

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica

Thiago Teixeira Nardy Barrioni

**Análise numérica e caracterização hiperelástica de metamateriais  
mecânicos produzidos com impressão 3D.**

Dissertação de Mestrado

Belo Horizonte

2021



Thiago Teixeira Nardy Barrioni



**Análise numérica e caracterização hiperelástica de metamateriais  
mecânicos produzidos com impressão 3D.**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para a obtenção de título de Mestre junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Orientador: Antonio Ferreira Ávila**

Belo Horizonte

2021

B276a

Barrioni, Thiago Teixeira Nardy.

Análise numérica e caracterização hiperelástica de metamateriais mecânicos produzidos com impressão 3D [recurso eletrônico] / Thiago Teixeira Nardy Barrioni. - 2021.

1 recurso online (121 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Antonio Ferreira Ávila.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 119-121.

Bibliografia: f. 112-118.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Metamateriais – Teses.  
3. Impressão 3D – Teses. I. Ávila, Antonio Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



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

**ANÁLISE NUMÉRICA E CARACTERIZAÇÃO HIPERELÁSTICA DE METAMATERIAIS  
MECÂNICOS PRODUZIDOS COM IMPRESSÃO 3D**

**THIAGO TEIXEIRA NARDY BARRIONI**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Antonio Ferreira Ávila (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marco Túlio Correa de Faria (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Lazaro Valentim Donadon (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Projeto e Sistemas".

Dissertação aprovada no dia 24 de novembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Ferreira Avila, Professor do Magistério Superior**, em 25/11/2021, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco Tulio Correa de Faria, Coordenador(a) de curso pós-graduação**, em 29/11/2021, às 17:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lazaro Valentim Donadon, Membro**, em 02/12/2021, às 19:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1105017** eo código CRC **D6DCF970**.

## **Agradecimentos**

A minha família por todo apoio. Especialmente aos meus pais, Suzana e Jefferson, por serem minha base ao longo de toda minha vida e todo carinho e apoio que me deram e à minha segunda mãe Geralda por toda criação que ela me deu.

Ao professor Antonio Ávila pelo ensino, paciência e suporte para todo o período do mestrado e para a construção desse trabalho. Agradeço ao professor Marco Túlio Corrêa e ao professor Lázaro Donadon por participarem da minha banca de defesa de dissertação.

Aos amigos do laboratório de Mecânica de Compósitos da UFMG, Elvis e Leonardo, por estarem comigo nessa caminhada do mestrado e as colaborações dadas nesse estudo.

Aos amigos de longa data Victor, Ana Paula, João Lúcio, Camille, Marcela, Sarah, Paula por todas suas amizades, momentos de diversão e suporte emocional que vocês sempre proporcionaram.

Aos amigos de nerdices, César, Lucas, Luíza e Bernardo por toda diversão compartilhando os hobbies que me permitiram escapar da realidade. Agradecimento a mais ao Lucas pelo importante apoio na reta final desse trabalho.

A Nayara por todos os incentivos, carinho e momentos de felicidade que ela proporciona na minha vida.

A todas as pessoas na minha vida que torceram por mim e me ajudaram a chegar nesse momento.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior – CAPES, agradeço o suporte financeiro que garantiu minha dedicação à essa pesquisa.

## Resumo

Metamateriais são uma classe de materiais que apresentam propriedades especiais não encontradas naturalmente. Essas propriedades especiais estão relacionadas ao projeto geométrico calculado, de forma que a estrutura tenha uma resposta desejável. Impressoras 3D possibilitaram que os metamateriais fossem produzidos, sendo que cada dia essa tecnologia se torna mais acessível à população em geral. Esse trabalho pode ser dividido em três etapas. A primeira foi a caracterização mecânica do filamento de impressão 3D de TPU (Termoplástico de Poliuretano), um material hiperelástico. Pelos ensaios de tensão e compressão os modelos de *Mooney-Rivlin* de 5ª ordem se mostrou a melhor opção. A segunda etapa foi a investigação de como os parâmetros de impressão 3D de Fabricação por Filamento Fundido (FFF), por exemplo, orientação de deposição do filamento, taxa de extrusão, velocidade de deposição e temperatura de extrusão podem afetar as propriedades e qualidade mecânica das peças. Um aumento na temperatura de extrusão combinado com uma redução da velocidade de deposição pareceu reduzir o erro de deposição das camadas. Diferenças estatísticas não foram observadas nas propriedades mecânicas (rigidez e resistência) quando variado a orientação de deposição do filamento. A última etapa foi a simulação numérica de duas classes de metamateriais: os tipos auxéticos e *kirigami*. Nas simulações numéricas as estruturas auxéticas demonstraram valores de coeficiente de Poisson entre 5 e 18% maiores comparado aos valores teóricos. Exceto a estrutura auxética *crosschiral* que apresentou variações maiores entre teórico e simulado e necessita maiores investigações (em torno de 50%). As estruturas *kirigami* tiveram valores de alongamento próximos comparados aqueles da literatura, mas é provável que em testes físicos essas estruturas possam atingir valores superiores. Aplicações como abafadores sonoros e tênis de corrida (auxéticos) e fitas adesivas fisioterápicas (*kirigami*) são algumas que podem ser mencionadas para essas estruturas.

**Palavras chaves:** Metamateriais, impressão 3D, Hiperelástico, PLA-flex®, MEF

## Abstract

Metamaterials are a class of materials that have special properties not found naturally. These special properties are related to the calculated geometric design so that the structure has a desirable response. 3D printers have enabled the production of metamaterials, becoming gradually an accessible technology for many people. This research can be divided into three different stages. The first one was the mechanical characterization of 3D printing filament based on TPU (polyurethane thermoplastic), an hyperelastic material. Based on tensile and compression tests, the 5th order *Mooney-Rivlin* models seems to be the best option. The second stage was the investigation of how 3D Fused Filament Fabrication (FFF) printers parameters, e.g., filament deposition orientation, flow rate, speed deposition and extrusion temperature affect the overall final specimens' mechanical properties and its quality. An increase on extrusion temperature combined with a decrease on speed deposition seems to reduce the layers' deposition failure. No statistical differences were observed on mechanical properties (stiffness and strength) regardless the filament deposition orientation. The last stage was the numerical simulations of two classes of metamaterials, i.e. auxetics and Kirigami-based. In numerical simulations, the auxetic structures showed Poisson ratio values between 5 and 18% higher than theoretical values. Except for the crosschiral auxetic structure, which showed greater variations between theoretical and simulated and needs further investigation (around 50%). The *kirigami* structures had elongation values close to those in the literature, but it is likely that in physical tests these structures can reach higher values. Applications such as sound mufflers and running shoes (auxetics) and physical therapy adhesive tapes (*kirigami*) are some that can be mentioned for these structures.

**Keywords:** Metamaterials, 3D print, hyperelastic, PLA-flex®, FEM

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação do metamateriais mecânicos através dos seus valores de módulo de Young, módulo de cisalhamento/volumétrico e coeficiente de Poisson. ....	19
Figura 2: Exemplo de estruturas <i>honeycomb</i> . a) estrutura metálica de Wang (2019); b) estrutura em TPU. ....	22
Figura 3: Diagrama das estruturas a) <i>honeycomb</i> e b) <i>re-entrant</i> .....	22
Figura 4: a) Estrutura “ <i>semi re-entrant honeycomb</i> ”; b) <i>AuxHex</i> em PEEK; c) <i>AuxHex</i> em Nylon; d) <i>AuxHex</i> 3D.....	24
Figura 5: Exemplos de estruturas quirais. a) Estruturas quirais em 2D; b) Estruturas quirais em 3D; c) Estrutura <i>cross-chiral</i> 3D. ....	25
Figura 6: Representação do efeito dos esforços de tração em corpos de diferentes valores de coeficientes de Poisson. a) Poisson Positivo, b) Poisson Negativo e c) Poisson Nulo .....	27
Figura 7: Padrão de corte linear. $L_c$ = comprimento do corte; $x$ = distância entre os cortes na direção transversal; $y$ = distância entre os cortes na direção axial.....	28
Figura 8: Comportamento da estrutura kirigami em tração.....	28
Figura 9: Padrão de corte linear. ....	30
Figura 10: Gráfico do ensaio de força por alongamento com as respectivas regiões de cada regime sendo mostradas através do corpo de prova em ensaio.....	31
Figura 11: Deformação no plano de uma placa de deformação unitária no primeiro regime .....	32
Figura 12: Deformação fora do plano no segundo regime. a) Vista da placa de deformação unitária e b) vista lateral da estrutura toda .....	33
Figura 13: Ilustração de uma placa dobrada. ....	33
Figura 14: a) Parâmetros e padrão de corte. b) Orientação de $45^\circ$ em relação ao carregamento. Orientação de $0^\circ$ em relação ao carregamento. ....	35
Figura 15: Gráfico adimensional de tensão versus deformação para orientações de corte em $45^\circ$ .....	36
Figura 16: a) Célula unitária do padrão kirigami sendo o conjunto de quatro quadrados b) único quadrado da célula unitária. ....	37
Figura 17: (a) Gráfico de tensão vs deformação do kirigami dentro do plano (linha vermelha) e fora do plano (linha azul). b) Gráfico densidade de energia de deformação vs deformação dentro do plano (linha vermelha) e fora do plano (linha azul). c) Desenho esquemático da deformação dentro do plano e d) fora do plano. e) Modelo em papel para demonstrar a deformação fora do plano. ....	40
Figura 18: Coordenadas e padrões geométricos das estruturas <i>honeycomb</i> (a) e <i>re-entrant</i> (b). ....	43
Figura 19: Célula unitária <i>AuxHex</i> e parâmetros geométricos. ....	45
Figura 20: Análise de tensão na célula unitária: a) carregamento uniaxial na direção Y e b) deformação esperada.....	47
Figura 21: Célula completa da estrutura <i>cross-chiral</i> . Em zoom o padrão de cruz que é considerado a célula unitária da estrutura.....	48
Figura 22: Modificação da célula unitária para adequação ao modelo de <i>cross-chiral</i> .....	49



Figura 23: Representação esquemática de impressoras 3D. a) FFF; b) Jato de tinta; c) SLA; d) SLS; e) 3D plotter. ....	52
Figura 24: Diagrama ilustrando uma impressora 3D FFF. ....	53
Figura 25: Malha de uma geometria com os nós e elementos. ....	55
Figura 26 - Fluxograma de análise por MEF. ....	56
Figura 27: Exemplos de análises feitas por MEF. Componente mecânico (superior) e acionamento de <i>airbag</i> (inferior). ....	57
Figura 28: Gráfico comparando comportamento de materiais hookeanos e materiais hiperelásticos. ....	58
Figura 29: Parâmetros geométricos do corpo de prova de tração. Valores em milímetros. ....	63
Figura 30: Parâmetros geométricos do corpo de prova de compressão. Visas isométrica, de topo e de frente. Valores em milímetros. ....	63
Figura 31: Tela capturada do fatiador Ultimaker Cura. ....	64
Figura 32: Orientação de impressão. ....	65
Figura 33: Impressora 3D. ....	67
Figura 34: Pontos de medição do corpo de prova de tração. Vista superior e lateral. ....	68
Figura 35: Pontos de medição do corpo de prova de compressão. ....	68
Figura 36: Máquina de ensaio mecânico Emic DL 10000. ....	69
Figura 37: Ilustração de modos de falhas dos corpos de tração: a) falha entre camadas e b) através das camadas. ....	70
Figura 38: a) Célula unitária <i>honeycomb</i> e seus parâmetros geométricos; b) Estrutura <i>honeycomb</i> 3x3; c) Célula unitária <i>re-entrant</i> e seus parâmetros geométricos; d) Estrutura <i>re-entrant</i> 3x3. Todas as unidades em milímetros. ....	72
Figura 39: a) Célula unitária <i>AuxHex</i> e seus parâmetros geométricos; b) Estrutura <i>AuxHex</i> 3x10. Todas as unidades em milímetros. ....	73
Figura 40: a) Célula unitária <i>cross-chiral</i> e seus parâmetros geométricos; b) estrutura <i>cross-chiral</i> completa; c) Estrutura <i>cross-chiral</i> 3x3. Todas as unidades em milímetros. ....	73
Figura 41: a) Célula unitária do padrão linear; b) Estrutura <i>kirigami</i> 3x25. Todas as unidades em milímetros. ....	74
Figura 42: a) Célula unitária do padrão ortogonal; b) Estrutura <i>kirigami</i> 3x8. Todas as unidades em milímetros. ....	74
Figura 43: Exemplo de malha de elementos finitos utilizado nesse estudo. ....	75
Figura 44: Elementos finitos tetraédricos para as estruturas <i>kirigami</i> . ....	76
Figura 45: Imagem superior exemplo de célula unitária e imagem inferior estrutura 3x3. Faces amarelas onde as condições de contorno são aplicadas. ....	77
Figura 46: Demonstrativo das condições de contorno para as estruturas <i>kirigami</i> . ....	77
Figura 47: Erro de adesão irregular da primeira camada. ....	82
Figura 48: Erro por entupimento do bico. ....	83

Figura 49: Fotos dos corpos de prova antes do ensaio de tração nas diferentes orientações de deposição de camada. a) Orientação 0°; b) Orientação 30°; c) Orientação 45°; d) Orientação 60°; e) Orientação 90°; f) Orientação 0-90°; g) Orientação 30-30°; h) Orientação 45-45°; i) Orientação 60-60° .	84
Figura 50: Fotos dos corpos de prova após o ensaio de tração nas diferentes orientações de deposição de camada. a) Orientação 0°; b) Orientação 30°; c) Orientação 45°; d) Orientação 60°; e) Orientação 90°; f) Orientação 0-90°; g) Orientação 30-30°; h) Orientação 45-45°; i) Orientação 60-60° .	85
Figura 51: Regiões de vazio ou falha de deposição encontrados nos corpos de prova de tração. ....	86
Figura 52: Gráficos de tensão x deformação de tração. A) Orientação 0°; B) Orientação 30°; C) Orientação 45°; D) Orientação 60°; E) Orientação 90°; F) Orientação 0-90°; G) Orientação 30-30°; H) Orientação 0°; I) Orientação 0°; J) Média de curvas de todas as orientações. ....	89
Figura 53: Gráficos das propriedades obtidas pelo ensaio de tração. A) Tensão Máxima; B) Módulo de Young; C) Alongamento.....	95
Figura 54: Fotos dos corpos de prova e um zoom nas falhas para análise. Da esquerda para a direita orientações 0°, 30°, 45°, 60° e 90° .	96
Figura 55: Trincas e falhas que se propagaram perpendicular ao sentido de espessura. a) 0-90; b) 30-30; c)45-45 e d) 60-60.....	98
Figura 56: Fotos dos corpos de compressão. ....	99
Figura 57: Gráficos do ensaio de compressão das orientações a)0° e b)90° .....	101
Figura 58: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura <i>honeycomb</i> aplicada um deslocamento de -1mm. a) unitário antes; b) unitário após; c) 3x3 antes e d) 3x3 após aplicação do deslocamento. ....	104
Figura 59: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura <i>re-entrant</i> aplicada um deslocamento de -1mm. a) unitário antes; b) unitário após; c) 3x3 antes e d) 3x3 após aplicação do deslocamento. ....	104
Figura 60: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura <i>AuxHex</i> aplicada um deslocamento de -1mm. a) unitário antes; b) unitário após; c) 3x3 antes e d) 3x3 após aplicação do deslocamento. ....	105
Figura 61: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura <i>cross-chiral</i> aplicada um deslocamento de -1mm. a) unitário antes; b) unitário após; c) 3x3 antes e d) 3x3 após aplicação do deslocamento. ....	105
Figura 62: Resultado obtidos pelo método de elementos finitos das estruturas kirigami. a) corte linear antes; b) corte linear após; c) corte ortogonal antes e d) corte ortogonal após aplicação da força. ...	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de elementos e de graus de liberdade (DOF) em cada uma das estruturas da análise de compressão. ....	75
Tabela 2: Número de elementos e graus de liberdade (DOF) em cada uma das estruturas da análise de tração. ....	76
Tabela 3: Variações em porcentagem (%) $\pm$ desvio padrão (DP) da medida por unidade de comprimento para diversas orientações dos corpos de tração. As posições são definidas de acordo com a Figura 34 desse trabalho. ....	80
Tabela 4: Variações em porcentagem (%) $\pm$ desvio padrão (DP) da medida por unidade de comprimento para diversas orientações dos corpos de compressão. As posições dos eixos são definidas de acordo com a Figura 35 desse trabalho. ....	81
Tabela 5: Variação do comprimento dos corpos de prova após o teste de tração. ....	87
Tabela 5: Variação do comprimento dos corpos de prova após o teste de tração. (continuação) .....	88
Tabela 6: Valores dos resultados do ensaio de tração para cada uma das orientações. ....	94
Tabela 7: Valores em milímetros das dimensões dos corpos de prova de compressão (CPC) antes e após o ensaio e suas variações em percentual. ....	100
Tabela 8: Valores de Módulo de Young dos corpos de prova do ensaio de compressão. ....	102
Tabela 9: Comparativo entre os valores de coeficiente de Poisson obtidos via elementos finitos e pelas expressões analíticas. ....	103
Tabela 10: Valores de força aplicada e alongamento obtidos pela análise de elementos finitos das estruturas <i>kirigami</i> .....	108

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

$\epsilon$  - Deformação

$d$  - Deflexão

$F$  - Força

$L$  - Comprimento

$E$  - Módulo de Young

$I$  - Segundo Momento de Inércia de Área

$w$  - Largura

$t$  - espessura

$\Delta$  - Extensão

$K$  - Constante de Rigidez

$\sigma$  - Tensão

$U$  - Energia de Deformação

$M$  - Momento Torsor

$G$  - Módulo de Cisalhamento

$W$  - Trabalho

$V$  - Volume

$I_i$  - Invariantes de Deformação

$\lambda$  - Alongamento

$\kappa_B$  - constante de Boltzmann

$T$  - Temperatura

$\eta$  - Função de Densidade de Cadeias Elastoméricas

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP - Corpo de prova de tração

CPC - Corpo de prova de compressão

DOF – *Degree of Freedom*

DV - Desvio padrão

FFF – Fabricação por filamento fundido

MEF - Método de Elementos finitos

PLA - Poliacido láctico

TPU - Termoplástico poliuretano

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
	3.1 METAMATERIAIS MECÂNICOS .....	18
	3.1.1 Geometrias .....	20
	3.1.2 Coeficiente de Poisson .....	26
	3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA .....	27
	3.2.1 Kirigami.....	27
	3.2.2 Propriedades mecânicas das estruturas Honeycomb/Re-entrant 2D por Masters e Evans (1996).....	42
	3.2.3 AuxHex.....	44
	3.2.4 Cross-chiral honeycomb.....	48
	3.3 IMPRESSÃO 3D .....	51
	3.3.1 Impressora FFF.....	52
	3.3.2 Filamento Poliacido Láctico (PLA) .....	54
	3.3.3 Filamento Termoplástico de Poliuretano (TPU) .....	54
	3.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	54
	3.5 MODELOS HIPERELÁSTICOS.....	57
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>61</b>
	4.1 CARACTERIZAÇÃO DO FILAMENTO .....	61
	4.1.1 Ensaio mecânicos.....	62
	4.1.2 Análise pós ensaio .....	70
	4.2 ANÁLISE DE TENSÕES VIA ELEMENTOS FINITOS. ....	71
	4.2.1 Propriedades do material.....	71
	4.2.2 Modelos geométricos.....	71
	4.2.3 Geração da Malha.....	75
	4.2.4 Condições de contorno .....	76
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>78</b>
	5.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	78

5.2	ENSAIOS MECÂNICOS .....	83
5.2.1	<i>Tração</i> .....	83
5.2.2	<i>Compressão</i> .....	98
5.3	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS .....	102
5.3.1	<i>Compressão</i> .....	102
5.3.2	<i>Tração</i> .....	107
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>110</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>112</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE</b> .....	<b>119</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os metamateriais, materiais que apresentam propriedades especiais, têm sido o foco de grande interesse para diversas áreas da engenharia como, por exemplo, a mecânica, de estruturas e biomateriais. Isso porque suas características particulares de respostas físicas não ocorrem de forma natural. A arquitetura detalhadamente calculada e planejada dos metamateriais permite um controle das respostas que esses sistemas apresentam e abre portas para aplicações promissoras em diversas áreas de conhecimento. Para que essas estruturas complexas possam ser produzidas, foi necessário que um novo meio de produção fosse desenvolvido: a manufatura aditiva.

Manufatura aditiva, ou popularmente conhecido como impressão 3D, tem sido a melhor forma para a fabricação de metamateriais. Apesar de não ser tão nova como imagina-se a impressão 3D tem crescido muito na última década, de forma que está se tornando mais acessível à população, como também está sendo aperfeiçoada para produzir peças mais detalhadas e com utilização de maior variedade de materiais.

Uma classe de material interessante no ramo de metamateriais por impressão 3D são os hiperelásticos. Os materiais hiperelásticos, a base de elastômeros, são atraentes candidatos para os metamateriais, principalmente aqueles com aplicação mecânica. O comportamento reversível que essa classe de material apresenta quando se aplica uma tensão sobre eles possibilita aplicações para absorção e dissipação de energia e impacto.

Nesse contexto, o presente trabalho tem o objetivo investigar metamateriais fabricados por impressão 3D com um material hiperelástico. O intuito é apresentar um método de produção de estruturas em metamateriais utilizando uma impressora 3D de baixo custo e avaliar as respostas dessas estruturas.



## 2 OBJETIVOS

Esse trabalho possui três objetivos principais: Avaliar o processo de fabricação para do termoplástico PLA-flex® por impressão 3D de filamento fundido, investigar as características mecânicas do filamento e avaliar as propriedades mecânicas das estruturas metamateriais auxéticos e kirigami.

### **Objetivos específicos**

- Avaliar a influência da orientação de deposição nas propriedades mecânicas;
- Estimar as constantes hiperelástica do filamento PLA-flex®;
- Comparar resultados numéricos e teóricos das propriedades dos metamateriais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Metamateriais mecânicos

Metamateriais é a classificação dada a uma recente classe de materiais que apresentam propriedades diferentes das convencionais. O conceito de metamaterial foi introduzido primeiramente no ramo de materiais eletromagnéticos, no qual denominaram-se os materiais aos quais as propriedades são derivadas não do comportamento da massa que compõem o material e sim da sua estrutura concluída (LEE; SINGER; THOMAS, 2012). Geralmente esses materiais possuem suas estruturas finais produzidas através de arquiteturas confeccionadas, em escalas micro ou nano, para atingir uma resposta definida (ZADPOOR, 2016).

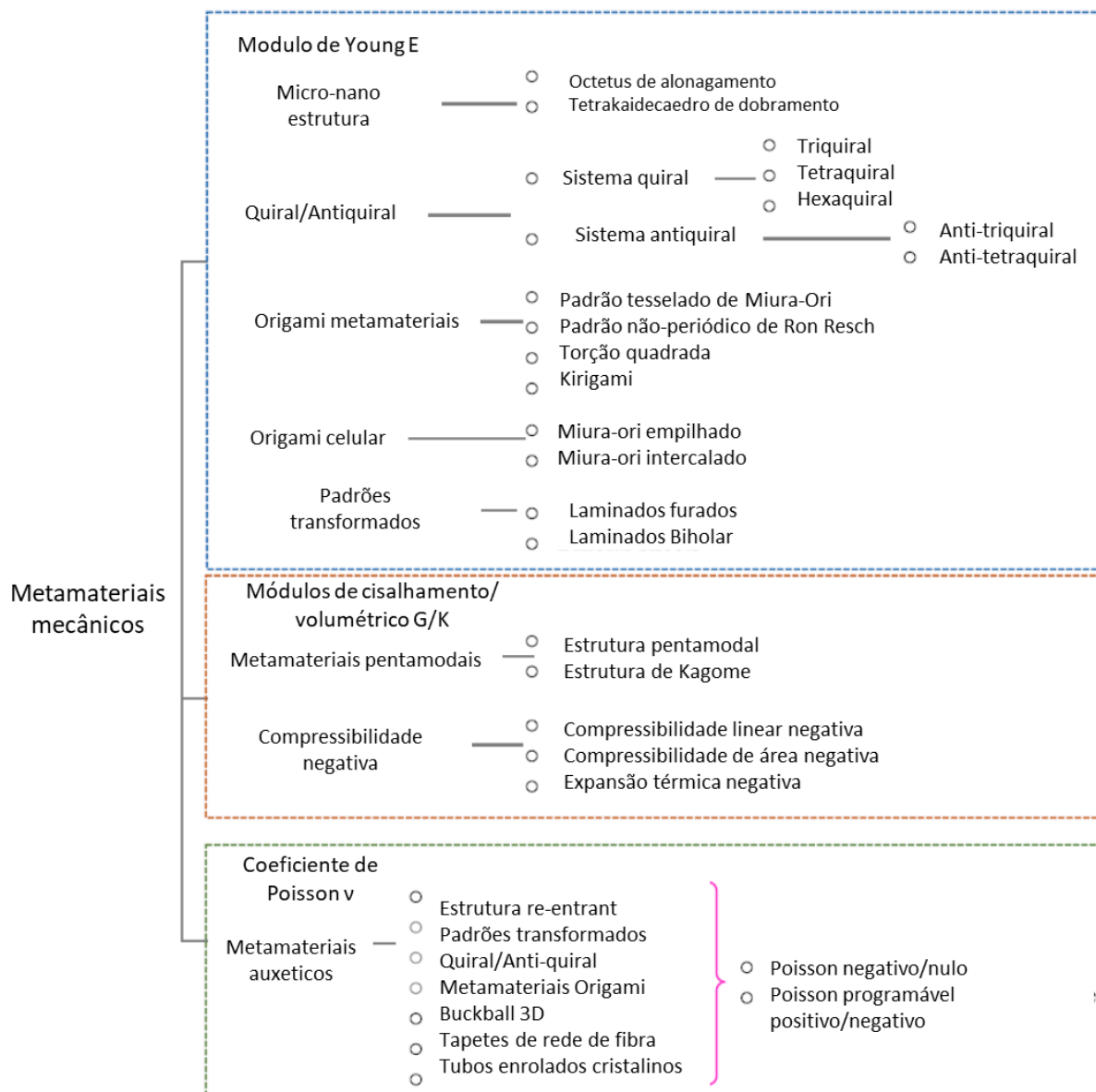
Metamateriais mecânicos são uma forma de metamaterial com propriedade mecânica única, baseada em sua estrutura (YU et al., 2018). Estes apresentam uma classificação baseada em suas quatro constantes elásticas: Módulo de Young (E), módulo de cisalhamento (G), módulo volumétrico (K) e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), como demonstrado na **Figura 1** (YU et al., 2018). Cada tipo de geometria de metamaterial é classificado pela propriedade mecânica que sua estrutura está modificando.

A produção de materiais com propriedades mecânicas diferenciados possibilita novas abordagens na fabricação de peças e equipamentos. Alguns exemplos das respostas que os metamateriais mecânicos podem apresentar são: alta razão entre resistência e densidade, ótima resiliência e capacidade de absorção de energia (SURJADI et al., 2019).

A descoberta e exploração das respostas dessas novas estruturas vêm sendo estudadas pela comunidade científica em diferentes aplicações, demonstrando as vantagens de utilização destes materiais. Na área da biomedicina (KURIBAYASHI et al., 2006) foi produzida uma endoprótese de uma liga de NiTi com memória de forma utilizando técnicas de produção de metamateriais por origami. No ramo de abafamentos acústicos (SUI et al., 2015) painéis sanduíches com matriz de metamaterial *honeycomb* feitas de fibras de aramida resultam em estruturas resistentes, leves e a prova de som. Estudos em equipamentos de proteção (IMBALZANO et al., 2018) provaram a eficiência de painéis com estrutura auxética de matriz de liga de alumínio com casca de liga de aço em resistência a impactos de explosão. Trabalhos

que demonstram que a adição de inclusões magnéticas em metamateriais mecânicos melhoram a absorção de impacto comparado ao mesmo componente não magnético (DUDEK et al., 2019).

**Figura 1: Classificação do metamateriais mecânicos através dos seus valores de módulo de Young, módulo de cisalhamento/volumétrico e coeficiente de Poisson.**



**Fonte: Adaptado de Yu et al. 2018.**

O controle das micro e nanoestruturas se tornou economicamente viável devido ao rápido crescimento e desenvolvimento das técnicas de manufatura, como por exemplo, impressão 3D, processo *roll-to-roll*, *electrospinning*, fotolitografia e litográficos de nova geração, gravura a seco, gravura química, micro usinagem a granel úmida, remoção baseada em energia térmica e mecânica, micro moduladores e automontagens (BARCHIESI et al.,

2019). Principalmente as técnicas de impressão 3D (ou manufatura aditiva) são fundamentais para a produção dos metamateriais mecânicos e as técnicas serão abordadas em mais detalhes posteriormente.

### **3.1.1 Geometrias**

#### **3.1.1.1 Kirigami/Origami**

Uma estrutura que tem chamado atenção dos estudos dos metamateriais mecânicos são as estruturas baseadas em *kirigami* e *origami*. Os padrões usados nessas estruturas são baseados na antiga arte japonesa *origami* (no qual “oru” e “kami”, significam “dobrar” e “papel”, respectivamente) e *kirigami* (de “kiru”, significando “cortar”, e “kami”, significando “papel”) (KOBAYASHI; UENO, 2013). Metamateriais baseados nessas estruturas apresentam deformações mecânicas que induzem as propriedades mecânicas desejáveis, como multi-estabilidade, deformações de alta amplitude, rigidez programável, morfologia estática e coeficiente de Poisson negativo (SURJADI et al., 2019).

Os metamateriais baseados na arte do origami são estruturas que dão origem a componentes dobráveis. Estes produzem componentes altamente leves, resistentes e rígidos, e suas aplicações são relacionados à capacidade estrutural e morfológica (DU et al., 2019). Esses componentes dobráveis demonstram características únicas que resultam em deformações dobráveis durante compressão, boa capacidade de absorção de energia e impacto (WANG et al., 2018a) e coeficiente de expansão térmica programável (BOATTI; VASIOS; BERTOLDI, 2017).

Aplicações dessas estruturas podem ser diversas. Na robótica, através de estruturas em polímero com memória capaz de se auto dobrar, quando aplicado calor uniforme, em formatos baseados em origami que podem ser usados para sistemas robóticos em micro escala (TOLLEY et al., 2014); um robô auto dobrável por calor em compósito baseado em origami controlado por campo magnético (MIYASHITA et al., 2015); na área espacial com o uso de fitas *Kapton* em *origami* como escudo solar para telescópio de raio-X (WILSON et al., 2013); uma estrutura sanduiche com núcleo dobrável em forma de cunha feito em Kevlar® na aplicação em componentes de aeronaves (HAHNEL et al., 2011).

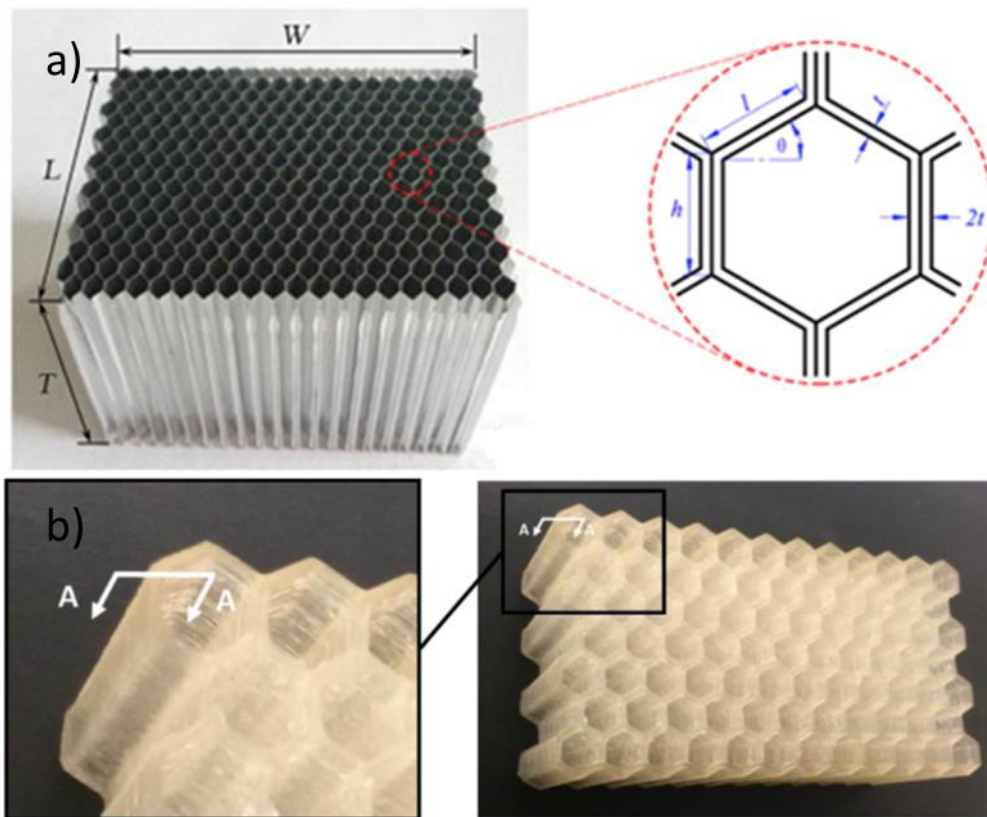
No caso dos metamateriais inspirados na arte do *kirigami* são aplicados vários cortes em materiais laminados, dessa forma pode-se melhorar o alongamento e a durabilidade do componente (NAKAJIMA; FAYAZBAKHS; TESHIMA, 2020). O uso da abordagem com *kirigami* permite um projeto e controle das propriedades elásticas de materiais laminados de uma forma altamente flexível (ISOBE et al., 2016).

Estudos mais recentes provam as vantagens e as possíveis aplicações para as estruturas em *kirigami* como o ganho em alongamento e a alta resistência de células solares de perovskita. As técnicas *kirigami* podem ser utilizadas em aparelhos eletrônicos vestíveis e de interface na pele (LI et al., 2020). A grande melhora do alongamento e um comportamento altamente extensível de lâminas de borracha com a introdução de corte baseado no *kirigami* podem ser aplicadas para desenvolvimento de aparelho sensoriais (MIZZI et al., 2020).

### 3.1.1.2 Honeycomb/Re-entrant

Uma estrutura já bem conhecida é a chamada *honeycomb* (Favo de mel). Seu projeto tem ocorrência natural e vem sendo usada comumente em estruturas sanduíches na indústria aeroespacial (DONG et al., 2019). Uma característica importante é que a estrutura *honeycomb* apresenta uma compressibilidade linear negativa, ou seja, ela expande em pelo menos uma direção quando colocada sobre pressão hidrostática de compressão (GRIMA et al., 2011). Em sua forma metálica a estrutura *honeycomb* apresenta elevada rigidez/resistência específica e excelente capacidade de dissipação de energia (XIAO et al., 2019), além disso, também foi demonstrado o potencial de absorção de energia de um *honeycomb* hiperelástico feito por impressão em 3D (BATES et al., 2016) (**Figura 2**).

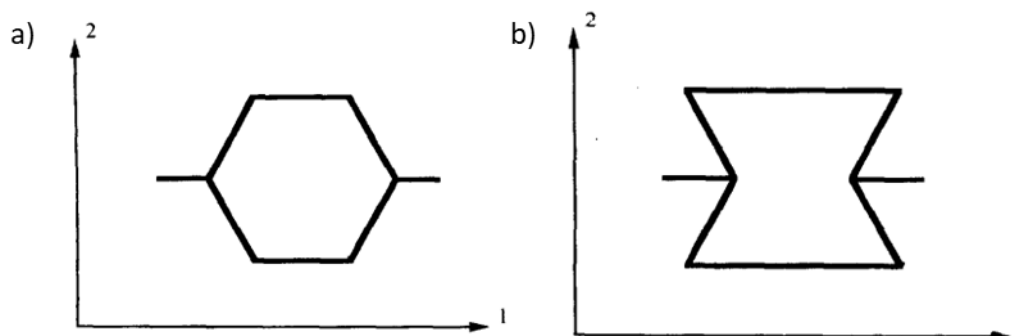
Figura 2: Exemplo de estruturas *honeycomb*. a) estrutura metálica de Wang (2019); b) estrutura em TPU.



Fonte: Bates et al. 2016.

A partir da estrutura *honeycomb* uma adaptação foi feita chamada *re-entrant honeycomb* (MASTERS; EVANS, 1996). Essa nova forma é obtida através de uma modificação da configuração celular derivada da *honeycomb* hexagonal tradicional (DONG et al., 2019). A **Figura 3** demonstra a comparação entre as duas células.

Figura 3: Diagrama das estruturas a) *honeycomb* e b) *re-entrant*.



Fonte: Adaptado de Masters e Evans (1996).

A modificação feita na *honeycomb* para a *re-entrant* resulta em uma estrutura com o coeficiente de Poisson negativo, classificada com o nome de auxético. Materiais auxéticos são aqueles que apresentam a propriedade de expandir ao ser esticado e contrair ao ser comprimido (EVANS, 1991). Além desse comportamento, esse tipo de estrutura apresenta propriedades interessantes como, elevada rigidez, elevado módulo de cisalhamento, resistência de indentação e capacidade de absorção de energia (WANG et al., 2018b).

A estrutura *re-entrant* vem sendo alvo de muitos estudos por vários pesquisadores. Dong et al. (2019) avaliaram o efeito da espessura de parede das células *re-entrant* produzindo estruturas em liga de alumínio; Xiao et al. (2019) avaliaram e propõem um modelo da dinâmica de encolhimento de estruturas *re-entrant* metálica; já Wang et al. (2019) introduziram um novo design para a estrutura *re-entrant* que apresenta uma boa capacidade de absorção de impacto em baixas velocidades; por sua vez Kolken et al. (2020) estudaram as propriedades mecânicas de uma estrutura *re-entrant* em liga de titânio, alumínio e vanádio com possível aplicação em implantes ortopédicos.

### 3.1.1.3 AuxHex

A estrutura apresentada nessa seção é denominada *AuxHex* e, de uma forma simplificada, é a combinação das estruturas *honeycomb* e *re-entrant*. A estrutura hexagonal *honeycomb* clássica é definida como tendo um coeficiente de Poisson positivo, a estrutura *re-entrant* possui um coeficiente de Poisson negativo, dessa forma a união das duas resulta em uma estrutura com Coeficiente de Poisson zero. Essa propriedade foi demonstrada por Grima et al. (2010) em seu estudo no qual ele introduziu uma estrutura chamada “semi *re-entrant honeycomb*” em que uma metade da célula unitária é *honeycomb* e a outra é *re-entrant* (**Figura 4a**). Dessa forma essa estrutura apresenta o valor de Poisson zero em uma direção de aplicação de força, o que resulta na estrutura não sofrer deformações nas direções perpendiculares à força aplicada.

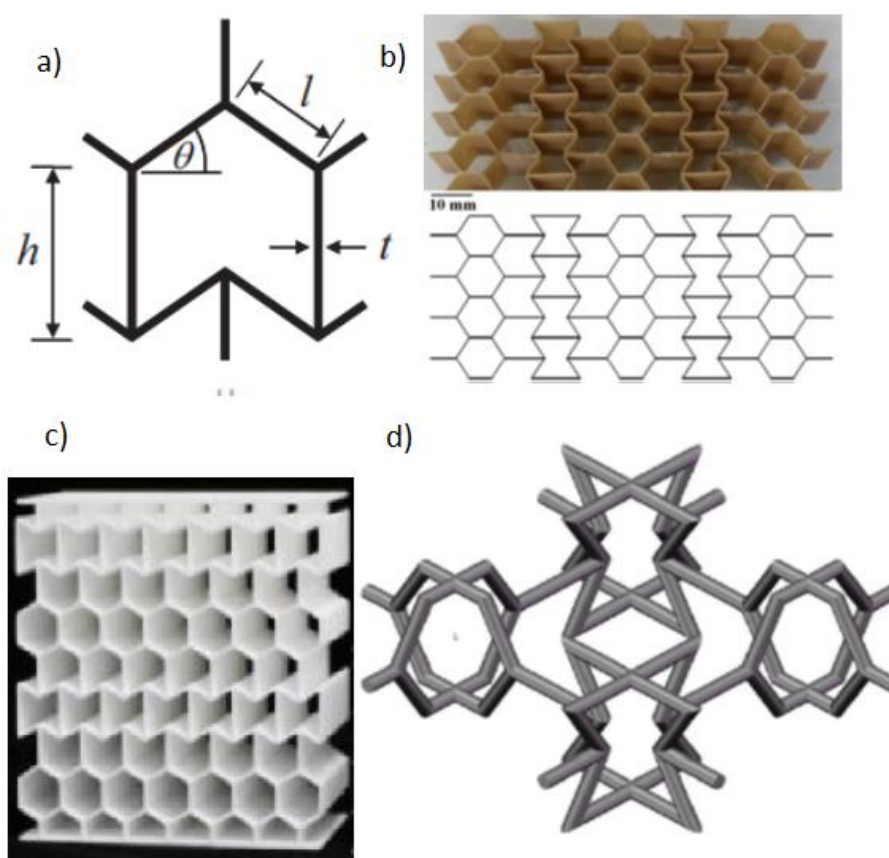
O termo *AuxHex* foi introduzido por Del Broccolo et al. (2017) que desenvolveu a estrutura celular no qual foram utilizadas as células unitárias completas do *honeycomb* e *re-entrant* (**Figura 4b**). Em seu estudo foram utilizadas as técnicas de *kirigami* em lâminas de

poli(éter-éter-cetona) (PEEK) coladas para gerar a estrutura. O *AuxHex* foi comparado com a estrutura *honeycomb* e suas propriedades mecânicas obtiveram uma pequena melhora relativa.

Por sua vez Xu et al. (2019) utilizaram a mesma estrutura *AuxHex*, só que produzida a partir de impressão 3D em Nylon (**Figura 4c**). Nesse estudo foi demonstrado que manipulando os parâmetros da estrutura celular pode resultar em uma das três faixas de valores de Poisson: positivo, negativo ou zero.

Recentemente Guo (2020) desenvolveu e analisou uma estrutura *AuxHex* 3D (**Figura 4d**). Foram feitos estudos numéricos e experimentais nos quais a estrutura produzida foi feita por impressão 3D de Nylon. A estrutura final apresenta coeficiente de Poisson zero e os resultados demonstraram uma capacidade de absorção de energia melhores que a estrutura *re-entrant*.

**Figura 4:** a) Estrutura “*semi re-entrant honeycomb*”; b) *AuxHex* em PEEK; c) *AuxHex* em Nylon; d) *AuxHex* 3D.



Fontes: a) Grima et al. (2010); b) Del Broccolo et al. (2017); c) Xu et al. (2019); d) Guo (2020).

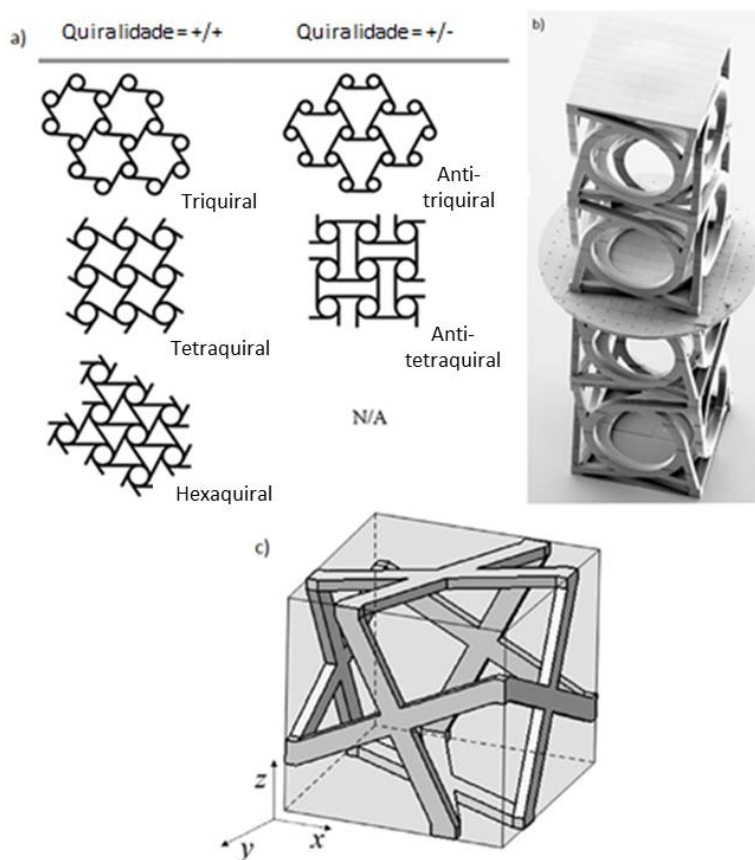


### 3.1.1.4 Estrutura Quiral

O termo quiral (chiral) vem da química e é utilizado para denominar uma imagem que não é sobreponível a seu reflexo no espelho. Metamateriais quirais foram primeiramente introduzidos por Wojciechowski (1989) e posteriormente implementados como uma estrutura quiral favo de mel hexagonal por Prall e Lakes (1997).

Os metamateriais quirais apresentam o comportamento auxético como uma de suas propriedades mecânicas. Não só se limitando apenas valores negativos do coeficiente de Poisson essa estrutura pode ser configurada para apresentar valores positivos e nulos (HA; PLESHA; AKES, 2016). Na **Figura 5** alguns exemplos dessa geometria em 2D e 3D podem ser vistos.

**Figura 5: Exemplos de estruturas quirais. a) Estruturas quirais em 2D; b) Estruturas quirais em 3D; c) Estrutura *cross-chiral* 3D.**



Fontes: a) Grima, Gatt e Farrugia(2008); b) Frenzel, Kadic e Wegener (2017); c) Lu et al. (2017).

Estes metamateriais ganham cada vez mais notoriedade em trabalhos científicos. Qi et al. (2019) estudaram por elementos finitos uma configuração híbrida quiral que combina tetraquiral e anti-tetraquiral com excelente capacidade de absorção energética em estruturas sanduiches; Frenzel, Kadic e Wegener (2017) projetaram uma estrutura quiral 3D feita de foto resina IP por impressão 3D que ao ser comprimida sofre uma rotação, que pode ser usado para mudanças de direção de campos de força (**Figura 5b**). Rossiter et al. (2014) fabricaram e analisaram uma estrutura quiral em polinorboneno feita também por impressão 3D com propriedades de memória de forma, capaz de se deformar através de calor podendo ser utilizado como um atuador. Ha et al. (2015) por sua vez desenvolveram uma estrutura hexaquiral em lâminas de ligas bi metálicas com coeficiente de expansão térmico negativo de grande magnitude (contraí quando aquecido) podendo ser utilizado para detecção de pequenas mudanças de temperatura. Lu et al. (2017) analisaram por método de elementos finitos um estrutura *cross-chiral* 3D (**Figura 5c**) que possui o comportamento auxético nas três principais direções podendo ser utilizado em componentes para absorção de energia.

### 3.1.2 Coeficiente de Poisson

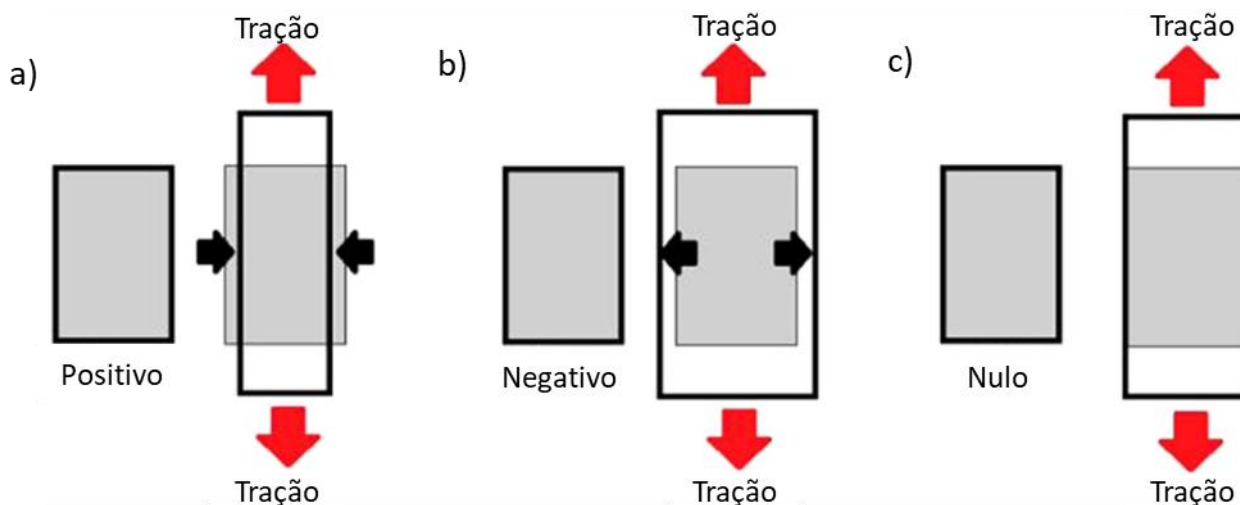
O coeficiente de Poisson é definido como um parâmetro do material. Ele é representado pela letra grega  $\nu$  (nu) e possui valor adimensional.

O coeficiente de Poisson em um material homogêneo e isotrópico submetido a uma carga axial se dá pela relação entre a deformação específica lateral e a deformação específica na direção axial:

$$\nu = -\frac{\text{deformação específica lateral}}{\text{deformação específica axial}} = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon} \quad (1)$$

Para a maioria dos materiais o valor do coeficiente é positivo, mas como foi mostrado nas sessões anteriores, os metamateriais podem ser programados para apresentar um valor negativo ou até mesmo zero. Cada um desses valores faz com que o material demonstre uma resposta mecânica específica. A **Figura 6** explica em duas dimensões as diferentes respostas, no qual sob esforço de tração estruturas com coeficiente positivo sofrem contração na direção perpendicular à força, com coeficiente negativo elas sofrem expansão na direção perpendicular à força e as com coeficiente nulo mantém sua morfologia.

**Figura 6: Representação do efeito dos esforços de tração em corpos de diferentes valores de coeficientes de Poisson. a) Poisson Positivo, b) Poisson Negativo e c) Poisson Nulo**



Fonte: Adaptado de Del Broccolo et al. (2017).

Supondo um material que está submetido a uma força de tração, em um coeficiente de Poisson positivo o material vai contrair na direção perpendicular à força. Para um valor negativo o material vai expandir na direção perpendicular à força. No caso de um valor nulo a morfologia é mantida.

## 3.2 Formulação matemática

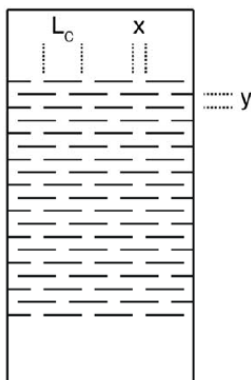
### 3.2.1 Kirigami

#### 3.2.1.1 Padrão de cortes lineares

#### Análise de forças usando teoria de vigas

Foi considerado deflexão de vigas em sistema de kirigami para prever analiticamente as forças associadas (SHYU et al., 2015). Considere um padrão de cortes kirigami como é mostrado na **Figura 7**:

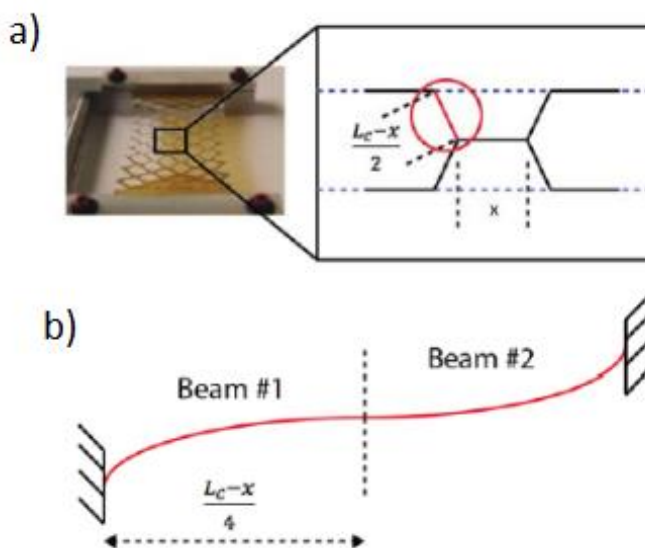
**Figura 7: Padrão de corte linear.**  $L_c$  = comprimento do corte;  $x$  = distância entre os cortes na direção transversal;  $y$  = distância entre os cortes na direção axial.



Fonte: Adaptado de Shyu et al. (2015).

Quando a estrutura está sob efeito de tração na direção axial, mudanças repentinas de comportamento definidas pela geometria do corte causam um cisalhamento ao longo do comprimento do corte, e subsequentemente um alongamento da estrutura e uma diminuição da sua largura. Dessa forma a estrutura kirigami se assemelha ao padrão da **Figura 8a**. Nessa figura, o comprimento do corte foi sobreposto com a coluna que o segue e foi aproximado a uma estrutura de duas vigas conectadas em série (**Figura 8b**), cada uma com comprimento  $\frac{L_c - x}{4}$ .

**Figura 8: Comportamento da estrutura kirigami em tração.**



Fonte: Adaptado de Shyu et al. (2015).

Usando teoria de vigas é possível relacionar a deflexão,  $d$ , e a força,  $F$ , por meio da equação (2), aproximando as vigas como sendo duas vigas em balanço com as pontas livres colocadas juntas:

$$d = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2)$$

No qual  $L$  é o comprimento da viga,  $E$  o módulo de Young do material, e  $I$  é o segundo momento de inércia de área, onde

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (3)$$

No qual  $w$  é a largura da viga e  $t$  é a espessura na direção da deflexão. Substituindo equação (3) em (2) tem-se:

$$d = \frac{4FL^3}{Ewt^3} \quad (4)$$

Como as vigas estão conectados em série, a deflexão é somada:

$$d_{viga\ total} = d_{viga1} + d_{viga2} = 2d_{viga1} = \frac{8FL^3}{Ewt^3} \quad (5)$$

Resolvendo para força em função da deflexão e substituindo os parâmetros da célula unitária do kirigami tem-se:

$$F_{viga} = \frac{8Edyt^3}{(L_c-x)^3} \quad (6)$$

Para calcular a força total atuando na estrutura como um todo, deve-se considerar as vigas na direção transversal e na direção axial. As vigas em uma mesma coluna são conectadas paralelas de tal forma que as forças atuantes para aquela coluna são somadas. Sendo assim, as forças por coluna podem ser expressas por:

$$F_{coluna} = N_V F_{viga} \quad (7)$$

Onde  $N_V$  é o número de vigas por coluna na direção transversal. No caso da direção transversal, as vigas de coluna em coluna estão conectadas em série, de tal forma que a força total atuante na estrutura,  $F_{Total}$  é expressa por:

$$\frac{1}{F_{Total}} = \frac{N_c}{F_{coluna}} \quad (8)$$

No qual  $N_c$  é o número de colunas na direção axial. Combinando as equações (6), (7) e (8) obtém-se:

$$F_{Total} = \frac{F_{coluna}}{N_c} = \frac{N_V F_{viga}}{N_c} = \frac{8dN_V E y t^3}{N_c (L_c - x)^3} \quad (9)$$

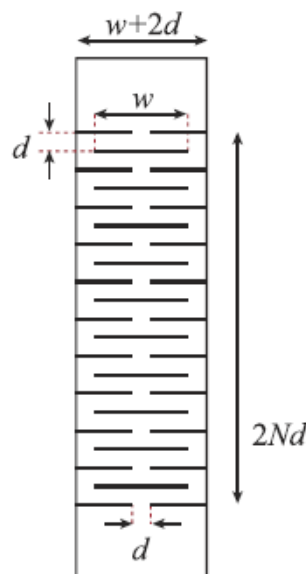
O valor máximo de deformação obtida (em %deformação) é a razão entre o comprimento máximo atingido antes da ruptura sobre o comprimento inicial:

$$\%deformação = \frac{\Delta L}{L_i} = \frac{L_c - x}{2y} \quad (10)$$

### Análise da energia de deformação

A análise da energia de deformação do kirigami possibilita uma simplificação na modelagem. Seguindo o padrão kirigami da **Figura 9**, no qual  $w$  é o comprimento do corte,  $d$  o espaçamento vertical e horizontal entre os cortes,  $N$  o número de cortes de comprimento  $w$  e  $h$  sendo a espessura da lâmina. O comprimento total do laminado é dado por  $2Nd$  e a largura total  $w+2d$ .

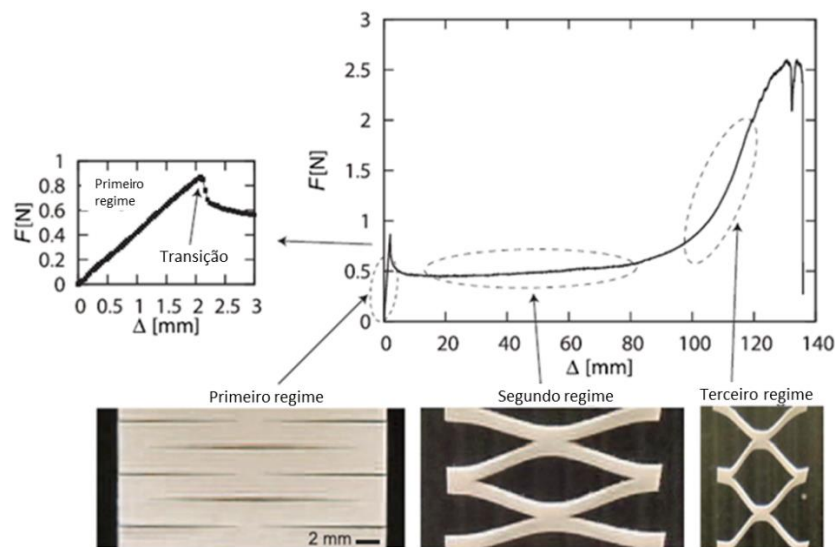
**Figura 9: Padrão de corte linear.**



Fonte: Isobe e Okumura (2016).

É possível separar a resposta do componente sob tensão em três regimes diferentes (ISOBE; OKUMURA, 2016). No primeiro regime, que é linear, a deformação ocorre no plano. No segundo, regime deslocamentos fora do plano acompanhados de uma rotação de ângulo  $\theta$  possibilitando um maior alongamento. No terceiro regime a deformação é concentrada nas pontas dos cortes, resultando em um aumento da dureza da estrutura até a fratura (**Figura 10**).

**Figura 10:** Gráfico do ensaio de força por alongamento com as respectivas regiões de cada regime sendo mostradas através do corpo de prova em ensaio.



Fonte: Adaptado de Isobe e Okumura (2016).

As respostas mecânicas apresentadas assim como a formulação desse comportamento podem ser explicadas da seguinte forma: Na transição entre o primeiro e segundo regimes, a energia de deformação dentro do plano iguala com a energia de deformação fora do plano. A transição entre os dois regimes acontece quando as duas energias se tornam iguais. Quando essa condição acontece obtém-se a extensão crítica ( $\Delta_c$ ) ou a deformação crítica ( $\varepsilon_c$ ):

$$\begin{aligned}\Delta_c &= 2N\delta_c \\ \varepsilon_c &= \frac{\delta_c}{d}\end{aligned}\quad (11)$$

Sendo:

$$\delta_c \cong \frac{h^2}{d}\quad (12)$$

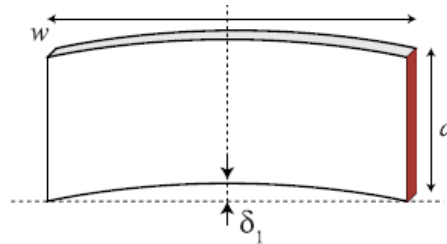
No primeiro regime (**Figura 11**), ( $\Delta < \Delta_c$ ), a resposta pode ser descrita pela lei de força-extensão ou a relação tensão-deformação, que é linear:

$$\begin{aligned} F &= K_1 \Delta \\ \sigma &= E_1 \varepsilon \end{aligned} \quad (13)$$

Onde  $K_i = k_i / (2N)$  e  $E_i = k_i d / (hw)$ .  $K$  e  $E$  são as constantes de rigidez do corpo de prova como um todo e o módulo de Young respectivamente. O termo  $i$  que aparece nas constantes dessa formulação terá valores de 1 e 2 referindo a primeiro e segundo regimes, respectivamente. Sendo assim constante de rigidez:

$$k_1 \cong \frac{Ed^3h}{w^3} \quad (14)$$

**Figura 11: Deformação no plano de uma placa de deformação unitária no primeiro regime**



Fonte: Adaptado de Isobe e Okumura (2016).

No segundo regime (**Figura 12**), ( $\Delta > \Delta_c$ ), a resposta mecânica se torna quase-linear:

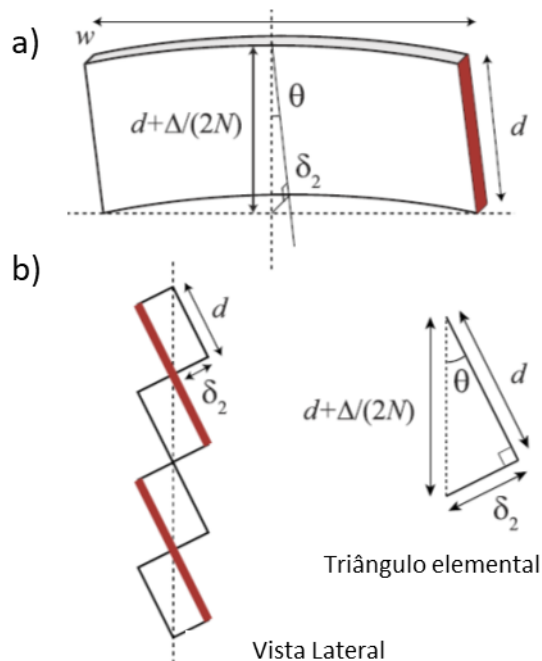
$$\begin{aligned} F &= cK_1 \Delta_c + K_2 \Delta \\ \sigma &= cE_1 \varepsilon_c + E_2 \varepsilon \end{aligned} \quad (15)$$

No qual  $0 < c < 1$  e

$$k_2 \cong \frac{Eh^3d}{w^3} \quad (16)$$



**Figura 12: Deformação fora do plano no segundo regime. a) Vista da placa de deformação unitária e b) vista lateral da estrutura toda**

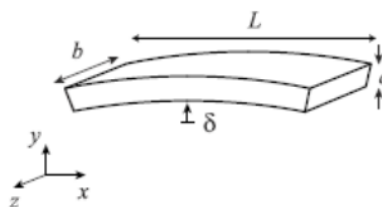


**Fonte: Adaptado de Isobe e Okumura (2016).**

Essa transição ocorre causando uma redução na rigidez, como pode ser confirmado por  $K_2/K_1 \cong (h/d)^2 \ll 1$ . A queda da força durante a transição pode ser estimada como  $(1 - c)K_1\Delta_c$  já que  $K_1\Delta_c \gg K_2\Delta$  para valores pequenos de  $\theta$  (ângulo de rotação da célula unitária).

Para entender melhor a resposta mecânica considere uma placa de comprimento  $L$ , largura  $b$  e espessura  $a$  (**Figura 13**).

**Figura 13: Ilustração de uma placa dobrada.**



**Fonte: Adaptado de Isobe e Okumura (2016).**

Considerando o a energia de dobramento dessa placa para o caso de pequena deflexão ( $\delta \ll L$ ) como sendo:

$$U(\delta)_{L,a,b} \cong \frac{Ea^3b\delta^2}{L^3} \quad (17)$$

Para caracterizar a resposta mecânica no primeiro regime basta simplesmente considerar a superposição da célula unitária da **Figura 11** com a placa da **Figura 13**. Sendo assim os parâmetros  $(L, a, b)$  com os respectivos parâmetros  $(w, d, h)$  é possível obter a energia de deformação do primeiro regime como sendo:

$$U_1(\Delta) = 2NU(\delta_1)_{w,d,h} = \frac{2NEd^3h\delta_1^2}{w^3} \text{ para } d \ll w \quad (18)$$

No qual  $\Delta = 2N\delta_1$  já que o corpo de prova pode ser considerado como uma conexão em série de  $2N$  da célula unitária. A energia do primeiro regime aumenta com o quadrado da extensão o que resulta na relação linear de força-extensão das equações (13) e (14). Para esse caso a tensão  $\sigma$  e o módulo de Young  $E_1$  pela definição pode ser calculado como:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{(hw)} \\ \sigma &= \frac{E_1\Delta}{(2Nd)} \end{aligned} \quad (19)$$

A resposta do segundo regime é encontrada fazendo a superposição da célula unitária da **Figura 12** com a placa da **Figura 13**. Sendo assim transpondo os parâmetros  $(L, a, b)$  com os respectivos parâmetros  $(w, h, d)$  é possível obter a energia de deformação do segundo regime como sendo:

$$U_1(\Delta) = 2NU(\delta_1)_{w,h,d} = \frac{2NEh^3d\delta_1^2}{w^3} \text{ para } d \ll w \quad (20)$$

Com a relação  $\delta_2^2 = (\Delta/2N + d)^2 - d^2$  (**Figura 12**). A energia da equação (20) escala com  $(\Delta/2N + d)^2 - d^2$  o que leva a uma força quase-linear proporcional a  $\Delta/2N + d$  nas equações (15) e (16).

Nas duas abordagens anteriores foram apresentadas as formas de calcular a resposta mecânica de uma estrutura kirigami. A primeira utiliza da teoria de vigas para o cálculo da resposta e a segunda utiliza uma análise de energia de deformação. Além do fato das amostras

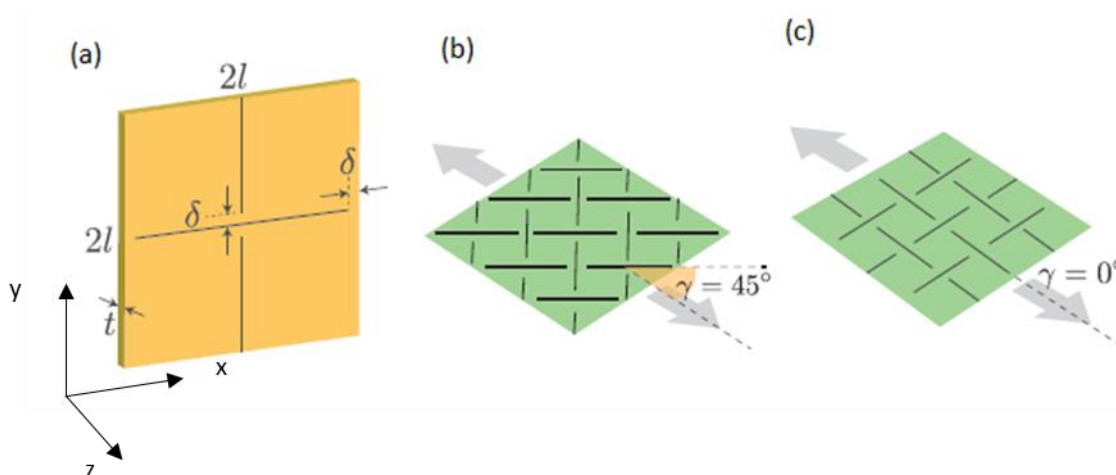
escolhidas para cada uma das abordagens serem similares (padrões de cortes na direção transversal ao carregamento aplicado com o devido espaçamento entre os cortes) é possível notar que o cálculo de força das equações (6) e (15) são similares (considerando um valor de  $c \rightarrow 0$  para a equação 15).

### 3.2.1.2 Padrão de cortes ortogonais

#### **Análise da resposta mecânica em padrões de kirigami com flambagem induzida Rafsanjani e Bertoldi (2017)**

Essa é uma análise da resposta elástica inicial no plano (xy) do sistema (**Figura 14**). Em seguida, é caracterizado as alterações de deslocamentos localizados que resultaram em resposta fora do plano e conseqüentemente a formação de padrões 3D. Para os cálculos a seguir é considerado que as todas as deformações acontecem localmente nas dobradiças e que os padrões são considerados quadrados rígidos. Na **Figura 14**  $l$  representa comprimento do domínio quadrático,  $\delta$  é espessura da dobradiça,  $t$  a espessura da lâmina e  $\gamma$  o ângulo dos padrões de corte em relação a direção da força aplicada.

**Figura 14:** a) Parâmetros e padrão de corte. b) Orientação de  $45^\circ$  em relação ao carregamento. Orientação de  $0^\circ$  em relação ao carregamento.

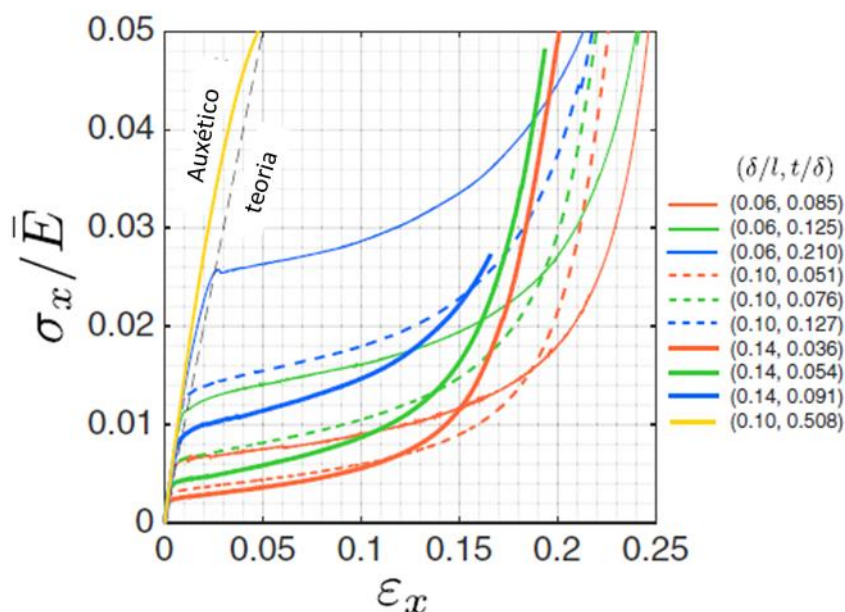


Fonte: Adaptado de Rafsanjani e Bertoldi (2017).

## Resposta elástica no plano

A curva de tensão por deformação, apresentada na **Figura 15**, demonstrou uma resposta inicial linear. Essa curva foi apresentada por Rafsanjani e Bertoldi (2017) de forma a propor uma relação analítica para encontrar o módulo de Young da estrutura com os padrões kirigami  $\bar{E}_x$ , em termos dos parâmetros geométricos  $l$ ,  $\delta$ ,  $t$  e do módulo de Young do material  $E_x$ .

**Figura 15:** Gráfico adimensional de tensão versus deformação para orientações de corte em 45°.

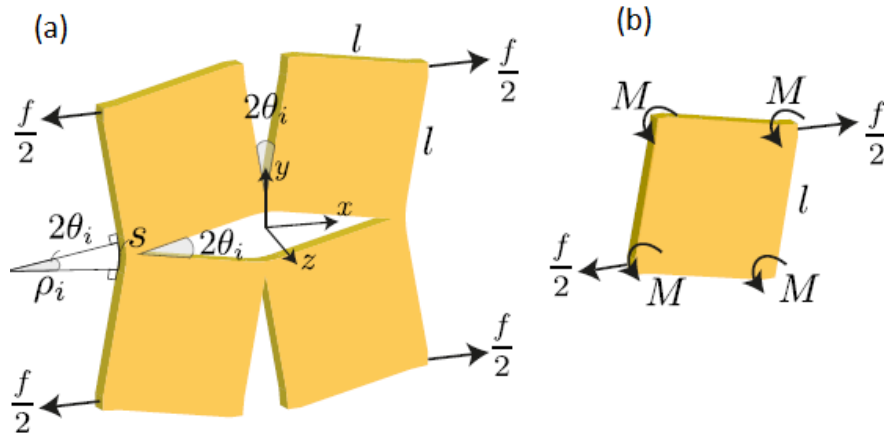


Fonte: Rafsanjani e Bertoldi (2017).

Considerando uma célula unitária como sendo o conjunto de 4 domínios quadráticos (**Figura 16a**) e uma deformação uniaxial ao longo de um conjunto de corte (por exemplo  $\gamma = 0^\circ$ ) a aplicando uma tensão na direção x:

$$\sigma_x = \frac{f}{2lt} \quad (21)$$

**Figura 16:** a) Célula unitária do padrão kirigami sendo o conjunto de quatro quadrados b) único quadrado da célula unitária.



Fonte: Adaptado de Rafsanjani e Bertoldi (2017).

Na **Figura 16**  $f$  = força aplicada às dobradiças  $2lt$  = área no qual a força é aplicada. A tensão uniaxial aplicada gera momento torsor  $M$  em todas as dobradiças, o que induz a uma rotação de todos os domínios quadráticos por um ângulo  $\theta_i$  e uma abertura de todos os cortes por um ângulo  $2\theta_i$  (**Figura 16a**). Analisando um único quadrado (**Figura 16b**) é possível afirmar que:

$$M = \frac{1}{4} \times \frac{fl}{2} = \frac{1}{4} \sigma_x l^2 t \quad (22)$$

Além disso, como  $M$  deve estar em equilíbrio pelos pares induzidos pelo carregamento interno, tem-se:

$$M = \frac{E_x I_i}{\rho_i} \quad (23)$$

No qual  $I_i = \delta^3 t / 12$  é o segundo momento de inércia de área de cada dobradiça no eixo  $z$  e  $\rho_i$  é a curvatura de cada dobradiça torcida. Todos os termos  $i$  adotados nos símbolos dessa seção se referem às ações dentro do plano da força (*in-plane*). Considerando que o comprimento da região torcida da dobradiça é aproximadamente igual à espessura da dobradiça  $\delta$ , obtém-se:

$$\rho_i \cong \frac{\delta}{2\theta_i} \quad (24)$$

Substituindo equações (22) e (24) na Eq. (23), tem-se:

$$\sigma_x = \frac{2}{3} E_x \left( \frac{\delta}{l} \right)^2 \theta_i \quad (25)$$

Além disso, como a deformação na direção do carregamento é:

$$\varepsilon_x = \cos \theta_i + \sin \theta_i - 1 \quad (26)$$

No caso do regime de pequenas deformações ( $\theta_i \rightarrow 0$ ) tem-se:

$$\varepsilon_x \cong \theta_i \quad (27)$$

logo,

$$\sigma_x = \frac{2}{3} E_x \left( \frac{\delta}{l} \right)^2 \varepsilon_x \quad (28)$$

Sendo assim o módulo de Young do laminado com o padrão kirigami,  $\bar{E}$ , é:

$$\bar{E}_x = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_x} = \frac{2}{3} E_x \left( \frac{\delta}{l} \right)^2 \quad (29)$$

Finalmente, considerando cada dobradiça como uma viga de espessura  $\delta$  e largura  $t$ , a densidade de energia da deformação sobre o plano pode ser calculada como:

$$U_{dobradiça} = \frac{1}{2V} \int_0^\delta \frac{E_x l_i}{\rho_i^2} ds = \frac{1}{16} \bar{E}_x \varepsilon_x^2 \quad (30)$$

Onde  $V = 4l^2 t$  é o volume da célula unitária. Como uma célula unitária é composta de 8 dobradiças a densidade de energia da deformação é:

$$U_i = 8 \times U_{dobradiça} = \frac{1}{2} \bar{E}_x \varepsilon_x^2 \quad (31)$$

Para o caso de  $\gamma \neq 0^\circ$  a transformação de coordenadas deve ser adotada. Como foi mostrado por Grima et al. (2005) o módulo de Young do laminado fica:

$$\bar{E}_x^\gamma = \left[ \frac{\cos^4 \gamma}{E_x} + \frac{\sin^4 \gamma}{E_y} - 2 \frac{\nu_{xy}}{E_x} \cos^2 \gamma \sin^2 \gamma \right]^{-1} \quad (32)$$

Vale ressaltar que toda essa formulação foi calculada a partir da consideração que os domínios são quadrados rígidos e Grima et al. (2005) demonstra que para esse caso:

$$\begin{aligned}\overline{E}_x^Y &= \overline{E}_x; \\ v_{xy} &= -1.\end{aligned}\tag{33}$$

### Resposta elástica fora do plano

A **Figura 15** exhibe a mudança do comportamento linear para uma tensão em platô. Essa transição fica mais visível para os corpos de provas mais finos ( $t/\delta \ll 1$ ). Isso é um resultado da flambagem dos ligamentos que ocorre fora do plano de ação da força e, ocorre quando as deformações das dobradiças fora do plano se tornam energeticamente menos factíveis que as deformações no plano. Enquanto a densidade de energia de deformação no plano é calculada através da equação (31), a equação para o caso fora do plano é:

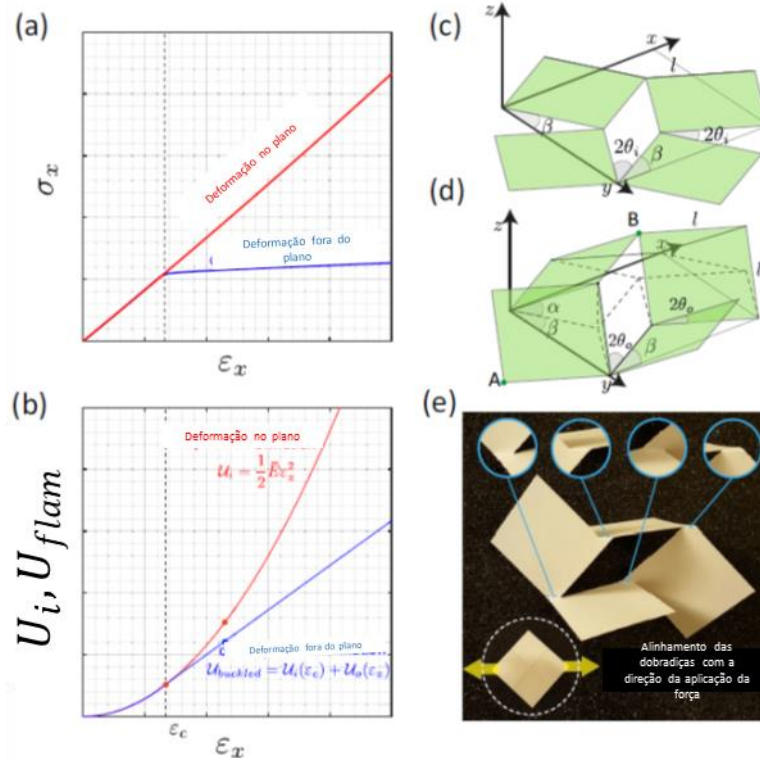
$$U_{flamb}(\varepsilon_x) = U_i(\varepsilon_c) + U_o(\varepsilon_x)\tag{34}$$

Onde  $\varepsilon_c$  é deformação crítica no qual a flambagem ocorre e  $U_o$  é a contribuição energética da deformação fora do plano. O subscrito  $o$  nessa seção se refere a termos fora do plano (*out-of-plane*).

Como  $\sigma_x = dU_{flamb}/d\varepsilon_x$  e a tensão imediatamente depois da instabilidade em flambagem é quase constante (**Figura 17b**). Nota-se que  $U_o(\varepsilon_x)$  é aproximadamente linear em  $\varepsilon_x$  (**Figura 17a**) e pode ser identificado como a tangente de  $U_i(\varepsilon_x)$  em  $\varepsilon_c$ :

$$U_o(\varepsilon_x) = \overline{E}_x \varepsilon_c (\varepsilon_x - \varepsilon_c)\tag{35}$$

**Figura 17:** (a) Gráfico de tensão vs deformação do kirigami dentro do plano (linha vermelha) e fora do plano (linha azul). b) Gráfico densidade de energia de deformação vs deformação dentro do plano (linha vermelha) e fora do plano (linha azul). c) Desenho esquemático da deformação dentro do plano e d) fora do plano. e) Modelo em papel para demonstrar a deformação fora do plano.



Fonte: Adaptado de Rafsanjani e Bertoldi (2017).

Além disso, como todas as dobradiças torcem fora do plano,  $U_o(\epsilon_x)$  também pode ser expresso como:

$$U_o(\epsilon_x) = 4 \times \frac{1}{2V} \int_0^\delta \frac{E_x I_o}{\rho_{o1}^2} ds + 4 \times \frac{1}{2V} \int_0^\delta \frac{E_x I_o}{\rho_{o2}^2} ds = \frac{1}{6} E_x \left(\frac{t}{l}\right)^2 (\theta_{o1}^2 + \theta_{o2}^2) \quad (36)$$

Onde  $I_o = \delta t^3 / 12$  é o segundo momento de inércia de área do eixo x para dobradiças no eixo y (ou vice-versa),  $\rho_{oj} = \delta / (2\theta_{oj})$  é a curvatura fora do plano das dobradiças deformadas e  $2\theta_{oj}$  é o ângulo de abertura de uma dobradiça após a flambagem fora do plano. Vale notar, em geral, depois da flambagem os ângulos de abertura das dobradiças do laminado podem tomar dois valores,  $2\theta_{o1}$  e  $2\theta_{o2}$  (nem todas as dobradiças abrem igualmente depois da flambagem) (Figura 17c, d).



Enquanto a equação (36) é válida para qualquer direção de carregamento, para  $\gamma = 45^\circ$  (carregamento na diagonal)  $\theta_{o1} = \theta_{o2} = \theta_o$  a equação (36) fica:

$$U_o(\varepsilon_x) = 8 \times \frac{1}{2V} \int_0^\delta \frac{E_x l_o}{\rho_o^2} ds = \frac{1}{3} E_x \left(\frac{t}{l}\right)^2 \theta_o^2 \quad (37)$$

A deformação crítica  $\varepsilon_c$  pode ser determinada pelas equações (35) e (37) depois de expressar  $\theta_o$  em função de  $\varepsilon_x$ . Com isso, é possível notar que para  $\gamma = 45^\circ$  (**Figura 17d**):

$$\cos 2\theta_o = \cos \alpha \sen 2\beta \quad (38)$$

Onde  $\alpha \in [0, \pi/2]$  determina a orientação do domínio quadrático no plano xy e é o ângulo entre o limite do domínio quadrático no plano xy e o eixo x.

$$\beta = \arccos \frac{1+\varepsilon_x}{\sqrt{2}} \quad (39)$$

Além disso, para o caso  $\gamma = 45^\circ$  as dobradiças são aproximadamente alinhadas a longo da direção de carregamento (**Figura 17e**), a distância entre os pontos A e B se mantém constante  $\overline{AB} = \sqrt{5}l$  (**Figura 17d**).

$$\cos \alpha = \tan \beta \quad (40)$$

Enquanto a equação (40) tem uma boa representabilidade para o regime pós flambagem, ela não captura corretamente a resposta do sistema no começo da transição, já que  $\alpha \neq 0$  para  $\varepsilon_c$  (é como se consideram os quadrados já rotacionados fora do plano xy quando a transição é iniciada). Para corrigir isso a equação 40 é modificada da seguinte forma:

$$\cos \alpha \cong \tan(\beta + \theta_c), \text{ para } \varepsilon_x \geq \varepsilon_c \quad (41)$$

Onde  $\theta_c = \pi/4 - \beta_c$  se refere ao ângulo de abertura associado a  $\varepsilon_c$ . Note que, de acordo com equação (41),  $\alpha = 0$  em  $\varepsilon_c$ . Substituição das equações (39) e (41) na equação (38) tem-se:

$$\theta_o(\varepsilon_x) = \frac{1}{2} \arccos \left[ \sen \left( 2 \arccos \frac{1+\varepsilon_x}{\sqrt{2}} \right) \tan \left( \frac{\pi}{4} + \arccos \frac{1+\varepsilon_x}{\sqrt{2}} - \arccos \frac{1+\varepsilon_c}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (42)$$

Apesar da equação (42) fornecer uma relação altamente não-linear entre  $\theta_c$  e  $\varepsilon_x$ , perto do ponto de instabilidade  $\theta_0^2(\varepsilon_x)$  pode ser aproximado a

$$\theta_0^2(\varepsilon_x) \cong \varepsilon_x - \varepsilon_c \quad (43)$$

Finalmente a deformação crítica pode ser determinada substituindo equação (43) na equação (37) e igualando à equação (35):

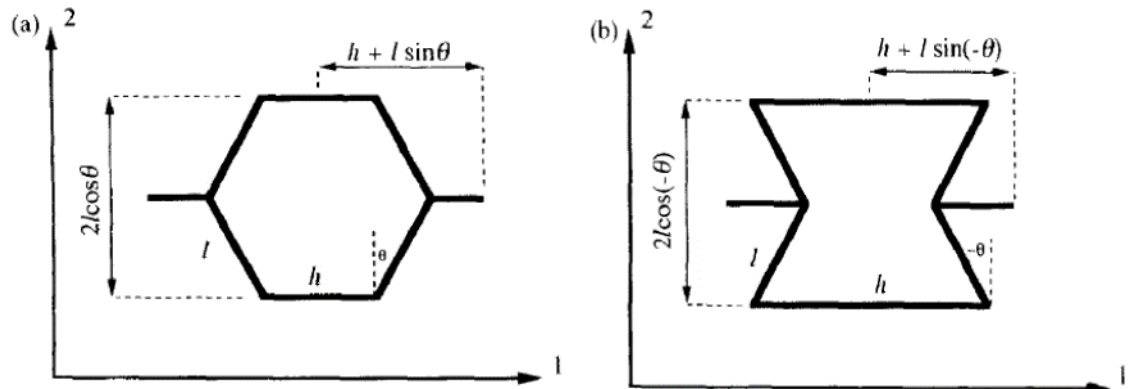
$$\varepsilon_c \cong \frac{1}{2} \left( \frac{t}{\delta} \right)^2 \quad (44)$$

Nessa formulação é possível notar o uso de teoria de vigas e também o calculo das energias de deformação. Nota-se uma combinação das análises feitas com os padrões de cortes transversais ao carregamento só que aprofundando em padrões de cortes mais complexos. Mesmo assim é possível notar um padrão da resposta do kirigami: uma deformação dentro do plano seguida por uma deformação fora do plano. Essa característica é que concede a esses metamateriais a capacidade de alcançar grandes deformações sem ruptura.

### 3.2.2 Propriedades mecânicas das estruturas Honeycomb/Re-entrant 2D por Masters e Evans (1996)

Inicialmente deve-se considerar as células unitárias dessas estruturas como é mostrado na **Figura 18**. Sendo que  $h$  = comprimento da parede horizontal;  $l$  = comprimento da parede lateral;  $t$  = espessura da parede no plano;  $\theta$  = ângulo da parede da célula;  $b$  = espessura em profundidade da célula.

Figura 18: Coordenadas e padrões geométricos das estruturas *honeycomb* (a) e *re-entrant* (b).



Fonte: Adaptado de Masters e Evans (1996).

Uma força ( $F$ ) aplicada nessas células unitárias está relacionada com o deslocamento da célula ( $\delta$ ) e a constante da força ( $K_i$ ) da seguinte forma:

$$F = K_i \delta \quad (45)$$

O termo  $i$  na constante da força representa cada um dos mecanismos de deformação que serão analisados: flexão, extensão e articulação. Além disso as constantes elásticas de módulo de Young ( $E$ ) e módulo de cisalhamento ( $G$ ) do material são conhecidas. Nesse trabalho será analisado apenas o modelo de flexão.

### Constante da força de flexão ( $K_f$ )

Para esse modelo considera-se a parede de comprimento  $l$  como uma viga em balanço como uma extremidade livre e outra fixa. O deslocamento da parte livre por flexão é expresso por:

$$\delta = \frac{Ml^2}{12EI} \quad (46)$$

No qual o momento aplicado é  $M = Fl$ , segundo momento de inércia de área da parede da célula é  $I = bt^3/12$ . Sendo assim a equação (46) fica:

$$\delta = \frac{Fl^3}{Ebt^3} \quad (47)$$

Comparando a equação (47) com a equação (45) tem-se:

$$K_f = \frac{Ebt^3}{l^3} \quad (48)$$

### Modelo de flexão

Usando as configurações geométricas e o sistema de coordenadas da **Figura 18** e considerando que a deformação ocorre por flexão das paredes das células, quando uma carga externa é aplicada (GIBSON et al., 1982). Dessa forma é possível chegar nas seguintes equações de propriedades elásticas em termos de  $K_f$ :

$$E_1 = \frac{K_f \left( \frac{h}{l} + \text{sen } \theta \right)}{b \cos^3 \theta} \quad (49)$$

$$E_2 = \frac{K_f \cos \theta}{b \left( \frac{h}{l} + \text{sen } \theta \right) \text{sen}^2 \theta} \quad (50)$$

$$\nu_{12} = \frac{\text{sen } \theta \left( \frac{h}{l} + \text{sen } \theta \right)}{\cos^2 \theta} \quad (51)$$

$$\nu_{21} = \frac{\cos^2 \theta}{\left( \frac{h}{l} + \text{sen } \theta \right) \text{sen } \theta} \quad (52)$$

$$G_{12} = \frac{K_f \left( \frac{h}{l} + \text{sen } \theta \right)}{b \left( \frac{h}{l} \right)^2 \left( 1 + \frac{2h}{l} \right) \cos \theta} \quad (53)$$

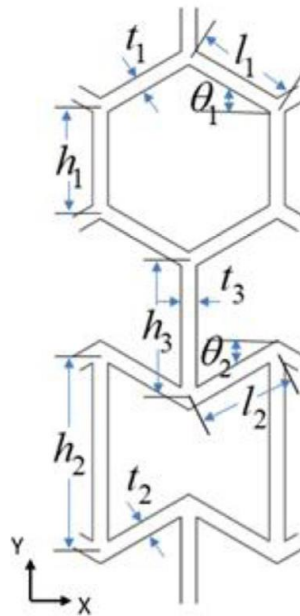
Onde  $E_1$ ,  $E_2$  são os módulos de Young da estrutura nas direções 1 e 2 respectivamente;  $\nu_{12}$  e  $\nu_{21}$  são os coeficientes de Poisson da estrutura;  $G_{12}$  o modulo de cisalhamento da estrutura. Todas essas expressões são válidas para as estruturas *honeycomb* e *re-entrant* (para o caso de *re-entrant* os valores do ângulo  $\theta$  são negativos). Nesse modelo de flexão é respeitada a relação  $E_1 \nu_{21} = E_2 \nu_{12}$  para uma matriz de rigidez simétrica.

### 3.2.3 AuxHex

Considera-se que carga de compressão distribuída uniformemente é aplicada nas direções X e Y de uma célula *AuxHex* (**Figura 19**). No qual  $h_1$  = comprimento da parede hexagonal,  $h_2$  = comprimento da parede re-entrant,  $h_3$  = comprimento da parede entre as estruturas,  $l_1$  = Comprimento da parede inclinada hexagonal,  $l_2$  = comprimento da parede inclinada re-entrant,  $\theta_1$  = ângulo da parede inclinada hexagonal;  $\theta_2$  = ângulo da parede inclinada

re-entrant,  $t_1$  = espessura hexagonal,  $t_2$  = espessura re-entrant e  $t_3$  = espessura da separação. As paredes das células são consideradas como vigas de Euler-Bernoulli, no qual as deformações de cisalhamento são desprezadas e as extensões axiais e deformações de compressão são ignoradas. Além disso é considerado que as deformações acontecem no limite linear elástico e que essas deformações são pequenas o suficiente para que mudanças muito bruscas na geometria não aconteçam.

**Figura 19: Célula unitária AuxHex e parâmetros geométricos.**



Fonte: Adaptado de Xu et al. (2019).

A partir das condições de contorno listadas acima será utilizado o modelo de flexão desenvolvido na seção anterior. Considerando inicialmente um carregamento uniaxial na direção X (direção 2 em relação a **Figura 18**). A deformação da célula unitária *honeycomb* ( $\varepsilon_2^h$ ) na direção 2 por uma carga  $\sigma_2$  e utilizando o valor de  $K_f$  (Eq. 48) é:

$$\varepsilon_2^h = \frac{\sigma_2 b \sin^2 \theta_1 \left( \frac{h_1}{l_1} + \sin \theta_1 \right)}{K_h \cos \theta_1} = \frac{\sigma_2 \left( \frac{h_1}{l_1} + \sin \theta_1 \right) l_1^3 \sin^2 \theta_1}{E t_1^3 \cos \theta_1} \quad (54)$$

No caso da célula unitária *re-entrant* a deformação na direção 2 ( $\varepsilon_2^r$ ) é:

$$\varepsilon_2^r = \frac{\sigma_2 b \sin^2 \theta_2 \left( \frac{h_2}{l_2} - \sin \theta_2 \right)}{K_h \cos \theta_2} = \frac{\sigma_2 \left( \frac{h_2}{l_2} - \sin \theta_2 \right) l_2^3 \sin^2 \theta_2}{E t_2^3 \cos \theta_2} \quad (55)$$

Percebe-se que a diferença entre as equações acima está exatamente no fato de o ângulo da estrutura *re-entrant* ser negativo em relação ao referencial.

Para calcular a deformação da estrutura *AuxHex* ( $\varepsilon_2$ ) basta fazer a média simples das deformações  $\varepsilon_2^h$  e  $\varepsilon_2^r$  dividindo pela metade:

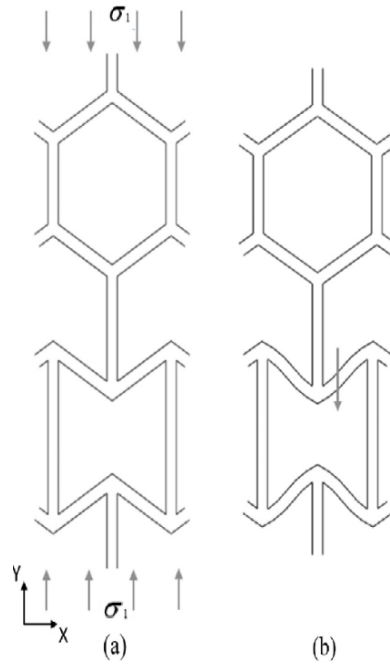
$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_2^h + \varepsilon_2^r}{2} = \frac{\sigma_2}{2E} \left[ \frac{\left(\frac{h_1}{l_1} + \text{sen } \theta_1\right) l_1^3 \text{sen}^2 \theta_1}{t_1^3 \cos \theta_1} + \frac{\left(\frac{h_2}{l_2} - \text{sen } \theta_2\right) l_2^3 \text{sen}^2 \theta_2}{t_2^3 \cos \theta_2} \right] \quad (56)$$

Dessa forma o modulo de Young fica:

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{2E}{\left[ \frac{\left(\frac{h_1}{l_1} + \text{sen } \theta_1\right) l_1^3 \text{sen}^2 \theta_1}{t_1^3 \cos \theta_1} + \frac{\left(\frac{h_2}{l_2} - \text{sen } \theta_2\right) l_2^3 \text{sen}^2 \theta_2}{t_2^3 \cos \theta_2} \right]} \quad (57)$$

Considerando agora um carregamento uniaxial na direção Y (direção 1 mostrada na **Figura 18**) da célula unitária *AuxHex*. Para esse caso, em específico, acontece uma deformação inicial da estrutura *re-entrant* o que resulta em uma deformação nula da estrutura *honeycomb* ( $\varepsilon_1^h = 0$ ). Esse fenômeno pode ser visualizado na **Figura 20**:

**Figura 20: Análise de tensão na célula unitária: a) carregamento uniaxial na direção Y e b) deformação esperada.**



**Fonte: Adaptado de Xu et al. (2019).**

A equação da deformação da estrutura *re-entrant* na direção 1 ( $\varepsilon_1^h$ ):

$$\varepsilon_1^h = \frac{\sigma_1 l_2^3 \cos^3 \theta_2}{Et_2^3 \left( \frac{h_1}{l_1} + \sin \theta_1 + \frac{h_2}{l_2} - \sin \theta_2 \right)} \quad (58)$$

Nessa equação percebe-se que o termo em parênteses contempla a célula *AuxHex* como um todo. Isso acontece porque nessa direção de carregamento a força passa pela estrutura *honeycomb* até chegar na estrutura *re-entrant*. Devido ao fato de que  $\varepsilon_1^h = 0$  a deformação da célula *AuxHex* fica sendo somente a deformação da estrutura *re-entrant*. Em outras palavras:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^h = \frac{\sigma_1 l_2^3 \cos^3 \theta_2}{Et_2^3 \left( \frac{h_1}{l_1} + \sin \theta_1 + \frac{h_2}{l_2} - \sin \theta_2 \right)} \quad (59)$$

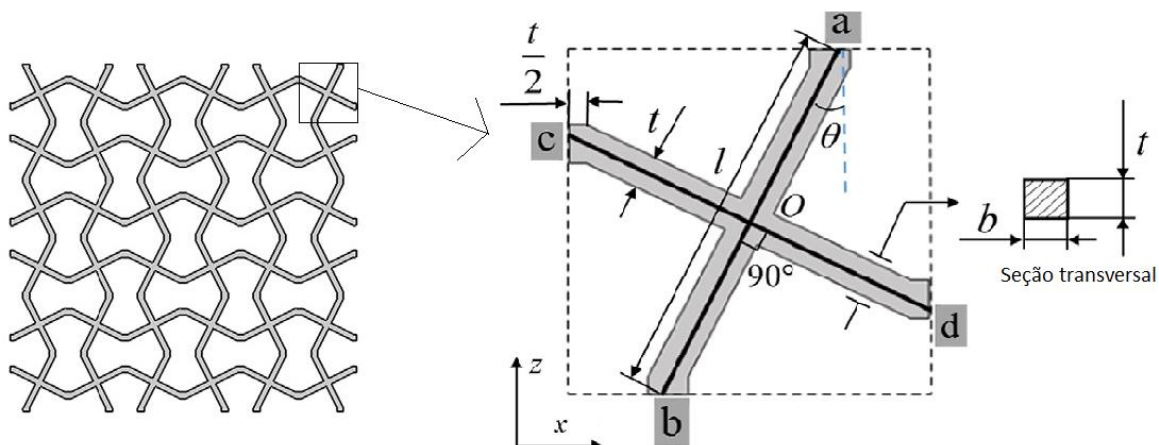
O modulo de Young é:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{Et_2^3 \left( \frac{h_1}{l_1} + \sin \theta_1 + \frac{h_2}{l_2} - \sin \theta_2 \right)}{l_2^3 \cos^3 \theta_2} \quad (60)$$

### 3.2.4 Cross-chiral honeycomb

. O modelo da estrutura *cross-chiral honeycomb* é baseado na geometria de Lu et al. (2017). A estrutura assemelha-se com a *re-entrant*, mas nesse caso a célula unitária é o padrão de cruz que é espelhada e replicada nas duas direções para gerar a geometria final (**Figura 21**).

**Figura 21:** Célula completa da estrutura *cross-chiral*. Em zoom o padrão de cruz que é considerado a célula unitária da estrutura.



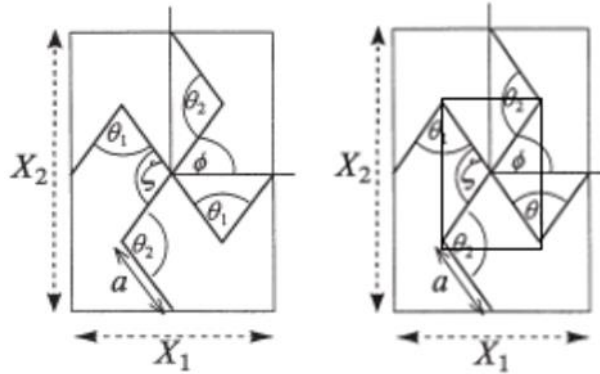
Fonte: Adaptado de Lu et al. (2017)

Onde  $l$  = o comprimento da parede,  $t$  = a espessura da parede,  $\theta$  = o ângulo de inclinação e  $b$  = a altura na direção Y.

Para calcular as propriedades mecânicas dessa estrutura será utilizado o método de Smith, Grima e Evans (2000), nesse estudo os autores analisaram a estrutura representada na **Figura 22**. A célula unitária da **Figura 22** pode ser transformada na célula unitária da **Figura 21** por meio das seguintes alterações:  $l = 2a$ ,  $\zeta = 90^\circ$ , por trigonometria  $\phi = 90^\circ - \theta$  e desconsiderar os ângulos para formar a célula unitária de cruz (Seleção da **Figura 22**).



Figura 22: Modificação da célula unitária para adequação ao modelo de *cross-chiral*.



Fonte: Smith, Grima e Evans (2000).

Inicialmente os comprimentos  $X_1$  e  $X_2$  são (nessa seção 1 e 2 representam as direções X e Z respectivamente):

$$X_1 = 2a \cos(\zeta - \phi) \quad (61)$$

$$X_2 = 2a \sin \phi \quad (62)$$

A célula unitária vai se deformar por articulação da junta central, considerando que não há flexão ou extensão da junta. Sendo assim a deformação dessa célula acontece através do deslocamento do ângulo  $\phi$  e o coeficiente de Poisson é dado por:

$$\nu_{21} = (\nu_{12})^{-1} = -\frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_2} \quad (63)$$

Onde  $d\varepsilon_i$  é a pequena deformação incremental na direção do carregamento, é expresso por:

$$d\varepsilon_i = \frac{dX_i}{X_i} = \frac{1}{X_i} \frac{dX_i}{d\phi} d\phi \quad (64)$$

Combinando as equações (63) e (64) obtém-se:

$$\nu_{21} = (\nu_{12})^{-1} = -\frac{d\varepsilon_1}{d\varepsilon_2} = -\left[ \frac{1}{X_1} \frac{dX_1}{d\phi} d\phi \right] \left[ \frac{1}{X_2} \frac{dX_2}{d\phi} d\phi \right]^{-1} = -\frac{X_2}{X_1} \frac{dX_1}{d\phi} \left[ \frac{dX_2}{d\phi} \right]^{-1} \quad (65)$$

Para esse caso:

$$\frac{dX_1}{d\phi} = 2a \operatorname{sen}(\zeta - \phi) \quad (66)$$

$$\frac{dX_2}{d\phi} = 2a \cos \phi \quad (67)$$

Sendo assim o coeficiente de Poisson para esse caso fica:

$$\nu_{21} = (\nu_{12})^{-1} = -\frac{2a \operatorname{sen} \phi}{2a \cos(\zeta - \phi)} 2a \operatorname{sen}(\zeta - \phi) [2a \cos \phi]^{-1} = -\tan \phi \tan(\zeta - \phi) \quad (68)$$

O cálculo do módulo de Young é derivado pelo princípio de conservação de energia. A energia de deformação por unidade de volume devido à deformação  $d\varepsilon_i$  é dada por:

$$U = \frac{1}{2} E_i (d\varepsilon_i)^2 \quad (69)$$

Já o trabalho feito pela célula unitária por cada uma das juntas é igual a:

$$W = N \left[ \frac{1}{2} k_\phi (d\phi)^2 \right] \quad (70)$$

Onde  $N$  é o número de vezes do ângulo  $\phi$  por célula unitária, que nesse caso é igual a 4 (**Figura 22**) e  $k_\phi$  é a constante de rigidez da junta. Pela conservação de energia as equações (69) e (70) se relacionam da seguinte forma:

$$U = \frac{W}{V} \quad (71)$$

Onde  $V$  representa o volume da célula unitária que é dado por:

$$V = X_1 X_2 b \quad (72)$$

Combinando as equações (72), (71), (70), (69) e (64) obtém-se:

$$\frac{1}{2} E_i (d\varepsilon_i)^2 = \frac{1}{2} E_i \left( \frac{1}{X_i} \frac{dX_i}{d\phi} d\phi \right)^2 = \frac{N}{X_i X_j b} \left[ \frac{1}{2} k_\phi (d\phi)^2 \right] \quad (73)$$

O modulo de Young geral fica:

$$E_i = \frac{Nk_\phi X_i}{b X_j} \left( \frac{dX_i}{d\phi} \right)^{-2} \quad (74)$$

Para esse caso fica:

$$E_1 = \frac{4k_\phi}{b} \frac{2a \cos(\zeta - \phi)}{2a \sin \phi} [2a \sin(\zeta - \phi)]^{-2} = \frac{k_\phi}{a^2 b} \frac{\cot(\zeta - \phi)}{\sin \phi \sin(\zeta - \phi)} \quad (75)$$

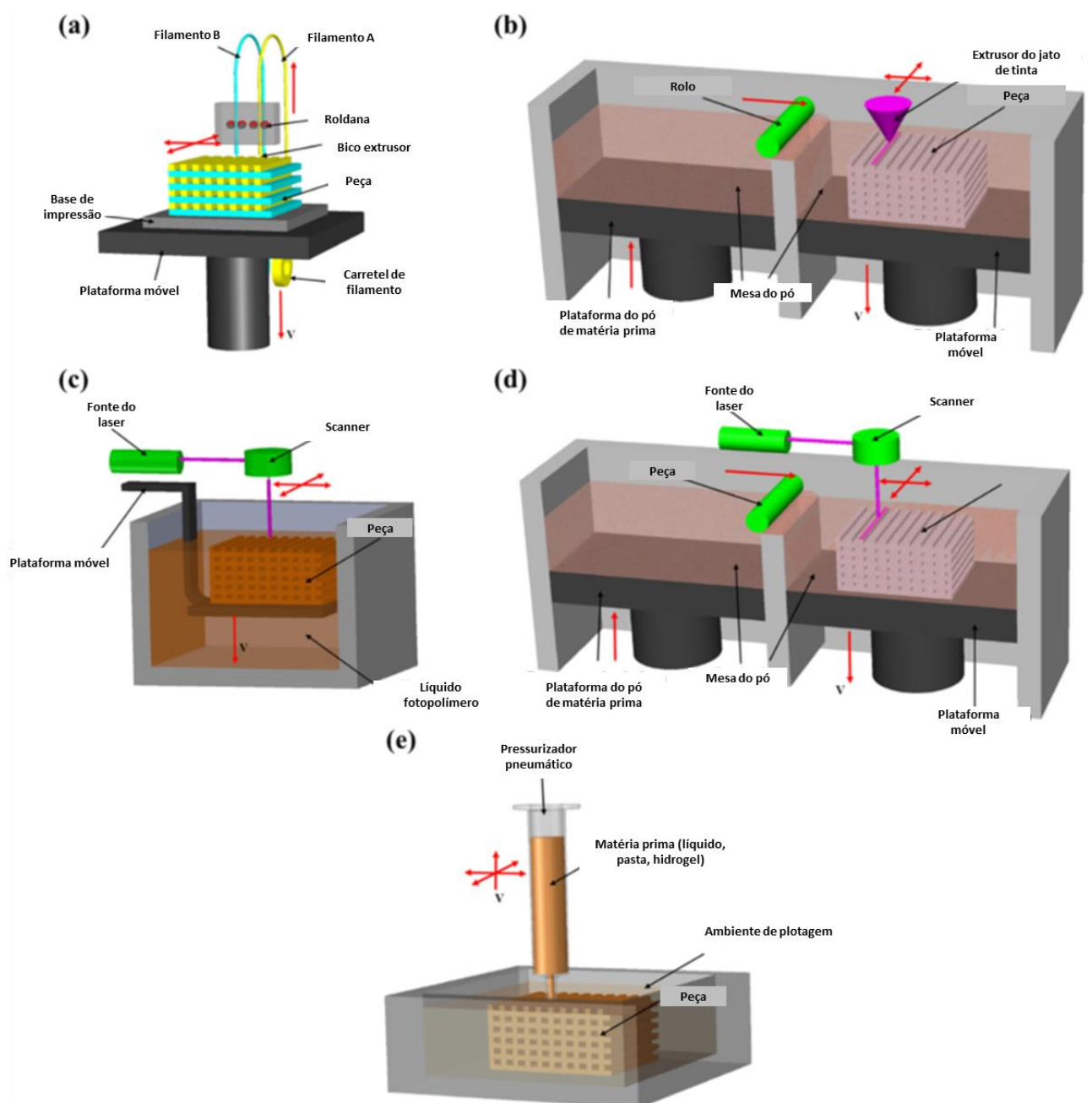
$$E_2 = \frac{4k_\phi}{b} \frac{2a \sin \phi}{2a \cos(\zeta - \phi)} [2a \cos \phi]^{-2} = \frac{k_\phi}{a^2 b} \frac{\tan \phi}{\cos \phi \cos(\zeta - \phi)} \quad (76)$$

### 3.3 Impressão 3D

Nos últimos anos têm se falado muito na técnica de impressão 3D para produção de objetos, peças e estruturas. Impressão 3D é o processo de união de materiais para se fazer um objeto de um modelo 3D virtual em um objeto real 3D, geralmente camada por cima de camada da geometria (ASTM INTERNATIONAL, 2013). Apesar de parecer um tópico bem recente, essa tecnologia foi primeiramente introduzida por Charles Hull em 1984 e patente aceita em 1986 (HULL, 1984), mas somente nos últimos anos que ela tem se tornado acessível. Isso deve-se ao fato de as primeiras patentes terem expirado, o que possibilitou que fabricantes pudessem desenvolver novos equipamentos de impressão 3D (NGO et al., 2018). Desenvolvimentos recentes reduziram os custos dessas máquinas, dessa forma expandindo suas aplicações para escolas, casas e laboratórios.

Dos métodos mais comuns de impressão 3D estão aqueles que fabricam os objetos por polímeros. As técnicas mais bem estabelecidos são a fabricação por filamento fundido (FFF), sinterização seletiva a laser (SLS), estereolitografia (SLA), impressora 3D de jato de tinta e impressora 3D plotter (WANG et al., 2017). A **Figura 23** mostra detalhes de cada uma dessas técnicas.

**Figura 23: Representação esquemática de impressoras 3D. a) FFF; b) Jato de tinta; c) SLA; d) SLS; e) 3D plotter.**



Fonte: Adaptado de Wang et al. (2017).

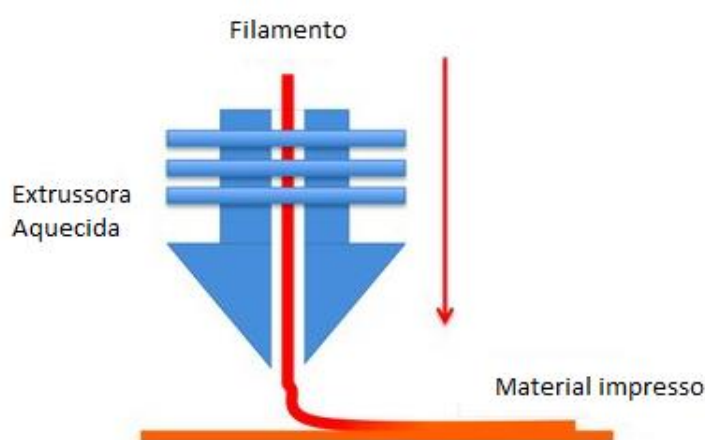
### 3.3.1 Impressora FFF

Impressão de Fabricação por Filamento Fundido (FFF) é um método onde camadas de polímeros termoplásticos são fundidos juntos em um padrão para a criação de um objeto. O filamento é geralmente aquecido até a sua temperatura de transição vítrea e então extrudado e

depositado ao lado ou acima do material extrudado anteriormente, criando o objeto camada por camada. (“FDM (3D Printing) – Simply Explained | All3DP”, [s.d.]).

As impressoras FFF são o método de fabricação de polímeros mais comum. Sua origem se passa no final da década de 80 com Scott Crump e patente aceita em 1992 (CRUMP, 1992). A **Figura 24** demonstra em detalhe como é feito a deposição do material.

**Figura 24: Diagrama ilustrando uma impressora 3D FFF.**



**Fonte: Adaptado de All3DP**

As vantagens dessa tecnologia em relação as outras impressoras 3D são: baixo custo de equipamento e matéria prima, velocidade de produção da peça e simplicidade do processo de fabricação. Dessa forma as impressoras FFF têm ganhado espaço e está se tornando mais acessível nas escolas, indústrias, laboratórios, oficinas e nas casas das pessoas.

Na parte de metamateriais mecânicos as impressoras FFF têm sido usadas por pesquisadores para a fabricação de seus componentes. Bates et al. (2016) fabricaram uma estrutura *honeycomb* em poliuretano e analisou a capacidade de absorção de energia. Nakajima et al.(2020) estudaram as propriedades de uma estrutura em kirigami feita também de poliuretano alterando os parâmetros de impressão da FFF. Recentemente Chen e He (2020) produziram uma estrutura auxética feita de nylon e nylon reforçado com fibra de carbono feita por uma impressão FFF com excelente capacidade de absorção energética.

### 3.3.2 *Filamento Poliacido Láctico (PLA)*

O Poliacido Láctico (PLA) é um termoplástico biodegradável de origem natural e de fontes renováveis, como amido de milho ou cana-de-açúcar. Na impressão 3D FFF o PLA é hoje um dos materiais mais utilizado devido às suas boas características de impressão. Sendo as principais a facilidade de imprimir e poder ser usado em qualquer impressora, elevada dureza superficial, alta qualidade visual na impressão e ótima adesão entre camadas. (3d Lab Industria Ltda.).

### 3.3.3 *Filamento Termoplástico de Poliuretano (TPU)*

Os filamentos termoplásticos são a matéria base das impressoras 3D FFF e um dos materiais utilizados é o TPU (Termoplástico de Poliuretano). Considerado um elastômero termoplástico versátil, este filamento pode oferecer uma alta durabilidade e flexibilidade às peças impressas em 3D. Dessa forma, além de manter as propriedades mecânicas, o filamento permite a sua utilização em diversos setores (D3M Industria e Comércio Ltda.).

O TPU é composto de um bloco de copolímeros de segmentos rígidos e segmentos macios. Os segmentos macios são *diols* (composto orgânico contendo dois grupos hidroxila) a base de poli éter ou poliéster. Os segmentos rígidos são *isocianato* duplos (grupo funcional de átomos  $-N=C=O$ ) e cadeias curtas de *diols* para extensão das ligações (FRICK et al., 2014). O TPU tem sido um polímero bem atrativo em diversas aplicações já que sua rigidez está relacionada a razão entre esses segmentos rígidos e macios em sua composição. Essa alteração da microestrutura permite o controle das respostas mecânicas do material (YI et al., 2006).

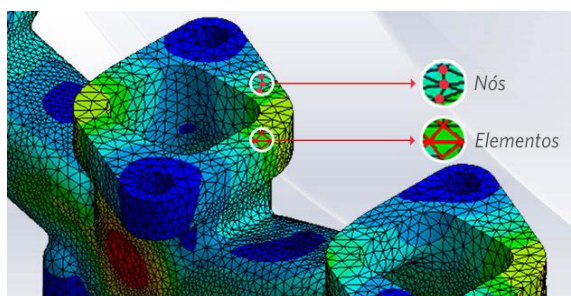
## 3.4 **Método de elementos finitos (MEF)**

Método de elementos finitos é um método discreto de solução aproximada de problemas de engenharia, que geralmente é utilizado para o desenvolvimento de procedimentos computacionais para a solução de equações diferenciais, equações integrais e outros problemas de engenharia. Essas soluções tratam de análises de tensões, transferência de calor, eletromagnetismo e escoamento de fluido (MOAVENI, 1999). Esse método tem sido amplamente utilizado, tanto em indústrias quanto em pesquisas, de forma a minimizar os custos e tempo gastos para o desenvolvimento de um projeto.

O desenvolvimento do Método de Elementos Finitos para a solução prática de problemas de engenharia começou com o avanço dos computadores digitais. Isso porque a essência das soluções de elementos finitos se dá de um conjunto de equações algébricas que são estabelecidas e resolvidas. Dessa forma somente através do uso de computadores digitais é que esse processo de solução numérica pode ser feito efetivamente e aplicado (BATHE, 1996).

O método a geração um número limitado de elementos de comportamento bem definido para definir uma estrutura. Esses elementos são as pequenas subdivisões na qual a geometria de análise foi separada, aos quais passam a representar o domínio contínuo do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são denominados de “elementos finitos”. Os elementos são conectados entre si por pontos, os quais são chamados de nós. O conjunto de todos os itens (elementos e nós) dá-se o nome de malha. Na **Figura 25** é possível observar um exemplo de geometria com sua malha.

**Figura 25: Malha de uma geometria com os nós e elementos.**

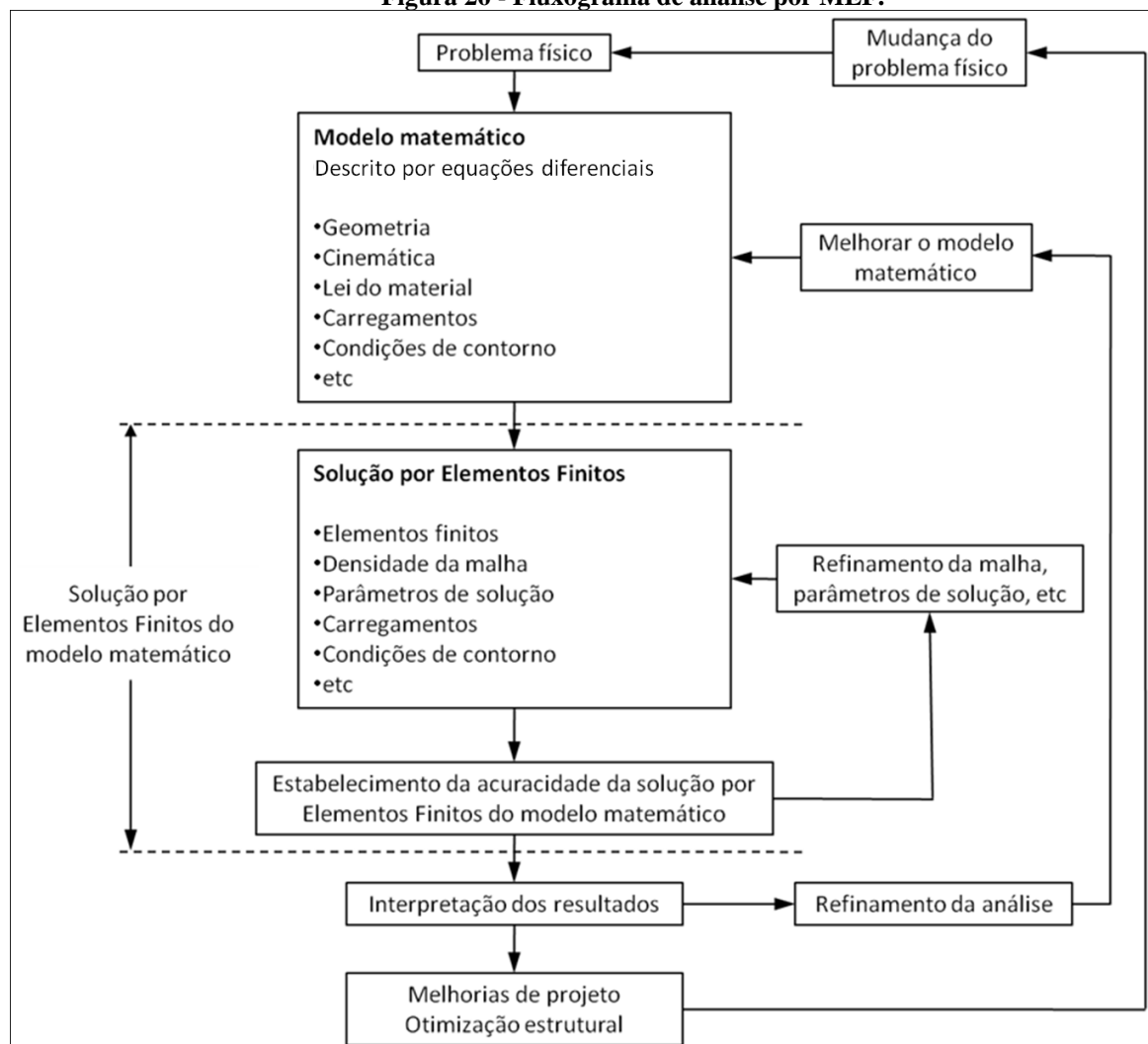


**Fonte: Adaptado de (ESSS)**

Em seguida as equações matemáticas que regem o comportamento físico são resolvidas de forma aproximada para cada um dos elementos. A precisão do Método de Elementos Finitos está relacionada ao número de nós e elementos, além do tamanho e tipo de malha. Geralmente cada geometria deve ter um tratamento especial na hora de gerar a malha, por isso quanto menor o tamanho e maior o número de elementos maior será a precisão dos resultados.

O fluxograma a seguir (**Figura 26**) esquematiza o processo de análise pelo método. Esse passo a passo ajuda na tomada de decisões de qualquer projeto que utilize do método e, por ser tudo feito por simulação computacional, o número de protótipos físicos é reduzido resultando em uma economia de recursos e tempo.

**Figura 26 - Fluxograma de análise por MEF.**

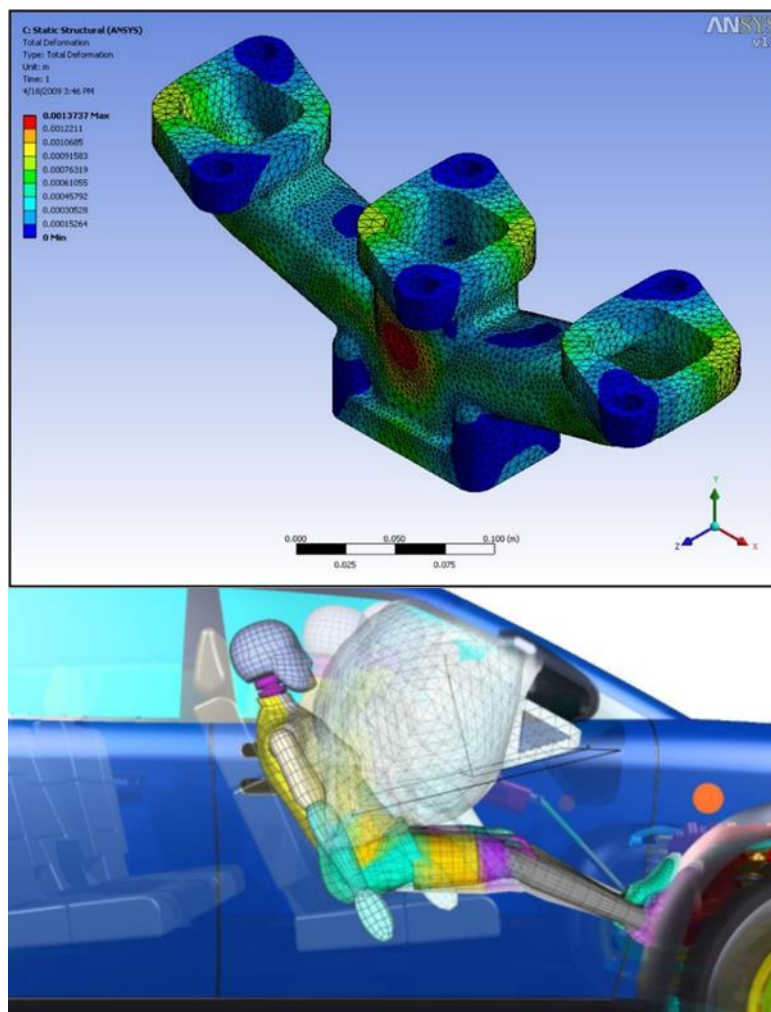


Fonte: Adaptado de Alvarenga (2019)

O método de elementos finitos é uma ferramenta de extrema importância e ao mesmo tempo de grande complexidade. Nele é possível fazer análises de sistemas mais simples, como por exemplo, uma análise estrutural da deformação de uma peça de um componente mecânico ou o ensaio de acionamento de um *airbag* de um carro (Figura 27). Para modelos mais complexos com o caso do *airbag*, no qual soluções temporais de propagação de ondas, aonde o instante seguinte depende das condições do instante anterior, a resolução do problema pode demorar cerca de dias (dependendo da capacidade computacional). Sendo assim é importante o usuário conhecer bem o modelo a ser testado, a capacidade do computador, e as condições que pode ser adotada no modelo. Algumas simplificações no modelo e na geometria a serem adotadas podem reduzir bastante o tempo de processamento, claro que se deve levar em conta que não se pode simplificar demais a ponto de perder confiabilidade dos resultados.



**Figura 27: Exemplos de análises feitas por MEF. Componente mecânico (superior) e acionamento de *airbag* (inferior).**



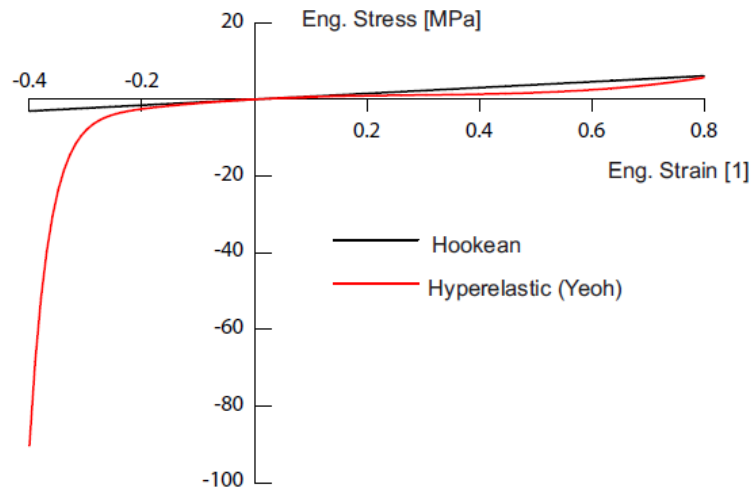
Fonte: Adaptado de (ESSS) e (ALVARENGA, 2019)

### 3.5 Modelos Hiperelásticos

Os materiais a base de elastômeros (como é o caso do TPU utilizado nesse estudo) são denominados hiperelásticos. Pela definição clássica um material elástico é aquele na qual uma função de energia de deformação existe. No caso hiperelásticos é um material para o qual a derivada da densidade de energia de deformação em relação à deformação fornece a componente de tensão associada (MALVERN, 1969). Esse tipo de material possui uma relação não-linear entre tensão e deformação independentemente do nível de sollicitação, caracterizando em uma não-linearidade do material. Devido a esse comportamento a Lei de Hooke não se aplica para esses materiais, sendo assim, as propriedades e as repostas dos hiperelásticos são

caracterizados pela função de energia de deformação (BEDA, 2007). Na **Figura 28** a seguir é possível ver essa diferença.

**Figura 28: Gráfico comparando comportamento de materiais hookeanos e materiais hiperelásticos.**



Fonte: Adaptado de Monteiro (2020)

Nessa seção serão apresentados os modelos hiperelásticos que podem ser usados nas simulações numéricas. Os modelos fazem parte da simulação para fazer a análise e previsão do comportamento das estruturas feitas com esses materiais. Para cada um dos modelos será apresentado sua aplicabilidade assim como suas vantagens e desvantagens.

### Modelo Geral

O comportamento dos materiais hiperelásticos é descrito da função de energia de deformação  $U$  baseado nas três invariantes da matriz de deformações  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  (SHAHZAD et al., 2015). A fórmula geral fica sendo:

$$U = f(I_1, I_2, I_3) \quad (77)$$

Onde os três invariantes de deformações são definidos pelos alongamentos  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  e  $\lambda_3$  da seguinte forma:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (78)$$

Geralmente os materiais hiperelásticos são considerados incompressíveis fazendo com que  $I_3 = 1$ .

### **Modelo de Mooney-Rivlin**

O modelo de *Mooney-Rivlin* é um dos pioneiros para descrever o comportamento de materiais hiperelásticos. Ele comumente é usado para descrever o comportamento de materiais isotrópicos incompressíveis (FRANCISCO; AMARAL, 2018). Sua fórmula é descrita por:

$$U = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (79)$$

Onde  $C_1$  e  $C_2$  são constantes do material e podem ser determinados por ajuste de curva da carga de deformação. Esse modelo funciona bem para deformações relativamente grandes de alongamento uniaxial (até 150%-200%) e deformações de cisalhamento (SHAHZAD et al., 2015).

### **Modelo de Neo-Hookean**

Esse modelo é um caso especial do modelo de *Mooney-Rivlin*. Nesse modelo é considerado o valor de  $C_2 = 0$  na equação (79) ficando:

$$U = C_1(I_1 - 3) \quad (80)$$

O modelo de *Neo-Hookean* é ideal quando os dados são insuficientes e quando a deformação atinge uma magnitude (em comparação ao tamanho do corpo de prova) de até 100% (MONTEIRO, 2020). Uma outra vantagem é que esse modelo tem um processamento mais rápido na simulação numérica.

### **Modelo de Yeoh**

O método de *Yeoh* é usado para modelar várias formas de deformação com base apenas nos dados obtidos a partir do ensaio de tração uniaxial (FRANCISCO; AMARAL, 2018). Esse modelo é uma função polinomial de terceira ordem que depende apenas de  $I_1$ , ficando como:

$$U = \sum_{i=1}^3 C_1 (I_1 - 3)^i \quad (81)$$

Esse modelo funciona bem quando há uma quantidade limitada de dados e deformações maiores (300%). Assim como o modelo de *Neo-Hookean* o modelo de *Yeoh* possui a vantagem de ter um processamento mais rápido na simulação matemática em relação aos outros modelos.

### Modelo de *Ogden*

O método de *Ogden* é um modelo que é baseado nos alongamentos ( $\lambda_i$ ) ao invés das invariantes de deformação ( $I_i$ ) sendo descrito da seguinte forma:

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (82)$$

No qual  $\mu_i$  e  $\alpha_i$  são constantes do material e  $N$  é o número de termos na série ( $N = 1, 2$  ou  $3$ ). Esse modelo apresenta a vantagem de possuir a maior faixa de trabalho de deformação (de 0-700%) só tendo atenção que esse modelo exige que se tenha um grande número de dados (SHAHZAD et al., 2015).

### Modelo de *Arruda-Boyce*

Esse modelo leva em conta o comportamento microestrutural do elastômero. Também conhecido com *eight-chain model* já que ele considera que o modelo assume que as macromoléculas (cadeias poliméricas) se posicionam ao longo da diagonal de uma célula unitária localizada no vetor de deformação principal (VIEIRA; LEAL; SILVEIRA, 2010). A função de energia fica:

$$U = \mu \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (83)$$

No qual  $\mu$  é obtido pela equação química:  $\mu = \eta \kappa_B T$  e  $\kappa_B$  é a constante de Boltzmann,  $\eta$  é uma função de densidade de cadeias elastoméricas e  $T$  a temperatura. Fisicamente  $\lambda_L$  representa o alongamento máximo que uma molécula atinge (*limiting network stretch*) e é obtido através de uma análise micromecânica. Assim como o modelo de *Yeoh* o modelo de *Arruda-Boyce* funciona bem com um número limitado de dados e deformações maiores (300%), porém seu processamento da simulação é maior.

## 4 METODOLOGIA

Nessa seção será abordado todo o processo para a realização desse trabalho. Na primeira parte será demonstrado o processo para a caracterização do filamento para a impressão 3D. Na segunda parte será demonstrado todo o processo para a realização da análise por elemento finito das estruturas analisadas nesse estudo.

### 4.1 Caracterização do Filamento

No primeiro momento realizou-se a caracterização do filamento usado nesse estudo. Foi utilizado o filamento PLA-flex® da 3DLAB (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021) que é um filamento a base de TPU com mistura de PLA.

Na literatura não é encontrado muito sobre esse tipo de mistura. Recentemente Nofar, Mohammadi e Carreau (2020) publicaram um trabalho avaliando misturas de TPU em PLA de diferentes graduações de dureza. No entanto nesse estudo a mistura tinha 85% de PLA e 15% de TPU. No atual trabalho o filamento tem sua base o polímero TPU.

Para definir a porcentagem de cada um dos polímeros na composição do filamento PLA-flex® foi utilizado a regra da mistura de compósitos. A regra da mistura define que é possível calcular a fração volumétrica de cada um dos componentes que formam o compósito. Para esse caso será usado o módulo de Young através da equação (84):

$$E_c = E_m V_m + E_d V_d \quad (84)$$

No qual:

$E_c$  = Módulo de Young do compósito (nesse caso PLA-flex®)

$E_m$  = Módulo de Young da matriz (nesse caso TPU)

$E_d$  = Módulo de Young da fase dispersa (nesse caso PLA)

$V_m$  = Fração volumétrica da matriz

$V_d$  = Fração volumétrica da fase dispersa

Obtendo os valores dos módulos de Young dos três materiais através da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2019, 2020, 2021) tem-se:

$$E_c = 400 \text{ MPa}$$

$$E_m = 120 \text{ MPa}$$

$$E_d = 1896 \text{ MPa}$$

Usando a equação (84) e considerando  $V_d = 1 - V_m$  é possível encontrar os seguintes valores para as frações volumétricas que compõem o filamento PLA-flex®:

$$V_m = 0,1577 = 15,77\% \text{ (PLA)}$$

$$V_d = 0,8423 = 84,23\% \text{ (TPU)}$$

A seguir foram feitos os ensaios de tração e compressão dos corpos de prova impressos do filamento PLA-Flex®.

#### **4.1.1 Ensaios mecânicos**

Os ensaios de tração foram feitos de acordo com a norma ASTM-D638-14 (2014) e os ensaios de compressão foram feitos de acordo com a norma ASTM D695-15 (2008). Para a impressão, análise dos corpos de prova e ensaios mecânicos foram seguidos os seguintes passos:

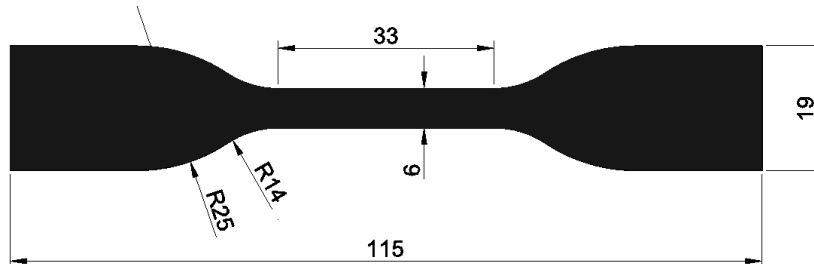
- Modelagem Geométrica;
- Parâmetros de impressão e fatiamento dos corpos de prova;
- Impressão 3D por FFF;
- Medição dos corpos de prova;
- Ensaios de tração e compressão;
- Análise estatística.

#### **Modelagem Geométrica**

De acordo com a norma ASTM D638-14 (2014) o tipo de corpo de prova para materiais plásticos não rígidos deve ser o tipo IV. Os parâmetros geométricos são demonstrados na

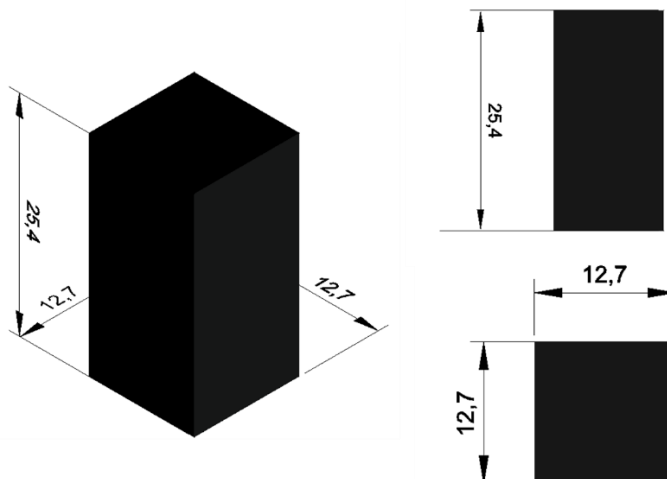
**Figura 29.** Além desses parâmetros, a norma especifica que a espessura do corpo de prova deve ser menor ou igual a 4mm. Por esse motivo, o valor de 4mm foi escolhido para maximizar o volume da região do pescoço.

**Figura 29:** Parâmetros geométricos do corpo de prova de tração. Valores em milímetros.



No caso da norma para o ensaio de compressão ASTM D695-15 (2008) o corpo de prova é no formato de um paralelepípedo. Os parâmetros geométricos podem ser vistos na **Figura 30**.

**Figura 30:** Parâmetros geométricos do corpo de prova de compressão. Visas isométrica, de topo e de frente. Valores em milímetros.

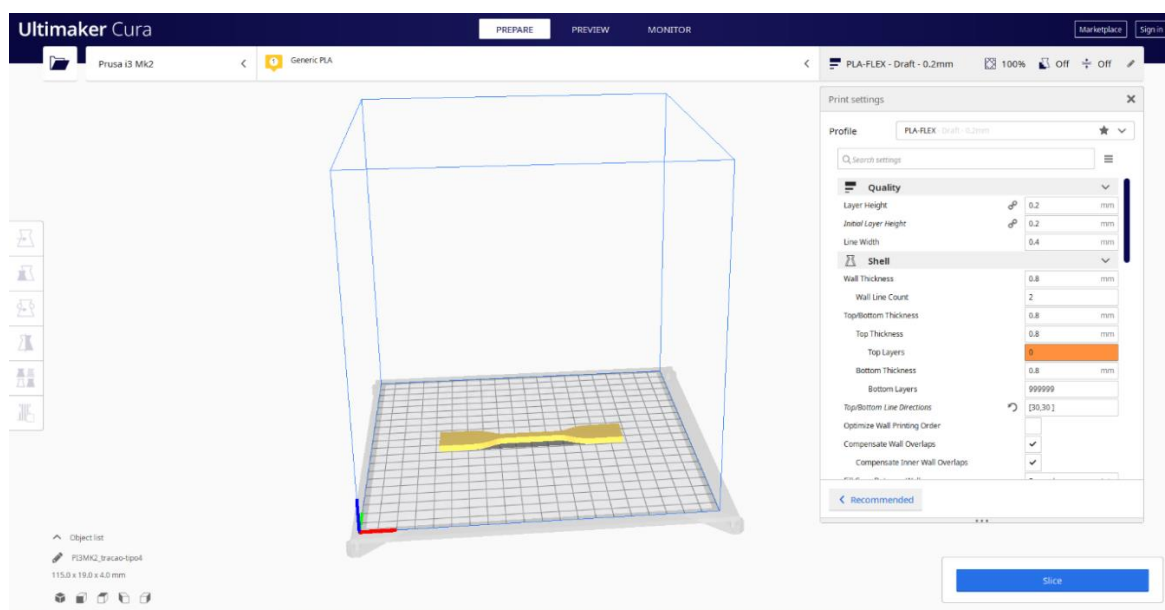


Os desenhos das peças foram feitos utilizando o *software* Autodesk® AutoCAD® 2020 versão estudante.

## Parâmetros de impressão e fatiamento dos corpos de prova

Após a realização do desenho o arquivo foi salvo em formato .stl para seguir para o fatiador onde foram definidos os parâmetros de impressão da peça. O *software* utilizado nesse trabalho para o fatiamento da peça foi o Ultimaker Cura v.4.6.1, um *software* de licença livre. Foi selecionado esse software pelo custo e sua interface amigável. Na **Figura 31** tem-se a imagem do fatiador.

**Figura 31:** Tela capturada do fatiador Ultimaker Cura.



Os parâmetros de impressão utilizados nesse trabalho estão detalhados no **Quadro 1**.

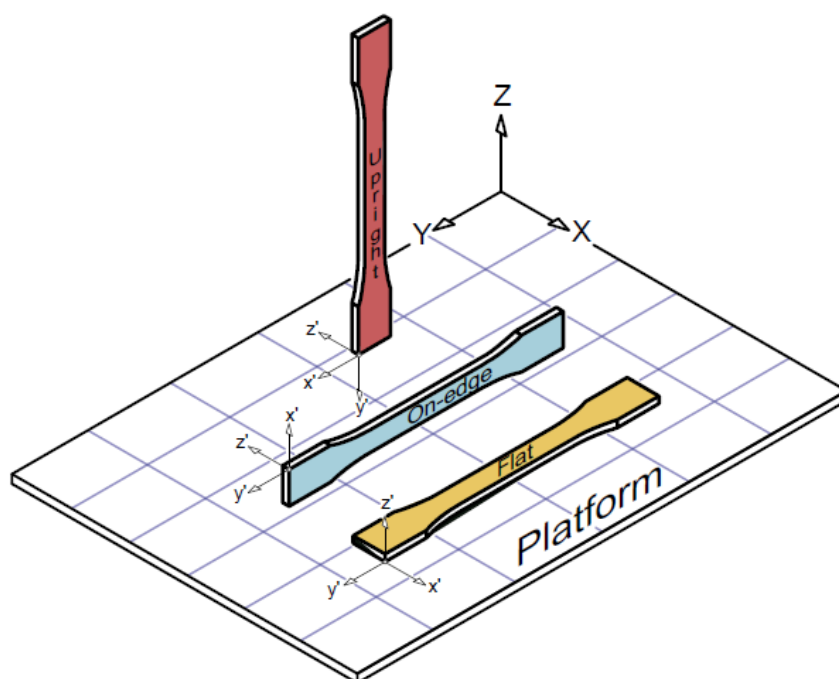
**Quadro 1:** Parâmetros de impressão dos corpos de prova

Orientação de impressão	Plana na superfície
Altura de camada	0,2 mm
Espessura da parede	0,8mm
Velocidade de impressão	30mm/s
Preenchimento	100%
Orientação de deposição das camadas (tração)	0°,30°,45°, 60°,90°,0°/90°, ±30°, ±45° e ±60°
Orientação de deposição das camadas (compressão)	0° e 90°
Retração	Desabilitada
Diâmetro do bico	0,4mm
Temperatura do bico	245°C
Temperatura da mesa	60°C



Para esse estudo a orientação de impressão escolhida foi a plana na superfície (*flat* **Figura 32**). Apesar de estudos demonstrarem (CHACÓN et al., 2017) que a melhor orientação é a de quina (*on-edge* **Figura 32**), para esse estudo a orientação plana faz mais sentido já que todas as peças de metamateriais analisadas foram impressas na orientação plana. No caso do corpo de prova de compressão, por ser um paralelepípedo, a orientação de impressão plana e de quina são as mesmas.

**Figura 32: Orientação de impressão.**



**Fonte: Adaptado de Chacón et al. (2017)**

O valor de altura de camada foi escolhido por ser um valor intermediário de 0,2mm já que para um bico de 0,4mm é aconselhável altura de camada entre 0,3 e 0,1mm. O valor de 0,3 diminui o tempo de impressão, porém resultando em espaços vazios entre camadas e uma piora nas propriedades mecânicas. No caso da camada de 0,1 o tempo de impressão aumenta consideravelmente e as propriedades mecânicas são as melhores para essa faixa de altura de camada (YAO et al., 2020). Um outro fator apontado por Samykano et al. (2019) é que uma altura de camada baixa resulta em um maior número de camadas. Como o material é depositado fundido a cada camada um número maior resulta em um grande gradiente de temperatura das camadas mais baixas até as que são depositadas por último. Esse fenômeno pode favorecer o surgimento de distorções ao longo da peça e comprometer as propriedades mecânicas. De forma a otimizar o processo e minimizar alguns dos efeitos negativos o valor de altura de camada de

0,2 foi selecionado já que proporciona um tempo bom de impressão, reduz a quantidade de espaços vazios entre camadas e reduz o gradiente de temperatura.

A espessura de parede foi mantida padrão do *software* do fatiador: 0,8mm. Ela serve como um contorno para sustentar a estrutura como um todo. Esse valor foi selecionado para manter uma parede que não iria interferir muito no preenchimento.

A velocidade de impressão é um parâmetro que depende da máquina e do material. O valor de 30 mm/s foi selecionado de acordo com o que é sugerido pelo fabricante do material, por ser uma velocidade dentro da faixa de trabalho da máquina e para gerar menor vibração durante o processo de impressão.

O preenchimento (*infill*) é um parâmetro que considera a porcentagem de material que é depositado no interior da peça impressa. O valor de 100% indica que a peça é maciça e sem espaço vazio no seu interior. Como foi demonstrado por Elmabet e Siegkas (2020), esse parâmetro está diretamente relacionado ao melhor desempenho mecânico da peça. Quanto maior o preenchimento, melhor serão as propriedades mecânicas.

A forma como a deposição de camada por camada é feita nas impressoras 3D FFF tornam as peças projetadas em um tipo de laminado. Sendo assim é importante avaliar a interação da orientação de deposição das camadas em relação as forças que serão aplicadas. Por isso nesse estudo foram selecionadas as orientações de 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 0°/90°, ±30°, ±45° e ±60° para os ensaios de tração e 0° e 90° para os de compressão. Esse parâmetro foi o selecionado para ser a variável nesse experimento de caracterização do material. Todos os outros parâmetros foram mantidos constantes.

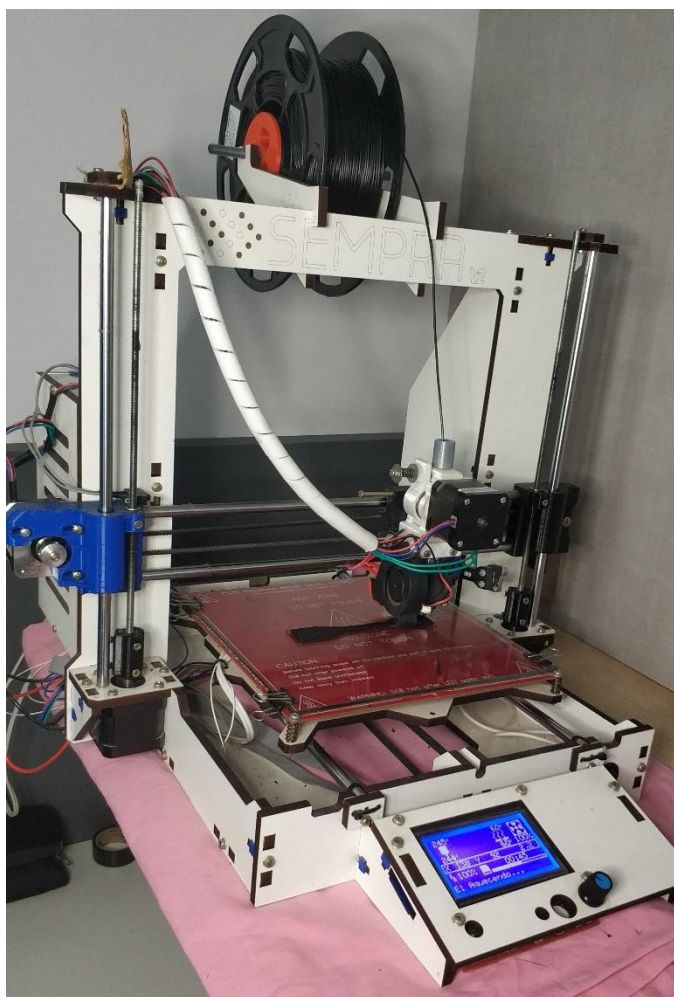
O parâmetro retração é uma função do *software* para evitar que o material plástico derretido escorra sobre a peça quando não estiver imprimindo. Esse parâmetro é aconselhado a estar desabilitado para os filamentos a base de TPU devido ao grande risco de fazer o filamento embolar ou/e entupir o bico durante o processo.

Os valores de temperatura do bico e de mesa de impressão são definidos pelo fabricante do material através de uma faixa de trabalho que pode variar para cada impressora utilizada. Para esse trabalho utilizou-se a temperatura de bico de 245°C e a temperatura de mesa de 60°C

## Impressão 3D por FFF

Todos os corpos de prova foram produzidos em uma impressora 3D desktop Grabber i3 (**Figura 33**). Essa impressora foi escolhida por ser uma impressora com seu projeto completo disponível livre na internet.

**Figura 33: Impressora 3D.**



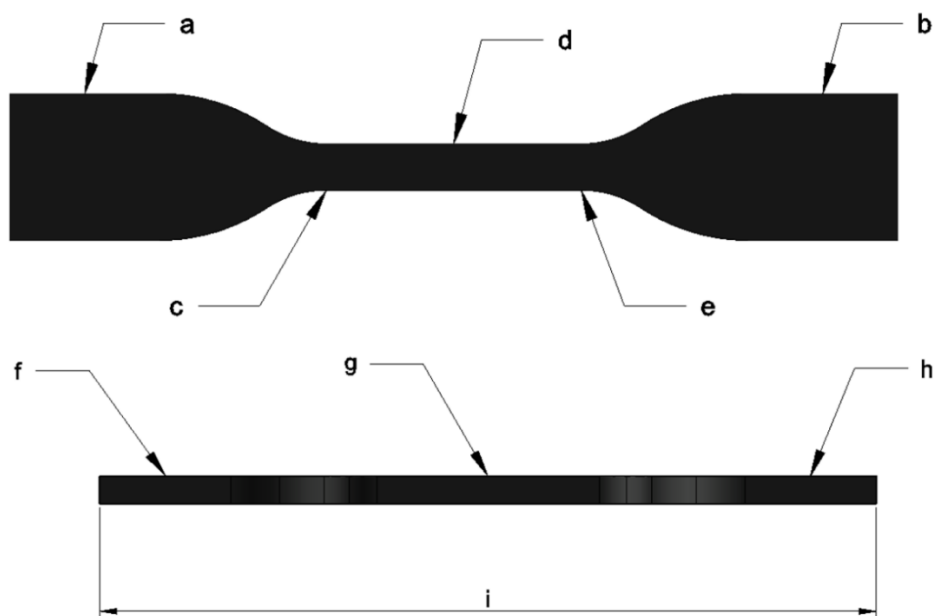
Para cada uma das configurações de orientação de camada foram impressos 6 corpos de prova. Como têm-se 10 orientações diferentes (9 de tração e 2 de compressão) no final foram feitos 66 corpos de prova.

## Medição dos corpos de prova

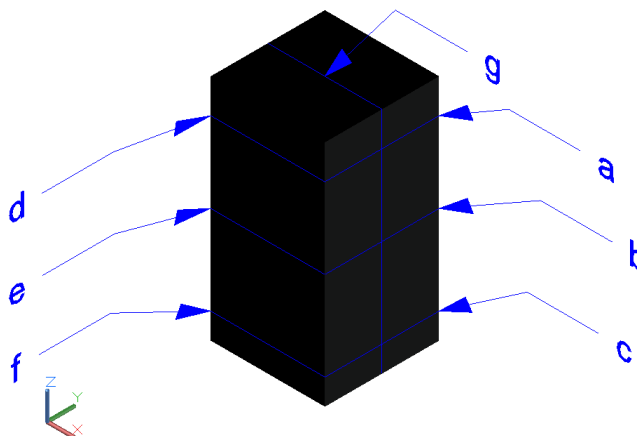
Nessa etapa foram realizadas as medidas e análises superficiais dos corpos de prova. Os dados de medidas serão usados para os ensaios mecânicos.

Para os grupos de tração cada corpo de prova foi medido em 8 pontos diferentes (**Figura 34**). Já os corpos de prova de compressão as medidas foram feitas em 7 pontos diferentes (**Figura 35**). As medidas foram feitas utilizando um paquímetro digital.

**Figura 34: Pontos de medição do corpo de prova de tração. Vista superior e lateral**



**Figura 35: Pontos de medição do corpo de prova de compressão.**



Essas medidas foram feitas em vários pontos de forma a encontrar o valor médio das dimensões dos corpos de prova, além de servir para analisar a precisão do processo de fabricação por impressão 3D.

## Ensaio de tração e compressão

Os ensaios de tração e compressão foram realizados em uma máquina Emic DL10000 (Figura 36).

**Figura 36: Máquina de ensaio mecânico Emic DL 10000**



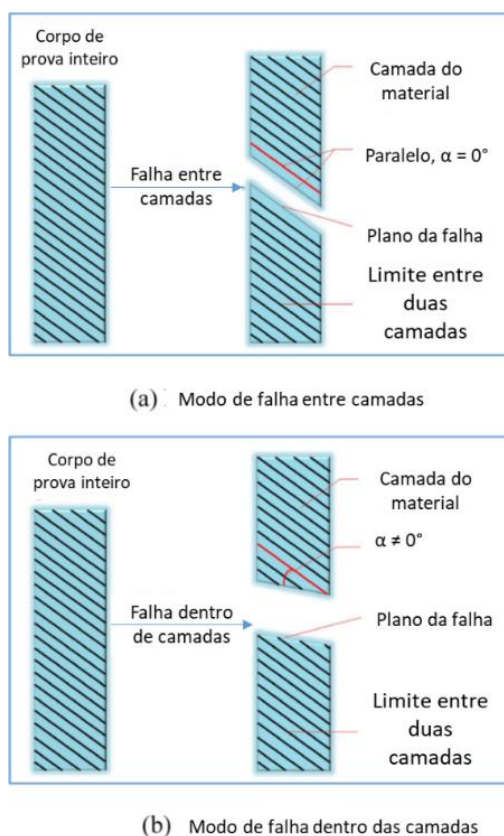
Para o ensaio de tração (ASTM-D638-14, 2014) foi utilizado uma velocidade de 50 mm/min durante todos os ensaios até a ruptura do corpo de prova. No caso do ensaio de compressão (ASTM D695-15, 2008) a velocidade de ensaio foi de 1,3 mm/min e foi definido um limite de deformação de 30% da altura do corpo de prova. Essa deformação de 30% se deve em função da limitação da célula de carga de compressão.

#### 4.1.2 Análise pós ensaio

Nessa etapa foi realizado uma análise estatística dos dados obtidos pelos ensaios mecânicos. O objetivo da análise estatística foi determinar se a orientação da deposição do filamento resulta em valores estatisticamente diferentes para as propriedades mecânicas do material. Os dados foram analisados utilizando o programa GraphPad Prism®8 por meio do teste estatístico Brown-Forsythe e Welch ANOVA e com T3 de Dunnett como pós-teste de comparação múltipla. A diferença foi considerada estatisticamente significativa quando  $p < 0,05$ . Esse teste e pós-teste foram selecionados já que os desvios padrões são diferentes entre cada grupo de corpo de prova analisado para cada propriedade mecânica.

Além disso uma análise visual foi conduzida para determinar os tipos de falhas encontrados para diferentes deposições. Como foi demonstrado por (YAO et al., 2020) é possível descrever dois tipos de falhas para os corpos de prova de tração: entre camadas ou através das camadas. Esse efeito pode ser visto na **Figura 37**.

**Figura 37: Ilustração de modos de falhas dos corpos de tração: a) falha entre camadas e b) através das camadas.**



Fonte: Adaptado de Yao et al. 2020.

Uma falha entre camadas ocorre quando a ruptura surge no limite entre duas camadas de materiais e essa camada de materiais se mantém intacta depois da falha, dessa forma o ângulo  $\alpha$  entre a superfície da falha e a camada do material é igual a  $0^\circ$ . Uma falha através de camadas ocorre quando a camada de material se quebra e o ângulo  $\alpha$  entre a superfície da falha e a quebra da camada de material é diferente de  $0^\circ$ .

## 4.2 Análise de tensões via elementos finitos.

As análises numéricas foram feitas no software ANSYS® v18.1 Workbench, realizando análise estrutural estática. Nessa seção serão discutidas as etapas percorridas para estabelecer as condições de montagem da simulação. Os passos descritos aqui estarão na mesma ordem utilizada no software.

As análises de tensão por elementos finitos foram divididas em duas partes: análise de compressão e análise de tração. Para as análises de compressão foram feitas as simulações com as seguintes configurações de metamateriais: *honeycomb* (Masters e Evans, 1996), *re-entrant* (Masters e Evans, 1996), *AuxHex* (Xu et al., 2019) e *cross-chiral* (Lu et al., 2017). Para as análises de tração foram feitas as simulações com os *kirigamis* de cortes lineares (Isobe e Okumura, 2016 e Shyu et al., 2015) e cortes ortogonais (Rafsanjani e Bertoldi, 2017).

### 4.2.1 Propriedades do material

A partir dos dados gerados nos ensaios mecânicos é possível obter as propriedades hiperelásticas do material PLA-flex®. Os dados do ensaio de tração são carregados no software e foi selecionado o modelo de *Mooney-Rivlin* de 5º ordem. Com o ajuste de curva foi possível obter as propriedades hiperelásticas do material.

### 4.2.2 Modelos geométricos

Os desenhos de todas as estruturas metamateriais foram feitos utilizando o software Autodesk® AutoCAD® 2020 versão estudante.

As estruturas sujeitas a esforços de compressão (*honeycomb*, *re-entrant*, *AuxHex* e *cross-chiral*) possuem espessuras de parede de 0,8 milímetros. Foi definido esse valor já

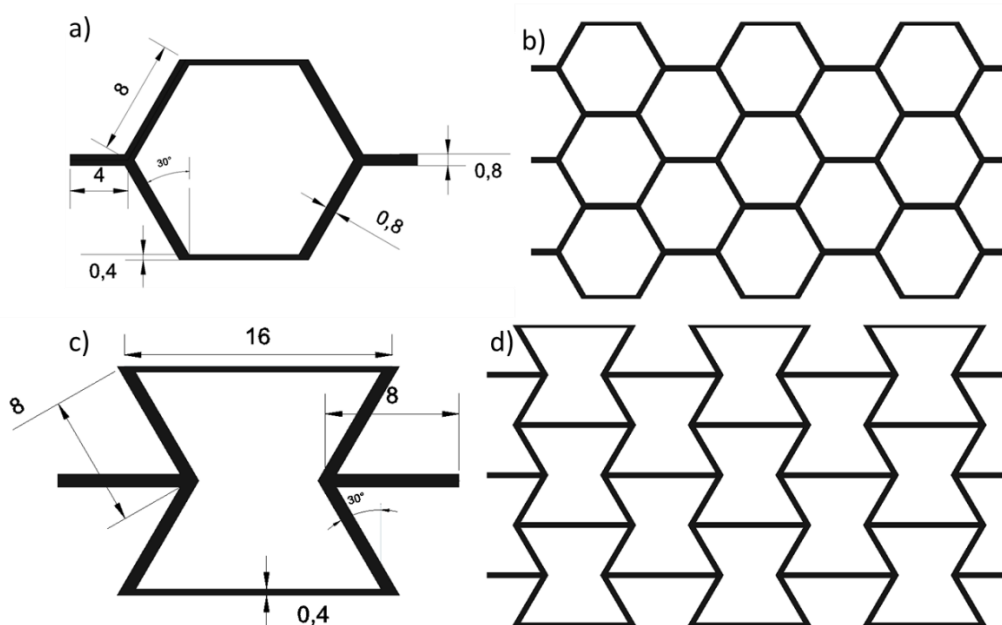
considerando o processo de fabricação por impressora 3D FFF. Por padrão esse tipo de impressora é comercializado com um bico de extrusão de diâmetro de 0,4 milímetros, sendo assim, foi definido um valor múltiplo desse valor de diâmetro. Além disso para as espessuras de profundidade foram escolhidas o valor de 10 milímetros.

No caso das estruturas em *kirigami* que sofreram esforços de tração, foram definidos os comprimentos de corte de 1 milímetro. De acordo com Nakajima, Fayazbakhsh e Teshima, (2020) esse é o valor mínimo para esses tipos de impressora, de maneira que os cortes não unem e se forma um junção impedindo a separação dos mesmos.

### Honeycomb e Re-entrant

Essas geometrias foram baseadas no estudo de Masters e Evans, (1996). Seus parâmetros geométricos são demonstrados na **Figura 38**.

**Figura 38:** a) Célula unitária *honeycomb* e seus parâmetros geométricos; b) Estrutura *honeycomb* 3x3; c) Célula unitária *re-entrant* e seus parâmetros geométricos; d) Estrutura *re-entrant* 3x3. Todas as unidades em milímetros.



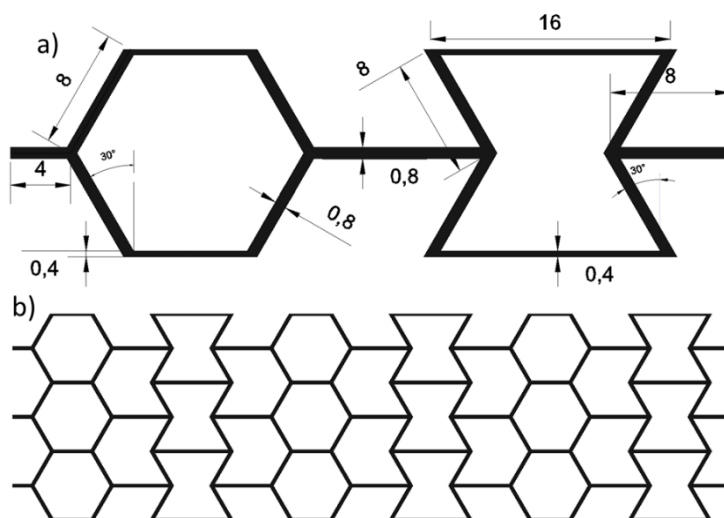


## AuxHex

A estrutura *AuxHex* é baseada no trabalho de Xu et al. (2019). Seus parâmetros são vistos na **Figura 39** com as células unitárias e as estruturas completas.

**Figura 39:** a) Célula unitária *AuxHex* e seus parâmetros geométricos; b) Estrutura *AuxHex* 3x10.

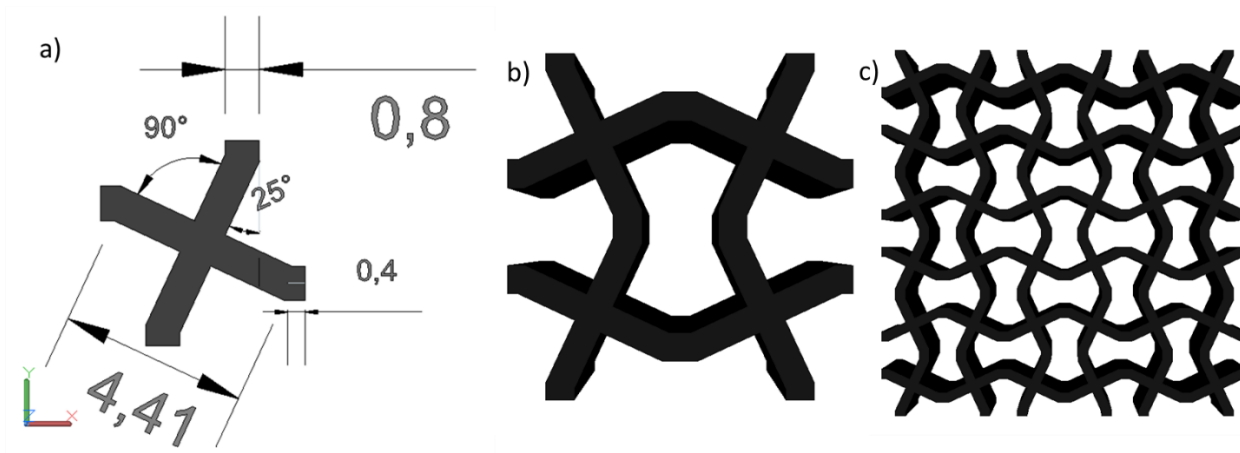
Todas as unidades em milímetros.



## Cross-chiral

A estrutura *cross-chiral* é baseada no trabalho de Lu et al. (2017). A **Figura 40** ilustra a geometria desse metamaterial.

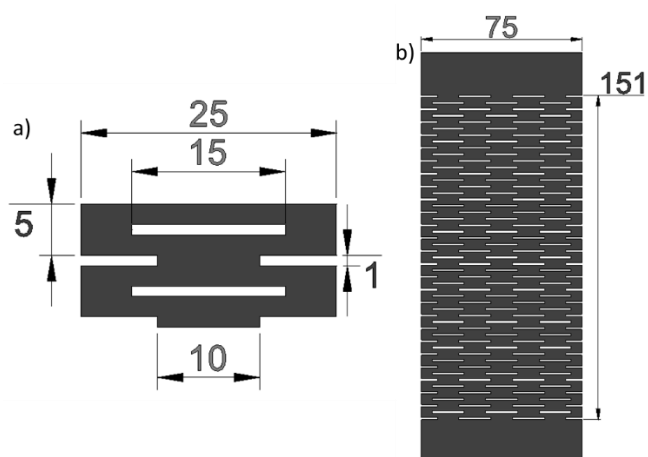
**Figura 40:** a) Célula unitária *cross-chiral* e seus parâmetros geométricos; b) estrutura *cross-chiral* completa; c) Estrutura *cross-chiral* 3x3. Todas as unidades em milímetros.



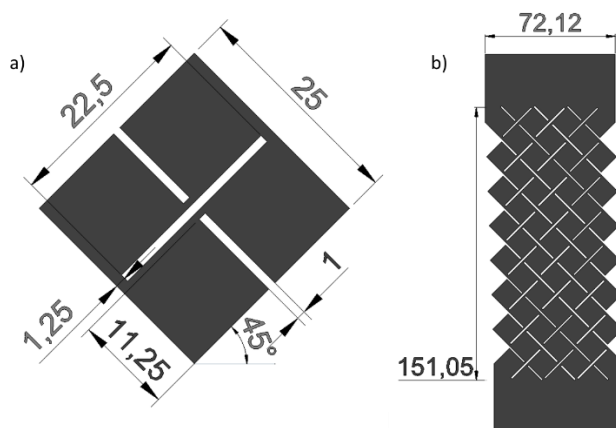
## Kirigami

As estruturas *Kirigami* foram divididas em padrões de cortes lineares (**Figura 41**) e de cortes ortogonais (**Figura 40**). *Kirigami* lineares foram baseados nos trabalhos de Isobe e Okumura (2016) e Shyu et al. (2015) e os *Kirigami* ortogonais foram baseados nos trabalhos de Rafsanjani e Bertoldi (2017). A seguir os parâmetros geométricos de cada tipo de *kirigami* são apresentados. Todas as espessuras de profundidade foram escolhidas o valor de 2 milímetros. Além disso as larguras e comprimento das estruturas completas foram selecionadas para terem valores próximos, exatamente para se ter uma avaliação similar e comparações adequadas em relação aos seus respectivos desempenhos.

**Figura 41:** a) Célula unitária do padrão linear; b) Estrutura *kirigami* 3x25. Todas as unidades em milímetros.



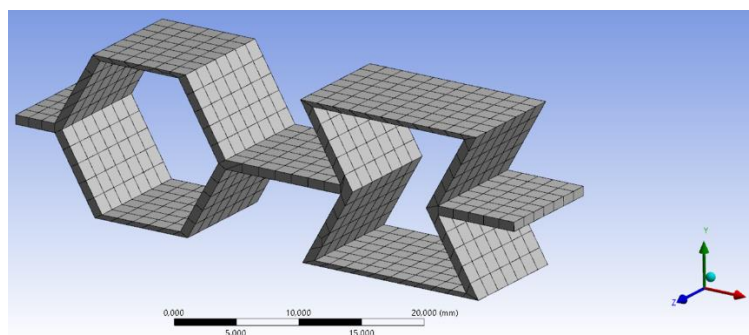
**Figura 42:** a) Célula unitária do padrão ortogonal; b) Estrutura *kirigami* 3x8. Todas as unidades em milímetros.



### 4.2.3 Geração da Malha

Para as estruturas sujeitas a esforços de compressão, a geração de malha foi baseada no trabalho de Wang et al. (2018b). Os elementos de malha foram quadráticos hexaédricos tamanho  $L/5$ , sendo  $L$  o comprimento lateral de cada geometria (**Figura 43**). Em seu estudo, Wang et al. (2018b) demonstrou que esse tipo de malha representa um balanço ideal entre tempo de processamento e qualidade dos resultados da simulação numérica para estruturas auxéticas. Assim sendo, essa metodologia foi adotada para o presente estudo. A **Tabela 1** demonstra o número de elementos e os graus de liberdade (DOF) para cada configuração.

**Figura 43: Exemplo de malha de elementos finitos utilizado nesse estudo.**



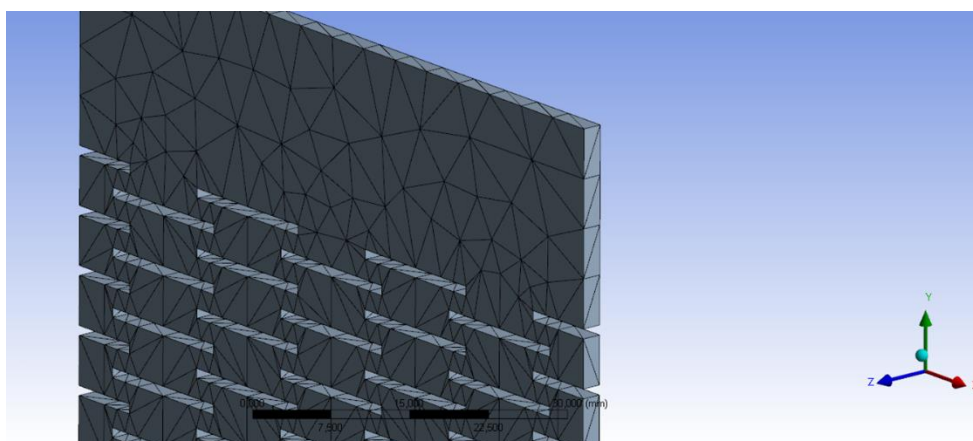
**Tabela 1: Número de elementos e de graus de liberdade (DOF) em cada uma das estruturas da análise de compressão.**

Geometria		Nº elementos	DOF
<i>Honeycomb</i>	Célula Unitária	294	882
	3x3	2289	6867
<i>Re-entrant</i>	Célula Unitária	406	1218
	3x3	3150	9450
<i>AuxHex</i>	Célula Unitária	686	2058
	3x3	5467	16401
<i>Cross-chiral</i>	Célula Unitária	1332	3996
	3x3	7488	22464

Para as estruturas sujeitas a esforços de tração foi feito de modo diferente. Ao primeiro momento tentou-se realizar a simulação com o mesmo tipo de malha usado acima, porém essa

metodologia não funcionou para as estruturas *kirigami*. Essas estruturas necessitavam de uma malha mais refinada devido as várias aristas internas geradas pelos cortes. Pensando nisso foi selecionado elementos do tipo tetraédricos para essas estruturas ao invés das quadráticas hexaédricas. Esse tipo de elemento possibilitou a realização da simulação e a análise mais precisa para as regiões de corte da estrutura. A seguir a **Figura 44** mostrando o exemplo da malha utilizada e a **Tabela 2** demonstrando o número de elementos e nós de cada estrutura.

**Figura 44: Elementos finitos tetraédricos para as estruturas *kirigami*.**



**Tabela 2: Número de elementos e graus de liberdade (DOF) em cada uma das estruturas da análise de tração.**

Geometria	Nº de elementos	DOF
Cortes lineares	10566	31698
Cortes ortogonais	6815	20445

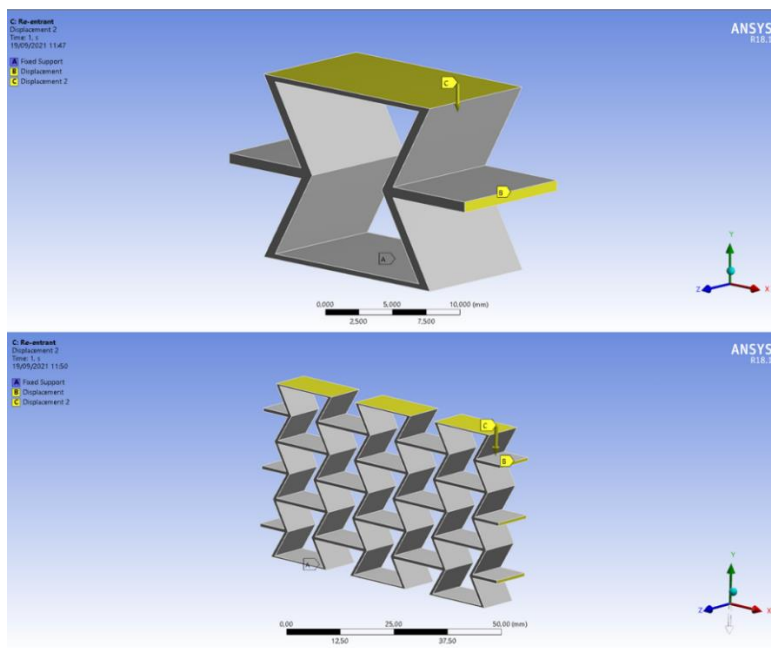
#### 4.2.4 Condições de contorno

Assim como a geração de malha as condições de contorno foram diferentes para as estruturas sujeitas à compressão e aquelas sujeitas à tração.

Para os metamateriais sujeitos a esforços de compressão a metodologia também foi baseada no trabalho de Wang et al. (2018b). Nessa metodologia para as estruturas unitárias, quanto as estruturas 3x3, foi definido suporte fixo na parte inferior e um deslocamento nulo na direção Y nas hastes laterais. Deslocamentos de compressão (sentido -Y) foram aplicados nas partes superior com valores de 0,05, 0,1, 0,5, 1 e 2 mm. A **Figura 45** demonstra essas condições de contorno aplicadas na geometria. Ponto A (face inferior) representa suporte fixo, ponto B

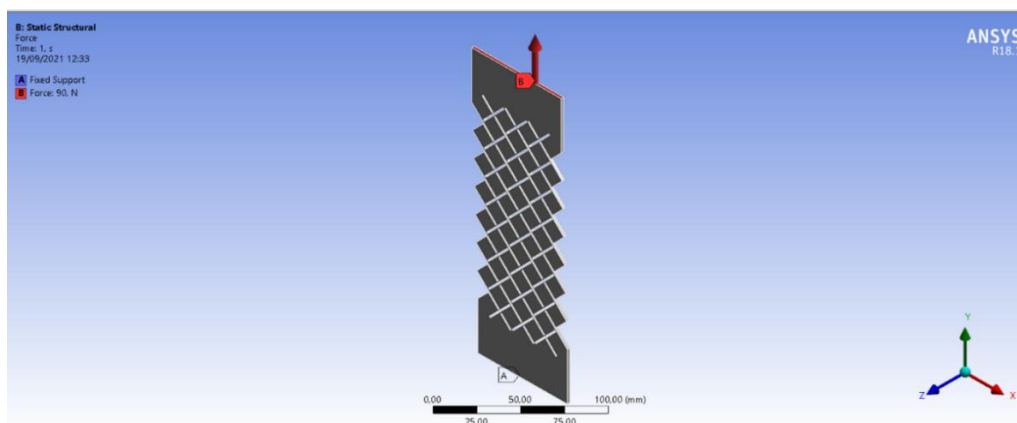
(face lateral) representa deslocamento nulo na direção Y e ponto C (face superior) deslocamento variável de compressão aplicado.

**Figura 45: Imagem superior exemplo de célula unitária e imagem inferior estrutura 3x3. Faces amarelas onde as condições de contorno são aplicadas**



Nas estruturas sujeitas a esforços de tração a análise foram diferentes. Nesse caso não foi realizado uma simulação para as células unitárias. O objetivo foi comparar o comportamento das estruturas completas, de forma a avaliar seus resultados e determinar aquele que tiver melhor resposta para a mesma área útil da estrutura (nesse caso as respostas avaliadas são maior alongamento e tensão de ruptura). Foi definido um suporte fixo na face inferior (ponto A) e uma força de tração variada no sentido +Y (ponto B) como é mostrado na **Figura 46**.

**Figura 46: Demonstrativo das condições de contorno para as estruturas kirigami.**



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Processo de fabricação

Nessa seção serão descritos alguns dos defeitos de fabricação encontrados nesse trabalho. Esses defeitos são comuns em impressoras do tipo FFF e as possíveis soluções para esses problemas serão discutidas.

Os valores medidos das dimensões dos corpos de prova podem ser encontrados no Apêndice A1. Interessante notar que os valores medidos são em sua maioria abaixo dos valores estipulados no desenho CAD do corpo de prova. Essa variação pode ser vista na **Tabela 3** para os corpos de prova de compressão e na **Tabela 4** para os corpos de prova de tração. As **Tabelas 3 e 4** representam as variações percentuais médias para cada orientação e cada tipo de corpo de prova.

A variação negativa é resultado da contração térmica, como foi demonstrado por Dilberoglu, Simsek e Yaman (2019). Essa contração térmica já é esperada devido ao processo de fabricação por impressão 3D FFF e pelas propriedades térmicas dos polímeros. Segundo Maurya, Rastogi e Singh (2019), o fato da impressão FFF gerar pequenos espaços vazios na peça impressa no qual favorecem essa contração. Valores positivos de variação da medida estão associados à precisão dos motores de passo que realizam o deslocamento nas três direções ou escoamento não linear do material. O erro dimensional da máquina está em torno de  $\pm 0,1$  mm. Interessante notar que as variações positivas acontecem na parte útil do corpo de tração e no corpo de compressão como um todo. Devido ao fato do equipamento utilizado ser uma impressora sem isolamento térmico, os resfriamentos dessas regiões aconteceram de forma que os espaços vazios são solidificados e permanecem na peça. Resultando em menor contração em relação as regiões de garra, espessura e comprimento do corpo de prova de tração. Para esses casos a contração ocorre de forma mais significativa já que seu resfriamento possibilita o fechamento dos poros gerados.

Um outro desafio no processo de fabricação são os erros de impressão. São diversos tipos que podem acontecer e suas causas variam desde erros de calibração, configurações inadequadas de parâmetros, não homogeneidade do filamento utilizado e problemas do

equipamento. Em seu trabalho Song e Telenko (2017) citam os tipos de falhas mais comuns nas impressoras 3D FFF: Material não utilizado, erro de aquecimento e/ou resfriamento da base de impressão, erro de projeto, deslocamento de camada, remoção de material suporte, falha de extrusão e erro de calibração na primeira camada. Esses erros resultam em perda de material, tempo e energia. Aqui serão tratados os erros de extrusão e calibração da primeira camada, no qual foram os erros que aconteceram durante a realização desse trabalho. Além disso serão tratados as possíveis causas, soluções adotadas e sugestões de melhorias para esses problemas.

Tabela 3: Variações em porcentagem (%)  $\pm$  desvio padrão (DP) da medida por unidade de comprimento para diversas orientações dos corpos de tração. As posições são definidas de acordo com a Figura 34 desse trabalho.

Orientação/ Região medida		Região da garra esquerdo	Região da garra direito	Região parte útil esquerda	Região parte útil meio	Região parte útil direita	Espessura	Comprimento
<b>Orientação 0</b>	%	-3,38	-3,45	0,41	0,28	0,66	-1,81	-0,62
	DP	0,745	0,564	0,180	0,307	0,425	1,651	0,054
<b>Orientação 30</b>	%	-3,95	-3,68	-0,10	-0,39	-0,31	-3,19	-0,60
	DP	0,527	0,494	0,743	0,785	0,471	2,937	0,040
<b>Orientação 45</b>	%	-4,48	-4,02	-0,15	0,09	-0,10	-1,86	-0,66
	DP	0,313	0,833	1,078	0,966	1,163	2,042	0,104
<b>Orientação 60</b>	%	-4,46	-3,35	-0,04	-0,32	0,02	-2,84	-0,60
	DP	0,159	0,749	0,559	0,393	0,576	2,054	0,107
<b>Orientação 90</b>	%	-4,17	-3,66	0,02	0,07	0,43	-0,55	-0,64
	DP	0,726	0,960	0,475	0,486	0,264	2,152	0,116
<b>Orientação 0-90</b>	%	-4,48	-3,58	0,01	-0,41	-0,15	-3,16	-0,61
	DP	0,361	0,447	0,796	0,369	0,439	1,194	0,039
<b>Orientação 30-30</b>	%	-4,40	-4,04	0,23	0,21	0,34	-3,77	-0,77
	DP	0,127	0,302	0,519	0,505	0,532	2,596	0,032
<b>Orientação 45-45</b>	%	-4,65	-4,35	0,43	-0,10	0,26	-0,14	-0,80
	DP	0,263	0,307	0,846	0,932	0,927	2,120	0,070
<b>Orientação 60-60</b>	%	-4,14	-4,48	-0,33	-0,50	-0,44	-0,32	-0,87
	DP	0,547	0,609	0,665	0,573	0,838	1,883	0,058



**Tabela 4: Variações em porcentagem (%)  $\pm$  desvio padrão (DP) da medida por unidade de comprimento para diversas orientações dos corpos de compressão. As posições dos eixos são definidas de acordo com a Figura 35 desse trabalho.**

Orientação		Largura eixo X	Espessura eixo Y	Comprimento eixo Z
Orientação 0°	%	1,38	1,14	1,41
	DP	0,240	1,005	0,743
Orientação 90°	%	0,58	0,04	0,52
	DP	0,997	0,801	0,371

### Falha na primeira camada

A primeira camada de deposição do filamento na superfície de aquecimento é crucial para uma boa impressão. Caso haja algum tipo de erro ou falha, depende do operador da impressora analisar como está sendo feita a deposição da primeira camada, fazer os ajustes ou reiniciar a impressão. Um problema muito comum encontrado nesse estudo foi falha de adesão da primeira camada. Para a impressão do filamento PLA-Flex® é recomendado pelo fabricante um espaço maior entre o bico e a mesa de deposição (valores entre 50% e 75% do valor do diâmetro do bico extrusor), de forma que haja a aderência, mas que também o filamento não esteja sendo prensado entre o bico e a base na primeira camada. Isso se deve ao fato que o filamento PLA-Flex® pode obstruir o bico extrusor durante a impressão, necessitando uma altura de camada apropriada. Nesse trabalho foi selecionado um valor de altura de camada de 0,2mm, porém a calibração de altura da máquina pode apresentar incertezas. Foram feitas alterações, na própria máquina, de  $\pm 0,05$ mm nessa distância entre o bico e a superfície de deposição para corrigir os erros e garantir uma deposição e aderência adequada da primeira camada. Dessa forma problemas como o ilustrado na **Figura 47** ocorreram durante o processo de fabricação. Isso ressalta a importância de uma boa calibragem do equipamento e o conhecimento do material no qual está trabalhando. Quando erros assim foram encontrados a impressão era interrompida, as devidas calibrações eram realizadas no eixo Z e uma nova impressão era iniciada. É sugerido que calibrações frequentes sejam feitas e a manutenção periódica das peças da máquina. Além disso, sensores de calibração e *firmware* atualizados são importantes para um nivelamento com maior precisão.

**Figura 47: Erro de adesão irregular da primeira camada.**



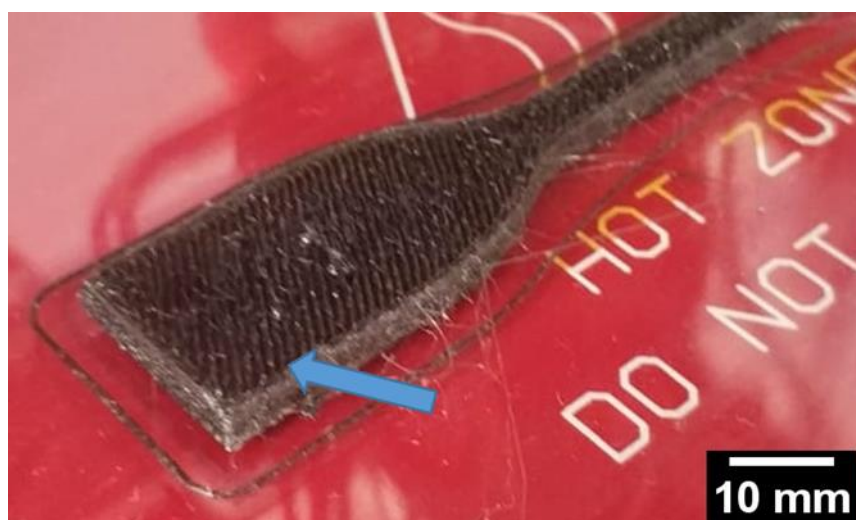
### **Falha de extrusão**

Como mencionado anteriormente, a impressão com PLA-Flex® pode favorecer a ocorrência de falhas do tipo obstrução do bico extrusor. Essa prospecção à obstrução do bico resulta em falhas de impressão do tipo mostrado na **Figura 48**. O material tem seu fluxo do bico extrusor obstruído e a deposição é interrompida. Quando isso ocorreu durante as impressões era necessário parar o processo, retirar o filamento do conjunto de extrusão, realizar a limpeza do bico e alimentar novamente o conjunto extrusor. Algumas formas de contornar esse problema são o aumento da temperatura de extrusão e/ou a redução de velocidade de impressão. No caso utilizou-se para esse estudo a maior temperatura de extrusão para esse filamento de acordo com o fabricante (3D LAB INDUSTRIA LTDA., 2021). Sendo assim, o conjunto extrusor poderia estar com uma taxa de calor por unidade de comprimento por segundo não otimizada, de forma que o calor necessário para o filamento se fundir nessa região e continuar o fluxo sem obstrução não está adequado para esse material. Uma solução adotada

foi o ajuste de velocidade de impressão. Velocidade menores podem compensar por essa taxa de aquecimento do conjunto extrusor.

Sendo assim o PLA-Flex® é um material de difícil manuseio. De 66 corpos de prova impressos (54 de tração e 12 de compressão) um total de 27 foram perdidos por conta dos erros citados acima. Isso demonstra uma taxa de erro em torno de 41%. Para o processo de fabricação por impressão 3D são importantes calibrações e manutenções constantes, uma máquina atualizada (tanto *hardware* e *firmware*) e conhecimento das especificidades do filamento utilizado. Dessa forma é possível a redução da taxa de erro e obter um processo de fabricação mais confiável.

**Figura 48:** Erro por entupimento do bico.



## 5.2 Ensaios mecânicos

### 5.2.1 Tração

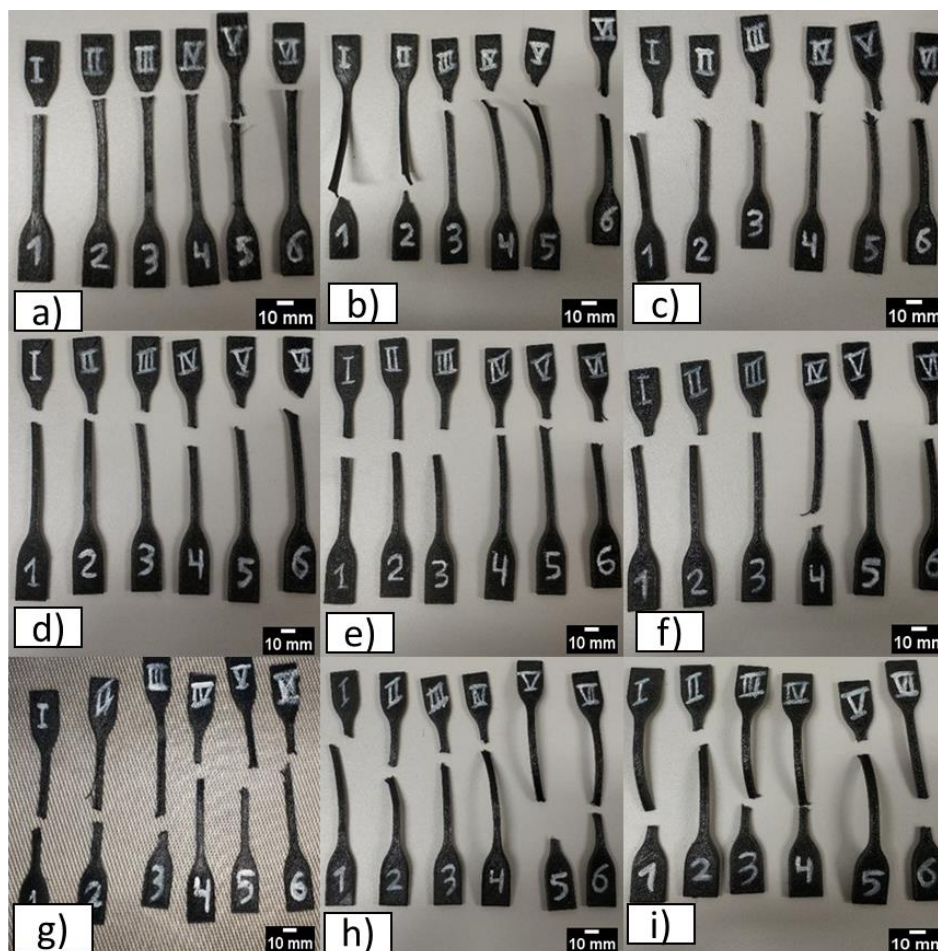
A partir das **Figuras 49 e 50** é possível ver um comparativo entre os corpos de prova antes e depois do ensaio de tração. Nota-se que após o ensaio de tração os corpos de prova mantêm parte do alongamento sofrido durante o teste.

Figura 49: Fotos dos corpos de prova antes do ensaio de tração nas diferentes orientações de deposição de camada. a) Orientação 0°; b) Orientação 30°; c) Orientação 45°; d) Orientação 60°; e) Orientação 90°; f) Orientação 0-90°; g) Orientação 30-30°; h) Orientação 45-45°; i) Orientação 60-60°.





**Figura 50:** Fotos dos corpos de prova após o ensaio de tração nas diferentes orientações de deposição de camada. a) Orientação 0°; b) Orientação 30°; c) Orientação 45°; d) Orientação 60°; e) Orientação 90°; f) Orientação 0-90°; g) Orientação 30-30°; h) Orientação 45-45°; i) Orientação 60-60°.



A **Tabela 5** mostra valores de variação de dimensão do comprimento. Os corpos de prova (CP) sofreram, após o teste, valores de deformação chegando a 32,12% de aumento do comprimento. Em alguns casos percebe-se que a falha ocorre perto da região de redução de seção do corpo de prova. Esse fenômeno acontece nas orientações de deposição no qual as camadas possuem todas as mesmas direções angulares (0°, 30°, 45°, 60° e 90°). Uma possível justificativa é que nessas regiões podem surgir espaços vazios deixados em cada camada de deposição. Esse fenômeno pode ser observado na **Figura 51** onde as regiões de vazio são vistas, especialmente perto das linhas de perímetro das camadas. Uma possível solução é a redução da velocidade de impressão, de forma a garantir uma deposição mais uniforme. Outra solução possível é aumentar a porcentagem da sobreposição da região de preenchimento interno nas linhas de perímetro. No software Ultimaker Cura® esse parâmetro é definido com um valor

padrão de 10% e um aumento para 20-25% resulta em uma maior adesão das camadas de preenchimento com as linhas de perímetro.

**Figura 51: Regiões de vazio ou falha de deposição encontrados nos corpos de prova de tração.**

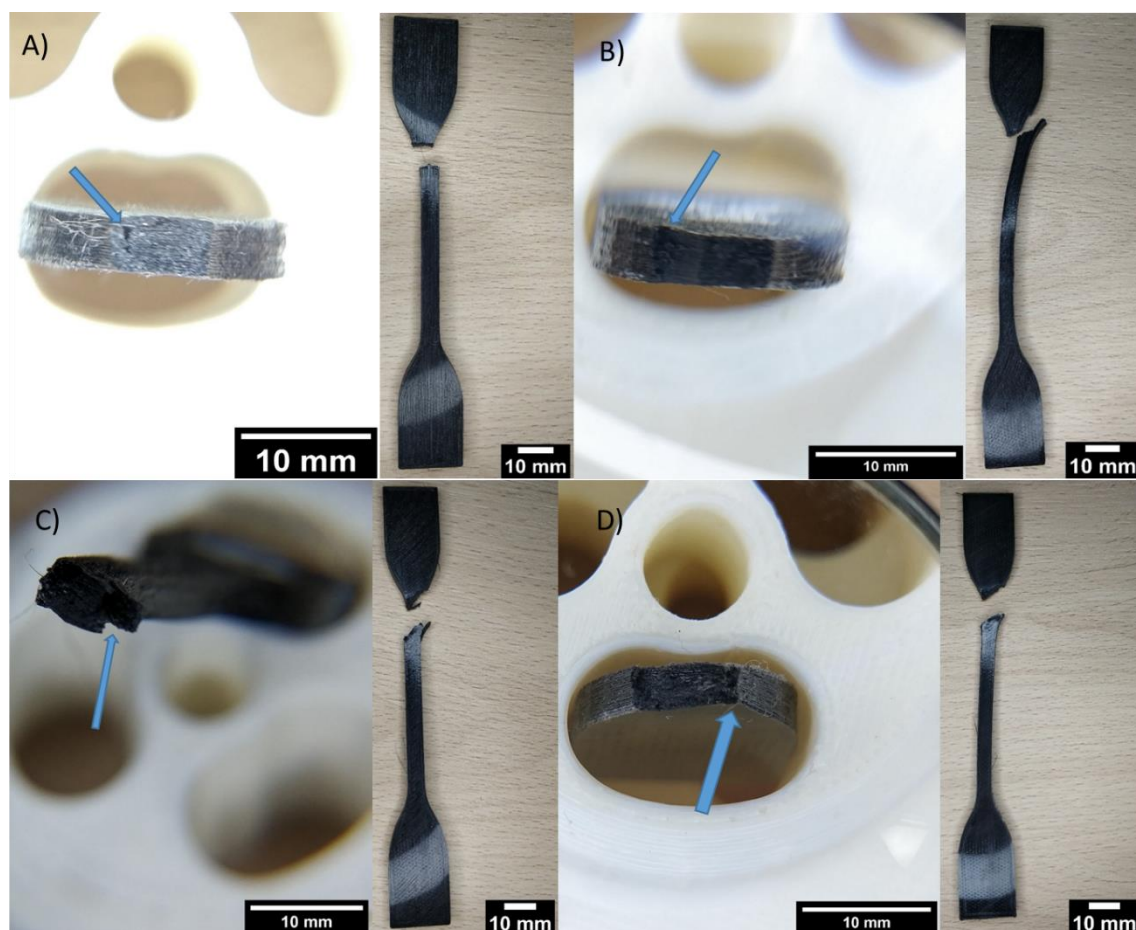


Tabela 5: Variação do comprimento dos corpos de prova após o teste de tração.

Orientação	Corpo de prova	Pré-teste (mm)	Teste (mm)	Pós-Teste (mm)	Variação após o teste (%)
0°	CP1	32,79	123,39	38,13	16,26
	CP2	32,78	160,53	40,65	23,99
	CP3	32,81	171,10	41,41	26,21
	CP4	32,81	172,76	41,15	25,41
	CP5	32,80	193,02	43,53	32,72
	CP6	32,77	159,85	40,49	23,56
30°	CP1	32,81	197,13	43,54	32,71
	CP2	32,80	165,06	40,94	24,80
	CP3	32,82	173,02	41,36	26,04
	CP4	32,80	189,28	42,34	29,08
	CP5	32,79	193,29	42,96	31,01
	CP6	32,78	174,63	41,59	26,88
4°	CP1	32,77	185,28	42,53	29,78
	CP2	32,79	176,09	37,28	13,69
	CP3	32,75	186,60	38,57	17,77
	CP4	32,79	134,67	41,63	26,96
	CP5	32,84	138,24	42,25	28,64
	CP6	32,75	122,27	38,29	16,90
60°	CP1	32,75	166,02	40,57	23,86
	CP2	32,75	170,71	41,19	25,76
	CP3	32,85	153,58	40,05	21,92
	CP4	32,77	142,33	38,89	18,67
	CP5	32,78	157,42	40,08	22,26
	CP6	32,79	144,51	39,56	20,65
90°	CP1	32,84	161,13	40,41	23,02
	CP2	32,80	177,83	42,01	28,09
	CP3	32,76	165,75	40,79	24,48
	CP4	32,81	178,35	41,53	26,57
	CP5	32,75	169,11	40,72	24,36
	CP6	32,78	128,20	37,84	15,42

Tabela 6: Variação do comprimento dos corpos de prova após o teste de tração. (continuação)

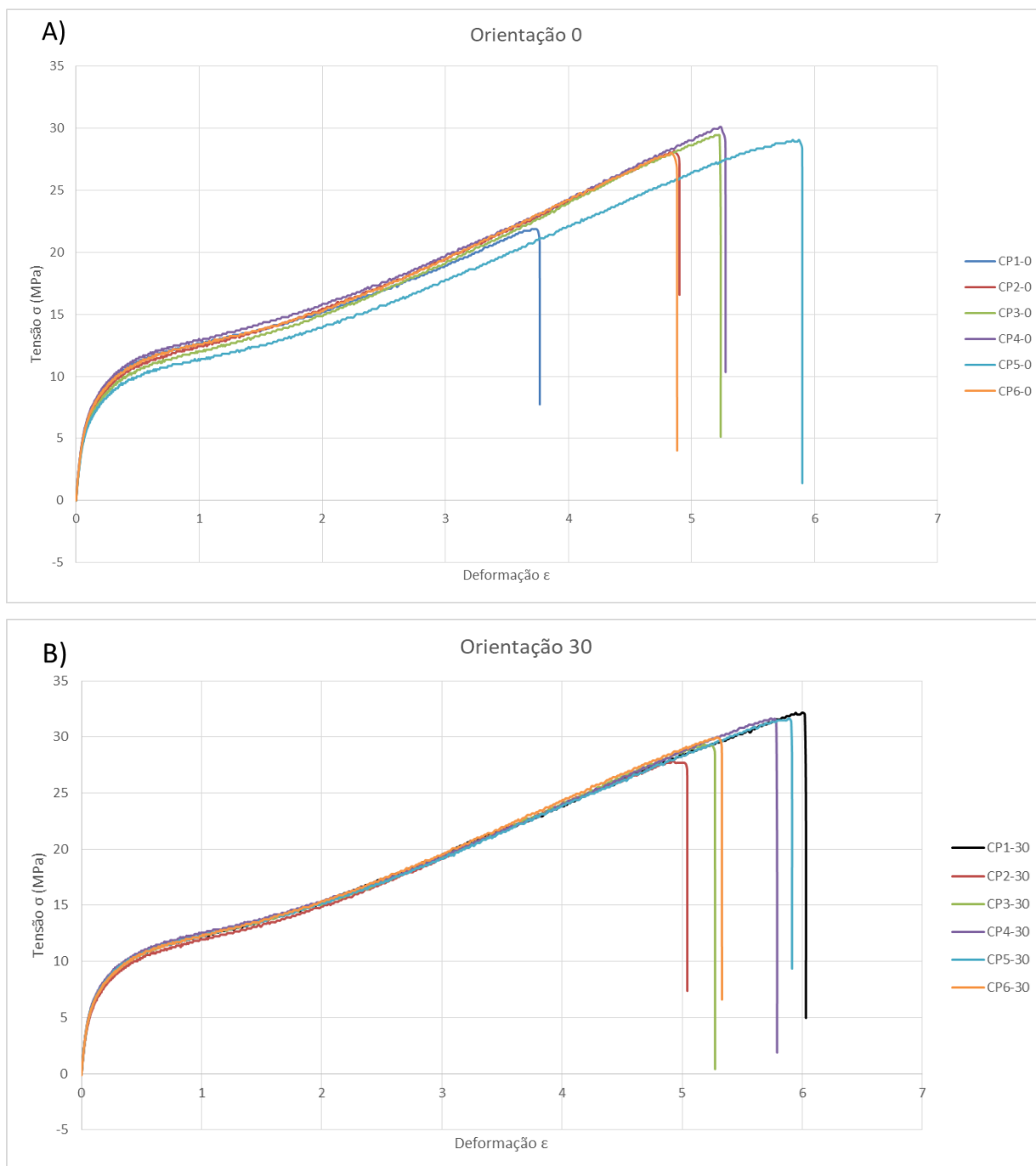
Orientação	Corpo de prova	Pré-teste (mm)	Teste (mm)	Pós-Teste (mm)	Variação após o teste (%)
<i>0-90°</i>	CP1	32,77	154,11	39,88	21,69
	CP2	32,75	166,59	40,99	25,14
	CP3	32,75	163,20	40,76	24,46
	CP4	32,78	170,37	41,35	26,14
	CP5	32,77	162,37	40,78	24,44
	CP6	32,75	167,38	41,25	25,94
<i>30-30°</i>	CP1	32,73	147,22	40,13	22,58
	CP2	32,72	161,43	37,02	13,14
	CP3	32,75	177,40	42,71	30,42
	CP4	32,76	162,44	41,32	26,12
	CP5	32,74	175,25	42,80	30,72
	CP6	32,75	140,25	39,71	21,26
<i>45-45°</i>	CP1	32,76	193,66	43,07	31,46
	CP2	32,71	189,45	42,70	30,56
	CP3	32,76	171,19	41,11	25,49
	CP4	32,71	198,22	43,33	32,47
	CP5	32,73	174,96	41,35	26,33
	CP6	32,73	194,54	43,24	32,12
<i>60-60°</i>	CP1	32,74	158,70	40,40	23,41
	CP2	32,73	142,78	38,89	18,81
	CP3	32,70	167,80	41,14	25,79
	CP4	32,69	170,37	41,02	25,49
	CP5	32,70	142,58	39,36	20,40
	CP6	32,72	144,12	39,36	20,29

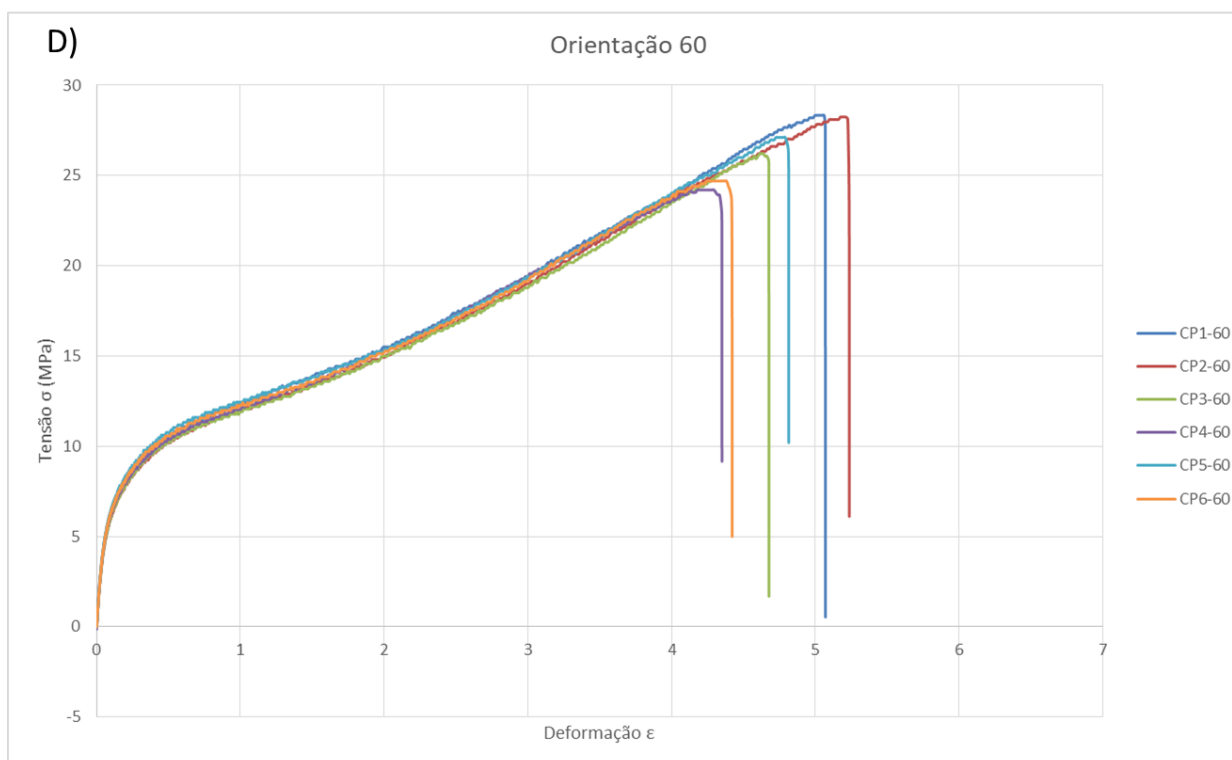
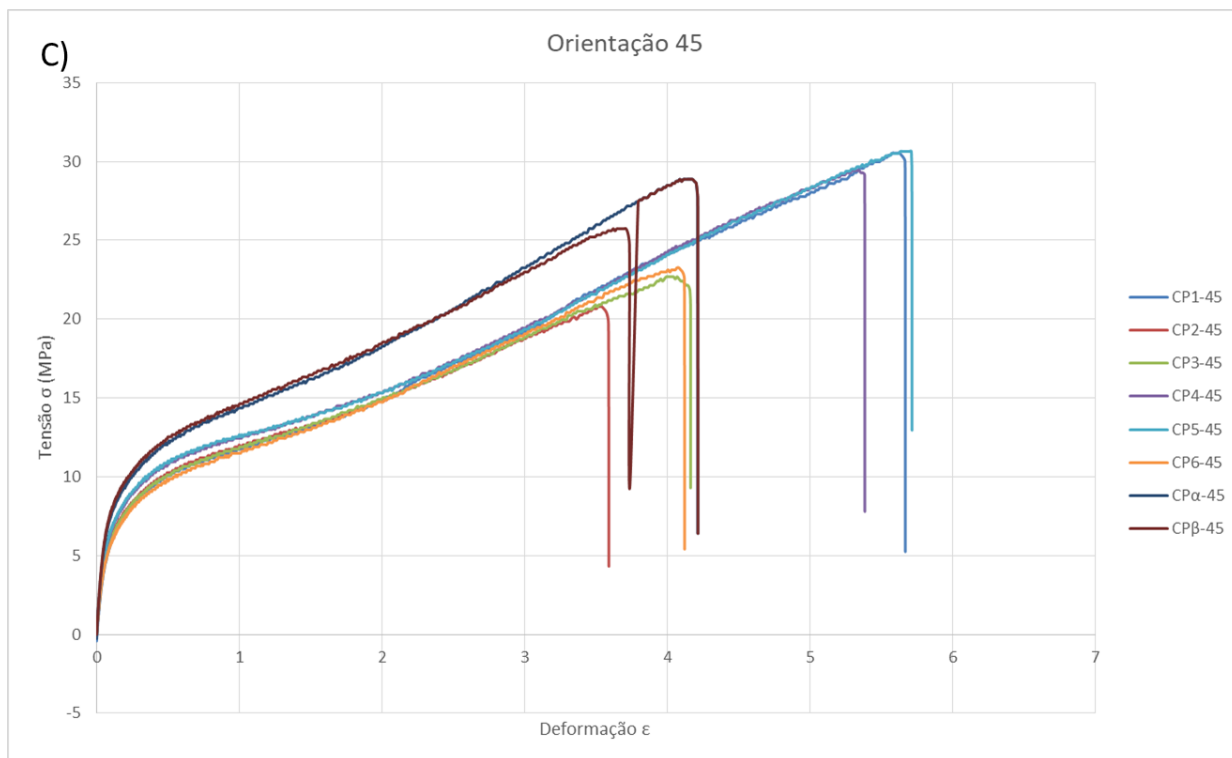
As curvas de tensão por deformação dos ensaios de tração podem ser vistas na **Figura**

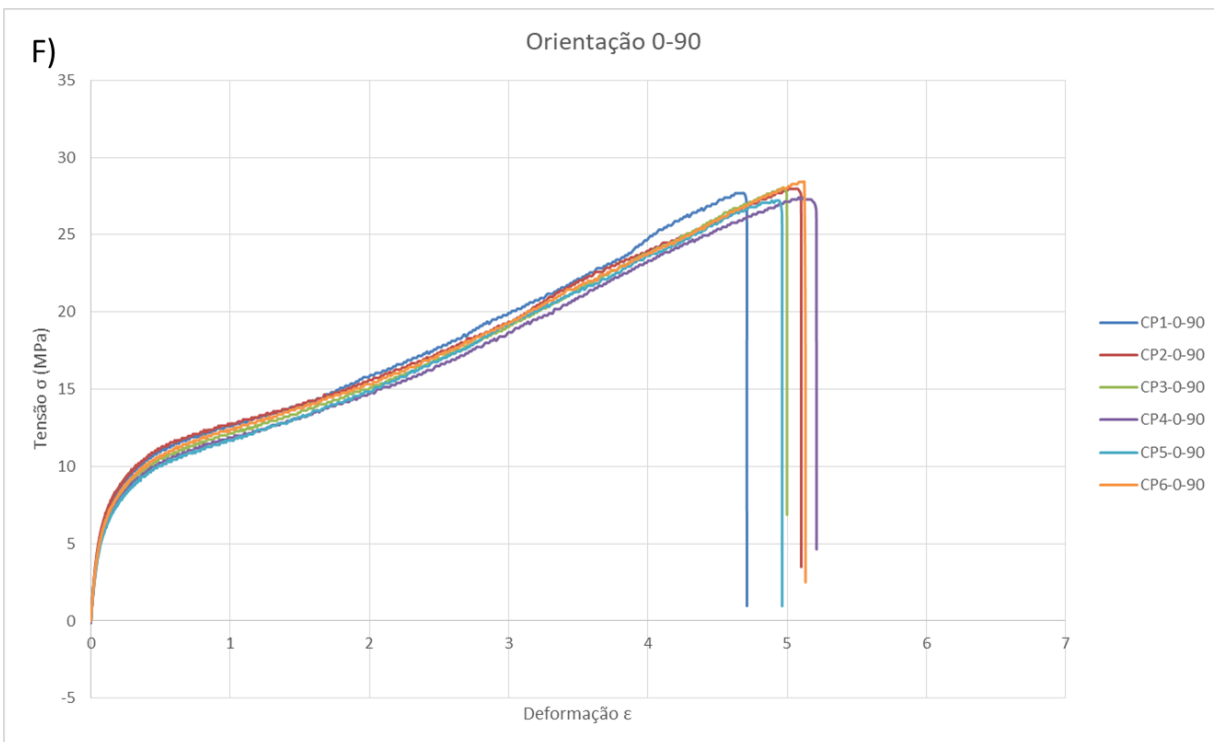
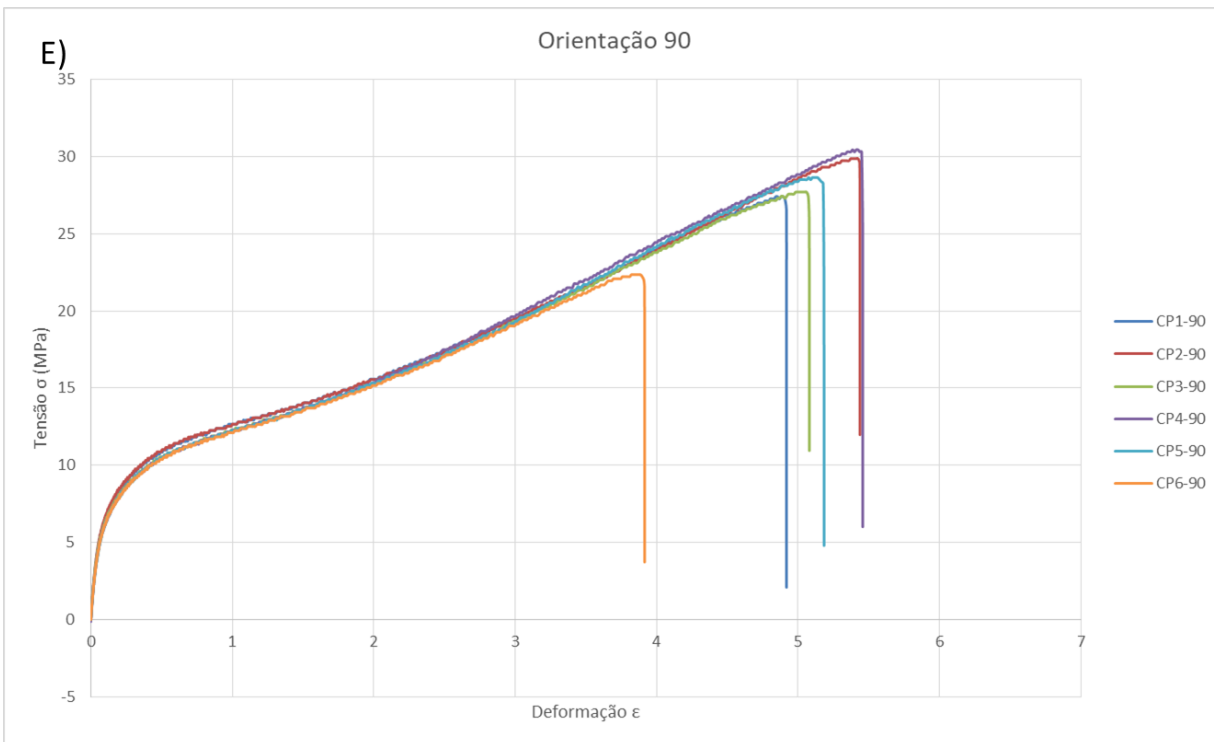
**52.**

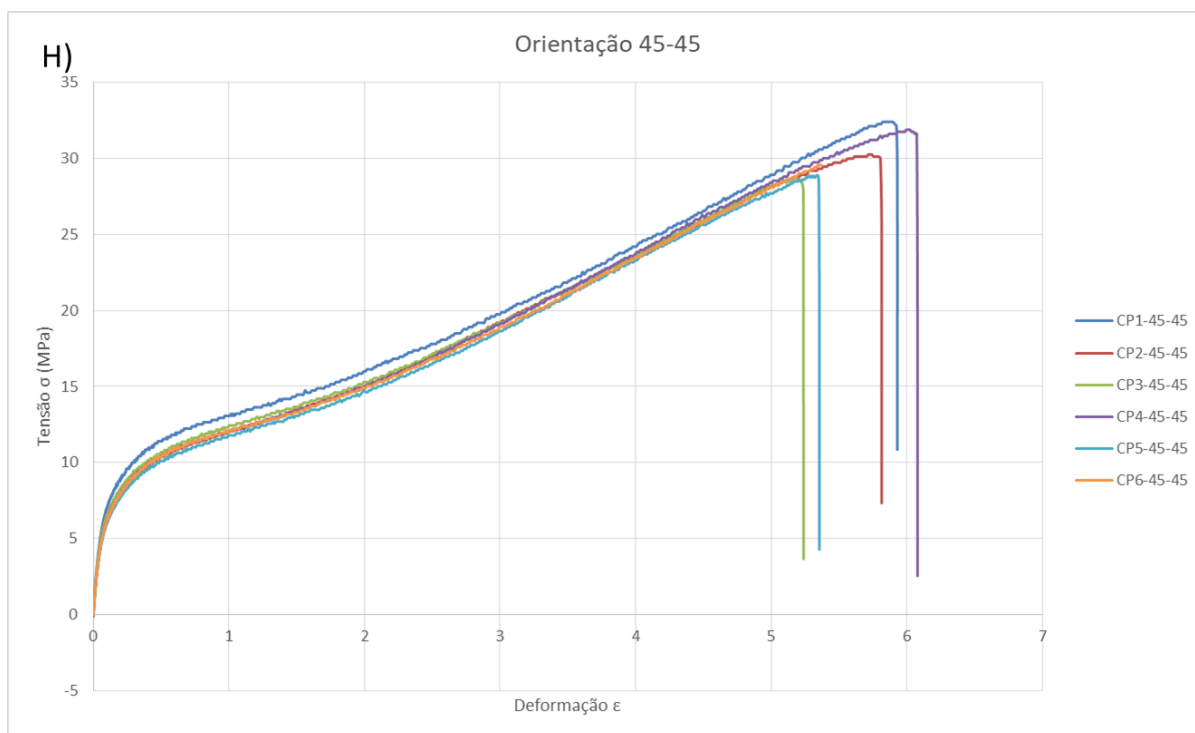
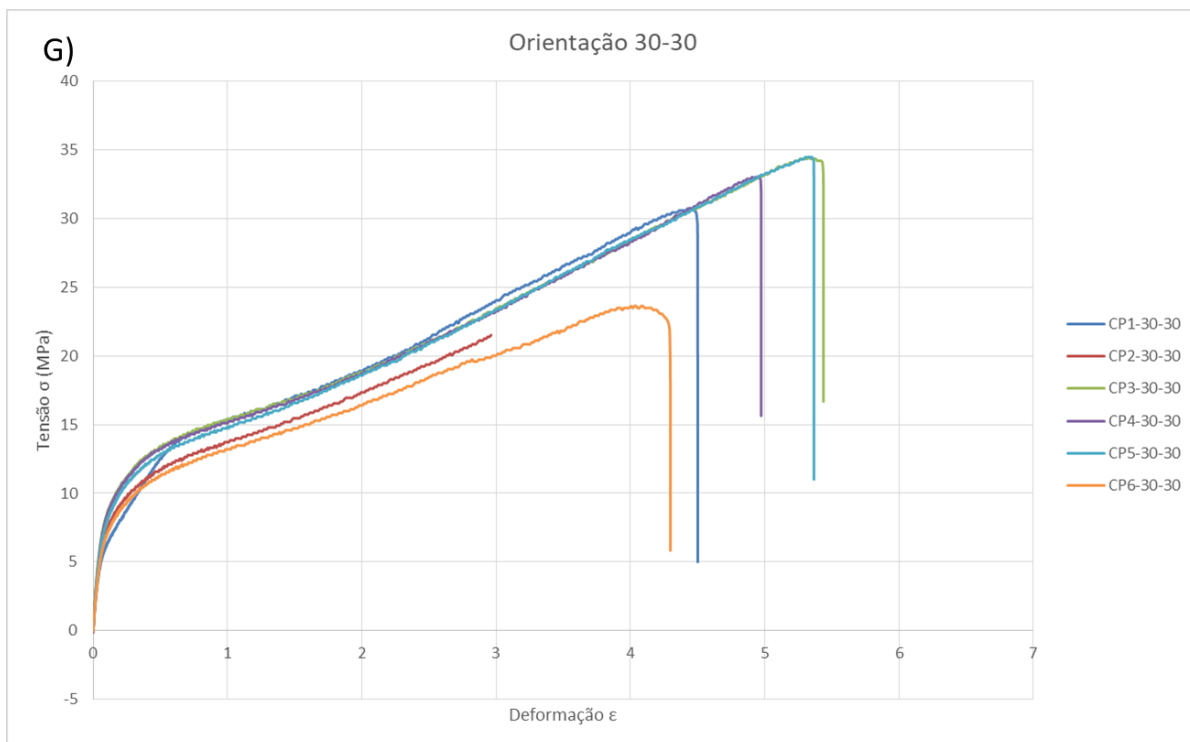


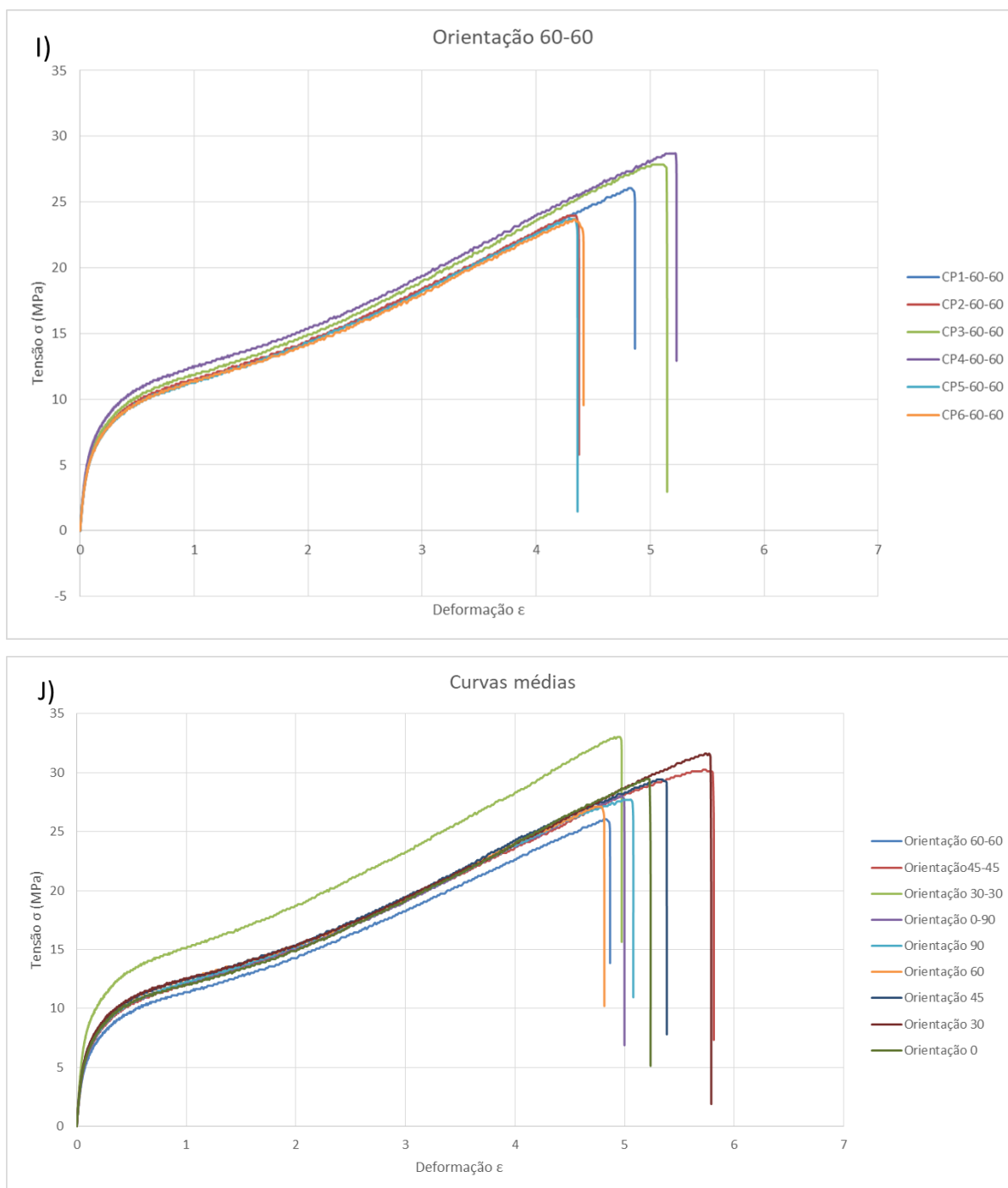
**Figura 52: Gráficos de tensão x deformação de tração. A) Orientação 0°; B) Orientação 30°; C) Orientação 45°; D) Orientação 60°; E) Orientação 90°; F) Orientação 0-90°; G) Orientação 30-30°; H) Orientação 0°; I) Orientação 0°; J) Média de curvas de todas as orientações.**











A partir da análise das curvas mostradas na **Figura 52** pode-se concluir que existe uma pequena variabilidade entre os resultados de cada grupo. O que evidencia a boa reprodutibilidade do processo de fabricação, apesar da elevada taxa de refugo do processo. A orientação da deposição do filamento parece não alterar a resposta dos corpos de prova à tração, já que a forma das curvas de tensão x deformação entre os grupos é muito semelhante. Isso se torna mais evidente quando se analisa a curva média das orientações (**Figura 52-J**). Observa-se uma região inicial de deformação elástica, o ponto de escoamento e a região de deformação

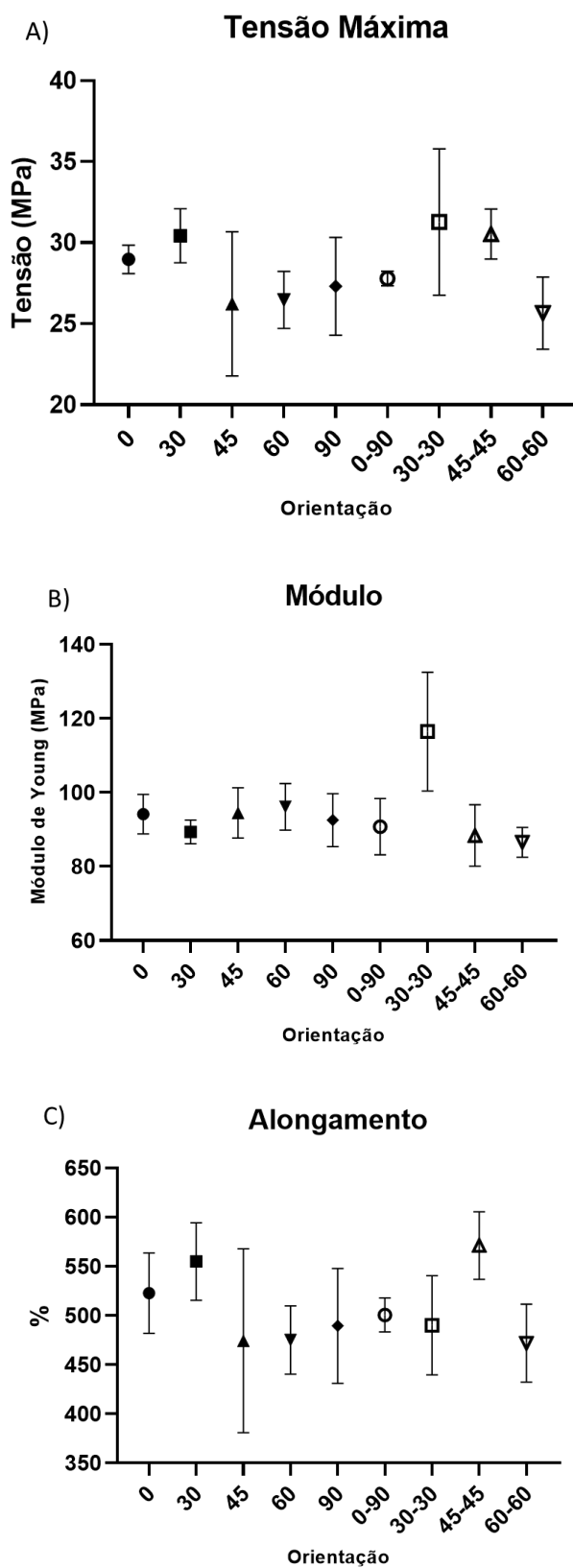
plástica presentes nos gráficos. Durante o ensaio não houve a formação de ponto de estricção nos corpos de prova. A longa região de deformação já era esperada para esse tipo de material. Notar que o PLA-flex® possui em sua composição 85 % de TPU, o que confere a esse material um comportamento hiperelástico. Os alongamentos possuem valores médios superiores a 450% do comprimento inicial (**Tabela 6**).

Os valores médios de Módulo de Young, Tensão de ruptura e alongamento podem ser vistos na **Tabela 6**, junto com os desvios padrões. Os gráficos com esses valores podem ser vistos na **Figura 53**.

**Tabela 7: Valores dos resultados do ensaio de tração para cada uma das orientações.**

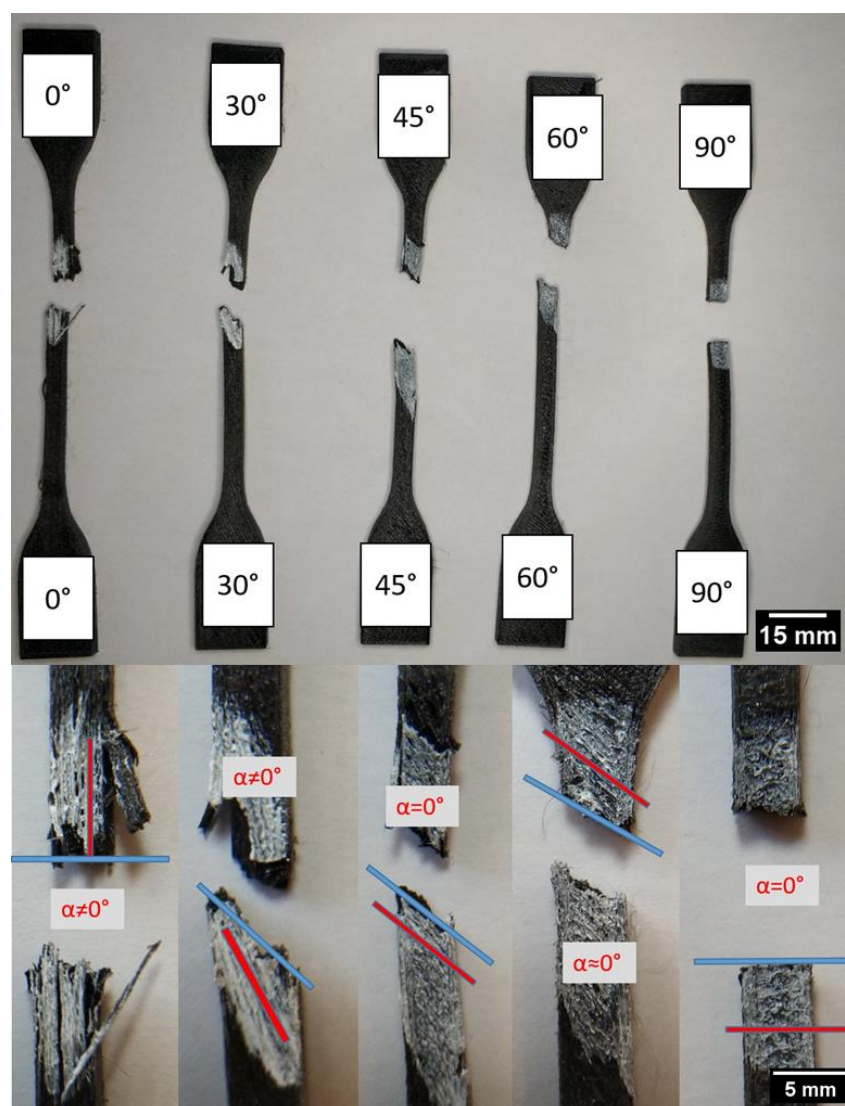
<i>Orientação</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Tensão Max (MPa)</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
<i>0°</i>	<b>Média</b>	28,97	94,14	522,80
	<b>DP</b>	0,88	5,34	40,81
<i>30°</i>	<b>Média</b>	30,43	89,38	555,10
	<b>DP</b>	1,67	3,21	39,33
<i>45°</i>	<b>Média</b>	26,23	94,52	474,40
	<b>DP</b>	4,45	6,79	93,53
<i>60°</i>	<b>Média</b>	26,47	96,15	475,20
	<b>DP</b>	1,76	6,28	34,83
<i>90°</i>	<b>Média</b>	27,31	92,53	489,50
	<b>DP</b>	3,01	7,16	58,34
<i>0-90°</i>	<b>Média</b>	27,79	90,79	500,60
	<b>DP</b>	0,44	7,60	17,27
<i>30-30°</i>	<b>Média</b>	31,27	116,50	490,20
	<b>DP</b>	4,51	16,02	50,45
<i>45-45°</i>	<b>Média</b>	30,53	88,37	571,30
	<b>DP</b>	1,55	8,30	34,39
<i>60-60°</i>	<b>Média</b>	25,65	86,55	472,00
	<b>DP</b>	2,23	4,05	39,58

Figura 53: Gráficos das propriedades obtidas pelo ensaio de tração. A) Tensão Máxima; B) Módulo de Young; C) Alongamento.



Na análise ANOVA foi observado que não há diferença estatística entre os grupos quando avaliado Tensão e Módulo de elasticidade. Isso significa que a orientação de deposição dos filamentos não tem influência na rigidez ou resistência dos corpos de prova. No caso do alongamento houve diferença estatística. Essa diferença estatística nos valores de alongamento pode ser explicada pelos modos de falhas. Os modos de falhas possuem uma relação direta com a orientação escolhida para a deposição do polímero. Como foi explicado na Seção 4.1.2 desse trabalho, as falhas entre camadas e através das camadas podem resultar em alongamentos variados dos corpos de prova. A **Figura 54** permite uma melhor visualização desse fenômeno nos corpos de prova testados.

**Figura 54:** Fotos dos corpos de prova e um zoom nas falhas para análise. Da esquerda para a direita orientações  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ .

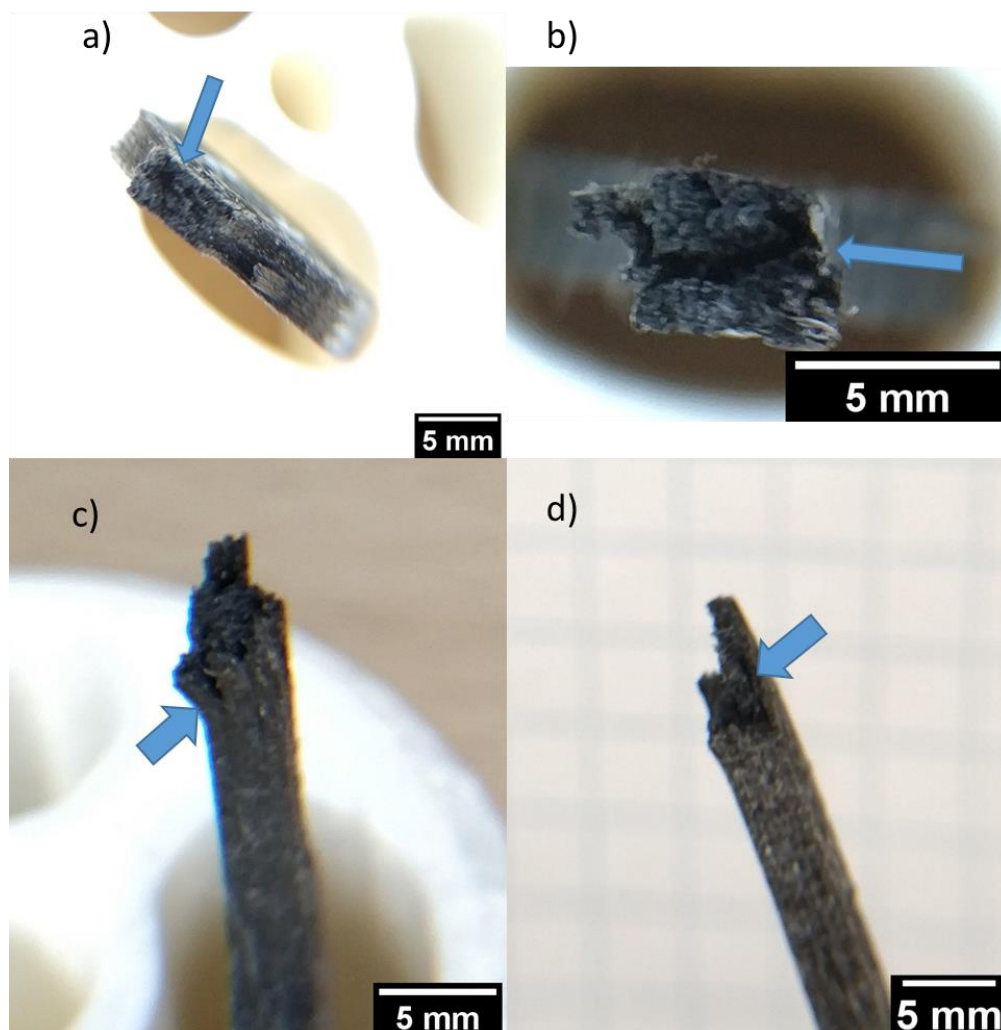




O valor de  $\alpha = 0^\circ$  representa falha entre camadas e o valor diferente de  $0^\circ$  representa falha através de camadas. Quando o valor  $\alpha = 0$ , é observado que a falha ocorre de forma que as fibras do corpo de prova são separadas uma das outras na extensão da espessura. Quando o valor  $\alpha \neq 0$ , é observado a falha acontece com o rompimento das fibras. Sendo assim, as falhas entre camadas resultam em valores de alongamento menores nos corpos de prova, se comparados com aqueles que tiveram as falhas através das camadas. Esse resultado pode ser observado quando comparado a **Figura 54** e a **Tabela 6**. As orientações com maior alongamento foram as de  $0^\circ$  e  $30^\circ$  que tiveram as falhas através das camadas quando comparadas com as outras orientações não cruzadas ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ ).

Para o caso das orientações cruzadas (0/90, 30-30, 45-45 e 60-60) a falha inicia no sentido paralelo ao plano da força. Na **Figura 55** é possível notar que há o surgimento de trincas e ocorre a separação das camadas no sentido perpendicular ao da espessura. Como já foi mencionado a área útil do corpo de prova é a que possui os vazios solidificados. No caso das orientações cruzadas esses vazios são minimizados pelo modo de deposição alternado, mas ainda podem ser encontrados. Sendo assim as trincas começam a se propagar nesses vazios que se acumulam entre as camadas na direção da espessura, até eventualmente, resultar no rompimento do corpo de prova.

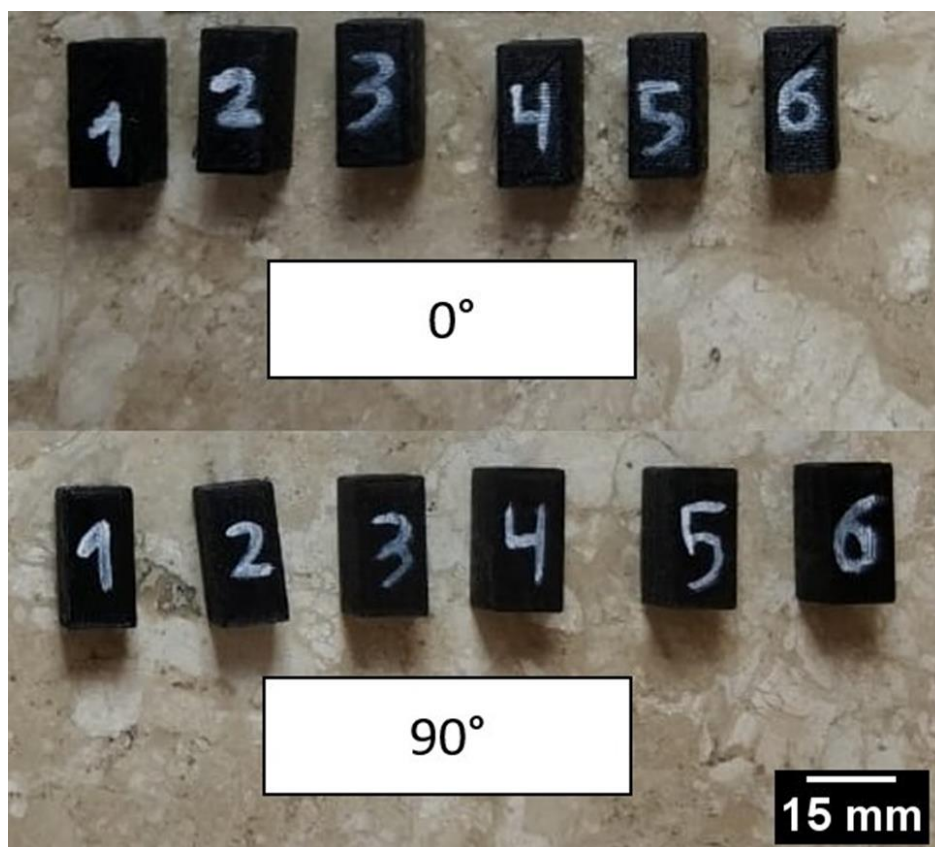
**Figura 55:** Trincas e falhas que se propagaram perpendicular ao sentido de espessura. a) 0-90; b) 30-30; c)45-45 e d) 60-60.



### 5.2.2 Compressão

Assim como para os corpos de prova do ensaio de tração, as medidas geométricas dos corpos de provas do ensaio de compressão podem ser encontradas no Apêndice A2. Na **Figura 56** têm-se os corpos de prova impresso.

Figura 56: Fotos dos corpos de compressão.



Após o ensaio de compressão os corpos de prova retornaram a praticamente seus valores iniciais nas 3 direções. Na **Tabela 7** é mostrado os valores medidos pré-teste, pós-teste e a alteração percentual em cada um dos pontos medidos (referência da **Figura 35**) para os corpos de prova de compressão (CPC). Nenhuma alteração geométrica alcançou variação maior do de 0,72% demonstrando a excelente recuperação plástica do material.

Tabela 8: Valores em milímetros das dimensões dos corpos de prova de compressão (CPC) antes e após o ensaio e suas variações em percentual.

<i>Orientação</i>	<i>Corpo de prova</i>	<i>Pré teste (mm)</i>			<i>Pós teste (mm)</i>			<i>Variação %</i>		
		<i>Largura Eixo X</i>	<i>Espessura Eixo Y</i>	<i>Comprimento Eixo Z</i>	<i>Largura Eixo X</i>	<i>Espessura Eixo Y</i>	<i>Comprimento Eixo Z</i>	<i>Largura Eixo X</i>	<i>Espessura a Eixo Y</i>	<i>Comprimento Eixo Z</i>
<i>0°</i>	<b>CPC1</b>	12,91	12,79	25,85	12,93	12,84	25,67	0,150	0,386	-0,68
	<b>CPC2</b>	12,82	12,72	25,60	12,85	12,75	25,45	0,250	0,178	-0,55
	<b>CPC3</b>	12,86	12,85	25,66	12,90	12,89	25,48	0,316	0,296	-0,72
	<b>CPC4</b>	12,89	13,07	26,10	12,91	13,10	25,92	0,114	0,230	-0,68
	<b>CPC5</b>	12,88	12,74	25,62	12,88	12,78	25,47	0,057	0,324	-0,59
	<b>CPC6</b>	12,89	2,90	25,73	12,89	12,94	25,55	0,000	0,346	-0,70
<i>90°</i>	<b>CPC1</b>	12,67	12,83	25,42	12,68	12,82	25,31	0,042	-0,119	-0,44
	<b>CPC2</b>	12,73	12,76	25,42	12,75	12,81	25,31	0,162	0,376	-0,46
	<b>CPC3</b>	12,91	12,66	25,66	12,92	12,66	25,55	0,134	0,042	-0,41
	<b>CPC4</b>	12,94	12,67	25,53	12,98	12,69	25,44	0,252	0,137	-0,38
	<b>CPC5</b>	12,63	12,77	25,57	12,65	12,82	25,41	0,185	0,402	-0,63
	<b>CPC6</b>	12,76	12,55	25,58	12,78	12,56	25,44	0,146	0,133	-0,55

Os gráficos do ensaio de compressão podem ser vistos na **Figura 57**. Os gráficos possuem um comportamento linear bem característico e mesmo com essa longa região de deformação plástica o material conseguiu retornar a quase 100% da sua forma original como foi mencionado acima. Ao isolar a região de deformação elástica desses gráficos é possível obter o valor de Módulo de Young através da inclinação das curvas. Essa análise pode ser vista na **Tabela 8** com os valores obtidos pela inclinação da curva e as médias

**Figura 57:** Gráficos do ensaio de compressão das orientações a)0° e b)90°

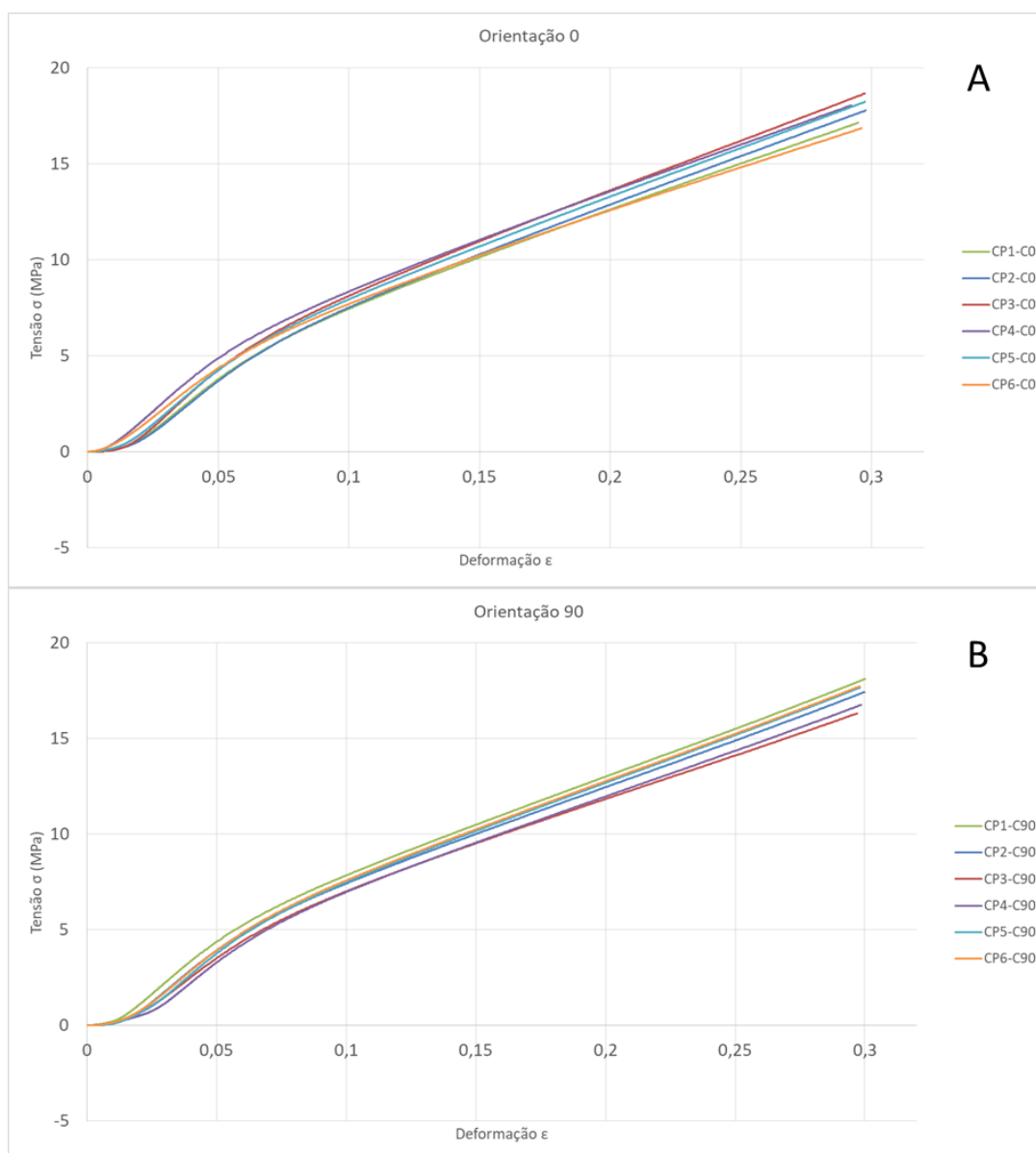


Tabela 9: Valores de Módulo de Young dos corpos de prova do ensaio de compressão.

<i>Corpo de prova</i>	<i>Módulo (MPa)</i>	
	<i>Orientação 0°</i>	<i>Orientação 90°</i>
<i>CPC1</i>	108,45	113,86
<i>CPC2</i>	108,10	110,01
<i>CPC3</i>	122,81	100,39
<i>CPC4</i>	118,49	106,18
<i>CPC5</i>	114,62	112,21
<i>CPC6</i>	105,96	110,46
<i>Média</i>	113,07	108,85
<i>Desvio Padrão</i>	6,68	4,88

### 5.3 Análise de elementos finitos

Utilizando-se o pacote computacional Ansys® Workbench, realiza-se a análise estática de tensões das estruturas sob tração e compressão. A análise de estruturas estáticas, dos diferentes metamateriais estudados nesse trabalho, será apresentado a seguir sendo dividida em duas partes: os metamateriais sujeitos a esforços de compressão e de tração.

#### 5.3.1 Compressão

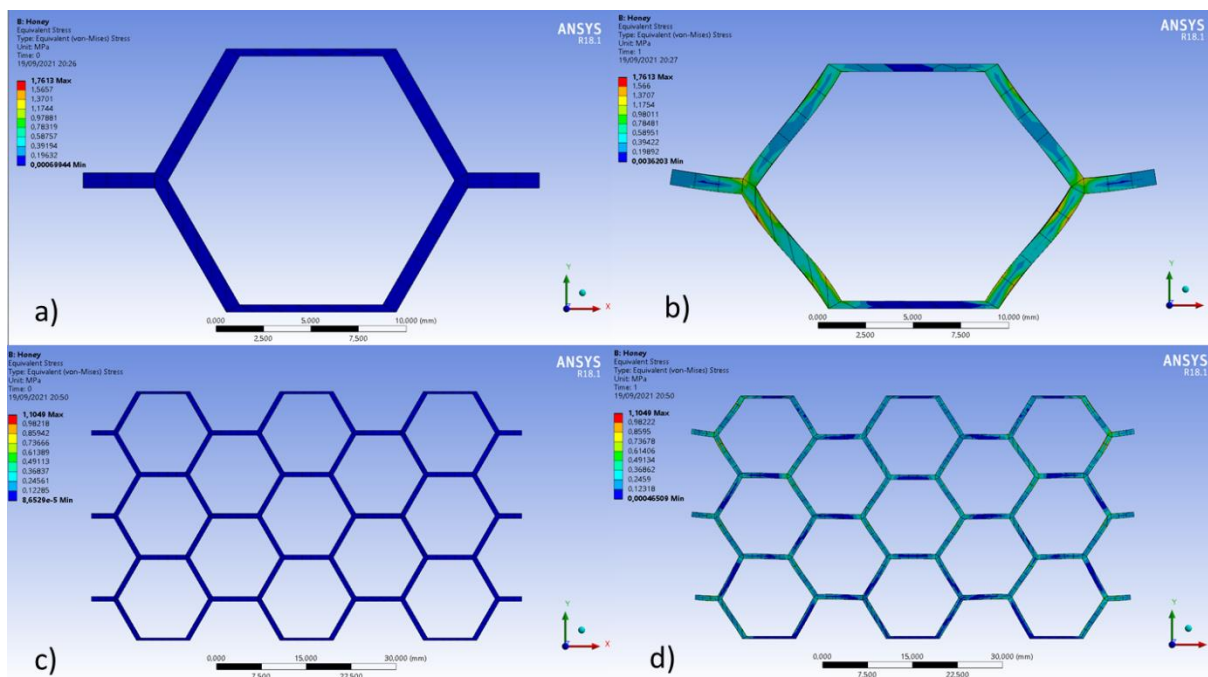
Nas análises de elementos finitos na qual as estruturas foram sujeitas a esforços de compressão comparou-se os valores do coeficiente de Poisson. Realizando as simulações com valores de deslocamento de compressão diferentes foi calculado o coeficiente de Poisson para cada um desses valores. Esses valores foram calculados e comparados com os valores obtidos de forma teórica. Para os valores teóricos das estruturas *honeycomb* e *re-entrant* foi utilizado a equação 52 com os parâmetros de geométricos da seção 4.2.2. Para a estrutura *cross-chiral* foi utilizado a equação 68 e também os parâmetros da seção 4.2.2. No caso da estrutura *AuxHex*, o valor do coeficiente de Poisson é tomado como nulo já que essa estrutura é a combinação das estruturas *honeycomb* e *re-entrant* que gera um valor nulo. Na **Tabela 9** estão os valores obtidos.

**Tabela 10: Comparativo entre os valores de coeficiente de Poisson obtidos via elementos finitos e pelas expressões analíticas**

	Deslocamento de compressão (mm)	Metamaterial			
		<i>Honeycomb</i>	<i>Re-entrant</i>	<i>AuxHex</i>	<i>Cross-chiral</i>
<b>Valores numéricos via MEF Unitário</b>	-0,05	1,11391	-1,05738	0,05653	-0,63029
	-0,1	1,11549	-1,06476	0,05073	-0,63585
	-0,5	1,12408	-1,12135	0,00272	-0,65800
	-1	1,12746	-1,18491	-0,05745	-0,75301
	-2	1,12869	-	-	-
<b>Valores numéricos via MEF 3x3</b>	-0,05	1,07982	-1,10156	-0,02174	-0,49441
	-0,1	1,08886	-1,10342	-0,01457	-0,48474
	-0,5	1,10421	-1,11900	-0,01480	-0,50221
	-1	1,12231	-1,13974	-0,01743	-0,76369
	-2	1,17382	-1,17169	0,00213	-1,09196
<b>Teórico</b>	-	1	-1	0	-1

Nas **figuras 58 a 61** são demonstrados os resultados obtidos pela simulação para o caso de um deslocamento de compressão de -1mm.

**Figura 58: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura *honeycomb* aplicada um deslocamento de -1mm. a) unitário antes; b) unitário após; c) 3x3 antes e d) 3x3 após aplicação do deslocamento.**



**Figura 59: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura *re-entrant* aplicada um deslocamento de -1mm. a) unitário antes; b) unitário após; c) 3x3 antes e d) 3x3 após aplicação do deslocamento.**

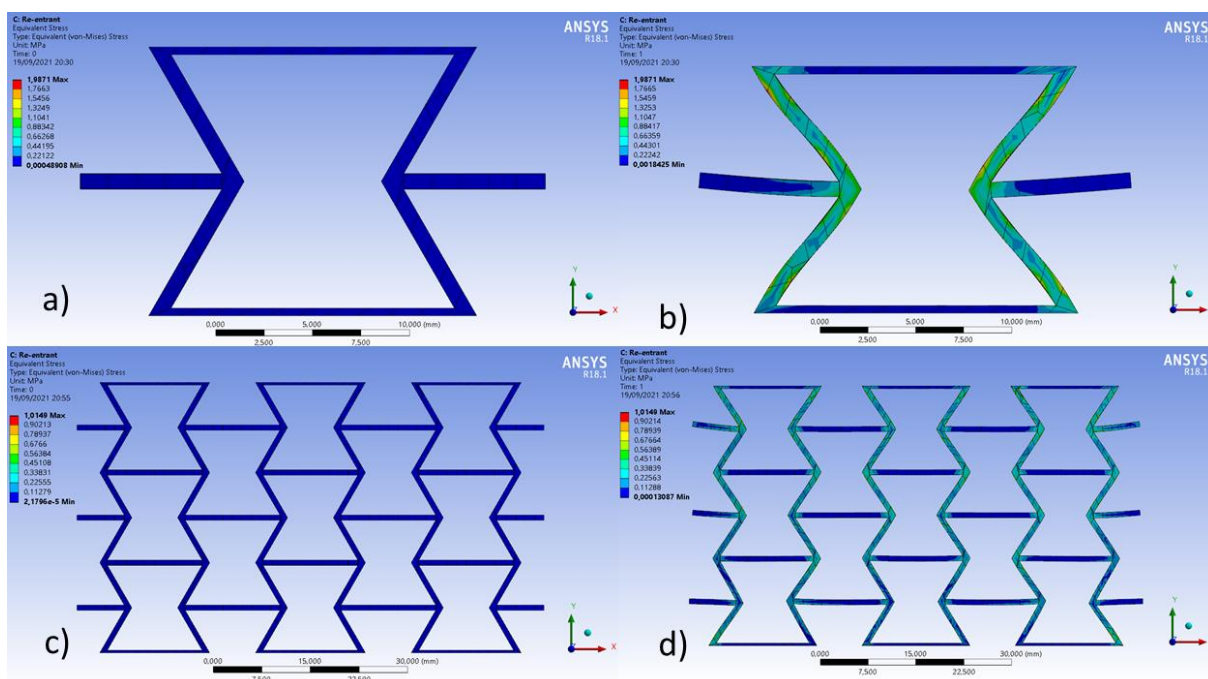




Figura 60: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura *AuxHex* aplicada um deslocamento de  $-1\text{mm}$ . a) unitário antes; b) unitário após; c)  $3\times 3$  antes e d)  $3\times 3$  após aplicação do deslocamento.

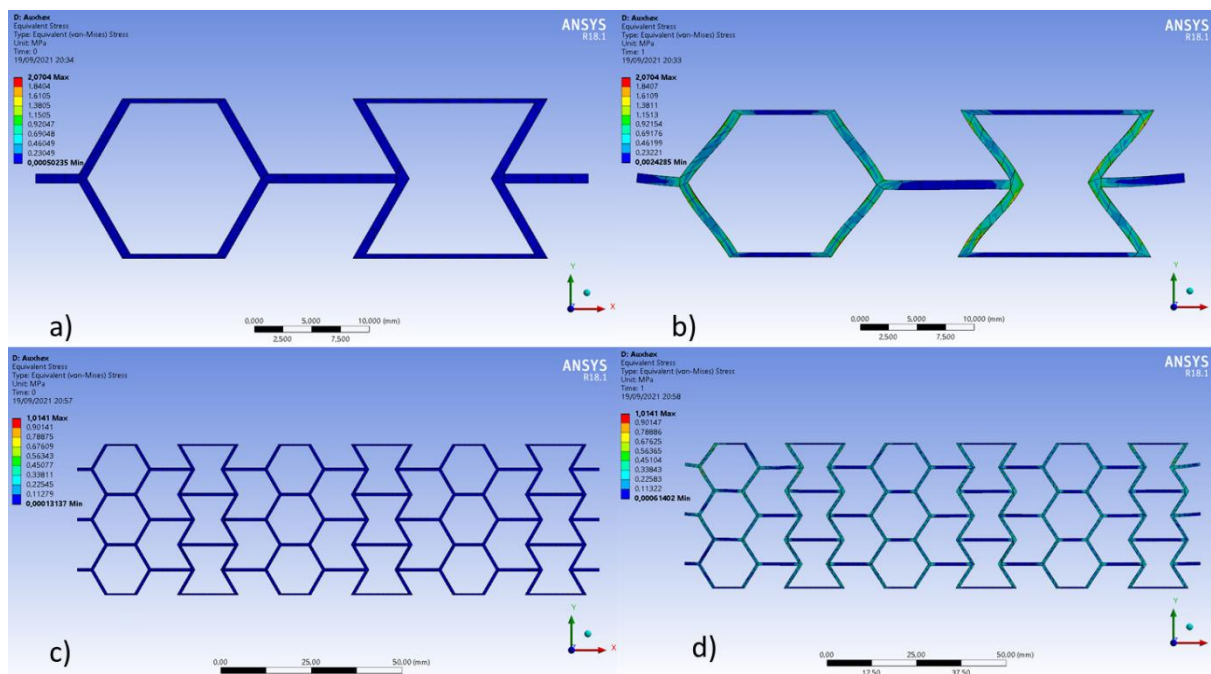
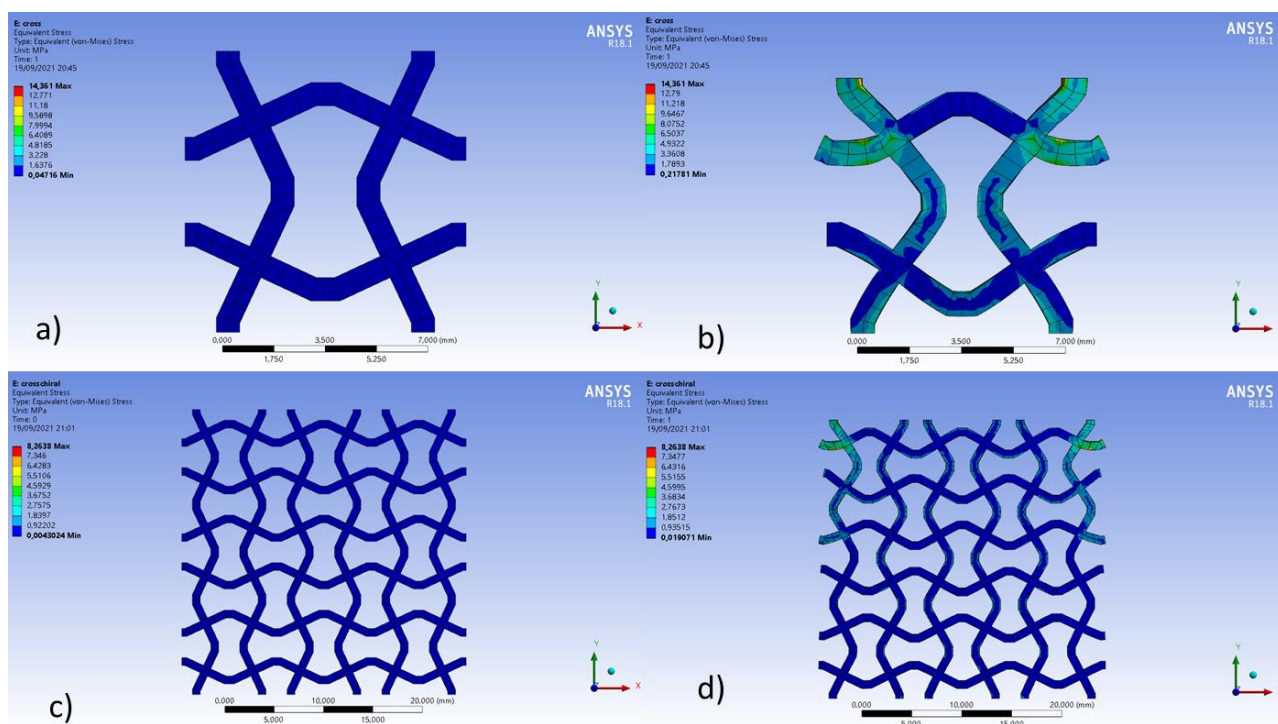


Figura 61: Resultados obtidos pelo método de elementos finitos para a estrutura *cross-chiral* aplicada um deslocamento de  $-1\text{mm}$ . a) unitário antes; b) unitário após; c)  $3\times 3$  antes e d)  $3\times 3$  após aplicação do deslocamento.



Comparando os valores do coeficiente de Poisson (**Tabela 9**) das estruturas *honeycomb* e *re-entrant* é possível notar similaridade entre os valores teóricos e os estimados computacionalmente. A teoria dos metamateriais mostra que a resposta desse tipo de material é função da sua morfologia/geometria. No entanto, no caso de materiais hiperelásticos, como o PLA-flex®, as grandes deformações parecem também influenciar os resultados. O desvio dos valores computacionais e teóricos tem relação com a parcela que o material de composição (PLA-flex®) possui para essa resposta mecânica.

Note, que para a estrutura *AuxHex*, pode se concluir que comportamento similar ao observado anteriormente foi revelado pela análise dos dados. O valor de Poisson não chega a ter seu valor nulo para essa estrutura quando analisamos os resultados obtidos computacionalmente via elementos finitos (**Tabela 9**), mas os valores ficam bem próximos do valor nulo. Vale notar que os valores encontrados por elementos finitos para a estrutura *AuxHex* variam entre valores negativos e positivos do coeficiente de Poisson (isso tanto para a estrutura unitária quanto para a 3x3). Isso pode estar relacionado com a parcela que o material de composição possui nessas estruturas ou com a resposta que as estruturas apresentam com o aumento do deslocamento aplicado.

Em relação à estrutura *cross-chiral* o comportamento é diferente. Pela **Figura 61** é possível perceber que essa estrutura possui um comportamento auxético. Esses valores negativos de coeficiente de Poisson foram observados, porém eles variam com o valor de deslocamento de compressão aplicado. O coeficiente só atinge os mesmos valores para o teórico e o computacional para o maior valor de compressão. Esse comportamento mostra que a resposta mecânica dessa estrutura depende, além da geometria e do material, da força aplicada. Análises mais completas desse comportamento e dessa estrutura serão necessárias.

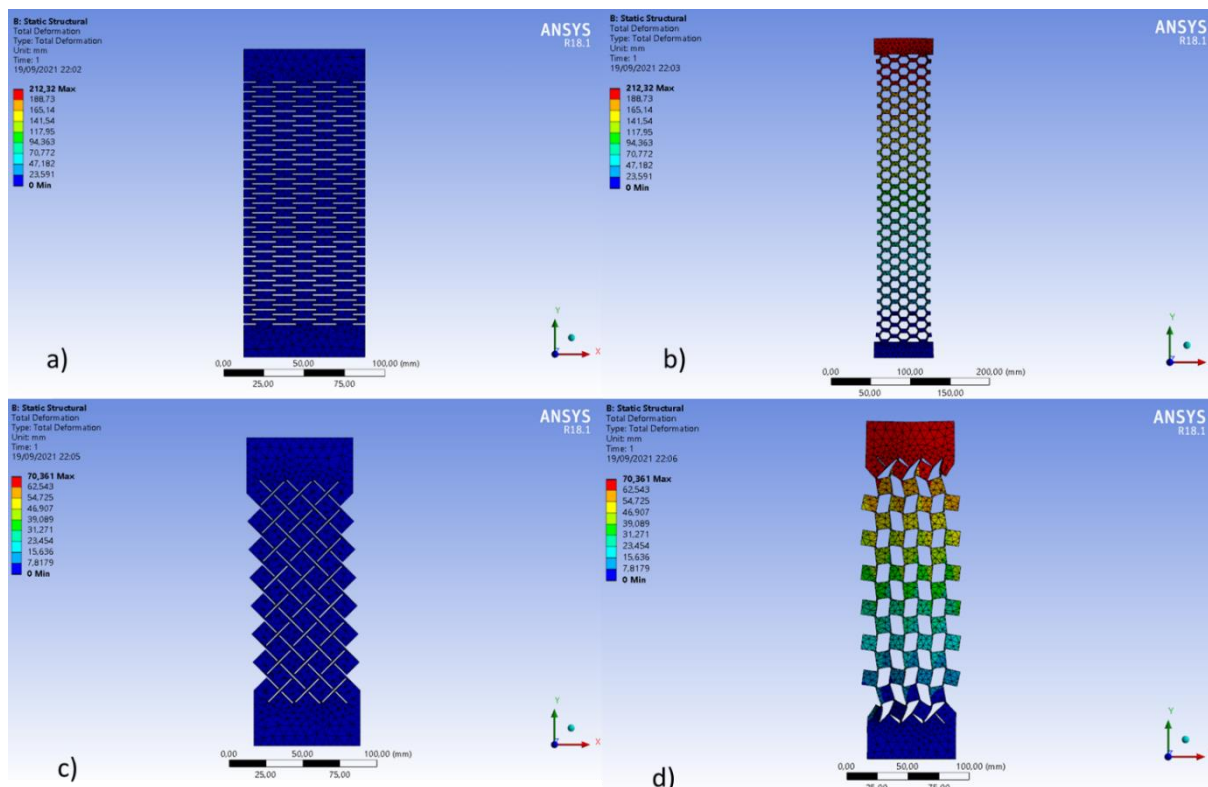
A estrutura *re-entrant* unitária apresentou comportamento atípico no valor de deslocamento 2mm, dessa forma o valor do coeficiente não foi calculado. Além disso, para o *cross-chiral* unitário o software não calculou no valor de deslocamento de 2mm. Uma provável causa são instabilidade numérica geradas devida ao fato do material hiperelástico ser considerado um sólido incompressível. Nesse caso, quando a espessura se aproxima de zero, o modelo de elementos finitos não consegue calcular a resposta da estrutura (deslocamento) de forma correta.

As respostas mecânicas esperadas puderam ser analisadas por meio do método de elementos finitos. Os coeficientes de Poisson negativo, nulo e positivo foram demonstrados nas estruturas *re-entrant* e *crosschiral*, *AuxHex* e *honeycomb* respectivamente. Essas estruturas podem ser usadas para absorção de vibrações e impactos, sendo algumas melhores que as outras dependendo da aplicação. A combinação do comportamento das estruturas com o comportamento hiperelástico do material de composição pode gerar resultados ainda melhores. Esse estudo para a avaliação e comparação da capacidade de absorção de vibrações e impacto é uma sugestão de trabalhos futuros.

### 5.3.2 Tração

A estratégia utilizada para a análise de tração foi diferente. Foi considerado um limite para a simulação que foi a tensão de ruptura. Foi definido um valor médio de tensão de ruptura de 28MPa baseado nos valores obtidos nos ensaios mecânicos (**Tabela 6**). A partir disso foi analisado o valor da força aplicada na análise por elementos finitos que resulta nesse valor de tensão. Foi então calculado os valores de alongamento obtido pelas estruturas *kirigami* para essas condições aplicadas. A **Figura 62** e a **Tabela 10** demonstram os resultados da simulação das estruturas analisadas.

**Figura 62: Resultado obtidos pelo método de elementos finitos das estruturas kirigami. a) corte linear antes; b) corte linear após; c) corte ortogonal antes e d) corte ortogonal após aplicação da força.**



**Tabela 11: Valores de força aplicada e alongamento obtidos pela análise de elementos finitos das estruturas kirigami**

	<i>Força aplicada (N)</i>	<i>Alongamento (%)</i>
<i>Corte linear</i>	178	147,15
<i>Corte ortogonal</i>	91	46,83

Os valores aqui obtidos de alongamento para as duas estruturas kirigami foram inferiores aos valores obtidos na caracterização do material PLA-flex® (Tabela 6). Importante destacar que a simulação numérica não consegue demonstrar e calcular com precisão as deformações fora do plano que essas estruturas apresentam. Investigações mais detalhada devem ser feitas, especialmente com a realização do ensaio físico dessas estruturas.

Em seu trabalho Nakajima, Fayazbakhsh e Teshima, (2020) obtiveram alongamentos de 183% para esse mesmo tipo de corte linear. Os autores utilizaram de filamento TPU para a fabricação por impressão 3D FFF das estruturas kirigami. Como o material utilizado no presente

trabalho possui em sua composição 15% de PLA para 85% de TPU, a diferença entre os valores de alongamento está associada ao fato que o PLA torna a estrutura mais rígida.

Por outro lado, o valor de alongamento do *kirigami* de corte ortogonal foi bem inferior comparado ao corte linear. O fato de que as deformações fora do plano não serem contabilizados pela análise de elementos finitos podem prejudicar a performance dessa estrutura. Em seu trabalho Rafsanjani e Bertoldi (2017) demonstraram que, mesmo ao ultrapassar o valor de tensão de ruptura do material de composição, a estrutura de cortes ortogonais conseguiu suportar valores de 312% a mais de deslocamento além do ponto de tensão máxima sem se romper. As deformações fora do plano auxiliam na distribuição dos esforços para que a estrutura não se rompa tão cedo. Os autores puderam comprovar isso através de teste físicos com essa mesma estrutura. Dessa forma é possível que a estrutura de corte ortogonal possa apresentar resultados mecânicos melhores que aqueles apresentados aqui nessa simulação numérica. Destacando que esse deslocamento maior encontrado por Rafsanjani e Bertoldi (2017) não necessariamente será o mesmo para a estrutura aqui analisada, já que os materiais de composição de cada um dos trabalhos assim como parâmetros de geometria são diferentes. Mesmo assim é possível tomar como base que essa estrutura pode suportar maiores valores de deslocamento e atingir maiores alongamentos.

Comparando os valores da **Tabela 10**, a estrutura de corte linear demonstrou valores superiores de força e alongamento em relação a estrutura de corte ortogonal. Os resultados numéricos aqui apresentados ainda necessitam uma validação com testes físicos, mas em uma análise preliminar o *kirigami* de corte linear pode ser considerado superior ao de corte ortogonal, quando comparados a força de ruptura e alongamento máximo. Para trabalhos futuros é sugerido que essa comparação dos modelos físicos e numéricos seja feita e que essa avaliação possa ser confirmada.

## 6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi conduzido um estudo de caracterização do PLA-flex® e uma análise numérica de alguns metamateriais. Foi apresentado formas de produção e avaliação de estruturas com resposta mecânicas especiais, feitas por impressão 3D FFF, com baixo custo de fabricação.

Apresentou-se primeiro o processo de fabricação por impressão 3D FFF. Erros de fabricação como falha nas primeiras camadas e falhas de extrusão ocorreram e foram lidados. Demonstrou-se que através de redução de velocidades de impressão, controle de temperatura e calibragem da máquina é possível minimizar os erros de fabricação. Sendo assim os parâmetros aqui apresentados possibilitam que impressões do material PLA-flex® possam ser replicados com sucesso na maioria das impressões 3D FFF.

Em seguida foi conduzido a caracterização do material PLA-flex®. Um filamento que em sua composição apresenta 85% de TPU e 15% de PLA com características hiperelásticas. Destacando principalmente que o material ao sofrer esforços de tração apresentou grandes alongamentos (em média 505,68%) e ao sofrer esforços de compressão conseguiu retornar a quase que sua forma original (variações geométricas menores que 0,8%). Além disso foi demonstrado, através de análises estatísticas dos corpos de prova dos ensaios mecânicos, que a orientação de deposição do filamento pela impressora 3D FFF não gerou diferença significativa na resposta do material.

Por fim, foram investigadas as estruturas em metamateriais. Por meio de uma análise estática de elementos finitos, foi analisado o comportamento dos metamateriais auxéticos (*honeycomb*, *re-entrant crosschiral* e *AuxHex*) sob compressão e estruturas *kirigami* (linear e ortogonal) sob tração. Os metamateriais auxéticos apresentaram resultados numéricos satisfatórios quando comparados aos resultados teóricos (variação não superiores a 18%) e as diferenças podem ser atribuídas a parcela de resposta do material constituinte. A estrutura *crosschiral* mostrou variações significativas (aproximadamente 50%) que necessitam maiores investigações. As estruturas *kirigami* demonstraram resultados abaixo do esperado. Apesar do padrão de corte linear apresentar resultados próximos da literatura em relação ao alongamento, pelos valores encontrados na caracterização do filamento PLA-flex® acredita-se que essa estrutura pode ter uma performance melhor. No caso do padrão de corte ortogonal já é de

conhecimento da literatura que essa estrutura pode chegar a valores de alongamento superiores, contudo uma validação física é necessária para quantificar esses valores. De toda forma as estruturas *kirigami* em PLA-flex® são excelentes candidatas para aplicações que necessitam grandes deformações.

Sendo assim, as estruturas metamateriais aqui investigadas podem apresentar algumas interessantes aplicações. Os metamateriais auxéticos possuem aplicabilidade por exemplo em estruturas sanduíches para abafar sons ou em sola de tênis de corrida para absorção de impacto. Já os metamateriais *kirigami* podem ser no ramo de tecnologia assistiva como por exemplo fitas adesivas com atuadores que podem auxiliar na mobilidade de idosos e/ou pessoas com mobilidade reduzida. A vantagem é que todas essas estruturas podem ser fabricadas com impressoras 3D FFF com relativo baixo custo.

### **Perspectivas futuras**

Para trabalhos futuros investigações e diferentes avaliações podem ser feitas. Alguns exemplos são:

- Realizar os ensaios experimentais acerca do comportamento mecânico de estruturas de metamateriais para validação de modelos de elementos finitos feitos nesse trabalho;
- Estudo mais detalhados das estruturas *crosschiral* e *kirigami* corte ortogonal;
- Investigação de metamateriais produzidos por outras tecnologias de impressão 3D, como a impressora de resina LCD que também é um equipamento de fácil acesso e obtenção pela população em geral;
- Análise das estruturas em metamateriais aqui estudadas em sua forma 3D total (aqui foram avaliadas estruturas 2D extrudadas para se ter uma espessura);

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D LAB INDUSTRIA LTDA. **PLA: Tudo o que você precisa saber sobre o filamento PLA - 3D Lab**. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/pla-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-filamento-pla/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

3D LAB INDUSTRIA LTDA. **Ficha técnica PLA 3DLAB**Betim - Brazil, 2019.

3D LAB INDUSTRIA LTDA. **Ficha técnica FLEX 3DLAB**Betim - Brazil, 2020.

3D LAB INDUSTRIA LTDA. **Ficha técnica PLA-FLEX 3DLAB**Betim - Brazil, 2021.

ALVARENGA, M. C. N. **MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA DESIGN, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE MOLAS DE LÂMINAS EM COMPÓSITO DE EPÓXI/FIBRA DE VIDRO**. [s.l.] UFMG, 2019.

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

ASTM D695-15. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. **ASTM International**, v. i, n. April 2003, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. **Rapid Manufacturing Association**, p. 10–12, 2013.

BATES, S. R. G.; FARROW, I. R.; TRASK, R. S. 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. **Materials and Design**, v. 112, p. 172–183, 2016.

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. 2nd. ed. Watertown: Prentice Hall, Pearson Education, Inc., 1996.

BEDA, T. Modeling hyperelastic behavior of rubber: A novel invariant-based and a review of constitutive models. **Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics**, 2007.

BOATTI, E.; VASIOS, N.; BERTOLDI, K. Origami Metamaterials for Tunable Thermal Expansion. **Advanced Materials**, 2017.



CHACÓN, J. M. et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. **Materials and Design**, v. 124, p. 143–157, 2017.

CHEN, Y.; HE, Q. 3D-printed short carbon fibre reinforced perforated structures with negative Poisson's ratios: Mechanisms and design. **Composite Structures**, v. 236, n. December 2019, 2020.

CRUMP, S. S. **Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects** United States Patent, 1992.

D3M INDUSTRIA E COMERCIO LTDA. **Filamento Flexível - 3D Fila para Impressora 3D**. Disponível em: <<https://3dfila.com.br/produto/filamento-flexivel/>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

DEL BROCCOLO, S.; LAURENZI, S.; SCARPA, F. AUXHEX – A Kirigami inspired zero Poisson's ratio cellular structure. **Composite Structures**, v. 176, p. 433–441, 2017.

DILBEROGLU, U. M.; SIMSEK, S.; YAMAN, U. Shrinkage compensation approach proposed for ABS material in FDM process. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 34, n. 9, p. 993–998, 2019.

DONG, Z. et al. Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb. **Materials and Design**, v. 182, p. 108036, 2019.

ELMRABET, N.; SIEGKAS, P. Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts. **Polymer Testing**, v. 90, n. June, p. 106656, 2020.

ESSS. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 28 out. 2020.

**FDM (3D Printing) – Simply Explained | All3DP**. Disponível em: <<https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>>.

Acesso em: 23 jun. 2020.

FRANCISCO, F.; AMARAL, S. **Estudo numérico de juntas adesivas com materiais hiperelásticos**. [s.l.] Instituto Politécnico de Bragança, 2018.

FRENZEL, T.; KADIC, M.; WEGENER, M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist. **Science**, v. 358, n. 6366, p. 1072–1074, 2017.

FRICK, A. et al. Microstructure and thermomechanical properties relationship of segmented thermoplastic polyurethane (TPU). **AIP Conference Proceedings**, v. 1593, n. February, p. 520–525, 2014.

GIBSON, L. J. et al. MECHANICS OF TWO-DIMENSIONAL CELLULAR MATERIALS. **Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences**, 1982.

GRIMA, J. N. et al. Hexagonal honeycombs with zero Poisson's ratios and enhanced stiffness. **Advanced Engineering Materials**, v. 12, n. 9, p. 855–862, 2010.

GRIMA, J. N.; ALDERSON, A.; EVANS, K. E. Auxetic behaviour from rotating rigid units. **Physica Status Solidi (B) Basic Research**, v. 242, n. 3, p. 561–575, 2005.

GRIMA, J. N.; GATT, R.; FARRUGIA, P. S. On the properties of auxetic meta-tetrachiral structures. **Physica Status Solidi (B) Basic Research**, v. 245, n. 3, p. 511–520, 2008.

GUO, M. F.; YANG, H.; MA, L. Design and characterization of 3D AuxHex lattice structures. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 181, n. March, 2020.

HA, C. S. et al. Controllable thermal expansion of large magnitude in chiral negative Poisson's ratio lattices. **Physica Status Solidi (B) Basic Research**, v. 252, n. 7, p. 1431–1434, 2015.

HA, C. S.; PLESHA, M. E.; LAKES, R. S. Chiral three-dimensional lattices with tunable Poisson's ratio. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 5, 2016.

HULL, C. W. **Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects By Stereo**

**ThographyPatent**, 1984.

IMBALZANO, G. et al. Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: Comparisons and parametric designs. **Composite Structures**, 2018.

ISOBE, M.; OKUMURA, K. Initial rigid response and softening transition of highly stretchable kirigami sheet materials. **Scientific Reports**, v. 6, n. January, p. 1–6, 2016.

KOBAYASHI, M.; UENO, T. Origami e kirigami: arte e cultura como recurso lúdico e educativo. **Currículo Lattes**, p. 148–158, 2013.

KOLKEN, H. M. A. et al. Mechanical performance of auxetic meta-biomaterials. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 104, n. November 2019, p. 103658, 2020.

KURIBAYASHI, K. et al. Self-deployable origami stent grafts as a biomedical application of Ni-rich TiNi shape memory alloy foil. **Materials Science and Engineering A**, 2006.

LEE, J. H.; SINGER, J. P.; THOMAS, E. L. Micro-/nanostructured mechanical metamaterials. **Advanced Materials**, v. 24, n. 36, p. 4782–4810, 2012.

LU, Z. et al. Elastic properties of two novel auxetic 3D cellular structures. **International Journal of Solids and Structures**, v. 124, p. 46–56, 2017.

MALVERN, L. E. Introduction to the mechanics of a continuous medium. p. 713, 1969.

MASTERS, I. G.; EVANS, K. E. Models for the elastic deformation of honeycombs. **Composite Structures**, v. 35, n. 4, p. 403–422, 1996.

MAURYA, N. K.; RASTOGI, V.; SINGH, P. Comparative study and measurement of form errors for the component printed by FDM and polyjet process. **Instrumentation Mesure Metrologie**, v. 18, n. 4, p. 353–359, 2019.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

MONTEIRO, E. C. **BIOMIMÉTICA APLICADA AO PROJETO E À ANÁLISE DE JUNTAS COLADAS NANOMODIFICADAS POR NANOTUBO DE CARBONO.**

[s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

NAKAJIMA, J.; FAYAZBAKHS, K.; TESHIMA, Y. Experimental study on tensile properties of 3D printed flexible kirigami specimens. **Additive Manufacturing**, v. 32, n. October 2019, p. 101100, 2020.

NOFAR, M.; MOHAMMADI, M.; CARREAU, P. J. Effect of TPU hard segment content on the rheological and mechanical properties of PLA/TPU blends. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 45, 2020.

PRALL, D.; LAKES, R. S. Properties of chiral honeycombe with Poisson's ratio of -1. **Int. J. Mech. Sci**, v. 39, n. 3, 1997.

QI, D. et al. Impact energy absorption of functionally graded chiral honeycomb structures. **Extreme Mechanics Letters**, v. 32, p. 100568, 2019.

RAFSANJANI, A.; BERTOLDI, K. Buckling-Induced Kirigami. **Physical Review Letters**, v. 118, n. 8, p. 1–5, 2017.

ROSSITER, J. et al. Shape memory polymer hexachiral auxetic structures with tunable stiffness. **Smart Materials and Structures**, v. 23, n. 4, 2014.

SAMYKANO, M. et al. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9–12, p. 2779–2796, 2019.

SHAHZAD, M. et al. Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material. **Materials Research**, v. 18, n. 5, p. 918–924, 2015.

SHYU, T. C. et al. A kirigami approach to engineering elasticity in nanocomposites through patterned defects. **Nature Materials**, v. 14, n. 8, p. 785–789, 2015.

SMITH, C. W.; GRIMA, J. N.; EVANS, K. E. Novel mechanism for generating auxetic

behaviour in reticulated foams: Missing rib foam model. **Acta Materialia**, v. 48, n. 17, p. 4349–4356, 2000.

SUI, N. et al. A lightweight yet sound-proof honeycomb acoustic metamaterial. **Applied Physics Letters**, 2015.

SURJADI, J. U. et al. Mechanical Metamaterials and Their Engineering Applications. **Advanced Engineering Materials**, v. 21, n. 3, p. 1–37, 2019.

VIEIRA, A. L.; LEAL, V.; SILVEIRA, M. E. Avaliação de Modelos Hiperelásticos na Simulação Numérica de um Suporte de Motor Automotivo. 2010.

WANG, H. et al. Unified parametric modeling of origami-based tube. **Thin-Walled Structures**, v. 133, n. September, p. 226–234, 2018a.

WANG, H. et al. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance. **Composite Structures**, v. 208, n. September 2018, p. 758–770, 2019.

WANG, T. et al. Elastic analysis of auxetic cellular structure consisting of re-entrant hexagonal cells using a strain-based expansion homogenization method. **Materials and Design**, v. 160, p. 284–293, 2018b.

WANG, Z. **Recent advances in novel metallic honeycomb structure Composites Part B: Engineering**, 2019.

WOJCIECHOWSKI, K. W. Two-dimensional isotropic system with a negative poisson ratio. **Physics Letters A**, v. 137, n. 1–2, p. 60–64, 1989.

XIAO, D. et al. Insight into the negative Poisson's ratio effect of metallic auxetic reentrant honeycomb under dynamic compression. **Materials Science and Engineering A**, v. 763, n. May, p. 138151, 2019.

XU, M. et al. Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 159, n. March, p. 43–57, 2019.

YAO, T. et al. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. **Composites Part B: Engineering**, v. 188, n. January, p. 107894, 2020.

ZADPOOR, A. A. Mechanical meta-materials. **Materials Horizons**, v. 3, n. 5, p. 371–381, 2016.

## 8 APÊNDICE

Tabela A1: Valores medidos da geometria dos corpos de prova de tração. Os pontos a-i referem-se aos pontos apresentados na Figura

### 34. Todos os valores em milímetros

	<i>Orientação 0°</i>						<i>Orientação 30°</i>						<i>Orientação 45°</i>					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
<i>Ponto a</i>	18,94	18,29	18,60	18,25	18,38	18,28	18,29	18,25	18,39	18,19	18,28	18,09	18,18	18,16	18,10	18,18	18,22	18,05
<i>Ponto b</i>	18,99	18,28	18,38	18,28	18,52	18,27	18,33	18,36	18,42	18,24	18,29	18,16	18,25	18,22	18,05	18,51	18,27	18,12
<i>Ponto c</i>	6,29	6,02	6,04	6,01	6,02	6,03	6,00	5,91	6,02	6,04	6,01	5,99	6,00	6,00	5,92	6,00	6,10	5,92
<i>Ponto d</i>	6,25	6,02	6,05	6,01	6,01	6,00	6,00	5,90	5,97	6,03	5,96	6,01	6,04	5,95	6,04	5,99	6,08	5,93
<i>Ponto e</i>	6,25	6,03	6,08	6,04	6,02	6,03	6,01	5,93	5,98	6,01	5,98	5,97	6,03	5,97	5,91	6,01	6,11	5,94
<i>Ponto f</i>	3,88	3,85	3,97	4,02	3,84	4,05	3,66	3,95	3,89	3,98	3,81	3,93	3,90	3,98	3,92	3,91	3,81	4,00
<i>Ponto g</i>	3,81	3,86	3,92	3,96	3,82	3,97	3,66	3,90	3,88	3,96	3,78	4,01	3,84	3,98	3,96	3,91	3,80	4,00
<i>Ponto h</i>	3,88	3,90	3,93	3,98	3,89	3,97	3,70	3,89	3,94	3,93	3,80	4,04	3,87	4,02	3,98	3,95	3,78	4,05
<i>Ponto i</i>	114,27	114,24	114,34	114,34	114,29	114,20	114,34	114,32	114,37	114,30	114,27	114,24	114,20	114,26	114,13	114,28	114,46	114,14
	<i>Orientação 60°</i>						<i>Orientação 90°</i>						<i>Orientação 0/90°</i>					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
<i>Ponto a</i>	18,18	18,16	18,18	18,14	18,14	18,10	18,30	18,36	18,25	18,07	18,05	18,36	18,11	18,05	18,25	18,16	18,20	8,13
<i>Ponto b</i>	18,26	18,22	18,45	18,11	18,35	18,49	18,43	18,48	18,36	18,15	18,08	18,50	18,14	18,13	18,29	18,32	18,28	18,18
<i>Ponto c</i>	6,03	6,04	6,02	5,99	6,00	5,95	6,04	6,07	6,01	5,96	6,00	6,00	5,93	6,03	6,01	5,98	5,91	6,01
<i>Ponto d</i>	5,99	6,01	6,01	6,01	5,99	5,95	6,04	6,11	6,01	6,02	5,99	5,96	5,96	5,98	5,99	5,98	5,93	5,98
<i>Ponto e</i>	5,99	6,03	5,98	5,99	6,02	5,93	6,05	6,12	6,04	6,01	6,02	6,01	5,99	5,99	6,01	6,02	5,95	5,97
<i>Ponto f</i>	4,00	3,92	3,78	3,94	3,86	3,76	3,86	3,79	4,00	3,98	4,01	4,08	3,89	3,99	3,96	3,93	3,93	3,84
<i>Ponto g</i>	4,02	3,96	3,90	3,91	3,86	3,81	3,82	3,85	3,96	4,02	4,03	4,04	3,91	3,98	4,01	3,94	3,95	3,89
<i>Ponto h</i>	4,03	3,93	3,80	3,94	3,80	3,83	3,83	3,87	3,92	4,07	4,05	4,01	3,93	4,01	3,98	3,96	3,98	3,87
<i>Ponto i</i>	114,13	114,13	114,46	114,20	114,24	114,26	114,46	114,29	114,18	114,33	114,12	114,24	114,20	114,13	114,12	114,23	114,21	114,14

**Tabela A1: Valores medidos da geometria dos corpos de prova de tração. Os pontos a-i referem-se aos pontos apresentados na Figura 34. Todos os valores em milímetros (continuação).**

	<i>Orientação ±30°</i>						<i>Orientação ±45°</i>						<i>Orientação ±60°</i>					
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
<i>Ponto a</i>	18,13	18,02	18,19	18,15	18,16	18,18	18,14	18,03	18,11	18,13	18,18	18,10	18,31	18,34	18,12	18,16	18,10	18,25
<i>Ponto b</i>	18,17	18,07	18,26	18,31	18,25	18,18	18,15	18,17	18,13	18,23	18,11	18,26	18,11	18,38	18,08	18,08	18,09	18,17
<i>Ponto c</i>	5,96	5,85	6,05	6,02	6,02	6,02	6,01	6,01	5,96	6,08	6,00	6,09	6,00	6,01	5,91	5,99	5,95	6,01
<i>Ponto d</i>	5,96	5,85	6,03	6,01	6,04	6,01	5,96	5,93	5,94	6,04	6,06	6,03	6,00	5,97	5,91	5,98	5,96	6,00
<i>Ponto e</i>	5,97	5,88	6,06	6,03	6,03	6,01	5,99	5,96	5,95	6,07	6,07	6,06	5,97	6,05	5,89	5,99	5,98	5,97
<i>Ponto f</i>	3,87	4,08	3,77	3,99	3,74	3,96	3,83	4,07	3,98	4,00	4,07	3,99	3,93	3,97	4,05	3,96	4,08	3,94
<i>Ponto g</i>	3,89	4,08	3,75	4,01	3,71	3,78	3,88	4,09	3,99	3,98	4,17	3,99	3,95	3,98	4,08	4,07	4,07	3,86
<i>Ponto h</i>	3,89	4,10	3,78	4,00	3,75	3,82	3,90	4,00	4,03	3,91	4,11	3,89	3,89	3,99	4,04	3,96	4,08	3,86
<i>Ponto i</i>	114,08	114,02	114,13	114,18	114,10	114,11	114,18	113,99	114,16	113,99	114,06	114,06	114,09	114,05	113,96	113,92	113,94	114,04



**Título: Tabela A2: Valores medidos da geometria dos corpos de prova de compressão. Os pontos a-g referem-se aos pontos apresentados na Figura 35. Todos os valores em milímetro.**

	<i>Orientação 0°</i>						<i>Orientação 90°</i>					
	<b>CPC1</b>	<b>CPC2</b>	<b>CPC3</b>	<b>CPC4</b>	<b>CPC5</b>	<b>CPC6</b>	<b>CPC1</b>	<b>CPC2</b>	<b>CPC3</b>	<b>CPC4</b>	<b>CPC5</b>	<b>CPC6</b>
<b><i>Ponto a</i></b>	12,91	12,88	12,87	12,88	12,86	12,86	12,63	12,72	12,91	12,93	12,60	12,74
<b><i>Ponto b</i></b>	12,89	12,83	12,87	12,92	12,92	12,95	12,71	12,71	12,86	12,87	12,64	12,78
<b><i>Ponto c</i></b>	12,92	12,76	12,84	12,88	12,85	12,86	12,67	12,75	12,95	13,04	12,65	12,76
<b><i>Ponto d</i></b>	12,78	12,70	12,80	13,05	12,71	12,88	12,78	12,77	12,57	12,67	12,76	12,38
<b><i>Ponto e</i></b>	12,81	12,75	12,91	13,08	12,82	12,94	12,94	12,80	12,72	12,72	12,79	12,63
<b><i>Ponto f</i></b>	12,77	12,72	12,84	13,07	12,69	12,88	12,77	12,72	12,68	12,61	12,76	12,63
<b><i>Ponto g</i></b>	25,85	25,60	25,66	26,10	25,62	25,73	25,42	25,42	25,66	25,53	25,57	25,58