efeito

¹⁰ De acordo com a norma utilizada, a carga de 1200 N deve ser aplicada verticalmente, com sua linha de ação posicionada a 70 mm na direção horizontal em relação ao eixo do canote. Para fins de simplificação do modelo e com o objetivo de concentrar a análise no canote, optou-se por aplicar diretamente essa força vertical sobre a face superior do canote interno. Como consequência dessa alteração no ponto de aplicação, foi necessário incluir um momento equivalente de 84000 Nmm, evitando a necessidade de modelar a interface completa com o selim.

combinado de peso do ciclista e esforços dinâmicos decorrentes do real uso do canote. O peso próprio da peça também foi considerado. Uma representação das condições de contorno pode ser vista pela Figura 23.



Figura 23: Condições de contorno para o CC

Fonte: Autoria própria

A análise modal foi conduzida como etapa prévia necessária à realização da análise transiente, uma vez que esta depende da identificação das frequências naturais e dos modos de vibração do sistema para a correta caracterização de sua resposta dinâmica – nesse tipo de abordagem não é necessário considerar todos os modos da estrutura, visto que aqueles com as frequências mais baixas são suficientes para a análise dinâmica (Lee, Yung-Li; Guo, 2012). Assim, a análise modal foi conduzida considerando os seis primeiros modos de vibração, por serem os que apresentaram um fator de participação¹¹ significativo. As frequências correspondentes aos 6 primeiros modos foram 8,79 Hz, 174,39 Hz, 461,54 Hz, 578,58 Hz, 795,08 Hz e 860,31 Hz respectivamente.

Em sequência, realizou-se a análise transiente com o objetivo de observar a resposta do sistema em termos de deslocamento ao longo do tempo, a partir da excitação aplicada. Essa etapa é essencial para avaliar a eficiência dos mecanismos de absorção e propagação de

¹¹ O fator de participação indica o quanto cada modo contribui para a resposta dinâmica total da estrutura, sendo, portanto, um critério fundamental para selecionar os modos mais representativos.

vibrações presentes no CC, servindo para o aprimoramento do projeto do CMM. O número de passos foi 1 (um), o fim do passo foi 3,1 s (fim do sinal) e o intervalo de tempo (*time step*) foi de 0,05 s.

b) Canote de metamaterial (CMM)

Pensando na ideia de amortecimento e redirecionamento de ondas mecânicas dos MMs chirais, o CMM possui célula unitária tipo arco central, isto é, apresenta trechos retos nas extremidades e curvatura côncava no trecho intermediário, permitindo concentração de deformação nessa região. A célula de arco central (CAC) foi projetada com 24 mm de altura, no qual 16 mm corresponde ao comprimento vertical do arco. A seção transversal da CAC apresenta largura total de 2,6 mm e profundidade de 6 mm. Ela foi utilizada para substituir a geometria tubular contínua do CC. As CACs estão rigidamente unidas em ambas as extremidades a bases cilíndricas, que exercem a função de apoio estrutural e ligação com as demais partes do sistema. Essas bases apresentam diâmetro externo de 27,2 mm, diâmetro interno de 15,2 mm e 12 mm de altura. Os procedimentos utilizados para a modelagem do CMM estão descritos a seguir.

A construção da curvatura central da CAC iniciou-se com o traçado de dois trechos retilíneos verticais de 4 mm cada, correspondendo às extremidades superior e inferior da célula. Entre esses segmentos, foi desenhada uma linha vertical de 16 mm, a qual foi destinada a projeção da curvatura da célula. A partir dessa linha, identificou-se seu ponto médio e definiu-se dois pontos auxiliares, ambos deslocados lateralmente 0,6 mm à esquerda, definindo os pontos de controle do arco. Dessa forma, foi traçado um arco de circunferência tangente às extremidades da linha central e aos segmentos retilíneos superior e inferior, resultando em uma geometria côncava e simétrica com a curvatura concentrada na porção central da célula, conforme ilustrado na Figura 24a.

Logo após, utilizou-se a ferramenta de “envolver” (*wrap*) do SolidWorks projetando o contorno previamente desenhado da CAC sobre a superfície de um cilindro com 27,2 mm de diâmetro externo e 15,2 mm de diâmetro interno. Com isso, evitou-se uma extrusão linear plana, e a célula passou a acompanhar a curvatura do CMM. O cilindro utilizado como referência para a projeção radial foi removido por meio de um corte extrudado (*cut-extrude*). Em seguida, a CAC foi distribuída radialmente, fixada sobre uma base com diâmetro externo de 27,2 mm,

diâmetro interno de 15,2 mm e 12 mm de altura. Utilizando um padrão circular (*circular pattern*) com 17 células igualmente espaçadas, formou-se um anel completo ao redor da base, Figura 24b. Esse módulo composto por uma base inferior e CACs foi repetido axialmente oito vezes, formando a sequência base-CACs. A estrutura foi finalizada com uma nona base na extremidade superior, totalizando nove bases e oito conjuntos de CACs empilhados, favorecendo a dissipação de energia. Assim, o CMM possui um comprimento de 300 mm.

O material selecionado para a fabricação foi o aço inoxidável 316L e a massa total da peça projetada foi de 777,80 g. O CMM pode ser visto pela Figura 25. A escala é 1:2, a unidade é em mm.

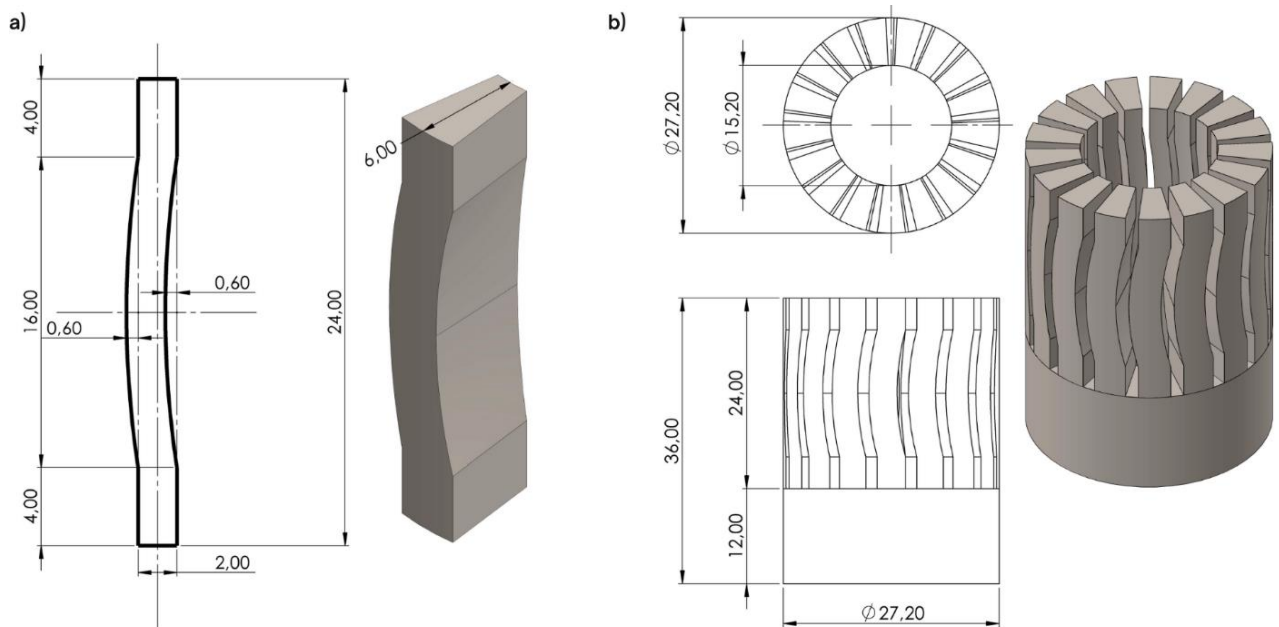


Figura 24: Geometria do metamaterial (em mm). Em a) Dimensões da célula unitária. Em b) Disposição da célula unitária na base de apoio

Fonte: Autoria própria

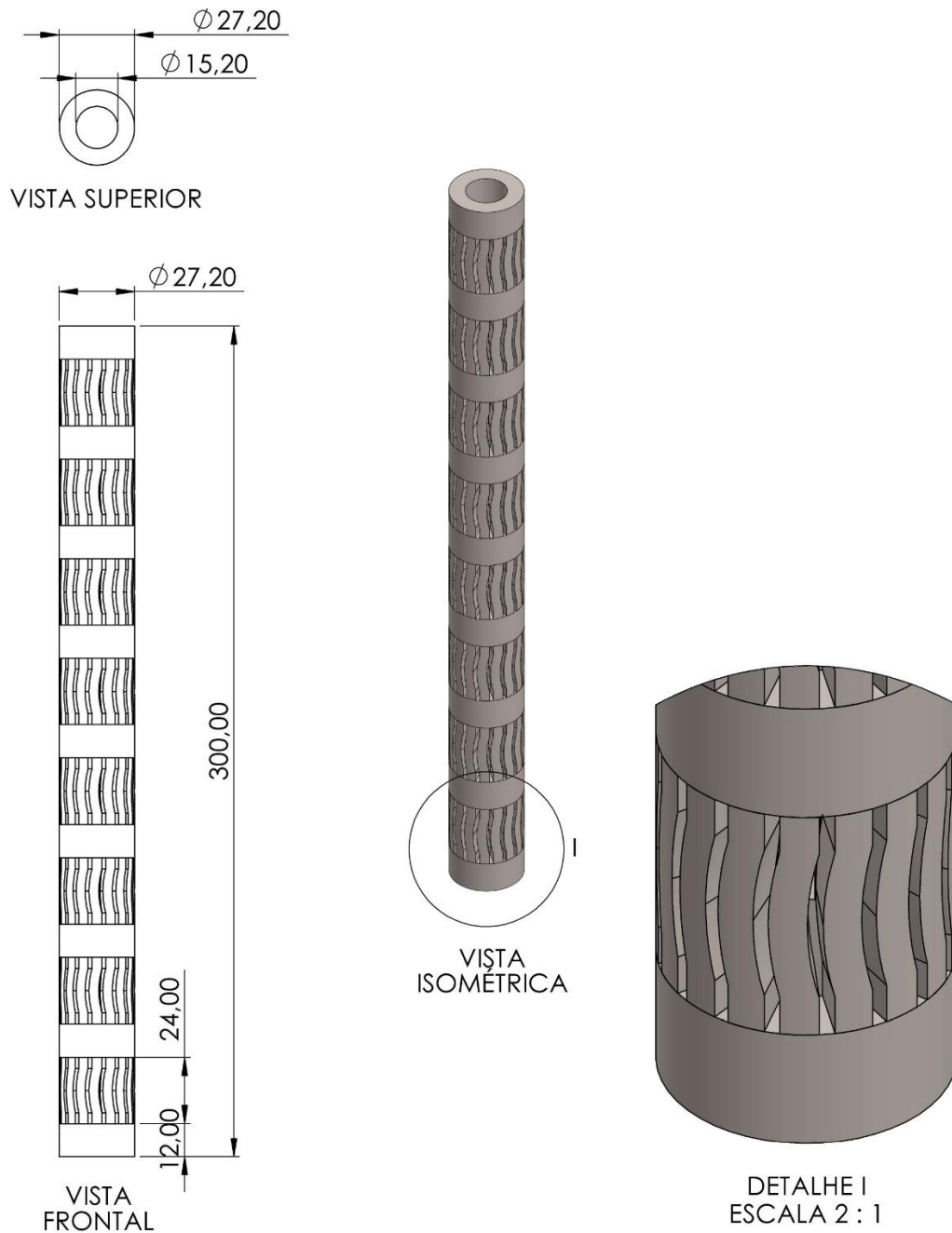


Figura 25: Geometria do CMM

Fonte: Autoria própria

Para a configuração do CMM no Ansys, seguiu-se os mesmos procedimentos aplicados ao CC. Inclinou-se o canote a 17° em relação ao eixo Y global, empregou-se um sistema de coordenadas cilíndricas e dispôs-se das propriedades do aço 316L disponível na biblioteca de materiais do Ansys, o qual representa propriedades mecânicas típicas associadas ao processo

de manufatura aditiva¹². Assim, o aço 316L empregado possui uma densidade de 7954 kg/m^3 , tensão de escoamento de 489 MPa, módulo de elasticidade de 195 GPa e coeficiente de Poisson de 0,25, todas as propriedades para a temperatura de 20°C . Para facilitar o processamento da simulação e demandar menor esforço computacional, toda a geometria do CMM – incluindo as CACs e a base de apoio – foi definida como uma única parte, isto é, todos os componentes do sistema foram integrados em um único corpo sólido contínuo, sem separações. Dessa forma, não houve a necessidade de definir contatos entre as regiões. Já para as definições da malha, estipulou-se um tamanho de elemento de 2 mm. Ao total, foram gerados 121.256 nós e 36.232 elementos, Figura 26.

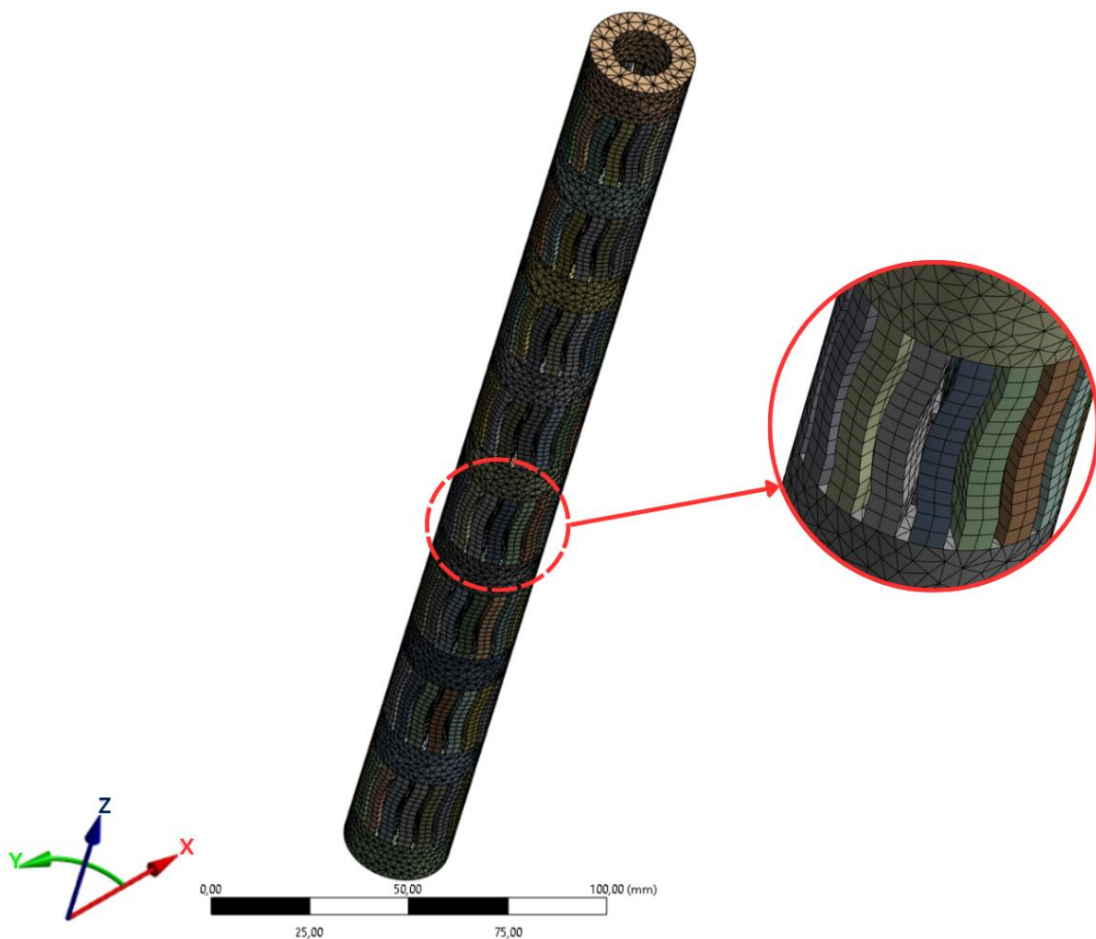


Figura 26: Construção da malha para o CMM

Fonte: Autoria própria

¹² Vale destacar que, embora a mola utilizada no CC também tenha sido especificada como aço inoxidável 316L, trata-se de um material proveniente de processos convencionais de fabricação, como a laminação, cujas propriedades físicas e microestruturais diferem significativamente do material obtido via MA. Portanto, apesar da nomenclatura comum, os dois materiais possuem comportamentos distintos, especialmente em termos de anisotropia e resposta à fadiga.

Para as condições de contorno, buscou-se manter a coerência com o modelo do CC para permitir uma comparação apropriada entre os canotes. Assim, foi aplicado um suporte fixo na base do tubo, representando o acoplamento com o quadro da bicicleta, uma força de 1200 N e um momento de 84000 Nmm foram impostos na face superior do canote, em conformidade com a norma BS EN 14766:2005, e considerou-se o peso próprio da estrutura, Figura 27. Além disso, ainda na análise estática, foram avaliadas a distribuição das tensões equivalentes de von Mises¹³ no CMM, para verificar se as tensões permanecem abaixo do limite de escoamento do material utilizado. Já na análise modal, também foram avaliados os seis primeiros modos de vibração do sistema, por apresentarem os maiores fatores de participação. As frequências naturais correspondentes a esses modos foram, respectivamente, 207,37 Hz, 207,40 Hz, 643,93 Hz, 1009,00 Hz, 1009,20 Hz e 1927,10 Hz.

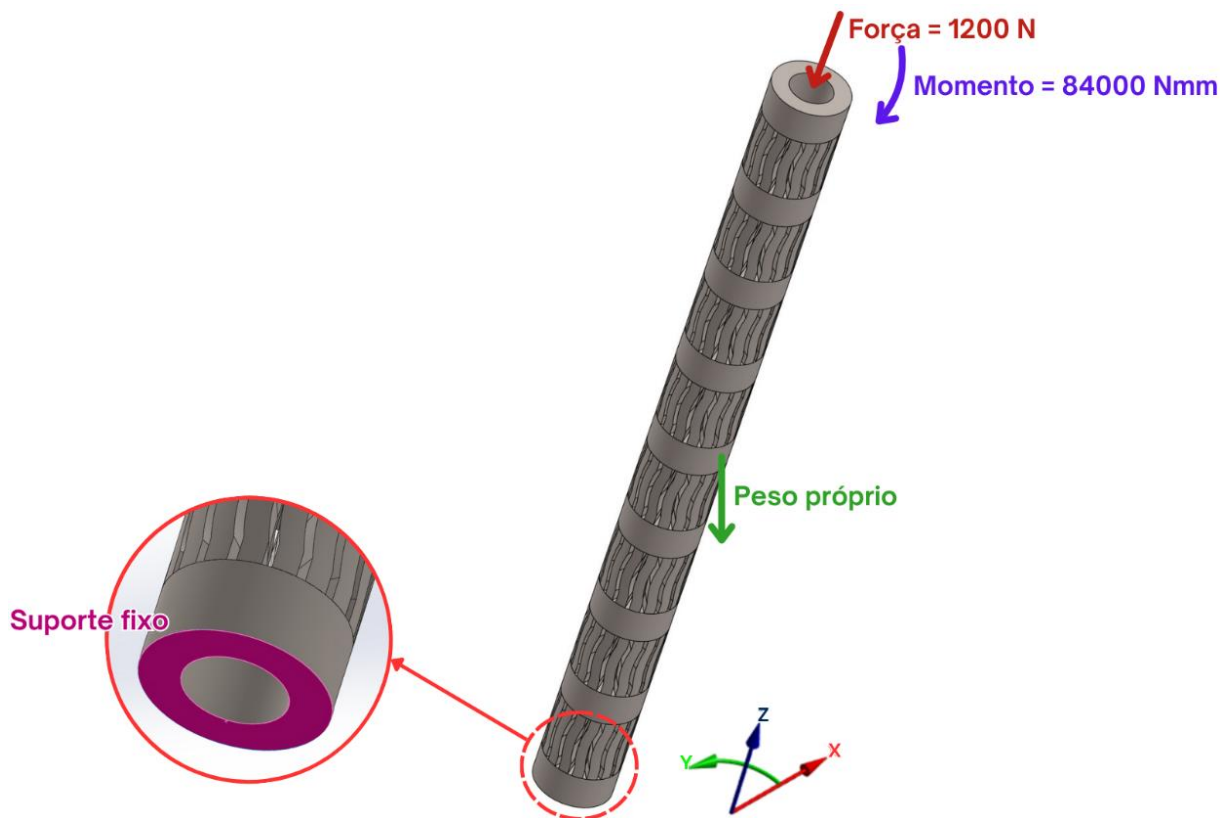


Figura 27: Condições de contorno para o CMM

Fonte: Autoria própria

¹³ O critério de von Mises permite prever o ponto de escoamento de um material a partir de um valor crítico da energia elástica no material (Wright, 2011), sendo utilizado para prever quando um material dúctil começará a escoar (deformar plasticamente). Se a tensão de von Mises calculada for menor que o limite de escoamento, a estrutura estará segura (regime elástico).

Por último, na análise transiente, aplicou-se o mesmo sinal de entrada adotado no modelo do CC, para representar a excitação dinâmica proveniente do solo. Essa aceleração foi atribuída a todos os corpos dos modelos, tanto no CC quanto no CMM, de forma a avaliar o comportamento global do sistema. A resposta dinâmica ao sinal imposto também foi monitorada em todos os corpos do modelo, permitindo avaliar os deslocamentos relativos ao longo da estrutura. Embora a direção de interesse corresponda fisicamente ao eixo vertical (normal ao solo), no modelo computacional adotou-se um sistema de coordenadas cilíndricas, no qual essa direção se expressa pelo eixo Z, correspondente ao eixo longitudinal do canote. Assim, todos os deslocamentos analisados foram extraídos nessa direção, representando diretamente o comportamento axial sob excitação dinâmica.

Por último, foi conduzida uma análise de otimização estrutural com o objetivo de reduzir a massa total do CMM. A estratégia adotada consistiu em aumentar o diâmetro interno do canote de 15,2 mm para 19,2 mm, o que resultou em uma diminuição na profundidade das CACs, conforme pode ser visto pela Figura 28. Essa modificação geométrica permitiu a redução da massa da estrutura, sem comprometer sua funcionalidade e integridade, uma vez que o critério de von Mises foi respeitado. Após a otimização, o modelo do CMM apresentou uma redução de 35,5% na massa total, passando de 777,80 g para 501,41 g. A configuração resultante manteve o desempenho dinâmico desejado, ao mesmo tempo em que tornou a peça mais eficiente do ponto de vista construtivo.

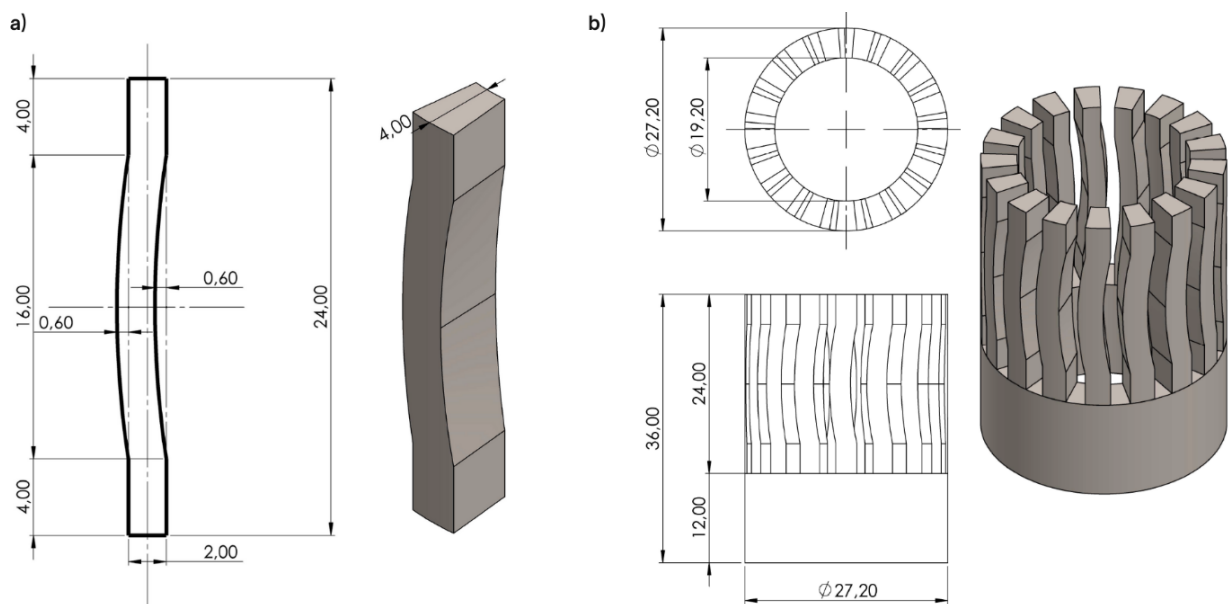


Figura 28: Geometria do metamaterial otimizado (em mm). Em a) Dimensões da célula unitária. Em b) Disposição da célula unitária na base de apoio

Fonte: Autoria própria

Já para a malha do modelo otimizado, foram gerados 97.825 nós e 29.496 elementos com um tamanho de elemento de 2 mm, respeitando a complexidade geométrica das CACs e assegurando boa qualidade nos resultados numéricos, Figura 29. Na análise modal, também foram considerados os seis primeiros modos de vibração, responsáveis por capturar os principais comportamentos dinâmicos do sistema. As frequências naturais correspondentes foram de 203,97 Hz, 204,14 Hz, 498,58 Hz, 888,79 Hz, 889,78 Hz e 1491,8 Hz. Todos os parâmetros de modelagem utilizados no CMM foram mantidos para o CMM otimizado (CMMot).

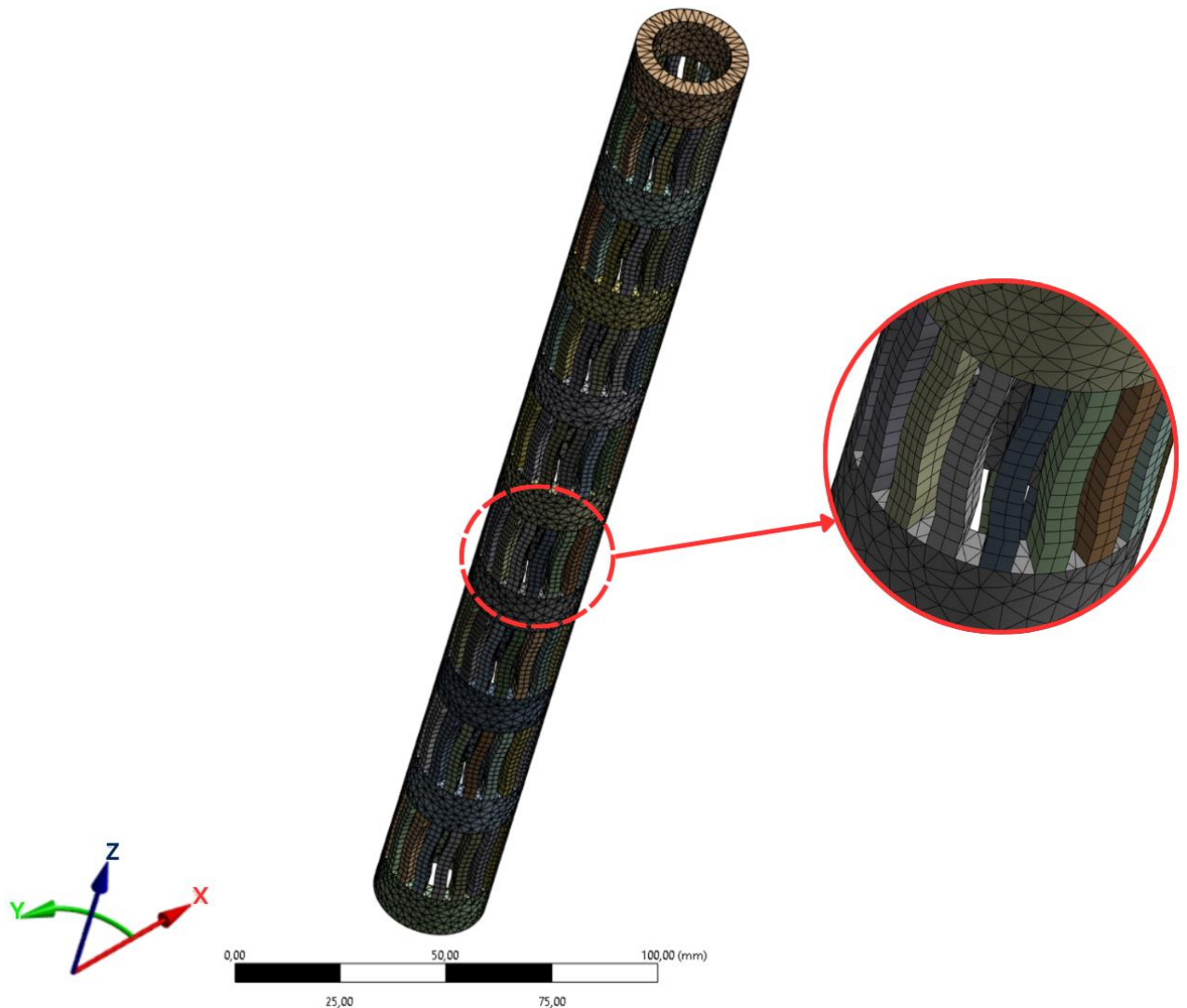


Figura 29: Construção da malha para o CMM otimizado

Fonte: Autoria própria

4.2 Prototipagem e impressão 3D

A fusão seletiva a *laser* (SLM) é um processo de MA de fusão em leito de pó (*powder bed fusion*) no qual um produto é construído pela fusão de áreas selecionadas de camadas de pó, usando um feixe de *laser* de alta intensidade que escaneia seletivamente um leito de pó, derretendo as partículas que se solidificaram para formar uma camada sólida (Attar *et al.*, 2014). Yap *et al.* (2015) descrevem que o processo de impressão começa com a colocação de uma fina camada de pó metálico em uma placa de substrato em uma câmara de fabricação, seguido pelo direcionamento de um *laser* para derreter e fundir áreas selecionadas de acordo com o que foi pré-definido. Após a conclusão da varredura a *laser*, a plataforma de construção é abaixada, uma próxima camada de pó é depositada na parte superior e o procede-se com a gravação de uma nova camada. A impressora utilizada na pesquisa é a OmniSint-160, Figura 30. Ela possui um módulo de *laser* contínuo de 500 W, uma mesa de impressão com 156 mm de diâmetro e 300 mm de altura e usa o argônio como gás inerte na câmara de impressão (OMNITEK, 2022) para melhorar a qualidade fabricação e evitar que ocorra a oxidação do metal durante a fusão.

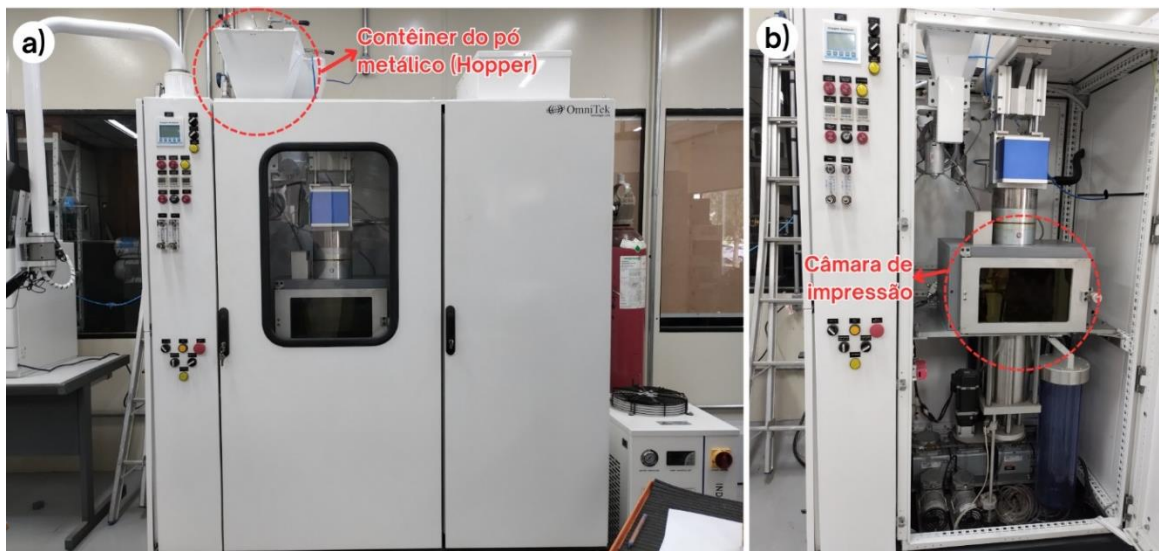


Figura 30: Impressora OmniSint-160. Em a) Vista frontal da impressora 3D. Em b) Interior do equipamento

Fonte: Autoria própria

O procedimento se inicia com a preparação do pó metálico e programação da impressora para estabelecer os parâmetros necessários para fabricação. A impressão é preparada em uma câmara fechada e inerte com argônio. Em seguida, o pó metálico é depositado em um contêiner (*hopper*) no topo da impressora. Após configurar a mesa de impressão, é necessário posicionar o modelo geométrico e adicionar suportes às peças antes de iniciar a impressão, por meio de

um arquivo em formato STL. Esse arquivo é exportado para um *software* de fatiamento (OmniSlicer), agregado ao computador do equipamento, responsável por dividir o modelo 3D em camadas finas que criarão instruções do movimento do *laser*. Geralmente a espessura da camada de pó na OmniSint-160 é de 30 μm (OMNITEK, 2022). Por fim, executa-se um acabamento na peça, removendo os suportes. Essa etapa pode exigir o auxílio de equipamentos de corte mecânico. O pó metálico solto que não fundiu é aspirado ou peneirado e pode ser reciclado. Utiliza-se ar comprimido para acionamento de componentes periféricos. Um passo a passo do processo pode ser visto pela Figura 31, com o modelo 3D já projetado.

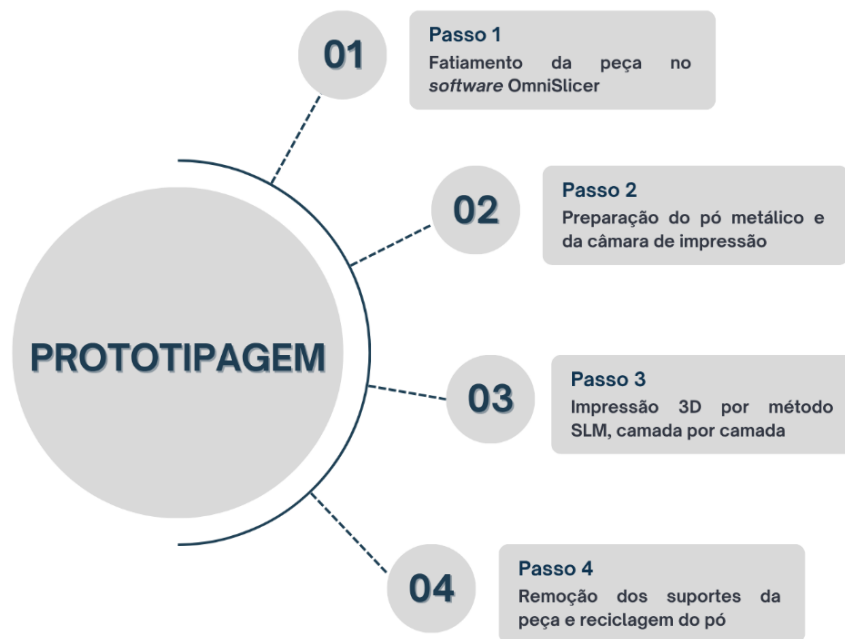


Figura 31: Passo a passo do processo de impressão

Fonte: Autoria própria

Para facilitar a fabricação do CMM, foi necessário considerar as limitações das dimensões da câmara de impressão utilizada no processo. Em função da altura máxima suportada pela máquina, optou-se por dividir o modelo em quatro partes, como ilustrado na Figura 32, sendo que as partes 2 e 3 apresentam a mesma geometria. O mesmo ocorreu para o modelo otimizado (Figura 33). Inicialmente, foi proposto que a união entre essas partes seria realizada por meio de encaixes rosqueados, com o objetivo de permitir a montagem manual após a impressão de cada segmento. Contudo, constatou-se que esse tipo de geometria dificultaria a adesão e a estabilidade das camadas subsequentes, devido ao movimento do dispositivo que espalha as camadas de pó (*recoater*), comprometendo a precisão do encaixe. Sendo assim, uma solução viável para unir as partes seria a soldagem a laser.

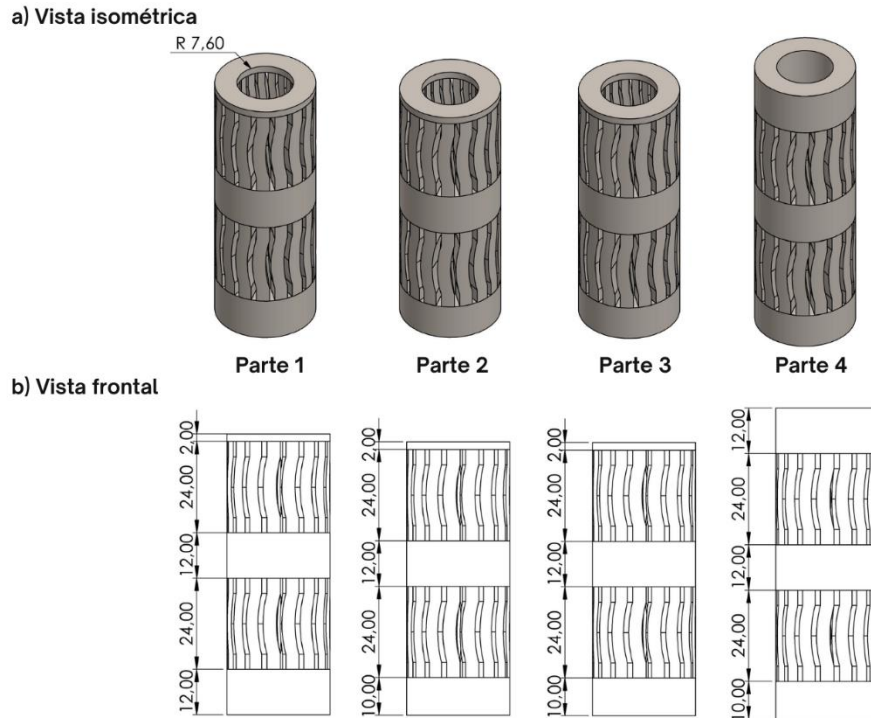


Figura 32: Divisão do CMM para impressão. Em a) Vista isométrica. Em b) Vista frontal

Fonte: Autoria própria

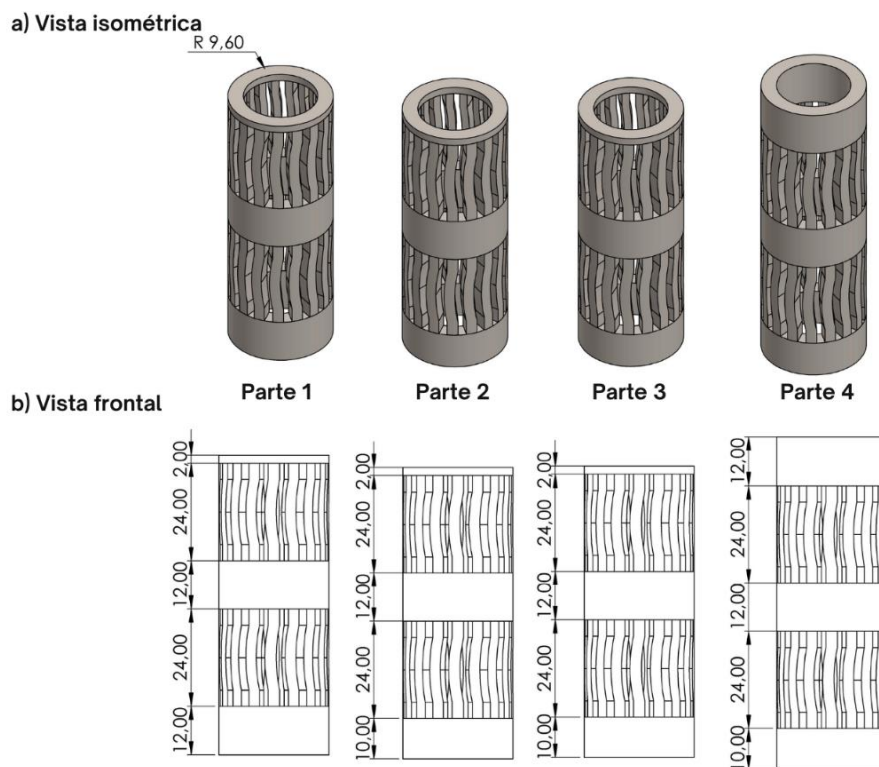


Figura 33: Divisão do CMM otimizado para impressão. Em a) Vista isométrica. Em b) Vista frontal

Fonte: Autoria própria

Ademais, durante a preparação do modelo para impressão, foi necessário aplicar dois *fillets* (arredondamentos) na parte superior dos vãos entre as CACs, para evitar concentrações de tensão nas regiões de cantos vivos, Figura 34. O primeiro *fillet* teve um raio de 0,80 mm, inserido nas arestas do vão. Contudo, como a profundidade das CACs é cônica, o primeiro arredondamento não resultou em uma curvatura contínua. Por este motivo, aplicou-se um segundo *fillet* de 0,40 mm de raio, garantindo uma transição suave. Em seguida, procedeu-se efetivamente para a impressão. O processo de impressão durou 22,9 horas para o CMM e 15,9 horas para o modelo otimizado, representando uma redução de 30,4 % no tempo total para imprimir a peça.

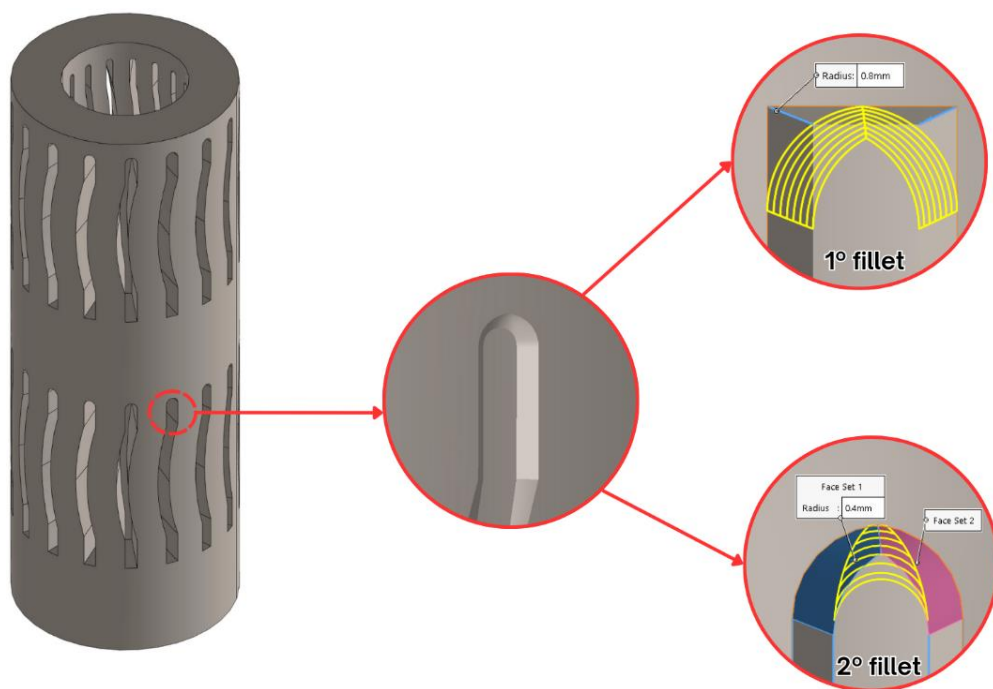


Figura 34: Arredondamento dos vãos entre as CACs

Fonte: Autoria própria

Por fim, durante a impressão, foram observadas instabilidades no *software* de operação da impressora, o que resultou em falhas na superfície da peça. Além disso, é importante considerar que as condições de armazenamento do pó metálico podem ter influenciado a qualidade final do componente, como umidade e oxidação. No entanto, a fabricação do protótipo do CMM foi concluída e suficiente para validar aspectos geométricos do projeto e, principalmente, para obtenção dos dados necessários para a ACV. A partir da programação do processo de MA, foi possível registrar informações como o tempo de fabricação, o consumo de energia, a quantidade de pó metálico utilizada e uso de argônio, permitindo a caracterização dos fluxos do sistema produtivo. O protótipo do CMM pode ser visto pela Figura 35.

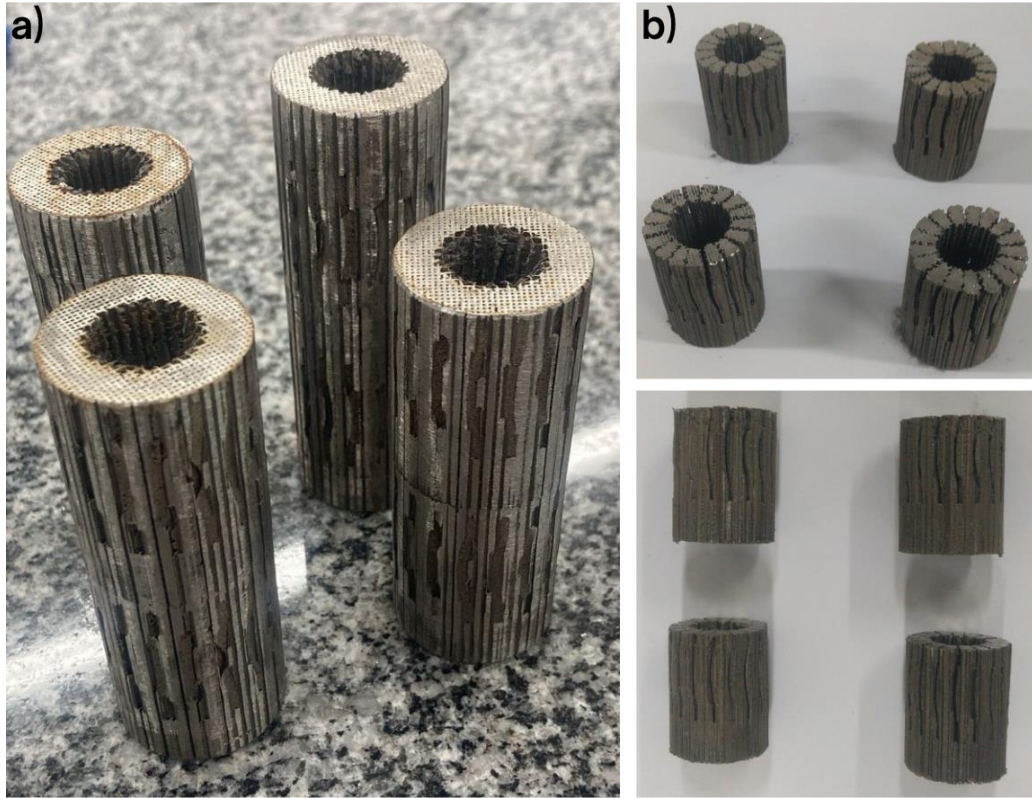


Figura 35: Protótipo do CMM fabricado por impressão 3D. Em a) Impressão final do CMM em quatro partes.
Em b) Impressão parcial dos módulos do CMM

Fonte: Autoria própria

4.3 Avaliação do ciclo de vida

Na etapa de avaliação do ciclo de vida, optou-se por avaliar os impactos do processo de fabricação do CC, CMM e CMM ot, pois, conforme já mencionado, os metamateriais não se caracterizam por diferentes composições químicas, mas sim pelo arranjo estrutural projetado. Dessa forma, os processos aqui analisados foram a manufatura convencional e a manufatura por impressão 3D. Seguiu-se as diretrizes estabelecidas pela NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009. O *software* utilizado foi o OpenLCA, versão 2.1.1, com banco dados primários coletados a partir da MA e banco de dados secundários do Ecoinvent, versão 3.6 (Ecoinvent, 2019).

a) Definição de objetivo e escopo

O estudo teve como objetivo comparar os impactos ambientais associados aos componentes empregados na fabricação dos dois tipos de canotes de bicicleta com sistema de amortecimento, sendo eles, um canote convencional produzido por manufatura tradicional e um canote de metamaterial construído por meio de impressão 3D. A comparação visa identificar os potenciais benefícios ou desvantagens ambientais do uso de manufatura aditiva em relação aos métodos tradicionais de produção. No que diz respeito a unidade funcional, ficou estabelecida como sendo 1 (um) canote com sistema de amortecimento. Ainda que seus processos de produção, geometria e materiais sejam diferentes, eles cumprem a mesma função, isto é, controle de vibrações. O fluxo de referência para este estudo foi definido como sendo igual a unidade funcional, pois a função analisada é cumprida por uma unidade do produto. A abordagem é atribucional, pois busca quantificar os impactos ambientais diretamente associados aos processos que compõem o sistema estudado, em um cenário estático.

Para o tempo de vida, dispôs-se dos dados de Akhyar et al. (2021), no qual forneceram que a durabilidade de um quadro de bicicleta de alumínio é de 10 anos. Considerando que tanto o CC quanto o CMM são componentes sujeitos aos mesmos esforços e ambientes similares, que o comportamento estrutural e exposição a intempéries de um canote podem ser consideradas equivalentes à de um quadro, além da ausência de dados específicos e consolidados na literatura sobre a durabilidade de canotes, especialmente utilizando MMs. Em relação aos limites impostos no sistema em estudo, como o foco do trabalho se dá na manufatura, a fronteira do sistema adotada foi do berço ao portão de fábrica (*cradle-to-gate*), incluindo a extração de matérias-primas, fabricação e produção de materiais intermediários.

Não foram consideradas as etapas de transporte, uso e disposição final, tendo em vista que o canote é um dispositivo leve e a relação transporte leva em conta a tonelada de material e a quilometragem percorrida, sendo pouco representativo e com escassez de dados, além da contribuição do transporte de matérias-primas ser insignificante (<1%), conforme fornecido por Kokare et al. (2023). Os estágios de uso e de disposição final não foram considerados, pois observou-se em trabalhos anteriores, como os de Peng et al. (2020); Wang et al. (2020) e Ramadugu et al. (2024), que a não inclusão dos dados de fim de vida (*end o life* - EoL) entre MA e convencional, associa-se à baixa disponibilidade de dados industriais. Por este motivo, a abordagem escolhida foi *cut-off*, tendo em vista que se observou apenas os impactos diretos da produção. Uma representação das fronteiras do sistema pode ser vista pela Figura 36. Os processos de fabricação foram detalhados no tópico do ICV.

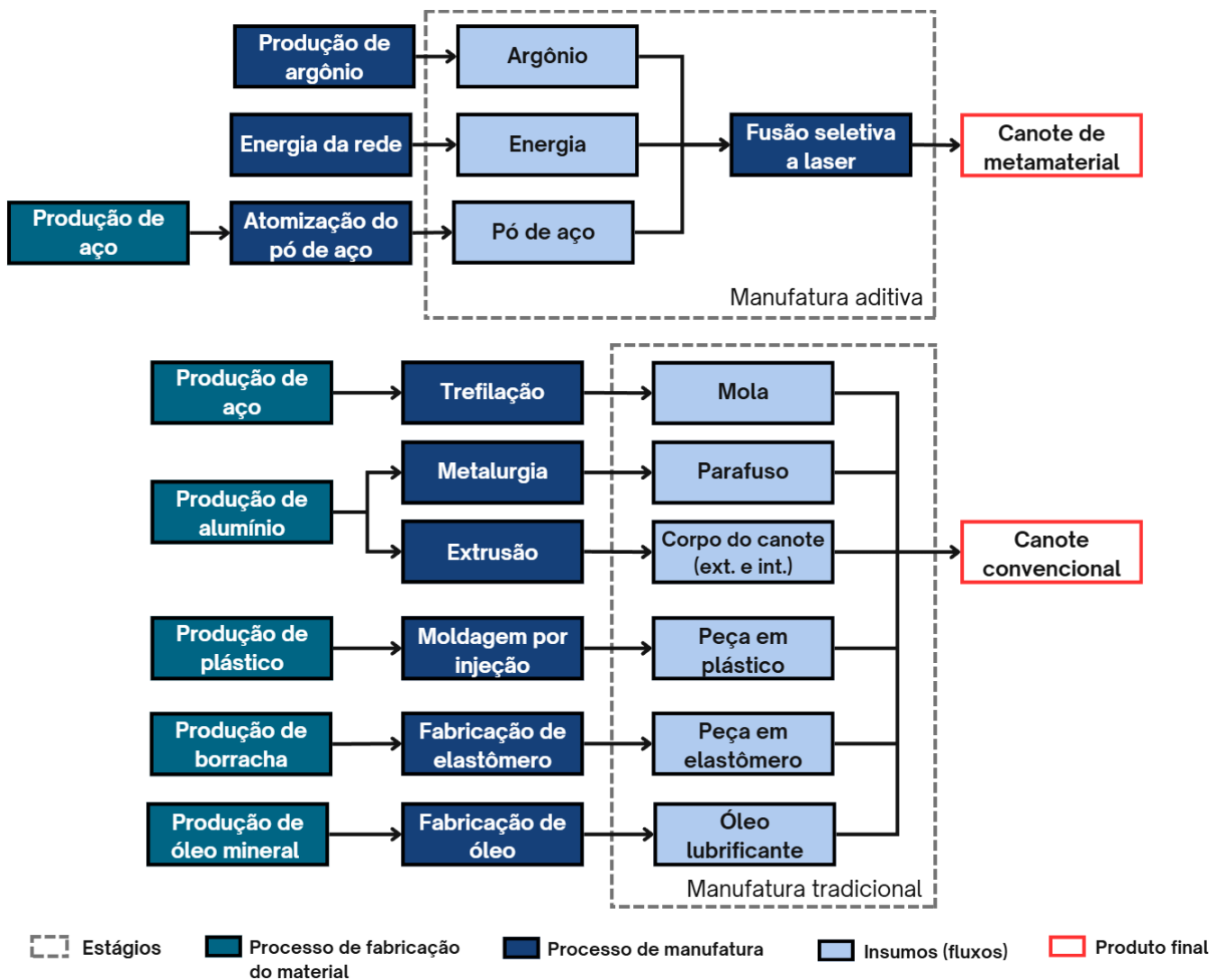


Figura 36: Fronteiras do sistema em estudo

Fonte: Autoria própria

b) Inventário do ciclo de vida (ICV)

Partindo para o ICV do CC, utilizou-se o Ecoinvent versão 3.6 como fonte de dados, já que não foi possível obter informações diretas com o fabricante. Como o CC é composto por diversos elementos, foi necessário dispor de referências na literatura para corroborar os métodos de manufatura tradicionais que seriam empregados. Assim, tomou-se como suporte a pesquisa de Groover (2021) exibindo as técnicas de fabricação industrial e, em seguida, mapeou-se àquelas que estariam disponíveis na base de dados Ecoinvent. Dessa maneira, garantiu-se que as informações estipuladas refletissem um processo equivalente e a representatividade do modelo pode ser assegurada. Em relação aos materiais empregados, Ashby (2017) traz indicações sobre alguns materiais que são usualmente adotados, como, por exemplo, na confecção de molas, tubos, conexões, entre outros.

Sendo assim, para a produção do parafuso em alumínio foi selecionada a metalurgia (*metal working*), para o elastômero incorporou-se a produção de borracha sintética em EPDM (*synthetic rubber production*), para a peça de plástico a moldagem por injeção (*injection moulding*), para a mola em aço a trefilação (*wire drawing*) e para o canote externo e interno equiparou-se a confecção de um tubo, portanto, a extrusão (*section bar extrusion*). É válido ressaltar que alguns processos de produção não incluem a entrada de material necessária. Por este motivo, inseriu-se manualmente algumas informações complementares para garantir a consistência do inventário, como é o caso da extrusão da barra de alumínio, da trefilação e da moldagem por injeção. Já no caso do componente elastomérico, o processo de produção da borracha sintética já contemplava a conformação final do produto. Logo, não foram adicionadas etapas extras de processamento no inventário.

Também foi incluído o uso de óleo lubrificante (*lubricating oil*), essencial para reduzir o atrito entre as peças. O valor estimado foi de 10 g. Alguns materiais específicos, como o alumínio 6061-T6, não possuíam uma correspondência exata na base de dados Ecoinvent. Como essa liga apresenta em sua composição magnésio, silício, cromo, cobre, manganês, ferro, zinco, entre outros (Muraca; S. J. Whittick, 1972), optou-se por utilizar o processo de produção do AlMg3, como substituto representativo. O aço inox 316L usado no corpo do canote e na mola também precisou ser substituído. Essa liga é caracterizada por ser um aço inoxidável austenítico, com alto teor de cromo, níquel e molibdênio (UPMET, 2024). Assim, foi utilizado como alternativa o cromo-níquel 18/8, por representar composições e técnicas industriais próximas. A quantidade de materiais e as especificações do ICV podem ser vistos pela Tabela

3. Não foi considerada a energia associada à etapa de montagem do CC, tampouco os resíduos provenientes da sua manufatura, por limitações de dados disponíveis.

Tabela 3: Inventário de dados para o CC

Parâmetro	Unidade	Quantidade	Processo Ecoinvent
Entrada (Input):			
Liga de alumínio	g	256,04	<i>aluminium alloy production, AlMg3{RoW} Cutoff, U</i>
Extrusão	g	256,04	<i>section bar extrusion, aluminium {RoW} Cutoff, U</i>
Metalurgia	g	8,37	<i>metal working, average for aluminium product manufacturing {RoW} Cutoff, U</i>
Aço inox	g	84,21	<i>steel production, electric, chromium steel 18/8 {RoW} Cutoff, U</i>
Trefilação	g	84,21	<i>wire drawing, steel {RoW} Cutoff, U</i>
Plástico (nylon)	g	3,41	<i>nylon 6 production {RoW} Cutoff, U</i>
Moldagem por injeção	g	3,41	<i>injection moulding {RoW} Cutoff, U</i>
Borracha sintética	g	12,20	<i>synthetic rubber production {RoW} Cutoff, U</i>
Óleo lubrificante	g	10,00	<i>lubricating oil production {RoW} Cutoff, U</i>
Saída (Output):			
Canote convencional (CC)	item	1	
Nota: RoW - restante do mundo (<i>Rest Of the World</i>)			

Fonte: Autoria própria

Já para o CMM, o processo de fabricação empregado é a fusão seletiva a *laser* (SLM) com pó de aço inoxidável 316L como matéria-prima. Como não há um inventário de dados no Ecoinvent que contemple esse tipo de manufatura, recorreu-se a informações em artigos científicos que utilizavam SLM. A etapa que precede a confecção do CMM é a denominada atomização a gás (*gas atomization*), necessária para a produção do pó metálico. Nesse processo, os lingotes do metal são derretidos e submetidos a um fluxo de gás argônio ou nitrogênio em alta velocidade, que os desintegra em partículas finas que são resfriadas para formar um pó metálico (Kokare; Oliveira; Godina, 2023).

Para os dados do ICV da atomização a gás, observou-se que o impacto ambiental da produção de pó metálico por atomização na MA é amplamente desconhecido, carecendo de uma análise abrangente e detalhada que leve em consideração todas as etapas do processo de produção (Ehmsen *et al.*, 2025). Por este motivo, recorreu-se as informações de Peng *et al.* (2020), no qual obteve-se que a unidade de energia incorporada para o pó atomizado foi de 2 kWh/kg, o consumo de água para resfriamento foi de 280 L/kg de pó atomizado e o consumo

de argônio foi de 3,5 Nm³/kg com densidade igual a 1,7837 kg/m³. Além disso, os autores destacam que o processo de atomização a gás possui um aproveitamento de 85% do material. Dessa forma, para cada 1 kg de pó metálico produzido, considera-se necessário 1,15 kg de lingote de aço, assumindo uma perda de 15% no processo.

Partindo para o processo SLM, considerou-se o uso de 0,5 L/min de argônio conforme fornecido pelo fabricante (OMNITEK, 2022). Para estimar o consumo energético do processo de impressão, foram consideradas a energia para operação da impressora e para o funcionamento do *laser*. Embora a potência nominal da impressora seja de 5 kW, esse valor representa sua máxima de operação. Dessa forma, realizou-se uma medição da corrente elétrica durante o processo de impressão, obtendo-se uma corrente média de 5,9 A sob tensão de 220 V. O produto desses valores seria a potência média real, ou seja, 1,30 kW. Considerando o tempo total de impressão de 22,9 horas para o modelo não otimizado, o consumo energético referente à operação da impressora foi de aproximadamente 29,77 kWh.

Partindo para o consumo do *laser*, sua potência nominal é de 500 W. No entanto, o sistema opera, em média, a uma potência de 150 W e não permanece ativo continuamente. Para cada ciclo de impressão de 30 segundos, o laser permanece em operação por cerca de 15 segundos. Dessa forma, em 22,9 horas de impressão, estima-se que o laser operou por 11,45 horas efetivas, resultando em um consumo adicional de 1,72 kWh. Portanto, o consumo total estimado de energia elétrica para a fabricação do modelo CMM não otimizado foi de aproximadamente 31,49 kWh. Para o modelo otimizado, os mesmos critérios e métodos de cálculo foram aplicados, considerando o tempo de impressão correspondente. Já a quantidade de pó metálico consumido foi de 874,27 g para o CMM não otimizado e 563,30 g para o CMM otimizado, com a inclusão dos suportes.

Para fins de modelagem, como não há um inventário específico para o argônio gasoso inerte, adotou-se o processo de produção de argônio líquido (*argon production, liquid*), usado na soldagem, corte e pulverização de metais, como agente representativo. O aço 316L seguiu o mesmo procedimento adotado no CC, selecionando o aço cromo-níquel 18/8. Para a água, optou pela deionizada por ser utilizada em processos industriais que exigem maior pureza e ausência sais e minerais que podem levar a corrosões nos equipamentos. O consumo de ar comprimido utilizado para acionar componentes auxiliares da impressora, como pistões, válvulas e sistemas de vedação, não foi considerado na modelagem da ACV, pois o volume necessário é de baixa magnitude, não exercendo influência significativa sobre o sistema.

A matriz energética escolhida foi a brasileira. É importante salientar que não foi considerado a geração de resíduos provenientes tanto dos suportes quanto do pó metálico não fundido durante a impressão, bem como o percentual de pó reciclável e seu respectivo processo de reciclagem. O ICV do CMM e CMM otimizado pode ser visto pela Tabela 4. O inventário da atomização a gás corresponde a produção de 1 kg de pó metálico.

Tabela 4: Inventário de dados para o CMM e CMM otimizado

Parâmetro	Unidade	Quantidade		Processo Ecoinvent
Entrada (Input):				
Atomização a gás:		CMM	CMM Otimizado	
Aço	kg	1,150	1,150	<i>steel production, electric, chromium steel 18/8 {RoW} Cutoff, U</i>
Água	kg	280,0	280,0	<i>water production, deionised {RoW} Cutoff, U</i>
Argônio	kg	1,962	1,962	<i>argon production, liquid {RoW} Cutoff, U</i>
Eletricidade	kWh	2,000	2,000	<i>market for electricity, low voltage {BR, South-eastern grid} Cutoff, U</i>
Saída (Output):				
Pó de aço inox 316L	kg	1	1	
Entrada (Input):				
Impressão SLM:		CMM	CMM Otimizado	
Pó metálico (aço)	kg	0,874	0,564	<i>Derivado do processo de atomização a gás</i>
Eletricidade	kWh	31,488	21,863	<i>market for electricity, low voltage {BR, South-eastern grid} Cutoff, U</i>
Argônio	kg	1,225	0,851	<i>argon production, liquid {RoW} Cutoff, U</i>
Saída (Output):				
Canote de metamaterial (CMM)	item	1	1	

Nota: RoW - restante do mundo (*Rest of the World*)

Fonte: Autoria própria

Por último, foi conduzida uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto da fonte de eletricidade sobre os resultados da ACV do CMM e CMM otimizado. O cenário base (C.base) foi a rede elétrica brasileira (*market for electricity, low voltage {BR, South-eastern grid} | Cutoff, U*), o cenário 1 (C.1) a energia por painel solar fotovoltaico (*electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si {RoW} | Cutoff, U*) e o

cenário 2 (C.2) a eletricidade por meio de turbinas eólicas (*electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore {BR, Southern grid} | Cutoff, U*).

c) Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV)

Na etapa de AICV, a metodologia utilizada foi ReCiPe Midpoint (H) 2014, versão 1.11. Apesar do método fornecer múltiplas categorias de impacto, 18 no total, deu-se um enfoque maior aquelas que compartilhavam maior afinidade com a proposta da pesquisa, isto é, a extração das matérias-primas, o consumo energético na manufatura e as consequências com a natureza. Desse modo, a partir das definições das categorias de impacto na Tabela 5, tem-se que as mudanças climáticas - MC (*climate change*), as emissões de material particulado - PMF (*particulate matter formation*), a formação de oxidantes fotoquímicos - POF (*photochemical oxidant formation*), a ecotoxicidade da água - WE, representado pela soma da ecotoxicidade marinha (*marine ecotoxicity*) com a ecotoxicidade da água doce (*freshwater ecotoxicity*), a ecotoxicidade terrestre - TET (*terrestrial ecotoxicity*), a toxicidade humana - HT (*human toxicity*), a acidificação terrestre - TA (*terrestrial acidification*), a escassez de água - WD (*water depletion*), de recursos fósseis - FD (*fossil depletion*) e de metais - MD (*metal depletion*), parecem ser mais adequadas ao estudo, considerando a relevância dos processos de fabricação envolvidos e as interferências ambientais.

Tabela 5: Definição das categorias de impactos ambientais - ReCiPe Midpoint (H) 2014

Categoria de impacto	Unidade	Descrição	Sigla
Acidificação terrestre	kgSO _{2eq}	Indicador do potencial de acidificação dos solos devido à liberação de gases como óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre.	TA
Depleção da camada de ozônio	kgCFC-11 _{eq}	Indicador de emissões de substâncias antropogênicas para o ar que causam a destruição da camada de ozônio.	OD
Ecotoxicidade da água doce	kg 1,4-DB _{eq}	Impacto sobre organismos de água doce/marinha/seres humanos de substâncias tóxicas emitidas para o meio ambiente.	WE
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB _{eq}		TET
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB _{eq}		HT
Toxicidade humana	kg 1,4-DB _{eq}		
Emissões de material particulado	kgPM _{10eq}	Incidência potencial de doenças devido a emissões de material particulado que afetam o trato respiratório quando inalado.	PMF
Escassez de água	m ³	Indicador da quantidade relativa de água usada.	WD
Escassez de recursos fósseis	kg oil _{eq}	Indicador da depleção de recursos naturais de combustíveis fósseis.	FD
Escassez de metal	kgFe _{eq}	Indicador da depleção de recursos naturais não fósseis, produzidos por meio de processos geológicos.	MD
Eutrofização da água doce	kgP _{eq}	Indicador do acúmulo de nutrientes como nitrogênio e fósforo na água doce/marinha, que estimula o crescimento excessivo de plantas, reduzindo o nível de O ₂ .	FE
Eutrofização da água do mar	kgN _{eq}		ME
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	Impacto da formação do ozônio troposférico a partir da reação de óxidos de nitrogênio (NO _x) com compostos orgânicos voláteis.	POF
Mudanças climáticas	kgCO _{2eq}	Indicador do potencial de aquecimento global devido às emissões de gases de efeito estufa no ar.	MC*
Radiação ionizante	kgU _{235eq}	Danos à saúde humana e aos ecossistemas associados às emissões de material radioativo.	IR
Transformação natural da terra	m ²	Mudanças na terra ou áreas naturais com alta intervenção humana, como terras urbanas e agrícolas.	NLT
Uso de terras agrícolas	m ² A	Alterações na qualidade e biodiversidade do solo a partir da ocupação da terra.	ALO
Uso do solo	m ² A		ULO

*Nota: Originalmente as mudanças climáticas são referenciadas com a sigla CC, entretanto, para não causar confusão com o canote convencional, adotou-se o acrônimo MC.

Fonte: Adaptado de Ferat Toscano et al. (2019, p. 24); Hillege (2019)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, foram discutidos os resultados obtidos na simulação numérica, verificando se o CMM seria capaz mitigar as vibrações longitudinais, representando, assim, uma melhoria em termos de conforto e desempenho dinâmico. Em seguida, examinou-se os resultados da ACV para ambos os sistemas CC e CMM considerando as etapas do berço ao portão de fábrica, com ênfase nas categorias de impacto ambiental mais representativas.

5.1 Simulação numérica

Com o intuito de avaliar o comportamento estrutural e dinâmico do canote convencional com sistema de amortecimento *versus* do canote de metamaterial, foi realizada uma simulação numérica por meio do *software* Ansys Inc. Essa etapa teve a intenção de compreender os mecanismos de dissipação de vibrações, bem como fornecer referências para o desenvolvimento do modelo CMM. Desse modo, a análise estrutural do CMM, sob as condições de carregamento aplicadas, permitiu determinar a distribuição de tensões equivalentes segundo o critério de von Mises.

Nesse sentido, para o aço 316L proveniente de processos de manufatura, a tensão de escoamento utilizada foi de 489 MPa, de acordo com as informações fornecidas na biblioteca do *software*. Os resultados indicaram que a tensão máxima de von Mises foi de, aproximadamente, 300 MPa, valor inferior ao limite de escoamento, o que assegura que o componente opera em regime elástico e, portanto, está estruturalmente seguro sob as condições avaliadas. Observou-se ainda que as maiores tensões se concentram na região do arco central da célula unitária, tendo em vista que a geometria curva impõe uma mudança na trajetória de propagação dos esforços internos (Figura 37).

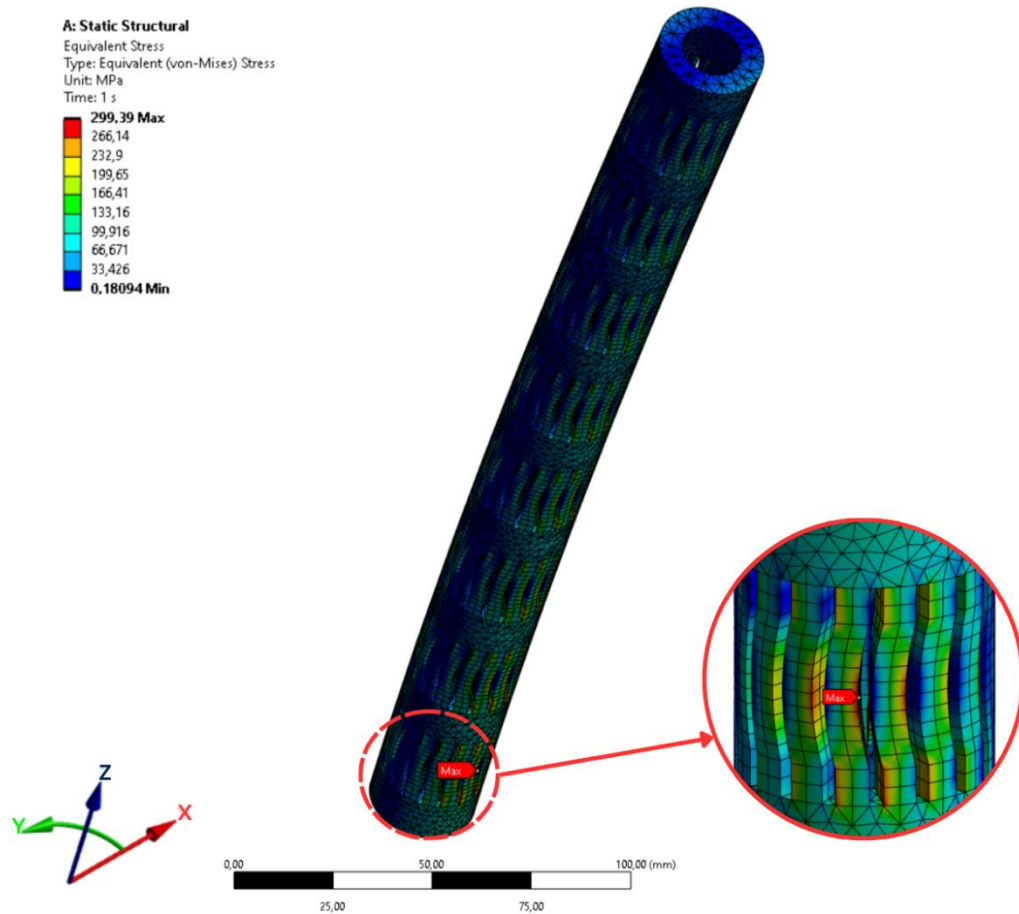


Figura 37: Distribuição das tensões de von Mises para o CMM

Fonte: Autoria própria

Já para a análise estática do modelo otimizado do CMM, verificou-se que a tensão máxima de von Mises atingiu 481 MPa, valor também inferior à tensão de escoamento do aço adotado de 489 MPa, Figura 38. Dessa forma, o componente permanece dentro do regime elástico, indicando que a otimização da geometria não comprometeu a integridade estrutural da peça sob as condições de carregamento simuladas.

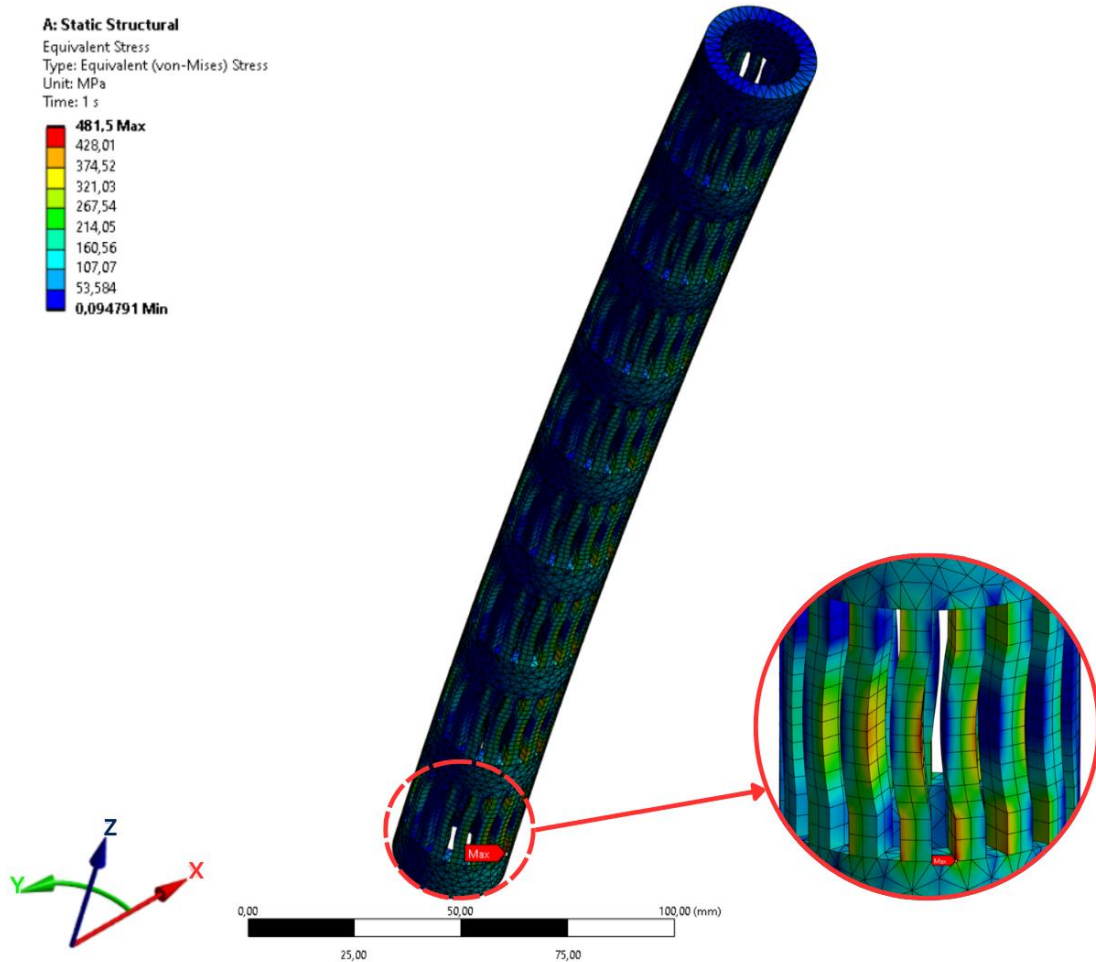


Figura 38: Distribuição das tensões de von Mises para o CMM otimizado

Fonte: Autoria própria

Partindo para a análise modal, e conforme mencionado anteriormente, avaliaram-se os 6 primeiros modos de vibração do CC, cujas frequências naturais obtidas foram, respectivamente, 8,79 Hz, 174,39 Hz, 461,54 Hz, 578,58 Hz, 795,08 Hz e 860,31 Hz. Verificou-se que os modos de vibração apresentaram predominantemente movimentos concentrados na direção axial (eixo Z), devido as condições de contorno estabelecidas. Observou-se que a maior parte da deformação modal está concentrada na mola, respondendo de forma mais expressiva às excitações dinâmicas, Figura 39. Em relação ao CMM, os seis primeiros modos de vibração obtidos apresentaram frequências iguais a 207,37 Hz, 207,40 Hz, 643,93 Hz, 1009,00 Hz, 1009,20 Hz e 1927,10 Hz, respectivamente.

Além disso, ao contrário do comportamento observado no CC, os modos de vibração do CMM se manifestaram, em sua maioria, como flexões laterais, onde os deslocamentos ocorreram fora do eixo longitudinal. Também é possível notar modos com torção ao redor do

eixo do tubo (3° e 6° modos), conforme ilustrado na Figura 40. Já para o CMM otimizado, seus seis primeiros modos obtidos foram 203,97 Hz, 204,14 Hz, 498,58 Hz, 888,79 Hz, 889,78 Hz e 1491,8 Hz. É importante notar que as frequências mais altas tiveram uma pequena redução em seu valor (a partir do 3° modo) em relação ao CMM original e os modos de vibração apresentaram um padrão de movimento extremamente similar ao modelo sem otimização, Figura 41.

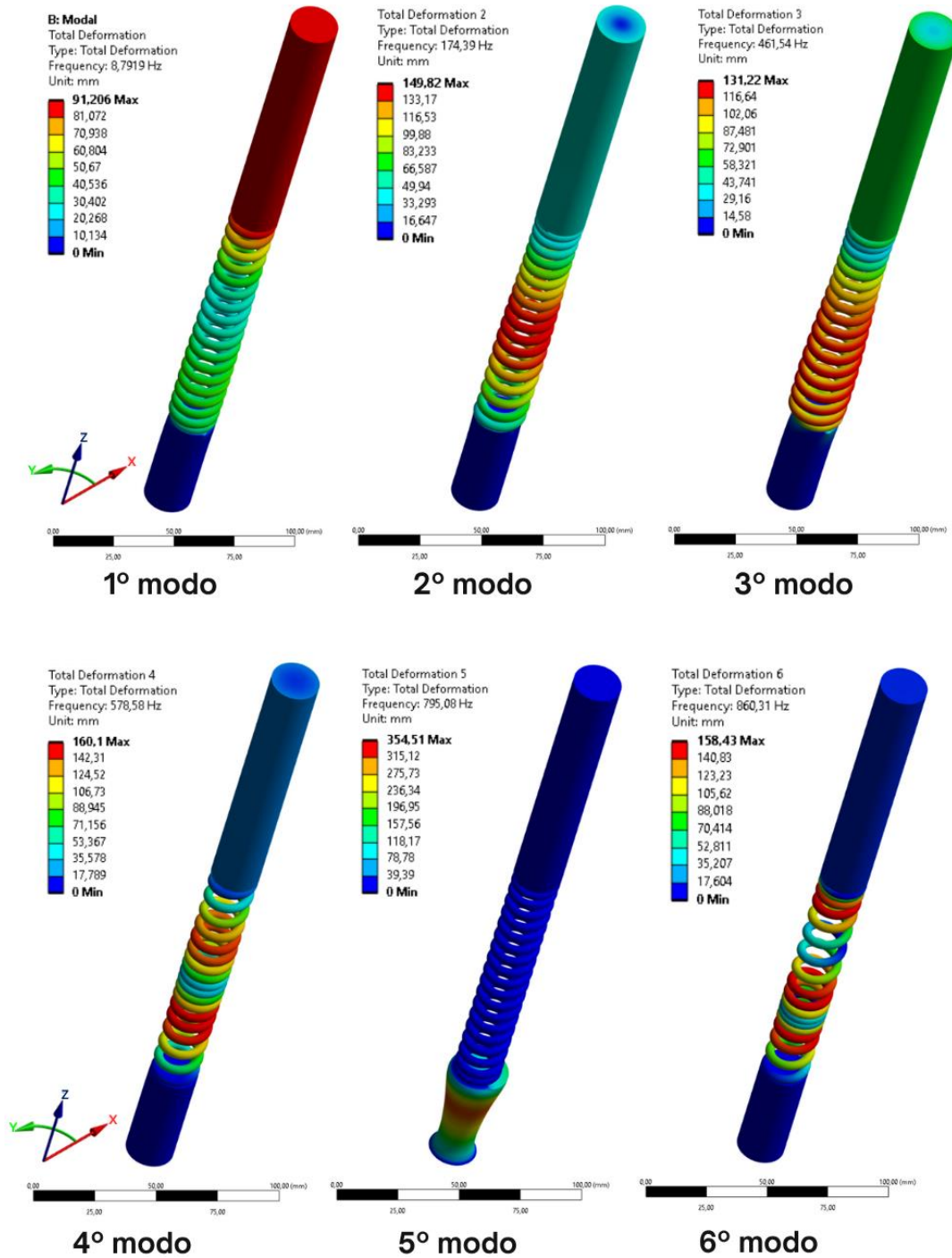


Figura 39: Análise modal dos seis primeiros modos de vibração do CC

Fonte: Autoria própria

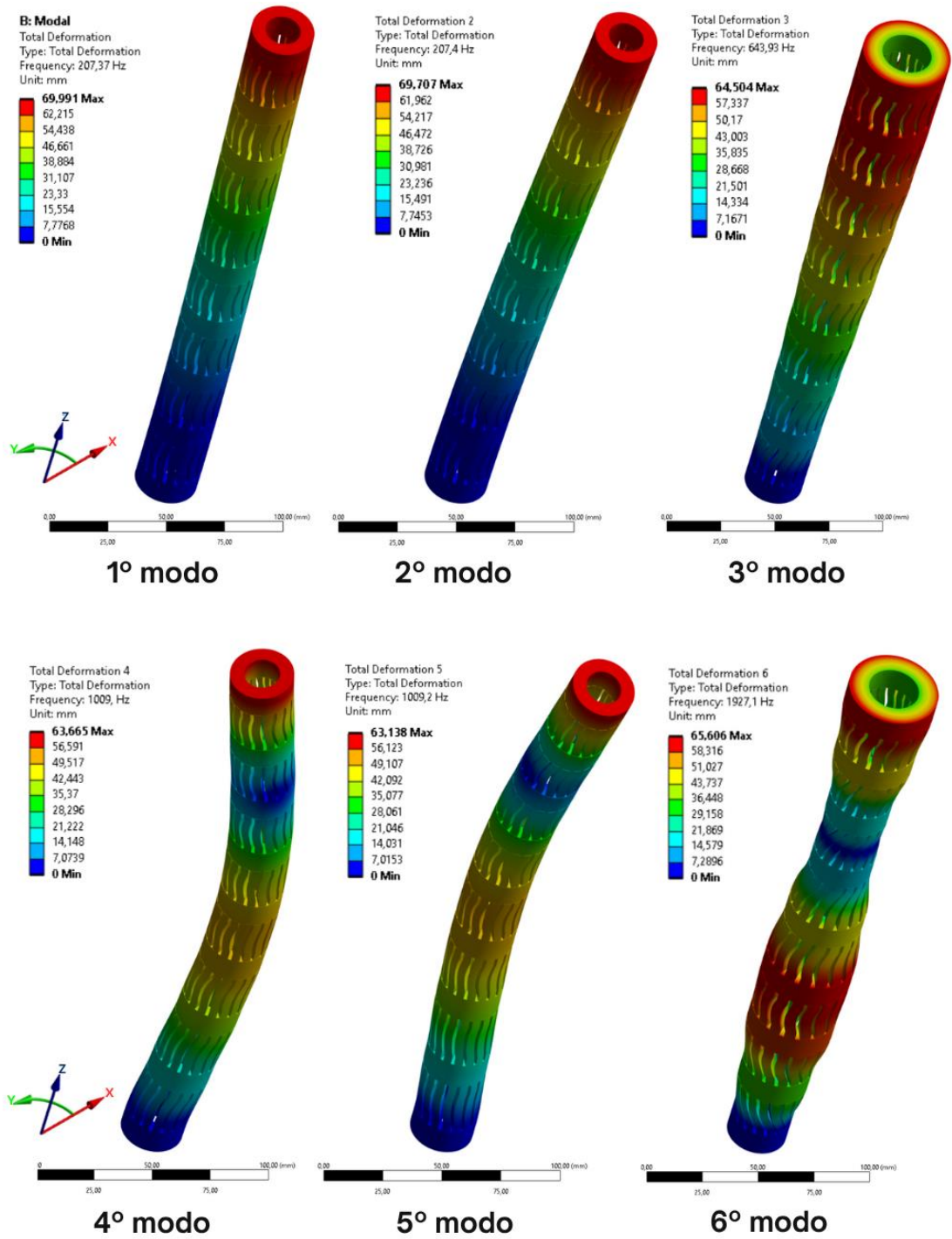


Figura 40: Análise modal dos seis primeiros modos de vibração do CMM

Fonte: Autoria própria

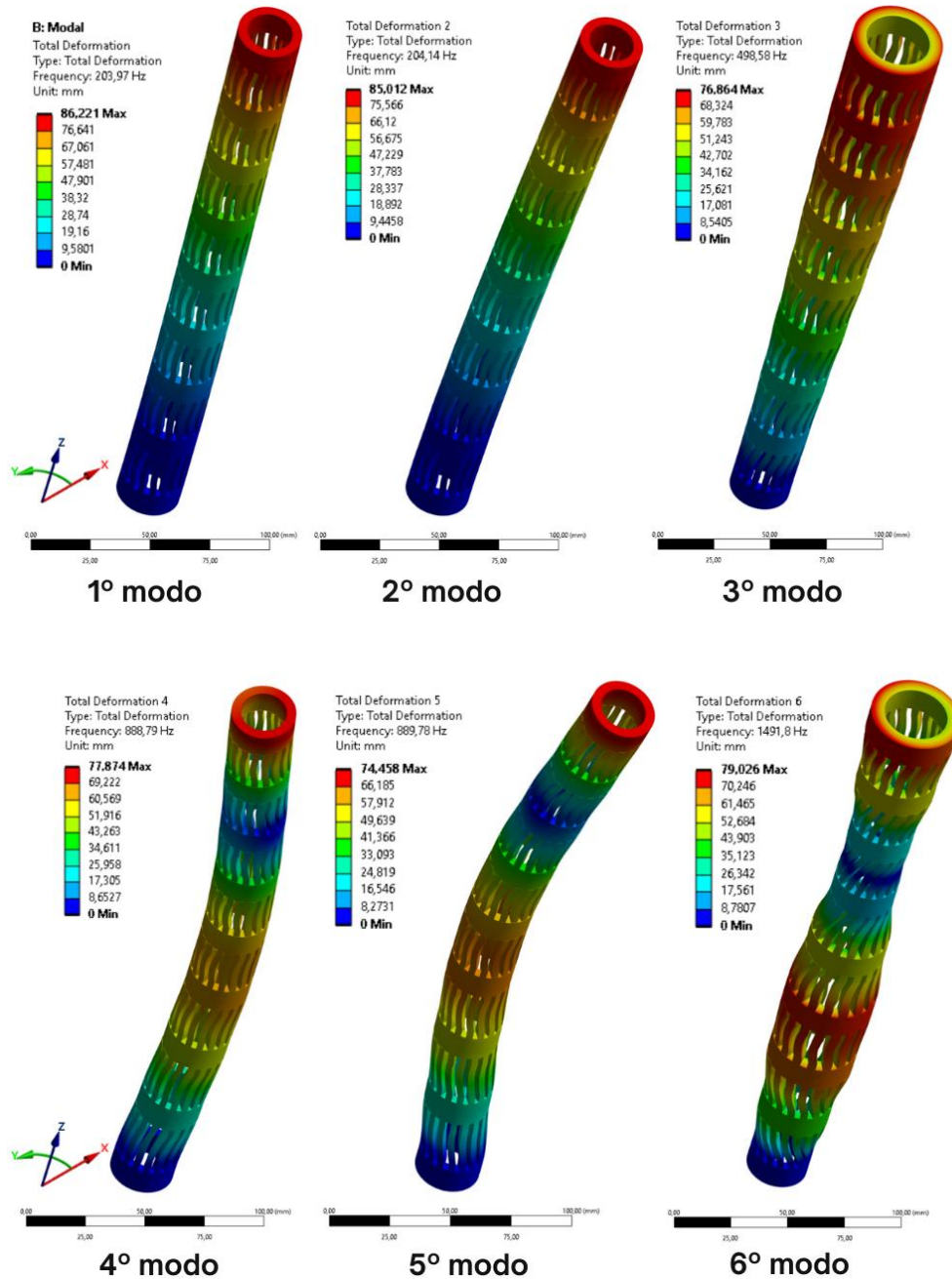


Figura 41: Análise modal dos seis primeiros modos de vibração do CMM otimizado

Fonte: Autoria própria

Partindo para análise transiente, buscou-se avaliar a resposta dinâmica dos canotes a partir da aplicação de um sinal variando no tempo em todos os elementos da estrutura. Dessa forma, para a direção Z, eixo longitudinal do canote, o CC apresentou um valor máximo de deslocamento total ao longo do tempo de 20,47 mm, enquanto o CMM respondeu com um valor consideravelmente menor de $2,55 \times 10^{-4}$ mm, Figura 42. Já para o CMM otimizado, não houve discrepância significativa nos resultados. O deslocamento máximo foi de $2,41 \times 10^{-4}$ mm. O contraste entre o CC e CMM evidencia a eficácia estrutural dos MMs no amortecimento de

vibrações. A disposição periódica das CACs faz com que a energia vibracional não seja transmitida diretamente ao longo do eixo do tubo, como ocorre no CC. Em vez disso, a geometria do CMM redistribui essa energia por meio de deformações laterais, flexões e torções, o que reduz significativamente os deslocamentos longitudinais. Um gráfico comparativo do deslocamento total e no eixo Z do CC e CMM pode ser visto pela Figura 43. Em virtude da discrepância de magnitude, foi necessário o uso de um eixo secundário no gráfico, permitindo a visualização simultânea de ambas as respostas. Em azul tem-se os deslocamentos máximos do CC (eixo Y à esquerda), em verde os do CMM e, em vermelho tracejado, do CMM otimizado (eixo Y à direita).

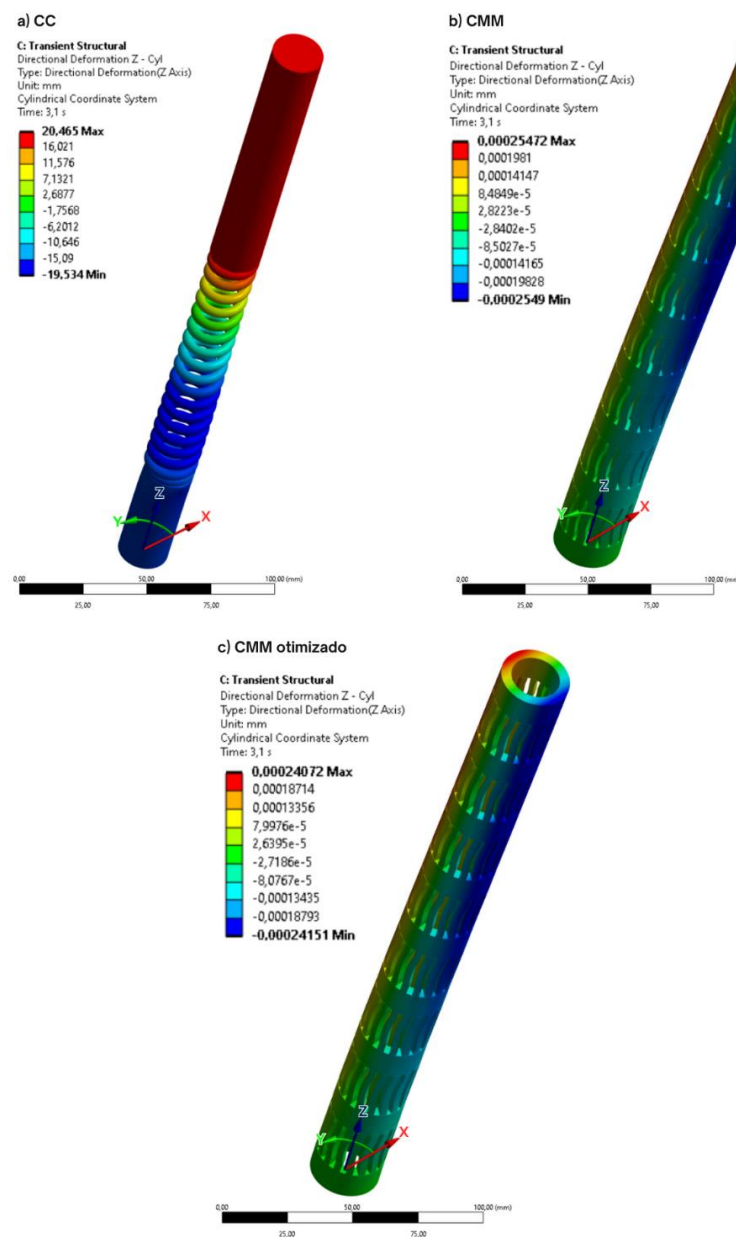


Figura 42: Deformações máximas totais no eixo Z. Em a) Em todo o corpo do CC. Em b) Em todo o corpo do CMM. Em c) Em todo o corpo do CMM otimizado

Fonte: Autoria própria

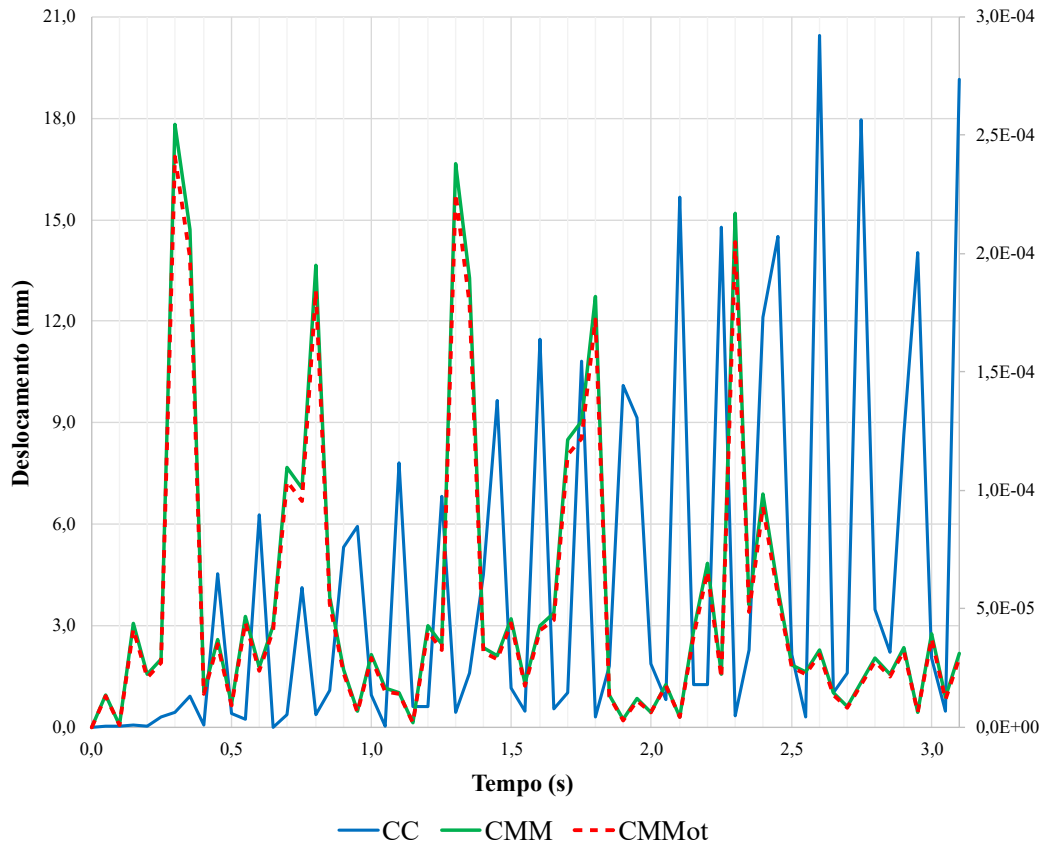


Figura 43: Deslocamentos máximos em Z para o CC e CMM

Fonte: Autoria própria

5.2 Avaliação do ciclo de vida

Tendo o inventário do ciclo de vida definido e as dez categorias de impacto ambiental selecionadas com base na sua relevância e abrangência temática, o próximo passo foi a discussão dos resultados referentes aos potenciais impactos gerados pelos insumos do canote convencional e do canote de metamaterial com e sem a aplicação da otimização da peça¹⁴. A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos para os insumos gerados para o CC. A Figura 44 ilustra o percentual de contribuição dos seus produtos gerados.

¹⁴ Como a fabricação do CMM foi realizada em quatro partes, ressalta-se que a montagem por soldagem a laser foi somente indicada e não contabilizada na ACV, como alternativa viável para o protótipo. Contudo, para aplicações comerciais futuras, seria recomendável investigar estratégias de fabricação e montagem mais robustas e integradas, incluindo a possibilidade de impressão em peça única em equipamentos com maior volume de construção.

Tabela 6: Análise dos impactos ambientais relativos ao CC

Categoria de impacto	Unidade	Canote externo e interno	Mola	Elastômero	Parafuso	Peça de plástico	Óleo lubrificante	Total
Mudanças climáticas (MC)	kgCO _{2eq}	2,16E+00	3,68E-01	3,39E-02	3,36E-02	3,65E-02	1,34E-02	2,65E+00
Emissões de material particulado (PMF)	kgPM _{10eq}	5,90E-03	1,99E-03	7,16E-05	7,84E-05	4,42E-05	3,17E-05	8,11E-03
Formação de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	7,26E-03	1,35E-03	1,49E-04	1,01E-04	1,12E-04	2,71E-04	9,24E-03
Ecotoxicidade da água (WE)	kg 1,4-DB _{eq}	1,20E+00	7,75E-02	2,08E-03	6,01E-03	1,91E-04	9,84E-04	1,29E+00
Ecotoxicidade terrestre (TET)	kg 1,4-DB _{eq}	1,43E-04	2,09E-04	2,43E-06	6,60E-06	4,91E-07	1,49E-06	3,63E-04
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4-DB _{eq}	8,93E-01	3,09E-01	1,16E-02	1,22E-02	1,79E-03	4,76E-03	1,23E+00
Acidificação terrestre (TA)	kgSO _{2eq}	9,91E-03	1,88E-03	1,49E-04	1,50E-04	1,13E-04	7,70E-05	1,23E-02
Escassez de água (WD)	m ³	1,39E+01	1,01E+01	1,21E-01	1,91E-01	2,92E-02	4,41E-02	2,43E+01
Escassez de recursos fósseis (FD)	kg oil _{eq}	5,30E-01	9,22E-02	2,18E-02	8,09E-03	1,01E-02	1,45E-02	6,77E-01
Escassez de metais (MD)	kgFe _{eq}	3,45E-04	6,89E-05	8,73E-06	4,52E-06	7,31E-06	2,71E-06	4,37E-04

Fonte: Autoria própria

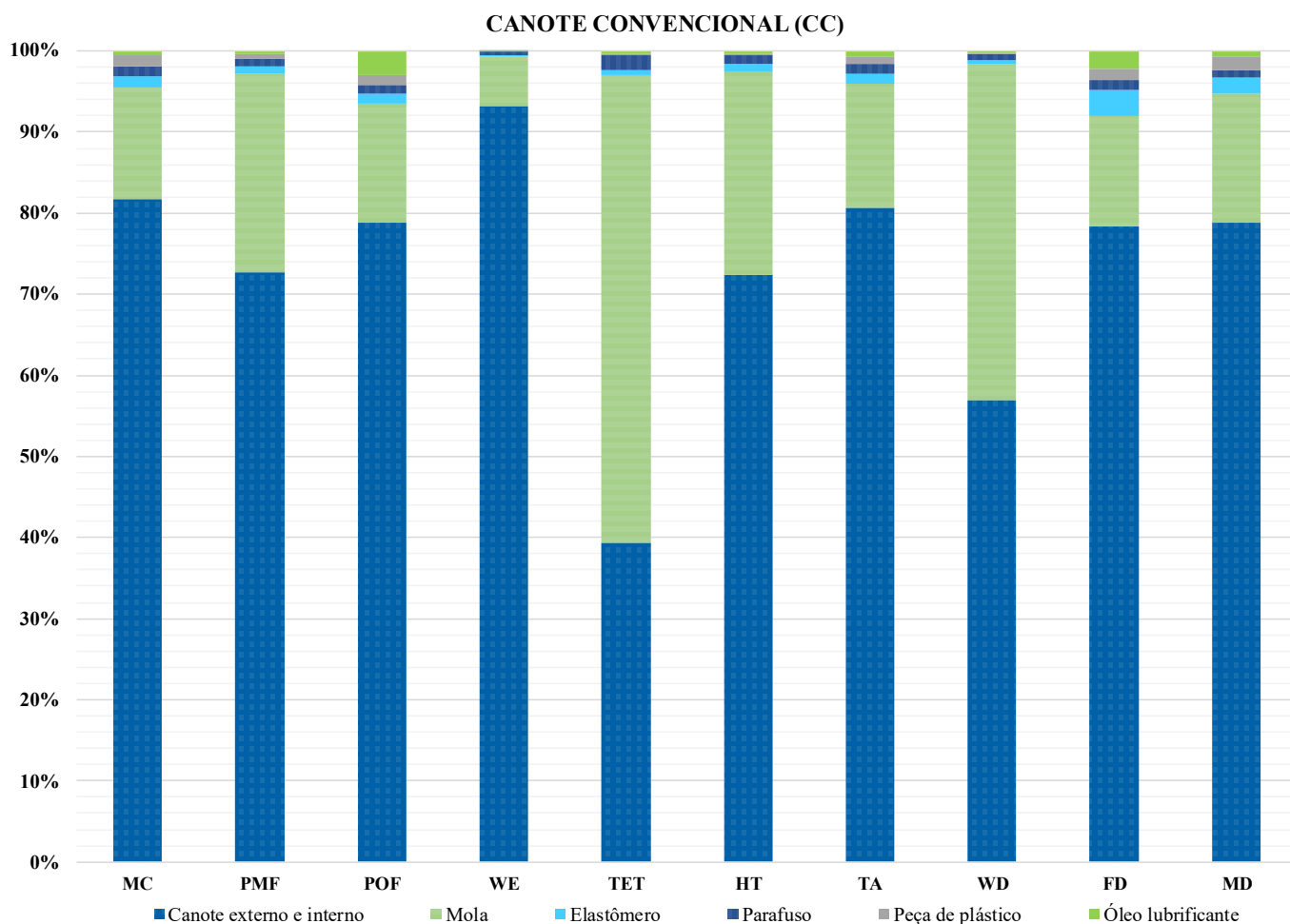


Figura 44: Percentual de contribuição dos insumos para o CC

Fonte: Autoria própria

Assim, para o CC, pode-se observar que o canote externo e interno apresentaram contribuições significativas para os impactos ambientais totais do sistema em estudo, com percentuais superiores a 70% em quase todas as categorias, exceto na ecotoxicidade terrestre (TET) e escassez de água (WD). Isso pode ser justificado por alguns procedimentos, como a extrusão da peça, no qual exige-se um alto consumo energético (Zhang *et al.*, 2024), e à produção de alumínio, que requer obtenção e purificação de sua matéria-prima, contendo metais pesados e substâncias tóxicas, como a lama vermelha (*red mud*), que podem levar a contaminação de solos e corpos hídricos (Georgitzikis K *et al.*, 2021). A mesma situação ocorre com o parafuso, decorrente, entretanto, do processo de metalurgia do aço. Como sua massa é pequena, sua contribuição não é expressiva.

Em sequência, destaca-se a confecção da mola como processo com maior representatividade, colaborando principalmente para ecotoxicidade terrestre (TET), escassez de água (WD) e toxicidade humana (HT). Esse resultado está associado à composição do aço utilizado, que inclui a combinação de diversas ligas metálicas (UPMET, 2024). Contudo, sua participação mostra-se interessante ao considerar que a massa de aço presente na mola é inferior à quantidade de alumínio utilizada no canote, o que indica um impacto elevado por unidade de material utilizado. Observa-se comportamento semelhante no óleo lubrificante que, apesar de representar uma quantidade muito pequena em termos de massa, possui elevado impacto em categorias como formação de oxidantes fotoquímicos (POF).

Já o elastômero, embora expresse parcela bem inferior de impacto, contribui em categorias como escassez de recursos fósseis (FD) e mudanças climáticas (MC), evidenciando que mesmo que materiais poliméricos sejam empregados em menor quantidade, podem gerar efeitos ambientais negativos devido a sua estrutura molecular, tornando-o difícil de decompor na natureza (Ducker, 2021). A participação dos demais componentes é insignificante quando comparada a contribuição dos processos relacionados ao alumínio e ao aço. Por último, é importante destacar que a matriz elétrica utilizada corresponde a um mix de combinação energética própria do banco de dados, predominantemente baseado em fontes fósseis. Caso fosse adotado a matriz de geração elétrica do Brasil, por exemplo, os resultados obtidos poderiam refletir um cenário mais favorável.

Já em relação aos resultados do CMM e CMM otimizado (CMMot), a Tabela 7 e Figura 45 ilustram os impactos ambientais associados a fabricação de tais produtos. A coluna à esquerda corresponde as emissões relacionadas ao CMM e, à direita, as do CMM otimizado.

Tabela 7: Análise dos impactos ambientais relativos ao CMM e CMM otimizado

Categoria de impacto	Unidade	Pó metálico		Eletricidade		Argônio		Total	
		CMM	CMMot	CMM	CMMot	CMM	CMMot	CMM	CMMot
Mudanças climáticas (MC)	kgCO _{2eq}	8,81E+00	5,69E+00	7,26E+00	5,04E+00	3,03E+00	2,10E+00	1,91E+01	1,28E+01
Emissões de material particulado (PMF)	kgPM _{10eq}	3,47E-02	2,24E-02	1,22E-02	8,49E-03	7,66E-03	5,32E-03	5,46E-02	3,62E-02
Formação de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	2,76E-02	1,78E-02	1,70E-02	1,18E-02	7,97E-03	5,54E-03	5,26E-02	3,51E-02
Ecotoxicidade da água (WE)	kg 1,4-DB _{eq}	1,13E+00	7,28E-01	1,44E+00	9,99E-01	9,59E-02	6,66E-02	2,66E+00	1,79E+00
Ecotoxicidade terrestre (TET)	kg 1,4-DB _{eq}	1,19E-03	7,70E-04	8,60E-04	5,90E-04	1,10E-04	7,65E-05	2,16E-03	1,44E-03
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4-DB _{eq}	5,33E+00	3,44E+00	2,00E+00	1,39E+00	1,14E+00	7,90E-01	8,47E+00	5,62E+00
Acidificação terrestre (TA)	kgSO _{2eq}	4,05E-02	2,62E-02	2,98E-02	2,07E-02	1,19E-02	8,29E-03	8,22E-02	5,51E-02
Escassez de água (WE)	m ³	1,60E+02	1,03E+02	1,34E+02	9,27E+01	2,32E+01	1,61E+01	3,16E+02	2,12E+02
Escassez de recursos fósseis (FD)	kg oil _{eq}	2,28E+00	1,47E+00	1,79E+00	1,24E+00	7,96E-01	5,53E-01	4,86E+00	3,27E+00
Escassez de metais (MD)	kgFe _{eq}	3,34E-03	2,16E-03	5,58E-03	3,87E-03	1,59E-03	1,10E-03	1,05E-02	7,13E-03

Fonte: Autoria própria

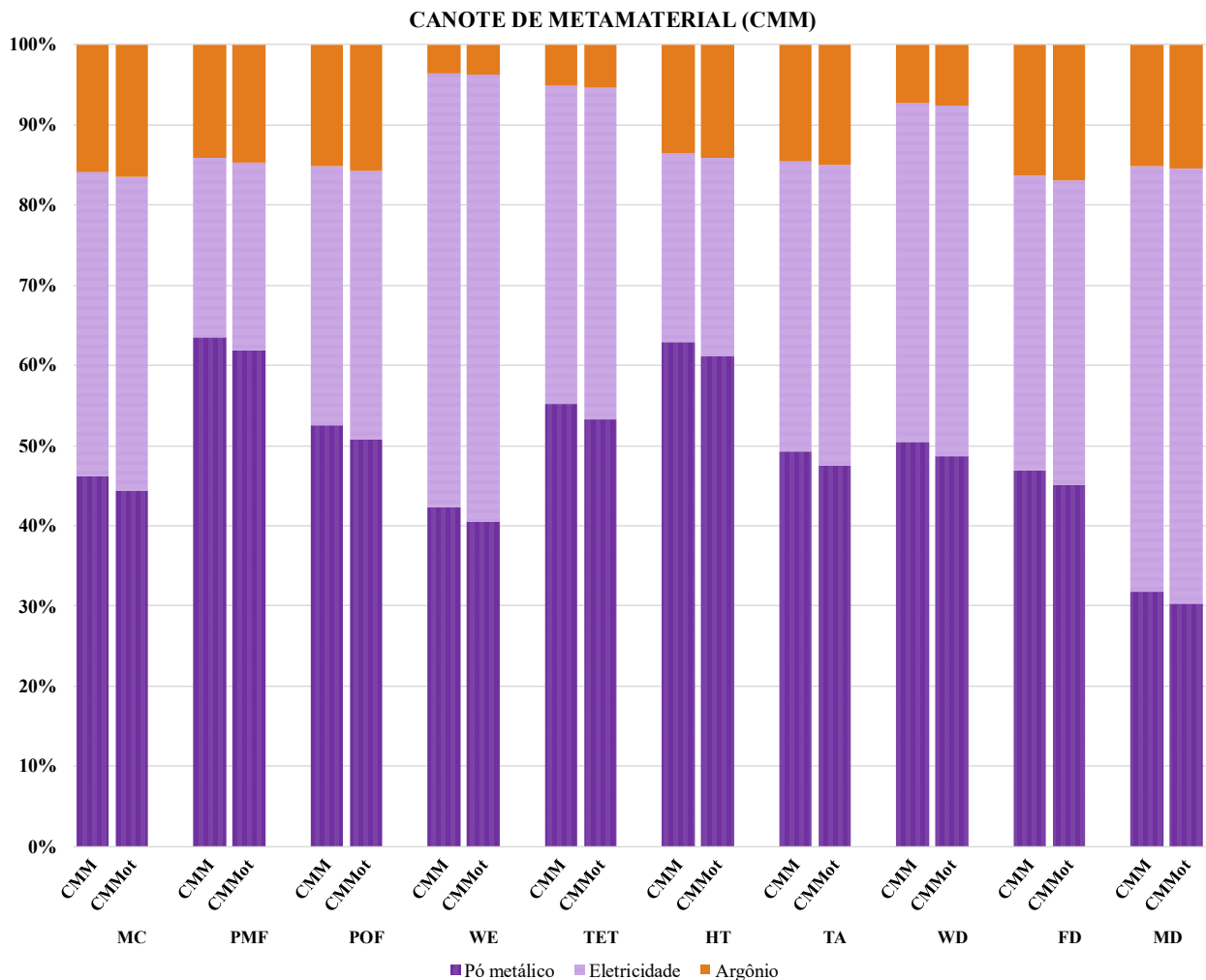


Figura 45: Percentual de contribuição dos insumos para o CMM e CMM otimizado

Fonte: Autoria própria

Em relação ao CMM, a AICV evidencia uma alta contribuição da produção do pó metálico em praticamente todas as categorias avaliadas, superando os 60% nas emissões de material particulado (PMF) e toxicidade humana (HT). Esse comportamento está associado a geração de partículas finas de metal em suspensão e exposição a agentes tóxicos durante sua cadeia produtiva e à alta demanda de energia exigida na atomização a gás que requer recursos significativos desde a extração mineral até a obtenção de pó com granulometria de alta qualidade (Ehmsen *et al.*, 2025). Uma alternativa viável sob o ponto de vista ambiental seria a utilização de pó metálico produzido por atomização a água. Apesar das partículas do pó apresentarem maiores irregularidades neste processo, o consumo energético é menor e sem a necessidade de introdução de um gás inerte (Kruzhanov; Arnhold, 2012), representando uma estratégia promissora.

O segundo maior contribuinte é o uso da eletricidade durante a etapa de fabricação por fusão seletiva a *laser*, técnica caracterizada justamente por seu alto consumo energético (Wang, Yanan *et al.*, 2020). A presença do *laser* também contribui para esse cenário, ainda que não opere no tempo total do uso da impressora, possuindo uma potência relativamente alta. Além disso, observou-se que o principal fator que inferiu no uso de eletricidade na técnica SLM foi o tempo de impressão da peça, que está relacionado diretamente a complexidade geométrica, dimensões da peça, aplicação de suportes, preenchimento da estrutura etc. Nesse sentido, a busca por cenários com a utilização de energias mais limpas e por *designs* otimizados, com consequente redução do tempo de impressão, torna-se interessante para o viés ambiental. Por último, a participação do argônio foi menos representativa, contribuindo de forma equilibrada sobre quase todas as categorias exceto, em menor quantidade, para a escassez de água (WD) e ecotoxicidade terrestre (TET) e aquática (WE).

Partindo para a comparação dos resultados obtidos entre o CMM e o CMM otimizado, ao reduzir de 22,9 h para 15,9 h de impressão, o CMMot mostrou-se eficaz, com cerca de 32% de redução em todas as categorias de impacto analisadas, confirmando a importância da realização de um projeto geométrico otimizado para diminuição da pegada ambiental. Ademais, a redução da massa total da peça resultou em menor uso de pó metálico, insumo com maior impacto relativo, e contribuiu para a redução da carga ambiental nas categorias mais críticas, como toxicidade humana (HT), emissões de material particulado (PMF), mudanças climáticas (MC) e escassez de água (WD). Destaca-se que, como não foram incluídos os procedimentos de reciclagem do pó não fundido, a ausência desses dados impacta diretamente os resultados da

ACV, uma vez que essa prática contribui para a redução do consumo de matéria-prima e, consequentemente, da demanda por água e energia na fase de atomização a gás.

A Tabela 8 e Figura 46 trazem os resultados comparativos entre os três canotes analisados. Cabe destacar que, por limitações de dados disponíveis, os resíduos provenientes da manufatura do CC também não foram incluídos no inventário do ciclo de vida. A ausência dessa etapa pode subestimar os impactos ambientais do modelo convencional.

Tabela 8: Análise comparativa dos impactos ambientais entre o CC, CMM e CMM otimizado

Categoria de impacto	Unidade	CC	CMM	CMMot
Mudanças climáticas (MC)	kgCO2eq	2,65E+00	1,91E+01	1,28E+01
Emissões de material particulado (PMF)	kgPM10eq	8,11E-03	5,46E-02	3,62E-02
Formação de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	9,24E-03	5,26E-02	3,51E-02
Ecotoxicidade da água (WE)	kg 1,4-DBeq	1,29E+00	2,66E+00	1,79E+00
Ecotoxicidade terrestre (TET)	kg 1,4-DBeq	3,63E-04	2,16E-03	1,44E-03
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4-DBeq	1,23E+00	8,47E+00	5,62E+00
Acidificação terrestre (TA)	kgSO2eq	1,23E-02	8,22E-02	5,51E-02
Escassez de água (WE)	m ³	2,43E+01	3,16E+02	2,12E+02
Escassez de recursos fósseis (FD)	kg oileq	6,77E-01	4,86E+00	3,27E+00
Escassez de metais (MD)	kgFeeq	4,37E-04	1,05E-02	7,13E-03

Fonte: Autoria própria

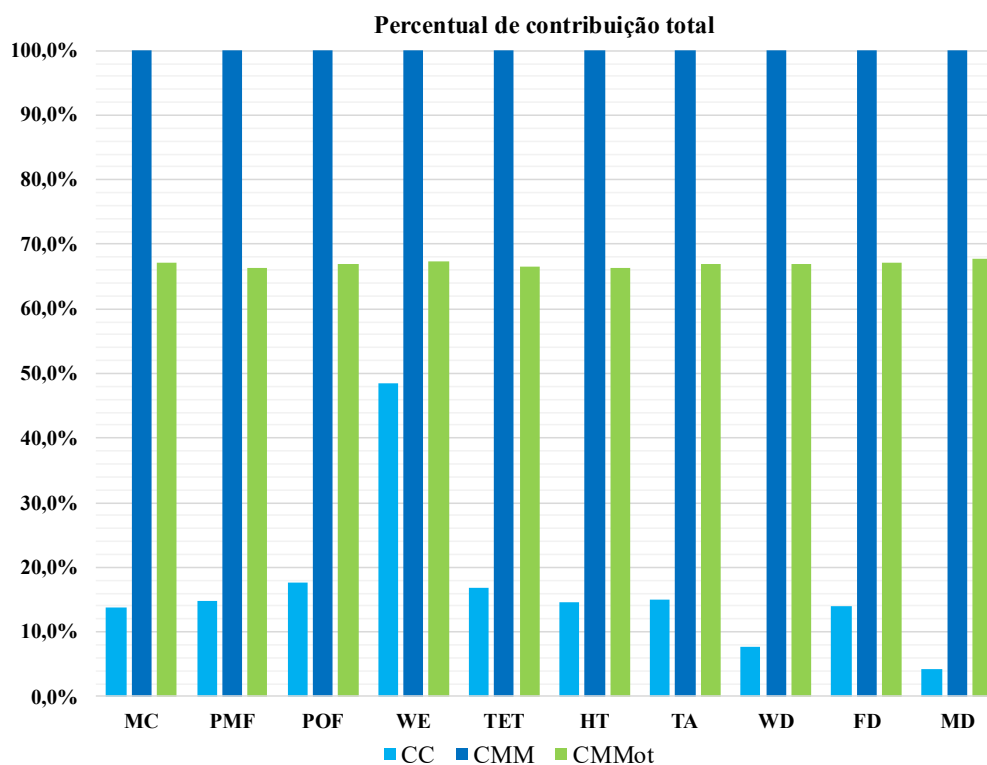


Figura 46: Análise comparativa do percentual de contribuição entre o CC e CMM

Fonte: Autoria própria

Ao normalizar os valores absolutos dos impactos ambientais em relação ao pior cenário, o CMM apresentou os maiores impactos ambientais em todas as categorias avaliadas, sendo utilizado como referência (100%). O CMM otimizado apresentou valores próximos de 65–68% do impacto do CMM, enquanto o CC apresentou os menores valores relativos. Observa-se que a redução de aproximadamente 30% na massa do CMM resultou em reduções proporcionais nos impactos ambientais, uma vez que os principais fluxos do sistema, como consumo de pó metálico, energia elétrica e gás inerte, estão diretamente relacionados à quantidade de material processado na MA.

Contudo, apesar do CMMot apresentar uma redução significativa nos impactos ambientais em comparação ao modelo CMM original, os resultados da ACV indicam que o CC ainda se mostra ambientalmente mais vantajoso. Essa observação está relacionada, principalmente, ao fato do processo produtivo do CC já se encontrar consolidado em escala industrial, tendo em vista que o CMM foi fabricado em ambiente laboratorial, utilizando MA em pequena escala. Portanto, a comparação direta entre os impactos ambientais de ambos os modelos deve ser verificada em estudos futuros, pois há uma discrepância significativa no nível de maturidade tecnológica (*technology readiness level*). Contudo, a otimização do CMM demonstrou que adotar determinadas estratégias de projeto, como a redução da massa, têm capacidade de mitigar impactos críticos, como a diminuição no consumo de eletricidade.

Por último, partindo para a análise de sensibilidade, o intuito foi verificar o potencial de mitigação de impactos ambientais mediante o uso de fontes renováveis de eletricidade para o CMM e CMMot. Os resultados para os três cenários do CMM sem otimização podem ser vistos pela Tabela 9 e Figura 47. Conforme já mencionado, no cenário base (C.base) tem-se a energia proveniente da rede elétrica, no cenário 1 (C.1) por painel solar fotovoltaico e, no cenário 2 (C.2), por meio de turbinas eólicas.

Tabela 9: Análise de sensibilidade dos impactos ambientais relativos ao CMM

Categoria de impacto	Unidade	C.base	C.1	C.2
Mudanças climáticas (MC)	kgCO2eq	1,91E+01	1,40E+01	1,19E+01
Emissões de material particulado (PMF)	kgPM10eq	5,46E-02	4,86E-02	4,35E-02
Formação de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	5,26E-02	4,51E-02	3,71E-02
Ecotoxicidade da água (WE)	kg 1,4-DBeq	2,66E+00	2,00E+00	1,51E+00
Ecotoxicidade terrestre (TET)	kg 1,4-DBeq	2,16E-03	5,87E-03	1,38E-03
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4-DBeq	8,47E+00	8,62E+00	6,85E+00
Acidificação terrestre (TA)	kgSO2eq	8,22E-02	6,41E-02	5,34E-02
Escassez de água (WE)	m ³	3,16E+02	2,17E+02	1,78E+02
Escassez de recursos fósseis (FD)	kg oileq	4,86E+00	3,66E+00	3,12E+00
Escassez de metais (MD)	kgFeeq	1,05E-02	5,36E-03	4,74E-03

Fonte: Autoria própria

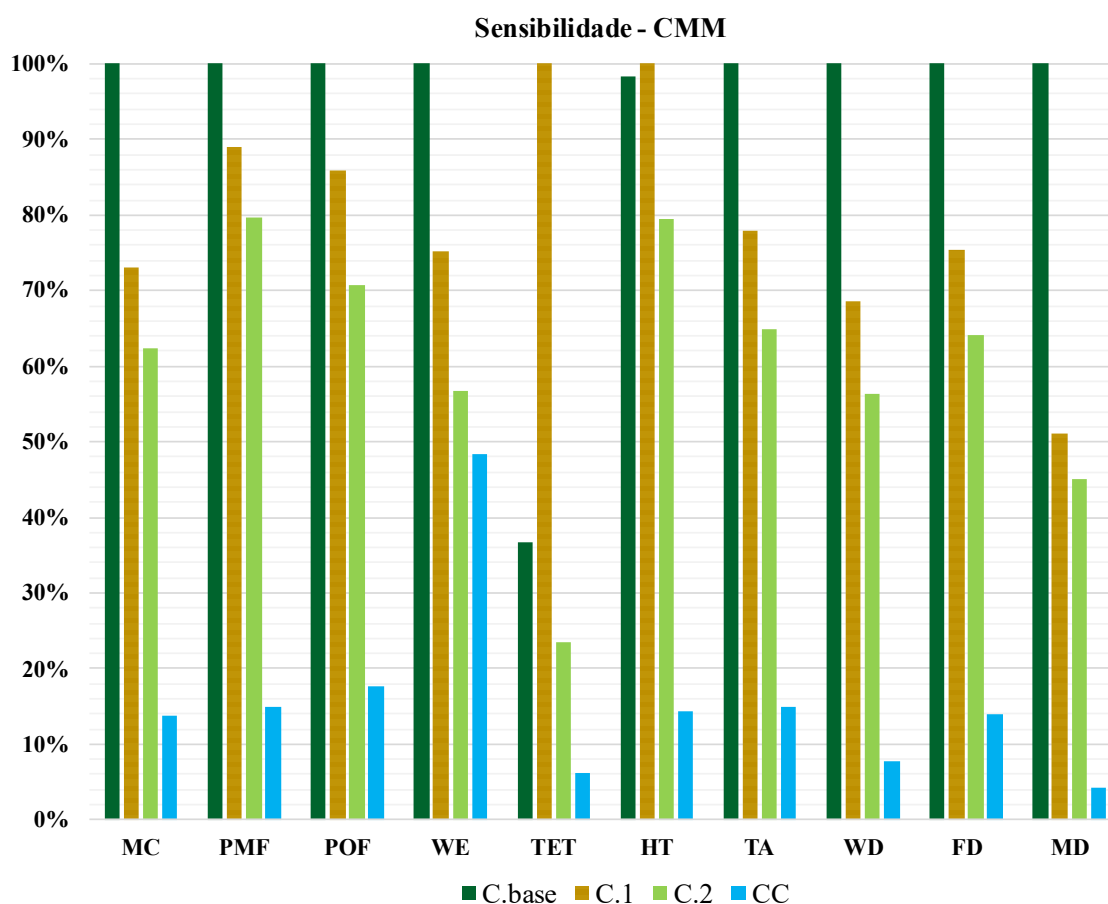


Figura 47: Percentual de contribuição entre os cenários em estudo para o CMM

Fonte: Autoria própria

O cenário 2 (C.2) apresentou os melhores resultados ambientais, com redução em todas as categorias de impacto. Os destaques incluem diminuições expressivas nas categorias de

mudanças climáticas (MC), escassez de água (WE), escassez de recursos fósseis (FD) e de metais (MD), refletindo o baixo impacto ambiental associado à geração eólica, sobretudo no contexto brasileiro. Já o cenário 1 (C.1), que modela a eletricidade proveniente de sistema fotovoltaico, também resultou em melhorias ambientais consideráveis em comparação ao cenário base, mas com menor magnitude que o C.2. Destaca-se, contudo, um aumento nos impactos de ecotoxicidade terrestre (TET) e um ligeiro aumento na toxicidade humana (HT), comportamento atribuído, principalmente, à cadeia produtiva dos materiais envolvidos nos painéis solares (Tawalbeh *et al.*, 2021).

Já para os três cenários do CMMot, a Tabela 10 e Figura 48 trazem os resultados obtidos para a sensibilidade.

Tabela 10: Análise de sensibilidade dos impactos ambientais relativos ao CMMot

Categoria de impacto	Unidade	C.base	C.1	C.2
Mudanças climáticas (MC)	kgCO _{2eq}	1,28E+01	9,28E+00	7,87E+00
Emissões de material particulado (PMF)	kgPM _{10eq}	3,62E-02	3,21E-02	2,86E-02
Formação de oxidantes fotoquímicos (POF)	kg NMVOC	3,51E-02	3,00E-02	2,45E-02
Ecotoxicidade da água (WE)	kg 1,4-DB _{eq}	1,79E+00	1,34E+00	9,96E-01
Ecotoxicidade terrestre (TET)	kg 1,4-DB _{eq}	1,44E-03	4,01E-03	8,99E-04
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4-DB _{eq}	5,62E+00	5,72E+00	4,50E+00
Acidificação terrestre (TA)	kgSO _{2eq}	5,51E-02	4,26E-02	3,52E-02
Escassez de água (WE)	m ³	2,12E+02	1,43E+02	1,16E+02
Escassez de recursos fósseis (FD)	kg oil _{eq}	3,27E+00	2,44E+00	2,06E+00
Escassez de metais (MD)	kgFe _{eq}	7,13E-03	3,56E-03	3,13E-03

Fonte: Autoria própria

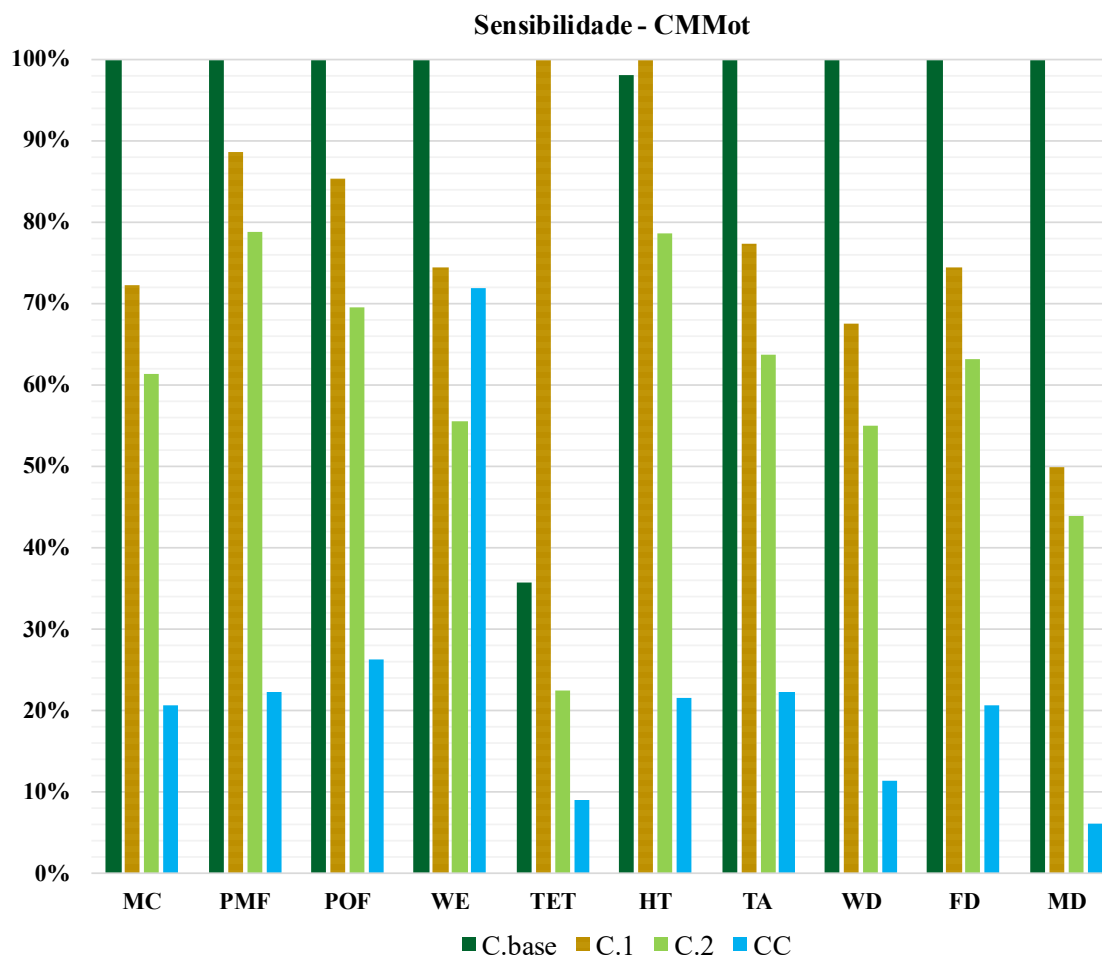


Figura 48: Percentual de contribuição entre os cenários em estudo para o CMMot

Fonte: Autoria própria

De forma análoga ao observado anteriormente, a análise de sensibilidade aplicada ao CMMot demonstra que a substituição da eletricidade da rede por fontes renováveis gera reduções expressivas em todas as categorias de impacto ambiental. O cenário 2, novamente se destaca como o mais vantajoso para o meio ambiente. Contudo, apesar das melhorias ambientais obtidas, tanto com a otimização quando com a aplicação de energia eólica, o modelo convencional apresenta resultados mais satisfatórios para a ACV. Esse aspecto reforça, mais uma vez, como o nível de maturidade tecnológica e a escala industrial exerce influência direta sobre o desempenho ambiental de um produto. Além disso, a fabricação do modelo já existente no mercado dispõe-se de cadeias produtivas robustas, uso integral de capacidade produtiva e maior rendimento energético por unidade produzida.

No presente estudo, a MA foi conduzida em ambiente laboratorial, com baixa ocupação do volume útil da câmara de impressão e produção unitária, o que contribuiu para uma maior concentração dos impactos ambientais por peça. Dessa forma, os resultados não apenas

evidenciam as limitações atuais do CMM frente a produtos consolidados, mas também destacam a importância de considerar o contexto tecnológico e de escala na interpretação dos dados de ACV. Entretanto, é fundamental ressaltar que o CMM se encontra ainda em fase de prototipagem e validação estrutural. Os resultados obtidos demonstraram que, mesmo em condições experimentais, o CMMot apresentou reduções ambientais significativas em relação ao modelo sem otimização, e que sua viabilidade ambiental pode ser ampliada com a incorporação de fontes de energia renovável e, sobretudo, com o escalonamento do processo produtivo. Assim, o CMM representa uma solução promissora, tanto do ponto de vista estrutural quanto ambiental, à medida que seu desenvolvimento tecnológico for avançando.

6. CONCLUSÕES

O trabalho investigou o desenvolvimento, o desempenho estrutural e os impactos ambientais de um canote de bicicleta com estrutura baseada em metamateriais (CMM), em comparação a um modelo convencional com sistema de amortecimento (CC) já existente no mercado. Essas estruturas artificiais têm se tornado objeto de interesse principalmente no que diz respeito a ordenação de seus arranjos e propriedades excepcionais quando comparadas aos materiais encontrados na natureza. A análise visou responder à pergunta “em que medida o canote de metamaterial apresenta desempenho estrutural e ambiental superior quando comparado ao canote convencional?”.

Do ponto de vista estrutural, os resultados indicaram que o CMM apresenta bom desempenho dinâmico, com capacidade de mitigar vibrações longitudinais transmitidas ao ciclista, o que pode contribuir para o aumento do conforto durante o uso. O tipo de MM empregado foi baseado em células de arco central (CACs), projetadas com o intuito de atenuar e redirecionar vibrações longitudinais, transformando perturbações verticais em deformações laterais, torcionais e efeitos de flexão. A análise estática e transiente demonstrou que o CMM e CMM otimizado mantiveram limites de tensões dentro do critério de von Mises e respostas dinâmicas adequadas, com deslocamentos extremamente baixos, na ordem de 10^{-4} mm, indicando uma resposta praticamente nula às excitações aplicadas, confirmando a viabilidade estrutural dos MMs, principalmente com geometria reduzida.

Em termos ambientais, os dados da avaliação do ciclo de vida (ACV) mostraram que o CMMot possuiu desempenho superior ao CMM original, com reduções de, aproximadamente, 32% em todas as categorias de impacto avaliadas, especialmente com a aplicação de energia eólica. No entanto, mesmo com a aplicação de fontes renováveis de energia, conforme demonstrado na análise de sensibilidade, o CC ainda apresenta menor impacto ambiental total. Este resultado se justifica, principalmente, pelo nível de maturidade tecnológica mais elevado do CC, produzido em escala industrial consolidada, enquanto o CMM é um protótipo fabricado em ambiente laboratorial, sem aproveitamento total do volume útil da câmara de impressão. Por este motivo, é necessário ajustar as avaliações de impacto com base na relação entre o volume real ocupado pela peça e o volume útil total da câmara, uma vez que a técnica SLM opera com custos energéticos significativos, que podem ser diluídos em contextos industriais com maior rendimento por ciclo.

Assim, a partir dos resultados encontrados, conclui-se que o CMM, embora ainda em estágio de prototipagem, mostra-se promissor como solução técnica e ambiental, especialmente com a incorporação de estratégias de otimização geométrica e uso de fontes de energia renovável. Entretanto, seu desempenho ambiental ainda não supera o do modelo convencional e comercial, reforçando a necessidade de avançar em maturação tecnológica e eficiência de processo para viabilizar sua competitividade em cenários reais de produção. Ademais, verificou-se uma grande dificuldade na obtenção de dados técnicos confiáveis relacionados, principalmente, ao processo de atomização a gás na produção de pó metálico. Tal limitação impacta diretamente a precisão dos inventários e reforçam a necessidade de padronização de dados industriais para que futuras análises ambientais em MA sejam mais concretas e fiéis a realidade.

É importante ressaltar que a pesquisa contribui para a literatura ao abordar a integração entre estruturas de MMs e ACV, tendo em vista a escassez de investigações que considerem simultaneamente os aspectos funcionais e ambientais dessas estruturas. Por fim, destaca-se que o presente estudo adotou uma abordagem do tipo *cradle-to-gate*. Para uma compreensão mais abrangente do comportamento ambiental do CMM ao longo de todo seu ciclo de vida, recomenda-se que trabalhos futuros realizem avaliações do tipo *cradle-to-grave*, incorporando as etapas de uso e descarte, além de análises de incerteza, visando avaliar a sensibilidade dos resultados frente às variações dos parâmetros de entrada para aumentar a robustez das conclusões. Também se sugere a realização de ensaios mecânicos experimentais para validação da resistência da peça fabricada, bem como o avanço em avaliações sociais integradas, ainda pouco exploradas em estudos envolvendo MMs e ACV.

REFERÊNCIAS

ABAD, Ehsan Masoumi Khalil; KHANOKI, Sajad Arabnejad; PASINI, Damiano. Fatigue design of lattice materials via computational mechanics: Application to lattices with smooth transitions in cell geometry. **International Journal of Fatigue**, [N.p.], vol. 47, p. 126–136, fev. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.08.003>.

ABDULLAH, Shakeeb; XIAO, Gaozhi; AMAYA, Rony E. A Review on the History and Current Literature of Metamaterials and Its Applications to Antennas Radio Frequency Identification (RFID) Devices. **IEEE Journal of Radio Frequency Identification**, [N.p.], vol. 5, n° 4, p. 427–445, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JRFID.2021.3091962>.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a. 1–21 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b. 1–46 p.

AKHMETSHIN, L. R.; IOKHIM, K. V.; KAZANTSEVA, E. A.; SMOLIN, I. Yu. Numerical study of the deformation behavior of a 2D chiral metamaterial. **Letters on Materials**, [N.p.], vol. 14, n° 1, p. 9–14, 1 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/doi.org/10.48612/letters/2024-1-9-14>.

AKHYAR, Akhyar; NASUTION, Abdillah Imron; MULYAGUSDIN, Ali; IBRAHIM, Masri. Economic Impact Analysis Versus Investment Analysis: Cast-Bike Frame Manufacturing from Recycled Aluminum Alloy. **Jurnal Teknik Mesin Unsyiah**, [N.p.], vol. 9, n° 1, p. 1–8, 2021. Disponível em: <https://jurnal.usk.ac.id/JTM/article/view/21620/14573>. Acessado: 5 jun. 2025.

ALBERT, Réka; ROBEVA, Raina. Signaling Networks: Asynchronous Boolean Models. In: ROBEVA, Raina S. (org.). **Algebraic and Discrete Mathematical Methods for Modern Biology**. 1. ed. [N.p.]: Elsevier, 2015. ed 1, p. 65–91. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801213-0.00004-6>.

ALEXOPOULOS, T.; GAZIS, E. N.; MALTEZOS, S.; KOUTELIERIS, G.; PERSSON, B. N. J. On the Use of Foam Rubber for Sealing Applications. **Tribology Letters**, [N.p.], vol. 72, n° 2, p. 1–10, 11 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11249-024-01845-5>.

ALI, Adnan; MITRA, Anirban; AÏSSA, Brahim. Metamaterials and Metasurfaces: A Review from the Perspectives of Materials, Mechanisms and Advanced Metadevices. **Nanomaterials**, [N.p.], vol. 12, n° 6, p. 1–32, 21 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12061027>.

ALOMARAH, Amer; YUAN, Ye; RUAN, Dong. A bio-inspired auxetic metamaterial with two plateau regimes: Compressive properties and energy absorption. **Thin-Walled Structures**, [N.p.], vol. 192, p. 1–15, 1 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111175>.

ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Desig.** 5. ed. [N.p.]: Butterworth-Heinemann, 2017. 1–907 p.

ATTAR, H.; CALIN, M.; ZHANG, L.C.; SCUDINO, S.; ECKERT, J. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. **Materials Science and Engineering: A**, [N.p.], vol. 593, p. 170–177, 21 jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.038>.

AU, Siu-Kui. **Operational Modal Analysis.** 1. ed. Singapore: Springer Singapore, out. 2017. 1–291 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4118-1>.

BAISHYA, Manash Jyoti; MUTHU, Nelson; KHANIKAR, Prasenjit. In pursuit of a high-performance mechanical metamaterial: Simple-cubic-octahedral plate lattice. **International Journal of Mechanical Sciences**, [N.p.], vol. 272, p. 1–17, 15 jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109189>.

BANERJEE, Sourav. **Metamaterials in Topological Acoustics.** 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, out. 2023. 1–429 p. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003225751>.

BARCHIESI, Emilio; SPAGNUOLO, Mario; PLACIDI, Luca. Mechanical metamaterials: a state of the art. **Mathematics and Mechanics of Solids**, [N.p.], vol. 24, n° 1, p. 212–234, 1 jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1081286517735695>.

BJØRN, Anders; MOLTESEN, Andreas; LAURENT, Alexis; OWSIANIAK, Mikołaj; CORONA, Andrea; BIRKVED, Morten; HAUSCHILD, Michael Z. Life Cycle Inventory Analysis. In: HAUSCHILD, Michael Z.; ROSENBAUM, Ralph K.; OLSEN, Stig Irving (orgs.). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.

BOSE, Jagadis Chunder. On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure. **Proceedings of the Royal Society of London**, [N.p.], vol. 63, n° 389–400, p. 146–152, 1 jan. 1898. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspl.1898.0019>.

BRÛLÉ, Stéphane; ENOCH, Stefan; GUENNEAU, Sébastien. Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives. **Physics Letters A**, [N.p.], vol. 384, n° 1, p. 1–11, 9 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126034>.

BSI. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 14766: Mountain-bicycles – Safety requirements and test methods**. London, UK: BSI, 2005. 1–89 p.

CAMPBELL, Thomas; WILLIAMS, Christopher; IVANOVA, Olga; GARRETT, Banning. Could 3D Printing Change the World?: Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. **Atlantic Council**, Washington, DC, p. 1–16, 1 out. 2011. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/resrep03564>. Acessado: 5 jun. 2024.

CHEN, Baocai; CHEN, Liming; DU, Bing; LIU, Houchang; LI, Weiguo; FANG, Daining. Novel multifunctional negative stiffness mechanical metamaterial structure: Tailored functions of multi-stable and compressive mono-stable. **Composites Part B: Engineering**, [N.p.], vol. 204, p. 1–16, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108501>.

CHEN, Yuan; MAI, Yiu Wing; YE, Lin. Perspectives for multiphase mechanical metamaterials. **Materials Science and Engineering R: Reports**, [N.p.], vol. 153, p. 1–17, 1 maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2023.100725>.

CHEN, Zhaochang; LIN, Ying-Tian; SALEHI, Hadi; CHE, Zhumei; ZHU, Ye; DING, Jun; SHENG, Biyun; ZHU, Ronghua; JIAO, Pengcheng. Advanced Fabrication of Mechanical Metamaterials Based on Micro/Nanoscale Technology. **Advanced Engineering Materials**, [N.p.], vol. 25, n° 22, p. 1–37, 22 jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adem.202300750>.

CHENG, Jing; LIANG, Shujun; CHU, Yangyang. Thermal Regulation of the Acoustic Bandgap in Pentamode Metamaterials. **Crystals**, [N.p.], vol. 14, n° 11, p. 1–8, 17 nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst14110992>.

CHRISTENSEN, Johan; KADIC, Muamer; WEGENER, Martin; KRAFT, Oliver; WEGENER, Martin. Vibrant times for mechanical metamaterials. **MRS Communications**, [N.p.], vol. 5, n° 3, p. 453–462, 1 set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/mrc.2015.51>.

CONNER, Brett P.; MANOGHARAN, Guha P.; MARTOF, Ashley N.; RODOMSKY, Lauren M.; RODOMSKY, Caitlyn M.; JORDAN, Dakesha C.; LIMPEROS, James W. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. **Additive Manufacturing**, [N.p.], vol. 1, p. 64–76, 1 out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.

CONTRERAS, Nicolás; ZHANG, Xihong; HAO, Hong; HERNÁNDEZ, Francisco. Application of elastic metamaterials/meta-structures in civil engineering: A review. **Composite Structures**, [N.p.], vol. 327, p. 1–19, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117663>.

CRASTER, Richard; GUENNEAU, Sébastien; KADIC, Muamer; WEGENER, Martin. Mechanical metamaterials. **Reports on Progress in Physics**, [N.p.], vol. 86, n° 9, p. 1–64, 1 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ace069>.

CUI, Tie Jun; SMITH, David R.; LIU, Ruopeng. **Metamaterials**. Boston, MA: Springer US, 2010. 1–367 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0573-4>.

CURRAN, Mary Ann. Life Cycle Assessment. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. 5. ed. Estados Unidos: Wiley, 15 mar. 2016. vol. 14, ed 5, p. 805–831. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0471238961.lifeguin.a01.pub2>.

CURRAN, Mary Ann. **Life Cycle Assessment Student Handbook**. 1. ed. [N.p.]: Wiley-Scrivener, jul. 2015. 1–320 p.

DE JONGE, Christa P.; KOLKEN, Helena M. A.; ZADPOOR, Amir A. Non-Auxetic Mechanical Metamaterials. **Materials**, [N.p.], vol. 12, nº 4, p. 1–21, 20 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12040635>.

DEGL'INNOCENTI, Riccardo; LIN, Hungyen; NAVARRO-CÍA, Miguel. Recent progress in terahertz metamaterial modulators. **Nanophotonics**, [N.p.], vol. 11, nº 8, p. 1485–1514, 2 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0803>.

DI BARBA, Paolo; WIAK, Sławomir. Innovative materials, computational methods and their disruptive effects. *In*: DI BARBA, Paolo; WIAK, Sławomir (orgs.). **Optimal Design Exploiting 3D Printing and Metamaterials**. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 11 fev. 2022. p. 5–55.

DICKS, Andrew P.; HENT, Andrei. An Introduction to Life Cycle Assessment. *In*: DICKS, Andrew P.; HENT, Andrei (orgs.). **Green Chemistry Metrics A Guide to Determining and Evaluating Process Greenness**. [N.p.]: Springer, Cham, 2015. p. 81–90. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10500-0_5.

DIONÍSIO, Hernani Cordeiro; SÁNCHEZ, Jesús Antonio García; SILVA, Luís Antonio. Origami-based metamaterial to attenuate the impact load in a landing gear for the recovery of the Microsatellites Launch Vehicle first stage. 15 jun. 2021. **XLII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia (ABMEC), 15 jun. 2021. vol. 3, nº 3, p. 1–7.

DUCKER, James. Environmental Problems Caused by Polymers. **AZoCleantech**. 19 mar. 2021. Disponível em: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=1189>. Acessado: 7 jul. 2025.

ECOINVENT. Ecoinvent Version 3.6. <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.6>. set. 2019.

EHMSEN, Svenja; CONRADS, Janosch; KLAR, Matthias; AURICH, Jan C. Environmental impact of powder production for additive manufacturing: Carbon footprint and cumulative energy demand of gas atomization. **Journal of Manufacturing Systems**, [N.p.], vol. 82, p. 13–25, 1 out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.05.004>.

EKVALL, Tomas. Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. *In*: BASTANTE-CECA, María José; FUENTES-BARGUES, Jose Luis; HUFNAGEL, Levente; MIHAI, Florin-Constantin; IATU, Corneliu (orgs.). **Sustainability Assessment at the 21st century**. [N.p.]: IntechOpen, 12 fev. 2020. p. 1–21. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.89202>.

ENGHETA, Nader; ZIOLKOWSKI, Richard W (orgs.). **Metamaterials: Physics and Engineering Explorations**. 1. ed. Estados Unidos: Wiley-IEEE Press, jun. 2006. 1–352 p.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Life-Cycle Assessment: Principles and Practice**. Cincinnati, Ohio: US Environmental Protection Agency, maio 2006. 1–80 p. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF>. Acessado: 2 maio 2025.

FERAT TOSCANO, Catalina; MARTIN-DEL-CAMPO, Cecilia; MOELLER-CHAVEZ, Gabriela; LEON DE LOS SANTOS, Gabriel; FRANÇOIS, Juan-Luis; REVOLLO FERNANDEZ, Daniel. Life Cycle Assessment of a Combined-Cycle Gas Turbine with a Focus on the Chemicals Used in Water Conditioning. **Sustainability**, [N.p.], vol. 11, nº 10, p. 1–24, 22 maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11102912>.

FU, Minghui; LIU, Fengming; HU, Lingling. A novel category of 3D chiral material with negative Poisson's ratio. **Composites Science and Technology**, [N.p.], vol. 160, p. 111–118, 26 maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.03.017>.

GAL, Joseph. Louis Pasteur, Chemical Linguist: Founding the Language of Stereochemistry. **Helvetica Chimica Acta**, [N.p.], vol. 102, n° 8, p. 1–19, 26 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hlca.201900098>.

GAO, Ziyang; LEI, Yu; LI, Zhanmiao; YANG, Jikun; YU, Bo; YUAN, Xiaoting; HOU, Zewei; HONG, Jiawang; DONG, Shuxiang. Artificial piezoelectric metamaterials. **Progress in Materials Science**, [N.p.], vol. 151, p. 1–43, 1 maio 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101434>.

GE, Changfeng; PRIYADARSHINI, Lakshmi; CORMIER, Denis; PAN, Liao; TUBER, Jonathan. A preliminary study of cushion properties of a 3D printed thermoplastic polyurethane Kelvin foam. **Packaging Technology and Science**, [N.p.], vol. 31, n° 5, p. 361–368, 21 jun. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pts.2330>.

GEORGITZIKIS K; MANCINI L; ELIA E; VIDAL-LEGAZ B. **Sustainability aspects of Bauxite and Aluminium Climate change, Environmental, Socio-Economic and Circular Economy considerations**. Luxembourg: [S.n.], jul. 2021. 1–111 p. DOI: <https://doi.org/10.2760/702356>. Disponível em: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/library/jrc125390_sustainability_profile_bauxite_aluminium_online.pdf. Acessado: 7 jul. 2025.

GRAHL, Birgit; GENSCHE, Carl-Otto. Why Do We Cover Interpretation As Well As Critical Review and Reporting in One Volume? In: CURRAN, Mary Ann (org.). **Interpretation, Critical Review and Reporting in Life Cycle Assessment**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2023. p. 1–5. (LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35727-5_1.

GRIMA, Joseph N.; CARUANA-GAUCI, Roberto. Materials that push back. **Nature Materials**, [N.p.], vol. 11, n° 7, p. 565–566, 21 jun. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nmat3364>.

GROEN, Evelyne A.; HEIJUNGS, Reinout; BOKKERS, Eddie A. M.; DE BOER, Imke J. M. Sensitivity analysis in life cycle assessment. *In*: SCHENCK, Rita; HUIZENGA, Douglas (orgs.). 2014. **9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector**. San Francisco, USA: [S.n.], 2014. p. 482–488.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems, International Adaptation**. 7. ed. USA: Wiley, jul. 2021. 1–1008 p.

GU, Jianwen; ZHAO, Wei; ZENG, Chengjun; LIU, Liwu; LENG, Jinsong; LIU, Yanju. Construction of mechanical metamaterials and their extraordinary functions. **Composite Structures**, [N.p.], vol. 356, p. 1–13, 1 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118872>.

GUARINO, Stefano; PONTICELLI, Gennaro Salvatore; VENETTACCI, Simone. Environmental assessment of Selective Laser Melting compared with Laser Cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [N.p.], vol. 31, p. 525–538, 1 nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004>.

GUEVARA-CORZO, Jeffrey J.; BEGAMBRE-CARRILLO, Oscar J.; GARCIA-SANCHEZ, Jesus A.; SANCHEZ-ACEVEDO, Heller G. Passive seismic protection systems with mechanical metamaterials: a current review. **Structural Engineering and Mechanics**, [N.p.], vol. 82, n° 4, p. 417–434, 25 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/sem.2022.82.4.417>.

GUINEE, Jeroen B.; DE BRUIJN, Hans; VAN DUIN, Robbert; HUIJBREGTS, Mark A. J.; GORREE, Marieke; HEIJUNGS, Reinout; HUPPES, Gjalt; KLEIJN, Renée; DE KONING, Arjan; VAN OERS, Laurant; WEGENER SLEESWIJK, Anneke; SUH, Sangwon; UDO DE HAES, Helias A. (orgs.). **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Dordrecht: Springer Netherlands, maio 2002. 1–692 p. (Eco-Efficiency in Industry and Science). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7>.

GUO, Dongliang; JIANG, Shan; ZHOU, Yunlei; ZHANG, Lei; LI, Kan; SONG, Bo; HUANG, YongAn. Ultrahigh compression-shear ratio of sandwich pentamode metamaterials. **Composite Structures**, [N.p.], vol. 322, p. 1–8, 15 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117331>.

HAS, Michael. **Sustainable products : life cycle assessment, risk management, supply chains, ecodesign**. 2. ed. [N.p.]: De Gruyter, 2024. 1–372 p.

HEDAYATI, R.; LEEFLANG, A. M.; ZADPOOR, A. A. Additively manufactured metallic pentamode meta-materials. **Applied Physics Letters**, [N.p.], vol. 110, nº 9, p. 1–5, 27 fev. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4977561>.

HEIJUNGS, Reinout. **Probability, Statistics and Life Cycle Assessment: Guidance for Dealing with Uncertainty and Sensitivity**. 1. ed. Cham, Switzerland: Springer Cham, 2024. 1–1144 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-49317-1>.

HEIJUNGS, Reinout; HUIJBREGTS, Mark A.J. A review of approaches to treat uncertainty in LCA. *In*: PAHL-WOSTL, Claudia; SCHMIDT, Sonja; RIZZOLI, Andrea E.; JAKEMAN, Anthony J. (orgs.). jun. 2004. **Complexity and integrated resources management: Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society**. Alemanha: [S.n.], jun. 2004. p. 332–339. Disponível em: https://www.iemss.org/iemss2004/proceedings/iEMSSs2004_vol1.pdf. Acessado: 13 maio 2025.

HILLEGE, Luc. Impact Categories (LCA): The Complete Overview Contents. **Ecochain**. 7 jun. 2019. Disponível em: <https://ecochain.com/blog/impact-categories-lca/>. Acessado: 14 jun. 2025.

HOLLIMAN, Jade E.; SCHAEF, H. Todd; MCGRAIL, B. Peter; MILLER, Quin R. S. Review of foundational concepts and emerging directions in metamaterial research: design, phenomena, and applications. **Materials Advances**, [N.p.], vol. 3, nº 23, p. 8390–8406, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D2MA00497F>.

ILCD. INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM. **ILCD Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. 1. ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2788/38479>.

JENSEN, Allan Astrup; HOFFMAN, Leif; MØLLER, Birgitte T.; SCHMIDT, Anders; CHRISTIANSEN, Kim; ELKINGTON, John; VAN DIJK, Francesca. **Life Cycle Assessment: A guide to approaches, experiences and information sources**. [N.p.]: [S.n.], ago. 1997. 1–119 p. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/gh-07-97-595-en-c>. Acessado: 2 maio 2025.

Ji, Guosheng; HUBER, John. Recent progress in acoustic metamaterials and active piezoelectric acoustic metamaterials - A review. **Applied Materials Today**, [N.p.], vol. 26, p. 1–18, 1 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101260>.

JIAO, Pengcheng; MUELLER, Jochen; RANEY, Jordan R.; ZHENG, Xiaoyu; ALAVI, Amir H. Mechanical metamaterials and beyond. **Nature Communications**, [N.p.], vol. 14, nº 1, p. 1–17, 26 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41679-8>.

KADIC, Muamer; BÜCKMANN, Tiemo; SCHITTNY, Robert; WEGENER, Martin. On anisotropic versions of three-dimensional pentamode metamaterials. **New Journal of Physics**, [N.p.], vol. 15, nº 2, p. 1–12, 18 fev. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/15/2/023029>.

KHOO, Hsien Hui; TAN, Reginald B H. Life Cycle Assessment Methodology: Ongoing Developments and Outlook. *In*: KHOO, Hsien Hui; TAN, Reginald B H (orgs.). **Life Cycle Assessment: New Developments and Multi-Disciplinary Applications**. Singapore: World Scientific Publishing, fev. 2022. p. 1–21. Disponível em: <https://doi.org/10.1142/12515>.

KLÖPPFER, Walter; GRAHL, Birgit. **Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice**. Weinheim, Germany: Wiley, 14 abr. 2014. 1–440 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9783527655625>.

KOCK, Winston E. Metallic Delay Lenses. **Bell System Technical Journal**, [N.p.], vol. 27, nº 1, p. 58–82, jan. 1948. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01331.x>.

KOKARE, Samruddha; OLIVEIRA, J.P.; GODINA, Radu. A LCA and LCC analysis of pure subtractive manufacturing, wire arc additive manufacturing, and selective laser melting approaches. **Journal of Manufacturing Processes**, [N.p.], vol. 101, p. 67–85, 8 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.102>.

KOKARE, Samruddha; OLIVEIRA, J.P.; SANTOS, T.G.; GODINA, Radu. Environmental and economic assessment of a steel wall fabricated by wire-based directed energy deposition. **Additive Manufacturing**, [N.p.], vol. 61, p. 1–14, 5 jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103316>.

KONDEPUDI, Dilip; KOUICHI, Asakura. Chiral asymmetry in nature. *In*: BUSCH, Kenneth W.; BUSCH, Marianna A. (orgs.). **Chiral Analysis**. 1. ed. Texas: Elsevier, out. 2006. ed 1, p. 25–45.

KOSCHNY, Thomas; SOUKOULIS, Costas M; WEGENER, Martin. Metamaterials in microwaves, optics, mechanics, thermodynamics, and transport. **Journal of Optics**, [N.p.], vol. 19, nº 8, p. 1–16, 21 ago. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2040-8986/aa7288>.

KRUSHYNSKA, Anastasiia O.; TORRENT, Daniel; ARAGÓN, Alejandro M.; ARDITO, Raffaele; BILAL, Osama R.; BONELLO, Bernard; BOSIA, Federico; CHEN, Yi; CHRISTENSEN, Johan; COLOMBI, Andrea; CUMMER, Steven A.; DJAFARI-ROUHANI, Bahram; FRATERNALI, Fernando; GALICH, Pavel I.; GARCIA, Pedro David; GROBY, Jean-Philippe; GUENNEAU, Sebastien; HABERMAN, Michael R.; HUSSEIN, Mahmoud I.; JANBAZ, Shahram; JIMÉNEZ, Noé; KHELIF, Abdelkrim; LAUDE, Vincent; MIRZAALI, Mohammad J.; PACKO, Pawel; PALERMO, Antonio; PENNEC, Yan; PICÓ, Rubén; LÓPEZ, María Rosendo; RUDYKH, Stephan; SERRA-GARCIA, Marc; SOTOMAYOR TORRES, Clivia M.; STARKEY, Timothy A.; TOURNAT, Vincent; WRIGHT, Oliver B. Emerging topics in nanophononics and elastic, acoustic, and mechanical metamaterials: an overview. **Nanophotonics**, [N.p.], vol. 12, nº 4, p. 659–686, 23 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0671>.

KRUZHANOV, Vladislav; ARNHOLD, Volker. Energy consumption in powder metallurgical manufacturing. **Powder Metallurgy**, [N.p.], vol. 55, n° 1, p. 14–21, 12 fev. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/174329012X13318077875722>.

KUMAR, Rakesh; KUMAR, Manoj; CHOHAN, Jasgurpreet Singh; KUMAR, Santosh. Overview on metamaterial: History, types and applications. **Materials Today: Proceedings**, [N.p.], vol. 56, p. 3016–3024, 1 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.423>.

KUMAR, S.; UBAID, J.; ABISHERA, R.; SCHIFFER, A.; DESHPANDE, V. S. Tunable Energy Absorption Characteristics of Architected Honeycombs Enabled via Additive Manufacturing. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [N.p.], vol. 11, n° 45, p. 42549–42560, 30 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b12880>.

LEE, Geon; LEE, Seong Jin; RHO, Junsuk; KIM, Miso. Acoustic and mechanical metamaterials for energy harvesting and self-powered sensing applications. **Materials Today Energy**, [N.p.], vol. 37, 1 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101387>.

LEE, Yung-Li; GUO, Mingchao. Pseudo Stress Analysis Techniques. *In*: LEE, Yung-Li; BARKEY, Mark E.; KANG, Hong-Tae (orgs.). **Metal Fatigue Analysis Handbook**. USA: Elsevier, 2012. p. 61–87. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385204-5.00002-1>.

LEONHARDT, Ulf. Optical Conformal Mapping. **Science**, [N.p.], vol. 312, n° 5781, p. 1777–1780, 23 jun. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1126493>.

LEROY-PARMENTIER, Noémie; WICHE, Pia; SONNEMANN, Guido. Life cycle assessment. *In*: VALDIVIA, Sonia; SONNEMANN, Guido (orgs.). **Handbook on Life Cycle Sustainability Assessment**. Reino Unido: Edward Elgar Publishing, 23 abr. 2024. p. 60–76. Disponível em: <https://doi.org/10.4337/9781800378650>.

LI, Bingxun; XIN, Xiaozhou; LIN, Cheng; LIU, Liwu; LIU, Yanju; LENG, Jinsong. Compressive properties and energy absorption of 4D printed auxetic mechanical metamaterials.

Composite Structures, [N.p.], vol. 340, p. 1–15, 15 jul. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118135>.

LI, Tiantian; LI, Yaning. Bio-inspired space-filling fractal metamaterial. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, [N.p.], vol. 160, p. 1–11, 1 dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106791>.

LIM, Dahyun Daniel; LEE, Jeongwoo; PARK, Jinwoo; LEE, Jaemin; NOH, Dowon; PARK, Sujin; GU, Grace X.; CHOI, Wonjoon. Multifunctional seamless meta-sandwich composite as lightweight, load-bearing, and broadband-electromagnetic-wave-absorbing structure. **Additive Manufacturing**, [N.p.], vol. 95, p. 1–10, 5 set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104515>.

LIN, Zhaowen; NOVELINO, Larissa S.; WEI, Heming; ALDERETE, Nicolas A.; PAULINO, Glaucio H.; ESPINOSA, Horacio D.; KRISHNASWAMY, Sridhar. Folding at the Microscale: Enabling Multifunctional 3D Origami-Architected Metamaterials. **Small**, [N.p.], vol. 16, nº 35, p. 1–9, 27 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sml.202002229>.

LINDELL, Ismo V.; SIHVOLA, Ari H.; KURKIJÄRVI, Juhani. Karl F. Lindman: The Last Hertzian, and a Harbinger of Electromagnetic Chirality. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, [N.p.], vol. 34, nº 3, p. 24–30, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/74.153530>.

LINDMAN, Karl L. Om en genom ett isotropt system av spiralformiga resonatorer alstrad rotationspolarisation av de elektromagnetiska vågorna. **Öfversigt af Finska vetenskaps-societetens förhandlingar**. Helsinki: Helsingfors centraltryckeri och bokbinderi Ab, 1914. vol. LVII, p. 1–32.

LV, Cheng; KRISHNARAJU, Deepakshyam; KONJEVOD, Goran; YU, Hongyu; JIANG, Hanqing. Origami based Mechanical Metamaterials. **Scientific Reports**, [N.p.], vol. 4, nº 1, p. 1–6, 7 ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep05979>.

MANILAL, Sidhant Kumar. **Bicycle ride comfort evaluation and optimization**. [N.p.]: [S.n.], 28 out. 2019. 1–54 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26063.64162>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339713359>. Acessado: 17 fev. 2025.

MCINERNEY, James P.; MISSERONI, Diego; ROCKLIN, D. Zeb; PAULINO, Glaucio H.; MAO, Xiaoming. Coarse-grained fundamental forms for characterizing isometries of trapezoid-based origami metamaterials. **Nature Communications**, [N.p.], vol. 16, n° 1, p. 1–12, 20 fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57089-x>.

MIAO, Huaibin; FU, Jun; QIAN, Zhihui; REN, Luquan; REN, Lei. How does the canine paw pad attenuate ground impacts? A multi-layer cushion system. **Biology Open**, [N.p.], vol. 6, n° 12, p. 1889–1896, 15 dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1242/bio.024828>.

MIRANDA, Luiz. Prototipagem: o que é, como funciona e para o que serve. 30 dez. 2023. Disponível em: <https://querobolsa.com.br/revista/prototipagem>. Acessado: 6 jun. 2024.

MURACA, R. F.; S. J. WHITTICK. **Materials data handbook: Aluminum alloy 6061**. [N.p.]: [S.n.], maio 1972. 1–105 p. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19720022808>. Acessado: 3 jun. 2025.

NIAN, Yuze; WAN, Shui; AVCAR, Mehmet; WANG, Xiao; HONG, Ru; YUE, Ru; LI, Mo. Nature-inspired 3D printing-based double-graded aerospace negative Poisson's ratio metastructure: Design, Fabrication, Investigation, optimization. **Composite Structures**, [N.p.], vol. 348, p. 1–21, 15 nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118482>.

NICOLAOU, Zachary G.; MOTTER, Adilson E. Mechanical metamaterials with negative compressibility transitions. **Nature Materials**, [N.p.], vol. 11, n° 7, p. 608–613, 20 maio 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nmat3331>.

NIU, Xiaohui; ZHAO, Rui; YAN, Simeng; PANG, Zengwei; LI, Hongxia; YANG, Xing; WANG, Kunjie. Chiral Materials: Progress, Applications, and Prospects. **Small**, [N.p.], vol. 19, n° 38, p. 1–50, 22 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sml.202303059>.

OMNITEK. OMNISINT-160: Fusão Seletiva a Laser. **Omnitek Tecnologia LTDA**. maio 2022. Disponível em: <https://www.omnitek.com.br/produto/equipamentos-de-fusao-seletiva-a-laser>. Acessado: 13 maio 2025.

PATI, Surjya Narayana. **Life Cycle Assessment: Future Challenges**. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 17 jun. 2022. 1–132 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003206750>.

PAVAN, Ana Laura Raymundo; MENDES, Natalia Crespo. ACV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida de Produtos. *In*: OLIVEIRA, José Augusto de; SILVA, Diogo Aparecido Lopes; PUGLIERI, Fabio Neves; SAAVEDRA, Yovana María Barrera (orgs.). **Engenharia e gestão do ciclo de vida de produtos: teoria e prática**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, dez. 2024. ed 1, p. 127–155.

PELLAND-LEBLANC, Jean-Philippe; LÉPINE, Julien; CHAMPOUX, Yvan; DROUET, Jean-Marc. Effect of Structural Damping on Vibrations Transmitted to Road Cyclists. *In*: DE CLERCK, James (org.). **Topics in Modal Analysis I, Volume 7: Proceedings of the 32nd IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics, 2014**. [N.p.]: Springer, Cham, abr. 2014. vol. 7, p. 283–290. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-04753-9_29. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-04753-9_29.

PENDRY, J. B.; HOLDEN, A. J.; STEWART, W. J.; YOUNGS, I. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. **Physical Review Letters**, [N.p.], vol. 76, n° 25, p. 4773–4776, 17 jun. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.4773>.

PENDRY, J. B.; SCHURIG, D.; SMITH, D. R. Controlling Electromagnetic Fields. **Science**, [N.p.], vol. 312, n° 5781, p. 1780–1782, 23 jun. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1125907>.

PENDRY, J.B.; HOLDEN, A.J.; ROBBINS, D.J.; STEWART, W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, [N.p.], vol. 47, n° 11, p. 2075–2084, 30 nov. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/22.798002>.

PENG, Tao; KELLENS, Karel; TANG, Renzhong; CHEN, Chao; CHEN, Gang. Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. **Additive Manufacturing**, [N.p.], vol. 21, p. 694–704, 1 maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.022>.

PENG, Tao; WANG, Yanan; ZHU, Yi; YANG, Yang; YANG, Yiran; TANG, Renzhong. Life cycle assessment of selective-laser-melting-produced hydraulic valve body with integrated design and manufacturing optimization: A cradle-to-gate study. **Additive Manufacturing**, [N.p.], vol. 36, p. 1–10, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101530>.

RAMADUGU, Swetha; LEDELLA, Siva Rama Krishna; GADUTURI, John Nitin Joshee; PINNINTI, Ravinder Reddy; SRIRAM, Venkatesh; SAXENA, Kuldeep K. Environmental life cycle assessment of an automobile component fabricated by additive and conventional manufacturing. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, [N.p.], vol. 18, nº 2, p. 847–858, 3 mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01532-0>.

RIZK, Nasser; NAZZAL, Mohammad; DARRAS, Basil M.; DEIAB, Ibrahim. Comparative sustainability assessment of laser powder bed fusion additive manufacturing and conventional machining for Ti-6Al-4V: A multi-criteria decision-making approach. **Journal of Cleaner Production**, [N.p.], vol. 525, p. 1–14, 20 set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146569>.

RODRÍGUEZ, Robin E.; AGARWAL, Sneha P.; AN, Shun; KAZYAK, Eric; DAS, Debashree; SHANG, Wen; SKYE, Rachael; DENG, Tao; DASGUPTA, Neil P. Biotemplated Morpho Butterfly Wings for Tunable Structurally Colored Photocatalysts. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [N.p.], vol. 10, nº 5, p. 4614–4621, 7 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b14383>.

ROSENBAUM, Ralph K.; HAUSCHILD, Michael Z.; BOULAY, Anne-Marie; FANTKE, Peter; LAURENT, Alexis; NÚÑEZ, Montserrat; VIEIRA, Marisa. Life Cycle Impact Assessment. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 167–270. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_10.

SAADE, Marcella Ruschi Mendes; GOMES, Vanessa; SILVA, Maristela Gomes da. ACV - Interpretação de resultados. *In*: OLIVEIRA, José Augusto de; SILVA, Diogo Aparecido Lopes; PUGLIERI, Fabio Neves; SAAVEDRA, Yovana María Barrera (orgs.). **Engenharia e gestão do ciclo de vida de produtos: teoria e prática**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, dez. 2024. ed 1, p. 159–180.

SAUER, Beverly. Life Cycle Inventory Modeling in Practice. *In*: CURRAN, Mary Ann (org.). **Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products**. Cincinnati, USA: Wiley, out. 2012. p. 43–66. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118528372.ch4>.

SHELBY, R. A.; SMITH, D. R.; NEMAT-NASSER, S. C.; SCHULTZ, S. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. **Applied Physics Letters**, [N.p.], vol. 78, n° 4, p. 489–491, 22 jan. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1343489>.

SILVERBERG, Jesse L.; EVANS, Arthur A.; MCLEOD, Lauren; HAYWARD, Ryan C.; HULL, Thomas; SANTANGELO, Christian D.; COHEN, Itai. Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials. **Science**, [N.p.], vol. 345, n° 6197, p. 647–650, 8 ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1252876>.

SKLAN, Sophia R; LI, Baowen. Thermal metamaterials: functions and prospects. **National Science Review**, [N.p.], vol. 5, n° 2, p. 138–141, 1 mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwy005>.

SMITH, D. R.; MOCK, J. J.; STARR, A. F.; SCHURIG, D. Gradient index metamaterials. **Physical Review E**, [N.p.], vol. 71, n° 3, p. 1–6, 17 mar. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036609>.

SOARES, Sebastião Roberto; FINOTTI, Alexandra Rodrigues; PRUDÊNCIO DA SILVA, Vamilson; ALVARENGA, Rodrigo A.F. Applications of life cycle assessment and cost analysis in health care waste management. **Waste Management**, [N.p.], vol. 33, n° 1, p. 175–183, jan. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.021>.

SUN, Shouheng; ERTZ, Myriam. Life cycle assessment and Monte Carlo simulation to evaluate the environmental impact of promoting LNG vehicles. **MethodsX**, [N.p.], vol. 7, p. 1–9, 1 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101046>.

SURJADI, James Utama; GAO, Libo; DU, Huifeng; LI, Xiang; XIONG, Xiang; FANG, Nicholas Xuanlai; LU, Yang. Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications. **Advanced Engineering Materials**, [N.p.], vol. 21, n° 3, p. 1–37, 4 mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adem.201800864>.

SWETHA, R.; SIVA RAMA KRISHNA, L.; HARI SAI KIRAN, B.; RAVINDER REDDY, P.; VENKATESH, Sriram. Comparative study on life cycle assessment of components produced by additive and conventional manufacturing process. **Materials Today: Proceedings**, [N.p.], vol. 62, p. 4332–4340, 1 jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.840>.

TAN, Xiaojun; LI, Yifeng; WANG, Lianchao; YAO, Kaili; JI, Qingxiang; WANG, Bing; LAUDE, Vincent; KADIC, Muamer. Bioinspired Flexible and Programmable Negative Stiffness Mechanical Metamaterials. **Advanced Intelligent Systems**, [N.p.], vol. 5, n° 6, p. 1–8, 22 jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aisy.202200400>.

TANZI, Maria Cristina; FARÈ, Silvia; CANDIANI, Gabriele. Mechanical Properties of Materials. **Foundations of Biomaterials Engineering**. 1. ed. [N.p.]: Elsevier, 2019. ed 1, p. 105–136. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101034-1.00002-5>.

TAWALBEH, Muhammad; AL-OTHMAN, Amani; KAFIAH, Feras; ABDELSALAM, Emad; ALMOMANI, Fares; ALKASRAWI, Malek. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. **Science of The Total Environment**, [N.p.], vol. 759, p. 143528, 10 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.

TSAKMAKIDIS, Kosmas L; BASKOURELOS, Konstantinos G; WARTAK, Marek S. **Metamaterials and Nanophotonics**. Singapore: World Scientific, set. 2022. 1–332 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1142/13010>.

UDDIN, Kazi Zahir; HERAS, Matthew; YOUSSEF, George; KIEL, Thomas; KOOHBOR, Behrad. Multiscale experimental characterization of nonlinear mechanics and auxeticity in mechanical metamaterials with rotating squares. **Composite Structures**, [N.p.], vol. 357, p. 1–13, 1 mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118931>.

UNITED PERFORMANCE METALS (UPMET). **316 Stainless Steel Datasheet**. [N.p.]: [S.n.], 2024. 1–3 p. Disponível em: <https://www.upmet.com/sites/default/files/datasheets/316-316l.pdf>. Acessado: 3 jun. 2025.

VALIPOUR, Ali; KARGOZARFARD, Mohammad H.; RAKHSHI, Mina; YAGHOOTIAN, Amin; SEDIGHI, Hamid M. Metamaterials and their applications: An overview. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, [N.p.], vol. 236, n° 11, p. 2171–2210, 1 nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1464420721995858>.

VESELAGO, Viktor G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . **Soviet Physics Uspekhi**, [N.p.], vol. 10, n° 4, p. 509–514, 30 abr. 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>.

VIERE, Tobias. State of the Art and Future Developments in LCA. *In*: SCHEBEK, Liselotte; HERRMANN, Christoph; CERDAS, Felipe (orgs.). **Progress in Life Cycle Assessment**. 1. ed. Cham: Springer Cham, 2019. ed 1, p. 3–6. (Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92237-9>.

VIGON, B.W.; TOLLE, D.A.; CORNABY, B.W.; LATHAM, H.C.; HARRISON, C.L.; BOGUSKI, T.L.; HUNT, R.G.; SELLERS, J.D.; U.S.E.P.A. RISK REDUCTION ENGINEERING LABORATORY. **Life-Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles**. 1. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 10 set. 1994. 113 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003075554>.

WANG, Jia-Xin; YANG, Qing-Sheng; WEI, Yu-Ling; TAO, Ran. A novel chiral metamaterial with multistability and programmable stiffness. **Smart Materials and Structures**, [N.p.], vol. 30, n° 6, p. 1–14, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abf994>.

WANG, Shangbin; GUO, Junxian; BICZO, Andras; FENG, Ning. Design and macroscopic mechanical responses of auxetic metamaterials with tunable stiffness. **Materials and Design**, [N.p.], vol. 241, p. 1–15, 1 maio 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112913>.

WANG, Yanan; PENG, Tao; ZHU, Yi; YANG, Yang; TANG, Renzhong. A comparative life cycle assessment of a selective-laser-melting-produced hydraulic valve body using design for Property. **Procedia CIRP**, [N.p.], vol. 90, p. 220–225, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.095>.

WEI, Wei; LARREY-LASSALLE, Pyrene; FAURE, Thierry; DUMOULIN, Nicolas; ROUX, Philippe; MATHIAS, Jean Denis. How to conduct a proper sensitivity analysis in life cycle assessment: Taking into account correlations within LCI data and interactions within the LCA calculation model. **Environmental Science and Technology**, [N.p.], vol. 49, n° 1, p. 377–385, 6 jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es502128k>.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology: Data quality guideline for the Ecoinvent database version 3**. St. Gallen, Suíça: [S.n.], 6 maio 2013. 1–161 p. Disponível em: https://lca-net.com/files/Overview_and_methodology.pdf. Acessado: 30 dez. 2025.

WRIGHT, Roger N. Mechanical Properties of Wire and Related Testing. **Wire Technology**. [N.p.]: Elsevier, 2011. p. 127–155. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382092-1.00011-7>.

YAP, C. Y.; CHUA, C. K.; DONG, Z. L.; LIU, Z. H.; ZHANG, D. Q.; LOH, L. E.; SING, S. L. Review of selective laser melting: Materials and applications. **Applied Physics Reviews**, [N.p.], vol. 2, n° 4, p. 1–21, 1 dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>.

YIN, Peng; LI, Baotong; ZHANG, Yue; LI, Bang; HONG, Jun; LI, Xiaohu; CHEN, Xiaoming; SHAO, Jinyou. A bioinspired multi-layer assembly method for mechanical metamaterials with extreme properties using topology optimization. **Computer Methods in Applied Mechanics**

and Engineering, [N.p.], vol. 438, p. 1–33, 1 abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2025.117850>.

YOU, Jianwei; MA, Qian; ZHANG, Lei; LIU, Che; ZHANG, Jianan; LIU, Shuo; CUI, Tiejun. Electromagnetic Metamaterials: From Classical to Quantum. **Electromagnetic Science**, [N.p.], vol. 1, nº 1, p. 1–33, 20 mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.23919/emsci.2022.0005>.

YU, Xianglong; ZHOU, Ji; LIANG, Haiyi; JIANG, Zhengyi; WU, Lingling. Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review. **Progress in Materials Science**, [N.p.], vol. 94, p. 114–173, 1 maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.003>.

YUAN, Xujin; CHEN, Mingji; YAO, Yin; GUO, Xiaogang; HUANG, Yixing; PENG, Zhilong; XU, Baosheng; LV, Bowen; TAO, Ran; DUAN, Shenyu; LIAO, Haitao; YAO, Kai; LI, Ying; LEI, Hongshuai; CHEN, Xu; HONG, Guangfu; FANG, Daining. Recent progress in the design and fabrication of multifunctional structures based on metamaterials. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, [N.p.], vol. 25, nº 1, p. 1–13, 1 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100883>.

YÜZBASI, Nur S.; GRAULE, Thomas. Colloid Casting Processes: Slip Casting, Centrifugal Casting, and Gel Casting. In: POMEROY, Michael (org.). **Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses**. [N.p.]: Elsevier, 2021. vol. 1, p. 146–153. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11767-9>.

ZHAI, Zirui; WU, Lingling; JIANG, Hanqing. Mechanical metamaterials based on origami and kirigami. **Applied Physics Reviews**, [N.p.], vol. 8, nº 4, p. 1–58, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0051088>.

ZHANG, Dewei; XU, Haijie; XU, Sheng; TONG, Fei; CHEN, Kai; LI, Zixuan; ZUO, Jinrong; SHU, Xuedao. Metal flow behavior and energy consumption model during the extrusion process of a 6063 aluminum alloy profile with complex cross-section. **Journal of Materials Research and Technology**, [N.p.], vol. 33, p. 9911–9925, 1 nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.029>.

ZHAO, Miao; LI, Xinwei; YAN, Xi; ZHOU, Naixun; PANG, Bowen; PENG, Bei; ZENG, Zhi. Machine learning accelerated design of lattice metamaterials for customizable energy absorption. **Thin-Walled Structures**, [N.p.], vol. 208, p. 1–10, 1 mar. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112845>.

ZHAO, Wei; LI, Nan; LIU, Xu; LIU, Liwu; YUE, Chengbin; ZENG, Chengjun; LIU, Yanju; LENG, Jinsong. 4D printed shape memory metamaterials with sensing capability derived from the origami concept. **Nano Energy**, [N.p.], vol. 115, p. 1–9, 1 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108697>.

ZHENG, Xiaoyang; ZHANG, Xubo; CHEN, Ta-Te; WATANABE, Ikumu. Deep Learning in Mechanical Metamaterials: From Prediction and Generation to Inverse Design. **Advanced Materials**, [N.p.], vol. 35, n° 45, p. 1–39, 9 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.202302530>.

ZIRNSTEIN, Benjamin; SCHULZE, Dietmar; SCHARTEL, Bernhard. Mechanical and Fire Properties of Multicomponent Flame Retardant EPDM Rubbers Using Aluminum Trihydroxide, Ammonium Polyphosphate, and Polyaniline. **Materials**, [N.p.], vol. 12, n° 12, p. 1–22, 15 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12121932>.

APÊNDICE A - Desenvolvimento histórico dos metamateriais

O conceito de metamateriais foi proposto pela primeira vez em 1968 por Veselago, que alegou que os materiais com permeabilidade negativa (μ) e permissividade positiva (ϵ) são teoricamente possíveis (Veselago, 1968). Para isso, ele recorreu às equações de Maxwell e às relações constitutivas para compreender as leis eletromagnéticas essencialmente ligadas ao sinal de μ e ϵ , no qual, para $\epsilon > 0$ e $\mu > 0$, teríamos materiais “destros”, e para $\epsilon < 0$ e $\mu < 0$, materiais “canhotos”, Figura 49. Contudo, a ideia de configurar materiais com características singulares ultrapassa séculos e parece não haver um consenso universal acerca da cronologia exata de sua concepção, visto que há a influência de diferentes domínios das ciências nesse campo de estudo ao longo do tempo, atuando de maneira não-linear. Desse modo, fundamentado nas contribuições da literatura (Ali; Mitra; Aïssa, 2022; Cui; Smith; Liu, 2010; Engheta; Ziolkowski, 2006; Koschny; Soukoulis; Wegener, 2017; Kumar, Rakesh *et al.*, 2022), tentou-se ordenar os principais avanços que contribuíram para advir o que hoje admite-se como metamateriais até alcançar os estudos em metamateriais mecânicos.

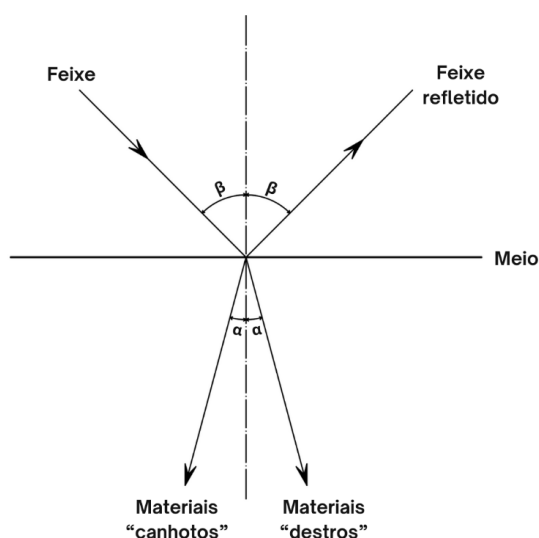


Figura 49: Comportamento de um feixe em um meio contentando materiais "canhotos" (reflexão) e materiais "destros" (refração)

Fonte: Adaptado de Veselago (1968, p. 511)

Bose (1898) dispendo-se dos aparatos que construía, apresentou como ondas eletromagnéticas podiam ter seu plano de polarização alterado ao passar por uma estrutura metálica torcida. Ao interpor um feixe de ondas eletromagnéticas milimétricas, sem torção, entre o polarizador e o analisador ele percebeu que nenhum efeito era produzido. Entretanto, uma reação significativa ocorreu quando os feixes, torcidos para a direita ou para a esquerda,

foram interpostos, pois o feixe saía com um ângulo de polarização diferente do inicial. Ele concluiu que “as substâncias cristalinas, devido a algum arranjo molecular especial, tem a capacidade de rotação e afetam a propagação da luz em seu interior dependendo da direção de transmissão”. Assim, parecia que as estruturas torcidas produziam uma torção óptica do plano de polarização. Esse efeito se assimilaria ao que hoje entendemos por metamateriais chirais. O sistema construído por Bose pode ser visto pela Figura 50.

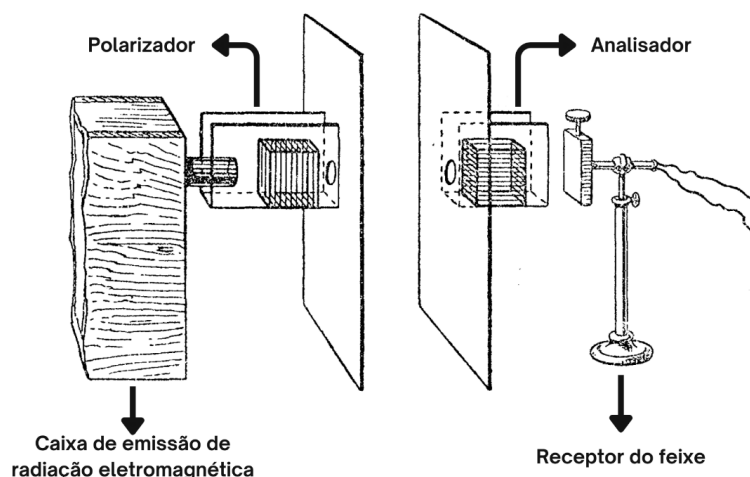


Figura 50: Configuração do equipamento utilizado para estudar o efeito da radiação eletromagnética em um objeto metálico

Fonte: Adaptado de Bose (1898, p. 148)

Em 1914, evidencia-se o avanço dos MMs a partir dos experimentos do pesquisador finlandês Karl F. Lindman, dispondo-se também da utilização do recurso da chiralidade (Lindell; Sihvola; Kurkijärvi, 1992). Segundo os autores, Lindman sintetizou um meio chiral envolvendo pequenas espirais de fio de cobre (tanto para a esquerda quanto para a direita), mergulhando-as em algodão e posicionando-as em uma caixa de papelão com orientações aleatórias para, em seguida, direcionar ondas de rádio linearmente polarizadas, Figura 51. O produto dessa investigação foi a constatação de que o efeito da chiralidade na propagação de ondas eletromagnéticas (ou ondas de rádio) é uma rotação do plano de uma onda linearmente polarizada e que o mesmo número de espirais à esquerda ou à direita causam as mesmas rotações, em direções opostas. A chiralidade é um fenômeno que denota a propriedade assimétrica em que um objeto não pode ser sobreposto à sua imagem espelhada por qualquer tipo de translação ou rotação (Niu *et al.*, 2023).

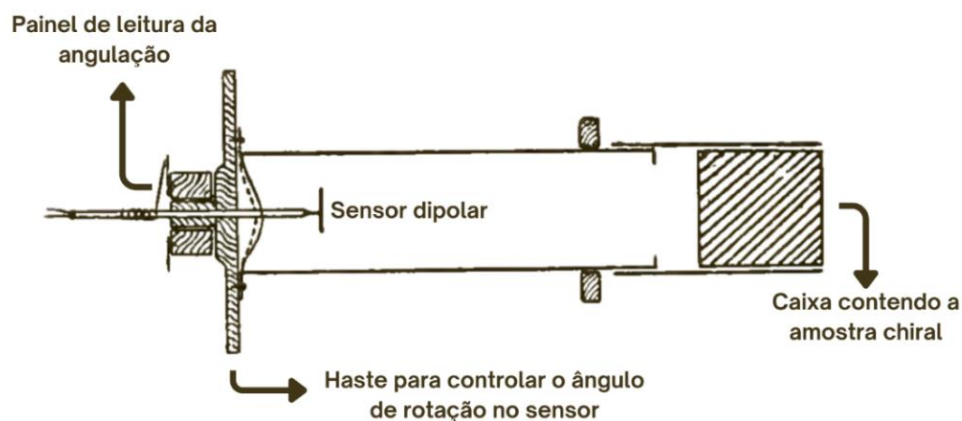


Figura 51: Aparato para direcionar ondas de rádio linearmente polarizadas

Fonte: Adaptado de Lindman (1914, p. 12)

Avançando para Kock (1948), o pesquisador fabricou lentes metálicas com atraso (*metallic delay lenses*), isto é, lentes leves para micro-ondas, a partir de uma matriz tridimensional com esferas, discos ou tiras condutoras de maneira periódica e adaptando o índice de refração efetivo, que pode ser sensivelmente constante em qualquer faixa desejada de frequências de micro-ondas. Entretanto, duas exigências foram impostas à essa estrutura em malha: o espaçamento dos elementos deveria ser um pouco menor do que um comprimento de onda do menor comprimento de onda de rádio a ser transmitido e o tamanho dos elementos deveria ser pequeno em relação ao comprimento de onda mínimo para os efeitos de ressonância serem evitados. Como consequência, essas lentes possuíam a vantagem do desempenho em banda larga em relação às lentes metálicas anteriormente usadas na forma de guia de ondas, eram mais leves do que as lentes dielétricas e poderiam ser projetadas para operar em qualquer faixa de comprimento de onda desejada. A Figura 52 ilustra um esboço da proposta da disposição das esferas para compor a ideia das lentes metálicas.

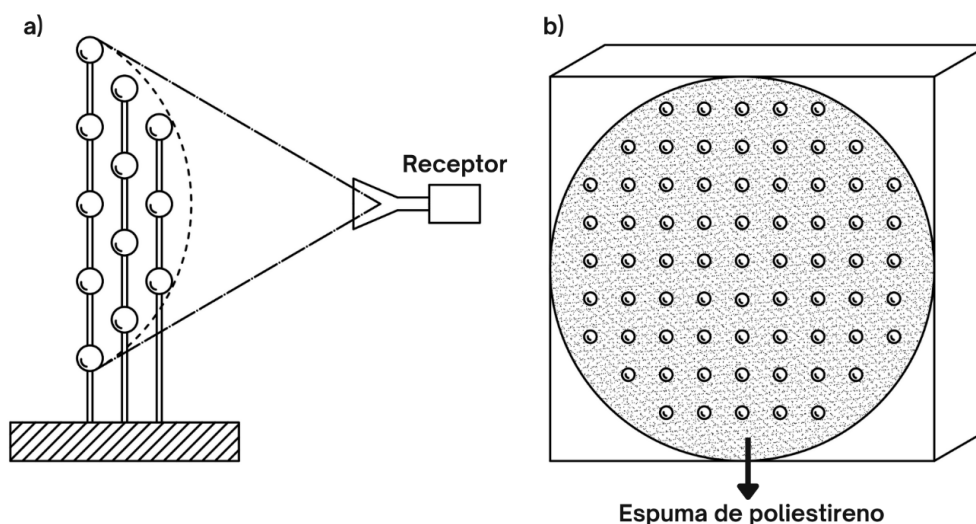


Figura 52: Esquema dos dispositivos propostos. Em a) matriz de esferas condutoras dispostas aproximadamente na forma de uma lente convexa. Em b) rede de esferas suportadas por placas de espuma simulando o efeito de uma lente

Fonte: Adaptado de Kock (1948, p. 62)

Em 1968, Veselago propôs o uso de materiais “canhotos” ou *left-handed material* (LHM) para obter propriedades eletromagnéticas negativas e o possível desenvolvimento de sistemas de refração incomuns. Entretanto, somente na década de 90, que as teorias em torno dos MMs seriam postas em prática experimentalmente. Assim, em 1996 tem-se o marco da Primeira Revolução dos Metamateriais, quando Pendry et al. (1996) propuseram um mecanismo para a redução da frequência do plasma para o espectro infravermelho ou até mesmo para a faixa de GHz. Os módulos constituintes desse novo material são fios metálicos muito finos, montados em uma rede periódica cúbica simples, Figura 53. O interesse nesse novo material derivou da analogia que poderia ser feita com o papel do plasma em frequências ópticas. Os objetos construídos com o novo material suportariam plasmas de GHz acoplados à superfície, que poderiam ser manipulados pela geometria local, possibilitando o controle de ondas. Esse material também seria um filtro de banda de parada¹⁵ ou de passagem de banda eficaz.

¹⁵ A banda de parada pode ser definida como uma faixa de frequência na qual as ondas não podem se propagar. No caso do estudo de Pendry et al. (1996), abaixo da frequência do plasma, muito pouco poderia ser transmitido. Já acima, e especialmente no espectro visível, a estrutura se tornaria “transparente”.

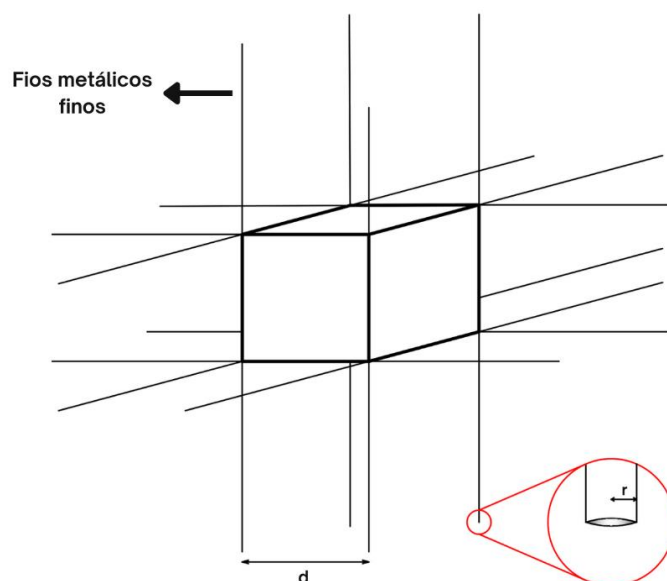


Figura 53: Estrutura periódica composta por infinitos fios metálicos finos dispostos em uma estrutura cúbica simples, unidos nos cantos da estrutura

Fonte: Adaptado de Pendry et al. (1996, p. 4774)

Três anos mais tarde, em 1999, Pendry et al. (1999) exibiram estruturas feitas com finas camadas de metal não magnéticas, que respondem à radiação de micro-ondas como se tivessem uma permeabilidade magnética efetiva, que poderia ser ajustada para valores não acessíveis em materiais de ocorrência natural, variando os parâmetros das estruturas e produzindo os denominados “ressonadores de anel seccionados” ou *split-ring resonators* (SRRs) para obter a resposta magnética, Figura 54. Como o revestimento de metal (agente ativo da estrutura) compreende uma fração muito pequena do volume, as estruturas seriam muito leves, podendo ser reforçadas por um forte material isolante para garantir a resistência mecânica, sem afetar negativamente suas propriedades magnéticas. Eles concluem que “tais estruturas serão exploradas por sua capacidade de concentrar a energia eletromagnética em um volume muito pequeno, aumentando sua densidade e aprimorando consideravelmente quaisquer efeitos não lineares presentes”.

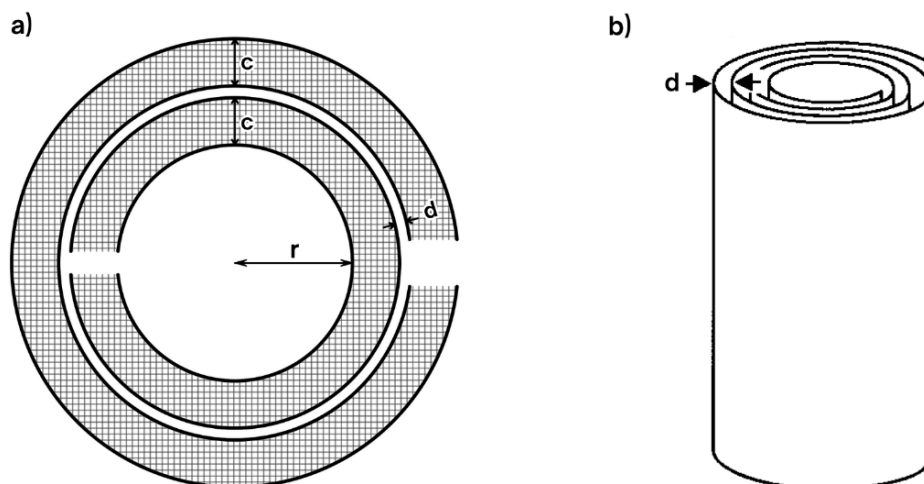


Figura 54: Diagrama representando os SRRs. Em a) Vista em planta de um anel seccionado e suas distâncias. Em b) Cada anel seccionado é composto por duas folhas finas de metal por uma distância “d” da folha anterior

Fonte: Adaptado de Pendry et al. (1999, p. 2079, 2081)

Partindo para os anos 2000, mais especificamente para 2001, Shelby et al. (2001) exibiram dados experimentais, simulações numéricas e cálculos analíticos de matriz de transferência para um metamaterial bidimensional isotrópico e canhoto (LHM) que consiste em ressonadores de anel seccionados (SRRs) com fios de cobre. Para isso, os autores dimensionaram uma banda de transmissão em frequências de micro-ondas de banda-X, isto é, de 8-12 GHz, reduzindo as dimensões gerais dos SRRs e alcançando a isotropia 2D. A amostra foi construída com SRRs ao longo de dois eixos ortogonais em uma rede acoplada em placas finas de fibra de vidro, Figura 55. Para facilitar a fabricação, eles introduziram um meio de permissividade negativa, através de tiras de fios montadas atrás dos SRRs. O estudo permitiu corroborar algumas das previsões de Veselago sobre as propriedades de ondas eletromagnéticas invertidas, incluindo o índice de refração negativo.

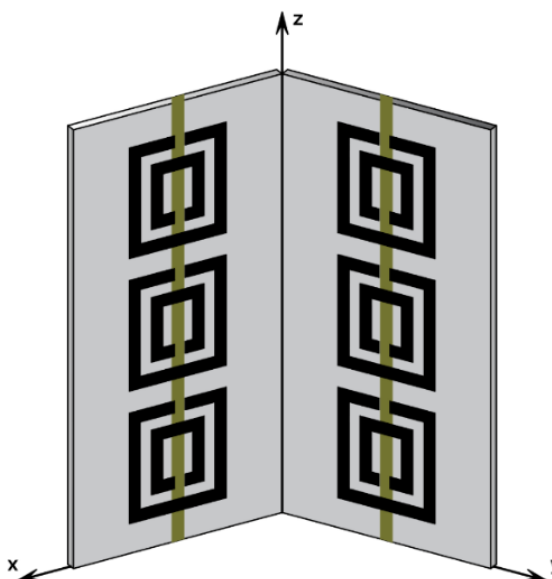


Figura 55: Diagrama de um SRR quadrado: cada célula unitária tem seis SRR de cobre e duas tiras de fios acoplados em placas finas de fibra de vidro

Fonte: Adaptado de Shelby et al. (2001, p. 489)

Em 2005 temos a Segunda Revolução dos Metamateriais, delimitado pelo trabalho de Smith et al. (2005), no qual foi demonstrado um metamaterial – observa-se que aqui, o nome MM já era empregado, ao invés de LHM – baseado em SRRs¹⁶ condutores, muito semelhante àqueles estudados em 2001, que possuía um índice de refração efetivo com um gradiente espacial constante. Os SRRs são modelados em placas de circuito revestidas de cobre utilizando uma máquina de microfresagem controlada numericamente, Figura 56. Os autores confirmaram experimentalmente o gradiente medindo a deflexão de um feixe de micro-ondas por uma placa plana do metamaterial composto por uma gama de frequências de micro-ondas. A aplicação do metamaterial de índice gradiente revelou-se como uma abordagem alternativa vantajosa para o desenvolvimento da óptica e em aplicações em terahertz.

¹⁶ É possível notar que o uso de SRRs foi recorrente nos avanços em MMs. A conveniência em utilizar esse sistema se deve ao fato de que suas propriedades estavam bem estabelecidas e a frequência de ressonância do SRR era relativamente fácil de identificar, podendo ser facilmente ajustada modificando as características da célula unitária para parametrizar a frequência do SRR (Smith et al., 2005).

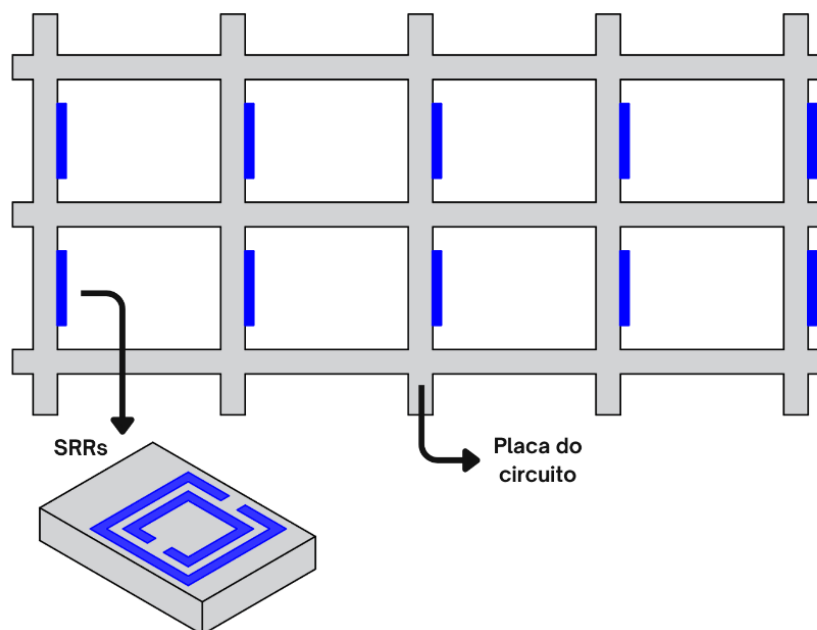


Figura 56: Vista superior da amostra de metamaterial com índice de refração efetivo e gradiente espacial constante, dispostos em placas de circuito contendo SRRs padronizados

Fonte: Adaptado de Smith et al. (2005, p. 4)

Já em 2006, a pesquisa dos MMs progrediu em direção a camuflagem eletromagnética (Pendry; Schurig; Smith, 2006) ocultando um objeto esférico com um metamaterial cuja função é desviar os raios que o atingiriam, guiá-los ao redor do mesmo e retorná-los à sua trajetória original, Figura 57. Os autores implicaram que nenhuma radiação seria capaz de entrar no interior desse objeto camuflado, assim como nenhuma radiação seria capaz de sair; qualquer radiação que tentasse penetrar ao redor do espaço oculto, seria suavemente guiada pela camuflagem para emergir viajando na mesma direção como se tivesse passado por um volume vazio de espaço. O método levava, a princípio, a um escudo eletromagnético ideal, excluindo tanto as ondas de propagação quanto os campos próximos da região oculta. No mesmo ano, Leonhardt (2006) também escreveu sobre uma metodologia utilizando MMs para o *design* de meios que criariam uma invisibilidade completa sem comprometer a precisão da óptica geométrica, podendo ser aplicado para evitar a detecção por ondas eletromagnéticas ou sonoras.

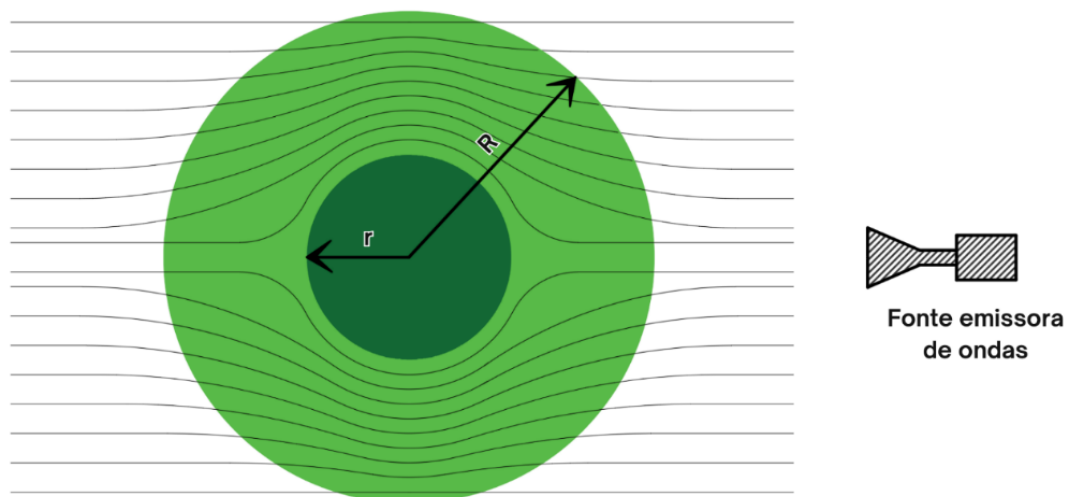


Figura 57: Trajetória dos raios dentro do espaço (verde claro) contendo o objeto camuflado (verde escuro) para emergir no lado oposto sem se desviar de seu curso original

Fonte: Adaptado de Pendry; Schurig; Smith (2006, p. 1781)

Até o momento, a linha do tempo forneceu o contexto necessário para elencar os principais marcos que deram origem a criação dos metamateriais. Daqui para a frente, a cronologia intencionalará, especialmente, aos eventos relacionados aos metamateriais mecânicos, tema central da pesquisa. Nesse sentido, em 2012, Nicolaou & Motter (2012) exploraram metamateriais com variações negativas de compressibilidade, que consiste em uma rede quadrada de elementos – o que entendemos atualmente por metamateriais volumétricos ou *bulk metamaterials*. Quando tensionados, os materiais comuns expandem-se ao longo da direção da força aplicada e se contraem quando comprimidos; no caso desse MM, ele sofre contração quando tensionado ou expansão quando pressionado, Figura 58. Apesar de se assemelharem a resposta de um MM auxético, os autores pontuaram que “as transições de compressibilidade negativa são diferentes do coeficiente de Poisson negativo e da tensão normal negativa, em que a resposta incomum é transversal à força aplicada”. Como produto, obtiveram sistemas capaz de serem utilizados para o projeto de amplificadores de força, controles micromecânicos e dispositivos de proteção.

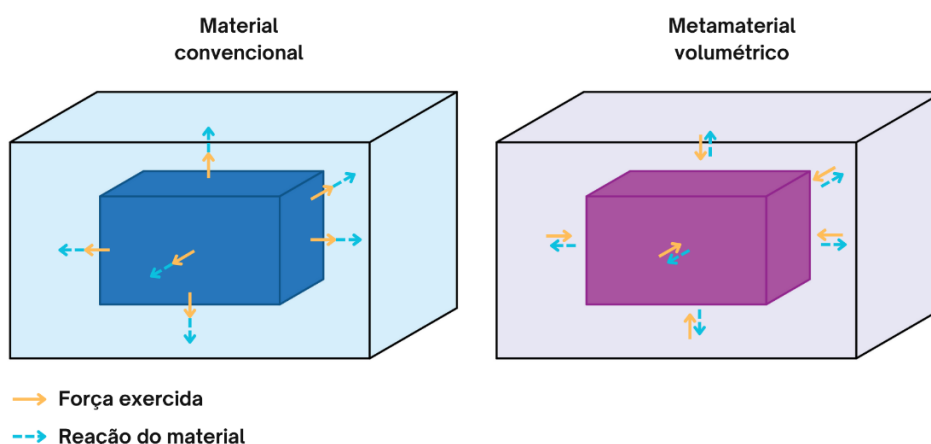


Figura 58: Demonstração da compressibilidade negativa quando um objeto é submetido a uma força de tração

Fonte: Adaptado de Grima & Caruana-Gauci (2012, p. 565)

Em 2014, Lv et al. (2014) desenvolveram um MM baseado na arte japonesa de origami, que permite a criação de estruturas tridimensionais (3D) a partir de folhas bidimensionais (2D) por meio de um processo de dobragem ao longo de vincos. Eles avaliaram as propriedades geométricas e de rigidez básicas, bem como a capacidade de suportar cargas. Foram examinadas a classe dos origamis rígidos, em especial dos padrões de dobragem Miura-ori (periódico) e Ron Resch (aperiódico). O resultado revelou que o padrão Miura-ori pode apresentar o coeficiente de Poisson ambos negativo e positivo e não somente negativo como estudos anteriores acreditavam. Além disso, o padrão Ron Resch apresentou uma excelente capacidade de suporte de carga, principalmente de resistência à flambagem compressiva. Uma representação das estruturas em origami mencionadas, pode ser visto pela Figura 59.

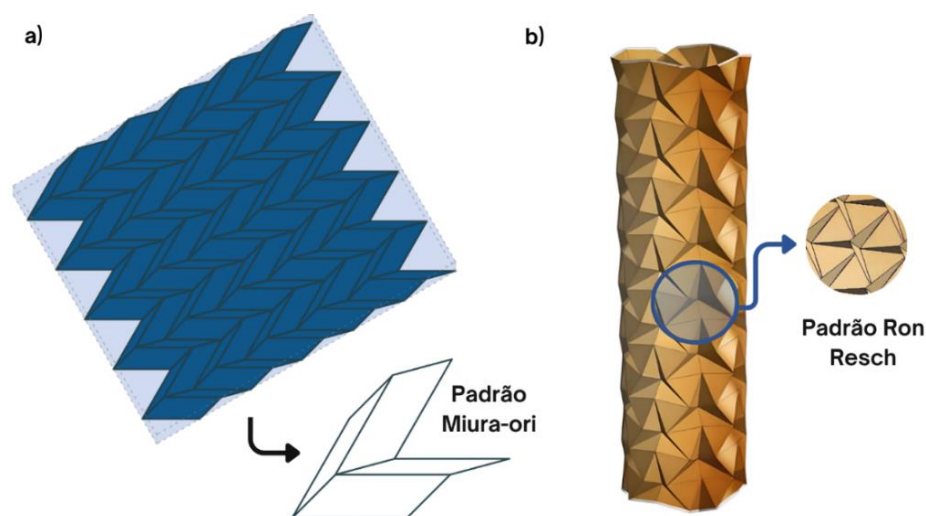


Figura 59: Estruturas em origami. Em a) padrão Miura-ori elaborado a partir de elementos de paralelogramo. Em b) padrão Ron Resch elaborado a partir de elementos triangulares

Fonte: Adaptado de Lv et al. (2014, p. 2, 5)

No mesmo sentido, Silverberg et al. (2014) também observaram o comportamento de origamis do tipo Miura-ori. Eles analisaram um defeito de estufamento ou *pop-through defect* (PTD) que ocorre durante a dobradura do origami, alterando a topologia da estrutura ao suprimir uma dobra e dobrar as facetas adjacentes, projetando-se para fora. Eles verificaram que uma sequência de PTDs em vértices consecutivos formaram uma estrutura corrugada altamente resistente à flexão fora do plano.

Partindo para 2017, Hedayati; Leeftang; Zadpoor (2017) exploraram as potencialidades dos metamateriais pentamodais, isto é, materiais projetados para possuir qualquer tensor de elasticidade termodinamicamente admissível, imitando o comportamento dos fluidos, Figura 60. Eles podem ser facilmente deformados em determinadas direções, ao mesmo tempo em que apresentam resistência extremamente alta contra a deformação em outras direções, possuindo um módulo de *bulk* (volumétrico) extremamente elevado. Assim, foram fabricados por meio de manufatura aditiva, MMs metálicos pentamodais a partir de uma liga de titânio biocompatível e mecanicamente robustos usando o método de fusão seletiva a *laser* (*selective laser melting*). As propriedades mecânicas dos materiais desenvolvidos foram algumas ordens de magnitude superiores às de semelhantes topologias fabricadas anteriormente a partir de polímeros, abrindo caminho para a aplicação prática desses materiais como suportes de engenharia de tecido ósseo e como partes de implantes ortopédicos.

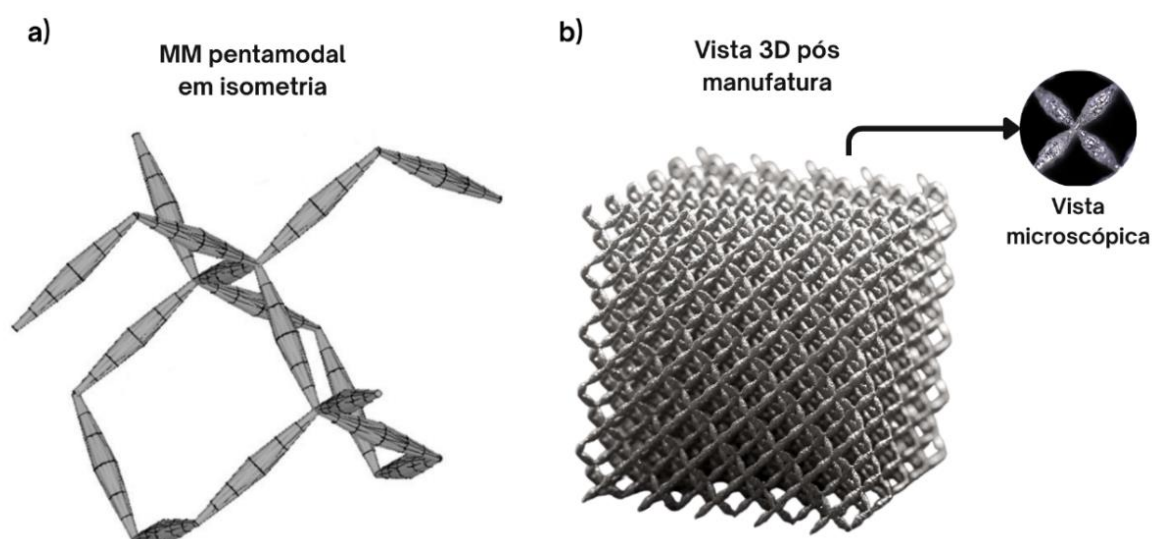


Figura 60: Representação do metamaterial pentamodal. Em a) estrutura na forma de diamante em vista isométrica. Em b) MM impresso por meio de manufatura aditiva e sua visualização microscópica

Fonte: Adaptado de Hedayati; Leeftang; Zadpoor (2017, p. 2-4)

Já em 2019, Kumar et al. (2019) demonstraram experimentalmente e numericamente as características aprimoradas de absorção de energia de metamateriais 3D em padrões favos de mel (*honeycomb*) geometricamente adaptados (hexagonais irregulares, reentrantes e chirais), Figura 61. Dispondo-se do método de elementos finitos (MEF), os modelos foram realizados para diferentes variações de espessura da parede da célula por meio da manufatura aditiva de jateamento de material (*material jetting*). A adaptação espacial da arquitetura e/ou das propriedades do material é fundamental para o desenvolvimento de materiais celulares ultraleves e capazes de suportar distúrbios na estrutura. A resposta medida, caracterizada por flambagem local (enrugamento) e falha progressiva, revela um aumento na eficiência e na absorção energética. A adaptação desses favos de mel abre ainda a possibilidade de serem projetados para atender a requisitos específicos de materiais, como leveza, rigidez e resistência.

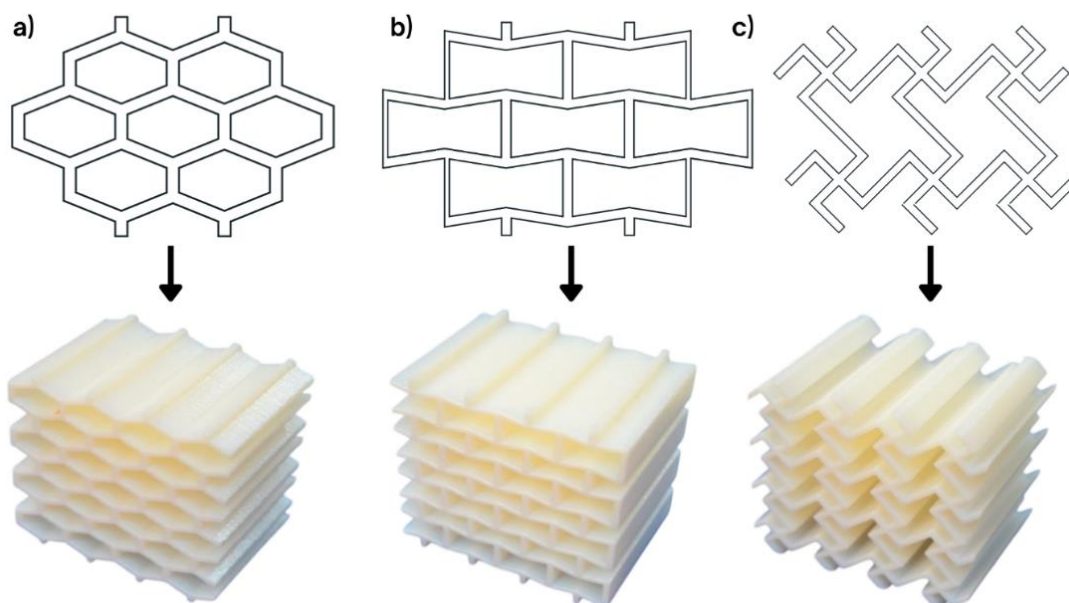


Figura 61: Metamateriais em padrões *honeycomb*. Em a) Geometria hexagonal irregular. Em b) Geometria reentrante. Em c) Geometria chiral

Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2019, p. 42550, 42554)

Retornando ao avanço da pesquisa em torno dos MMs origamis, Dionísio; Sánchez; Silva (2021) confeccionaram um MM origami repetitivo para absorver e atenuar cargas de impacto em um trem de pouso (Figura 62), com o objetivo de recuperar o primeiro estágio de um Veículo Lançador de Microsatélites (VLM-1). A resposta dinâmica da estrutura em MM é comparada a uma estrutura clássica e a força de reação na conexão entre o VLM-1 e o trem de pouso foi avaliada numericamente, por meio de análise de impacto, mediante uso de método de elementos finitos. Os resultados revelaram que a aplicação estudada é viável, atenuando a força

de reação nas extremidades da plataforma em contato com o veículo. Adicionalmente, os autores apontaram que a utilização do MM origami pode possibilitar a redução da massa do primeiro estágio, o aumento da velocidade máxima de pouso (minimizando combustível para desacelerar) e a redução do risco de falhas durante a fase de pouso.

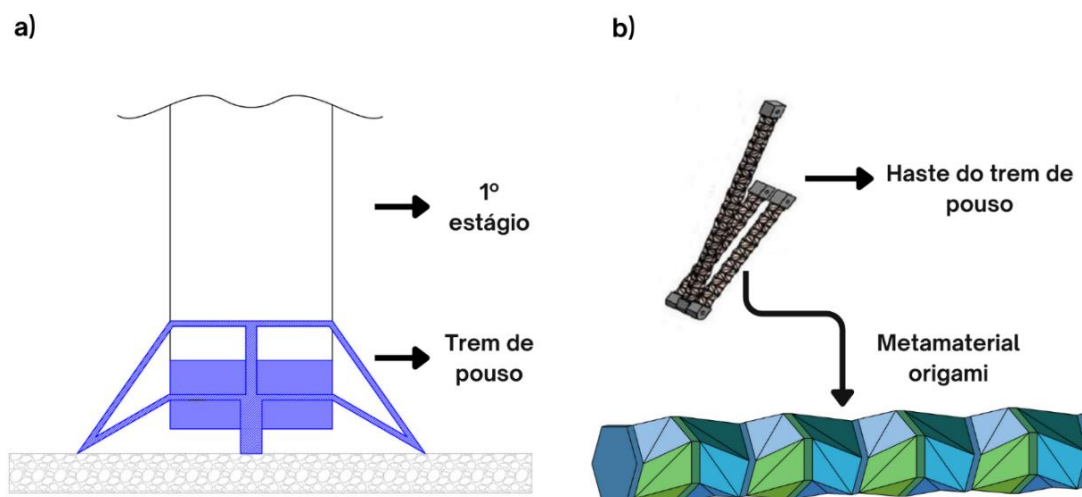


Figura 62: Demonstração da aplicação do metamaterial origami para o primeiro estágio de um VLM-1. Em a) Localização do trem de pouso. Em b) haste do trem de pouso com a inserção do metamaterial

Fonte: Adaptado de Dionísio; Sánchez; Silva (2021, 2-4)

Finalmente, em 2024, Wang et al. (2024) apresentaram o projeto, a fabricação e a caracterização macroscópica de metamateriais mecânicos flexíveis com propriedades elásticas ajustáveis em comparação com um material em formato de “estrelas conectadas” (*connected-stars*). Os metamateriais foram fabricados com ácido polilático (PLA) por impressão 3D na forma de uma placa flexível e os resultados foram validados por meio de estudos teóricos, simulações estáticas e experimentos de tração. Foi demonstrado, que os parâmetros geométricos dos MMs flexíveis influenciaram significativamente a resposta mecânica, possibilitando personalizar amplamente o efeito Poisson e a rigidez. As propriedades mecânicas multidimensionais entre os metamateriais desenvolvidos e as estruturas celulares em forma de estrela foram comparadas, e os resultados apontaram que os MMs mecânicos flexíveis desenvolvidos apresentaram superioridade notável em termos de deformabilidade, sensibilidade e auxeticidade. Um dos tipos de MMs mecânicos fabricados, pode ser visto pela Figura 63.

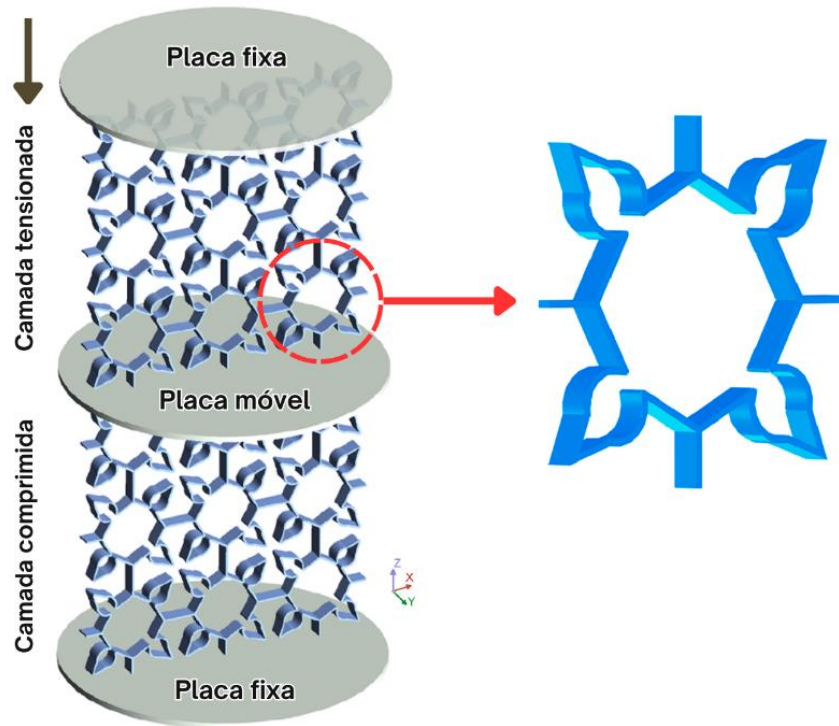
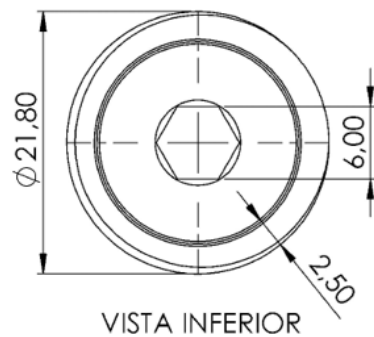
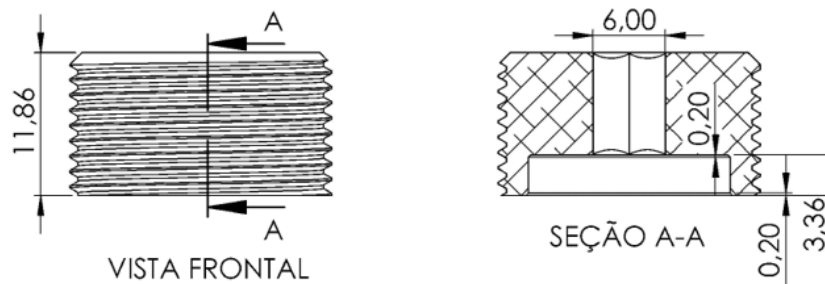
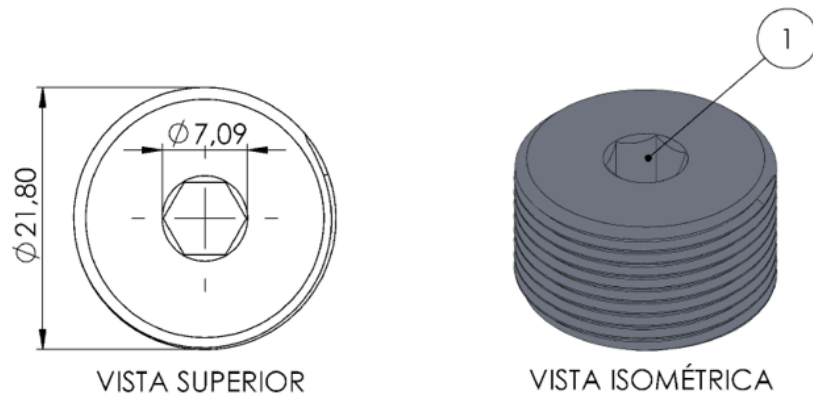


Figura 63: Ilustração do MM mecânico flexível desenvolvido em material PLA

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2024, p. 2, 8)

APÊNDICE B - Desenho técnico do parafuso

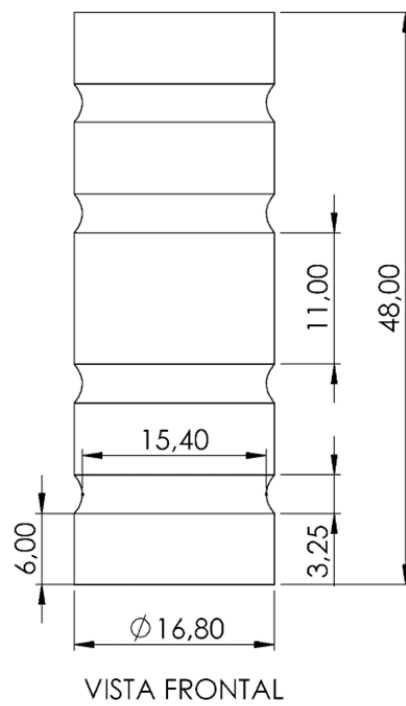
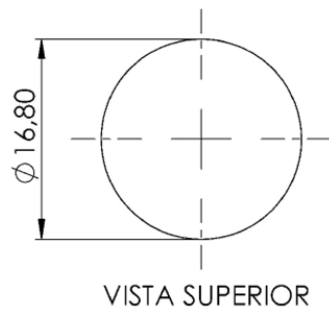
- Material: Alumínio 6061-T6
- Escala 2:1
- Unidade: milímetros (mm)



1 Furo do tipo: Flat Head
Screw (100)
Tamanho: #6

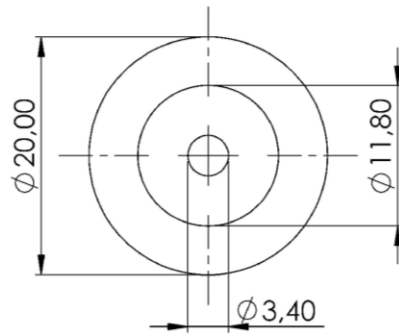
APÊNDICE C - Desenho técnico do elastômero

- Material: EPDM (Etileno Propileno Dieno Terpolímero)
- Escala 2:1
- Unidade: milímetros (mm)

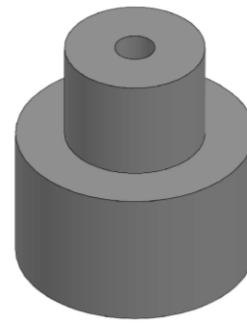


APÊNDICE D - Desenho técnico da peça de plástico

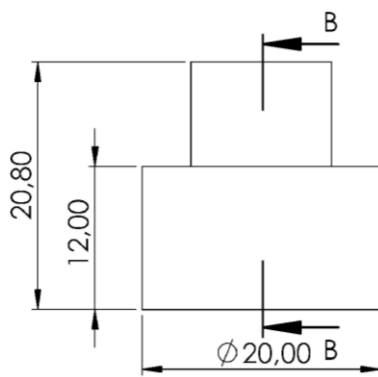
- Material: nylon 6
- Escala 2:1
- Unidade: milímetros (mm)



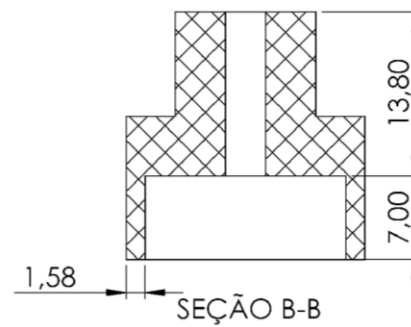
VISTA SUPERIOR



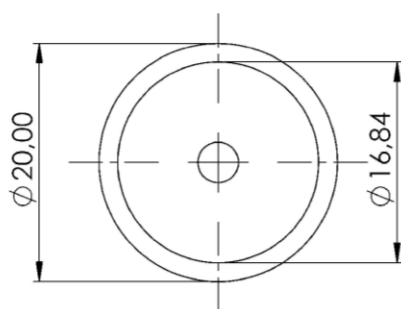
VISTA ISOMÉTRICA



VISTA FRONTAL



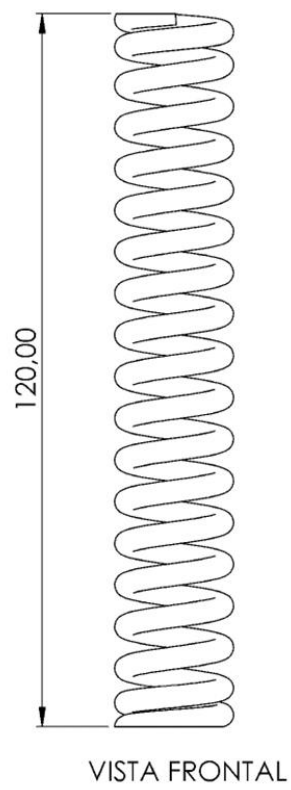
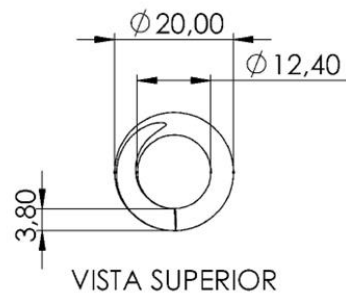
SEÇÃO B-B



VISTA INFERIOR

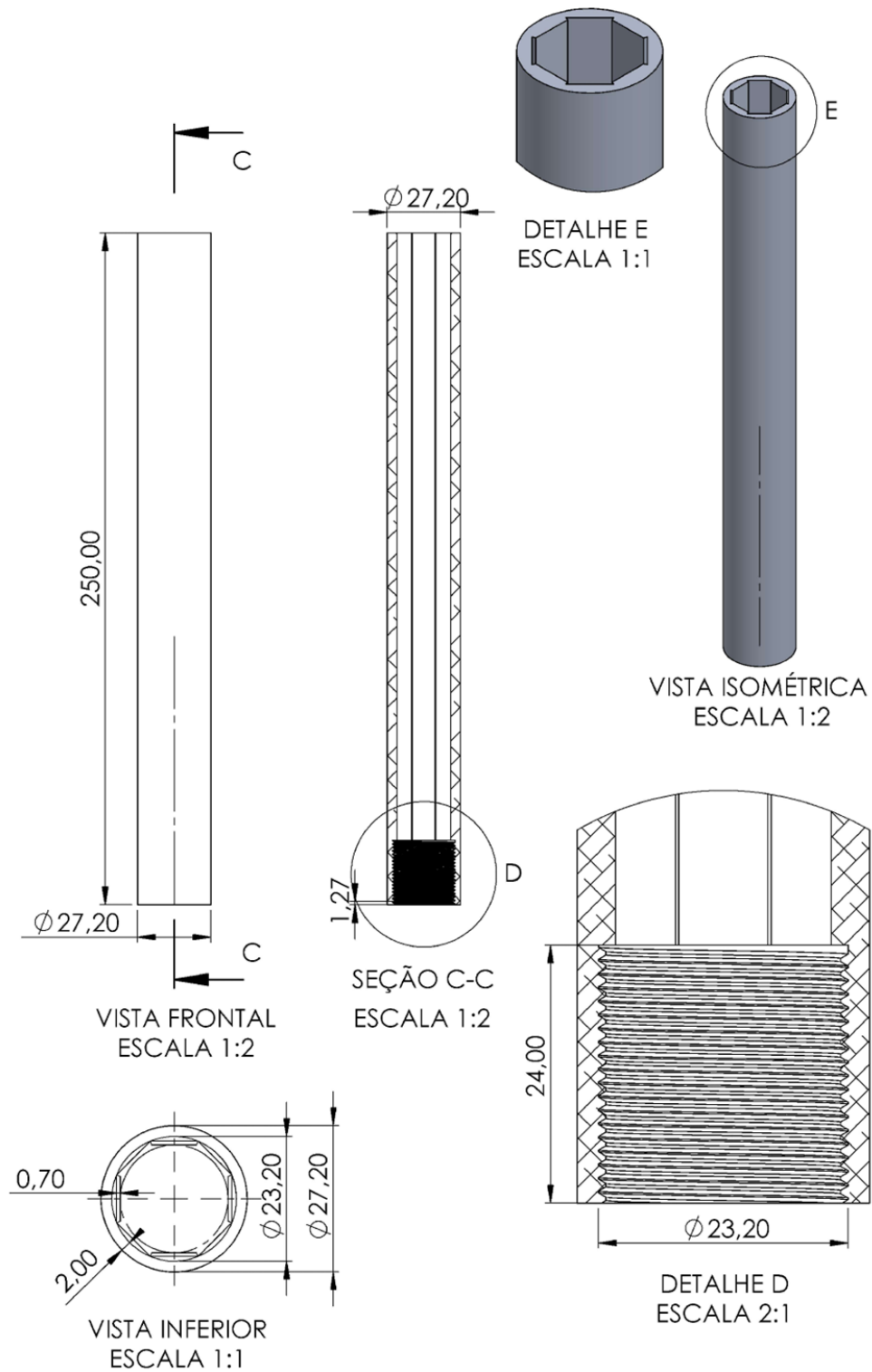
APÊNDICE E - Desenho técnico da mola

- Material: aço inox 316L
- Escala 1:1
- Unidade: milímetros (mm)



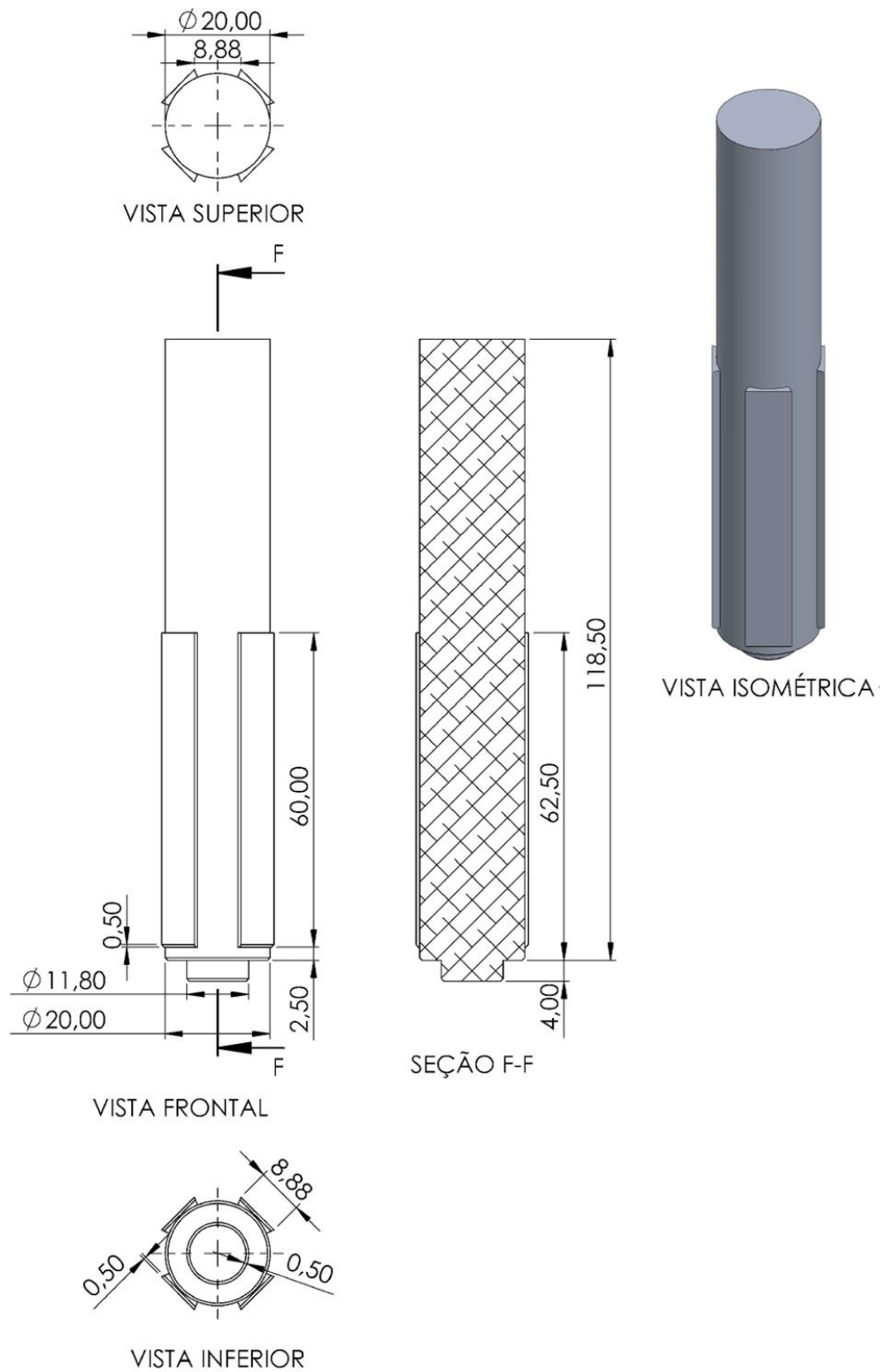
APÊNDICE F - Desenho técnico do canote (externo)

- Material: alumínio 6061-T6
- Escalas variadas
- Unidade: milímetros (mm)



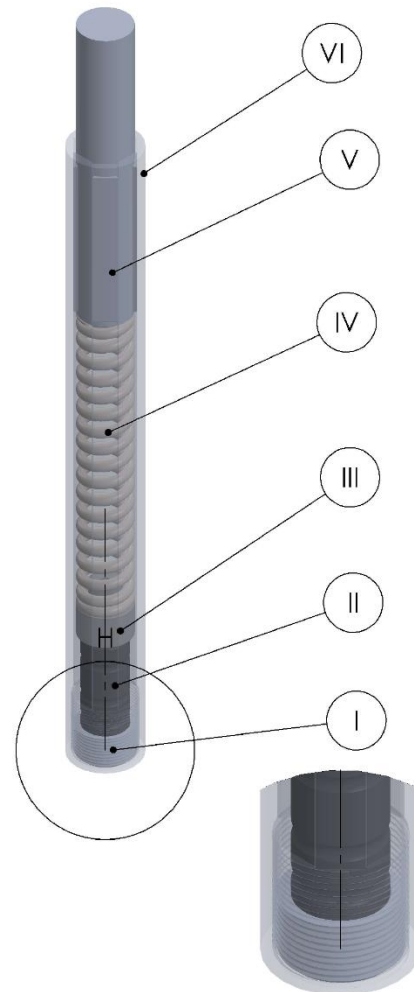
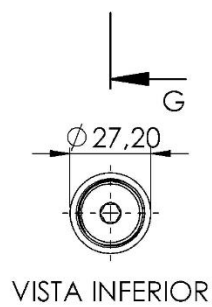
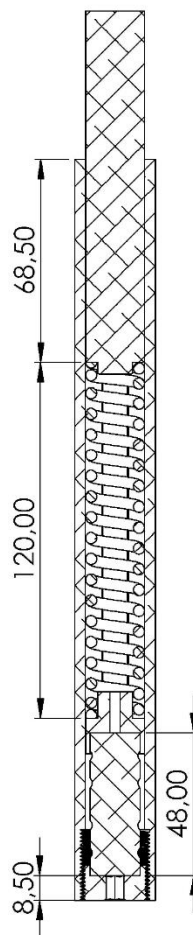
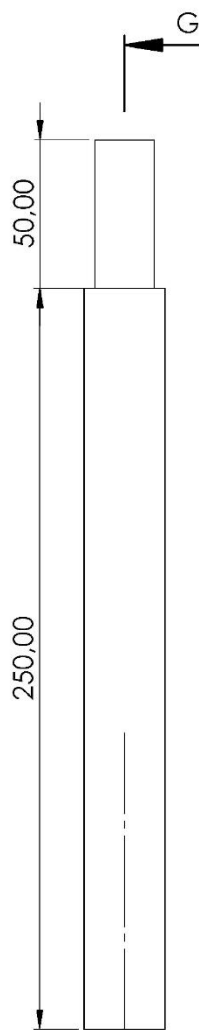
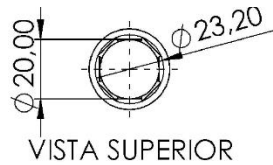
APÊNDICE G - Desenho técnico do canote (interno)

- Material: alumínio 6061-T6
- Escala 1:1
- Unidade: milímetros (mm)



APÊNDICE H - Desenho técnico do canote convencional com amortecimento

- Materiais diversos
- Escala 1:2
- Unidade: milímetros (mm)



DETALHE H
ESCALA 1 : 1

- Ⓚ I PARAFUSO
- Ⓚ II ELASTÔMERO
- Ⓚ III PEÇA DE PLÁSTICO
- Ⓚ IV MOLA
- Ⓚ V CANOTE INTERNO
- Ⓚ VI CANOTE EXTERNO