

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA BIOMÉDICA**

**Modelagem, Fabricação e Validação de Perfis Geométricos em
Atuadores Pneumáticos Macios Impressos Para Aplicação em
Dispositivos Assistivos**

Severino Peixoto Nunes Netto

Uberlândia

2025

Severino Peixoto Nunes Netto

**Modelagem, Fabricação e Validação de Perfis Geométricos em
Atuadores Pneumáticos Macios Impressos Para Aplicação em
Dispositivos Assistivos**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Tecnologias Assistivas

Linha de Pesquisa: Engenharia Biomédica

Prof. Alcimar Barbosa Soares, PhD

Orientador

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

N972 Nunes Netto, Severino Peixoto, 1994-
2026 Modelagem, Fabricação e Validação de Perfis Geométricos em
Atuadores Pneumáticos Macios Impressos Para Aplicação em
Dispositivos Assistivos [recurso eletrônico] / Severino Peixoto
Nunes Netto. - 2026.

Orientador: Alcimar Barbosa Soares.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Doutorado em Engenharia Biomédica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.53>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia biomédica. I. Soares, Alcimar Barbosa, 1965-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Doutorado em
Engenharia Biomédica. III. Título.

CDU: 62:61

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Severino Peixoto Nunes Netto

Modelagem, Fabricação e Validação de Perfis Geométricos em Atuadores Pneumáticos Macios Impressos Para Aplicação em Dispositivos Assistivos

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Biomédica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Tecnologias Assistivas

Linha de pesquisa: Engenharia Biomédica

Uberlândia, 10 de Dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Alcimar Barbosa Soares, PhD - Orientador (UFU)

Prof. Dr. Danilo Alves Pinto Nagem - UFRN

Prof. Dr. Edgard Morya - IIN-ELS/ISD

Prof. Dra. Karilany Dantas Coutinho - UFRN

Prof. Dr. Claysson Bruno Santos Vimieiro - UFMG

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à família por todo suporte concedido nos últimos anos, principalmente à minha mãe Márcia Rosângela e meu irmão Jorge filho, além dos membros caninos Boris e Lock que sempre estiveram correndo (literalmente) do meu lado nos mais diversos momentos.

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Alcimar Soares que mesmo com todas as intempéries, minha chegada e saída de Uberlândia, com todas as mudanças e problemas continuou me apoiando, ensinando e foi parte essencial para que o final desse ciclo acontecesse. Ao meu coorientador Danilo Nagem que me acompanha desde a graduação em diferentes projetos e foi ponto de apoio quando retornei para continuar a pesquisa em terras natalenses.

Agradeço aos professores membros da banca por ajudarem com suas sugestões e apontamos visando melhorar o trabalho e contribuindo para o desenvolvimento futuro, além de todos os outros professores que fizeram parte da minha formação, tive a oportunidade de ser professor nos últimos dois anos e sei a mudança que podemos proporcionar na vida dos nossos alunos.

Agradeço aos meus amigos que felizmente são muitos então não posso citar o nome de todos aqui mas citando os não envolvidos com a Engenharia Biomédica: Ste, Kami, Tutu, João, Guigão, in memoriam Didi, entre outros. E aos que estão envolvidos com o curso ou o biolab de forma geral ressalto Caetano e Júlia. Agradeço aos amigos que fiz no trabalho também, principalmente no IFRN, aqui representados por Angelo, Formiga, Bruna, André, Lupa, entre outros.

Por fim, agradeço aos meus alunos que também me ensinaram muito para que eu pudesse chegar nesse momento hoje e decidisse o que eu realmente desejava para o futuro.

*“Who even needs alchemy, when I’ve got them! That’s the only thing I’ve ever been,
just a simple human that couldn’t save a little girl, not even with alchemy.”*

Edward Elric

Resumo

Nunes Netto, SP. *Modelagem, Fabricação e Validação de Perfis Geométricos em Atuadores Pneumáticos Macios Impressos Para Aplicação em Dispositivos Assistivos*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Dezembro 2025.

A robótica macia tem se destacado em reabilitação e assistência por favorecer conformidade, segurança no contato e adaptação à anatomia humana. Esta tese propõe o desenvolvimento de atuadores Pneumatic Network (PneuNet) impressos em TPU 95A por deposição de material fundido (FDM) e avalia sua aplicação em dispositivos assistivos, integrando modelagem hiperelástica, simulação em elementos finitos e validação experimental. Foram investigadas seis geometrias, combinando três perfis laterais de câmara (triangular, circular e retangular) e dois perfis longitudinais (reto e côncavo). As geometrias foram inicialmente triadas por simulação com o modelo de Ogden e, após a seleção do melhor desempenho, o atuador escolhido foi reavaliado para TPU 95A com o modelo de Yeoh, estimando flexão e *stress* sob pressurização interna. A geometria de paredes planas e perfil retangular selecionada foi então fabricada e validada experimentalmente quanto à deformação e à força na extremidade, por análise de vídeo e medições com célula de carga. As simulações reproduziram adequadamente as tendências experimentais, com erros médios de 3,8% para deslocamento linear e 13% para deflexão, além de forças de extremidade da ordem de 2,12 N para 200 kPa, mesmo com a maior rigidez do TPU 95A. Conclui-se que a simulação por elementos finitos pode apoiar a prototipagem e que atuadores PneuNet em TPU 95A são viáveis para futuros dispositivos assistivos e órteses ativas de baixo custo.

Palavras-chave: Robótica macia. Atuadores pneumáticos. PneuNet. Impressão 3D. Modelagem por elementos finitos.

Abstract

Nunes Netto, SP. *Modeling, Fabrication and Validation of Geometric Profiles in TPU 95A 3D-Printed Soft Pneumatic Actuators*. Doctorate's thesis - Federal University of Uberlândia, December 2025.

Soft robotics has increasingly been adopted for rehabilitation and assistive devices due to its compliance, safe physical interaction, and adaptability to human anatomy. This thesis proposes the development of Pneumatic Network (PneuNet) actuators fabricated in TPU 95A by fused deposition modeling (FDM) and evaluates their applicability to assistive devices by integrating hyperelastic modeling, finite element simulations, and experimental validation. Six geometries were investigated by combining three lateral chamber profiles (triangular, circular, and rectangular) with two longitudinal profiles (straight and concave). The geometries were first screened via numerical simulations using an Ogden hyperelastic model, and after selecting the best-performing design (flat walls and rectangular profile), the chosen actuator was re-evaluated for TPU 95A using the Yeoh model to estimate bending response and *stress* under internal pressurization. The selected geometry was then manufactured and experimentally validated in terms of deformation and tip force using video-based analysis and load-cell measurements. The simulations reproduced the experimental trends, with mean errors of 3.8% for linear displacement and 13% for bending angle, and tip forces on the order of 2.12 N at 200 kPa, despite the higher stiffness of TPU 95A. These results indicate that finite element modeling can support prototyping and that TPU 95A PneuNet actuators are feasible candidates for future low-cost assistive devices and active orthoses.

Keywords: Soft robotics. Pneumatic actuators. PneuNet. 3D printing. Finite element modeling.

Publicações

Os artigos listados abaixo são referentes aos trabalhos publicados que foram desenvolvidos ao longo do doutorado e referem-se ao tema da tese.

- **Netto, S. P. N.**, Spinelli, B., Medeiros, A., Soares, A. (2021). Choose a soft place and embark on a roadmap regarding soft robotics use in orthotics. Anais do XIII SEB - Simpósio de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Uberlândia. <https://doi.org/10.47573/XIIISEB.71>
- Holanda, L. J., Fernandes, A. P. M., De Amorim, J. A., Matias, A. M., **Nunes Netto, S. P.**, Nagem, D. A., Lindquist, A. R. (2021). Adaptive algorithms as control strategies of smart upper limb orthosis: a protocol for a systematic scoping review. *Frontiers in neuroscience*, 15, 660141.
- **Netto, S. N.**, Araújo, R. S., Jorenti, S. J., Bráulio, L. F., Nagem, D. A. P., Soares, A. B. (2022, October). Development of 3D Printing Soft Pneumatic Actuators for Rehabilitation. In *Latin American Conference on Biomedical Engineering* (pp. 668-680). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Bráulio, L. F., Jacyntho, S. J., **Netto. Severino Nunes**, Nagem, D. A. P., Soares, A. B. (2022, dezembro 27). Roadmap of soft robotics application in orthotics. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7491820>
- Jacyntho, S. J., **Netto, S. N.**, Bráulio, L., Nagem, D. A. P., Soares, A. B. (2022, dezembro 27). Proposal for application of soft robots in hand orthosis. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7489022>
- **Netto, S.**, Filho, G., Nagem, D., Soares, A. (2025). From Prototyping to Prediction: Finite Element Modeling of Additively Manufactured Soft Robotic Actuators. *Manuscrito (revisão)*.

Sumário

Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas e Quadros	xviii
Lista de Abreviaturas e Siglas	xix
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Problema de pesquisa	8
1.3 Objeto de estudo	10
1.4 Justificativa	12
1.5 Hipótese	12
1.6 Objetivos	13
1.6.1 Objetivo geral	13
1.6.2 Objetivos específicos	13
2 Fundamentação Teórica	15
2.1 Robótica macia	15
2.1.1 Conceitos e diferenças em relação à robótica rígida	15
2.1.2 Materiais típicos	18
2.1.3 Tipos de atuadores em robótica macia	19
2.1.3.1 Atuadores pneumáticos	22
Atuadores pneumáticos tipo PneuNet	25
Princípio de funcionamento	26
Geometrias típicas e parâmetros de projeto	27
Aplicações	30

2.2	Impressão 3D de materiais flexíveis	33
2.2.1	Tecnologias de manufatura aditiva aplicáveis	34
2.2.2	Propriedades do TPU usado em robótica macia	36
2.2.3	Desafios para impressão de TPU por FDM	37
2.2.4	Parâmetros de impressão relevantes	38
2.3	Simulação por elementos finitos de atuadores macios	40
2.3.1	Formulação geral do MEF para materiais hiperelásticos	41
2.3.2	Modelagem geométrica de atuadores PneuNet em softwares FEM	43
2.3.3	Estratégias de malha em atuadores macios	44
2.3.4	Condições de contorno típicas	45
2.3.5	Exemplos de estudos da literatura com foco em PneuNet	46
2.4	Síntese crítica da literatura e lacunas	47
2.4.1	O que já foi feito em PneuNets com impressão 3D	47
2.4.2	O que já foi feito especificamente com TPU em FDM	48
2.4.3	O que já foi feito com modelo Yeoh em atuadores macios	49
2.4.4	Lacunas identificadas que a tese pretende abordar	50
3	Proposta de desenvolvimento e avaliação de atuadores pneunets impres-	
	sos em 3D	53
3.1	Materiais e Métodos	53
3.1.1	Avaliação de modelos de perfis para atuadores pneumáticos	53
3.1.2	Modelagem numérica por elementos finitos	55
3.1.2.1	Modelo geométrico	56
3.1.2.2	Propriedades Mecânicas do TPU	57
3.1.2.3	Condições de contorno e carregamento	58
3.1.3	Processo de fabricação por impressão 3D	60
3.1.3.1	Equipamentos e materiais	60
	Impressora 3D utilizada	60
	Filamento TPU	61
3.1.3.2	Parâmetros de impressão adotados	62
3.1.3.3	Pós-processamento	64
3.1.4	Setup experimental do atuador	64
3.1.4.1	Sistema de pressurização	64

3.1.4.2	Instrumentação de deformação e força	65
3.1.4.3	Protocolo experimental	67
3.1.4.4	Análise de Dados - Deflexão	68
3.1.4.5	Análise de Dados - Força	68
4	Resultados	69
4.1	Primeiro ciclo de modelagem dos atuadores e escolha do perfil a ser validado	69
4.1.1	Atuador com perfil retangular e paredes planas	71
4.1.2	Atuador com perfil circular e paredes planas	75
4.1.3	Atuador com perfil triangular e paredes planas	79
4.1.4	Atuador de perfil retangular e paredes curvadas	83
4.1.5	Atuador de perfil circular e paredes curvadas	87
4.1.6	Atuador de perfil triangular e paredes curvadas	91
4.1.7	Avaliação dos resultados da modelagem numérica e seleção de perfil para fabricação do atuador	95
4.2	Fabricação dos atuadores	98
4.3	Simulações computacionais do perfil escolhido	101
4.3.1	Simulação de Deflexão Livre	102
4.3.2	Simulação de Força na Extremidade	105
4.3.3	Simulação de Força de Prensão	106
4.4	Validação dos atuadores	108
4.4.1	Validação de Deflexão Livre	108
4.4.2	Validação de Força na Extremidade	111
4.4.3	Framework de utilização de PneuNets em TPU 95A para dispo- sitivos assistivos	113
5	Discussão	115
5.1	Modelagem e Simulação dos Diferentes Perfis Geométricos	115
5.2	Fabricação dos atuadores	117
5.3	Validação dos atuadores	120
5.3.1	Quanto à deformação	120
5.3.2	Quanto à força gerada	122

SUMÁRIO

xii

6 Conclusão

126

Referências Bibliográficas

129

Lista de Figuras

1.1	Robôs macios biomédicos sob a perspectiva dos materiais. Níveis de biomimética e biocompatibilidade são comparados. Adaptado de (Cianchetti <i>et al.</i> , 2018).	2
1.2	Exemplo de atuador PneuNet. Adaptado de (Holland <i>et al.</i> , 2014).	4
2.1	Soluções robóticas classificadas de acordo com a rigidez estrutural e com suas características de precisão, força de saída e graus de liberdade. Adaptado de (Chen, 2020).	17
2.2	Visão geral de mecanismos de atuação empregados em atuadores macios e dispositivos robóticos para reabilitação e assistência. As categorias incluem atuadores acionados por fluido, motores elétricos acoplados a estruturas flexíveis, reações químicas, elastômeros dielétricos, ligas com memória de forma, elastômeros magnetoativos, elastômeros de cristal líquido e materiais piezelétricos. Adaptado de (Pan <i>et al.</i> , 2022).	22
2.3	Exemplos de atuadores pneumáticos macios classificados segundo o tipo de movimento predominante (extensão, contração, flexão e torção) e a estratégia de reforço estrutural. A ilustração inclui músculos pneumáticos do tipo McKibben, atuadores com bainhas têxteis, PneuNets e atuadores reforçados com fibras. Adaptado de (Xavier; Tawk <i>et al.</i> , 2022).	25
2.4	Parâmetros geométricos de um atuador PneuNet de múltiplas câmaras, incluindo largura e altura totais, dimensões das câmaras individuais e espessuras das paredes interna, superior e inferior. Adaptado de Wang <i>et al.</i> (Wang, T. <i>et al.</i> , 2018).	30

2.5 Exemplo de luva macia para reabilitação da mão baseada em atuadores pneumáticos tipo PneuNet, com os atuadores posicionados ao longo dos dedos para gerar flexão durante o inflamento. Adaptado de Wang et al. (Wang, F. et al., 2022).	32
2.6 Exemplo de exoesqueleto macio para mão e punho com atuadores pneumáticos do tipo PneuNet integrados a uma estrutura vestível, utilizado para assistência e reabilitação de movimentos em membros superiores. Adaptado de Tejada et al. (Tejada et al., 2024) e Ridremont et al. (Ridremont et al., 2024).	33
3.1 Curva de tensão e deformação para o TPU 85A (Ćurković; Jambrečić, 2020).	58
3.2 Exemplo do engaste, fixação de uma face como Fixed Support no software Ansys.	59
3.3 Exemplo da área de paredes internas onde a pressão é uniformemente aplicada no software Ansys.	59
3.4 Impressora 3D FDM modelo Ender 3 V2 utilizada na fabricação dos atuadores pneumáticos macios.	61
3.5 Aparato experimental utilizado para medição de deformação.	66
3.6 Aparato experimental utilizado para medição de força na extremidade do atuador.	67
4.1 Conjunto das seis configurações geométricas propostas para avaliação no primeiro ciclo, combinando três perfis laterais de câmaras (retangular, circular e triangular) e dois perfis longitudinais (reto e côncavo).	70
4.2 Vista lateral do atuador pneumático macio selecionado ao final do primeiro ciclo para validação experimental, com indicação das cotas externas de comprimento total e altura.	71
4.3 A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.	72
4.4 Resultados de deflexão para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas a 160kPa.	72
4.5 Resultados de stress para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas a 160kPa.	73

4.6 Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas.	73
4.7 Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes planas.	74
4.8 Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes planas.	75
4.9 A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.	76
4.10 Resultados de deflexão para o atuador com câmaras circulares e paredes planas a 160kPa.	76
4.11 Resultados de stress para o atuador com câmaras circulares e paredes planas a 160kPa.	77
4.12 Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras circulares e paredes planas.	77
4.13 Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil circular e paredes planas.	78
4.14 Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil circular e paredes planas.	79
4.15 A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.	80
4.16 Resultados de deflexão para o atuador com câmaras triangulares e paredes planas a 160kPa.	80
4.17 Resultados de stress para o atuador com câmaras triangulares e paredes planas a 160kPa.	81
4.18 Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras triangulares e paredes planas.	81
4.19 Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes planas.	82
4.20 Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes planas.	83
4.21 A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.	84
4.22 Resultados de deflexão para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvadas a 160kPa.	84

4.23 Resultados de stress para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvadas a 160kPa.	85
4.24 Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvadas.	86
4.25 Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes curvadas.	86
4.26 Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes curvadas.	87
4.27 A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.	88
4.28 Resultados de deflexão para o atuador com câmaras circulares e paredes curvadas a 160kPa.	88
4.29 Resultados de stress para o atuador com câmaras circulares e paredes curvadas a 160kPa.	89
4.30 Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras circulares e paredes curvadas.	89
4.31 Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil circular e paredes curvadas.	90
4.32 Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil circular e paredes curvadas.	91
4.33 A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.	92
4.34 Resultados de deflexão para o atuador com câmaras triangulares e paredes curvadas a 160kPa.	92
4.35 Resultados de stress para o atuador com câmaras triangulares e paredes curvadas a 160kPa.	93
4.36 Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes curvadas.	94
4.37 Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes curvadas.	94
4.38 Atuadores fabricados com métodos de selagem.	98
4.39 Modelo com perfil retangular e paredes planas impresso.	100
4.40 Modelo com perfil retangular e paredes curvadas impresso.	100

4.41 Vistas com cotas do modelo impresso para validação com região de entrada de ar alongada e maciça para fixação em ensaios.	101
4.42 Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 50kPa.	103
4.43 Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 100kPa.	103
4.44 Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 150kPa.	104
4.45 Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 200kPa.	104
4.46 Simulação de força na extremidade com atuador a 200kPa.	106
4.47 Simulação de força de preensão com atuador a 1000kPa.	107
4.48 Ângulo de deflexão do atuador a 50 kPa.	109
4.49 Ângulo de deflexão do atuador a 100 kPa.	110
4.50 Ângulo de deflexão do atuador a 150 kPa.	110
4.51 Ângulo de deflexão do atuador a 200 kPa.	111
4.52 Coleta de força do atuador a 200kpa	112
4.53 Valores de força na extremidade (Eixo Z) para o experimento com e sem deslocamento da célula de carga.	112
4.54 Valores de força na extremidade (Eixo Z) para simulação e experimento.	113
4.55 Fluxo proposto (<i>framework</i>) para utilização de atuadores PneuNet em TPU 95A em dispositivos assistivos, integrando definição da aplicação, fabricação, simulação, testes, decisão, otimização e validação.	114

Lista de Tabelas e Quadros

2.1	Parâmetros típicos de impressão FDM para TPU e sua influência na fabricação de atuadores pneumáticos macios.	52
3.1	Valores de parâmetros para modelo Yeoh (adaptado de (Schreiber <i>et al.</i> , 2025)).	56
3.2	Parâmetros mecânicos básicos do filamento NinjaFlex, fornecidos pelo fabricante. (NinjaTek, 2016)	57
3.3	Parâmetros de impressão FDM adotados para a fabricação dos atuadores em TPU.	63
4.1	Comparação qualitativa entre perfis laterais de câmara para aplicações em reabilitação.	96
4.2	Comparação qualitativa entre perfis longitudinais para aplicações em reabilitação.	97
4.3	Comparação entre deslocamento experimental e simulado em função da pressão.	109
4.4	Comparação entre deflexão experimental e simulada em função da pressão.	111
5.1	Tabela de Pressão e Força dos Atuadores	123

Lista de Abreviaturas e Siglas

CAD	Computed Aided Design
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Método dos elementos finitos
FFF	Fused Filament Fabrication
PDMS	Polidimetilsiloxano
PneuNet	Pneumatic Network Actuator
TPU	Termoplástico de poliuretano

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, sistemas robóticos têm sido progressivamente incorporados a hospitais, clínicas e outros ambientes de cuidado em saúde, abrangendo desde plataformas cirúrgicas e dispositivos de reabilitação até robôs de apoio logístico e robôs sociais de companhia para idosos e pessoas com doenças crônicas (Jiryaei; Jafar-pisheh, 2024; Bradwell *et al.*, 2019). Tal expansão é motivada não apenas pela busca por maior reprodutibilidade dos procedimentos e pela redução do esforço físico dos profissionais da saúde, mas também pela necessidade de ampliar as possibilidades de reabilitação, monitoramento e suporte (físico, cognitivo e emocional) a indivíduos com comprometimento motor ou outras vulnerabilidades associadas ao envelhecimento e a condições neurológicas (Banyai; Brişan, 2024).

No contexto industrial, a robótica rígida consolidou-se como a principal solução para automação de linhas de produção, em que manipuladores realizam tarefas repetitivas, perigosas ou que exigem alta precisão, com milhões de unidades em operação em fábricas ao redor do mundo (International Federation of Robotics, 2024). No entanto, quando o objetivo é projetar dispositivos assistivos e outros sistemas robóticos destinados a interagir fisicamente com o corpo humano, em ambientes clínicos ou domiciliares muitas vezes pouco estruturados, essa abordagem tradicional apresenta limitações importantes: necessidade de barreiras de segurança e esquemas complexos de detecção de colisão, risco de desalinhamento articular e desconforto durante o uso prolongado, além de baixa capacidade de acomodar variações anatômicas e

movimentos naturais (Morris *et al.*, 2023; Cianchetti *et al.*, 2018; Thalman; Artemiadis, 2020). Essas restrições têm impulsionado o interesse por arquiteturas intrinsecamente complacentes, como a robótica macia (*soft robotics*), especialmente em órteses, exoesqueletos e demais tecnologias vestíveis de assistência ao movimento.

Existem diversas aplicações de robôs macios utilizados em cirurgia, terapia, administração de medicamentos, reabilitação e assistência, bem como robôs que imitam o corpo humano em diferentes níveis de biomimética. Nessas aplicações, características como biocompatibilidade, capacidade de adaptação e segurança em caso de contato involuntário com o paciente são centrais. A literatura recente destaca que materiais, arquiteturas e modos de atuação podem ser classificados em graus de biomimeticidade e biocompatibilidade, como ilustrado na Figura 1.1 (Cianchetti *et al.*, 2018).

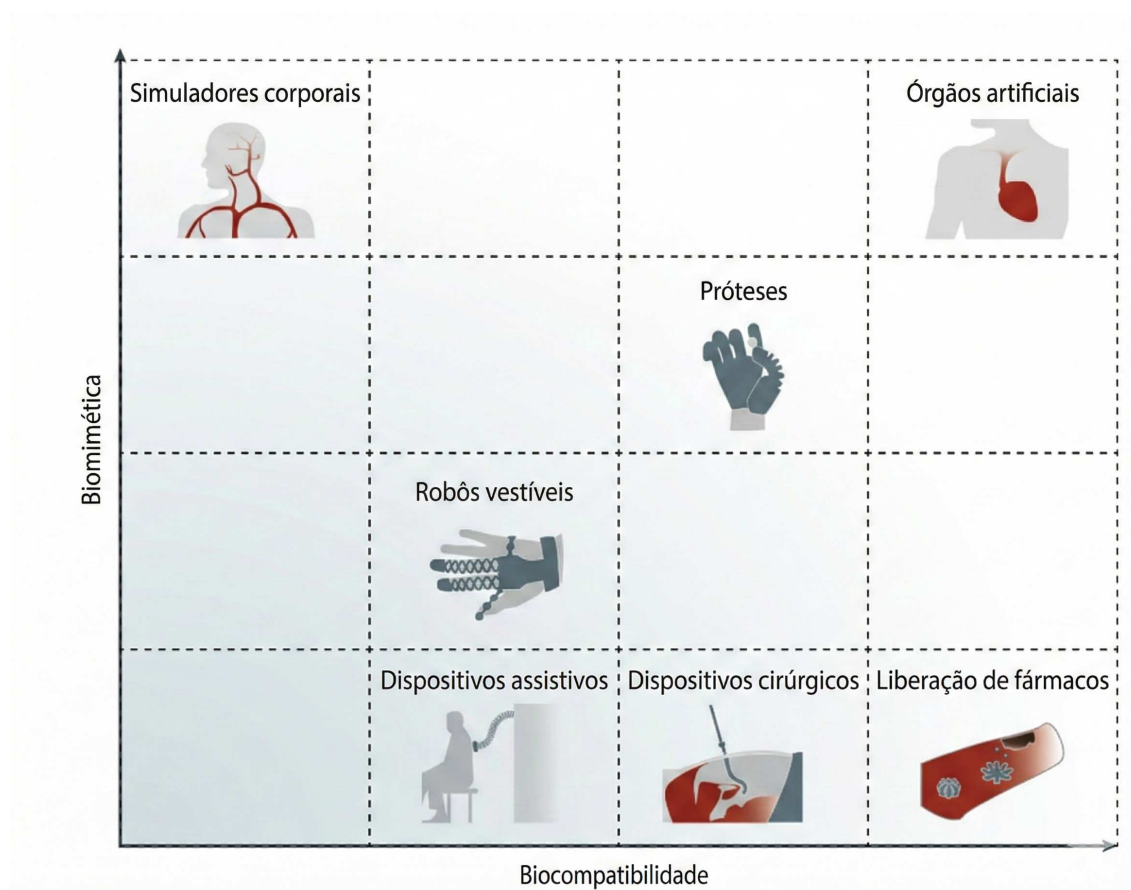


Figura 1.1: Robôs macios biomédicos sob a perspectiva dos materiais. Níveis de biomimética e biocompatibilidade são comparados. Adaptado de (Cianchetti *et al.*, 2018).

A emergência da robótica macia responde diretamente a essas limitações ao empregar materiais e estruturas com elevada conformabilidade, grande capacidade de

deformação e resposta mecânica não linear. Embora muitas arquiteturas incorporem camadas rígidas ou elementos de contenção para limitar deformações indesejadas, esses sistemas tiram proveito de regiões intrinsecamente complacentes do corpo robótico para redistribuir tensões, absorver impactos e adaptar, de forma controlada, a forma do atuador à superfície de contato. Revisões recentes mostram que a robótica macia vem ganhando destaque em aplicações que incluem manipulação delicada de objetos, dispositivos vestíveis, reabilitação motora e interação físico-social com humanos, consolidando um novo paradigma de projeto em que o corpo do robô e o seu controlador são concebidos de forma integrada (Rus; Tolley, 2015; Chu; Patterson, 2018; Wang, D. *et al.*, 2023).

Entre as diferentes abordagens de projeto em robótica macia, observa-se uma diversidade de tecnologias de atuação, que incluem atuadores pneumáticos e hidráulicos baseados em câmaras internas, polímeros eletroativos, ligas com memória de forma, materiais magnetoativos, sistemas térmicos e atuadores de cabo ou tendão integrados a estruturas complacentes (Polygerinos; Correll *et al.*, 2017; Trivedi *et al.*, 2008). Cada uma dessas estratégias apresenta compromissos específicos em termos de força gerada, faixa de deformação, velocidade de resposta, necessidade de condicionamento de potência e complexidade de controle, o que faz com que sua adoção em dispositivos vestíveis e assistivos dependa de requisitos como conforto, material utilizado, massa total, eficiência energética e segurança na interação com o usuário (Cianchetti *et al.*, 2018; Laschi; Mazzolai; Cianchetti, 2016). Nesse cenário, os atuadores pneumáticos, principalmente os do tipo Pneumatic Network (PneuNet) observados na figura 1.2, destacam-se pela combinação entre grande amplitude de deformação, integração relativamente simples com estruturas flexíveis e disponibilidade de componentes comerciais de fornecimento e controle de ar comprimido, o que explica sua predominância em diversos protótipos de garras, órteses e exoesqueletos macios descritos na literatura (Gu *et al.*, 2021).

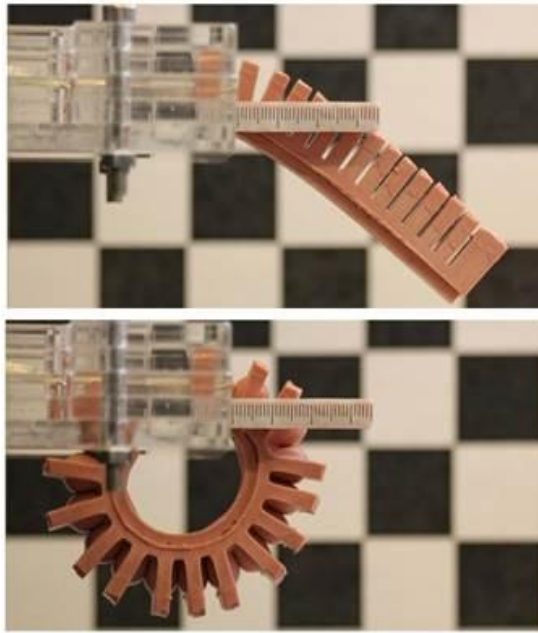


Figura 1.2: Exemplo de atuador PneuNet. Adaptado de (Holland *et al.*, 2014)

O avanço recente das tecnologias de manufatura aditiva ampliou o uso de atuadores PneuNet possibilitando a fabricação de estruturas pneumáticas complexas em uma única estrutura, sem a necessidade de moldes e pós processamento. Em particular, a impressão 3D por deposição de filamento fundido (*Fused Deposition Modeling*, FDM) com materiais flexíveis, como poliuretanos termoplásticos (TPU), tem se mostrado uma alternativa promissora para a produção de atuadores macios (Gul *et al.*, 2018). Tal técnica combina facilidade no acesso, custo baixo e possibilidade de personalização rápida. Estudos recentes demonstram que é possível imprimir atuadores pneumáticos estanques em TPU, inclusive com integração de canais internos, conectores de ar e até elementos sensoriais, desde que parâmetros como espessura de parede, densidade de preenchimento, temperatura de extrusão e estratégia de deposição sejam cuidadosamente controlados (Stano; Arleo; Percoco, 2020; Hohimer *et al.*, 2020; Georgopoulou *et al.*, 2021; SantÁнна *et al.*, 2025; Landgraf *et al.*, 2021). Esse aumento de complexidade geométrica e de liberdade de projeto traz, por outro lado, um desafio importante de modelagem e dimensionamento. Atuadores PneuNet impressos em TPU operam sob grandes deformações, com comportamento não linear e dependente tanto das propriedades do próprio material como de propriedades relacionadas ao processo de impressão (Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Sendo assim, é necessário que o desenvolvimento desses dispositivos deixe de depender exclusiva-

mente de um processo empírico de tentativa e erro. Observa-se assim, a necessidade da utilização de modelos constitutivos capazes de representar adequadamente o comportamento hiperelástico do material e de modelos numéricos que reproduzam o acoplamento entre a pressurização interna e a performance dos dispositivos.

Apesar do avanço significativo em robótica macia e em atuadores pneumáticos, a etapa de projeto ainda é, em grande parte, guiada por abordagens empíricas baseadas em prototipagem sucessiva e ajustes de geometria por tentativa e erro. Revisões recentes apontam que, embora o número de aplicações esteja crescendo, a integração sistemática entre modelagem numérica, caracterização de materiais e fabricação ainda é um ponto crítico para que esses dispositivos possam ser projetados com o nível de previsibilidade esperado em estruturas mecânicas convencionais (Rus; Tolley, 2015; Xavier; Tawk *et al.*, 2022; Yasa *et al.*, 2023; Hasanshahi *et al.*, 2024). Em particular, a combinação entre atuadores pneumáticos macios, manufatura aditiva e modelos constitutivos hiperelásticos calibrados experimentalmente é frequentemente citada como uma fronteira de pesquisa que precisa ser melhor explorada para reduzir custo, tempo de desenvolvimento e incerteza de desempenho.

A modelagem por elementos finitos tem se consolidado como uma ferramenta central para o projeto de atuadores fluidicamente acionados, permitindo prever campos de deformação, tensões internas e resposta global antes da fabricação física do dispositivo (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Tawk; Alici, 2020). Ainda assim, grande parte dos trabalhos foca em atuadores moldados em silicones ou em geometrias de referência relativamente simples, com propriedades de material frequentemente obtidas de bancos de dados genéricos ou de ensaios em corpos de prova que não refletem o processo real de fabricação do atuador. Quando o foco se desloca para atuadores totalmente impressos em 3D, fabricados por FDM ou FFF, o acoplamento entre processo de impressão, propriedades mecânicas efetivas e resposta simulada torna-se mais complexo, e ainda são poucos os estudos que integram todas essas dimensões de maneira consistente (Zolfagharian *et al.*, 2020; Gonzalez *et al.*, 2022; Ambaye *et al.*, 2025), sendo assim um dos produtos dessa tese é um framework para a construção de PneuNets em TPU 95A para dispositivos assistivos integrando os processos citados.

No caso específico do TPU impresso, diversos trabalhos mostram que as propri-

idades mecânicas desse material dependem de forma marcante de parâmetros de impressão, como padrão de *infill*, temperatura de extrusão e orientação de deposição, o que impacta diretamente a resposta em grandes deformações (Landgraf *et al.*, 2021; Gallup, L. *et al.*, 2024; Pires, 2023). Ainda assim, observa-se que muitos modelos numéricos de atuadores pneumáticos impressos utilizam ajustes de material que não são explicitamente associados ao processo de impressão ou não exploram de maneira sistemática a capacidade de generalização desses modelos quando aplicados a geometrias distintas (Buonamici; Puggelli *et al.*, 2024; Gallup, L. K. *et al.*, 2021).

Outro aspecto relevante diz respeito à escolha do modelo hiperelástico. Revisões sobre modelagem de atuadores fluidicamente acionados destacam que funções de energia de deformação como Neo Hooke, Mooney Rivlin, Ogden e Yeoh são amplamente empregadas, com diferentes compromissos entre complexidade paramétrica, custo de calibração e capacidade de prever múltiplos modos de deformação (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Qin *et al.*, 2024). Resultados compilados na literatura indicam que o modelo de Yeoh e Ogden apresentam desempenho particularmente adequado em situações de grandes deformações, com boa capacidade de ajuste em faixas extensas de alongamento usando, em muitos casos, apenas dados de tração uniaxial, ao mesmo tempo em que mantém um número relativamente reduzido de parâmetros (Yeoh, 1993; Shahzad *et al.*, 2015; Xavier; Fleming; Yong, 2021). Apesar disso, ainda são limitados os trabalhos que investigam de forma explícita o uso do modelo de Yeoh aplicado a atuadores fabricados com TPU 95A, sobretudo em famílias de geometrias com variação sistemática de parâmetros de projeto.

Do ponto de vista geométrico, diversos estudos mostram que pequenas alterações na arquitetura interna de atuadores pneumáticos macios podem produzir mudanças significativas em curvatura, força na extremidade, histerese e eficiência de conversão entre pressão e deformação (Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Mehrdad *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024; Slim *et al.*, 2025). Ainda assim, muitas investigações se concentram em uma única geometria ou em poucas variações, com validações experimentais limitadas em faixa de pressão ou em número de amostras. Faltam, portanto, estudos em que uma família de atuadores, compartilhando o mesmo material e o mesmo processo de fabricação, seja analisada de forma integrada, de modo a verificar se um conjunto único de parâmetros hiperelásticos é capaz de descrever, com erro con-

trolado, o comportamento de múltiplas geometrias e, ao mesmo tempo, evidenciar o efeito de modificações geométricas no desempenho global.

Neste contexto, a escolha do TPU 95A como material estrutural e do modelo hiperelástico de Yeoh como representação constitutiva do comportamento em grandes deformações encontra justificativa direta nas lacunas identificadas, além da padronização do processo de fabricação. O TPU 95A impresso por FDM oferece uma plataforma acessível, reprodutível e amplamente disseminada para os pesquisadores brasileiros para a fabricação de atuadores macios, com possibilidade de explorar ajustes finos de rigidez e resposta mecânica por meio de parâmetros de impressão (SantÁнна *et al.*, 2025; Hohimer *et al.*, 2020; Georgopoulou *et al.*, 2021). O modelo de Yeoh, por sua vez, fornece um compromisso atraente entre simplicidade e capacidade de representação em grandes deformações, com evidências de desempenho robusto em diferentes elastômeros e indicação de boa adequação em cenários de alta deformação típicos de atuadores pneumáticos (Yeoh, 1993; Landgraf *et al.*, 2021; Xavier; Fleming; Yong, 2021). Integrar essas duas escolhas em um fluxo que abrange caracterização experimental, calibração do modelo, simulação por elementos finitos e validação em uma família de atuadores PneuNet impressos em TPU atende diretamente às recomendações de revisões recentes sobre projeto e análise de robôs macios, que apontam a necessidade de métodos mais sistemáticos, baseados em modelos físicos e com validação experimental rigorosa (Tawk; Alici, 2020; Hasanshahi *et al.*, 2024; Zolfagharian *et al.*, 2020).

Dessa forma, o presente trabalho se insere na interseção entre robótica macia, manufatura aditiva e modelagem numérico experimental. Ao focalizar atuadores pneumáticos tipo PneuNet fabricados em TPU por impressão 3D e modelados com o comportamento hiperelástico descrito pelo modelo de Ogden e Yeoh, busca-se contribuir para o desenvolvimento de metodologias de projeto, simulação e validação que tornem o uso desses dispositivos mais previsível, reprodutível e acessível em aplicações futuras, tanto em contextos industriais quanto em dispositivos assistivos e de reabilitação.

1.2 Problema de pesquisa

Embora a literatura recente aponte os atuadores pneumáticos do tipo PneuNet como uma solução promissora para aplicações em robótica macia, ainda há uma dependência significativa de processos empíricos de projeto baseados em tentativa e erro, em especial quando se consideram dispositivos fabricados por manufatura aditiva. Em muitos estudos clássicos, os atuadores são produzidos em elastômeros moldados, com geometrias relativamente padronizadas e condições de operação limitadas, o que facilita a reprodução experimental, mas nem sempre representa a diversidade de configurações necessárias para aplicações reais (Rus; Tolley, 2015; Gu *et al.*, 2021; Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Quando se migra para atuadores PneuNet impressos em 3D, com poliuretanos termoplásticos e variações finas de parâmetros geométricos, surgem desafios adicionais de modelagem que ainda não estão plenamente resolvidos (Stano; Arleo; Percoco, 2020; Sant’Anna *et al.*, 2025).

No contexto específico da impressão 3D por FDM com TPU, o processo de fabricação introduz anisotropias, descontinuidades locais e dependência das propriedades mecânicas em relação a parâmetros como orientação de deposição, espessura de parede e densidade de preenchimento. Nessas situações para estimar propriedades mecânicas pode-se realizar ensaios mecânicos com peças impressas com as mesmas configurações do projeto ou como utilizado nessa tese observar parâmetros já evidenciados na literatura (Schreiber *et al.*, 2025).

Estudos recentes têm mostrado que o comportamento hiperelástico de termoplásticos flexíveis impressos camada a camada pode diferir significativamente daquele observado em corpos de prova moldados ou maciços, exigindo uma caracterização mecânica dedicada e o ajuste de modelos constitutivos específicos (Landgraf *et al.*, 2021). Apesar disso, muitos modelos numéricos de atuadores PneuNet ainda assumem propriedades homogêneas e isotrópicas, frequentemente adaptadas de dados de materiais comerciais ou de ensaios em condições idealizadas, o que limita a capacidade preditiva desses modelos quando aplicados a atuadores reais impressos em 3D.

Outro ponto crítico refere-se à influência da geometria interna do atuador sobre sua resposta pressão–deformação. Variações no número de câmaras, nas dimensões e na forma das cavidades, na espessura das paredes, no espaçamento entre câmaras

e na presença de camadas de restrição podem alterar de forma expressiva a curvatura, o deslocamento da extremidade e a distribuição de tensões ao longo do atuador. Trabalhos recentes demonstram que a geometria interna modula de forma marcante a resposta dinâmica, a histerese e a eficiência de conversão energia–deformação em atuadores pneumáticos macios (Gu *et al.*, 2021; Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Mehrdad *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). Ainda que existam estudos analíticos, numéricos e experimentais que relacionam parâmetros geométricos à resposta mecânica de PneuNets, grande parte deles considera apenas uma ou poucas configurações geométricas de referência, ou não realiza validação experimental sistemática em um intervalo amplo de pressurização, o que mantém o projeto dependente de ciclos demorados de prototipagem (Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Patel *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2025; Slim *et al.*, 2025). Na prática, essa limitação impacta diretamente o desenvolvimento de dispositivos assistivos, garras adaptativas ou módulos de reabilitação que dependem de desempenho bem controlado.

Do ponto de vista da modelagem de material, modelos hiperelásticos baseados em funções de energia de deformação, como os propostos por Yeoh e outros autores, têm se mostrado adequados para representar elastômeros submetidos a grandes deformações, inclusive em termoplásticos flexíveis (Yeoh, 1993; Shahzad *et al.*, 2015; Landgraf *et al.*, 2021). No entanto, ainda é pouco explorado na literatura o quanto um conjunto de parâmetros obtido a partir do uso de TPU 95A, fabricados com um processo representativo do que é usado para os atuadores, é capaz de prever com erro controlado o comportamento global de atuadores PneuNet com geometrias diferentes, submetidos a pressurizações internas em regime quase estático.

Diante desse cenário, o problema de pesquisa deste trabalho pode ser enunciado da seguinte forma: Há uma carência de metodologias integradas de projeto, fabricação por manufatura aditiva, simulação por elementos finitos e validação experimental que permitam prever, de modo quantitativo e com base em parâmetros fisicamente significativos, o comportamento de atuadores pneumáticos do tipo PneuNet fabricados em TPU 95A por impressão 3D e sua viabilidade para aplicação em dispositivos assistivos, considerando tanto as particularidades do material hiperelástico quanto o efeito de diferentes geometrias internas. Investigar em que medida um modelo numérico que incorpora um comportamento hiperelástico do tipo Yeoh, é capaz de reproduzir

a relação entre pressão interna, deformação e força gerada em atuadores PneuNet fabricados com TPU 95A por impressão 3D.

1.3 Objeto de estudo

O objeto central deste trabalho é uma família de atuadores pneumáticos do tipo *Pneumatic Network* (PneuNet), projetados para operar em regime grandes deformações e fabricados por impressão 3D utilizando poliuretano termoplástico (TPU) do tipo 95A como material estrutural principal. Esses atuadores pertencem à classe dos atuadores pneumáticos macios largamente explorados em robótica macia, nos quais uma rede de câmaras internas interligadas se expande sob pressurização, gerando movimentos de flexão, alongamento ou combinação de ambos, a depender da geometria e das camadas de restrição adotadas (Rus; Tolley, 2015; Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Ao concentrar o estudo em PneuNets, este trabalho se insere em uma linha de pesquisa consolidada que já demonstrou o potencial desses atuadores em tarefas de manipulação delicada, reabilitação e interação segura com humanos (Gu *et al.*, 2021; Stano; Arleo; Percoco, 2020; Zhang *et al.*, 2024).

Do ponto de vista de fabricação, os atuadores considerados são concebidos para produção monolítica por manufatura aditiva, utilizando a técnica de deposição de filamento fundido (*Fused Filament Fabrication*, FFF) com filamentos de TPU 95A. Essa escolha elimina a necessidade de moldes, etapas de desmolde e colagem de componentes, reduz a quantidade de operações manuais na construção do atuador e facilita a rápida iteração de geometrias alternativas diretamente a partir de modelos CAD (Stano; Arleo; Percoco, 2020; Sant'Anna *et al.*, 2025). Diversos estudos recentes indicam que o TPU (em todas as durezas) impresso apresenta combinação favorável de flexibilidade, resistência mecânica, recuperação elástica e adesão entre camadas, o que permite a fabricação de atuadores pneumáticos estanques, compatíveis com pressurizações repetidas e com potencial de integração de funções sensoriais no próprio corpo do atuador (Hohimer *et al.*, 2020; Georgopoulou *et al.*, 2021; Landgraf *et al.*, 2021). Nesse contexto, o TPU aparece como um material particularmente interessante por aliar disponibilidade comercial, compatibilidade com impressoras 3D amplamente difundidas em ambientes de pesquisa e possibilidade de ajuste de rigidez efetiva por

meio de parâmetros de impressão, como *infill*, altura de camada e orientação de deposição.

Além da definição do material e do processo de fabricação, este trabalho toma como objeto de estudo não apenas uma única configuração de atuador, mas um conjunto de geometrias internas de PneuNets que compartilham o mesmo material e o mesmo processo construtivo. Essa abordagem permite investigar de forma sistemática em que medida um mesmo modelo constitutivo é capaz de descrever o comportamento pressão–deformação de geometrias distintas, o que é particularmente relevante para o projeto de dispositivos que exijam curvas de atuação específicas ou perfis de rigidez diferenciados (Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Mehrdad *et al.*, 2023; Slim *et al.*, 2025).

No âmbito da modelagem de material, o comportamento mecânico do TPU é representado por meio de diversos modelos hiperelásticos, na etapa de validação o modelo mais adequado mostra-se como o modelo de Yeoh, formulado a partir de uma função de energia de deformação dependente do primeiro invariante do tensor de deformação. O modelo de Yeoh foi originalmente proposto para descrever borrachas quase incompressíveis sob grandes deformações e, desde então, tem demonstrado boa capacidade de ajuste em ensaios de tração, compressão e cisalhamento, com um número relativamente reduzido de parâmetros quando comparado a modelos mais gerais, como o de Ogden (Yeoh, 1993). Estudos de caracterização e modelagem numérica mostram que, para elastômeros submetidos a deformações elevadas, o modelo de Yeoh é capaz de reproduzir curvas tensão–deformação com erro reduzido em uma faixa ampla de alongamentos, frequentemente com desempenho superior ao de modelos mais simples, como o de Neo-Hooke ou o de Mooney-Rivlin, especialmente quando se busca um compromisso entre precisão e complexidade paramétrica (Shahzad *et al.*, 2015). No caso específico de termoplásticos flexíveis impressos, investigações recentes indicam que o ajuste de um modelo do tipo Yeoh com base em parâmetros da literatura para atuadores impressos em TPU 95A camada a camada fornece uma base consistente para simulações em elementos finitos de componentes moles fabricados por impressão 3D (Landgraf *et al.*, 2021).

Dessa forma, o objeto de estudo desta tese pode ser entendido como a combinação de três elementos principais: O primeiro é o próprio atuador pneumático PneuNet,

concebido como um sistema deformável de múltiplas câmaras internas; O segundo é o material estrutural, um TPU 95A compatível com impressão 3D por FFF e não tão utilizado na área nessa dureza, cujo comportamento mecânico é dependente tanto da formulação do polímero quanto dos parâmetros de impressão utilizados; O terceiro é o modelo numérico, construído em ambiente de elementos finitos e baseado em um comportamento hiperelástico do tipo Yeoh. A interação entre esses três elementos, considerando diferentes geometrias internas dentro de uma mesma família de atuadores, constitui o foco central das análises de projeto, simulação e validação que serão apresentadas nos capítulos seguintes.

1.4 Justificativa

A justificativa deste trabalho se apoia em três eixos complementares. Em primeiro lugar, há uma motivação científica ligada ao avanço da modelagem numérico experimental de atuadores pneumáticos macios, com foco na integração entre material, processo de fabricação e geometria. Em segundo lugar, há uma motivação tecnológica associada à redução de ciclos de prototipagem e ao estabelecimento de diretrizes de projeto que facilitem a adoção de atuadores PneuNet impressos em TPU 95A em aplicações futuras. Em terceiro lugar, há uma motivação aplicada, na medida em que atuadores com comportamento previsível e reproduzível constituem componentes fundamentais para dispositivos assistivos, sistemas de reabilitação e interfaces homem máquina mais seguras e adaptáveis. Ao abordar essas três dimensões de forma articulada, a tese pretende contribuir para preencher lacunas importantes na literatura e aproximar o projeto de atuadores pneumáticos macios de uma prática de engenharia mais baseada em modelos e menos dependente de tentativa e erro.

1.5 Hipótese

Considerando o contexto apresentado, a hipótese central deste trabalho é:

Hipotetiza-se a suficiência de um PneuNet para uma aplicação assistiva depende criticamente de geometria, material e metodologia de simulação e impressão; essas dependências podem ser organizadas em um framework

capaz de orientar o projeto e a seleção do atuador para cada contexto de uso.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo geral

Investigar a influência de diferentes perfis geométricos de atuadores pneumáticos do tipo PneuNet, variando o formato lateral das câmaras e o perfil longitudinal, sobre a capacidade de força e deflexão gerada na extremidade, utilizando modelagem mecânica computacional em elementos finitos e testes experimentais para construir um framework para utilização de PneuNets em dispositivos assistivos.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Projetar geometrias de atuadores PneuNet distintos perfis laterais de câmara e perfis longitudinais, mantendo fixos o material, o processo de fabricação e os principais parâmetros de impressão para avaliar impacto em performance.
2. Fabricar atuadores em TPU 95A por impressão 3D, seguindo um mesmo conjunto de parâmetros de impressão previamente definido, de forma a isolar o efeito das variações geométricas e definir qual melhor combinação para aplicação em dispositivos assistivos.
3. Construir modelos em elementos finitos para as geometrias de atuadores PneuNet, incorporando o modelo de material e condições de contorno e pressurização compatíveis com os ensaios experimentais visando otimizar o processo de prototipagem.
4. Comparar, de forma quantitativa sempre que possível e qualitativa quando necessário, a resposta simulada e a resposta experimental do atuador escolhido com base na performance das simulações iniciais buscando validar as simulações.

5. Validar o processo de fabricação de atuadores do tipo pneunet através de impressão 3D por deposição de material fundido e com o uso do filamento TPU 95A uniformizando parâmetros e desafios.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho, com foco na robótica macia e, em particular, nos atuadores pneumáticos do tipo PneuNet, discutindo seus princípios de funcionamento, modelos de comportamento mecânico e principais aplicações em dispositivos assistivos. Inicialmente, serão apresentados os conceitos básicos de robótica macia e suas diferenças em relação à robótica rígida, com ênfase nas vantagens de estruturas deformáveis para interação segura com o corpo humano e com o ambiente. Nesse contexto, serão descritos os materiais mais utilizados, como silicões, elastômeros, TPU e tecidos, bem como os principais tipos de atuadores empregados em robótica macia, com destaque para os atuadores pneumáticos. Também serão destacadas outras abordagens, como atuadores hidráulicos, dielétricos e ligas com memória de forma, além de exemplos de aplicações em manipuladores, dispositivos de reabilitação, órteses, tecnologias assistivas e sistemas vestíveis.

2.1 Robótica macia

2.1.1 Conceitos e diferenças em relação à robótica rígida

A robótica industrial consolidou-se historicamente com o uso de manipuladores formados por elos rígidos conectados por juntas rotacionais, acionados em geral por motores elétricos. Nessa configuração, o sistema é bem descrito por modelos de corpos rígidos com poucos graus de liberdade concentrados nas juntas, o que favorece

alta precisão de trajetória e repetibilidade em ambientes controlados, como linhas de produção (Siciliano; Khatib, 2008; Spong; Hutchinson; Vidyasagar, 2006). A interação com o ambiente costuma ser tratada como uma perturbação e, quando necessário, é compensada por esquemas de controle de posição e de força.

Quando um robô precisa manipular objetos frágeis ou dúcteis, adaptar-se a superfícies irregulares ou operar em contato próximo com pessoas, rigidez mecânica dos manipuladores convencionais se torna uma limitação importante. Pequenas incertezas de modelo ou erros de calibração podem gerar forças de contato elevadas, causando dano ao ambiente, ao robô e ao usuário, exigindo camadas adicionais de controle para garantir segurança (Rus; Tolley, 2015; Yasa *et al.*, 2023). Tal demanda estimulou o surgimento da robótica macia, que busca incorporar conformidade estrutural e deformações distribuídas como parte do projeto, e não apenas como compensações.

Em linhas gerais, considera-se robótica macia o conjunto de sistemas robóticos cuja estrutura é formada predominantemente por materiais com baixo módulo elástico, como silicones, elastômeros, géis, compósitos poliméricos flexíveis ou tecidos técnicos. Esses materiais permitem deformações grandes e contínuas, de modo que o corpo do atuador pode curvar, alongar e torcer de maneira distribuída, aproximando-se do comportamento de organismos biológicos como polvos e outros invertebrados (Kim; Laschi; Trimmer, 2013; Whitesides, 2018; Majidi, 2019). Em vez de depender de cadeias de elos rígidos e juntas discretas, muitos robôs macios utilizam atuadores fluidicamente acionados, materiais eletroativos, ligas com memória de forma ou estruturas infláveis, integrando atuadores e elementos estruturais em um único corpo (Polygerinos; Correll *et al.*, 2017).

Uma forma didática de visualizar as diferenças entre soluções rígidas, macias e híbridas é apresentada na Figura 2.1. O diagrama organiza diferentes exemplos de robôs e atuadores em um espaço conceitual definido por quatro eixos: conformidade estrutural, graus de liberdade, precisão e capacidade de geração de força. Na região associada a estruturas macias, localizada na parte inferior esquerda, aparecem exemplos como atuadores PneuNet e animais macios, que apresentam alta conformidade e boa adaptação ao ambiente, mas, em geral, menor capacidade de gerar força e menor precisão de posicionamento. Na região oposta, na parte superior direita, situam-se

soluções tipicamente rígidas, como garras e braços robóticos industriais, capazes de produzir forças elevadas e movimentos precisos, porém com baixa conformidade estrutural e maior risco de interação agressiva com o ambiente.

Entre esses dois extremos, o diagrama destaca uma região intermediária de soluções híbridas, nas quais componentes rígidos e macios são combinados no mesmo dispositivo (Chen, 2020). Nessa região estão, por exemplo, juntas antagonísticas e módulos de flexão inspirados na morfologia de lagostas, que utilizam câmaras macias internas para atuação combinadas com “cascas” rígidas responsáveis por limitar a deformação e aumentar a capacidade de geração de torque. Essas arquiteturas procuram explorar o compromisso entre conformidade e robustez, buscando ao mesmo tempo maior força de saída, certa precisão de movimento e interação mais segura com o ambiente. Estruturas variadas são ilustradas na Figura 2.1 reforça a ideia de que robôs macios, rígidos e híbridos formam um contínuo em termos de rigidez estrutural e funcionalidades, e contextualiza o papel de atuadores pneumáticos macios, como os PneuNet, dentro desse espectro.

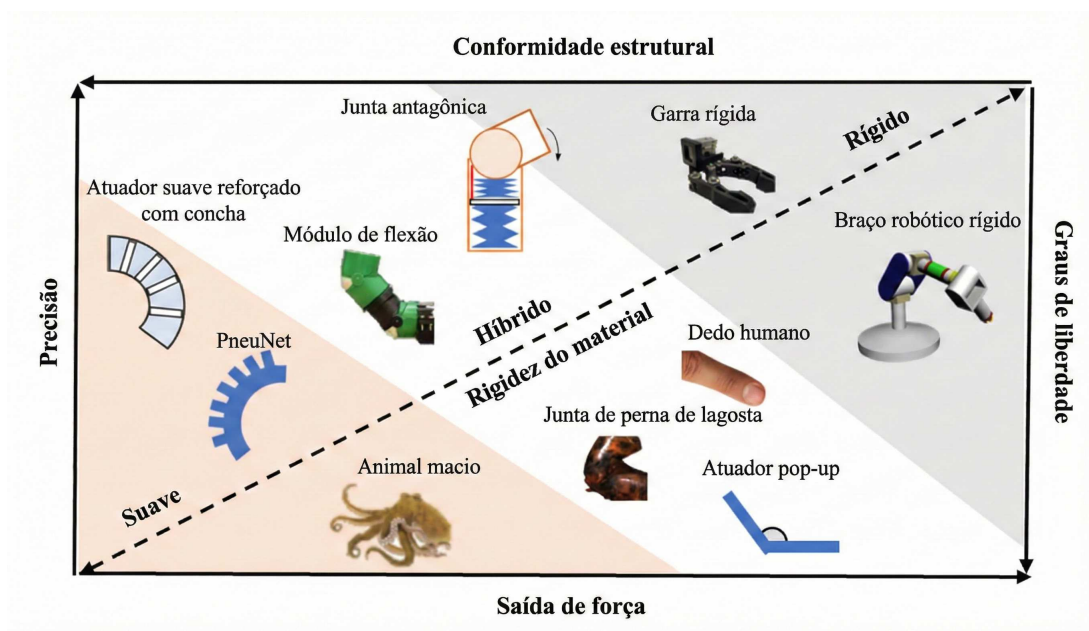


Figura 2.1: Soluções robóticas classificadas de acordo com a rigidez estrutural e com suas características de precisão, força de saída e graus de liberdade. Adaptado de (Chen, 2020).

2.1.2 Materiais típicos

A seleção dos materiais é um dos fatores que mais influenciam o desempenho de robôs macios. Em geral, esses sistemas utilizam polímeros com módulo de Young na faixa de quilopascas a poucos megapascas, capazes de grandes deformações sem falha e com resposta predominantemente elástica em regime de grande deformação. Entre esses materiais estão elastômeros de silicone, poliuretanos termoplásticos (TPU), borrachas sintéticas, hidrogéis e têxteis técnicos. Revisões recentes ressaltam que a combinação entre propriedades mecânicas intrínsecas e arquitetura geométrica do atuador determina a rigidez efetiva, a histerese, a eficiência energética e a durabilidade do sistema (Kim; Laschi; Trimmer, 2013; Whitesides, 2018; Majidi, 2019; Wang, Y. *et al.*, 2024).

Os elastômeros de silicone formam o grupo de materiais mais utilizado em robótica macia, em especial em atuadores pneumáticos do tipo PneuNet e em estruturas contínuas. Formulações como o polidimetilsiloxano (PDMS, por exemplo Sylgard 184) e silicones de cura por platina amplamente usados em prototipagem, como Ecoflex e Dragon Skin, apresentam elevada extensibilidade, boa resistência à fadiga, estabilidade térmica e química e processamento relativamente simples por moldagem. Trabalhos com PDMS reportam módulo de Young tipicamente na ordem de 0,2–3,0 MPa (por exemplo, 1,32–2,97 MPa para PDMS não modificado), enquanto o alongamento na ruptura pode variar de cerca de 135% (formulações mais rígidas) até 296% ao reduzir a densidade de ligações cruzadas (p.ex., razão 20:1) e 365% em misturas comerciais; além disso, formulações de PDMS projetadas para alta extensibilidade já demonstraram 1400–3800 de alongamento na ruptura, superando 400%, o que favorece curvaturas elevadas sem fratura. (Miranda *et al.*, 2021; Wolf; Salieb-Beugelaar; Hunziker, 2018).

Além dos silicones, outros elastômeros e hidrogéis aparecem com frequência em dispositivos de robótica macia. Hidrogéis condutores e ionicamente ativos são empregados em atuadores e sensores deformáveis, enquanto elastômeros dielétricos à base de silicone ou acrilato são usados em atuadores eletroativos de grande deformação. Esses materiais tendem a apresentar maior densidade de energia, porém exigem tensões elétricas elevadas, encapsulamento cuidadoso e estratégias de controle específicas (Majidi, 2019; Wang, Y. *et al.*, 2024). Embora sejam relevantes para

o campo, esses sistemas não são o foco da presente tese, que se concentra em atuadores pneumáticos acionados por pressão interna.

Para a fabricação aditiva de atuadores, poliuretanos termoplásticos, em particular o TPU, vêm ganhando destaque. O TPU é um copolímero segmentado com domínios rígidos e flexíveis que combinam elevada resistência mecânica, grande deformabilidade e boa recuperação elástica (Gul *et al.*, 2018). Quando processado por técnicas de extrusão de material, como FDM, ou por sinterização seletiva a laser, o TPU permite a produção de geometrias internas complexas, incluindo redes de câmaras pneumáticas, sem etapas adicionais de moldagem (Dong *et al.*, 2024). Estudos recentes mostram que a resposta mecânica do TPU impresso depende fortemente da orientação das linhas de extrusão, da densidade de preenchimento e da espessura de parede. (Beloshenko *et al.*, 2021; Wang, Y. *et al.*, 2024). Essa sensibilidade aos parâmetros de impressão é particularmente relevante para a presente tese, que utiliza TPU impresso em 3D na fabricação de atuadores pneumáticos.

De forma geral, a seleção entre silicones, TPU, hidrogéis ou têxteis depende do compromisso desejado entre módulo de elasticidade, alongamento admissível, permeabilidade a gases, compatibilidade com processos de fabricação e requisitos da aplicação. No contexto desta tese, a ênfase recai sobre elastômeros poliméricos processáveis por impressão 3D, em especial o TPU, que conciliam grandes deformações com possibilidade de controle geométrico detalhado das câmaras e paredes de atuadores pneumáticos.

2.1.3 Tipos de atuadores em robótica macia

A diversidade de aplicações da robótica macia está diretamente ligada à variedade de princípios físicos usados na atuação. Revisões recentes costumam organizar os atuadores macios em grandes famílias, de acordo com a forma de conversão de energia em deformação mecânica, o meio de atuação e o tipo de material ativo empregado (Rus; Tolley, 2015; Polygerinos; Correll *et al.*, 2017; Kim; Laschi; Trimmer, 2013; Yasa *et al.*, 2023; Pan *et al.*, 2022; Perera *et al.*, 2024). De forma geral, é possível distinguir atuadores fluidicamente acionados, atuadores elétricos e eletroativos, atuadores térmicos e de mudança de fase, atuadores magnéticos, atuadores químicos ou responsivos a estímulos ambientais e dispositivos que exploram deformação passiva

induzida por cabos e motores.

Os atuadores fluídicos constituem a classe mais difundida em robótica macia. Nessa família estão os atuadores pneumáticos e hidráulicos, em que uma diferença de pressão interna gera expansão, contração ou curvatura de estruturas elastoméricas confinadas (Rus; Tolley, 2015; Polygerinos; Correll *et al.*, 2017). *Pneumatic artificial muscles*, PneuNets, bainhas têxteis infláveis e músculos pneumáticos lineares são alguns exemplos. Em sistemas hidráulicos, o princípio é semelhante, mas o fluido interno é líquido, o que permite maiores forças de saída às custas de maior complexidade de selagem e de bombeamento. Atuadores fluídicos aparecem com destaque em aplicações de preensão, reabilitação e órteses devido à sua elevada conformidade e à facilidade de gerar movimentos de grande amplitude (Pan *et al.*, 2022).

Outra classe importante é formada por atuadores elétricos e eletroativos. Nessa categoria estão os atuadores de elastômero dielétrico, em que um campo elétrico aplicado entre eletrodos flexíveis causa compressão na espessura e expansão na área do filme, gerando dobramento ou alongamento da estrutura; os compósitos polímero metal iônico, que dobram quando uma corrente ou potencial é aplicado e íons se redistribuem na matriz polimérica; e atuadores baseados em materiais piezelétricos macios (Bernat *et al.*, 2023; Perera *et al.*, 2024). Em geral, esses sistemas oferecem altas frequências de resposta e boa densidade de potência, mas exigem eletrônica de acionamento específica, isolamento elétrico adequado e, muitas vezes, tensões elevadas.

Atuadores térmicos e de mudança de fase formam outra família recorrente. Nela se incluem ligas com memória de forma, polímeros com memória de forma e elastômeros de cristal líquido. Nesses materiais, variações de temperatura induzem transições de fase ou reorganização molecular que levam a contrações ou dobramentos significativos (Kim; Laschi; Trimmer, 2013; Wang, Y. *et al.*, 2024; Perera *et al.*, 2024). Atuadores desse tipo apresentam elevada força específica e são atraentes para dispositivos compactos, embora usualmente apresentem respostas mais lentas e dificuldades de controle térmico. De modo complementar, atuadores magneticamente responsivos utilizam elastômeros carregados com partículas magnéticas, que se deformam sob campos magnéticos externos, enquanto atuadores químicos e baseados em hidrogéis exploram mudanças de volume ou forma em resposta a pH, concentração de íons, luz

ou reações químicas (Pan *et al.*, 2022; Dewang *et al.*, 2025).

Por fim, muitos dispositivos de robótica macia utilizam a deformação passiva de estruturas flexíveis acionadas por cabos, tendões ou fitas tracionados por motores elétricos convencionais. Nesses casos, o elemento ativo de fato é rígido, mas a geometria do corpo, geralmente em forma de viga contínua ou estrutura segmentada macia, converte o encurtamento do cabo em curvatura distribuída. Essa abordagem é comum em tentáculos macios, dedos robóticos e manipuladores contínuos, e aparece em diversas revisões ao lado dos atuadores fluídicos e eletroativos na classificação de estratégias de atuação em robótica macia (Rus; Tolley, 2015; Zhou *et al.*, 2024).

A Figura 2.2 ilustra de forma sintética essa variedade, tomando como referência um mapeamento recente de atuadores macios usados em dispositivos de reabilitação e assistência (Pan *et al.*, 2022). O diagrama organiza os atuadores de acordo com o mecanismo de atuação predominante, incluindo atuadores acionados por fluido (pneumáticos e hidráulicos), motores elétricos acoplados a estruturas flexíveis, atuadores baseados em reações químicas, elastômeros dielétricos, ligas com memória de forma, elastômeros magnetoativos, elastômeros de cristal líquido e materiais piezelétricos. A distribuição percentual de cada categoria no conjunto de trabalhos analisados sugere que os atuadores fluídicos, em especial os pneumáticos, continuam sendo a solução mais adotada em aplicações de interação física com o ser humano, o que reforça a relevância do enfoque escolhido nesta tese.

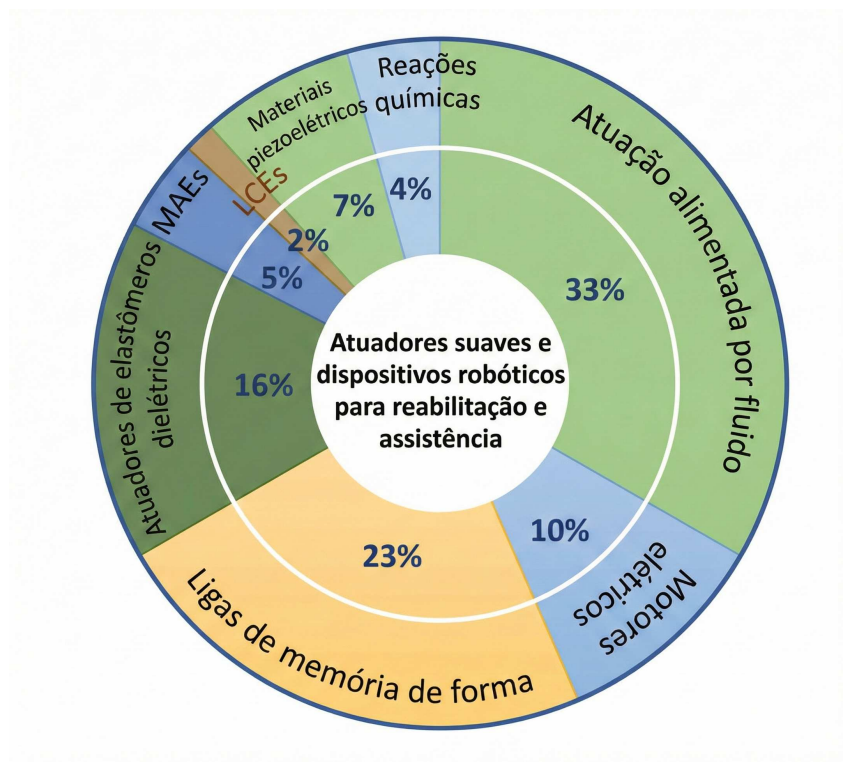


Figura 2.2: Visão geral de mecanismos de atuação empregados em atuadores macios e dispositivos robóticos para reabilitação e assistência. As categorias incluem atuadores acionados por fluido, motores elétricos acoplados a estruturas flexíveis, reações químicas, elastômeros dielétricos, ligas com memória de forma, elastômeros magnetoativos, elastômeros de cristal líquido e materiais piezoelétricos. Adaptado de (Pan *et al.*, 2022).

Nas subseções seguintes, o foco recai especificamente sobre atuadores pneumáticos macios do tipo PneuNet, que pertencem ao grupo dos atuadores fluídicos e combinam estruturas elastoméricas com câmaras internas pressurizadas. A seção 2.1.3.1 aprofunda os princípios de funcionamento e as características desses atuadores, preparando o terreno para a discussão de geometria, materiais, impressão tridimensional e modelagem por elementos finitos desenvolvida nos demais tópicos da fundamentação teórica.

2.1.3.1 Atuadores pneumáticos

Os atuadores pneumáticos constituem hoje a tecnologia de atuação mais empregada em robótica macia. Diversas revisões apontam que a combinação entre baixo

custo dos componentes, relativa simplicidade de projeto, boa relação potência–peso e grande deformabilidade explica a popularidade desses dispositivos em aplicações de preensão, locomoção, reabilitação e interação segura com o ser humano (Rus; Tolley, 2015; Polygerinos; Correll *et al.*, 2017; Xavier; Tawakoli *et al.*, 2022). Em termos gerais, esses atuadores são formados por uma estrutura elastomérica que contém cavidades internas conectadas a uma fonte de ar comprimido ou vácuo. A variação de pressão no interior dessas cavidades produz deformações volumétricas que se convertem em alongamento, encurtamento, dobra ou torção, dependendo da forma da estrutura e de eventuais camadas de reforço.

Uma maneira prática de classificar os atuadores pneumáticos macios é pela geometria e pela forma predominante de movimento. Xavier e colaboradores descrevem quatro modos principais de atuação: extensão, contração, flexão e torção (Xavier; Tawakoli *et al.*, 2022). Atuadores de extensão e contração incluem os músculos pneumáticos do tipo McKibben e variações planas, nos quais um tubo flexível é envolvido por uma malha trançada ou bainha têxtil. Quando a pressão interna aumenta, o tubo tende a expandir radialmente, enquanto a malha converte essa expansão em encurtamento axial, gerando força de tração entre as extremidades. Ajustes na trama, no ângulo das fibras e na geometria interna permitem configurar diferentes faixas de curso, força e rigidez.

Os atuadores de flexão e torção são particularmente relevantes para robôs macios que precisam envolver objetos ou seguir trajetórias curvas. Nessa categoria estão os atuadores com redes pneumáticas internas, conhecidos como PneuNets, e os atuadores com reforço em fibras ou tecidos (Ilievski *et al.*, 2011; Mosadegh *et al.*, 2014a; Polygerinos; Correll *et al.*, 2017). Em um PneuNet típico, uma série de câmaras alinhadas é esculpida ou impressa em um corpo elastomérico. A parede inferior ou posterior é mais espessa ou é reforçada por uma camada de material menos deformável, enquanto as paredes entre as câmaras são mais finas. Quando o interior das câmaras é pressurizado, a expansão é favorecida na região superior e lateral, o que provoca a curvatura controlada do atuador. Variações no número de câmaras, no espaçamento e na espessura das paredes permitem obter perfis de flexão distintos e, quando os canais são dispostos de forma oblíqua, também é possível gerar torção acoplada (Gu *et al.*, 2021; Ge *et al.*, 2018).

Além dos atuadores inflados com pressão positiva, há também dispositivos baseados em pressão negativa, conhecidos como atuadores a vácuo. Nesse caso, uma estrutura flexível é envolvida por um invólucro selado, e a aplicação de vácuo faz com que a casca externa colapse e comprima o núcleo. Essa estratégia reduz o risco de falhas explosivas por ruptura de paredes e pode aumentar a durabilidade em aplicações repetitivas (Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Em paralelo, desenvolvimentos recentes exploram atuadores pneumáticos baseados em tecidos, estruturas dobradas inspiradas em origami e geometrias programáveis, que buscam combinar a versatilidade dos PneuNets com maior eficiência volumétrica e facilidade de integração em dispositivos vestíveis (Chai; Li; Zhang *et al.*, 2025; Pan *et al.*, 2022).

A Figura 2.3 apresenta de forma esquemática algumas dessas famílias de atuadores, organizadas segundo o tipo de movimento predominante e a estratégia de reforço estrutural, adaptada da classificação proposta por Xavier *et al.* (Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Observa-se que PneuNets e atuadores com reforço em fibras ocupam posição central nesse panorama, por combinarem geometrias relativamente simples com boa capacidade de gerar flexão de grande amplitude e forças compatíveis com tarefas de manipulação e assistência. A próxima seção aprofunda a discussão especificamente sobre atuadores PneuNet, detalhando o seu princípio de funcionamento, geometrias mais comuns e parâmetros de projeto relevantes para modelagem e fabricação em impressão tridimensional.

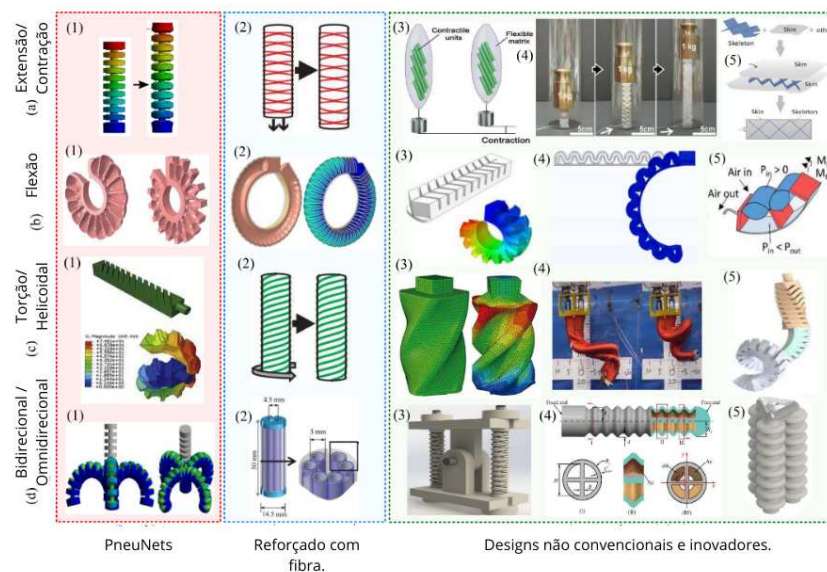


Figura 2.3: Exemplos de atuadores pneumáticos macios classificados segundo o tipo de movimento predominante (extensão, contração, flexão e torção) e a estratégia de reforço estrutural. A ilustração inclui músculos pneumáticos do tipo McKibben, atuadores com bainhas têxteis, PneuNets e atuadores reforçados com fibras. Adaptado de (Xavier; Tawk *et al.*, 2022).

Atuadores pneumáticos tipo PneuNet

Entre os diferentes atuadores utilizados em robótica macia, os atuadores pneumáticos com redes internas de câmaras, conhecidos como *Pneumatic Networks* ou PneuNets, tornaram-se uma das soluções mais difundidas. Desde as primeiras demonstrações de robôs macios para manipulação e locomoção (Ilievski *et al.*, 2011; Shepherd *et al.*, 2011), esse tipo de atuador passou a ser adotado em garras, manipuladores contínuos, dispositivos de reabilitação e órteses, pela capacidade de gerar grandes curvaturas com geometrias relativamente simples. Revisões recentes apontam os PneuNets como uma das famílias centrais de atuadores pneumáticos macios, ao lado de músculos pneumáticos do tipo McKibben e de atuadores com reforço têxtil ou em fibras (Polygerinos; Correll *et al.*, 2017; Xavier; Tawk *et al.*, 2022).

Os atuadores de fole macios formam uma classe mais geral, da qual os PneuNets podem ser vistos como um caso particular. Esses atuadores utilizam uma geometria em formato de fole como conjunto de câmaras que podem inflar ou desinflar em resposta a diferentes tipos de estímulo, incluindo, mas não se limitando, a ativação

pneumática (Hashem *et al.*, 2020), fluídica (De Greef; Lambert; Delchambre, 2009), eletrostática (Sirbu *et al.*, 2021) e eletromagnética (Mao *et al.*, 2020; Jung *et al.*, 2022). As abordagens inspiradas em hidráulica permitem a atuação sem a necessidade de partes energizadas, ao contrário das estratégias eletrostática e eletromagnética.

Além disso, atuadores de fole pneumáticos e fluídicos apresentam boa capacidade de escala (Blumenschein; Mcngüç, 2019; Boyraz; Runge; Raatz, 2018), enquanto o mesmo não é necessariamente verdadeiro para atuadores eletrostáticos na faixa de milímetros a centímetros (Sirbu *et al.*, 2021) ou para atuadores eletromagnéticos fora da faixa de milímetros (Boyraz; Runge; Raatz, 2018). Nesta tese, o interesse recai principalmente sobre atuadores de fole pneumáticos macios, pois oferecem um caso de teste adequado para avaliar a eficácia da abordagem de modelagem proposta. As forças produzidas por esses dispositivos podem ser distinguidas de forma clara em componentes ativos e passivos, associados, respectivamente, a forças axiais e de cisalhamento.

Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento dos atuadores PneuNet baseia-se na conversão de variações de pressão interna em deformações não uniformes ao longo da seção transversal do atuador. Em um desenho típico, um conjunto de câmaras retangulares ou em forma de arco é disposto ao longo do comprimento do atuador e conectado por um canal interno que permite a entrada de ar comprimido (Ilievski *et al.*, 2011; Mo-sadegh *et al.*, 2014a). Quando a pressão é aplicada, o material elastomérico tende a se expandir em todas as direções, mas a presença da base mais rígida restringe a deformação na face inferior. As paredes superiores e laterais, mais delgadas, sofrem maiores alongamentos, o que leva à expansão volumétrica das câmaras na direção superior. Como consequência, a face superior do atuador apresenta alongamento efetivo maior do que a base, gerando uma distribuição de deformações ao longo da espessura que se traduz em curvatura. Em termos simplificados, o PneuNet pode ser interpretado como uma viga de material macio submetida a um gradiente de deformação: a face superior alonga mais do que a inferior, o que leva ao encurvamento no sentido da base (Gu *et al.*, 2021).

A magnitude da curvatura e a forma da dobra dependem diretamente do desenho das câmaras e da distribuição de rigidez. Aumentar o número de câmaras, reduzir o

espaçamento entre elas ou diminuir a espessura das paredes tende a favorecer maiores deformações locais e maior curvatura global. Por outro lado, uma base mais espessa ou a inclusão de camadas de reforço, por exemplo em tecido ou em polímero rígido, limita a deformação em determinadas regiões e permite controlar o raio de curvatura e a direção do movimento (Mosadegh *et al.*, 2014a; Gu *et al.*, 2021). Variações na forma das câmaras, como geometrias trapezoidais, curvas ou inclinadas, também podem gerar modos combinados de flexão e torção.

Outro aspecto relevante é o acoplamento entre pressão interna, deformação do material e forças geradas na extremidade livre do atuador. Para um dado perfil de câmaras e um material elastomérico com comportamento hiperelástico, a relação entre pressão aplicada, curvatura e força de ponta resulta de um equilíbrio entre energia armazenada no material e trabalho realizado pelo fluido. Modelos analíticos e numéricos, baseados em teoria de vigas e no método dos elementos finitos, têm sido empregados para estimar essa relação e apoiar o projeto de atuadores com respostas específicas (Gu *et al.*, 2021; Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Esses modelos são particularmente úteis quando se pretende comparar diferentes perfis geométricos, como será feito nos capítulos seguintes desta tese.

Em síntese, o funcionamento de um PneuNet depende da combinação entre arquitetura interna de câmaras, propriedades do material e distribuição de rigidez ao longo da seção. A assimetria de deformação gerada por essa combinação é o que produz a dobra ou curvatura característica do atuador, bem como as forças disponíveis para interação com o ambiente. As próximas subseções aprofundam essa descrição ao tratar das geometrias típicas, dos parâmetros de projeto e das aplicações relatadas na literatura, preparando o terreno para a modelagem por elementos finitos e para a validação numérica e experimental discutidas posteriormente.

Geometrias típicas e parâmetros de projeto

Os atuadores pneumáticos tipo PneuNet apresentam grande flexibilidade geométrica, o que permite adaptar sua resposta mecânica a diferentes tarefas de preensão, interação e locomoção. Do ponto de vista estrutural, é possível distinguir algumas geometrias recorrentes. A forma mais simples é o atuador de câmara única, normalmente com seção transversal assimétrica e uma câmara interna pressurizável sobre uma camada inferior mais rígida. Nessa configuração, a expansão da parede superior

gera um gradiente de deformação ao longo da espessura, resultando em curvatura controlada em um plano específico (Dilibal; Sahin; Celik, 2018). A partir desta ideia básica, surgem variações com múltiplas câmaras em série ao longo do comprimento, segmentos com geometrias diferenciadas e arranjos em *arrays* que combinam diversos módulos em paralelo ou em torno de uma seção circular para produzir movimentos com múltiplos graus de liberdade (Demir *et al.*, 2020; Zolfagharian *et al.*, 2020).

Nos atuadores de múltiplas câmaras, que correspondem à configuração clássica de PneuNet de flexão, as câmaras são separadas por paredes internas mais finas, enquanto a parede inferior é mantida mais espessa ou reforçada para restringir a expansão e induzir a curvatura em direção ao lado menos deformável. A literatura descreve arranjos lineares com câmaras retangulares, trapezoidais ou em forma de fole, bem como arquiteturas em arco ou em torno de uma seção circular, nas quais três ou mais fileiras de câmaras são distribuídas radialmente para produzir flexões em qualquer direção ou combinações de flexão e torção (Wang, T. *et al.*, 2018; Gariya; Kumar; Singh, 2023). Em configurações modulares, unidades PneuNet idênticas podem ser conectadas em série ou paralelo, permitindo o escalonamento do curso de flexão, da força de ponta ou da rigidez aparente sem alterar a topologia interna de cada módulo (Giacoppo; Hötzel; Pott, 2023).

Os parâmetros de projeto que caracterizam essas geometrias incluem, de forma geral, a largura total do atuador, a altura total, a altura e o comprimento de cada câmara, a espessura das paredes internas e externas, a espessura da camada inferior quase inextensível, o espaçamento entre câmaras e o número total de câmaras ao longo do eixo de flexão. Estudos paramétricos combinando simulação por elementos finitos e ensaios experimentais mostram que pequenas variações nesses parâmetros podem alterar significativamente a curvatura máxima, o raio de curvatura e a força de bloqueio na ponta para uma mesma faixa de pressão (Demir *et al.*, 2020; Zolfagharian *et al.*, 2020). Em geral, maior número de câmaras para um mesmo comprimento total leva a ângulos de dobra mais elevados a menores pressões, ao custo de redução na rigidez axial e na força de ponta. Por outro lado, paredes mais espessas tendem a diminuir a curvatura, porém aumentam a capacidade de suportar pressões mais altas e reduzem o risco de falhas por balonamento ou ruptura das paredes internas (Gariya; Kumar; Singh, 2023).

A altura das câmaras e a espessura da camada inferior também exercem papel central no balanço entre curvatura e força. Câmaras mais altas aumentam a área interna exposta à pressão e, consequentemente, a força resultante, mas também ampliam a tendência ao balonamento e à deformação não desejada na direção radial. A camada inferior mais espessa ou fabricada com material de maior módulo de elasticidade reforça o lado tracionado durante a flexão, favorecendo curvaturas mais definidas e reduzindo o alongamento axial excessivo (Dilibal; Sahin; Celik, 2018; Zolfagharian *et al.*, 2020). Em atuadores de múltiplas câmaras, o espaçamento entre câmaras funciona como região de concentração de curvatura e deve ser ajustado de modo a evitar que as paredes colapsem ou se toquem prematuramente, o que pode limitar o curso útil do atuador.

Além das dimensões lineares, parâmetros geométricos mais específicos vêm sendo explorados para programar movimentos complexos. Wang *et al.* propuseram PneuNets com câmaras oblíquas em relação ao eixo do atuador, de forma que a variação do ângulo das câmaras modifica a combinação entre flexão e torção produzida pelo mesmo perfil de pressão (Wang, T. *et al.*, 2018). Para um conjunto fixo de largura, altura e espessuras de parede, o aumento do ângulo das câmaras reduz a componente de flexão pura e aumenta a componente de torção, o que demonstra como a orientação das câmaras pode ser usada como parâmetro de projeto para movimentos tridimensionais.

Outra tendência recente é a combinação de geometrias PneuNet com materiais ou preenchimentos estruturais diferenciados. Giacoppo *et al.* apresentaram um PneuNet com preenchimento poroso interno e câmara externa estanque, no qual a variação da densidade de preenchimento ao longo das câmaras altera a deflexão de membrana e a distribuição de curvatura, abrindo espaço para gradientes de rigidez e resposta em um mesmo atuador (Giacoppo; Hötzel; Pott, 2023). Estudos com impressão 3D em TPU e outros termoplásticos elastoméricos também mostram que a discretização geométrica imposta pelo processo aditivo, como espessuras mínimas imprimíveis e raios de filete, introduz restrições adicionais ao espaço de projeto, mas permite explorar topologias mais complexas de câmaras e reforços internos (Demir *et al.*, 2020).

A Figura 2.4 ilustra um conjunto representativo de parâmetros geométricos de um atuador PneuNet de múltiplas câmaras, incluindo largura e altura totais, dimensões

das câmaras e espessuras das diferentes paredes. Estes parâmetros serão utilizados nos capítulos seguintes como base para a definição das geometrias estudadas nesta tese. A partir dessas escolhas geométricas e de projeto, detalha-se a modelagem numérica e a análise da resposta mecânica em função da pressão interna, em particular quanto à curvatura e à força na ponta.

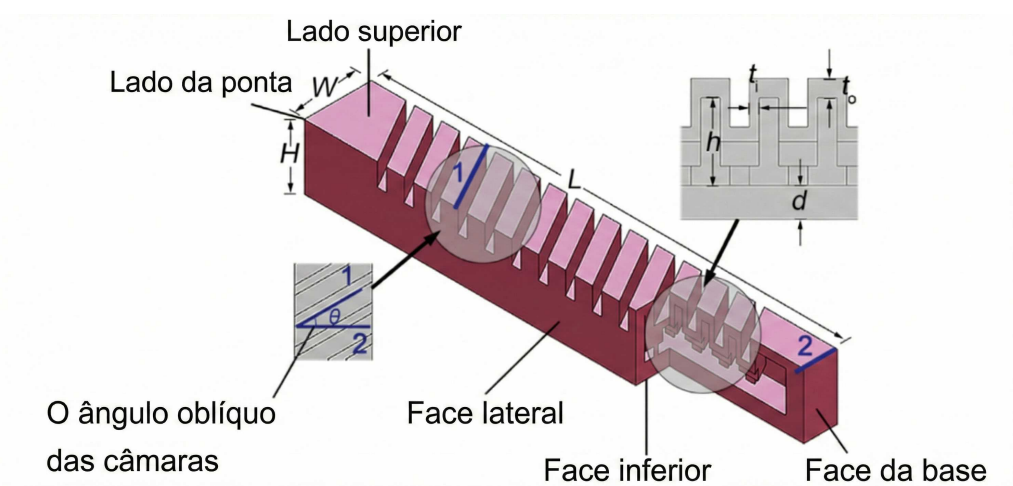


Figura 2.4: Parâmetros geométricos de um atuador PneuNet de múltiplas câmaras, incluindo largura e altura totais, dimensões das câmaras individuais e espessuras das paredes interna, superior e inferior. Adaptado de Wang et al. (Wang, T. et al., 2018).

Aplicações

Atuadores pneumáticos tipo PneuNet vêm sendo empregados em uma gama ampla de aplicações que se beneficiam da combinação entre grande deformação, conformidade geométrica e segurança no contato com superfícies frágeis. Em cenários de manipulação, esses atuadores são usados como elementos de preensão em garras macias capazes de segurar objetos de formatos irregulares e materiais delicados, como frutas, componentes eletrônicos e produtos alimentícios. Nesses casos, o arranjo em rede de câmaras possibilita que o atuador se molde ao contorno do objeto, distribuindo as pressões de contato e reduzindo o risco de dano mecânico, ao mesmo tempo em que gera forças de preensão suficientes para tarefas industriais e de laboratório (Belforte et al., 2014; Salem et al., 2018).

Além de garras e manipuladores, PneuNets também são utilizados em estruturas contínuas, como braços inspirados em tentáculos ou trombas, voltados para exploração em ambientes desestruturados, apoio a tarefas de inspeção e interação segura

com humanos. Nesses arranjos, o mesmo princípio de curvatura controlada por pressão é explorado em segmentos sucessivos, o que permite movimentos suaves, com múltiplos graus de liberdade efetivos, e uma interface física mais tolerante a colisões do que braços rígidos tradicionais (Belforte *et al.*, 2014). Esse panorama reforça que o PneuNet se consolidou como um “bloco de construção” versátil dentro da robótica macia.

Na área da saúde, a literatura mostra um interesse crescente em integrar atuadores PneuNet a dispositivos vestíveis para assistência e reabilitação de membros superiores. Belforte e colaboradores revisam diversas configurações de atuadores pneumáticos macios aplicados a dispositivos de reabilitação, incluindo órteses para mão e punho, destacando a capacidade desses sistemas de fornecer esforços relevantes mantendo baixo peso e boa adaptação anatômica (Belforte *et al.*, 2014). Em seguida, uma linha de trabalhos passa a focar diretamente em estruturas tipo PneuNet integradas a luvas e exoesqueletos de mão.

Um dos trabalhos pioneiros nesse sentido é o de Polygerinos *et al.*, que apresentaram uma luva macia na qual atuadores tipo PneuNet são posicionados ao longo do dorso dos dedos para gerar flexão durante o inflamento (Polygerinos; Lyne *et al.*, 2013). O projeto foi concebido para auxiliar pacientes em exercícios de fechamento da mão, evidenciando que é possível obter movimentos de preensão funcionais com pressões relativamente baixas e com segurança na interação pele–dispositivo. Trabalhos posteriores exploraram geometrias mais complexas de câmaras, buscando ampliar o número de posturas terapêuticas e melhorar a capacidade de assistência às atividades de vida diária.

Wang *et al.* propuseram uma luva pneumática macia capaz de realizar múltiplas posturas de reabilitação e modos de preensão assistida, também baseada em atuadores tipo PneuNet segmentados ao longo dos dedos (Wang, F. *et al.*, 2022). A solução permite flexão coordenada dos dedos, diferentes gestos de reabilitação e auxílio na preensão de objetos, mantendo estrutura relativamente leve e portátil. A Figura 2.5 ilustra um exemplo típico desse tipo de dispositivo, em que a luva flexível é combinada a atuadores macios distribuídos sobre a mão.

Mais recentemente, dispositivos em formato de exoesqueletos de mão têm incorporado atuadores PneuNet aprimorados para oferecer não apenas assistência na fle-



Figura 2.5: Exemplo de luva macia para reabilitação da mão baseada em atuadores pneumáticos tipo PneuNet, com os atuadores posicionados ao longo dos dedos para gerar flexão durante o inflamento. Adaptado de Wang et al. (Wang, F. *et al.*, 2022).

xão dos dedos, mas também estratégias de controle mais refinadas e integração com sensores. Tejada e colaboradores apresentaram um exoesqueleto de mão macio com atuadores PneuNet otimizados, voltado para assistência e reabilitação de movimentos, demonstrando melhorias na relação entre curvatura e pressão e na capacidade de gerar forças funcionais na ponta dos dedos (Tejada *et al.*, 2024). Em paralelo, Ridremont et al. desenvolveram um exoesqueleto pneumático macio que combina movimentos de mão e punho, com controle em malha fechada baseado em trajetórias angulares alvo para exercícios de flexão e extensão, o que reforça o potencial de sistemas macios pneumáticos em protocolos de reabilitação mais complexos (Ridremont *et al.*, 2024). A Figura 2.6 mostra um exemplo de exoesqueleto macio para mão e punho, em que múltiplos atuadores pneumáticos são acoplados a uma estrutura vestível para assistência de movimentos.

No contexto específico de desenvolvimento de atuadores, há também esforços voltados para a fabricação aditiva de PneuNets com geometria otimizada para reabilitação. Nunes Netto et al. descreveram o desenvolvimento de atuadores pneumáticos macios impressos em 3D voltados para aplicações em órteses, discutindo desafios de



Figura 2.6: Exemplo de exoesqueleto macio para mão e punho com atuadores pneumáticos do tipo PneuNet integrados a uma estrutura vestível, utilizado para assistência e reabilitação de movimentos em membros superiores. Adaptado de Tejada et al. (Tejada et al., 2024) e Ridremont et al. (Ridremont et al., 2024).

manufatura, problemas de estanqueidade e a relação entre parâmetros de impressão e desempenho mecânico (Nunes Netto et al., 2024). Em conjunto, esses trabalhos mostram que atuadores PneuNet vêm sendo empregados desde tarefas de preensão industrial até sistemas vestíveis de reabilitação, o que reforça a relevância de estudar com mais detalhe sua geometria, o material elastomérico e o comportamento mecânico sob pressão. A seção seguinte aprofunda esse ponto ao tratar da modelagem e avaliação de atuadores pneumáticos PneuNet em aplicações de interesse para esta tese.

2.2 Impressão 3D de materiais flexíveis

A popularização da manufatura aditiva ampliou de forma significativa as possibilidades de projeto e fabricação de dispositivos para robótica macia, permitindo a produção de geometrias complexas, canais internos e estruturas monolíticas difíceis de obter por rotas convencionais. Em particular, a impressão 3D de materiais poliméricos flexíveis tem se mostrado especialmente relevante para atuadores pneumáticos macios, pois combina liberdade geométrica com a possibilidade de ajustar propriedades mecânicas por meio de formulações de material e parâmetros de processo (Gul et al., 2018). Revisões recentes sobre robótica macia destacam que, entre as rotas de fabricação disponíveis, processos de impressão que trabalham com elastômeros,

termoplásticos flexíveis e resinas de baixa dureza têm um papel central na transição de protótipos de laboratório para dispositivos funcionais em aplicações biomédicas e industriais (Duran *et al.*, 2023).

Entre os materiais flexíveis disponíveis para impressão tridimensional, o poliuretano termoplástico (TPU) ocupa uma posição de destaque devido à combinação de elasticidade, resistência à abrasão, boa recuperação após deformações elevadas e compatibilidade com tecnologias amplamente difundidas, como a impressão por extrusão de filamento. Uma revisão específica sobre TPU em aplicações de impressão 3D mostra que esse material vem sendo usado em contextos que vão desde componentes de absorção de energia até dispositivos médicos, com uma variedade de graus de dureza e formulações que permitem adaptar rigidez, alongamento na ruptura e comportamento viscoelástico (Desai; Sonawane; More, 2023). No contexto de atuadores macios, essas características tornam o TPU interessante tanto para estruturas que exigem grandes deformações quanto para componentes que devem suportar ciclos repetidos de pressurização.

Além da compatibilidade com extrusão de filamento, o TPU também vem sendo explorado em outras plataformas de manufatura aditiva, inclusive em forma de resinas modificadas ou compósitos elastoméricos, ampliando o leque de processos possíveis para a fabricação de estruturas flexíveis (Duran *et al.*, 2023). Ainda assim, na prática de laboratório e em ambientes com infraestrutura mais acessível, a rota baseada em impressão por FDM ou FFF com filamentos comerciais de TPU continua sendo uma das mais atraentes, em função do custo, da disponibilidade de equipamentos e da relativa simplicidade de operação. Nesse cenário, compreender as particularidades do comportamento do TPU impresso e das tecnologias de impressão associadas é fundamental para projetar atuadores pneumáticos com desempenho previsível.

2.2.1 Tecnologias de manufatura aditiva aplicáveis

Diversas tecnologias de manufatura aditiva podem ser empregadas na fabricação de estruturas flexíveis e atuadores macios, cada uma com vantagens e limitações próprias em termos de materiais suportados, resolução, acabamento superficial e complexidade de equipamento. No contexto de robótica macia, revisões sobre impressão 3D indicam que processos como extrusão de material, jateamento de material e im-

pressão baseada em fotopolimerização são particularmente relevantes, pois permitem o uso de elastômeros, termoplásticos flexíveis e resinas de baixa dureza (Gul *et al.*, 2018). A escolha do processo depende tanto das propriedades desejadas no dispositivo final quanto de aspectos práticos, como custo, disponibilidade de impressoras e necessidade de multi-material (Ngo *et al.*, 2018).

A tecnologia de extrusão de material, normalmente referida como FDM ou FFF, é uma das mais difundidas para impressão de TPU. Nesse processo, um filamento contínuo de termoplástico é aquecido e extrudado através de um bico, sendo depositado camada a camada até a construção da peça. Revisões recentes sobre impressão de TPU apontam que FDM permite explorar uma ampla gama de formulações de poliuretano termoplástico, inclusive compósitos, além de possibilitar o ajuste de propriedades mecânicas efetivas por meio de parâmetros como padrão de preenchimento, orientação das trajetórias de deposição e espessura de trilhas (Desai; Sonawane; More, 2023). Essa flexibilidade, combinada com o baixo custo relativo dos equipamentos, explica por que a extrusão de filamento é frequentemente a primeira opção para o desenvolvimento de atuadores pneumáticos em laboratórios de pesquisa.

Outra família importante de processos é baseada em jateamento de material e fotopolimerização, como na tecnologia PolyJet. Nesse caso, gotículas de uma ou mais resinas fotocuráveis são depositadas em alta resolução e curadas camada a camada por luz ultravioleta. Revisões sobre PolyJet enfatizam a capacidade de imprimir estruturas multi-material com gradientes de rigidez e combinações de materiais rígidos e flexíveis dentro de um mesmo componente, com excelente definição geométrica e bom acabamento superficial (Patpatiya *et al.*, 2022). Essa característica é particularmente interessante para robótica macia e dispositivos biomédicos, pois permite, por exemplo, combinar regiões de alta flexibilidade com zonas mais rígidas de ancoragem ou interfaces de fixação. No entanto, o custo elevado dos equipamentos e a dependência de resinas proprietárias podem limitar a adoção dessa tecnologia em comparação com FDM em TPU.

Por fim, revisões sobre impressão de elastômeros em aplicações médicas mostram que outras rotas, como impressão direta de tinta (*direct ink writing*), processos baseados em estereolitografia modificada e variações de extrusão assistida, vêm sendo adaptadas para silicones e poliuretanos com diferentes viscosidades (Duran *et al.*,

2023). Essas tecnologias ampliam o espaço de projeto de materiais macios e de dispositivos complexos, mas, do ponto de vista desta tese, FDM com TPU se destaca por oferecer uma combinação específica de acessibilidade, compatibilidade com geometrias de atuadores pneumáticos e integração relativamente direta com rotinas de modelagem numérica e validação experimental.

2.2.2 Propriedades do TPU usado em robótica macia

O poliuretano termoplástico (TPU) é um copolímero segmentado que combina segmentos rígidos e flexíveis em sua estrutura, resultando em um material com boa elasticidade, resistência ao desgaste e capacidade de suportar grandes deformações de forma repetida. Essas características, aliadas à possibilidade de processamento em tecnologias de extrusão e impressão 3D, fazem do TPU uma escolha comum em aplicações que exigem flexibilidade e robustez, como componentes de absorção de impacto, dispositivos vestíveis e elementos funcionais em robótica macia (Desai; Sonawane; More, 2023). Em comparação com elastômeros silicônicos utilizados em moldagem convencional, o TPU apresenta maior dureza típica e módulo inicial mais elevado, o que pode ser vantajoso em atuadores que precisam gerar força útil com deformações moderadas, ao mesmo tempo em que mantém alongamentos significativos antes da ruptura (Janardhana *et al.*, 2025).

Do ponto de vista mecânico, estudos de caracterização apontam que o TPU apresenta comportamento fortemente não linear em tração, com regiões iniciais de baixa rigidez seguidas de enrijecimento progressivo em grandes deformações, além de histerese e dependência de taxa de deformação (Eceiza *et al.*, 2008). Tais características motivam o uso de modelos hiperelásticos para descrever seu comportamento em regimes de grande alongamento, sendo frequente o emprego de funções de energia de deformação como Neo-Hooke, Mooney-Rivlin, Ogden e Yeoh em ajustes a dados experimentais. Em contextos de impressão 3D, observa-se ainda que as propriedades efetivas do TPU dependem não apenas da formulação do polímero, mas também da microestrutura gerada pela deposição camada a camada, o que inclui porosidade residual, orientação das trilhas de material e qualidade de fusão entre cordões (Gallup, L. K. *et al.*, 2021).

Para aplicações em robótica macia, a combinação entre alta deformabilidade e ca-

pacidade de recuperação elástica após ciclos repetidos é particularmente relevante (Chu; Patterson, 2018). Ensaios cíclicos em amostras impressas indicam que o TPU pode manter resposta estável em um número elevado de ciclos, embora efeitos de amolecimento inicial, histerese e relaxação de tensões devam ser considerados em aplicações que envolvam operação prolongada (Jaradat; Soliman; Taha, 2023). Além disso, a possibilidade de formular TPUs com diferentes durezas e composições permite ajustar, em nível de material, o compromisso entre rigidez e alongamento, enquanto parâmetros de impressão, como padrão de preenchimento e orientação das camadas, permitem ajustes adicionais em nível de estrutura (Viccica; Giordano; Galati, 2025). Nesta tese, o foco recai sobre um único tipo de TPU compatível com impressão por FDM que é o TPU 95A, amplamente encontrado no mercado brasileiro, com parâmetros de impressão mantidos constantes, de modo que variações observadas no desempenho dos atuadores possam ser atribuídas predominantemente às diferenças geométricas entre as configurações estudadas.

2.2.3 Desafios para impressão de TPU por FDM

Apesar de sua atratividade para robótica macia, a impressão de TPU por FDM apresenta desafios específicos associados tanto ao comportamento viscoelástico do material quanto às características do processo de deposição. Entre os problemas mais comuns reportados na literatura estão fenômenos de retração do filamento na região do extrusor, instabilidade no fluxo, formação de *stringing* e *oozing* entre regiões próximas da peça, além de dificuldades na manutenção de geometria estável em elementos esbeltos ou muito flexíveis (Li; Shi *et al.*, 2025). Muitos desses efeitos estão relacionados à baixa rigidez do filamento, à sensibilidade a variações de temperatura e à necessidade de um controle cuidadoso de retrações, velocidades de deslocamento e temperaturas de extrusão.

Outro desafio recorrente diz respeito à adesão entre camadas e à formação de porosidade interna. Em FDM, o contato e a coalescência entre cordões sucessivos de material são determinantes para a integridade mecânica da peça. No caso do TPU, a combinação de viscosidade relativamente elevada e resfriamento rápido pode levar à formação de interfaces parcialmente fundidas, provocando redução de resistência à tração na direção normal às camadas, anisotropia pronunciada e possíveis caminhos

para vazamento de fluido (Desai; Sonawane; More, 2023). Estudos sobre estruturas impressas em TPU apontam que parâmetros como largura de extrusão, sobreposição entre trilhas, temperatura de bico e velocidade de impressão influenciam diretamente a densidade efetiva e o fechamento de vazios internos (Le et al., 2023).

Em atuadores pneumáticos, esses efeitos se tornam críticos, pois a presença de poros ou descontinuidades entre camadas pode comprometer a estanqueidade das câmaras internas. A literatura sobre atuadores macios impressos em TPU indica que pequenas falhas na vedação podem resultar em perda gradual de pressão, redução de amplitude de deformação e comportamento inconsistentes entre ciclos de pressurização (Gonzalez et al., 2022; Wichiramala et al., 2023). Estratégias para mitigar esse problema incluem o uso de múltiplas paredes externas, aumento da sobreposição entre cordões, redução da velocidade de impressão em regiões críticas, ajuste da temperatura de extrusão para favorecer a fusão entre camadas e, em alguns casos, aplicação de selantes superficiais ou pós-processamentos térmicos leves. Trabalhos recentes também sugerem que padrões de preenchimento mais densos e trajetórias de deposição alinhadas com a direção principal de tensão podem contribuir para a melhoria da integridade estrutural e da estanqueidade em câmaras pneumáticas (Li; Shi et al., 2025; Le et al., 2023).

No contexto desta tese, a ênfase recai sobre a obtenção de atuadores PneuNet impressos em TPU 95A com câmaras internas suficientemente estanques para operação em regime de pressurização quasi-estática, mantendo-se constantes os parâmetros de impressão uma vez estabelecida uma configuração adequada. Assim, os desafios associados à retração, ao *stringing* e à aderência entre camadas são tratados como aspectos de ajuste de processo que devem ser resolvidos em uma fase inicial de calibração, ao passo que a análise detalhada se concentra na influência da geometria das câmaras sobre o desempenho mecânico dos atuadores, assumindo-se que a estanqueidade global foi alcançada de forma satisfatória.

2.2.4 Parâmetros de impressão relevantes

A definição adequada dos parâmetros de impressão é um dos fatores que mais influenciam a qualidade de peças em TPU produzidas por FDM, tanto em termos de resposta mecânica quanto de integridade estrutural e estanqueidade. A literatura mostra

que combinações específicas de temperatura de bico e mesa, velocidade de impressão, densidade e padrão de preenchimento, altura de camada e largura de extrusão podem alterar de forma sensível propriedades como rigidez efetiva, anisotropia, porosidade interna e resistência entre camadas (Desai; Sonawane; More, 2023). No contexto de atuadores pneumáticos, esses parâmetros assumem papel ainda mais crítico, pois pequenas descontinuidades ou vazios podem comprometer a vedação das câmaras internas.

A temperatura de bico precisa ser suficiente para garantir boa fusão entre os cordões de TPU, mas sem degradar o polímero ou provocar excesso de fluência. Estudos reportam faixas típicas de aproximadamente 210–240 °C para muitos filamentos comerciais de TPU, com variações dependendo da dureza e da formulação específica (Desai; Sonawane; More, 2023; Li; Shi *et al.*, 2025). Temperaturas muito baixas tendem a produzir cordões mal fundidos e interfaces frágeis entre camadas, enquanto temperaturas muito elevadas podem aumentar a tendência a *stringing* e *oozing*. A temperatura de mesa, por sua vez, costuma situar-se entre 40 e 70 °C, sendo ajustada para melhorar a aderência da primeira camada sem induzir deformações térmicas excessivas.

A velocidade de impressão também exerce influência direta na qualidade do depósito de material. Trabalhos que avaliam a imprimibilidade de TPU em FDM indicam que velocidades moderadas, em torno de 15–40 mm/s, tendem a produzir melhor controle de fluxo e menor ocorrência de defeitos visuais e geométricos, sobretudo em peças esbeltas ou com paredes finas (Li; Shi *et al.*, 2025; Le *et al.*, 2023). Velocidades muito altas podem resultar em falta de material em curvas e mudanças bruscas de direção, enquanto velocidades muito baixas aumentam o tempo de exposição ao calor e podem favorecer deformações indesejadas em regiões já depositadas.

No que diz respeito ao preenchimento interno, parâmetros como densidade de *infill* e padrão adotado (reticulado, linhas, *gyroid*, entre outros) determinam a porosidade efetiva, a rigidez global e o caminho disponível para eventual passagem de ar ou fluido. Em aplicações estruturais, densidades intermediárias podem ser suficientes para alcançar um compromisso entre rigidez e economia de material. Já em atuadores pneumáticos com câmaras pressurizadas, a tendência é utilizar perímetros sólidos com múltiplas paredes externas, combinados a preenchimentos de alta den-

sidade (tipicamente superiores a 60–80 %) ou mesmo preenchimento quase maciço em regiões críticas, de modo a minimizar a presença de vazios conectados (Desai; Sonawane; More, 2023; Le *et al.*, 2023). Além disso, padrões de preenchimento mais contínuos e com trajetórias bem sobrepostas tendem a favorecer a estanqueidade em comparação com padrões muito abertos.

A altura de camada e a largura de extrusão influenciam a resolução vertical, a rugosidade superficial e o grau de coalescência entre cordões. Alturas de camada em torno de 0,15–0,30 mm são frequentemente utilizadas em TPU, com valores menores favorecendo melhor acabamento e maior densidade aparente, à custa de tempos de impressão mais longos (Li; Shi *et al.*, 2025). A largura de extrusão costuma ser definida próxima ao diâmetro do bico (em torno de 100–120 % desse valor), o que ajuda a garantir sobreposição adequada entre trilhas adjacentes e a reduzir a formação de lacunas. Para atuadores pneumáticos, a combinação de altura de camada moderada com largura de extrusão ligeiramente aumentada pode contribuir para paredes mais densas e com menor probabilidade de vazamento, desde que acompanhada de uma calibração cuidadosa da taxa de fluxo.

Na prática, a escolha final dos parâmetros resulta de um processo iterativo que equilibra qualidade de impressão, tempo de fabricação e requisitos específicos da aplicação. Para esta tese, a estratégia adotada consiste em selecionar uma combinação de parâmetros dentro de faixas reportadas na literatura como adequadas para TPU, realizando ajustes pontuais até alcançar estanqueidade satisfatória das câmaras. Uma vez estabelecido esse conjunto de parâmetros, ele é mantido fixo em todas as geometrias de atuadores, de forma que as diferenças observadas no desempenho mecânico sejam atribuídas predominantemente às variações de perfil geométrico e não a mudanças no processo de impressão.

2.3 Simulação por elementos finitos de atuadores macios

A modelagem por elementos finitos (MEF) tornou-se uma ferramenta central no estudo de atuadores macios, em especial daqueles acionados por fluidos, devido à combinação de grandes deformações, comportamento material não linear e geome-

trias com cavidades internas complexas (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Ding *et al.*, 2022). Nesses dispositivos, abordagens analíticas costumam exigir simplificações fortes, enquanto a MEF permite incluir, em um mesmo modelo, a cinemática de grandes deslocamentos, a não linearidade constitutiva e as condições reais de carregamento e restrição (Tawk; Alici, 2020). Revisões recentes indicam que a MEF é uma das estratégias mais utilizadas para acelerar o desenvolvimento de atuadores pneumáticos macios, reduzindo o número de protótipos físicos necessários e oferecendo um meio sistemático de explorar o espaço de projeto geométrico e de materiais (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Gariya; Kumar; Prasad, 2022).

Em muitos estudos voltados a atuadores pneumáticos do tipo PneuNet, modelos tridimensionais são construídos com materiais hiperelásticos quase incompressíveis, e o carregamento é representado por pressurização interna quasi estática das câmaras (Gariya; Kumar; Prasad, 2022; Palacios-Lazo *et al.*, 2025). A calibração de modelos hiperelásticos, como os de Yeoh, Ogden ou Mooney Rivlin, é realizada a partir de ensaios mecânicos em corpos de prova do material, e os parâmetros obtidos são então utilizados em simulações de elementos finitos que buscam reproduzir curvas pressão–deformação e padrões de flexão dos atuadores PneuNets (Schreiber *et al.*, 2025; Yap; Ng; Yeow, 2016; Mosadegh *et al.*, 2014b).

2.3.1 Formulação geral do MEF para materiais hiperelásticos

A formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF) para sólidos hiperelásticos é estabelecida no regime de grandes deformações da mecânica do contínuo. Seja $\chi(\mathbf{X})$ o mapeamento da configuração de referência (coordenadas materiais \mathbf{X}) para a configuração atual. Define-se o gradiente de deformação

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \chi}{\partial \mathbf{X}}, \quad J = \det(\mathbf{F}), \quad \mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}, \quad (2.1)$$

em que \mathbf{C} é o tensor de Cauchy–Green à direita e J representa a variação local de volume.

Para materiais hiperelásticos isotrópicos quase incompressíveis, a energia de deformação por unidade de volume na referência (densidade de energia) é usualmente decomposta em uma parcela isocórica (ou desviadora), associada às mudanças de

forma, e uma parcela volumétrica, associada às mudanças de volume:

$$W(\mathbf{C}) = W_{\text{iso}}(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + W_{\text{vol}}(J), \quad (2.2)$$

onde \bar{I}_1 e \bar{I}_2 são invariantes modificados (isocóricos) do tensor \mathbf{C} , definidos a partir de $I_1 = \text{tr}(\mathbf{C})$ e $I_2 = \frac{1}{2}[(\text{tr} \mathbf{C})^2 - \text{tr}(\mathbf{C}^2)]$ como

$$\bar{I}_1 = J^{-2/3} I_1, \quad \bar{I}_2 = J^{-4/3} I_2. \quad (2.3)$$

Essa escolha separa explicitamente o efeito volumétrico (J) do efeito isocórico, o que é desejável quando a incompressibilidade é imposta de forma aproximada (isto é, $J \approx 1$).

No presente trabalho, o modelo de Yeoh foi empregado na segunda etapa de simulação como lei constitutiva hiperelástica para representar o comportamento do TPU na faixa de deformações de interesse. Especificamente, adotou-se o modelo de Yeoh de segunda ordem, assumindo $C_{30} = 0$ em virtude de a resposta observada ocorrer sob deformações moderadas, para as quais o termo cúbico não se mostrou necessário. Nesse caso, a parcela isocórica depende apenas do primeiro invariante modificado \bar{I}_1 e é escrita como:

$$W_{\text{iso}}(\bar{I}_1) = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{20} (\bar{I}_1 - 3)^2, \quad (2.4)$$

em que C_{10} e C_{20} são parâmetros do material obtidos por ajuste a dados experimentais (por exemplo, ensaios de tração uniaxial), e o termo $(\bar{I}_1 - 3)$ assegura energia nula no estado não deformado ($\mathbf{C} = \mathbf{I}$, $J = 1$).

Para representar a quase incompressibilidade, utiliza-se um termo volumétrico penalizador, por exemplo:

$$W_{\text{vol}}(J) = \frac{1}{2D_1} (J - 1)^2, \quad (2.5)$$

onde D_1 controla a compressibilidade (quanto menor D_1 , maior a penalização para $J \neq 1$), sendo frequentemente relacionado ao módulo volumétrico K por aproximações do tipo $K \sim 1/D_1$, dependendo da convenção adotada no *solver*.

No contexto do MEF, em cada ponto de integração calcula-se \mathbf{F} , \mathbf{C} , \bar{I}_1 , \bar{I}_2 e J , e a partir de W obtêm-se as tensões e a rigidez tangente consistentes para a solução não linear. Por exemplo, o segundo tensor de Piola–Kirchhoff é dado por

$$\mathbf{S} = 2 \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}}, \quad (2.6)$$

e a tensão de Cauchy é recuperada por $\sigma = \frac{1}{J} \mathbf{F} \mathbf{S} \mathbf{F}^T$.

Para materiais quase incompressíveis, como muitos elastômeros e TPUs, a formulação puramente em deslocamentos pode apresentar travamento volumétrico numérico. Por esse motivo, códigos de elementos finitos comerciais adotam alternativas como formulações mistas deslocamento–pressão, integração reduzida seletiva ou técnicas de penalização volumétrica (Holzapfel, 2000; Li; Wei, 2015). Em pacotes amplamente utilizados na área de robótica macia, como Abaqus, Ansys e COMSOL, modelos hiperelásticos do tipo Yeoh e Ogden são implementados em estruturas numéricas que já tratam internamente esses aspectos, cabendo ao usuário fornecer os parâmetros ajustados e escolher a formulação de elemento apropriada para grandes deformações (Xavier; Fleming; Yong, 2021).

2.3.2 Modelagem geométrica de atuadores PneuNet em softwares FEM

Em estudos de atuadores pneumáticos tipo PneuNet, a geometria costuma ser representada explicitamente como um sólido tridimensional contendo cavidades internas conectadas, que correspondem às câmaras pressurizadas. As paredes externas, a base não pressurizada e eventuais camadas de restrição são modeladas de forma contínua, refletindo a fabricação monolítica obtida por moldagem ou impressão 3D (Tawk; Alici, 2020; Gariya; Kumar; Prasad, 2022). Essa representação geométrica detalhada permite capturar concentrações de tensões em cantos de câmaras, efeitos de espessura de parede e variações de rigidez ao longo do comprimento do atuador.

Softwares comerciais como Abaqus, Ansys Mechanical e COMSOL Multiphysics, são amplamente utilizados para esse tipo de análise. Em geral, o fluxo de trabalho envolve: (i) a importação ou criação do modelo CAD do atuador com suas cavidades internas; (ii) a definição de um material hiperelástico apropriado, muitas vezes do tipo Yeoh ou Ogden, calibrado a partir de ensaios mecânicos; (iii) a geração de uma malha de elementos sólidos adequada a grandes deformações; (iv) a aplicação de condições de contorno que restringem a extremidade fixa do atuador; e (v) a aplicação de pressão interna nas superfícies das câmaras, em etapas progressivas, para simular o processo de inflagem (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Palacios-Lazo *et al.*, 2025).

No caso específico do Ansys Mechanical, por exemplo, atuadores pneumáticos moles são frequentemente modelados com elementos tetraédricos ou hexaédricos de segunda ordem, apropriados para grandes deformações, e com ativação explícita de efeitos geométricos não lineares. O material hiperelástico é definido no módulo de dados de engenharia, selecionando-se o modelo de Yeoh e inserindo-se os coeficientes ajustados a partir de ensaios experimentais. A pressão interna é aplicada como carregamento distribuído nas faces das cavidades, e o problema é resolvido em regime quasi estático, com incremento gradual da pressão (Gariya; Kumar; Prasad, 2022; Harchegani *et al.*, 2025). Resultados típicos incluem campos de deformação, mapas de tensão de Cauchy e curvas numéricas que relacionam pressão à curvatura ou ao deslocamento da extremidade do atuador, as quais são então comparadas a medições experimentais na fase de validação (Schreiber *et al.*, 2025; Jiryaei; Jafarpisheh, 2024).

2.3.3 Estratégias de malha em atuadores macios

A qualidade da malha é um dos fatores que mais influencia a precisão e a estabilidade numérica em simulações de atuadores macios por elementos finitos. Revisões sobre modelagem de atuadores fluidicamente acionados destacam que a escolha do tipo de elemento, o tratamento de contatos internos e o refinamento localizado em regiões de elevada concentração de tensões são aspectos recorrentes nos estudos da área (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Bonet; Wood, 2008). Em geral, utilizam-se elementos sólidos tridimensionais com formulações adequadas a grandes deformações, frequentemente de segunda ordem, que apresentam melhor capacidade de capturar curvaturas e gradientes de deformação em comparação a elementos lineares (Gariya; Kumar; Prasad, 2022; Palacios-Lazo *et al.*, 2025).

No caso de atuadores pneumáticos com cavidades internas, a malha precisa representar de forma adequada as paredes finas que separam câmaras adjacentes, bem como a transição entre a região ativa e a base mais rígida (Xavier; Fleming; Yong, 2021). Estudos de PneuNets e atuadores similares mostram que é comum empregar elementos tetraédricos ou hexaédricos com refinamento nas proximidades de cantos de câmaras, curvas acentuadas e interfaces onde se espera concentração de tensão ou maior gradiente de deformação (Tawk; Alici, 2020; Pasquier; Jeong; Okamura, 2023). A realização de análises de sensibilidade de malha, verificando a convergência

de grandezas de interesse como deslocamento da extremidade e curvatura global, é recomendada para assegurar que o número de elementos seja suficiente sem tornar o tempo de solução excessivo (Xavier; Fleming; Yong, 2021).

Em situações em que partes do atuador podem entrar em contato entre si ou com superfícies rígidas, a definição de contatos na malha também se torna relevante. Em muitos trabalhos, a interação entre o atuador e objetos externos é representada por contatos superfície–superfície com atrito baixo ou nulo, enquanto o contato entre paredes internas tende a ser menos frequente em atuadores de flexão pura, mas pode ocorrer em configurações com grandes amplitudes de dobramento (Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Patel *et al.*, 2023; Harchegani *et al.*, 2025). Códigos comerciais como Abaqus, Ansys e COMSOL oferecem rotinas específicas para esse tipo de problema, e a literatura aponta que a escolha de algoritmos robustos de detecção de contato e penalização é importante para evitar instabilidades numéricas em grandes deformações.

2.3.4 Condições de contorno típicas

As condições de contorno adotadas nos modelos numéricos de atuadores pneumáticos macios procuram reproduzir, de forma simplificada, o modo como esses dispositivos são fixados e carregados em ensaios experimentais e situações de aplicação real. Em muitos estudos, a extremidade proximal do atuador é completamente restringida em deslocamento e rotação, representando o ponto de fixação na estrutura de suporte, enquanto a extremidade distal permanece livre para se deformar sob ação da pressão interna (Gu *et al.*, 2021; Gariya; Kumar; Prasad, 2022). Em alguns casos, restrições adicionais são aplicadas para impedir deslocamentos rígidos globais ou para explorar simetrias geométricas e de carregamento.

O carregamento fluido é normalmente representado por uma pressão uniforme aplicada nas superfícies internas das câmaras. Na literatura de PneuNets e atuadores macios inflados, essa pressão é incrementada em etapas quasi estáticas até um valor máximo de interesse, permitindo rastrear a curva de resposta do atuador em termos de deslocamento da extremidade e ângulo de flexão (Tawk; Alici, 2020; Pasquier; Jeong; Okamura, 2023). Em análises focadas em comportamento dinâmico ou em regimes de excitação cíclica, podem ser considerados históricos de pressão depen-

desenvolvidos ao longo do tempo, embora a maior parte dos estudos de projeto utilize carregamentos quasi estáticos para avaliar a rigidez efetiva e a capacidade de deformação.

Quando o objetivo é analisar a interação do atuador com superfícies externas, como em garras ou dispositivos de reabilitação, superfícies rígidas são incluídas no modelo e condições de contato são definidas entre o atuador e o objeto representado. Exemplos incluem a simulação de dedos robóticos macios que fecham sobre um corpo rígido ou de atuadores que empurram uma placa ou anteparo (Polygerinos; Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2024). Nesses casos, além da pressão interna, forças de reação de contato e distribuições de pressão na interface atuador–objeto podem ser analisadas para avaliar a capacidade de preensão ou de aplicação de força do dispositivo.

2.3.5 Exemplos de estudos da literatura com foco em PneuNet

A literatura recente apresenta diversos estudos que combinam modelagem numérica e experimentos em atuadores PneuNet. Gu *et al.* propuseram um modelo analítico e numérico generalizado para atuadores desse tipo, considerando deformações tridimensionais e explorando a influência de parâmetros geométricos como número de câmaras, espessura de paredes e dimensões das cavidades sobre a curvatura e a força gerada (Gu *et al.*, 2021). Esse trabalho tornou-se uma referência importante para análises paramétricas e para o entendimento de como modificações de geometria podem ser incorporadas em modelos simplificados e em simulações de elementos finitos.

Em outro exemplo, Stano *et al.* estudaram atuadores PneuNet fabricados por impressão 3D monolítica, enfatizando aspectos de manufatura aditiva e vedação, mas também apresentando simulações numéricas para avaliar a distribuição de tensões e o comportamento de flexão sob pressurização (Stano; Arleo; Percoco, 2020). O foco recaiu sobre a demonstração de que é possível obter atuadores estanques e funcionalmente relevantes a partir de processos de impressão, o que reforça o interesse por geometrias projetadas diretamente para manufatura aditiva.

Libby *et al.* investigaram como a geometria interna de atuadores macios, incluindo configurações tipo PneuNet, modula a resposta dinâmica e a histerese, combinando simulações de elementos finitos com ensaios de fadiga para avaliar a evolução da rigi-

dez e da capacidade de deformação ao longo do tempo (Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Mehrdad *et al.*, 2023; Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Patel *et al.*, 2023). Esses estudos destacam a importância de considerar não apenas a resposta quasi estática inicial, mas também o comportamento em ciclos repetidos de pressurização, aspecto relevante para aplicações de reabilitação e uso contínuo.

Mais recentemente, trabalhos como os de du Pasquier *et al.* e Wu *et al.* ilustram o uso de modelos de elementos finitos detalhados para explorar regimes de pressão mais amplos e diferentes tipos de carregamento (Pasquier; Jeong; Okamura, 2023; Wu *et al.*, 2025). Enquanto du Pasquier *et al.* analisam atuadores de flexão inflados a partir da perspectiva de robôs do tipo *inflated beam*, com foco em curvatura e limites operacionais, Wu *et al.* estudam a resposta de atuadores PneuNet desde baixas até altas pressões, discutindo a transição entre regimes de deformação e a importância de incluir modelos de material apropriados. Em paralelo, aplicações como garras macias e dispositivos de reabilitação de mão utilizam modelos numéricos de PneuNets para apoiar o projeto de dispositivos mais complexos, como no caso de Polygerinos *et al.* e Zhang *et al.*, que analisam módulos de atuação acoplados a estruturas vestíveis (Polygerinos; Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2024).

Esses exemplos ilustram o papel da simulação por elementos finitos como ferramenta de apoio ao projeto de atuadores PneuNet, fornecendo um pano de fundo conceitual para a abordagem numérica adotada nos capítulos seguintes desta tese.

2.4 Síntese crítica da literatura e lacunas

2.4.1 O que já foi feito em PneuNets com impressão 3D

Os atuadores pneumáticos do tipo PneuNet surgiram originalmente em contextos de moldagem em elastômeros, com geometrias obtidas a partir de moldes rígidos e processos de laminação ou colagem. Trabalhos como os de Gu *et al.* consolidaram descrições analíticas e numéricas para esses atuadores, relacionando parâmetros geométricos como número de câmaras, espessura de paredes e dimensões das cavidades à curvatura e à força na extremidade (Gu *et al.*, 2021). Com o avanço da manufatura aditiva, parte dessa linha de pesquisa migrou para processos de impressão 3D,

permitindo a fabricação de atuadores com geometrias mais complexas, integração de canais internos e produção monolítica sem etapas intensivas de pós-processamento.

Stano et al. demonstraram a viabilidade de fabricar PneuNets monolíticos por impressão 3D, enfatizando a vedação das câmaras e a integração de conectores de ar no próprio corpo do atuador (Stano; Arleo; Percoco, 2020). Outros estudos exploraram atuadores pneumáticos impressos com geometrias adaptadas à impressão, incluindo variações na disposição das câmaras, na espessura das paredes e na presença de camadas de restrição, muitas vezes com foco em garras, módulos de reabilitação ou robôs infláveis (Zolfagharian et al., 2020; Harchegani et al., 2025; Pasquier; Jeong; Okamura, 2023). Em geral, esses trabalhos mostram que a impressão 3D permite acelerar o ciclo de projeto e prototipagem de PneuNets, além de facilitar a personalização geométrica.

Por outro lado, a maioria dos estudos que combinam PneuNets e impressão 3D ainda se concentra em demonstrar a viabilidade de fabricação e o funcionamento básico dos atuadores, com análises numéricas frequentemente limitadas a alguns casos geométricos específicos. Avaliações sistemáticas de famílias de geometrias relacionadas, com variação controlada de atributos como forma da seção transversal e perfil longitudinal das câmaras, são menos frequentes, especialmente quando se busca uma comparação quantitativa entre diferentes configurações com o mesmo material.

2.4.2 O que já foi feito especificamente com TPU em FDM

Dentro do universo de PneuNets impressos, o uso de poliuretano termoplástico (TPU) em impressão por FDM/FFF tem ganhado espaço pela combinação de flexibilidade, resistência mecânica e compatibilidade com impressoras amplamente disponíveis. Revisões sobre TPU em impressão 3D destacam aplicações em componentes flexíveis, estruturas de absorção de energia e dispositivos médicos (Desai; Sonawane; More, 2023). Em robótica macia, diversos trabalhos têm explorado o TPU impresso como alternativa a silicones moldados, tanto em atuadores quanto em garras macias (Georgopoulou et al., 2021; Hohimer et al., 2020).

Estudos específicos sobre atuadores pneumáticos impressos em TPU, como os de Gonzalez et al. e Sant'Anna et al., indicam que é possível obter atuadores funcionalmente eficientes por FDM, desde que parâmetros de impressão sejam cuidado-

samente ajustados para garantir boa adesão entre camadas e minimizar porosidade interna (Gonzalez *et al.*, 2022; SantÁnna *et al.*, 2025). Em paralelo, trabalhos de caracterização mecânica de TPU impresso mostram que o comportamento do material é fortemente influenciado pelo padrão de preenchimento, pela orientação de deposição e por parâmetros de processo, evidenciando anisotropia e dependência da microestrutura formada na impressão (Duran *et al.*, 2023; Gallup, L. K. *et al.*, 2021).

Apesar desses avanços, muitos estudos com TPU em FDM ainda se concentram em caracterizações de material ou em demonstrações de caso, sem necessariamente conectar de forma detalhada a calibração de modelos hiperelásticos à simulação de atuadores com geometrias variadas. Além disso, a questão da estanqueidade permanece como um desafio recorrente, sendo frequentemente abordada como um problema de calibração de processo, mas nem sempre documentada de forma sistemática ou relacionada diretamente à performance mecânica em diferentes geometrias de atuadores. Por fim, o desenvolvimento de atuadores com o TPU 95A aplicado nesse trabalho é extremamente escasso, visto que a grande maioria dos trabalhos utiliza TPU 85A ou, em alguns casos, TPU 60A.

2.4.3 O que já foi feito com modelo Yeoh em atuadores macios

No campo da modelagem de atuadores macios, o uso de modelos hiperelásticos baseados em energia de deformação é amplamente documentado. Entre os modelos mais recorrentes estão Neo-Hooke, Mooney–Rivlin, Ogden e Yeoh, frequentemente avaliados em termos de capacidade de ajuste, número de parâmetros e facilidade de calibração (Yeoh, 1993; Li; Wei, 2015; Shahzad *et al.*, 2015). Em revisões sobre modelagem de atuadores fluidicamente acionados, o modelo de Yeoh é apontado como uma opção particularmente adequada em cenários de grandes deformações, oferecendo boa qualidade de ajuste com um número relativamente reduzido de parâmetros (Xavier; Fleming; Yong, 2021).

Aplicações concretas do modelo de Yeoh em atuadores macios incluem tanto dispositivos em silicone quanto atuadores impressos em outras resinas. Gariya *et al.* compararam diferentes modelos hiperelásticos na análise de um atuador pneumático de flexão, mostrando que o modelo de Yeoh pode reproduzir com boa fidelidade as curvas numéricas para grandes deformações, desde que adequadamente calibrado

(Gariya; Kumar; Prasad, 2022). Palacios-Lazo et al. utilizaram um modelo do tipo Yeoh calibrado para um atuador antagonista impresso por estereolitografia, analisando limites operacionais e distribuições de tensão com base em simulações de elementos finitos (Palacios-Lazo et al., 2025). Xavier et al. discutem, em uma revisão ampla, o uso de modelos do tipo Yeoh e Ogden em atuadores fluidicamente acionados, destacando que esses modelos têm sido implementados em softwares comerciais como Abaqus, Ansys e COMSOL em estudos tanto quasi estáticos quanto dinâmicos (Xavier; Fleming; Yong, 2021).

No caso específico de TPUs impressos, estudos de caracterização hiperelástica mostram que o modelo de Yeoh pode se ajustar bem a dados de tração e outros modos de carregamento, capturando o enrijecimento em grandes deformações (Landgraf et al., 2021). No entanto, a integração explícita entre atuadores impressos com TPU 95A e a simulação de atuadores pneumáticos ainda aparece de forma pontual na literatura.

2.4.4 Lacunas identificadas que a tese pretende abordar

A partir da revisão apresentada, identificam-se três lacunas principais que orientam esta tese. Primeiro, embora existam trabalhos que utilizam impressão 3D para fabricar atuadores PneuNet e demonstrar sua funcionalidade (Stano; Arleo; Percoco, 2020; Zolfagharian et al., 2020; Harchegani et al., 2025), ainda são escassos os estudos que comparam, de forma sistemática, diferentes perfis geométricos de câmaras (laterais e longitudinais) de uma mesma família de atuadores, mantendo constantes o material e o processo de fabricação. Segundo, apesar de o TPU em FDM se mostrar promissor para robótica macia, a obtenção de atuadores pneumáticos verdadeiramente estanques continua sendo um desafio relevante (Desai; Sonawane; More, 2023; Gonzalez et al., 2022; SantÁnna et al., 2025), com pouca sistematização de estratégias de impressão voltadas à fabricação de PneuNets em TPU, especialmente com dureza 95A. Terceiro, embora modelos hiperelásticos do tipo Yeoh já sejam empregados em análises de atuadores macios (Xavier; Fleming; Yong, 2021; Gariya; Kumar; Prasad, 2022; Palacios-Lazo et al., 2025), ainda são limitados os estudos que usam essa modelagem para reduzir prototipagem física de PneuNets em TPU e explorar, em um mesmo conjunto de simulações, métricas como deformação angular, deslocamento e forças

na extremidade e de preensão (Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Patel *et al.*, 2023; Libby; Somwanshi; Stancati; Tyagi; Mehrdad *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2025). Diante disso, esta tese propõe: (i) comparar, por simulação, o efeito de diferentes perfis geométricos de câmaras em atuadores PneuNet, com material e parâmetros de modelo fixos; (ii) estabelecer e registrar estratégias de impressão para obtenção de câmaras pneumáticas suficientemente estanques em TPU; e (iii) empregar modelagem em elementos finitos com modelo Yeoh para avaliar múltiplos indicadores de desempenho, reduzindo a dependência de ciclos sucessivos de prototipagem física.

Tabela 2.1: Parâmetros típicos de impressão FDM para TPU e sua influência na fabricação de atuadores pneumáticos macios.

Parâmetro	Faixa típica (TPU)	Efeito principal	Referências
Temperatura de bico	210–240 °C	Fusão entre cordões, aderência entre camadas, risco de <i>stringing/oozing</i>	(Desai; So-nawane; More, 2023; Li; Shi et al., 2025)
Temperatura de mesa	40–70 °C	Aderência da primeira camada, redução de deformações e <i>warping</i>	(Desai; So-nawane; More, 2023)
Velocidade de impressão	15–40 mm/s	Estabilidade do fluxo, qualidade dimensional, controle de defeitos em paredes finas	(Li; Shi et al., 2025)
Densidade/padrão de <i>infill</i>	60–100 % (regiões críticas quase maciças)	Porosidade interna, rigidez global, risco de caminhos para vazamento de ar	(Desai; So-nawane; More, 2023; Let et al., 2023)
Altura de camada	ca- 0,15–0,30 mm	Resolução vertical, densidade aparente, tempo de impressão	(Duran et al., 2023)
Largura de extrusão	100–120 % do diâmetro do bico	Sobreposição entre trilhas, fechamento de lacunas, integridade das paredes	(Duran et al., 2023)

Capítulo 3

Proposta de desenvolvimento e avaliação de atuadores pneunets impressos em 3D

3.1 Materiais e Métodos

3.1.1 Avaliação de modelos de perfis para atuadores pneumáticos

Para o desenvolvimento de atuadores pneumáticos baseados em *soft robotics*, utilizou-se o software Autodesk Fusion 360 (versão educacional 2024), desenvolvido pela Autodesk, Inc., com sede em San Rafael, Califórnia, EUA, para a modelagem geométrica. Inicialmente, a primeira versão do atuador foi concebida a partir do conceito clássico de PneuNet apresentado por Yap et al. (Yap; Ng; Yeow, 2016), que se consolidou como uma referência para projeto de atuadores pneumáticos segmentados em câmaras seriadas. A adoção desse ponto de partida teve como objetivo estabelecer um modelo-base compatível com aplicações assistivas e reabilitadoras, em que a flexão controlada do atuador, a repetibilidade geométrica e a possibilidade de fabricação por métodos acessíveis são aspectos centrais.

Entretanto, embora a literatura apresente configurações recorrentes de PneuNets, o desempenho mecânico e a viabilidade de fabricação desses atuadores são fortemente dependentes da geometria interna e externa. Em particular, a forma das câmaras e a seção transversal ao longo do comprimento influenciam diretamente a relação

entre pressão aplicada, amplitude de flexão, distribuição de tensões no material e eficiência de conversão pneumática em movimento. Estudos comparativos indicam que, mantendo material e dimensões globais constantes, variações entre seções retangulares, circulares e triangulares podem produzir diferenças sistemáticas nos ângulos de dobra e na capacidade de geração de força na extremidade (Zolfagharian *et al.*, 2020). De forma complementar, análises paramétricas também mostram que alterações no perfil longitudinal ou na seção frontal do atuador podem modificar a sensibilidade do ângulo de flexão em função da pressão, reforçando a necessidade de uma avaliação comparativa antes de definir a geometria a ser validada experimentalmente (Ionela-Lenuța; MÂNDRU, 2024).

Com base nessa premissa, esta tese não assume *a priori* a superioridade de um perfil específico. Em vez disso, foi definido um procedimento de comparação de famílias geométricas, no qual foram propostos modelos CAD que combinam três perfis laterais de câmaras (retangular, circular e triangular) e dois perfis longitudinais do atuador (reto e côncavo, também referido como corte longitudinal arredondado), totalizando seis configurações geométricas. Em todas as configurações, manteve-se o mesmo número de câmaras pneumáticas, a mesma organização seriada e dimensões externas comparáveis, de modo que as diferenças observadas pudessem ser atribuídas predominantemente ao perfil geométrico adotado. A apresentação consolidada dessas seis geometrias e a comparação visual entre elas são discutidas no capítulo de resultados, juntamente com as evidências obtidas nas análises numéricas e nos testes de fabricação.

Após a definição desse conjunto de geometrias candidatas, a escolha do perfil a ser levado às etapas posteriores foi conduzida a partir de critérios objetivos de desempenho mecânico e de viabilidade prática de fabricação. Do ponto de vista mecânico, cada configuração foi avaliada por simulação numérica em elementos finitos, utilizando o mesmo modelo hiperelástico e as mesmas condições de contorno e carregamento descritas na Seção 3.1.3, permitindo comparar indicadores como deformação angular, deslocamento da extremidade e distribuição de tensões ao longo das paredes das câmaras. Essa estratégia está alinhada ao uso recorrente de simulação como ferramenta de triagem de projeto em atuadores pneumáticos, especialmente quando se busca reduzir ciclos sucessivos de prototipagem física e isolar o efeito de parâmetros

geométricos (Gu *et al.*, 2021).

Além do desempenho mecânico, considerou-se explicitamente a fabricabilidade como parte do processo de seleção, uma vez que geometrias distintas podem impor diferentes dificuldades de impressão e vedação em TPU. Em particular, trabalhos recentes que discutem fabricação por FDM em materiais flexíveis relatam que paredes com inclinações acentuadas e superfícies em balanço tendem a demandar estruturas de suporte na impressão, aumentar a rugosidade interna e comprometer a estanqueidade, enquanto geometrias com paredes mais verticais e topo mais plano são frequentemente preferidas por apresentarem maior previsibilidade de deposição e menor taxa de falhas (Conrad *et al.*, 2024). Assim, a seleção do perfil final foi realizada integrando os resultados de simulação e as observações de fabricação correspondentes, de modo que o perfil escolhido representasse um compromisso consistente entre (i) capacidade de flexão e resposta à pressão, (ii) níveis de tensão distribuídos de forma mais favorável e (iii) maior potencial de obtenção de câmaras pneumaticamente estanques em TPU.

Como resultado desse processo comparativo, definiu-se um perfil majoritário para compor o atuador empregado nas etapas de validação experimental. Ressalta-se que ajustes de detalhamento geométrico e de parâmetros voltados à fabricação, assim como o procedimento completo de impressão e os critérios de estanqueidade adotados, são descritos nas seções subsequentes, evitando antecipar nesta etapa introdutória informações que pertencem ao processo de manufatura e à configuração final do protótipo. A documentação gráfica das geometrias avaliadas e a justificativa do perfil selecionado são apresentadas e discutidas no capítulo de resultados, com base nas métricas de deformação, distribuição de tensões e evidências de fabricabilidade obtidas para as seis configurações.

3.1.2 Modelagem numérica por elementos finitos

A avaliação numérica do atuador pneumático macio foi conduzida por meio de simulações em elementos finitos no software Ansys (Versão Educacional 2025), desenvolvido pela Ansys, Inc., com sede em Canonsburg, Pensilvânia, EUA, que permite uma análise detalhada do comportamento mecânico dos atuadores sob diferentes condições de pressurização. Adotando-se um modelo hiperelástico do tipo Ogden

para representar o comportamento do TPU 85A conforme especificados no trabalho de Yap (Yap; Ng; Yeow, 2016), essa simulação foi feita com o intuito de escolher o melhor perfil geométrico para os testes subsequentes e, no momento de seu desenvolvimento, não havia trabalhos utilizando TPU 95A.

No entanto para a simulação utilizada na validação que precisava utilizar TPU 95A mesmo sem muitos trabalhos na literatura foi utilizado o modelo de Yeoh segundo o trabalho de (Schreiber *et al.*, 2025) observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores de parâmetros para modelo Yeoh (adaptado de (Schreiber *et al.*, 2025)).

Hyperelastic model	Parameter	Value (MPa)
Yeoh	C_{10}	6,6389
	C_{20}	-0,5188
	C_{30}	0

A metodologia foi estruturada em duas etapas. Na primeira, foram simuladas as seis geometrias propostas, combinando perfis laterais triangulares, retangulares e circulares com comprimentos reto e côncavo, todas com espessura de parede de 1,6 mm e utilizando as propriedades de material do TPU 85A. Nessas análises iniciais a pressão interna foi incrementada até 160 kPa, faixa de pressão utilizada em muitos Pneu-Nets (Wang, D. *et al.*, 2023), permitindo comparar a capacidade de deformação e a distribuição de tensões entre as diferentes configurações e culminando na seleção do atuador de comprimento reto e perfil retangular como geometria de referência. Na segunda etapa, esse perfil selecionado foi reavaliado utilizando as propriedades mecânicas do TPU 95A (que seria o TPU utilizado na fabricação) investigando-se de forma sistemática a deformação, flexão, força na extremidade livre e a força de preensão.

3.1.2.1 Modelo geométrico

O modelo geométrico de cada atuador foi obtido a partir da importação direta dos arquivos STL no Ansys, preservando integralmente a geometria tridimensional desenvolvida para fabricação. Para as simulações foram consideradas apenas as partes móveis do atuador, sem a representação explícita da entrada de ar, uma vez que a

pressão interna foi aplicada como carregamento uniforme nas superfícies dos canais internos. Não foram introduzidas simplificações adicionais na forma externa ou nos canais pneumáticos, de modo a manter a fidelidade geométrica em relação aos protótipos impressos. A geração da malha tridimensional foi realizada com elementos sólidos tetraédricos, utilizando um tamanho característico de elemento suficientemente pequeno para discretizar a espessura das paredes com múltiplos elementos ao longo dessa direção e capturar adequadamente os gradientes de tensão nas regiões de maior curvatura. As malhas resultantes apresentaram número de elementos e nós da ordem de centenas de milhares, garantindo resolução suficiente para as análises.

3.1.2.2 Propriedades Mecânicas do TPU

Na primeira fase das simulações onde se buscava comparar os diferentes perfis, o comportamento mecânico do TPU foi descrito por um modelo hiperelástico incompressível do tipo Ogden de acordo com demonstrado em (Yap; Ng; Yeow, 2016), conforme implementado no módulo estrutural do Ansys. Os parâmetros do modelo foram obtidos a partir do ajuste das curvas tensão–deformação obtidas na literatura e utilizando as informações do TPU Ninja Flex (85A) fornecidas pelo fabricante conforme descrito anteriormente pelo fato de ser o filamento mais utilizado em impressão de pneunets. As características mecânicas fornecidas pelo fabricante podem ser observadas em (Tabela 3.2).

Tabela 3.2: Parâmetros mecânicos básicos do filamento NinjaFlex, fornecidos pelo fabricante. (NinjaTek, 2016)

Propriedade Mecânica	Valor
Densidade	1 190 kg/m ³
Resistência ao escoamento	4 MPa
Módulo de Young	12 MPa
Resistência à tração, última	26 MPa
Alongamento na ruptura	660 %

O mesmo conjunto de parâmetros foi empregado em todas as simulações na etapa comparativa das seis geometrias. Já na análise detalhada do atuador selecionado com

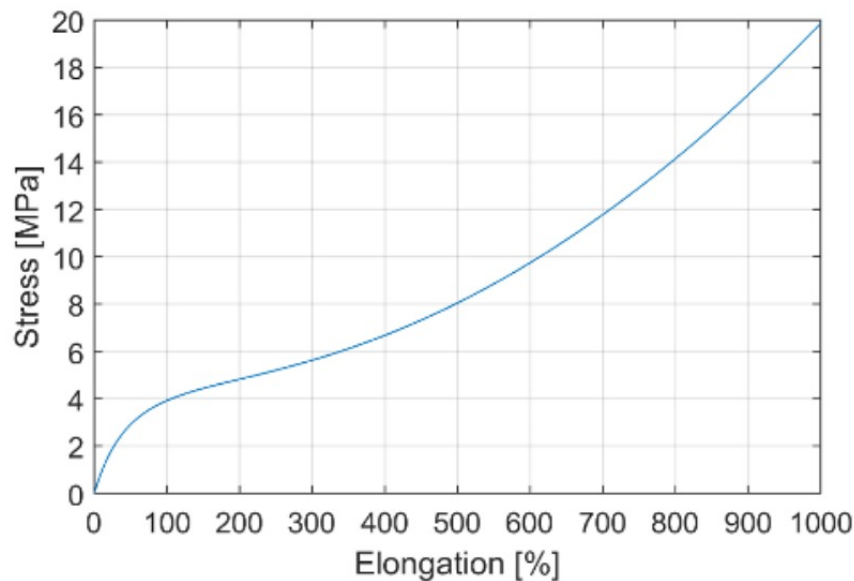


Figura 3.1: Curva de tensão e deformação para o TPU 85A (Ćurković; Jambrečić, 2020).

espessura de 1,6 mm, foi-se utilizado as propriedades mecânicas de TPU com dureza 95A como a utilizada durante a impressão do atuador, assegurando consistência de materiais utilizados entre a modelagem numérica e os resultados experimentais de caracterização.

Visto que o material era muito menos suscetível às deformações em razão da sua dureza e não havia trabalhos o utilizando para TPU 95A o modelo de Ogden já não era mais uma escolha viável, então na segunda etapa de modelagem, optou-se por Yeoh por disponibilidade de parâmetros calibrados para TPU 95A e boa robustez para grandes deformações/quase incompressibilidade com os parâmetros definidos em (Schreiber *et al.*, 2025), único trabalho encontrado que utilizou TPU 95A em fabricação e simulação simultaneamente.

3.1.2.3 Condições de contorno e carregamento

As condições de contorno foram definidas de modo a reproduzir a fixação empregada nos ensaios experimentais. A face proximal do atuador, correspondente à região em que o componente é ancorado à estrutura rígida do aparato de teste, foi completamente restringida em deslocamento, representando um engastamento na base. A pressão interna foi aplicada como um carregamento distribuído nas superfícies inter-

nas das câmaras pneumáticas, assumindo-se distribuição uniforme do fluido ao longo de todo o volume pressurizado.

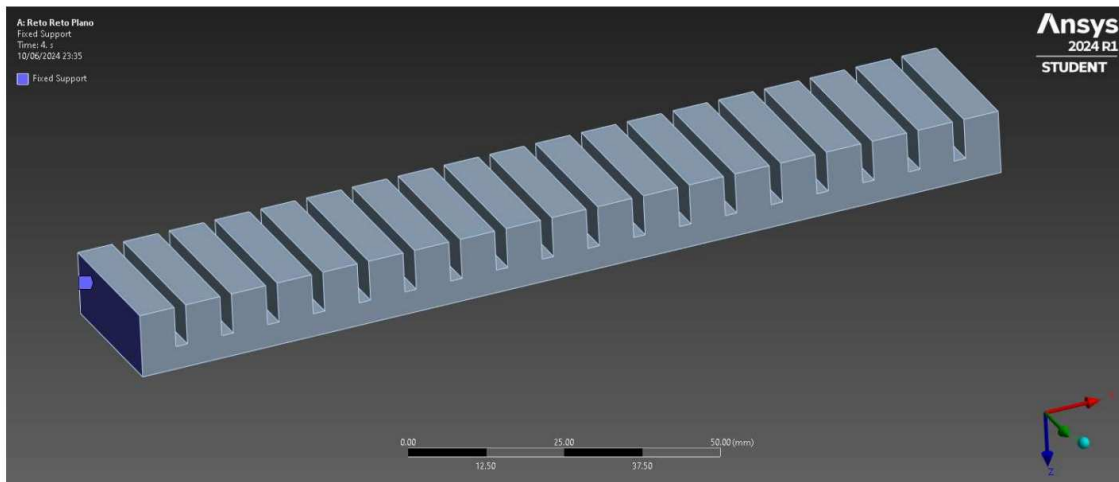


Figura 3.2: Exemplo do engaste, fixação de uma face como Fixed Support no software Ansys.

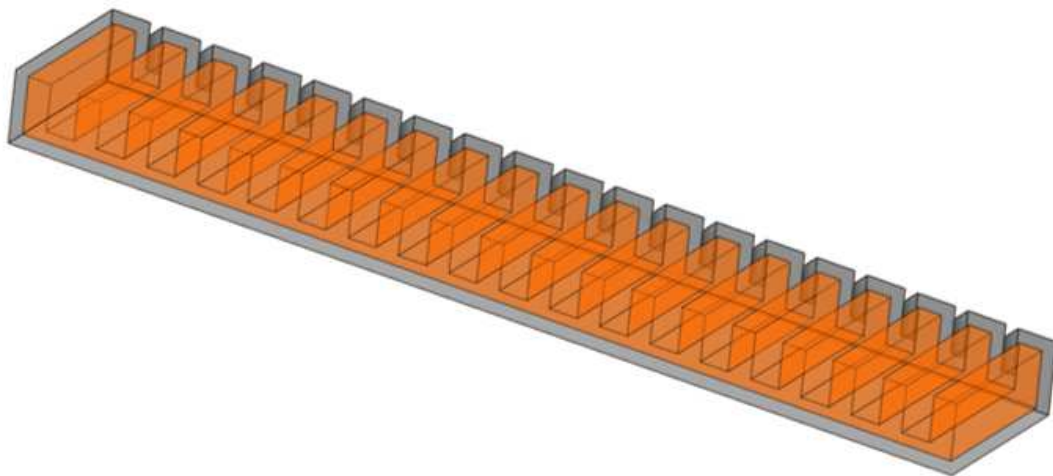


Figura 3.3: Exemplo da área de paredes internas onde a pressão é uniformemente aplicada no software Ansys.

Nas simulações comparativas das seis geometrias, a pressão foi incrementada monotonicamente até 160 kPa em passos de 10 kPa, permitindo avaliar a evolução da curvatura, dos deslocamentos na extremidade livre e dos campos de tensão para cada configuração.

Na segunda etapa, dedicada ao atuador de comprimento reto e perfil retangular com espessura de 1,6 mm, foi aplicada estratégia de carregamento em consonância com a validação experimental, avaliando a deformação nos valores de 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa, e avaliando a força bloqueada produzida na extremidade não engastada no intervalo entre 30kPa e 200kPa, valores de pressão comuns na utilização de PneuNets (Xavier; Tawk *et al.*, 2022). Também foi realizada uma simulação de força de prensão que não pôde ser validada.

3.1.3 Processo de fabricação por impressão 3D

Os atuadores pneumáticos macios foram fabricados por impressão 3D utilizando o processo de modelagem por deposição fundida (fused deposition modeling, FDM) a partir dos modelos tridimensionais previamente desenvolvidos. Os arquivos no formato STL foram preparados em software fatiador, no qual foram definidos parâmetros como altura de camada, temperaturas de extrusão e do leito, velocidades de impressão e número de perímetros, gerando arquivos G-code posteriormente enviados à impressora. Em todas as condições experimentais foi adotado o mesmo procedimento de preparação da máquina, aquecimento do leito, impressão e remoção das peças, de modo a manter a reprodutibilidade entre amostras e entre as diferentes geometrias avaliadas.

3.1.3.1 Equipamentos e materiais

Nesta subseção são apresentados os principais equipamentos e materiais empregados na fabricação dos protótipos, com ênfase na impressora 3D utilizada, no filamento de TPU e nos recursos auxiliares necessários para a preparação do leito e a remoção das peças impressas.

Impressora 3D utilizada

A fabricação dos atuadores foi realizada em uma impressora 3D de mesa do tipo FDM, modelo Ender 3 V2 (Creality, China). Esse equipamento dispõe de volume útil de impressão de aproximadamente $220 \times 220 \times 250$ mm, o que é suficiente para acomodar o comprimento total dos atuadores projetados sem necessidade de segmentação do modelo. A extrusão é feita por um único bico metálico com diâmetro

nominal de 0,4 mm, compatível com filamento de 1,75 mm de diâmetro, configuração usual em impressoras de bancada. O leito de impressão é constituído por uma plataforma aquecida com superfície em vidro, o que permite controlar a adesão durante a deposição das primeiras camadas e facilita a remoção das peças após o resfriamento. A máquina foi operada em sua configuração cartesiana padrão, sem modificações de hardware, realizando-se apenas os ajustes de calibração e o nivelamento do leito antes de cada sequência de impressão. A Figura 3.4 apresenta uma fotografia da impressora utilizada no processo de fabricação dos atuadores.



Figura 3.4: Impressora 3D FDM modelo Ender 3 V2 utilizada na fabricação dos atuadores pneumáticos macios.

Para favorecer a adesão entre o TPU e a superfície do leito, aplicou-se previamente uma fina camada de spray fixador de cabelo comercial (marca Karina) sobre o vidro limpo. Após o término da impressão e o resfriamento do conjunto, a remoção das peças foi realizada com o auxílio de uma espátula metálica plana, evitando esforços excessivos que pudessem danificar as estruturas de parede delgada dos atuadores.

Filamento TPU

Como material de construção foi utilizado filamento flexível de TPU (termoplástico poliuretano) da marca 3D Fila (3D Fila Indústria e Comércio, Brasil), com diâmetro no-

mineral de 1,75 mm. Trata-se de um elastômero termoplástico formulado para impressão 3D, com elevada flexibilidade e boa resistência ao desgaste, indicado para aplicações funcionais que exigem deformações elásticas repetidas, como componentes de robótica macia e dispositivos vestíveis. Durante toda a etapa de fabricação utilizou-se o mesmo tipo de TPU, armazenado em ambiente seco e protegido da luz, a fim de minimizar variações de umidade e de desempenho entre as diferentes impressões.

3.1.3.2 Parâmetros de impressão adotados

Os parâmetros de impressão foram definidos a partir de uma série de testes preliminares com variação sistemática de altura de camada, temperaturas, velocidades e número de perímetros, até a obtenção de peças com boa fidelidade geométrica e ausência de vazamentos nas câmaras pneumáticas. O perfil final, comum a todas as geometrias avaliadas, é sintetizado na Tabela 3.3, na qual se observam a adoção de camadas finas, múltiplos perímetros e preenchimento sólido nas regiões maciças, em consonância com recomendações da literatura para impressão de atuadores macios em TPU por FDM.

Estratégias adicionais foram empregadas especificamente para maximizar a estanqueidade dos atuadores. Entre as variações que mostraram maior impacto destacam-se a redução da altura de camada para 0,10 mm, que aumentou a área de contato entre linhas sucessivas e favoreceu a coalescência entre camadas, e a adoção de espessura de parede de 1,6 mm, obtida com quatro perímetros de bico de 0,4 mm, o que proporcionou uma barreira mais robusta à pressurização interna. Em termos de preparação do material, o filamento de TPU foi condicionado em desumidificador por, no mínimo, 4 h antes de cada sequência de impressão, minimizando defeitos de extrusão relacionados à umidade. Por fim, utilizou-se a função de *ironing* (passar ferro) do PrusaSlicer na camada superior das regiões pressurizadas, promovendo o alisamento da superfície e o preenchimento de microespaços entre linhas, o que contribuiu de forma decisiva para a obtenção de atuadores funcionalmente vedados e reproduzíveis ao longo das diferentes geometrias estudadas.

Tabela 3.3: Parâmetros de impressão FDM adotados para a fabricação dos atuadores em TPU.

Parâmetro	Valor final
Altura de camada	0,10 mm
Altura da primeira camada	0,20 mm
Número de perímetros	4
Espessura de parede alvo	1,6 mm
Camadas sólidas superior / inferior	14 / 14
Densidade de <i>infill</i> (regiões maciças)	100 %
Velocidade de perímetros	20–25 mm/s
Velocidade da primeira camada	15 mm/s
Temperatura do bico (1ª / demais camadas)	245 / 240–245 °C
Temperatura do leito (1ª / demais camadas)	50 / 45 °C
Multiplicador de extrusão	1,05

3.1.3.3 Pós-processamento

Após a impressão e o resfriamento completo das peças, os atuadores foram cuidadosamente removidos do leito com o auxílio de espátula metálica e submetidos a uma etapa de pós-processamento. Inicialmente, realizou-se a verificação de vazamentos por meio de um ensaio simples de pressurização: cada atuador era conectado à linha de ar comprimido, pressurizado até um valor de 50kPa como recomendado em (Yap; Lim *et al.*, 2016), em seguida, imerso em água ou em solução aquosa de sabão neutro, observando-se a formação de bolhas ao longo das câmaras e das interfaces entre camadas. A ausência de bolhas visíveis durante um intervalo de tempo fixado foi adotada como critério para considerar o atuador adequadamente vedado. Em seguida, procedeu-se à limpeza das peças, com remoção de rebarbas, fios de material residual e pequenas irregularidades superficiais decorrentes do processo de deposição, utilizando lâmina ou estilete de precisão. Essa etapa foi conduzida de forma a não alterar a geometria funcional das câmaras pneumáticas, assegurando que todos os protótipos empregados nas etapas de caracterização e validação apresentassem acabamento superficial e integridade compatíveis com a aplicação pretendida.

3.1.4 Setup experimental do atuador

O desempenho do atuador pneumático selecionado foi avaliado experimentalmente em termos de deformação angular e força gerada na extremidade livre sob pressurização interna em consonância com outros trabalhos que desenvolveram PneuNets (Schreiber *et al.*, 2025; Yap; Ng; Yeow, 2016; Wu *et al.*, 2025; Gu *et al.*, 2021). Os ensaios foram realizados no laboratório de hidropneumática do IFRN campus Ceará-Mirim, utilizando exclusivamente o modelo com comprimento reto, perfil retangular e espessura de parede de 1,6 mm, previamente aprovado nos testes de estanqueidade descritos na Seção 3.2.

3.1.4.1 Sistema de pressurização

Como fonte de pressão utilizou-se a linha de ar comprimido do laboratório, conectada ao atuador por meio de tubulação pneumática flexível e conexões apropriadas além de um monitor de pressão com fonte de 24V da Festo. A pressão de trabalho

foi ajustada manualmente por uma válvula de regulação fina até o valor de 200 kPa, adotado como pressão máxima segura para o protótipo, e monitorada em tempo real por um manômetro digital instalado a montante do atuador. Antes de cada ensaio verificava-se a estabilidade do valor indicado no manômetro com relação à pressão desejada, bem como a ausência de variações perceptíveis durante o intervalo de aquisição de dados, de modo a garantir que as medições de deformação e força fossem realizadas em condição aproximadamente estacionária de pressurização.

3.1.4.2 Instrumentação de deformação e força

A caracterização da deformação foi baseada em registros fotográficos obtidos com a câmera de um telefone celular iPhone 12, posicionado de forma fixa em frente ao atuador. As imagens eram adquiridas após a estabilização da resposta do atuador numa faixa de pressão entre 50kPa e 200kPa com passo de 50kPa. O ângulo de curvatura foi determinado a partir das fotografias por meio de pós-processamento no software Kinovea, traçando-se uma linha de referência ao longo da base fixa do atuador e uma segunda linha tangente à sua extremidade livre e calculando-se o ângulo entre essas duas direções. Esse procedimento foi repetido para cada valor de pressão mensurado.

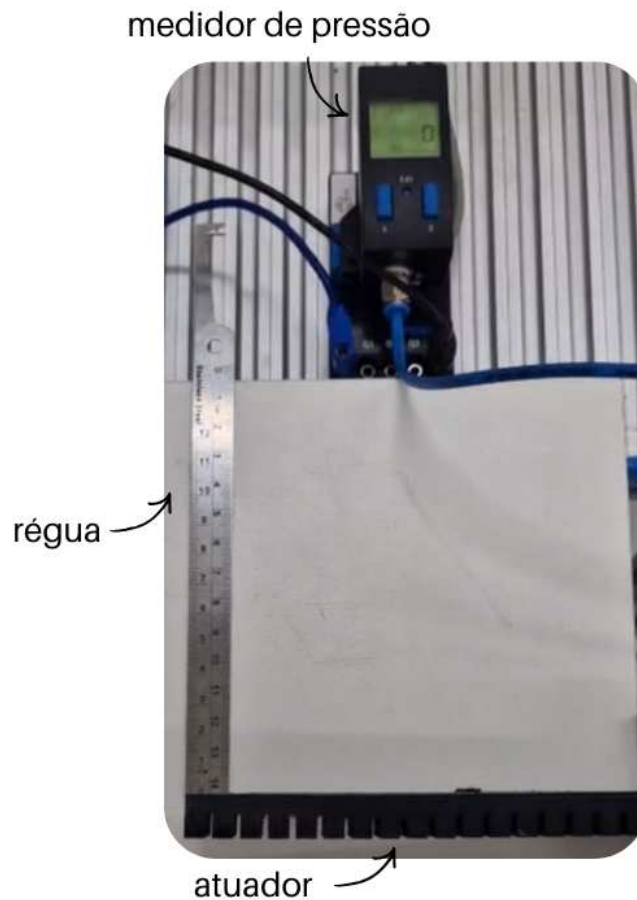


Figura 3.5: Aparato experimental utilizado para medição de deformação.

A força na extremidade foi medida utilizando uma célula de carga com capacidade nominal de 10 kg, acoplada a um módulo amplificador HX711 e a um Arduino responsável pela aquisição dos dados. O atuador era rigidamente engastado na extremidade proximal, enquanto a extremidade distal permanecia apoiada sobre a superfície ativa da célula de carga, de forma que a curvatura induzida pela pressurização resultasse em uma componente de força normal ao sensor. A coleta foi feita no intervalo de 30kPa até 200kPa com passo de 10kPa. O sinal amplificado era amostrado a 1 Hz durante um intervalo de 15 s após a estabilização da pressão, e os valores de força eram obtidos pela média dos pontos no regime estacionário.

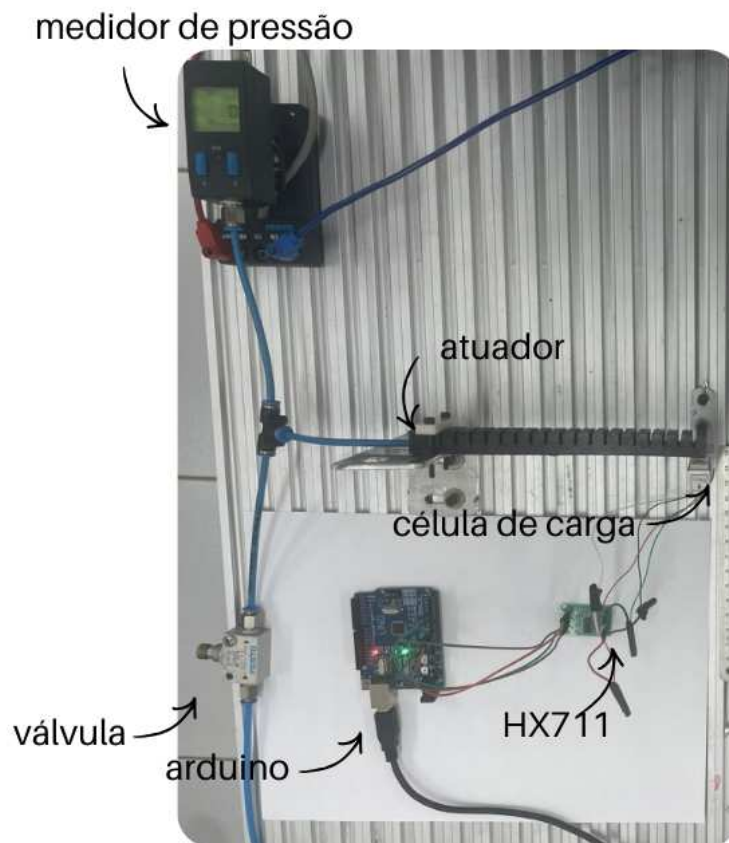


Figura 3.6: Aparato experimental utilizado para medição de força na extremidade do atuador.

3.1.4.3 Protocolo experimental

Os ensaios experimentais foram conduzidos apenas após a confirmação da estanqueidade do atuador por meio do protocolo descrito na Seção 3.2.3. Em seguida, o atuador era conectado ao sistema de pressurização, engastado na base e posicionado de forma alinhada em relação à câmera e à célula de carga. A pressão interna para avaliação da deformação foi avaliada nos valores de: 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa, registradas por foto com análise em software de video posterior.

Quanto à força na extremidade, foram medida a força aplicada na célula de carga e registrados 15 valores após a estabilização no intervalo entre 30kPa e 200kPa com incremento de 10kPa. O valor era salvo em uma planilha do excel onde cada coluna era um valor de pressão com os dados sendo os valores de força em N. Após a primeira bateria de coleta, a célula de carga foi deslocada 1cm para baixo para verificarmos a perda de força gerada no atuador e todo o procedimento de coleta foi repetido.

3.1.4.4 Análise de Dados - Deflexão

A deformação do atuador foi quantificada por meio de análise de vídeo em vista lateral, registrada enquanto o modelo geométrico selecionado era progressivamente pressurizado com 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa. Para cada nível de pressão, foram selecionados os quadros correspondentes ao estado estacionário de deflexão, tomando a condição não pressurizada como referência para as medidas subsequentes.

A partir desses vídeos, a deformação foi mensurada no software Kinovea de duas maneiras complementares: (i) pelo deslocamento vertical de um ponto de interesse localizado na extremidade distal do atuador em relação à sua posição inicial em repouso e (ii) pelo ângulo formado entre o segmento que liga esse ponto à região de origem do atuador e uma linha de referência traçada na posição inicial. Os valores de deslocamento e de ângulo extraídos no Kinovea para cada condição de pressão foram registrados para posterior comparação entre o experimento e as simulações.

3.1.4.5 Análise de Dados - Força

A análise de força produzida pelo atuador foi realizada por meio de uma célula de carga acoplada a um sistema de aquisição baseado em microcontrolador Arduino, enquanto o atuador era pressurizado em diferentes patamares entre 30 kPa e 200 kPa. Os níveis de 10 kPa e 20 kPa foram desconsiderados, pois se encontravam em uma zona morta do sistema de leitura e não eram adequadamente representados no manômetro digital. Para cada patamar de pressão, foram registrados 15 valores consecutivos de força, com frequência de amostragem de 1 Hz (janela de 15 s), em duas configurações distintas: célula de carga em contato direto com a extremidade distal do atuador e célula de carga afastada 1 cm dessa extremidade.

Em seguida, calculou-se a média dos 15 valores de força para cada faixa de pressão e para cada posição da célula de carga, de modo a obter curvas pressão–força representativas em cada condição experimental. Essas curvas foram utilizadas para comparar o comportamento do atuador nas duas configurações de contato com a célula de carga e, adicionalmente, para confrontar os resultados experimentais com as forças previstas pelas simulações de elementos finitos.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Primeiro ciclo de modelagem dos atuadores e escolha do perfil a ser validado

Esta seção apresenta uma visão geral do primeiro ciclo de desenvolvimento geométrico dos atuadores pneumáticos do tipo PneuNet e do processo que conduziu à definição do perfil empregado na etapa de validação experimental. O objetivo deste ciclo foi estabelecer, de maneira controlada, um conjunto de geometrias candidatas e organizar a tomada de decisão com base em critérios de desempenho mecânico e de viabilidade de fabricação em TPU por FDM, evitando a adoção de um perfil *a priori*.

Em aplicações assistivas e de reabilitação, a definição do perfil geométrico não é uma escolha universal, pois depende diretamente das necessidades do projeto, como amplitude de movimento requerida, força a ser gerada, faixa de pressurização disponível, restrições de volume/ergonomia e requisitos de segurança no contato com o usuário (Jiryaei; Jafarpisheh, 2024; Skirven *et al.*, 2011). Assim, perfis que maximizam a deflexão podem não ser os mais adequados quando se prioriza robustez estrutural, redução de tensões internas ou maior capacidade de força na extremidade, e vice-versa. Nesse contexto, a simulação numérica por elementos finitos torna-se uma ferramenta estratégica de projeto, pois permite avaliar de forma sistemática o efeito de variações geométricas sobre métricas relevantes (deflexão e distribuição de tensões) antes da fabricação física, reduzindo o número de iterações de prototipagem, custos e tempo de desenvolvimento. Além disso, a triagem numérica auxilia na identificação

de regiões críticas de concentração de tensões e de geometrias potencialmente mais suscetíveis a falhas ou deformações permanentes, contribuindo para orientar ajustes de projeto e aumentar a previsibilidade do desempenho do atuador.

Inicialmente, foi definido um espaço de projeto composto por seis configurações geométricas, obtidas pela combinação de três perfis laterais de câmaras (retangular, circular e triangular) com dois perfis longitudinais (reto e côncavo). A Figura 4.1 sintetiza essas seis geometrias avaliadas no primeiro ciclo, que servem como ponto de partida para as análises comparativas apresentadas nas seções seguintes. Nessa etapa, buscou-se preservar dimensões globais e arquitetura básica equivalentes entre os modelos, de modo que as diferenças observadas fossem predominantemente atribuídas às variações de perfil.

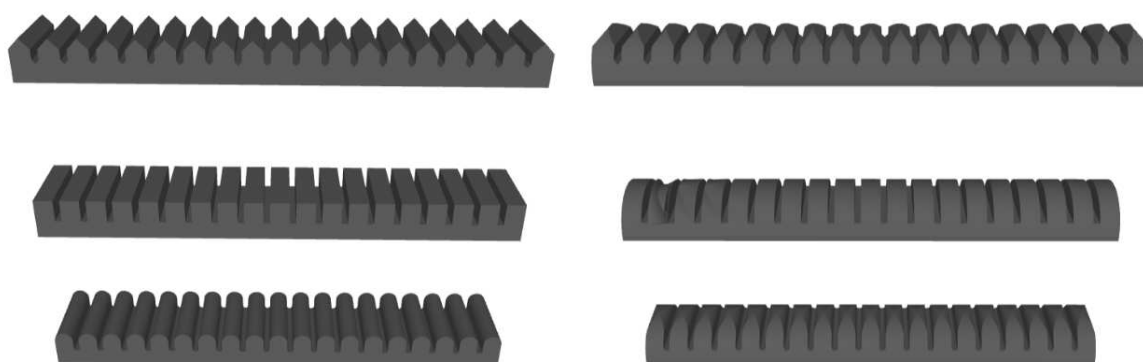


Figura 4.1: Conjunto das seis configurações geométricas propostas para avaliação no primeiro ciclo, combinando três perfis laterais de câmaras (retangular, circular e triangular) e dois perfis longitudinais (reto e côncavo).

A partir desse conjunto de candidatos, a seleção do perfil a ser validado experimentalmente foi conduzida integrando dois eixos de evidência: (i) resultados de simulação numérica em elementos finitos, comparando deflexão e distribuição de tensões sob pressurização; e (ii) observações relativas à fabricabilidade, considerando aspectos como integridade das paredes, facilidade de impressão, repetibilidade e potencial de estanqueidade das câmaras. Essa abordagem busca transformar a etapa de prototipagem em um processo mais racional e rastreável: em vez de depender exclusivamente de tentativa e erro por fabricação sucessiva, utiliza-se a simulação como etapa de filtragem para concentrar esforços experimentais nos perfis com melhor compromisso entre desempenho e viabilidade prática. Embora a decisão final seja apresentada ao

término deste ciclo, os dados que a sustentam (simulações e evidências de fabricação) são detalhados e discutidos nas seções subsequentes, de modo a explicitar de forma transparente como cada critério contribuiu para a escolha do perfil majoritário.

Como síntese do desfecho deste primeiro ciclo, o atuador selecionado para a etapa de validação experimental (deflexão e força na extremidade) é apresentado na Figura 4.2, incluindo a indicação das principais dimensões externas. A justificativa técnica dessa escolha, baseada nas métricas comparativas e nas limitações/prioridades observadas durante a fabricação, é construída ao longo das seções seguintes.

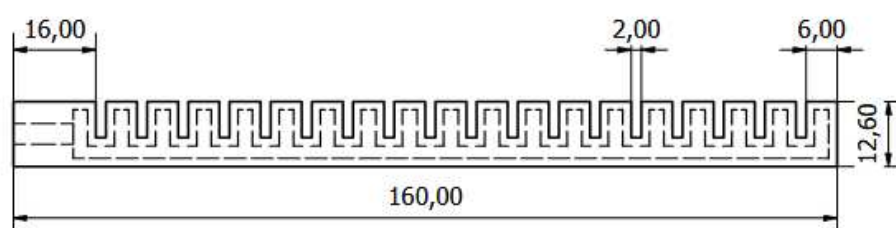


Figura 4.2: Vista lateral do atuador pneumático macio selecionado ao final do primeiro ciclo para validação experimental, com indicação das cotas externas de comprimento total e altura.

4.1.1 Atuador com perfil retangular e paredes planas

O primeiro atuador hermético, dentre os seis desenvolvidos, possui perfil retangular e paredes planas, podendo ser observado na figura 4.3, facilitando sua impressão pois as distâncias onde a impressora terá que fazer overhang (imprimir sobre o vazio) na face lateral superior são menores que nos outros dois perfis. Tal atuador também foi submetido ao processo de simulação por elementos finitos com parâmetros especificados no capítulo anterior. Todos os atuadores foram simulados com as condições de contorno e pressões descritas na metodologia.

Pode-se observar que a pressão de 160kPa já é bastante alta para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas visto que ele executa uma volta completa (Figuras 4.4 e 4.5), incompatível com a aplicação em órteses, os outros atuadores com paredes planas também tiveram altas deformações para mesma faixa de pressão. O deslocamento em cada eixo pode ser observada na figura 4.6.

Podemos perceber que ao final da simulação o atuador volta à altura original por

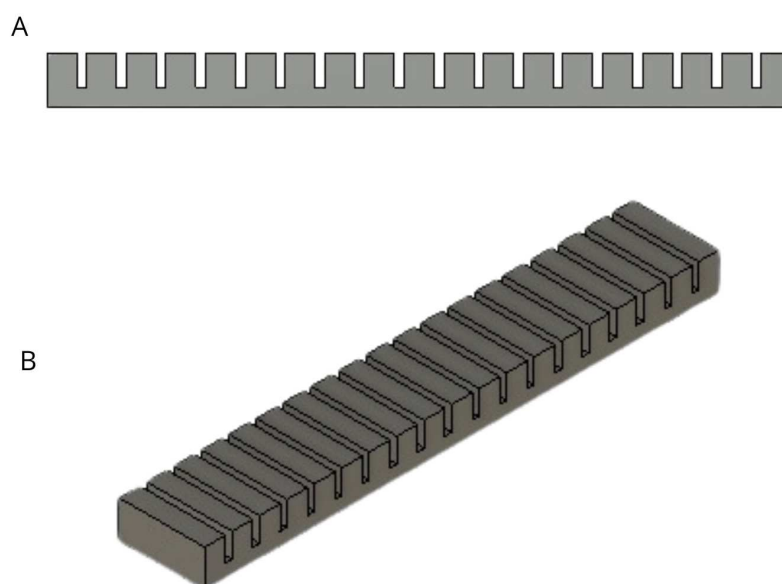


Figura 4.3: A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.

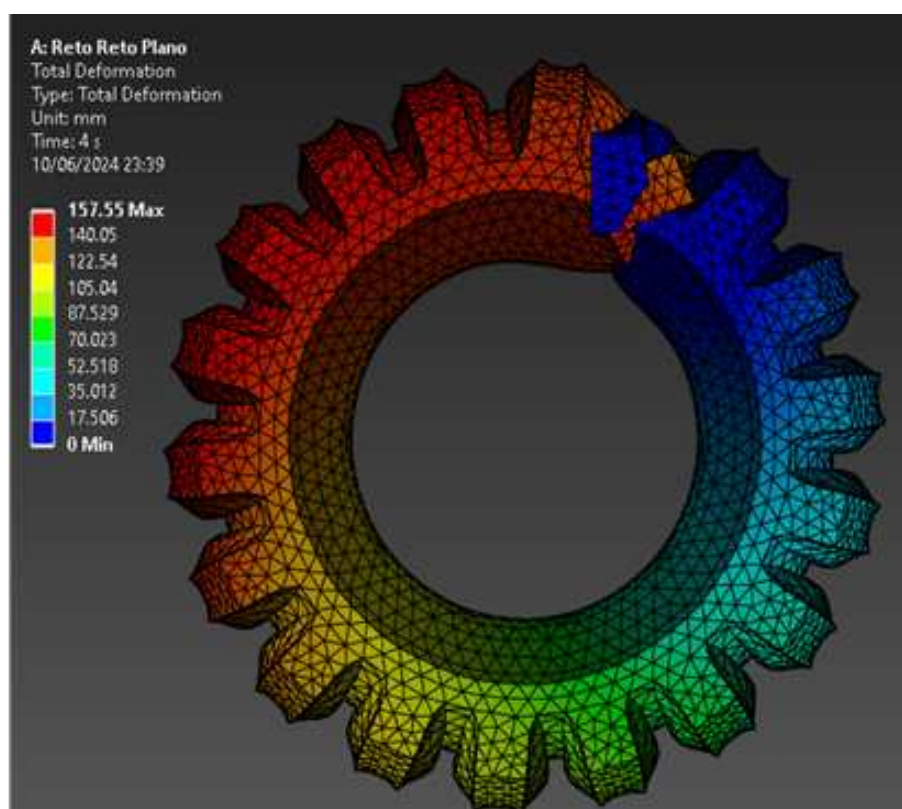


Figura 4.4: Resultados de deflexão para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas a 160kPa.

meio da avaliação da curva vermelha (Eixo Z), esse comportamento foi observado nos três modelos com paredes planas, sugerindo maior facilidade em deflexão. Outra

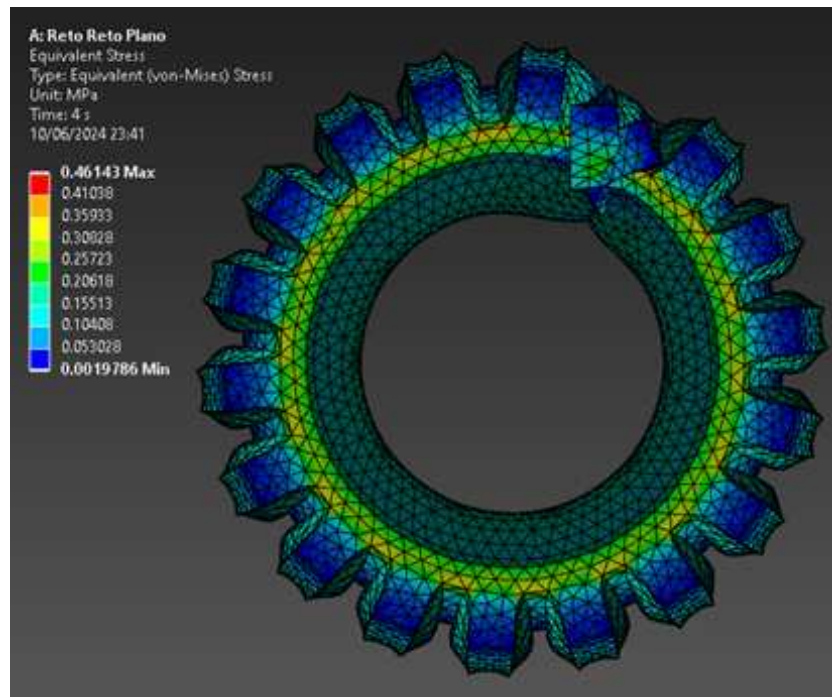


Figura 4.5: Resultados de stress para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas a 160kPa.

Deslocamentos em função do tempo - Atuadores com câmaras retangulares e paredes planas

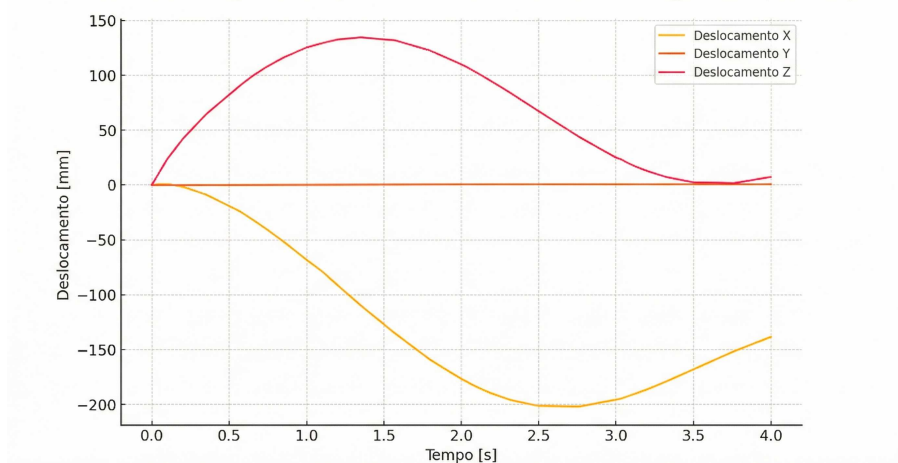


Figura 4.6: Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras retangulares e paredes planas.

característica que pode ser observada é o baixo deslocamento no eixo Y, tal resultado corrobora com o objetivo e design do atuador e é relatado para todos os modelos aqui discutidos.

RETO RETO PLANO				
Stress				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0	0	0	0	0
1	0.1	1.27E-04	1.76E-02	4.17E-03
2	0.2	2.43E-04	2.83E-02	7.60E-03
3	0.35	3.69E-04	3.95E-02	1.23E-02
4	0.575	5.13E-04	5.78E-02	1.89E-02
5	0.65375	5.61E-04	6.72E-02	2.12E-02
6	0.7325	6.09E-04	7.65E-02	2.34E-02
7	0.85062	6.82E-04	9.12E-02	2.67E-02
8	1	7.78E-04	1.11E-01	3.08E-02
9	1.1	8.47E-04	0.12356	3.35E-02
10	1.2	9.15E-04	0.13718	3.63E-02
11	1.35	1.02E-03	0.15826	4.04E-02
12	1.575	9.80E-04	0.19079	4.66E-02
13	1.8	9.18E-04	0.22447	5.28E-02
14	2	9.06E-04	0.25445	5.84E-02
15	2.035	8.84E-04	0.25953	5.94E-02
16	2.07	9.00E-04	0.26457	6.04E-02
17	2.1225	9.11E-04	0.27184	6.19E-02
18	2.2013	9.35E-04	0.28196	6.41E-02
19	2.3194	9.75E-04	0.29474	6.74E-02
20	2.4966	1.05E-03	0.30911	7.25E-02
21	2.7623	1.18E-03	0.32607	8.01E-02
22	3	1.31E-03	0.33996	8.71E-02
23	3.035	1.25E-03	0.34184	8.81E-02
24	3.07	1.29E-03	0.34391	8.92E-02
	3.1225	1.37E-03	0.34695	9.08E-02
	3.2013	1.44E-03	0.35614	9.33E-02
	3.3194	1.51E-03	0.37369	9.70E-02
	3.4966	1.57E-03	0.39901	0.10265
	3.7623	1.81E-03	0.43371	0.11149
	4	1.98E-03	0.46143	0.11983

Figura 4.7: Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes planas.

Aprofundando-se um poucos nas tabelas presentes nas figuras 4.7 e 4.8, pode-se perceber que o atuador ainda tem bastante margem para produzir tensão, visto que a tensão máxima nas paredes internas ainda está muito distante da tensão de escoamento, os valores máximos giram em torno de 0.46MPa que representa aproximadamente 10% da tensão de escoamento, valor que poderia resultar em deformações permanentes do atuador.

A tabela de deslocamento trás informações semelhantes à figura 4.6, evidenciando uma hiperdeflexão com um deslocamento angular maior que o requisito máximo com uma pressão relativamente baixa.

RETO RETO PLANO					
Total Displacement					
	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]	Maximum [mm]
0	0	0	0	0	0
1	0.1	0.8497	-0.003357	23.613	23.649
2	0.2	-1.6358	0.0021611	41.936	41.991
3	0.35	-8.7294	0.018239	64.371	64.981
4	0.575	-24.525	0.053427	91.134	94.397
5	0.65375	-31.846	0.067875	99.575	104.57
6	0.7325	-39.383	0.083528	106.81	113.87
7	0.85062	-51.555	0.10786	116.12	127.1
8	1	-68.208	0.14632	125.24	142.71
9	1.1	-78.74	0.16162	129.29	151.5
10	1.2	-91.376	0.19024	132.56	161.17
11	1.35	-109.8	0.22388	134.55	173.9
12	1.575	-135.68	0.2904	131.7	189.44
13	1.8	-159.48	0.35847	122.43	201.54
14	2	-176.88	0.421	109.87	208.8
15	2.035	-179.28	0.43207	107.55	209.65
16	2.07	-182.06	0.44291	104.66	210.59
17	2.1225	-185.63	0.45891	100.49	211.67
18	2.2013	-190.36	0.48146	93.956	212.86
19	2.3194	-196.03	0.50954	83.678	213.68
20	2.4966	-201.37	0.53651	67.524	212.79
21	2.7623	-202.02	0.55658	43.67	209.28
22	3	-195.63	0.56559	24.833	204.04
23	3.035	-194.64	0.5669	23.206	203.27
24	3.07	-192.86	0.56753	20.377	201.79
25	3.1225	-190.31	0.56874	16.994	199.68
26	3.2013	-186.27	0.57042	12.672	196.26
27	3.3194	-179.49	0.57267	7.3815	190.29
28	3.4966	-168.29	0.57615	2.4279	180.84
29	3.7623	-151.57	0.58176	1.6219	167.62
30	4	-138.49	0.51811	7.3533	157.55

Figura 4.8: Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes planas.

4.1.2 Atuador com perfil circular e paredes planas

A modelagem final do atuador com perfil circular e paredes planas pode ser observada na figura 4.9, tanto esse perfil como o perfil triangular geram mais dificuldade na impressão mas ainda é controlado por causa das paredes planas que dão bastante estabilidade na impressão sem necessidade de nenhum suporte.

Quanto a simulação, demonstradas nas figuras 4.10 e 4.11, os resultados para o atuador com paredes planas e câmaras circulares são semelhantes, uma alta tendência à deflexão, gerando uma flexão até a outra extremidade do atuador e impossibilitando o uso com o design atual. Uma diferença é uma distribuição de stress um pouco mais intensa que o atuador de câmaras retangulares. De toda forma, não há, ainda, diferenças que justifiquem a escolha do perfil retangular ou circular para a aplicação.

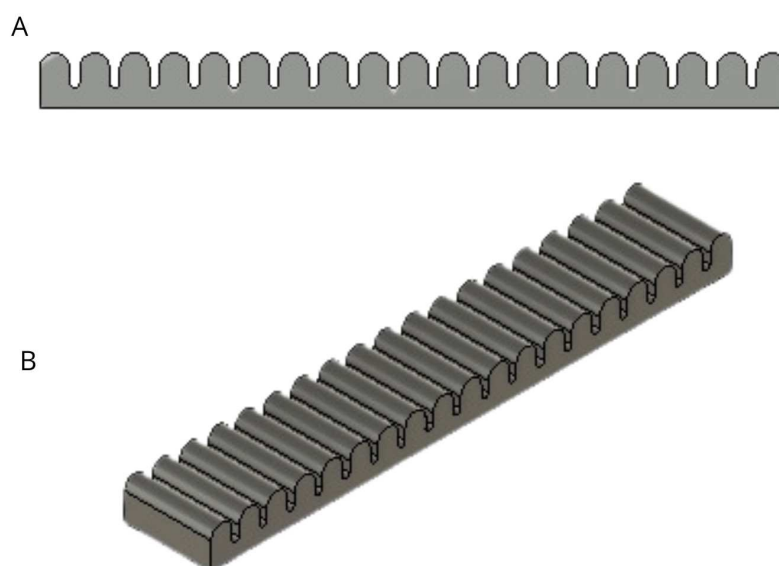


Figura 4.9: A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.

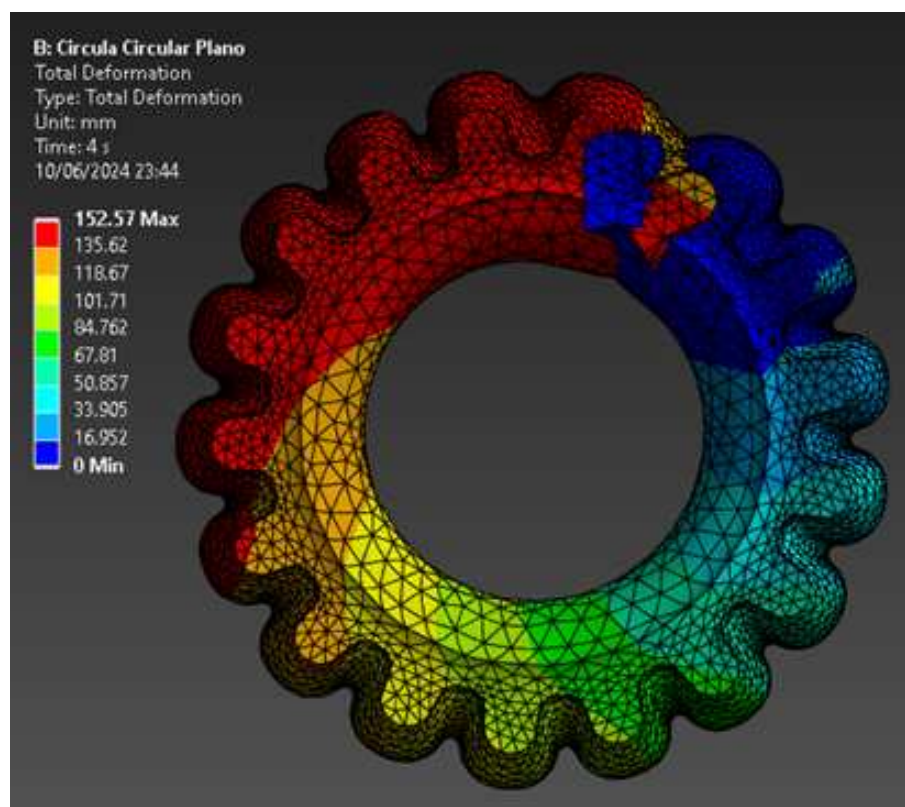


Figura 4.10: Resultados de deflexão para o atuador com câmaras circulares e paredes planas a 160kPa.

O deslocamento decomposto nos eixos ao longo do tempo pode ser observada na figura 4.12, ressaltando que o deslocamento do eixo Z volta ao valor nulo (colisão vir-

tual). O comportamento de deslocamento quase nulo no eixo Y se mantém como o esperado.

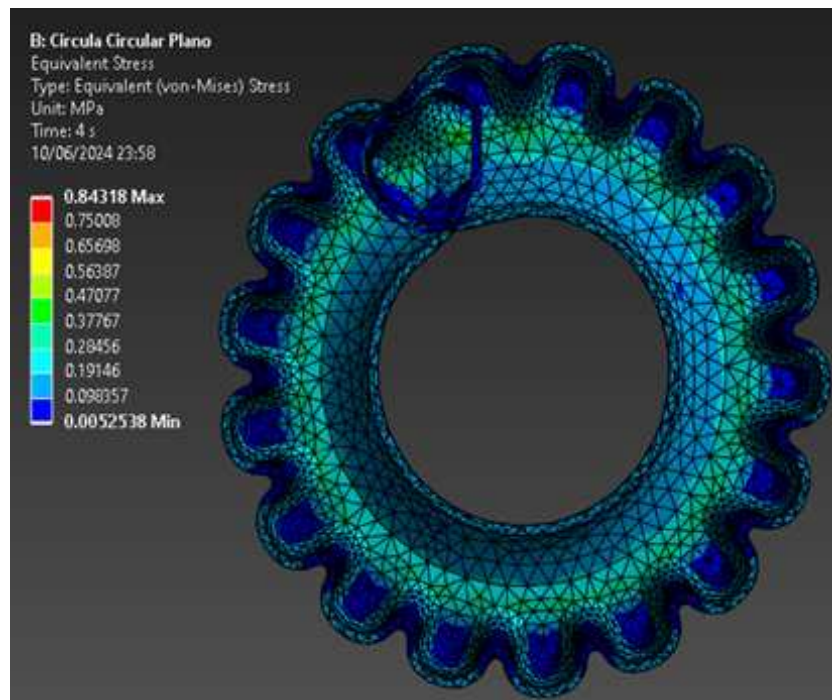


Figura 4.11: Resultados de stress para o atuador com câmaras circulares e paredes planas a 160kPa.

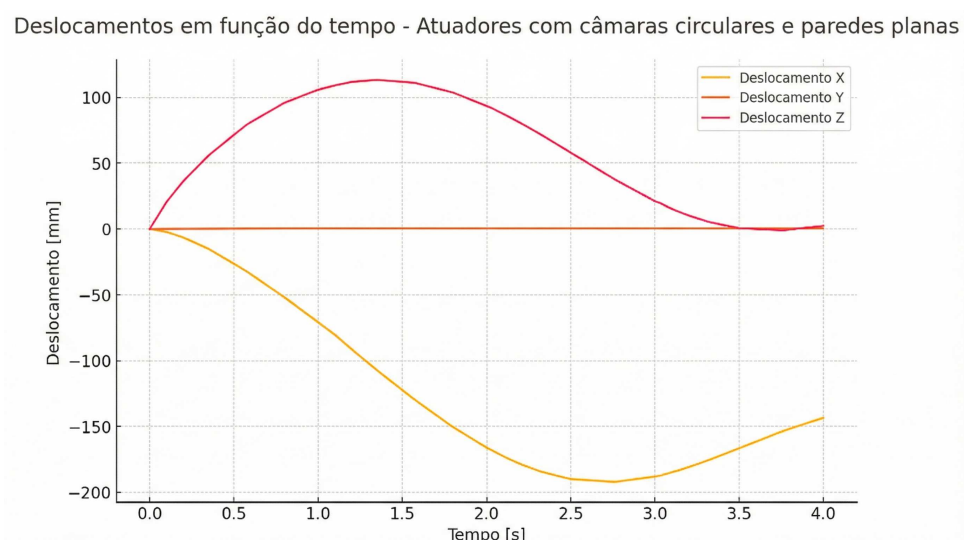


Figura 4.12: Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras circulares e paredes planas.

Analisando as tabelas presentes nas figuras 4.13 e 4.14, pode-se perceber que o atuador ainda tem bastante margem para produzir tensão mesmo que com poten-

cial reduzido comparado ao atuador de perfil retangular, visto que a tensão máxima nas paredes internas está distante do escoamento mas é expressivamente maior que o exemplo anterior, os valores máximos giram em torno de 0.84MPa que representa aproximadamente 20% da tensão de escoamento, valor que poderia resultar em deformações permanentes do atuador.

A tabela de deslocamento trás informações semelhantes à figura 4.12, evidenciando uma hiperdeflexão com um deslocamento angular maior que o requisito máximo com uma pressão relativamente baixa. Todos os atuadores de paredes planas evidenciaram esse comportamento.

CIRCULAR CIRCULAR PLANO				
Stress				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
0	0	0	0	0
1	0.1	1.36E-04	2.09E-02	4.80E-03
2	0.2	3.01E-04	3.43E-02	8.96E-03
3	0.35	5.75E-04	6.30E-02	1.46E-02
4	0.575	1.02E-03	1.11E-01	2.24E-02
5	0.8	1.52E-03	1.63E-01	2.97E-02
6	1	1.98E-03	2.12E-01	3.60E-02
7	1.1	2.21E-03	2.38E-01	3.91E-02
8	1.2	2.44E-03	2.64E-01	4.23E-02
9	1.35	2.68E-03	0.30559	4.70E-02
10	1.575	2.69E-03	0.36956	5.41E-02
11	1.8	3.30E-03	0.43627	6.14E-02
12	2	3.56E-03	0.49338	6.81E-02
13	2.035	3.61E-03	0.50155	6.92E-02
14	2.07	3.65E-03	0.50891	7.04E-02
15	2.1225	3.69E-03	0.51786	7.22E-02
16	2.2013	3.73E-03	0.52815	7.48E-02
17	2.3194	3.80E-03	0.5408	7.88E-02
18	2.4966	3.68E-03	0.55832	8.48E-02
19	2.7623	4.14E-03	0.58459	9.43E-02
20	3	4.45E-03	0.60865	1.03E-01
21	3.035	4.51E-03	0.61198	1.05E-01
22	3.07	4.57E-03	0.62092	1.06E-01
23	3.1225	4.67E-03	0.63447	1.08E-01
24	3.2013	4.83E-03	0.65328	1.11E-01
25	3.3194	4.98E-03	0.67958	1.16E-01
26	3.4966	5.06E-03	0.71499	1.24E-01
27	3.7623	5.16E-03	0.76604	1.36E-01
28	4	5.25E-03	0.84318	0.1481

Figura 4.13: Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil circular e paredes planas.

CIRCULAR CIRCULAR PLANO				
Total Displacement				
	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
0	0	0	0	0
1	0.1	-2.2334	4.16E-02	20.647
2	0.2	-6.4692	8.29E-02	36.481
3	0.35	-15.112	0.1412	55.948
4	0.575	-32.12	0.21975	79.234
5	0.8	-51.926	0.27381	95.881
6	1	-70.862	0.31424	105.81
7	1.1	-80.4	0.32815	109.12
8	1.2	-91.452	0.34098	111.76
9	1.35	-107.38	0.35279	113.32
10	1.575	-129.81	0.35887	111.03
11	1.8	-150.41	0.34822	103.69
12	2	-166.09	0.32169	93.493
13	2.035	-168.23	0.3154	91.647
14	2.07	-170.77	0.30972	89.322
15	2.1225	-174.08	0.30259	85.937
16	2.2013	-178.56	0.29585	80.586
17	2.3194	-184.17	0.29189	72.018
18	2.4966	-189.94	0.29217	58.274
19	2.7623	-192.18	0.29915	37.597
20	3	-188.06	0.30881	21.146
21	3.035	-187.28	0.31041	19.6
22	3.07	-185.94	0.3121	17.064
23	3.1225	-184.01	0.31477	14.054
24	3.2013	-180.9	0.31876	10.197
25	3.3194	-175.59	0.32523	5.4107
26	3.4966	-166.79	0.336	0.66057
27	3.7623	-153.46	0.35499	-0.98106
28	4	-143.41	0.37545	2.3825

Figura 4.14: Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil circular e paredes planas.

4.1.3 Atuador com perfil triangular e paredes planas

A modelagem final do atuador com perfil triangular e paredes planas pode ser observada na figura 4.15. Tal atuador possui características relativas ao processo de impressão semelhantes aos dois anteriores e é um perfil geralmente não abordado em atuadores pneunet, sendo os circulares e retangulares mais comuns.

Para o simulação atuador com perfil triangular e paredes planas (Figuras 4.16 e 4.17), apesar de não ocorrer a colisão virtual entre as extremidades do atuador, a deflexão ainda foi bastante intensa em comparação com os requisitos de deslocamento angular para uma aplicação de luva assistiva, por exemplo, a distribuição de tensão foi

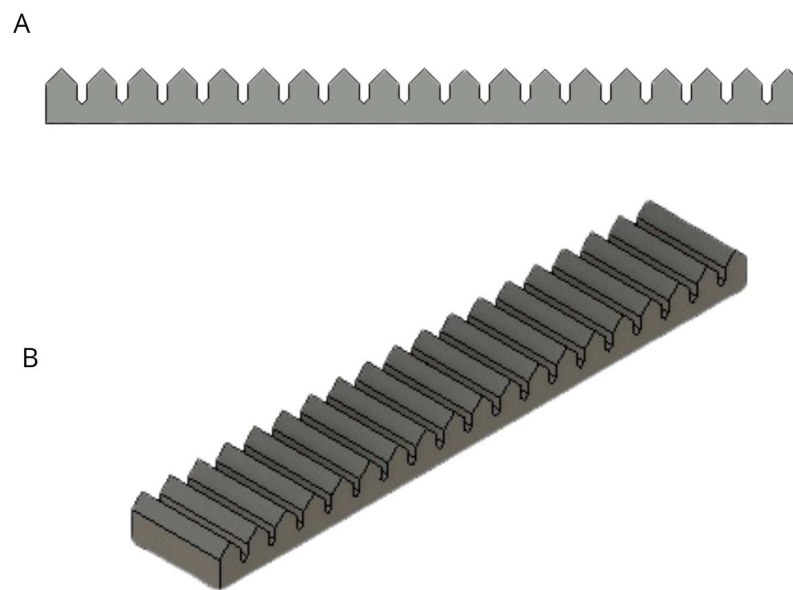


Figura 4.15: A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.

semelhante ao perfil retangular com paredes planas, sugerindo um maior acúmulo em atuadores com perfil circular.

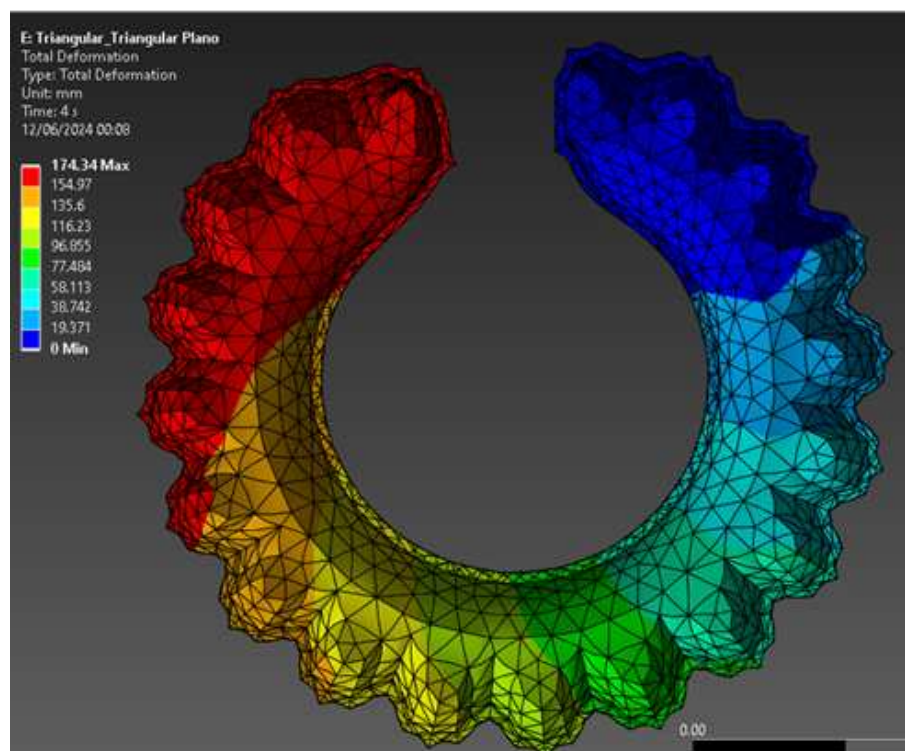


Figura 4.16: Resultados de deflexão para o atuador com câmaras triangulares e paredes planas a 160kPa.

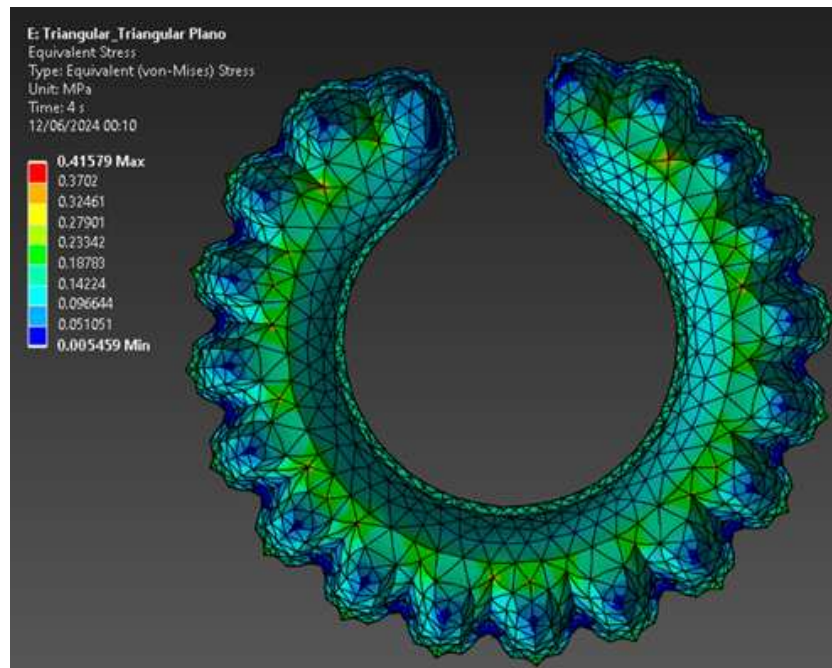


Figura 4.17: Resultados de stress para o atuador com câmaras triangulares e paredes planas a 160kPa.

Essa tendência de menor deslocamento em comparação aos atuadores com perfis retangulares e circulares também pode ser observada na figura [4.18](#), apesar do deslocamento no eixo Z voltar a zero, o deslocamento no eixo X não voltou a ultrapassar o ponto de -150mm, o que indicaria a colisão como nos outros 2 atuadores com paredes planas.

Deslocamentos em função do tempo - Atuadores com câmaras triangulares e paredes planas

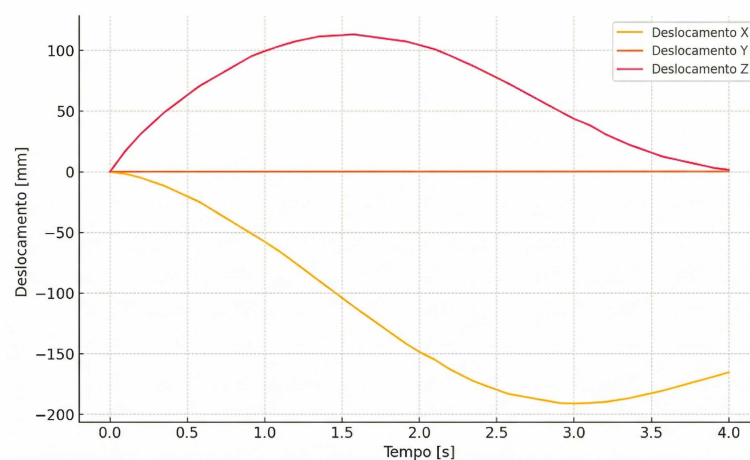


Figura 4.18: Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras triangulares e paredes planas.

Através das tabelas presentes nas figuras 4.19 e 4.20, pode-se perceber que o atuador ainda tem potencial para produzir mais tensão com condições parecidas com os outros atuadores de paredes planas, visto que a tensão máxima nas paredes internas está distante do escoamento, os valores máximos giram em torno de 0.61MPa que representa aproximadamente 15% da tensão de escoamento, valor que poderia resultar em deformações permanentes do atuador.

A tabela de deslocamento trás informações semelhantes à figura 4.18, evidenciando uma hiperdeflexão com um deslocamento angular maior que o requisito máximo (mesmo que não tenha ocorrido a colisão virtual) com uma pressão relativamente baixa, reforçando o comportamento observados nos demais atuadores planos.

TRIANGULAR TRIANGULAR PLANO				
Stress				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	0.1	1.76E-04	2.02E-02	4.90E-03
2	0.2	3.31E-04	3.29E-02	9.14E-03
3	0.35	5.65E-04	5.69E-02	1.47E-02
4	0.575	8.47E-04	9.09E-02	2.20E-02
5	0.9125	1.70E-03	1.46E-01	3.18E-02
6	1	1.91E-03	1.61E-01	3.42E-02
7	1.1	2.17E-03	1.78E-01	3.69E-02
8	1.2	2.43E-03	1.96E-01	3.95E-02
9	1.35	2.73E-03	0.22231	4.34E-02
10	1.575	3.18E-03	0.26283	4.92E-02
11	1.9125	3.82E-03	0.32404	5.78E-02
12	2	3.97E-03	0.33979	6.00E-02
13	2.1	4.15E-03	0.35711	6.25E-02
14	2.2	4.30E-03	0.37387	6.51E-02
15	2.35	4.49E-03	0.3972	6.90E-02
16	2.575	4.59E-03	0.42816	7.48E-02
17	2.9125	3.97E-03	0.46546	8.38E-02
18	3	4.12E-03	0.47375	8.62E-02
19	3.1	4.82E-03	0.48268	8.90E-02
20	3.2	4.89E-03	0.49237	9.18E-02
21	3.35	3.88E-03	0.51716	9.61E-02
22	3.575	5.10E-03	0.55297	1.03E-01
23	3.9125	5.30E-03	0.60333	0.11364
24	4	5.35E-03	0.6157	0.11658

Figura 4.19: Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes planas.

TRIANGULAR TRIANGULAR PLANO				
Total Displacement				
	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
1	0.1	-1.6376	3.94E-02	17.283
2	0.2	-4.8538	8.22E-02	31.361
3	0.35	-11.442	0.13939	48.835
4	0.575	-24.528	0.2143	70.415
5	0.9125	-50.693	0.2969	95.209
6	1	-57.572	0.31375	99.506
7	1.1	-65.872	0.32952	103.78
8	1.2	-75.255	0.34401	107.6
9	1.35	-89.552	0.35921	111.5
10	1.575	-110.93	0.37372	113.35
11	1.9125	-141.51	0.37641	107.5
12	2	-148.33	0.3754	104.58
13	2.1	-154.75	0.37003	101.06
14	2.2	-162.9	0.37057	95.713
15	2.35	-172.52	0.36891	87.167
16	2.575	-182.97	0.37222	72.888
17	2.9125	-190.63	0.38423	49.596
18	3	-190.98	0.38879	43.689
19	3.1	-190.51	0.43483	38.739
20	3.2	-189.58	0.39442	31.205
21	3.35	-186.7	0.40716	22.708
22	3.575	-180.25	0.44075	12.465
23	3.9125	-168.43	0.43995	3.0549
24	4	-165.14	0.45938	1.6122

Figura 4.20: Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes planas.

4.1.4 Atuador de perfil retangular e paredes curvadas

A modelagem do atuador de perfil retangular com paredes curvadas pode ser observada na figura 4.21, onde um corte em formato de arco foi feito através do comprimento do atuador de mesmo perfil e paredes planas.

Os atuadores com paredes curvadas possuem comportamento consideravelmente distinto, são menos propensos à deflexão, não voltando ao nível do eixo Z original e com uma tensão acumulada relativamente menor que os pares com o mesmo perfil, os resultados para o atuador com câmaras retangulares e parede curvada podem ser observados nas figuras 4.22 e 4.23.

O fato de serem menos propensos à deflexão pode confundir a princípio se observar o valor do Ansys que é de 211,51mm, maior que todos os atuadores com paredes planas (157,55 para o perfil retangular, 152,57 para o perfil circular e 174,34 para o perfil triangular), porém isso se dá pois todos deformaram tanto que acabaram desenvolvendo uma proximidade maior da origem considerando o eixo X, isso faz com que a

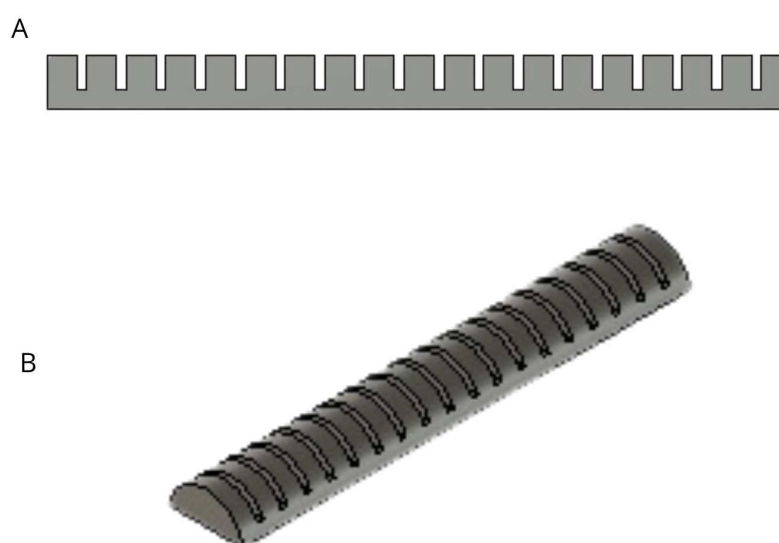


Figura 4.21: A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.

resultante de deslocamento linear apresentada pelo Ansys seja maior, mas avaliando o ângulo que representa a circunferência do atuador pressurizado é uma deflexão de menor intensidade.

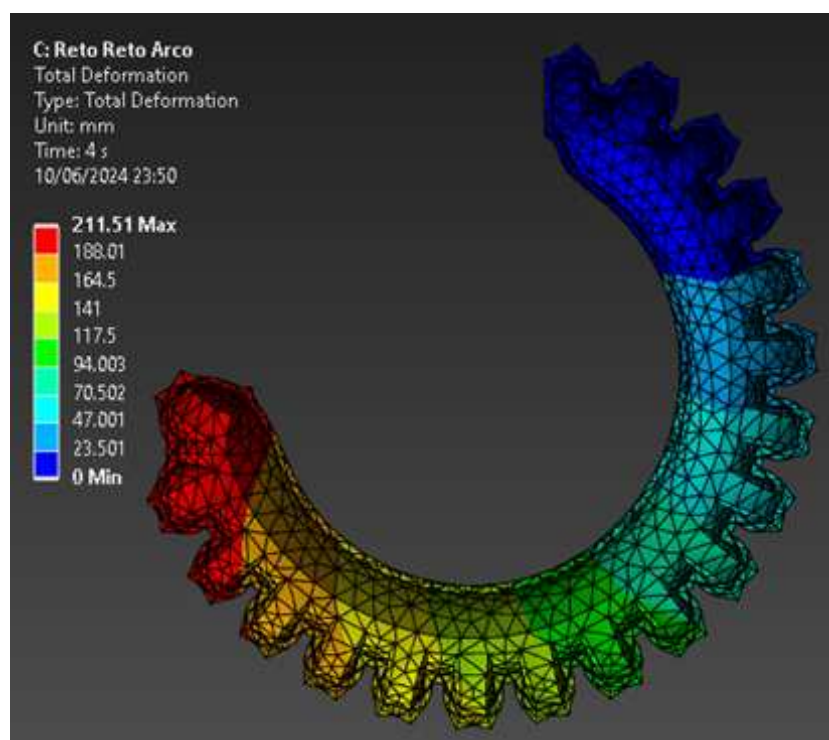


Figura 4.22: Resultados de deflexão para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvas a 160kPa.

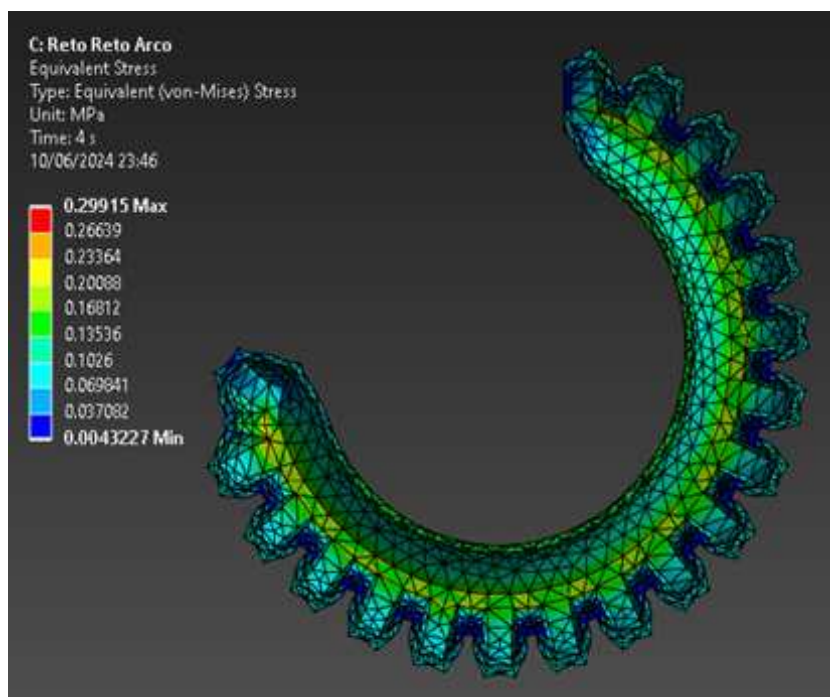


Figura 4.23: Resultados de stress para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvadas a 160kPa.

A decomposição de deslocamento nos eixos para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvadas pode ser observada na figura 4.24. Pode-se observar algumas características que se fazem presentes em todos os atuadores com paredes curvadas independente do perfil geométrico, uma maior resistência à deflexão, explicada pelo não retorno da curva do eixo Z a zero, evidenciando que a outra extremidade do atuador não se curvou até chegar à altura original. Outro ponto é por não ocorrer uma inflexão na curva que representa o deslocamento do eixo X, isso evidenciaria que o atuador deformou formando um arco de mais de 270° , sendo assim, o atuador cumpre os requisitos de deflexão máxima até a pressurização de 160kPa.

Com relação às tabelas de deslocamento e tensão do modelo de perfil retangular e paredes curvadas (Figuras 4.25 e 4.26), podemos ver uma margem ainda maior de tensão máxima, onde o maior valor encontrado na simulação é inferior a 0,30MPa, representando 7,5% da tensão de escoamento. Quanto à deflexão, o resultado também é positivo, chegando num ângulo próximo aos requisitos comuns com uma pressão de 160kPa.

Deslocamentos em função do tempo - Atuadores com câmaras retangulares e paredes curvadas

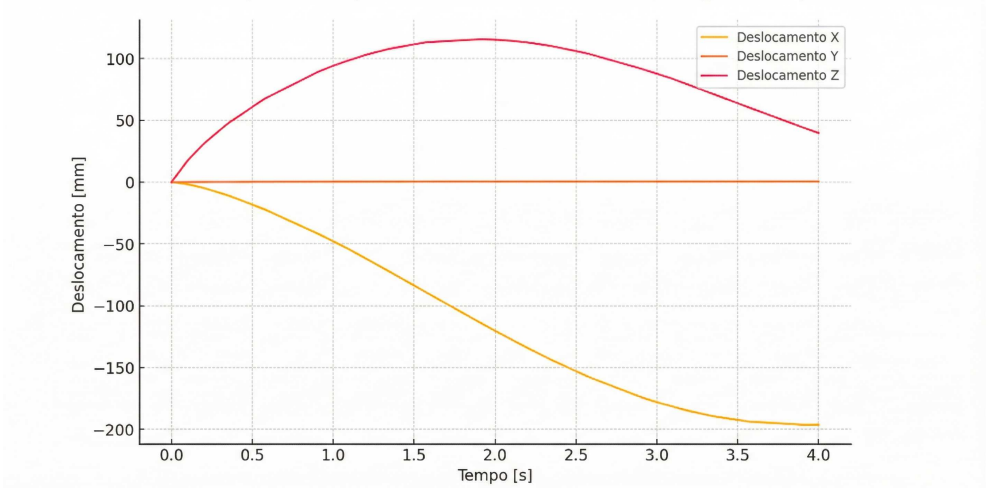


Figura 4.24: Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras retangulares e paredes curvadas.

RETO RETO ARCO				
Stress				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	0.1	1.76E-04	1.78E-02	4.18E-03
2	0.2	3.43E-04	2.76E-02	7.57E-03
3	0.35	5.91E-04	3.78E-02	1.20E-02
4	0.575	4.92E-04	4.94E-02	1.82E-02
5	0.9125	1.54E-03	6.96E-02	2.68E-02
6	1	1.69E-03	7.72E-02	2.90E-02
7	1.1	1.87E-03	8.62E-02	3.14E-02
8	1.2	2.04E-03	9.54E-02	3.39E-02
9	1.35	2.26E-03	0.10952	3.75E-02
10	1.575	2.54E-03	0.13155	4.29E-02
11	1.9125	2.96E-03	0.16458	5.10E-02
12	2	3.07E-03	0.17308	5.31E-02
13	2.1	3.19E-03	0.1826	5.55E-02
14	2.2	3.31E-03	0.19186	5.80E-02
15	2.35	3.49E-03	0.20503	6.16E-02
16	2.575	3.75E-03	0.22278	6.72E-02
17	2.9125	3.99E-03	0.24424	7.56E-02
18	3	4.01E-03	0.249	7.78E-02
19	3.1	4.03E-03	0.25411	8.03E-02
20	3.2	4.06E-03	0.25902	8.29E-02
21	3.35	4.11E-03	0.266	8.68E-02
22	3.575	4.18E-03	0.27598	9.29E-02
23	3.9125	4.28E-03	0.29204	0.10232
24	4	4.32E-03	0.29915	0.10487

Figura 4.25: Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes curvadas.

RETO RETO ARCO				
Total Displacement				
	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
1	0.1	-1.6477	4.56E-02	17.485
2	0.2	-4.7464	9.13E-02	31.162
3	0.35	-10.737	0.15344	47.562
4	0.575	-21.973	0.23014	67.389
5	0.9125	-42.155	0.31717	89.574
6	1	-47.872	0.33425	94.104
7	1.1	-54.472	0.35119	98.648
8	1.2	-61.657	0.36671	102.86
9	1.35	-72.526	0.38467	107.95
10	1.575	-89.19	0.40641	113.12
11	1.9125	-113.93	0.41943	115.57
12	2	-120.19	0.42149	115.21
13	2.1	-127.11	0.4223	114.35
14	2.2	-134.03	0.42372	112.97
15	2.35	-143.84	0.42403	110.05
16	2.575	-157.31	0.42622	103.92
17	2.9125	-174.31	0.42934	91.387
18	3	-177.97	0.43208	87.624
19	3.1	-181.45	0.43649	83.482
20	3.2	-185.09	0.44001	78.495
21	3.35	-189.32	0.44841	71.217
22	3.575	-193.71	0.4629	60.123
23	3.9125	-196.23	0.4881	43.789
24	4	-196.14	0.49628	39.775

Figura 4.26: Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil retangular e paredes curvadas.

4.1.5 Atuador de perfil circular e paredes curvadas

A modelagem do atuador de perfil circular com paredes curvadas pode ser observada na figura 4.27, onde um corte em formato de arco foi feito através do comprimento do atuador de mesmo perfil e paredes planas.

Comparando as simulações do atuador com perfil circular e paredes curvadas (Figuras 4.28, 4.29), observou-se uma deflexão controlada como nos outros atuadores com paredes curvadas e uma redução na distribuição de tensão (0,6147) se comparado ao mesmo perfil com paredes planas (0,84318). O mesmo levantado para o atuador de perfil retangular na figura 4.24 é aplicável para o atuador de perfil circular na figura 4.30.

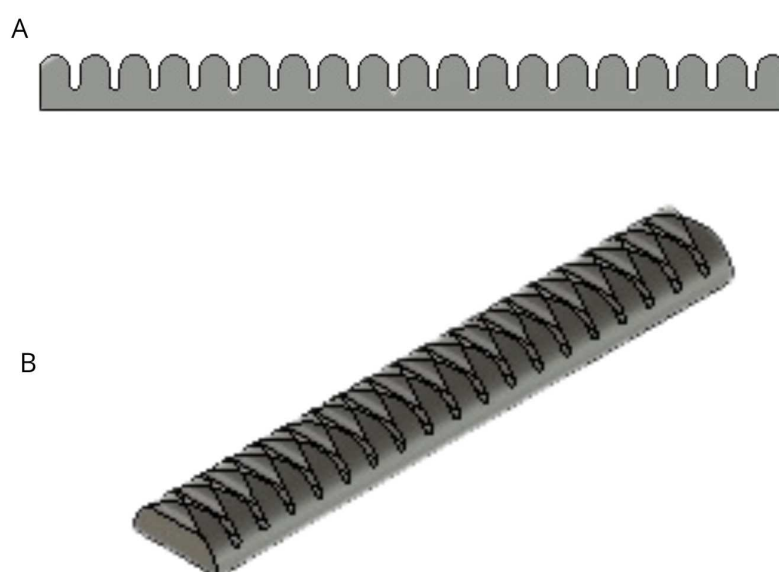


Figura 4.27: A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.

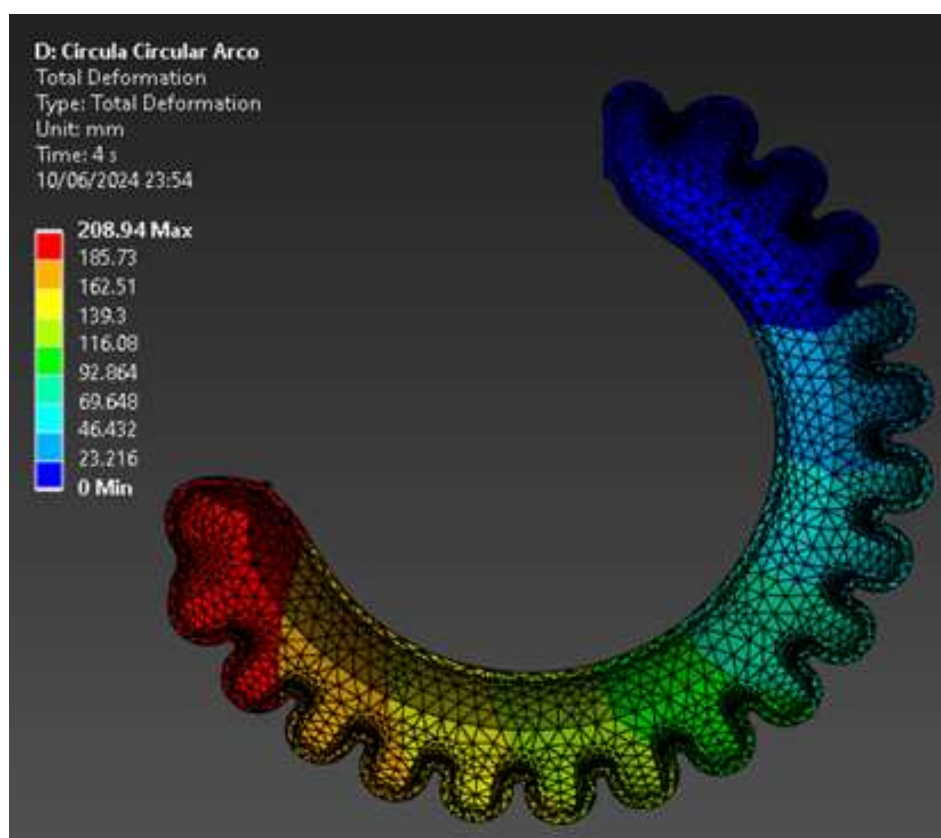


Figura 4.28: Resultados de deflexão para o atuador com câmaras circulares e paredes curvadas a 160kPa.

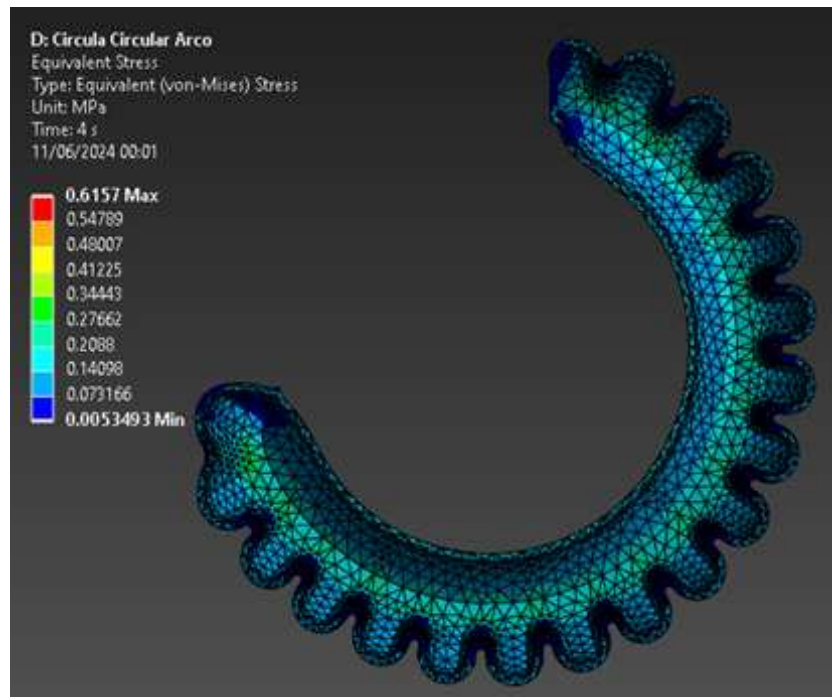


Figura 4.29: Resultados de stress para o atuador com câmaras circulares e paredes curvadas a 160kPa.

Deslocamentos em função do tempo - Atuadores com câmaras circulares e paredes curvadas

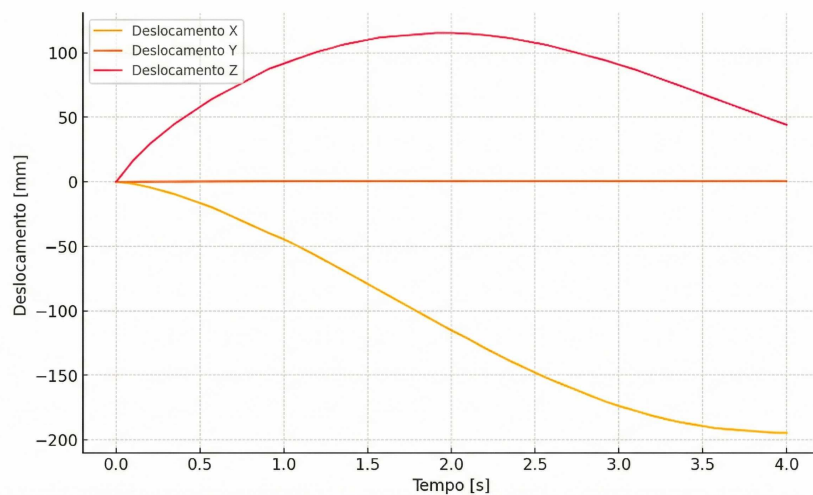


Figura 4.30: Deslocamento decomposto por eixo durante o tempo para o atuador com câmaras circulares e paredes curvadas.

Com relação as tabelas de deslocamento e tensão do modelo de perfil circular e paredes curvadas (Figuras 4.31 e 4.32), podemos ver uma margem menor que outros perfis como também foi observado nas paredes planas, no entanto, o maior valor encontrado na simulação é aproximadamente 60MPa, representando 15% da tensão

de escoamento. Quanto à deflexão, o resultado também é positivo, apresentando boa flexão com uma pressão de 160kPa.

CIRCULAR CIRCULAR ARCO				
Stress				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	0.1	1.76E-04	2.02E-02	4.90E-03
2	0.2	3.31E-04	3.29E-02	9.14E-03
3	0.35	5.65E-04	5.69E-02	1.47E-02
4	0.575	8.47E-04	9.09E-02	2.20E-02
5	0.9125	1.70E-03	1.46E-01	3.18E-02
6	1	1.91E-03	1.61E-01	3.42E-02
7	1.1	2.17E-03	1.78E-01	3.69E-02
8	1.2	2.43E-03	1.96E-01	3.95E-02
9	1.35	2.73E-03	0.22231	4.34E-02
10	1.575	3.18E-03	0.26283	4.92E-02
11	1.9125	3.82E-03	0.32404	5.78E-02
12	2	3.97E-03	0.33979	6.00E-02
13	2.1	4.15E-03	0.35711	6.25E-02
14	2.2	4.30E-03	0.37387	6.51E-02
15	2.35	4.49E-03	0.3972	6.90E-02
16	2.575	4.59E-03	0.42816	7.48E-02
17	2.9125	3.97E-03	0.46546	8.38E-02
18	3	4.12E-03	0.47375	8.62E-02
19	3.1	4.82E-03	0.48268	8.90E-02
20	3.2	4.89E-03	0.49237	9.18E-02
21	3.35	3.88E-03	0.51716	9.61E-02
22	3.575	5.10E-03	0.55297	1.03E-01
23	3.9125	5.30E-03	0.60333	0.11364
24	4	5.35E-03	0.6157	0.11658

Figura 4.31: Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil circular e paredes curvadas.

CIRCULAR CIRCULAR ARCO				
Total Displacement				
	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
1	0.1	-1.4552	4.82E-02	16.36
2	0.2	-4.197	9.38E-02	29.3
3	0.35	-9.5919	0.15623	45.083
4	0.575	-19.882	0.23648	64.479
5	0.9125	-39.786	0.32972	87.652
6	1	-44.432	0.34868	91.579
7	1.1	-50.853	0.36869	96.357
8	1.2	-57.726	0.38662	100.74
9	1.35	-68.219	0.40967	106.16
10	1.575	-84.442	0.43709	111.94
11	1.9125	-108.83	0.46069	115.42
12	2	-115.04	0.46434	115.36
13	2.1	-121.51	0.46775	114.85
14	2.2	-128.82	0.46906	113.78
15	2.35	-138.74	0.47044	111.35
16	2.575	-152.4	0.46955	105.94
17	2.9125	-169.9	0.46706	94.397
18	3	-173.74	0.46688	90.86
19	3.1	-177.49	0.46684	86.87
20	3.2	-181.33	0.46748	82.169
21	3.35	-185.92	0.46927	75.199
22	3.575	-190.92	0.47421	64.423
23	3.9125	-194.39	0.48556	48.306
24	4	-194.55	0.48961	44.272

Figura 4.32: Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil circular e paredes curvadas.

4.1.6 Atuador de perfil triangular e paredes curvadas

A modelagem do atuador de perfil triangular com paredes curvadas pode ser observada na figura 4.33, onde um corte em formato de arco foi feito através do comprimento do atuador de mesmo perfil e paredes planas.

Em linhas gerais, o comportamento do atuador com paredes curvadas e perfil triangular é semelhante aos demais atuadores de parede curvada, no entanto há um deslocamento no eixo Y ligeiramente maior que os outros atuadores independente do perfil, todos os outros atuadores tiveram deslocamento no eixo Y menor que 1mm enquanto que o de perfil triangular e paredes curvadas em alguns momentos da simulação chegou a 4mm de deslocamento.

No atuador com perfil triangular e paredes curvadas também observa-se uma resistência maior que os de paredes planas, menor tensão e margem para atuar com uma pressão maior. Os resultados podem ser observados nas figuras 4.34 e 4.35.



Figura 4.33: A. Vista lateral do atuador, B. Vista isométrica do atuador.

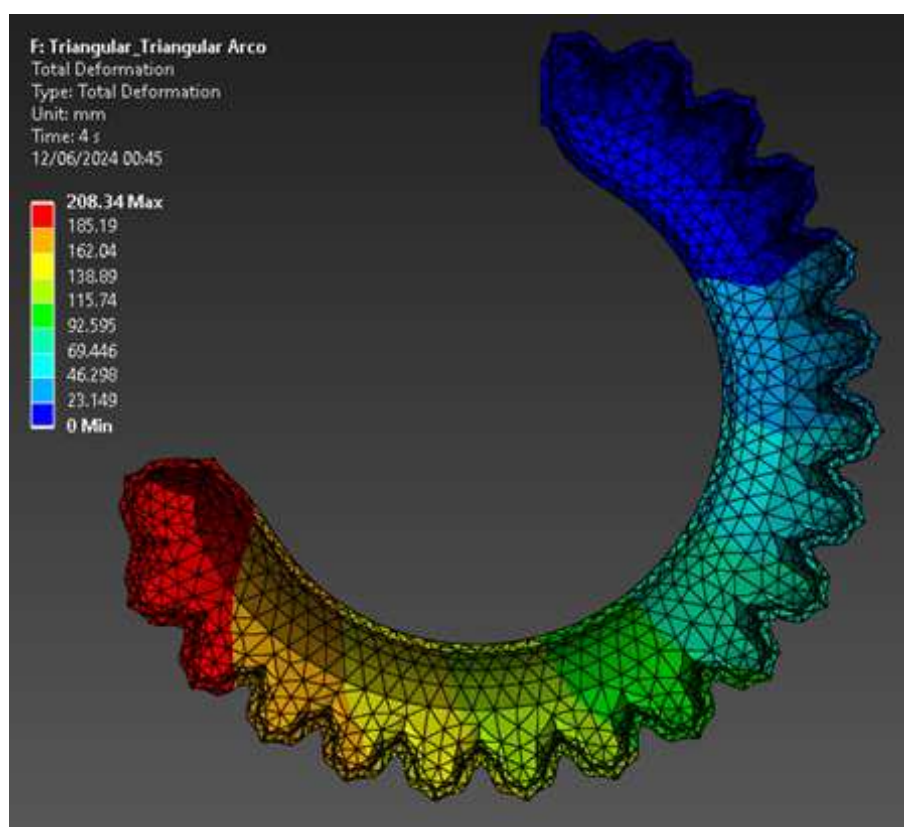


Figura 4.34: Resultados de deflexão para o atuador com câmaras triangulares e paredes curvadas a 160kPa.

Com relação as tabelas de deslocamento e tensão do modelo de perfil circular e paredes curvadas (Figuras [4.36](#) e [4.37](#)), podemos ver uma margem menor que outros

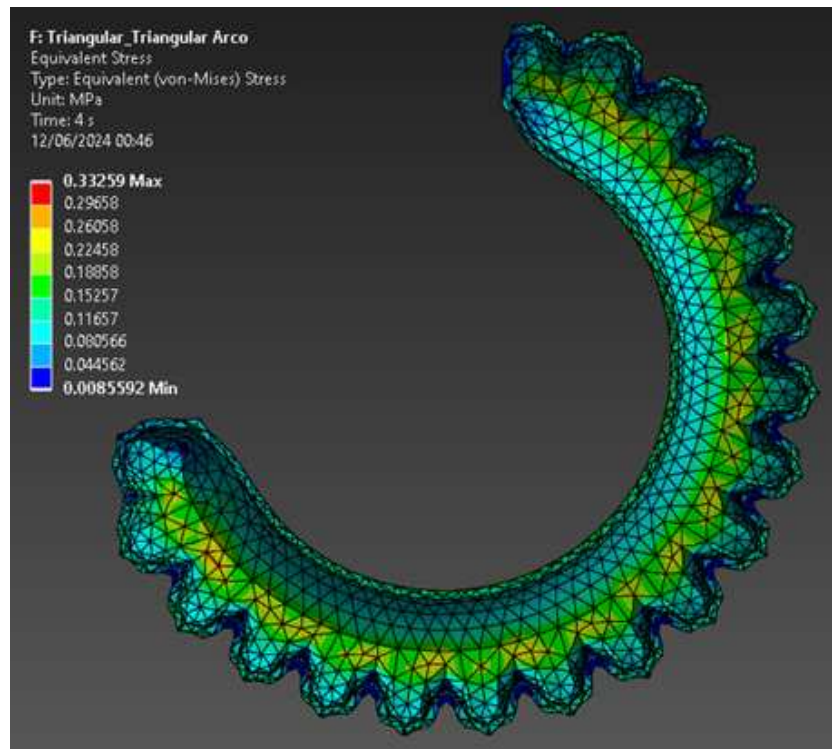


Figura 4.35: Resultados de stress para o atuador com câmaras triangulares e paredes curvadas a 160kPa.

perfis como também foi observado nas paredes planas, no entanto, o maior valor encontrado na simulação é aproximadamente 60MPa, representando 15% da tensão de escoamento, uma performance melhor que o mesmo perfil de paredes planas. Também é possível averiguar o grande aumento para o deslocamento no eixo Y onde a atuação deveria ser mínima, não condizente com os demais modelos.

TRIANGULAR TRIANGULAR ARCO				
Stress				
	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]	Average [MPa]
1	0.1	1.76E-04	2.02E-02	4.90E-03
2	0.2	3.31E-04	3.29E-02	9.14E-03
3	0.35	5.65E-04	5.69E-02	1.47E-02
4	0.575	8.47E-04	9.09E-02	2.20E-02
5	0.9125	1.70E-03	1.46E-01	3.18E-02
6	1	1.91E-03	1.61E-01	3.42E-02
7	1.1	2.17E-03	1.78E-01	3.69E-02
8	1.2	2.43E-03	1.96E-01	3.95E-02
9	1.35	2.73E-03	0.22231	4.34E-02
10	1.575	3.18E-03	0.26283	4.92E-02
11	1.9125	3.82E-03	0.32404	5.78E-02
12	2	3.97E-03	0.33979	6.00E-02
13	2.1	4.15E-03	0.35711	6.25E-02
14	2.2	4.30E-03	0.37387	6.51E-02
15	2.35	4.49E-03	0.3972	6.90E-02
16	2.575	4.59E-03	0.42816	7.48E-02
17	2.9125	3.97E-03	0.46546	8.38E-02
18	3	4.12E-03	0.47375	8.62E-02
19	3.1	4.82E-03	0.48268	8.90E-02
20	3.2	4.89E-03	0.49237	9.18E-02
21	3.35	3.88E-03	0.51716	9.61E-02
22	3.575	5.10E-03	0.55297	1.03E-01
23	3.9125	5.30E-03	0.60333	0.11364
24	4	5.35E-03	0.6157	0.11658

Figura 4.36: Tabela de tensão no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes curvadas.

TRIANGULAR TRIANGULAR ARCO				
Total Displacement				
	Time [s]	X [mm]	Y [mm]	Z[mm]
1	0.1	-1.4696	0.25798	16.204
2	0.2	-4.1947	0.53199	29.055
3	0.35	-9.4639	0.92976	44.538
4	0.575	-19.657	1.5194	63.879
5	0.9125	-39.222	2.3743	86.829
6	1	-44.557	2.5807	91.342
7	1.1	-51.076	2.7975	96.141
8	1.2	-58.088	3.0177	100.55
9	1.35	-68.812	3.3225	105.97
10	1.575	-85.361	3.7269	111.63
11	1.9125	-110.06	4.1363	114.73
12	2	-116.3	4.2177	114.53
13	2.1	-122.8	4.3155	113.87
14	2.2	-130.03	4.3399	112.64
15	2.35	-139.78	4.3933	109.99
16	2.575	-153.07	4.3759	104.32
17	2.9125	-169.73	4.2355	92.659
18	3	-173.27	4.153	89.218
19	3.1	-176.82	4.075	85.261
20	3.2	-180.27	3.9677	80.801
21	3.35	-184.47	3.7929	74.139
22	3.575	-188.97	3.5234	64.069
23	3.9125	-192.19	2.9607	49.101
24	4	-192.36	2.8918	45.547

Figura 4.37: Tabela de deslocamento no tempo para o atuador com perfil triangular e paredes curvadas.

4.1.7 Avaliação dos resultados da modelagem numérica e seleção de perfil para fabricação do atuador

Em posse da simulação de todos os atuadores para o intervalo de pressurização citado, pode-se tirar algumas conclusões sobre a utilização dos mesmos. De maneira geral, os atuadores de parede curvada ainda podem ser pressurizados com mais intensidade gerando uma força na extremidade distal dos dedos maior, além de que no intervalo de pressão utilizado eles performaram flexões que não foram exacerbadas.

Os perfis geométricos avaliados nesta etapa não se diferenciam apenas em desempenho mecânico, mas também em aspectos diretamente relevantes para aplicações em reabilitação, como conforto, segurança no contato e integração em dispositivos vestíveis (por exemplo, luvas assistivas). Em uso clínico ou domiciliar, esses fatores são particularmente importantes porque os atuadores tendem a operar sob ciclos repetitivos de pressurização e em contato próximo com a pele, de modo que limitações geométricas podem impactar acomodação anatômica, distribuição de contato e aceitabilidade do dispositivo pelo usuário.

Além disso, a viabilidade de fabricação também é determinante para reabilitação, pois falhas de estanqueidade e baixa reprodutibilidade reduzem a confiabilidade do sistema e comprometem o uso contínuo ao longo de sessões. Assim, para organizar essa análise de forma objetiva, a Tabela 4.1 sintetiza as vantagens e limitações associadas aos perfis laterais de câmara, enquanto a Tabela 4.2 apresenta a comparação entre os perfis longitudinais, considerando simultaneamente integração em luvas/órteses, desempenho esperado, facilidade de impressão em TPU por FDM e robustez de estanqueidade.

No processo de decisão de utilização do atuador, precisamos avaliar também o impacto dos perfis nas simulações realizadas, o primeiro a ser descartado é o perfil de geometria triangular que apresentou um deslocamento no eixo Y, indesejada para a aplicação, quatro vezes maior que os perfis retangulares e circulares (a tabela com todos os valores de deslocamento e tensão ao longo do tempo pode ser encontrada nos anexos do trabalho). Comparando então os atuadores curvados de perfil retangular e circular temos comportamentos muito semelhantes principalmente quanto à deflexão, porém com relação à tensão interna os valores de perfil retangular tem valores máximos menores mesmo com uma média próxima, 0,10487MPa para os retangulares e

Tabela 4.1: Comparação qualitativa entre perfis laterais de câmara para aplicações em reabilitação.

Perfil lateral	Vantagens (reabilitação e desempenho)	Limitações e cuidados (manufatura e uso)
Retangular	<p>Maior desempenho mecânico observado neste trabalho (por simulação), com deflexão mais pronunciada para uma mesma pressão. Integração relativamente simples em dispositivos vestíveis. Em geral, boa fabricabilidade em FDM.</p>	<p>Cantos vivos podem concentrar tensões, o que exige atenção à durabilidade em ciclos de pressurização repetidos, comuns em reabilitação. Recomenda-se cautela no projeto (por exemplo, suavização de arestas) e inspeção periódica.</p>
Circular	<p>Geometria mais suave tende a reduzir concentrações de tensão, o que pode favorecer robustez estrutural e conforto ao contato, dependendo do encapsulamento na luva.</p>	<p>Pode apresentar desempenho inferior ao retangular para as métricas avaliadas, dependendo da espessura de parede e volume de câmara. Em alguns casos, pode demandar ajustes finos de parâmetros para manter estanqueidade.</p>
Triangular	<p>Permite explorar assimetrias de deflexão e compactação do conjunto, podendo ser útil quando há restrições de espaço em luvas ou órteses.</p>	<p>Maior sensibilidade a parâmetros de impressão e orientação, com risco de regiões delgadas e maior chance de defeitos locais. Pode demandar mais iterações para assegurar repetibilidade e estanqueidade.</p>

Tabela 4.2: Comparação qualitativa entre perfis longitudinais para aplicações em reabilitação.

Perfil longitudinal	Vantagens (reabilitação e integração)	Limitações e implicações na fabricação
Côncavo (parede curvada)	Formato externo mais anatômico, com melhor acomodação ao contorno dos dedos e potencial para uma aparência mais natural em luvas assistivas. Pode melhorar a distribuição de contato quando bem encapsulado.	Fabricabilidade mais crítica em FDM: frequentemente exige suportes; a remoção pode induzir microfissuras e comprometer a estanqueidade, reduzindo reprodutibilidade. Maior taxa de falhas por vazamento nas tentativas realizadas.
Reto (parede plana)	Maior facilidade de manufatura e maior consistência na obtenção de atuadores herméticos. Melhor reprodutibilidade, favorecendo validação experimental e futura escalabilidade para uso em reabilitação. Neste trabalho, também apresentou melhor desempenho mecânico global.	Menor aderência anatômica quando embutido diretamente em luvas, podendo exigir estratégias de integração (posicionamento, encapsulamento, camadas de conforto) para melhorar acomodação e estética.

0,11658MPa para os circulares, além de que a geometria retangular é mais facilmente fabricada.

Considerando todos os dados apresentados, a geometria mais indicada para a etapa de validação do projeto é o atuador de perfil retangular e paredes planas visto que o método de impressão é FDM e os de paredes curvadas possuem difícil fabricabilidade, ele ainda pode ser otimizado para gerar mais tensão ou deflexão caso seja necessário através da mudança de características como: altura da câmara, largura da base e espaçamento entre as câmaras como mostrado em Polygerinos et al. (Polygerinos; Wang *et al.*, 2015) e Mosadegh et al. (Mosadegh *et al.*, 2014a).

4.2 Fabricação dos atuadores

Houveram dois momentos de fabricação distintos. O primeiro impresso na Ender 3 V2 com filamento TPU 95A (Fabricante: 3DFila) que resultou em atuadores que não foram estanques e, por isso, não conseguiam produzir deflexão quando pressurizados. Sendo assim, houve a tentativa de usar algumas técnicas de pós-processamento para selá-los, como pode ser observado na figura 4.38.

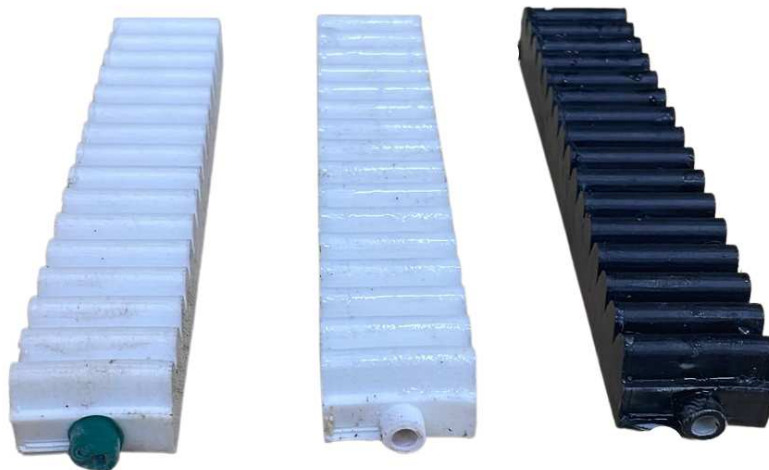


Figura 4.38: Atuadores fabricados com métodos de selagem.

As estratégias utilizadas para esses atuadores foram: inserir um balão dentro da câmara para que o balão segurasse o ar, vedar com silicone externamente e vedar com borracha líquida externamente. No entanto mesmo depois desses processos, apenas o atuador onde o balão foi utilizado se apresentou hermético. Os atuadores

acima não passaram pelo processo de simulação de elementos finitos e foram modelados com base no artigo de Yap et al. Ainda assim o balão explodia internamente quando o atuador era pressurizado com pressões acima de 250kPa.

Esse modelo de atuador foi inteiramente baseado no atuador desenvolvido no trabalho de Yap et al. (Yap; Ng; Yeow, 2016) que apresentava grande potencial de deflexão e geração de força, no entanto devido ao processo de impressão não otimizado e, principalmente, ao tipo de TPU, a versão acabou ficando rígida e com baixa flexibilidade, gerando uma força em torno de 1N para 200kPa.

Os atuadores da segunda parte, que correspondem aos modelos descritos na etapa de modelagem com simulação de elementos finitos, foram impressos em outra impressora e com configuração distinta, conforme descrito na metodologia, e mostraram-se herméticos em sua maioria, não sendo necessário utilizar qualquer método adicional de selagem para os 6 modelos apresentados. Neste processo, o refinamento da impressão foi deliberadamente concentrado nos atuadores de paredes planas e perfil retangular, para os quais a taxa de sucesso atual é de 90%, quase todos os espécimes impressos são herméticos, isso acontece pois em alguns casos o filamento dobra no caminho da impressora por ser do tipo Bowden.

Em contraste, para perfis curvados, a taxa de atuadores herméticos foi de aproximadamente 20%, e nenhum atuador com parede curvada e perfil retangular apresentou vedação adequada sem a utilização de métodos de pós-processamento. Esses resultados justificam a escolha de validar a simulação com um atuador de parede plana e perfil retangular, que apresenta maior probabilidade de sucesso na fabricação e maior reprodutibilidade experimental. Um exemplo da estrutura dos modelos impressos, com perfil retangular pode ser observado nas Figuras 4.39 e 4.40.



Figura 4.39: Modelo com perfil retangular e paredes planas impresso.



Figura 4.40: Modelo com perfil retangular e paredes curvadas impresso.

Ao fim dos testes de impressão, já com foco na etapa de validação experimental, foi desenvolvida uma versão modificada do atuador em que a região próxima à entrada de ar foi alongada e impressa de forma maciça. Essa adaptação teve como objetivo permitir o engaste rígido do atuador no aparato de validação, mantendo inalteradas as dimensões estruturais e os parâmetros de impressão da porção móvel responsável pela deflexão. Dessa forma, assegura-se que as medições de força reflitam predo-

minimamente o comportamento do segmento ativo do atuador, minimizando efeitos indesejados de deformação na região de fixação. Um exemplo desse atuador modificado pode ser observado na Figura 4.41.

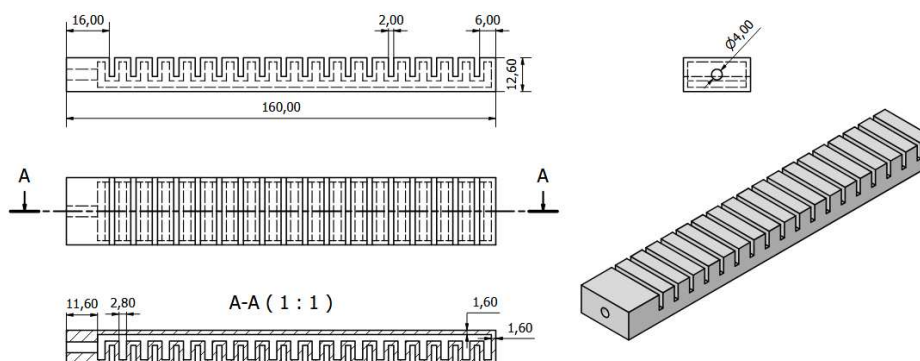


Figura 4.41: Vistas com cotas do modelo impresso para validação com região de entrada de ar alongada e maciça para fixação em ensaios.

4.3 Simulações computacionais do perfil escolhido

Após a definição dos perfis lateral e longitudinal a serem investigados na etapa de validação, foi executada uma segunda rodada de simulações numéricas com foco em métricas diretamente relacionadas ao uso do atuador em dispositivos de reabilitação. Nessa etapa, as simulações avaliaram (i) deflexão livre, (ii) força na extremidade e (iii) força de preensão. Para reduzir variáveis e isolar o comportamento estrutural do atuador, os modelos consideraram apenas a porção ativa do componente, desconsiderando o alongamento, camadas externas de restrição e detalhes de alimentação de ar.

Ressalta-se, contudo, que as simulações iniciais não eram suficientes para sustentar a etapa de validação experimental, pois foram parametrizadas com propriedades mecânicas associadas a um TPU de menor dureza (85A), frequentemente adotado na literatura por favorecer maiores amplitudes de deflexão. Embora útil para uma triagem preliminar de geometrias, esse conjunto de parâmetros não representa o material escolhido para fabricação dos protótipos desta tese. Para a etapa de validação, adotou-se TPU 95A, devido à sua maior disponibilidade e viabilidade prática para múltiplas iterações de impressão necessárias à obtenção de atuadores herméticos e reprodu-

tíveis. Além disso, do ponto de vista científico, a investigação de atuadores PneuNet impressos em TPU 95A permanece relativamente menos explorada quando comparada a graus mais macios, de modo que a calibração e a avaliação do desempenho com esse material contribuem para reduzir uma lacuna na literatura e ampliar a aplicabilidade dos resultados em contextos onde o acesso a TPU de menor dureza é limitado. Como consequência direta da maior rigidez do TPU 95A, espera-se que, para a mesma faixa de pressão, as deformações sejam menos intensas do que aquelas previstas com parâmetros de TPU 85A, o que impacta as escolhas de projeto e o envelope de aplicações. Os efeitos dessa mudança de material e suas implicações para diferentes cenários de reabilitação são discutidos na Seção de Discussão.

4.3.1 Simulação de Deflexão Livre

A simulação foi conduzida para avaliar o deslocamento linear no eixo vertical nas pressões de 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa. Todos os componentes dos atuadores foram discretizados com elementos sólidos tetraédricos quadráticos (tetraédricos de 10 nós), utilizando malha de segunda ordem no Ansys. Uma condição de contorno de fixação (Fixed Support) foi aplicada à extremidade proximal dos atuadores. Por simplificação do modelo, as entradas de ar dos atuadores não foram consideradas, e a pressão foi aplicada diretamente em todas as paredes das cavidades internas.

Os valores podem ser observados nas figuras abaixo, sendo notória a diferença de flexibilidade ao se passar das características do TPU 85A para o TPU 95A, isso se reflete também no número de publicações científicas, é realmente baixo o volume de trabalhos utilizando o TPU 95A devido sua rigidez comparado ao 85A, no entanto ainda encontra-se artigos com aplicações biomédicas onde a deflexão não necessita ser tão intensa (Risangtuni *et al.*, 2023).

O deslocamento da extremidade encontrado varia de 2,15cm com o atuador sendo pressurizado com 50kPa, 4,04cm com pressurização de 100kPa, 5,65cm com pressurização de 150kPa até 7,19cm com pressurização de 200kPa. Compatível com o trabalho de Schreiber (Schreiber *et al.*, 2025) que também utilizou TPU95A em seus experimentos.

H: 4.3.1 - Simulação de Deformação Livre 200kpa Yeoh

Directional Deformation 3

Type: Directional Deformation(Z Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 5 s

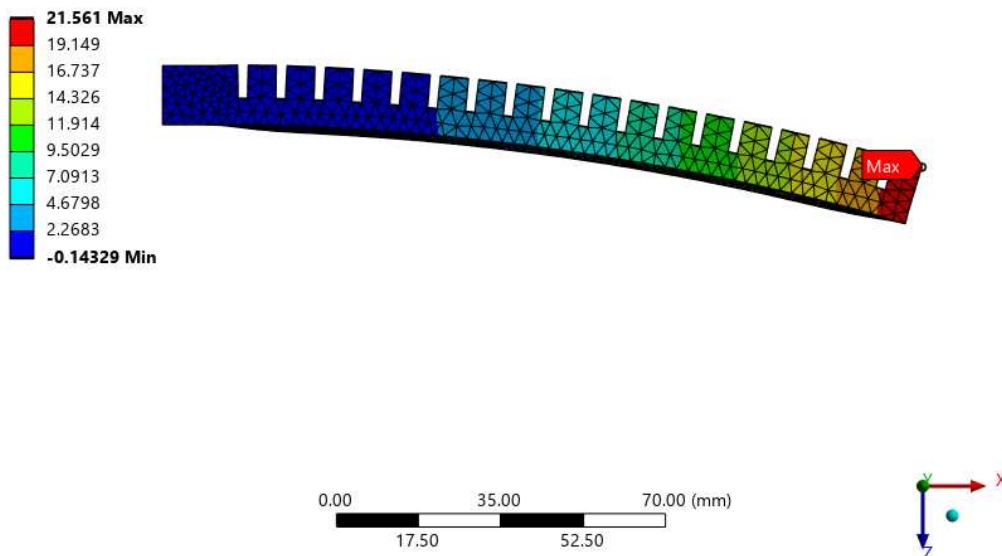


Figura 4.42: Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 50kPa.

H: 4.3.1 - Simulação de Deformação Livre 200kpa Yeoh

Directional Deformation 3

Type: Directional Deformation(Z Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 10 s

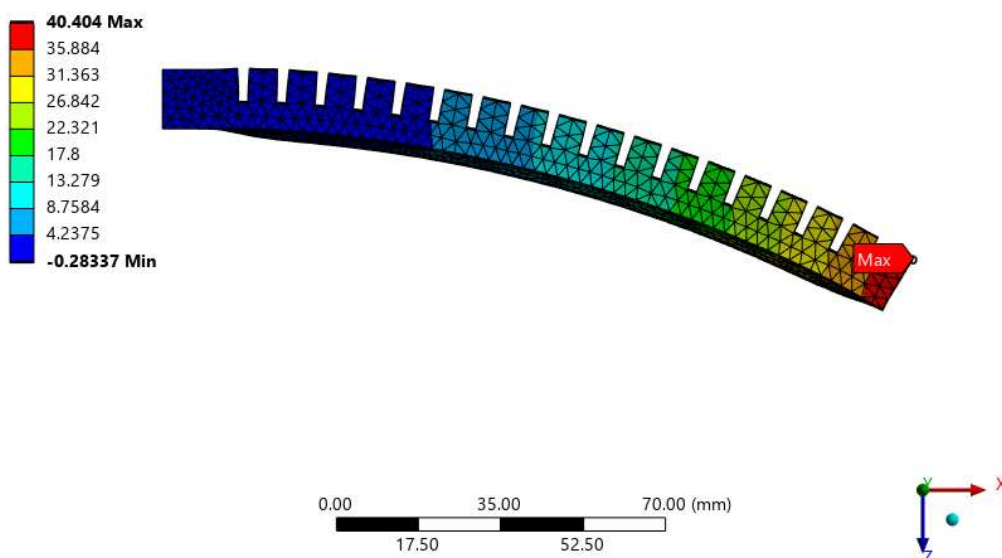


Figura 4.43: Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 100kPa.

H: 4.3.1 - Simulação de Deformação Livre 200kpa Yeoh

Directional Deformation 3

Type: Directional Deformation(Z Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 15 s

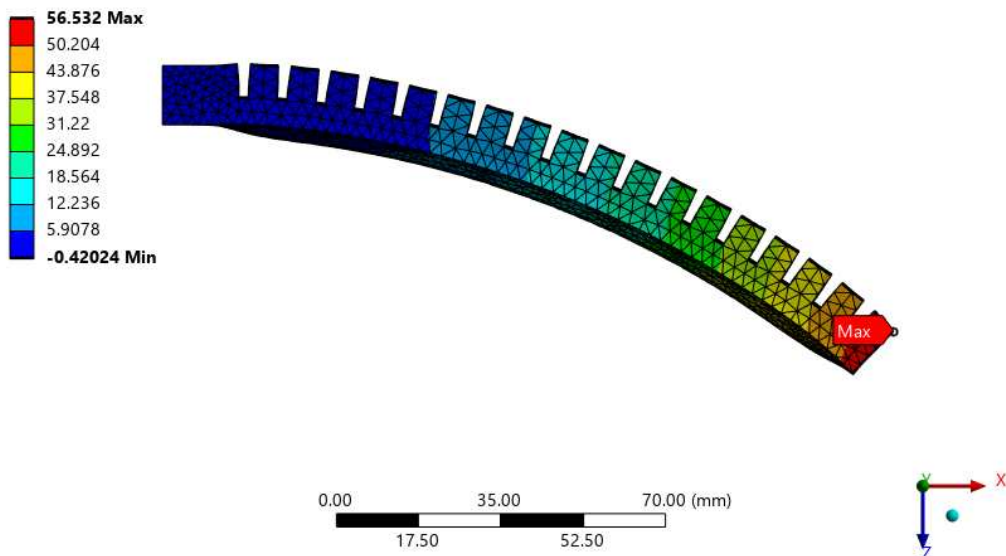


Figura 4.44: Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 150kPa.

H: 4.3.1 - Simulação de Deformação Livre 200kpa Yeoh

Directional Deformation 3

Type: Directional Deformation(Z Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 20 s

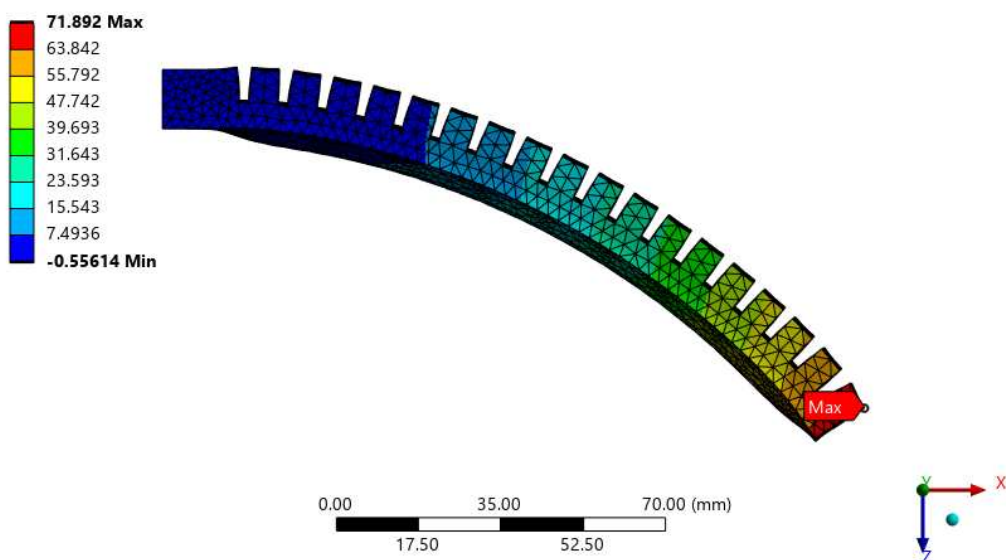


Figura 4.45: Simulação de deflexão do atuador selecionado submetido a pressão de 200kPa.

Um padrão de flexão semelhante para os mesmos valores de pressão pode ser observado no trabalho de schreiber2025applicability que simulou e produziu atuadores com o TPU 95A, o ângulo de flexão do mesmo pressurizado com 100kPa gira em torno de 30°. Contudo, cabe destacar que a geometria utilizada pelo autor tem mais volume nas câmaras para produzir deslocamento.

4.3.2 Simulação de Força na Extremidade

A simulação foi conduzida para avaliar a força que o atuador produz na extremidade oposta sob pressurização variando de 30 até 200kPa com incremento de 10kPa. Todos os componentes dos atuadores foram discretizados com elementos sólidos tetraédricos quadráticos (tetraédricos de 10 nós), utilizando malha de segunda ordem no Ansys. Uma condição de contorno de fixação foi aplicada à extremidade proximal do atuador o ponto de avaliação aplicado a extremidade distal do atuador. Por simplificação do modelo, as entradas de ar dos atuadores não foram consideradas, e a pressão foi aplicada diretamente em todas as paredes das cavidades internas.

O resultado de força aplicada na extremidade quando pressurizado com 200kPa foi de 2N, o comportamento do atuador pode ser observado na figura 4.46, fazendo com que o atuador seja suficiente para diversas aplicações, outro trabalho que utilizou TPU 95A para medição semelhante foi o de (Scharff *et al.*, 2019) que atingiu apenas 1N em condições de teste semelhantes, porém utilizou uma largura de parede mais fina que o comum (0.8mm) e também possui um design de câmaras incomum. As consequências disso é que para um teste de pouca carga como segurar uma caneta foi necessário uma pressão em torno de 500kPa. Outros trabalhos serão citados na discussão no que tange a força produzida na extremidade.

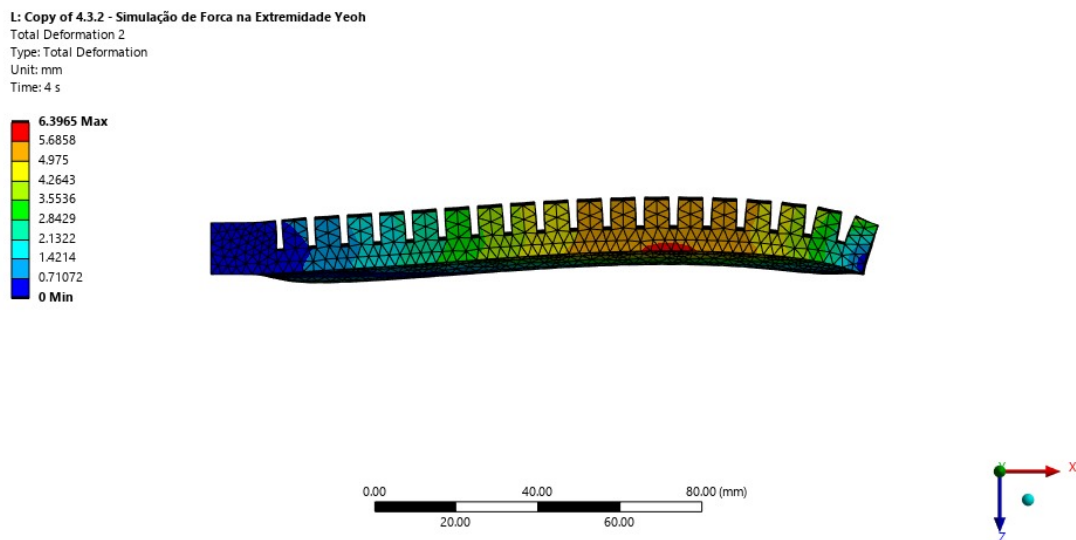


Figura 4.46: Simulação de força na extremidade com atuador a 200kPa.

4.3.3 Simulação de Força de Preensão

Além das simulações que passaram por processo de validação experimental, duas outras foram executadas, sendo uma delas a simulação de força de preensão, ensaio mecânico presente em muitos trabalhos de atuadores PneuNet. A expectativa é que o comportamento do atuador se alinha às simulações validadas e a literatura como um todo. Destaca-se que nessa seção não foram encontrados trabalhos com esse tipo de experimento utilizando TPU95A.

O procedimento de simulação utilizou os mesmos parâmetros dos demais e foi necessário uma pressão de aproximadamente 1000kPa para envolver o cilindro resultando numa força de resposta de 23,5N, valor de maior força normal no objeto cilíndrico, o resultado pode ser observado na figura 4.47. Já era esperado que o atuador necessitasse de muita pressão aplicada para realizar a deflexão total e entrar em contato com o cilindro responsável pela medida de força de preensão, em contextos reais isso acarreta na diminuição de vida útil do atuador. (Yap; Lim *et al.*, 2016) realizou o teste e necessitou de 300kPa para realizar a mensuração das forças aplicadas ao cilindro, no entanto a solução utilizava TPU85A o que reduziu o valor de pressão necessário.

Avaliando a tensão de Von Mises apresentada na imagem abaixo, vemos que o valor máximo é superior a tensão de escoamento tanto do TPU85A como do TPU95A

o que indicaria falha do atuador para esse regime de trabalho.

J: 4.3.3 - Simulação de Força de Preensão Yeoh

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 62 s

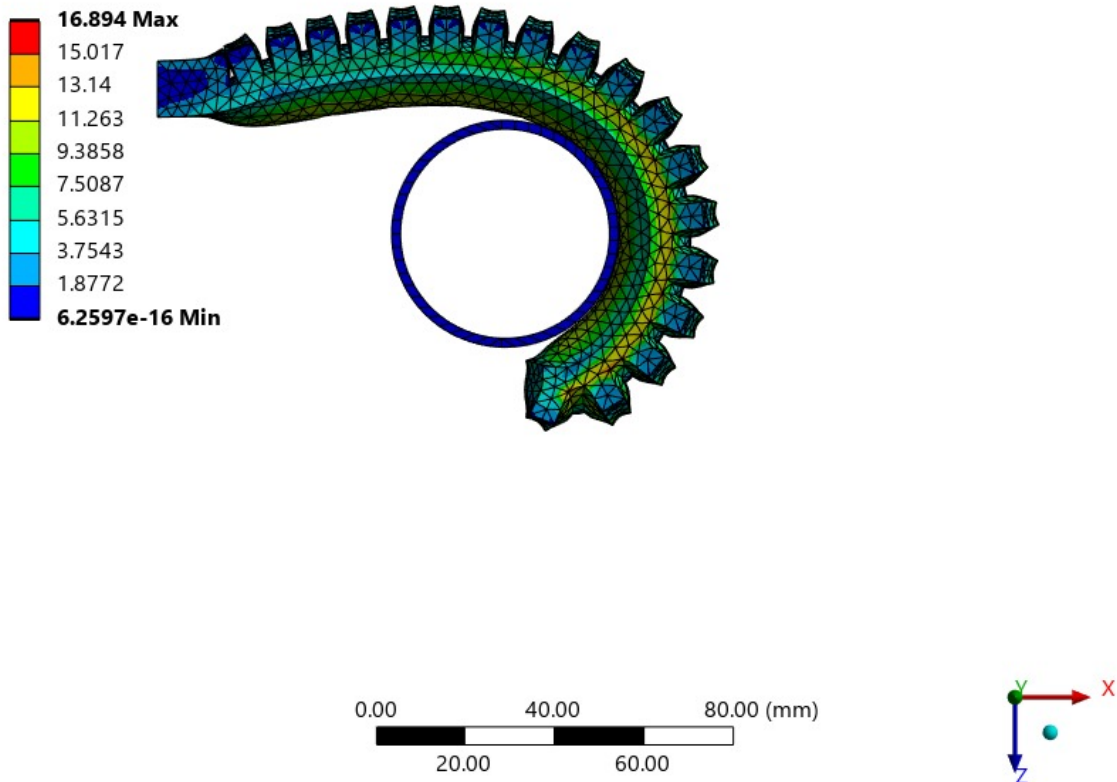


Figura 4.47: Simulação de força de preensão com atuador a 1000kPa.

Recentes trabalhos também mostram a utilização de pressões altas na força de preensão de atuadores pneunets em TPU. (Buonamici; Cerruti *et al.*, 2025) desenvolveram um preênsil antropomórfico com dedos do tipo PneuNet impressos em TPU por FFF, cuja vedação foi projetada para suportar até 300kPa e que apresentou forças bloqueadas de até 3,73 N nessa condição de pressão. No mesmo dispositivo, o atuador pneumático rotativo responsável pela reconfiguração dos dedos foi testado com pressões de até 600kPa, sendo 400kPa adotados como valor operacional durante os ensaios de preensão.

De forma complementar, (Wichiramala *et al.*, 2023) caracterizaram um atuador pneumático macio impresso em TPU, reportando forças de preensão da ordem de 2 N em ensaios de força bloqueada quando a pressão interna atinge 400kPa, o que

reforça que pressões na faixa de algumas centenas de quilopascals são comuns em atuadores moles impressos em TPU voltados a tarefas de preensão.

4.4 Validação dos atuadores

Ao fim do processo de manufatura do atuador final e em posse dos três tipos de simulação anteriormente citados, foram executados testes para verificar a performance do atuador e otimizar as simulações desenvolvidas.

4.4.1 Validação de Deflexão Livre

De forma semelhante à simulação, o atuador impresso foi fixado através de sua porção alongada e pressurizado por um sistema de eletropneumática FESTO, como descritos nas figuras 3.5 e 3.6, o controle do sistema era feito de forma manual através de uma válvula de fluxo enquanto observa-se a pressão de interesse no manômetro digital.

Para o ensaio de deflexão as pressões utilizadas foram de 50kPa, 100kPa, 150kPa e 200kPa, foram mensurados o deslocamento vertical da extremidade distal do atuador (oposta ao engaste) através de uma régua posicionada e análise das fotos nas pressões de interesse. Também foi mensurado o ângulo de deflexão baseado na linha de origem do atuador e os pontos de estabilidade da extremidade distal através do software Kinovea.

Os valores de deslocamento linear para cada valor de pressão, bem como os valores de cada deslocamento linear no ambiente simulado e o erro percentual entre as duas medidas pode ser observado na tabela 4.3. O erro foi calculado conforme a fórmula abaixo.

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\varepsilon_{\text{exp}} - \varepsilon_{\text{sim}}}{\varepsilon_{\text{exp}}} \times 100$$

Já para o deslocamento angular, podemos perceber o ângulo formado entre a base e a extremidade para os diferentes valores de pressão nas figuras 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51. Os valores encontrados foram: 10,8° para 50kPa, 15,8° para 100kPa, 21,2° para 150kPa e 27,5° para 200kPa. A amplitude de deflexão obtida neste estudo foi relativamente reduzida quando comparada a resultados reportados para atuadores

Tabela 4.3: Comparação entre deslocamento experimental e simulado em função da pressão.

Pressão [kPa]	Experimento (mm)	Simulação (mm)	Erro [%]
50	23,3	21,561	7,5%
100	42,1	40,404	4%
150	56,2	56,532	0,6%
200	74,2	71,892	3,1%

impressos em TPU de menor dureza, como 85A ou mesmo 60A. Por outro lado, os valores observados são bem condizentes com aqueles descritos em trabalhos que empregam TPU 95A. Esse comportamento era esperado, uma vez que o TPU 95A foi o material efetivamente utilizado na fabricação dos atuadores.



Figura 4.48: Ângulo de deflexão do atuador a 50 kPa.

Seguindo o mesmo raciocínio de comparação apresentado na etapa de deslocamento linear temos os seguintes valores para o deslocamento angular apresentados na tabela 4.4.



Figura 4.49: Ângulo de deflexão do atuador a 100 kPa.



Figura 4.50: Ângulo de deflexão do atuador a 150 kPa.



Figura 4.51: Ângulo de deflexão do atuador a 200 kPa.

Tabela 4.4: Comparação entre deflexão experimental e simulada em função da pressão.

Pressão [kPa]	Experimento (°)	Simulação (°)	Erro [%]
50	10,8	7,6	29,6%
100	15,8	14,21	10%
150	21,2	19,97	5,8%
200	27,5	25,71	6,5%

4.4.2 Validação de Força na Extremidade

Os valores de força aplicados na célula de carga foram registrados quando atuador era submetido a pressurização entre 30kPa e 200kPa duas vezes, no primeiro momento a célula de carga estava imediatamente abaixo da extremidade distal do atuador e no segundo momento deslocada 1cm para baixo com o intuito de demonstrar a grande perda de performance do atuador com relação à deflexão. A imagem do atuador pressurizado a 200kPa no primeiro momento pode ser observada na figura [4.52](#).



Figura 4.52: Coleta de força do atuador a 200kpa

O resultado da baixa flexibilidade do atuador e seu impacto na performance pode ser observado no decréscimo de força gerada quando a célula de carga é deslocada, utilizando parte considerável da energia apenas para entrar em contato com a célula de carga novamente, essa comparação pode ser observada na figura 4.53. A força com a célula deslocada é cerca de 0,40 N menor, o que representa aproximadamente 38,5% a menos do que a força média medida na configuração original.

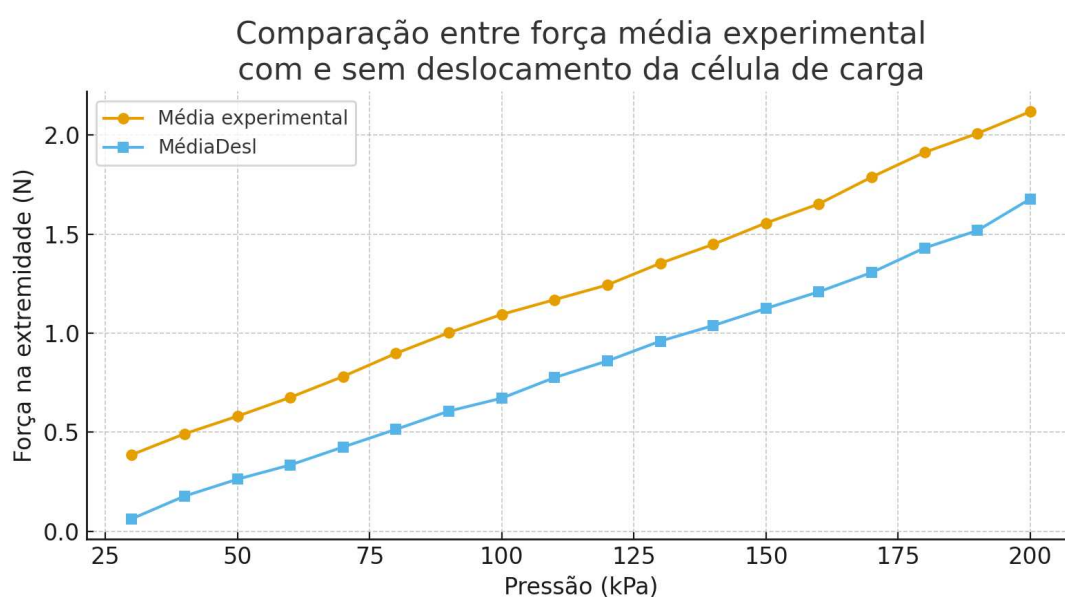


Figura 4.53: Valores de força na extremidade (Eixo Z) para o experimento com e sem deslocamento da célula de carga.

A comparação entre os dados experimentais e a simulação numérica com a força normal calculada na extremidade não engastada mostrou um erro médio absoluto de aproximadamente 0,09 N na força de extremidade, o que corresponde a um erro relativo médio de cerca de 26,6% em relação aos valores simulados. A evolução dos dados entre 30kPa e 200kPa pode ser observado na figura 4.54

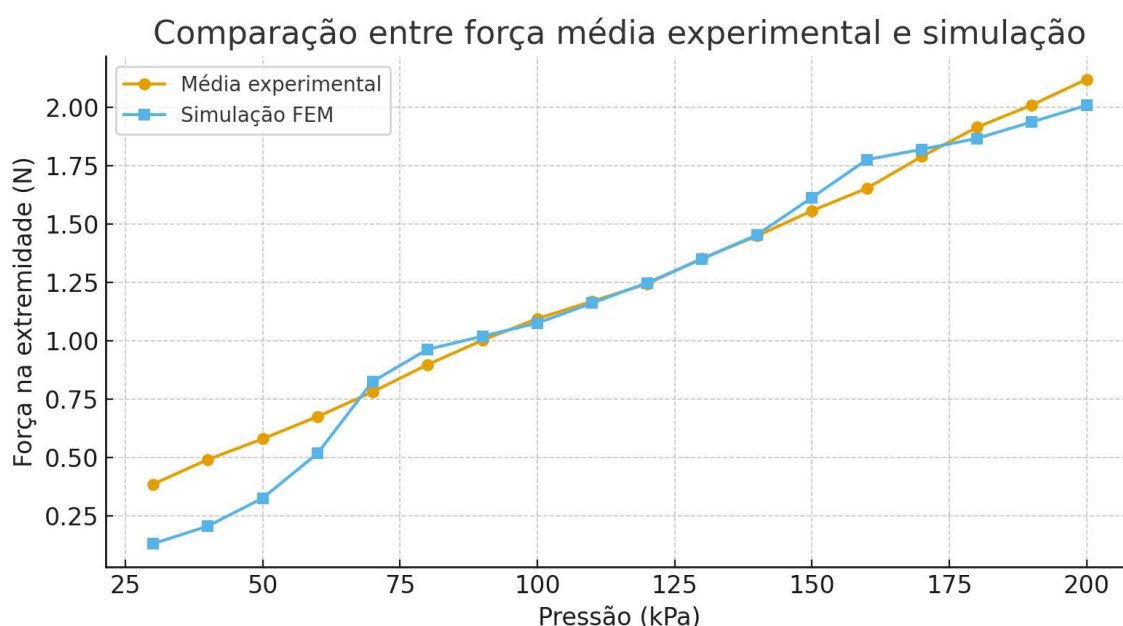


Figura 4.54: Valores de força na extremidade (Eixo Z) para simulação e experimento.

Desse forma, acredita-se que houve êxito em simular a força gerada pelo atuador por meio do modelo Yeoh.

4.4.3 Framework de utilização de PneuNets em TPU 95A para dispositivos assistivos

A literatura sobre atuadores PneuNet apresenta grande variabilidade em geometrias, materiais, parâmetros de fabricação, modelos constitutivos e protocolos de validação, o que dificulta a comparação direta de resultados e a transferência de soluções para aplicações assistivas específicas. Diante disso, propõe-se um *framework* que organiza o desenvolvimento em etapas encadeadas e iterativas, tornando explícitos os critérios mínimos para decidir quando avançar e reduzindo retrabalho.

O fluxo inicia pela definição da aplicação, em que se delimitam o contexto de uso, a amplitude de movimento desejada, a força necessária e as dimensões do segmento

a ser assistido. Em seguida, realiza-se a fabricação por impressão 3D do atuador em TPU 95A, adotando geometrias de paredes planas e perfil retangular como ponto de partida, com procedimentos de desumidificação do filamento, padronização de parâmetros de impressão e verificação de estanqueidade em baixa pressão. A etapa de simulação e testes integra a definição do material no *solver*, o ajuste do modelo hiperelástico (neste trabalho, Yeoh) e a comparação entre resultados numéricos e experimentais de deformação e força na faixa operacional de interesse.

A partir desses resultados, aplica-se um critério decisório (“Atende?”) para direcionar o desenvolvimento. Se o atuador satisfaz os requisitos, o processo avança para validação na aplicação, contemplando segurança, usabilidade e viabilidade e, quando pertinente, validação clínica. Caso não atenda, são propostas otimizações em nível de projeto e material, como alteração do volume das câmaras, da espessura das paredes ou do material, seguidas por reavaliação numérica para filtrar soluções promissoras antes de nova fabricação, fechando um ciclo iterativo orientado à reprodutibilidade.

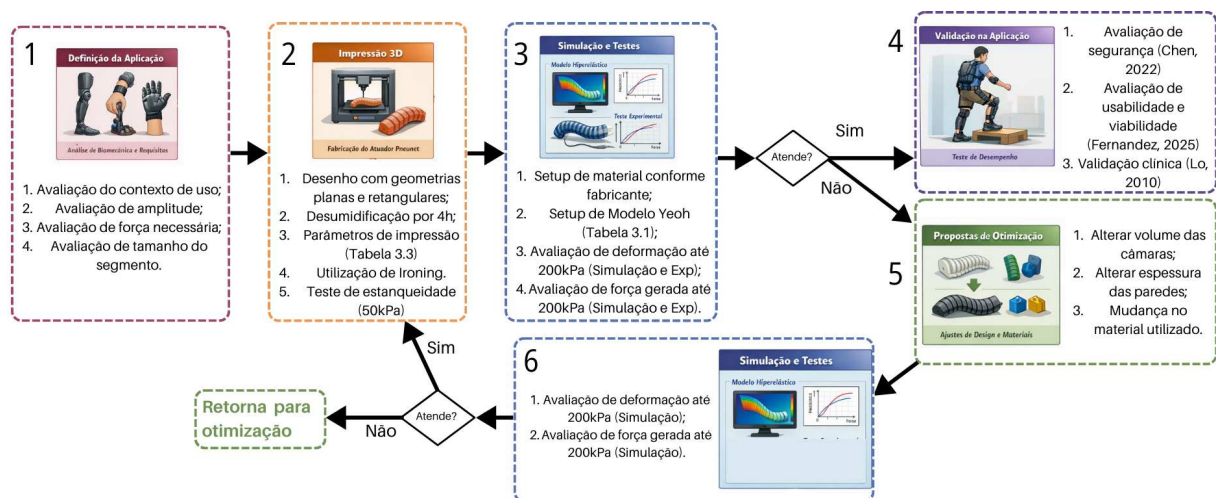


Figura 4.55: Fluxo proposto (*framework*) para utilização de atuadores PneuNet em TPU 95A em dispositivos assistivos, integrando definição da aplicação, fabricação, simulação, testes, decisão, otimização e validação.

Capítulo 5

Discussão

5.1 Modelagem e Simulação dos Diferentes Perfis Geométricos

O trabalho se inicia através da simulação dos seis diferentes tipos de perfis geométricos abordados sendo compostos da combinação de três perfis laterais: retangular, circular e triangular com dois perfis frontais: semicircular e reto. Após o desenho dos atuadores através do software Fusion foi simulado o comportamento dos diferentes perfis utilizando o modelo de Yeoh com três parâmetros e as configurações de material do TPU 85A NinjaFlex no software Ansys. A partir disso houve a escolha de um perfil específico para seguir nas demais etapas do trabalho.

A escolha do perfil lateral retangular para as câmaras do PneuNet não foi arbitrária, mas baseada na simulação e alinhada com o que a literatura tem apontado como uma geometria favorável para maximizar a flexão em atuadores pneumáticos impressos. Zolfagharian e colaboradores Zolfagharian2020₃D4DSP Acomparamseesretangulares,circulares

Resultados semelhantes aparecem em análises paramétricas mais recentes quando se trata do perfil longitudinal do atuador, o trabalho de Ionela (Ionela-Lenuța; MÂN-DRU, 2024) mostra que atuadores com seção retangular exibem maior sensibilidade do ângulo de flexão em função da pressão quando todos os demais parâmetros geométricos são mantidos, reforçando a ideia de que essa geometria explora melhor a alavanca fornecida pela camada inextensível.

Além do desempenho mecânico, o perfil retangular dialoga bem com as limita-

ções práticas da fabricação aditiva em TPU. Trabalhos recentes em lógica pneumática impressa em FDM relatam que câmaras com paredes verticais e topo plano são preferidas porque impressoras de filamento em materiais flexíveis têm dificuldade em construir paredes muito inclinadas ou em balanço sem o uso intensivo de suportes, o que compromete a estanqueidade e aumenta a taxa de falhas (Conrad *et al.*, 2024; Zhai *et al.*, 2023).

Outros estudos descrevem atuadores de seção retangular fabricados a partir de moldes simples impressos em 3D, destacando que a adoção de uma seção retangular simplifica a moldagem e reduz o trabalho manual, favorecendo ciclos rápidos de prototipagem e personalização em dispositivos vestíveis (McCall; Readling; Kamper *et al.*, 2020; Chen, 2020; Marchese; Katzschmann; Rus, 2015).

Nesse contexto, optar por câmaras retangulares encurta o caminho entre o modelo numérico e o protótipo físico por três motivos práticos: (i) reduz a probabilidade de defeitos na impressão, pois privilegia paredes verticais e superfícies planas, evitando regiões em balanço e inclinações longas que, em FDM com materiais flexíveis, tendem a exigir suportes e aumentar a variabilidade; (ii) facilita a selagem, já que interfaces planas e espessuras mais uniformes tornam mais previsíveis as regiões críticas de vedação e diminuem marcas internas associadas a suportes; e (iii) simplifica a transferência de parâmetros do FEM para o atuador impresso, porque a seção é descrita por poucos parâmetros geométricos e é menos sensível a arredondamentos e pequenas distorções introduzidas pelo bico e pelo fatiamento.

A variação mais original explorada aqui não está tanto na seção transversal, mas no perfil longitudinal das câmaras, ao comparar versões com paredes planas e com um contorno curvado ao longo do comprimento. No entanto, no fim de 2024 o trabalho de Ionela (Ionela-Lenuța; MÂNDRU, 2024) também abordou essa ideia, chegando a conclusão que paredes planas são mais eficientes, isso conversa com as diretrizes gerais de soft robotics a seguir.

Diretrizes de projeto para PneuNets, sintetizadas em recursos como o Soft Robotics Toolkit e em revisões recentes (Holland *et al.*, 2014; Xavier; Tawk *et al.*, 2022; Qin *et al.*, 2024), indicam que, para um comprimento fixo, o aumento da altura e do volume útil das câmaras tende a resultar em maiores ângulos de flexão e maior força de extremidade para uma mesma pressão interna, justamente por ampliar a área interna

sujeita à pressão e o braço de alavanca sobre a camada de restrição.

Dentro dessa lógica, a geometria com paredes planas ao longo do comprimento preserva um volume interno útil maior do que a variante com perfil curvado, na qual parte do envelope é ocupada pela concavidade. Assim, em vez de uma mera expectativa teórica, os resultados numéricos e de bancada apresentados neste estudo corroboram que a versão de paredes planas oferece um desempenho mais favorável, em flexão e/ou força, para a mesma faixa de pressurização. Essa convergência entre princípio geométrico, fabricabilidade e desempenho observado sustenta sua adoção como geometria de referência para as etapas seguintes e é consistente com as recomendações recentes de priorizar configurações mais simples e “support-free” em FDM com materiais flexíveis, reduzindo variabilidade e falhas associadas a suporte e vedação.

5.2 Fabricação dos atuadores

Do ponto de vista da fabricação, a adoção de impressão 3D por FFF/FDM com TPU 95A para produzir diretamente atuadores PneuNet impõe uma margem de ajuste estreita para os parâmetros de processo devido às propriedades intrínsecas do material. Estudos recentes mostram que a estanqueidade e desempenho do atuador dependem da combinação entre espessura de parede, largura de linha e estratégia de preenchimento. Stano et al. (Stano; Arleo; Percoco, 2020) demonstraram que, para PneuNets monolíticos impressos em TPU, a variação da espessura de parede de 1,6 mm para 1,0 mm permitiu aumentar o ângulo de flexão em mais de 70% mantendo a estanqueidade até pressões de vários bar.

No entanto, esse resultado não invalida a recomendação recorrente na literatura de adotar cerca de 1,6 mm como espessura mínima de parede. Em muitos estudos, esse valor está implicitamente associado ao uso de bicos 0,4 mm, configuração mais comum em FDM, na qual 1,6 mm corresponde a aproximadamente quatro linhas/perímetros por parede, o que tende a favorecer a coalescência entre cordões e a estanqueidade. No estudo de Stano et al., a parede foi reduzida para 1,0 mm, mas isso foi viabilizado pelo uso de um bico menor (0,25 mm), permitindo manter uma parede com quatro linhas/perímetros mesmo com menor espessura absoluta.

De forma complementar, Sant'Anna et al. (Sant'Anna et al., 2025) mostraram que o aumento da espessura de paredes em câmaras impressas em TPU 95A eleva significativamente a pressão de ruptura, enquanto a variação da densidade de preenchimento apresenta efeito não linear, com infills em torno de 30% suportando pressões tão altas quanto configurações quase maciças. Em conjunto, esses resultados (Sant'Anna et al., 2025; Stano; Arleo; Percoco, 2020; Yap; Ng; Yeow, 2016) reforçam que, em atuadores pneumáticos impressos, pequenas alterações em parâmetros de impressão podem deslocar a fronteira entre operação segura e falha, o que justifica tratar os parâmetros de impressão e desenho adotados neste trabalho como parte integrante do projeto mecânico, e não apenas como detalhes de manufatura (Blich et al., 2025).

A questão da estanqueidade é particularmente delicada em sistemas pneumáticos macios. Stano et al. propuseram um conector de ar embutido, justamente para eliminar vazamentos entre o tubo pneumático e o corpo do PneuNet, mostrando que o desenho do conector e a orientação de impressão são decisivos para obter vedação completa (Stano; Arleo; Percoco, 2020). Na literatura baseada em moldagem de elastômeros, tanto o Soft Robotics Toolkit quanto trabalhos que replicam seus protocolos de fabricação enfatizam procedimentos rigorosos de degasificação, colagem e ensaio de vazamento em água para garantir a integridade das câmaras (Holland et al., 2014; Giffney; Ng; Anderson, 2016).

Embora a rota por FDM lide com defeitos de natureza diferente, o problema físico é equivalente: poros intercamadas, falta de fusão entre perímetros ou descontinuidades na região de entrada de ar podem se converter em microcanais de vazamento sob pressão. À luz disso, e em concordância com estudos que investigam PneuNets impressos mantendo constante o par impressora-filamento e comparando geometrias ou parâmetros apenas após calibração cuidadosa (Stano; Arleo; Percoco, 2020; Yap; Ng; Yeow, 2016), os resultados deste trabalho indicam que a estanqueidade tornou-se mais consistente quando foi adotado um padrão de atuadores retos como referência de fabricação e quando se incorporou um fluxo de calibração reproduzível, incluindo secagem/desumidificação do filamento antes de cada impressão e a manutenção do mesmo lote de filamento pelo maior tempo possível. Quando a troca de filamento se fez necessária, observou-se a necessidade de repetir as etapas de calibração e

condicionamento para recuperar a estabilidade do processo e reduzir a variabilidade. Por fim, para assegurar que eventuais microdefeitos não fossem propagados para as etapas experimentais, cada atuador produzido foi submetido a teste de estanqueidade no próprio sistema de pressurização, como critério de aceitação antes dos ensaios de deformação e força.

Documentos destacam que o TPU é um material higroscópico, recomendando secagem prévia do filamento em torno de 60–70 °C por várias horas e armazenamento em ambiente seco, já que a umidade absorvida leva à formação de bolhas e superfícies rugosas, reduzindo a adesão entre linhas e aumentando a probabilidade de porosidade interna (FormFutura, 2025; Prusa Research, 2025). Em outras palavras, o controle da umidade do filamento não é apenas um detalhe de acabamento, mas um fator diretamente ligado à estanqueidade das câmaras pneumáticas.

Em termos práticos, mudar de impressora ou de lote de TPU no meio da obtenção dos protótipos implicaria reintroduzir incertezas na estanqueidade das peças, exigindo uma nova rodada de ajuste fino de parâmetros antes de qualquer comparação quantitativa entre atuadores. Esse aspecto também se converte em um desafio de gerenciamento do projeto: não é recomendável adquirir filamentos para armazenamento prolongado, sobretudo em regiões de alta umidade, mas também não é desejável alternar entre fabricantes e lotes durante a mesma série de impressões. No presente estudo, parte do material acabou sendo perdida porque alguns rolos, após um período sem uso, tornaram-se quebradiços, evidenciando a degradação associada ao tempo e às condições de acondicionamento. Além disso, a necessidade de recorrer a diferentes marcas de TPU ao longo do processo introduziu variações adicionais de processabilidade e vedação, reforçando que, idealmente, o planejamento deve prever a compra de uma quantidade razoável de filamento do mesmo fabricante e lote, mantida sob condições controladas de armazenamento e secagem, para reduzir retrabalho e aumentar a reprodutibilidade dos protótipos.

Além disso, a própria natureza do TPU como filamento flexível impõe restrições adicionais ao processo de impressão. Guias técnicos de fabricantes e de comunidades de prática convergem ao recomendar velocidades tipicamente entre 20 e 30 mm/s, com camadas da ordem de 0,1–0,2 mm, para garantir alimentação estável do filamento e boa adesão entre camadas (FormFutura, 2025; Prusa Research, 2025; Trček, 2025).

Esses valores são significativamente inferiores às velocidades usuais para PLA ou ABS, o que implica tempos de fabricação elevados para geometrias longas e com muitos detalhes internos, como é o caso de atuadores PneuNet. Nesse cenário, um framework de produção com calibração, secagem do filamento e critérios claros de aceitação tem impacto direto na eficiência do desenvolvimento, pois reduzir a taxa de falhas evita a repetição de impressões longas e, conseqüentemente, diminui o tempo total de prototipagem. De forma complementar, a avaliação prévia de alternativas por modelagem e simulação pode ajudar a filtrar geometrias pouco promissoras antes da fabricação, reduzindo o número de iterações físicas necessárias; essa integração entre simulação e prototipagem será discutida em mais detalhe nas seções seguintes.

Os resultados de fabricação mostram que a impressão direta de PneuNets monolíticos em TPU 95A por FDM se torna confiável quando o processo é conduzido com controle rigoroso. Na prática, isso exigiu velocidades mais baixas, camadas finas (0,1mm de altura menor que o apresentado na literatura), calibração recorrente a cada impressão, rotinas de desumidificação de pelo menos quatro horas, além de manter constante o conjunto impressora-filamento (incluindo o lote) para reduzir variações. A estanqueidade foi tratada como critério de aceitação, com pressurização de 50kPa com o atuador submerso em água antes de considerá-lo válido. Esse cuidado aumenta bastante o tempo de impressão, mas melhora a reprodutibilidade e diminui falhas de processo, permitindo comparar as respostas mecânicas com mais segurança. Como ainda há poucos estudos dedicados à fabricação de PneuNets monolíticos em TPU 95A, o procedimento consolidado aqui pode servir como referência prática para a produção de outros atuadores pneumáticos, tanto para reabilitação quanto para aplicações não clínicas.

5.3 Validação dos atuadores

5.3.1 Quanto à deformação

A deformação angular observada em atuadores PneuNet impressos em TPU está fortemente relacionada tanto à dureza do material quanto à espessura das paredes das câmaras. Atuadores fabricados em TPU com dureza em torno de 85 A tendem

a apresentar grandes amplitudes de flexão para pressões relativamente moderadas, como relatado por Yap et al. (Yap; Lim *et al.*, 2016), em que ângulos próximos ao fechamento completo do atuador são obtidos em faixas de pressão comparáveis às deste estudo. No presente trabalho, entretanto, os atuadores foram impressos em TPU 95 A, material substancialmente mais rígido, e a deflexão máxima medida para o modelo selecionado foi de aproximadamente $27,5^\circ$ sob pressurização de 200 kPa. Embora esse valor seja inferior ao observado em trabalhos com elastômeros de menor dureza, ele é coerente com a expectativa de menor deformação para polímeros mais rígidos combinados a paredes estruturais de 1,6 mm, o que, por sua vez, contribui para maior robustez mecânica e menor risco de falhas por fadiga ou vazamento.

Essa interpretação é reforçada quando se compara o desempenho obtido com resultados de atuadores PneuNet impressos em TPU 95 A disponíveis na literatura. Schreiber et al. (Schreiber *et al.*, 2025) analisaram o comportamento de um atuador de referência fabricado por diferentes tecnologias de manufatura aditiva e, na Figura 4, reportam para o caso de atuadores produzidos por FFF em TPU com parede de 1,6 mm um gradiente de deflexão da ordem de $12,7^\circ/100$ kPa, isto é, cerca de 25° para 200 kPa, muito próximo do valor de $27,5^\circ$ observado neste estudo. A boa concordância entre os resultados, apesar de diferenças de geometria e de parâmetros de impressão, indica que o atuador desenvolvido apresenta um comportamento mecânico compatível com o esperado para PneuNets em TPU 95 A, situando-se dentro de uma faixa de desempenho aceitável para aplicações que demandam pequenos deslocamentos angulares.

Os resultados deste trabalho indicam que, para a geometria selecionada e o material adotado (TPU 95A), o atuador operou em um regime de deformação moderada, atingindo deflexão máxima em torno de $27,5^\circ$. Embora esse valor seja inferior ao observado em arquiteturas otimizadas para grandes amplitudes de flexão, ele é coerente com o fato de que, em muitas aplicações, grandes deformações não são um requisito e podem até ser indesejáveis quando se busca maior previsibilidade e controle fino do movimento. Nesse sentido, estudos prévios mostram que PneuNets podem ser explorados de forma eficiente em regimes de baixa a moderada curvatura: Gariya e Kumar, por exemplo, ao comparar geometrias do tipo plane, slow pneu-net e fast pneu-net, reportam que as configurações plane e slow operam com ângulos sensivelmente menores para a mesma faixa de pressão (até 10°), privilegiando precisão de ajuste em

detrimento de grandes deformações (Gariya; Kumar, 2022). De forma complementar, Rad et al. desenvolvem um modelo cinemático baseado em dados para um gripper comercial com dedos PneuNet, enfatizando justamente cenários em que pequenas variações de pressão produzem variações controláveis de posição, mais compatíveis com tarefas que demandam repetibilidade do que com “fechamento completo” do dedo (Rad; Hancu; Lapusan, 2022).

Além disso, Alici et al. ao estudarem atuadores pneumáticos segmentados, demonstram que mesmo em materiais altamente complacentes muitas tarefas de prensão e interação se beneficiam de um regime útil concentrado em deformações de algumas dezenas de graus, reforçando que ângulos extremos nem sempre se traduzem em melhor funcionalidade (Alici et al., 2018). Assim, a deflexão máxima observada neste trabalho ($\approx 27,5^\circ$) se insere precisamente nesse intervalo de deformações moderadas, sendo compatível com aplicações que priorizam ajustes de posição mais sutis, estabilidade e controle, em vez de grandes amplitudes de movimento.

5.3.2 Quanto à força gerada

O resultado quanto à produção de força na extremidade foi de 2,12N para pressurização a 200kPa. Quando se observa a literatura sobre atuadores macios impressos em TPU 95A, nota-se que forças de magnitude semelhante à encontrada neste trabalho são reportadas para geometrias e configurações de teste distintas. Scharff et al. (Scharff et al., 2019) investigaram atuadores pneumáticos do tipo *bellows* impressos em TPU 95A e mostraram que, em condições de bloqueio e pressões moderadas (1,5N a 200kPa).

De forma complementar, Park et al. (Park et al., 2014) apresentaram músculos pneumáticos impressos em TPU 95A capazes de atingir esforços significativamente mais elevados (dezenas de quilogramas-equivalente) quando dimensionados para alta capacidade de carga, ao custo de maior rigidez e menor adequação a aplicações vestíveis. Além dos materiais utilizados o design influencia bastante, a tabela 5.1 resume alguns achados de atuadores PneuNet impressos em 3D com diferentes tipos de TPU (Apenas (Scharff et al., 2019) utilizou 95A dentre eles) em comparação com este trabalho.

Autor	Pressão	Força
Este trabalho	200 kPa	2,12 N
Yap et al. (Yap; Ng; Yeow, 2016)	250 kPa	20 N
Mosadegh et al. (Mosadegh et al., 2014a)	72 kPa	1,4 N
Peele et al. (Peele et al., 2015)	170 kPa	0,65 N
Scharff et al. (Scharff et al., 2019)	200 kPa	1,62 N
Lalegani et al. (Lalegani Dezaki et al., 2023)	200 kPa	0,8 - 1 N

Tabela 5.1: Tabela de Pressão e Força dos Atuadores

A Tabela 5.1 sintetiza a relação entre pressão de operação e força na extremidade reportada para diferentes atuadores do tipo PneuNet, permitindo posicionar quantitativamente o desempenho do protótipo deste estudo. Observa-se que, na mesma ordem de grandeza de pressão (200 kPa), o atuador aqui desenvolvido (2,12 N) apresenta força superior aos valores reportados por Scharff et al. (1,62 N) e por Lalegani et al. (0,8–1 N), além de superar o caso de Peele et al. (0,65 N) mesmo em pressão relativamente próxima (170 kPa). Por outro lado, o valor de Yap et al. (20 N a 250 kPa) é substancialmente maior e sugere um regime de projeto e ensaio distinto, possivelmente influenciado por diferenças de material, geometria, reforços, condições de contorno e até pelo tipo de métrica (força bloqueada versus força na ponta). Também chama atenção que Mosadegh et al. reportam 1,4 N em apenas 72 kPa, reforçando que comparações diretas exigem cautela, já que eficiência pressão–força depende fortemente do volume interno, espessuras, estratégia construtiva e método de medição. Ainda assim, no conjunto, a tabela indica que o resultado obtido neste trabalho se enquadra de forma consistente no intervalo típico de forças em deformações moderadas, especialmente para configurações avaliadas em torno de 200 kPa, contribuindo para validar a competitividade do atuador proposto dentro de um cenário de fabricação e operação comparável.

É necessário que para cada aplicação seja avaliado as necessidades de deformação e produção de esforços para viabilizar o desenho CAD do atuador, escolha do material e até decisão relativa aos parâmetros de impressão. O atuador consegue gerar forças para algumas aplicações biomédicas visto que Skirven et al. (Skirven et al., 2011) afirma que forças feitas diretamente aos dedos entre 100 e 250g (1 até 2,5N,

aproximadamente) já podem ser eficazes em processos de reabilitação motora. No entanto não consegue deformar o suficiente para o movimento total (com pressões de trabalho aceitáveis)

Por outro lado, aplicações como o trabalho de (Risangtuni *et al.*, 2023) onde o deslocamento angular é mais baixo tem alto potencial para ser implementado com um atuador semelhante ao desenvolvido nesse trabalho. Além disso, para aplicações de órteses o peso é um fator muito importante (Chu; Patterson, 2018; Aubin *et al.*, 2014) e os atuadores PneuNet podem se beneficiar disso.

Este trabalho cumpriu os objetivos propostos ao integrar modelagem constitutiva, simulação numérica e validação experimental no desenvolvimento de atuadores pneumáticos do tipo PneuNet monolíticos fabricados por FDM em TPU 95A, preenchendo uma lacuna prática ainda pouco explorada para esse material mais rígido e amplamente disponível no Brasil. A partir de propriedades mecânicas obtidas na literatura e em especificações do fabricante, foi adotado um modelo hiperelástico do tipo Yeoh em elementos finitos para prever a resposta em flexão sob pressurização interna de até 200 kPa, permitindo comparar, de forma sistemática, geometrias com paredes retas e curvadas e perfis internos triangulares, circulares e retangulares. Os resultados numéricos e fabris convergiram para a seleção do atuador de paredes planas e perfil retangular, que combinou melhor desempenho em flexão com maior reprodutibilidade de impressão e menor incidência de vazamentos, justificando sua escolha como geometria de referência na etapa experimental.

A comparação entre simulação e bancada mostrou boa concordância na tendência pressão–deformação, indicando que o modelo computacional é suficientemente consistente para orientar decisões de projeto e reduzir o número de protótipos necessários, encurtando o ciclo de prototipagem. Em paralelo, um dos principais aportes do estudo foi evidenciar que a obtenção de câmaras herméticas em TPU por FDM depende fortemente de engenharia de processo: a estanqueidade só se tornou estável após a padronização do conjunto impressora–filamento–perfil de fatiamento, rotinas de secagem/desumidificação, ajuste fino de parâmetros e testes de estanqueidade como critério de aceitação, alcançando alta taxa de sucesso nas geometrias finais. Por fim, os resultados apoiam a viabilidade de uso em reabilitação em cenários que não exigem grandes amplitudes angulares, ao mesmo tempo em que indicam que,

quando maiores deformações forem necessárias, elas podem ser buscadas por alterações geométricas e estratégias de projeto, mantendo o TPU 95A como alternativa realista e escalável para o contexto de fabricação disponível.

Capítulo 6

Conclusão

Conclusões

Do ponto de vista científico e metodológico, esta tese cumpre os cinco objetivos específicos propostos e apresenta contribuições objetivas para o desenvolvimento de atuadores pneumáticos do tipo PneuNet em TPU 95A com foco em aplicações assistivas e de reabilitação. Primeiramente, foi realizado um estudo controlado do efeito de variações geométricas, com a concepção de seis geometrias (três perfis laterais de câmara, triangular, circular e retangular, combinados a dois perfis longitudinais, reto e côncavo), mantendo-se constantes o material, o processo de fabricação e os principais parâmetros de impressão. Em seguida, essas seis configurações foram efetivamente fabricadas por FDM em TPU 95A, utilizando um mesmo conjunto de parâmetros de fatiamento para isolar o efeito das variações geométricas. Além disso, a tese consolida diretrizes práticas de projetabilidade e fabricabilidade para PneuNets impressos em TPU 95A, discutindo escolhas geométricas e decisões de fabricação que favorecem vedação, repetibilidade e transferência fiel do modelo geométrico para o protótipo físico. Por fim, foram construídos e aplicados modelos em elementos finitos para as seis geometrias, com modelo hiperelástico e condições de contorno e pressurização compatíveis com os ensaios, permitindo empregar, na prática, um fluxo de projeto integrado em que caracterização, modelagem e simulação numérica orientam a concepção dos atuadores e, de forma mais específica, reduzem a dependência de tentativa e erro no desenvolvimento de atuadores PneuNet em TPU 95A destinados a dispositivos de reabilitação, especialmente nas etapas de seleção de geometria,

definição de faixas de operação e ajuste inicial de parâmetros de projeto antes da prototipagem em bancada.

A comparação entre a resposta simulada e a resposta experimental do atuador selecionado com base no desempenho das simulações iniciais evidenciou boa concordância qualitativa e, sempre que possível, quantitativa. Essa consistência reforça a adequação do modelo numérico adotado e sustenta a validação de um processo de fabricação de atuadores PneuNet em TPU 95A por FDM como rota viável de produção para aplicações em robótica macia com exigência de deformações moderadas, com potencial de integração em soluções assistivas. Ainda assim, o estudo apresenta limitações importantes: adotou-se um modelo hiperelástico elástico puro, sem viscoelasticidade, histerese ou dano por fadiga; a faixa de pressão explorada concentrou-se em torno de 200 kPa; os ensaios priorizaram a resposta em flexão com caracterização de força na extremidade, mas sem avaliar preensão em objetos de diferentes geometrias ou comportamento em ciclos prolongados; e a análise restringiu-se a uma única faixa de dureza de TPU, o que impede comparações diretas com materiais mais macios ou com atuadores fundidos em silicone, aspectos que se configuram como oportunidades claras para trabalhos futuros.

Essas limitações, no entanto, abrem caminhos claros para trabalhos futuros. Uma continuidade natural consiste em expandir a caracterização experimental para incluir medidas detalhadas de testes de preensão envolvendo cilindros e objetos de uso cotidiano, além de protocolos de avaliação funcional mais próximos de tarefas de vida diária. Em paralelo, faz sentido aprofundar a análise numérica, incorporando modelos viscoelásticos ou dependentes de dano que permitam estudar fadiga e degradação de desempenho ao longo de muitos ciclos. Outra linha promissora é a comparação direta entre atuadores impressos em diferentes durezas de TPU, incluindo 85A quando sua disponibilidade permitir, ou mesmo combinações multimateriais que explorem gradientes de rigidez. Finalmente, a integração dos atuadores em dispositivos assistivos completos, como órteses para membros superiores ou inferiores, abre espaço para avaliar o impacto desses elementos em tarefas funcionais reais, aproximando o estudo das condições de uso em reabilitação e assistência ao movimento.

Em síntese, os resultados apresentados mostram que atuadores PneuNet em TPU 95A, fabricados por FDM e apoiados por modelagem numérica adequada, constituem

uma plataforma concreta e promissora para o desenvolvimento de soluções em robótica macia voltadas à saúde que não tenham como requisito grandes deformações. Ao evidenciar tanto as possibilidades quanto as dificuldades do processo, o trabalho contribui para tornar mais claro e reproduzível o percurso entre o conceito de atuador macio e um protótipo funcional, mensurável e passível de replicação. Em um cenário em que a adoção de tecnologias assistivas de baixo custo e produzíveis localmente se torna cada vez mais relevante, a demonstração de que é possível projetar e fabricar atuadores pneumáticos com materiais e equipamentos relativamente acessíveis, sem abrir mão de rigor de modelagem e de análise, representa um passo importante na direção de dispositivos mais acessíveis, customizáveis e adaptados à realidade de contextos como o brasileiro.

Referências Bibliográficas

ALICI, Gursel *et al.* Modeling and Experimental Evaluation of Bending Behavior of Soft Pneumatic Actuators Made of Discrete Actuation Chambers. **Soft Robotics**, v. 5, n. 1, p. 24–35, 2018. DOI: [10.1089/soro.2016.0052](https://doi.org/10.1089/soro.2016.0052).

AMBAYE, Getahun *et al.* Soft Robot Workspace Estimation via Finite Element Analysis and Machine Learning. **Actuators**, v. 14, n. 3, p. 110, 2025. DOI: [10.3390/act14030110](https://doi.org/10.3390/act14030110).

AUBIN, Patrick *et al.* A pediatric robotic thumb exoskeleton for at-home rehabilitation: the Isolated Orthosis for Thumb Actuation (IOTA). **International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics**, Emerald Group Publishing Limited, v. 7, n. 3, p. 233–252, 2014.

BANYAI, Adriana Daniela; BRIŞAN, Cornel. Robotics in Physical Rehabilitation: Systematic Review. **Healthcare**, v. 12, n. 17, p. 1720, ago. 2024. DOI: [10.3390/healthcare12171720](https://doi.org/10.3390/healthcare12171720).

BELFORTE, Guido *et al.* Soft Pneumatic Actuators for Rehabilitation. **Actuators**, v. 3, n. 2, p. 84–105, 2014. DOI: [10.3390/act3020084](https://doi.org/10.3390/act3020084).

BELOSHENKO, Vasyl *et al.* Mechanical Properties of Flexible TPU-Based 3D Printed Lattice Structures: Role of Lattice Cut Direction and Architecture. **Polymers**, v. 13, n. 17, p. 2986, 2021. DOI: [10.3390/polym13172986](https://doi.org/10.3390/polym13172986).

BERNAT, Joanna *et al.* Review of Soft Actuators Controlled with Electrical Stimuli: IPMC, DEAP, and MRE. **Applied Sciences**, v. 13, n. 3, p. 1651, 2023. DOI: [10.3390/app13031651](https://doi.org/10.3390/app13031651).

BLIAH, Anat *et al.* Fabrication of Soft Robotics by Additive Manufacturing: From Materials to Applications. **Chemical Reviews**, 2025. in press.

BLUMENSCHN, Laura H; MCNGÜÇ, Yiğit. Generalized delta mechanisms from soft actuators. *In*: IEEE. 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). [S. l.: s. n.], 2019. p. 249–256.

BONET, Javier; WOOD, Richard D. **Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

BOYRAZ, Pinar; RUNGE, Gundula; RAATZ, Annika. An overview of novel actuators for soft robotics. *In*: MDPI, 3. ACTUATORS. [S. l.: s. n.], 2018. v. 7, p. 48.

BRADWELL, Hannah L. *et al.* Companion robots for older people: Importance of user-centred design demonstrated through observations and focus groups comparing preferences of older people and roboticists in South West England. **BMJ Open**, v. 9, n. 9, e032468, 2019. DOI: [10.1136/bmjopen-2019-032468](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2019-032468).

BUONAMICI, F; PUGGELLI, L *et al.* Modeling of 3D Printed Soft Pneumatic Actuators. *In*: SCIPEDIA SL. WCCM-ECCOMAS CONGRESS. [S. l.: s. n.], 2024. p. 0–0.

BUONAMICI, Francesco; CERRUTI, Michele *et al.* Development of an Anthropometric Soft Pneumatic Gripper with Reconfigurable Fingers for Assistive Robotics. **Robotics**, v. 14, n. 11, p. 152, 2025. DOI: [10.3390/robotics14110152](https://doi.org/10.3390/robotics14110152).

CHAI, Yuhang; LI, Yinzhe; ZHANG, Zhiyu *et al.* Advances in Fabric-Based Pneumatic Soft Actuators for Wearable Robotics. **Sensors**, v. 25, n. 12, p. 3665, 2025. DOI: [10.3390/s25123665](https://doi.org/10.3390/s25123665).

CHEN, Yaohui. **Development of lobster-inspired hybrid actuators for compliant robotic applications**. 2020. Tese (Doutorado) – Monash University.

CHU, Chia-Ye; PATTERSON, Rita M. Soft robotic devices for hand rehabilitation and assistance: a narrative review. **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, Springer, v. 15, p. 1–14, 2018.

CIANCHETTI, Matteo *et al.* Biomedical applications of soft robotics. **Nature Reviews Materials**, Nature Publishing Group UK London, v. 3, n. 6, p. 143–153, 2018. DOI: [10.1038/s41578-018-0022-y](https://doi.org/10.1038/s41578-018-0022-y).

CONRAD, Stefan *et al.* 3D-printed digital pneumatic logic for the control of soft robotic actuators. **Science robotics**, American Association for the Advancement of Science, v. 9, n. 86, eadh4060, 2024.

ĆURKOVIĆ, Petar; JAMBREČIĆ, Antonio. Improving structural design of soft actuators using finite element method analysis. **Interdisciplinary Description of Complex Systems: INDECS**, Hrvatsko interdisciplinarno društvo, v. 18, n. 4, p. 490–500, 2020.

DE GREEF, Aline; LAMBERT, Pierre; DELCHAMBRE, Alain. Towards flexible medical instruments: Review of flexible fluidic actuators. **Precision engineering**, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 311–321, 2009.

DEMIR, Kahraman G. *et al.* Computational and Experimental Design Exploration of 3D-Printed Soft Pneumatic Actuators. **Advanced Intelligent Systems**, v. 2, n. 7, p. 2000013, 2020. DOI: [10.1002/aisy.202000013](https://doi.org/10.1002/aisy.202000013).

DESAI, Shubham M.; SONAWANE, Rushikesh Y.; MORE, Aarti P. Thermoplastic polyurethane for three-dimensional printing applications: A review. **Polymer Advanced Technologies**, v. 34, n. 7, p. 2061–2082, 2023. DOI: [10.1002/pat.6041](https://doi.org/10.1002/pat.6041).

DEWANG, Yogesh *et al.* Research Progress in Electroactive Polymers for Soft Robotics and Artificial Muscle Applications. **Polymers**, MDPI, v. 17, n. 6, p. 746, 2025.

DILIBAL, Seyed; SAHIN, Hakan; CELIK, Yusuf. Experimental and numerical analysis on the bending response of the geometrically gradient soft robotics actuator. **Archives of Mechanics**, v. 70, n. 5, p. 391–404, 2018. DOI: [10.24423/aom.2903](https://doi.org/10.24423/aom.2903).

DING, Liang *et al.* Dynamic Finite Element Modeling and Simulation of Soft Robots. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 35, p. 24, 2022. DOI: [10.1186/s10033-022-00701-8](https://doi.org/10.1186/s10033-022-00701-8).

DONG, Hui *et al.* Review: Application of 3D Printing Technology in Soft Robots. **3D Printing and Additive Manufacturing**, v. 11, n. 3, p. 954–976, 2024. DOI: [10.1089/3dp.2023.0127](https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0127).

DURAN, Myka Mae *et al.* 3D printing of silicone and polyurethane elastomers for medical device application: A review. **Advances in Industrial and Manufacturing Engineering**, v. 7, p. 100125, 2023. DOI: [10.1016/j.aime.2023.100125](https://doi.org/10.1016/j.aime.2023.100125).

ECEIZA, A. *et al.* Thermoplastic Polyurethane Elastomers Based on Polycarbonate Diols With Different Soft Segment Molecular Weight and Chemical Structure: Mechanical and Thermal Properties. **Polymer Engineering & Science**, v. 48, p. 297–306, 2008. DOI: [10.1002/pen.20905](https://doi.org/10.1002/pen.20905).

FORMFUTURA. **TPU Filament Material Guide: Flexible 3D Printing**. [S. l.: s. n.], 2025.
<https://www.formfutura.com/blog/blogs-1/material-guide-tpu-filament-53>.
Acesso em: nov. 2025.

GALLUP, Lucas *et al.* Influence of Fused Deposition Modeling Process Parameters on Constitutive Model of Hyperelastic Thermoplastic Polyurethane. **Polymers**, MDPI, v. 17, n. 1, p. 26, 2024.

GALLUP, Lucas K *et al.* Toward Understanding Large Deflection Bending of 3d Printed Ninjabflex®. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, WIT Press, v. 133, p. 55–65, 2021.

GARIYA, Narendra; KUMAR, Pushpendra. A comparison of plane, slow pneu-net, and fast pneu-net designs of soft pneumatic actuators based on bending behavior.

Materials Today: Proceedings, v. 65, p. 3799–3805, 2022. DOI:

[10.1016/j.matpr.2022.06.576](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.576).

GARIYA, Narendra; KUMAR, Pushpendra; PRASAD, Brijesh. Stress and Bending Analysis of a Soft Pneumatic Actuator Considering Different Hyperelastic Materials.

Materials Today: Proceedings, v. 65, p. 3126–3131, 2022. DOI:

[10.1016/j.matpr.2022.05.352](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.352).

GARIYA, Narendra; KUMAR, Pushpendra; SINGH, Tej. Experimental study on a bending type soft pneumatic actuator for minimizing the ballooning using chamber-reinforcement. **Heliyon**, v. 9, n. 4, e14898, 2023. DOI:

[10.1016/j.heliyon.2023.e14898](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14898).

GE, Liang *et al.* Fabrication of Soft Pneumatic Network Actuators with Oblique Chambers Using 3D Printed Soluble Molds. **Micromachines**, v. 9, n. 9, p. 462, 2018.

DOI: [10.3390/mi9090462](https://doi.org/10.3390/mi9090462).

GEORGOPOULOU, Antonia *et al.* A Sensorized Soft Pneumatic Actuator Fabricated with Extrusion-Based Additive Manufacturing. **Actuators**, v. 10, n. 5, p. 102, 2021.

DOI: [10.3390/act10050102](https://doi.org/10.3390/act10050102).

GIACOPPO, Giuliano A.; HÖTZEL, Julia; POTT, Peter P. Additively Manufactured Porous Filling Pneumatic Network Actuator. **Actuators**, v. 12, n. 11, p. 414, 2023.

DOI: [10.3390/act12110414](https://doi.org/10.3390/act12110414).

GIFFNEY, Timothy; NG, Tsz Kit; ANDERSON, Ian A. Soft Pneumatic Bending Actuator with Integrated Carbon Nanotube Sensor. **Robotics**, v. 5, n. 1, p. 7, 2016.

DOI: [10.3390/robotics5010007](https://doi.org/10.3390/robotics5010007).

GONZALEZ, David *et al.* Characterization of 3D printed pneumatic soft actuator.

Sensors and Actuators A: Physical, Elsevier, v. 334, p. 113337, 2022.

GU, Guoying *et al.* Analytical Modeling and Design of Generalized Pneu-Net Soft Actuators with Three-Dimensional Deformations. **Soft Robotics**, v. 8, n. 4, p. 462–477, 2021. DOI: [10.1089/soro.2020.0039](https://doi.org/10.1089/soro.2020.0039).

GUL, Jahan Zeb *et al.* 3D printing for soft robotics – a review. **Science and Technology of Advanced Materials**, v. 19, n. 1, p. 243–262, 2018. DOI: [10.1080/14686996.2018.1431862](https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1431862).

HARCHEGANI, Ehsan Kiani *et al.* Innovative Design and Fabrication of a 3D Printed Soft Pneumatic Actuator with Enhanced Bending Capacity and Better Controllability. *In: PROCEEDINGS of the euspen International Conference & Exhibition. [S. l.: s. n.], 2025.*

HASANSHAHI, Behzad *et al.* Design of Soft Robots: A Review of Methods and Future Opportunities for Research. **Machines**, v. 12, n. 8, p. 527, 2024. DOI: [10.3390/machines12080527](https://doi.org/10.3390/machines12080527).

HASHEM, Ryman *et al.* Design and characterization of a bellows-driven soft pneumatic actuator. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, IEEE, v. 26, n. 5, p. 2327–2338, 2020.

HOHIMER, Cameron J *et al.* 3D printed conductive thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites for capacitive and piezoresistive sensing in soft pneumatic actuators. **Additive Manufacturing**, Elsevier, v. 34, p. 101281, 2020.

HOLLAND, Dónal P *et al.* The soft robotics toolkit: Shared resources for research and design. **Soft Robotics**, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 1, n. 3, p. 224–230, 2014.

HOLZAPFEL, Gerhard A. **Nonlinear Solid Mechanics: A Continuum Approach for Engineering**. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

ILIEVSKI, Filip *et al.* Soft Robotics for Chemists. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 50, n. 8, p. 1890–1895, 2011. DOI: [10.1002/anie.201006464](https://doi.org/10.1002/anie.201006464).

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **World Robotics 2024: Industrial Robots**. [S. l.: s. n.], 2024. Executive summary.

IONELA-LENUȚA, POP; MÂNDRU, Silviu-Dan. THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THE PERFORMANCES OF PNEUMATIC SOFT ACTUATORS. **ACTA TECHNICA NAPOCENSIS-Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, and ENGINEERING**, v. 67, n. 4, 2024.

JANARDHANA, R. *et al.* A Comprehensive Experimental, Simulation, and Characterization Mechanical Analysis of Ecoflex and Its Formulation Under Uniaxial Testing. **Materials**, v. 18, n. 13, p. 3037, 2025. DOI: [10.3390/ma18133037](https://doi.org/10.3390/ma18133037).

JARADAT, Mohammed; SOLIMAN, Eslam; TAHA, Mahmoud Reda. 3D-printed bio-inspired mechanically interlocked viscoelastic dampers for energy dissipation. **Materials & Design**, v. 228, p. 111826, 2023. DOI: [10.1016/j.matdes.2023.111826](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111826).

JIRYAEI, Zahra; JAFARPISHEH, Amir Salar. The usefulness of assistive soft robotics in the rehabilitation of patients with hand impairment: A systematic review. **Journal of Bodywork and Movement Therapies**, v. 39, p. 398–409, 2024. DOI: [10.1016/j.jbmt.2024.02.025](https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2024.02.025).

JUNG, Woojun *et al.* Wirelessly powered micro soft bellows actuator with 3d helix coils. *In: IEEE. 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS)*. [S. l.: s. n.], 2022. p. 361–364.

KIM, Sangbae; LASCHI, Cecilia; TRIMMER, Barry. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. **Trends in Biotechnology**, v. 31, n. 5, p. 287–294, 2013. DOI: [10.1016/j.tibtech.2013.03.002](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002).

LALEGANI DEZAKI, Mohammadreza *et al.* Soft pneumatic actuators with controllable stiffness by bio-inspired lattice chambers and fused deposition modeling 3D printing. **Advanced Engineering Materials**, Wiley Online Library, v. 25, n. 6, p. 2200797, 2023.

LANDGRAF, Ralf *et al.* Experiments, hyperelastic modeling and finite element simulation of 3D-printed thermoplastic polyurethane. **PAMM**, Wiley Online Library, v. 21, n. 1, e202100229, 2021.

LASCHI, Cecilia; MAZZOLAI, Barbara; CIANCHETTI, Matteo. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities. **Science robotics**, American Association for the Advancement of Science, v. 1, n. 1, eaah3690, 2016.

LE, Duong *et al.* Optimizing 3D printing process parameters for the tensile strength of thermoplastic polyurethane plastic. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Springer, v. 32, n. 23, p. 10805–10816, 2023.

LI, Suyun; SHI, Zengqin *et al.* The 3D Printing of Flexible Materials: Technologies, Materials, and Challenges. **Materials**, MDPI, v. 18, n. 23, p. 5428, 2025.

LI, Xuebing; WEI, Yintao. Classic Strain Energy Functions and Constitutive Tests of Rubber-Like Materials. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 88, n. 4, p. 604–627, 2015. DOI: [10.5254/rct.15.84879](https://doi.org/10.5254/rct.15.84879).

LIBBY, Jacqueline; SOMWANSHI, Aniket A.; STANCATI, Federico; TYAGI, Gayatri; MEHRDAD, Sarmad *et al.* How Does the Inner Geometry of Soft Actuators Modulate the Dynamic and Hysteretic Response? **arXiv preprint**, arXiv:2308.04722, 2023. DOI: [10.48550/arXiv.2308.04722](https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.04722).

LIBBY, Jacqueline; SOMWANSHI, Aniket A.; STANCATI, Federico; TYAGI, Gayatri; PATEL, Aadit *et al.* What Happens When Pneu-Net Soft Robotic Actuators Get Fatigued? *In: 2023 International Symposium on Medical Robotics (ISMR)*. [S. l.: s. n.], 2023. p. 1–7. DOI: [10.1109/ISMR57123.2023.10130227](https://doi.org/10.1109/ISMR57123.2023.10130227).

MAJIDI, Carmel. Soft-Matter Engineering for Soft Robotics. **Advanced Materials Technologies**, v. 4, n. 2, p. 1800477, 2019. DOI: [10.1002/admt.201800477](https://doi.org/10.1002/admt.201800477).

MAO, Guoyong *et al.* Soft electromagnetic actuators. **Science advances**, American Association for the Advancement of Science, v. 6, n. 26, eabc0251, 2020.

MARCHESE, Andrew D.; KATZSCHMANN, Robert K.; RUS, Daniela. A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots. **Soft Robotics**, v. 2, n. 1, p. 7–25, 2015. DOI: [10.1089/soro.2014.0022](https://doi.org/10.1089/soro.2014.0022).

MCCALL, James V; READLING, Caleb; KAMPER, Derek G *et al.* Compliant Actuators for Hand Exoskeletons. **IROS Mech. Des**, 2020.

MIRANDA, Inês *et al.* Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review. **Journal of Functional Biomaterials**, v. 13, n. 1, p. 2, 2021. DOI: [10.3390/jfb13010002](https://doi.org/10.3390/jfb13010002).

MORRIS, Leah *et al.* The-state-of-the-art of soft robotics to assist mobility: a review of physiotherapist and patient identified limitations of current lower-limb exoskeletons and the potential soft-robotic solutions. **Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation**, v. 20, n. 1, p. 18, 2023. DOI: [10.1186/s12984-022-01122-3](https://doi.org/10.1186/s12984-022-01122-3).

MOSADEGH, Bobak *et al.* Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. **Advanced Functional Materials**, v. 24, n. 15, p. 2163–2170, 2014. DOI: [10.1002/adfm.201303288](https://doi.org/10.1002/adfm.201303288).

MOSADEGH, Bobak *et al.* Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. **Advanced functional materials**, Wiley Online Library, v. 24, n. 15, p. 2163–2170, 2014.

NGO, Tuan D *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 143, p. 172–196, 2018.

NINJATEK. **NinjaFlex® 3D Printing Filament: Technical Data Sheet**. [S. l.: s. n.], abr. 2016. Technical data sheet. Document code: 2016_04_NF_MSPEC.

NUNES NETTO, S. P. *et al.* Development of 3D Printing Soft Pneumatic Actuators for Rehabilitation. *In*: IX Latin American Congress on Biomedical Engineering and XXVIII Brazilian Congress on Biomedical Engineering (CLAIB 2022, CBEB 2022). Cham: Springer, 2024. v. 100. (IFMBE Proceedings), p. 668–680. DOI: [10.1007/978-3-031-49407-9_66](https://doi.org/10.1007/978-3-031-49407-9_66).

PALACIOS-LAZO, Jim S. *et al.* Stress Analysis and Operational Limits of an SLA-Printed Soft Antagonistic Actuator Using a Yeoh-Calibrated Finite Element Model. **Actuators**, v. 14, n. 11, p. 540, 2025. DOI: [10.3390/act14110540](https://doi.org/10.3390/act14110540).

PAN, Min *et al.* Soft Actuators and Robotic Devices for Rehabilitation and Assistance. **Advanced Intelligent Systems**, v. 4, n. 3, p. 2100140, 2022. DOI: [10.1002/aisy.202100140](https://doi.org/10.1002/aisy.202100140).

PARK, Yong-Lae *et al.* Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle–foot rehabilitation. **Bioinspiration & biomimetics**, IOP Publishing, v. 9, n. 1, p. 016007, 2014.

PASQUIER, Cosima du; JEONG, Sehui; OKAMURA, Allison M. Finite Element Modeling of Pneumatic Bending Actuators for Inflated-Beam Robots. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 8, n. 9, p. 5854–5861, 2023. DOI: [10.1109/LRA.2023.3295926](https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3295926).

PATPATIYA, Parth *et al.* A review on polyjet 3D printing of polymers and multi-material structures. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 236, n. 14, p. 7899–7926, 2022. DOI: [10.1177/09544062221079506](https://doi.org/10.1177/09544062221079506).

PEELE, Bryan N *et al.* 3D printing antagonistic systems of artificial muscle using projection stereolithography. **Bioinspiration & biomimetics**, IOP Publishing, v. 10, n. 5, p. 055003, 2015.

PERERA, Osura *et al.* A Review of Soft Robotic Actuators and Their Applications in Bioengineering, with an Emphasis on HASEL Actuators' Future Potential. **Actuators**, v. 13, n. 12, p. 524, 2024. DOI: [10.3390/act13120524](https://doi.org/10.3390/act13120524).

PIRES, Pedro Miguel Pasadas. **Estudo do comportamento hiperelástico de estruturas de TPU fabricadas por impressão 3D (FDM)**. Jun. 2023. Diss. (Mestrado) – Universidade de Lisboa.

POLYGERINOS, Panagiotis; CORRELL, Nikolaus *et al.* Soft Robotics: Review of Fluid-Driven Intrinsically Soft Devices; Manufacturing, Sensing, Control, and Applications in Human-Robot Interaction. **Advanced Engineering Materials**, v. 19, n. 12, p. 1700016, 2017. DOI: [10.1002/adem.201700016](https://doi.org/10.1002/adem.201700016).

POLYGERINOS, Panagiotis; LYNE, Stacey *et al.* Towards a Soft Pneumatic Glove for Hand Rehabilitation. *In*: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Tokyo, Japan: IEEE, 2013. p. 1512–1517. DOI: [10.1109/IROS.2013.6696549](https://doi.org/10.1109/IROS.2013.6696549).

POLYGERINOS, Panagiotis; WANG, Zheng *et al.* Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 73, p. 135–143, 2015. DOI: [10.1016/j.robot.2014.08.014](https://doi.org/10.1016/j.robot.2014.08.014).

PRUSA RESEARCH. **Flexible Materials – Prusa Knowledge Base**. [S. l.: s. n.], 2025. https://help.prusa3d.com/article/flexible-materials_2057. Acesso em: nov. 2025.

QIN, Longhui *et al.* Modeling and simulation of dynamics in soft robotics: A review of numerical approaches. **Current Robotics Reports**, Springer, v. 5, n. 1, p. 1–13, 2024.

RAD, Ciprian; HANCU, Olimpiu; LAPUSAN, Ciprian. Data-Driven Kinematic Model of PneuNets Bending Actuators for Soft Grasping Tasks. **Actuators**, v. 11, n. 2, p. 58, 2022. DOI: [10.3390/act11020058](https://doi.org/10.3390/act11020058).

RIDREMONT, Tanguy *et al.* Pneumatically Actuated Soft Robotic Hand and Wrist Exoskeleton for Motion Assistance in Rehabilitation. **Actuators**, v. 13, n. 5, p. 180, 2024. DOI: [10.3390/act13050180](https://doi.org/10.3390/act13050180).

RISANGTUNI, Ayu Gareta *et al.* Dual-mode 3D printed dynamic wrist driven orthosis for hand therapy exercises. **Frontiers in Mechanical Engineering**, Frontiers Media SA, v. 9, p. 1286304, 2023.

RUS, Daniela; TOLLEY, Michael T. Design, fabrication and control of soft robots. **Nature**, Nature Publishing Group UK London, v. 521, n. 7553, p. 467–475, 2015.

SALEM, Mohamed E. M. *et al.* Design and Characterization of Soft Pneumatic Actuator for Universal Robot Gripper. *In*: 2018 International Conference on Control

and Robots (ICCR). Tokyo, Japan: IEEE, 2018. p. 6–10. DOI: [10.1109/ICCR.2018.8534605](https://doi.org/10.1109/ICCR.2018.8534605).

SANTÁNNA, Tiago Barretto *et al.* Evaluation of FDM-Printed Soft Pneumatic Actuators in TPU. **Journal of Bioengineering, Technologies and Health**, v. 8, n. 2, p. 163–168, 2025. DOI: [10.34178/jbth.v8i2.482](https://doi.org/10.34178/jbth.v8i2.482).

SCHARFF, Rob BN *et al.* Reducing out-of-plane deformation of soft robotic actuators for stable grasping. *In*: IEEE. 2019 2nd IEEE international conference on soft robotics (RoboSoft). [S. l.: s. n.], 2019. p. 265–270.

SCHREIBER, Florian *et al.* Applicability of models to predict the bending behavior of soft pneumatic grippers. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 138, n. 2, p. 273–286, 2025.

SHAHZAD, Majid *et al.* Mechanical Characterization and FE Modelling of a Hyperelastic Material. **Materials Research**, v. 18, n. 5, p. 918–924, 2015. DOI: [10.1590/1516-1439.320414](https://doi.org/10.1590/1516-1439.320414).

SHEPHERD, Robert F. *et al.* Multigait soft robot. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 51, p. 20400–20403, 2011. DOI: [10.1073/pnas.1116564108](https://doi.org/10.1073/pnas.1116564108).

SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama (ed.). **Springer Handbook of Robotics**. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.

SIRBU, Ion-Dan *et al.* Electrostatic bellow muscle actuators and energy harvesters that stack up. **Science Robotics**, American Association for the Advancement of Science, v. 6, n. 51, eaaz5796, 2021.

SKIRVEN, Terri M *et al.* **Rehabilitation of the hand and upper extremity, 2-volume set E-book: expert consult**. [S. l.]: Elsevier Health Sciences, 2011.

SLIM, Mohamed *et al.* Optimization of Soft Actuator Geometry and Material Modeling Using Metaheuristic Algorithms. **Actuators**, v. 14, n. 11, p. 520, 2025. DOI: [10.3390/act14110520](https://doi.org/10.3390/act14110520).

SPONG, Mark W.; HUTCHINSON, Seth; VIDYASAGAR, M. **Robot Modeling and Control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.

STANO, Gianni; ARLEO, Luca; PERCOCO, Gianluca. Additive Manufacturing for Soft Robotics: Design and Fabrication of Airtight, Monolithic Bending PneuNets with

Embedded Air Connectors. **Micromachines**, v. 11, n. 5, p. 485, 2020. DOI: [10.3390/mi11050485](https://doi.org/10.3390/mi11050485).

TAWK, Cheddric; ALICI, Gursel. Finite Element Modeling in the Design Process of 3D Printed Pneumatic Soft Actuators and Sensors. **Robotics**, v. 9, n. 3, p. 52, 2020. DOI: [10.3390/robotics9030052](https://doi.org/10.3390/robotics9030052).

TEJADA, Juan C. *et al.* Soft Robotic Hand Exoskeleton with Enhanced PneuNet-Type Pneumatic Actuators for Rehabilitation and Movement Assistance. **Journal of Robotics**, v. 2024, p. 5815358, 2024. DOI: [10.1155/2024/5815358](https://doi.org/10.1155/2024/5815358).

THALMAN, Carly; ARTEMIADIS, Panagiotis. A review of soft wearable robots that provide active assistance: Trends, common actuation methods, fabrication, and applications. **Wearable Technologies**, v. 1, e3, 2020. DOI: [10.1017/wtc.2020.4](https://doi.org/10.1017/wtc.2020.4).

TRČEK, Tomaž. **Mastering TPU Print Settings for Reliable 3D Printing**. [S. l.: s. n.], 2025. <https://3dtrcek.com/hu/blog/post/mastering-tpu-print-settings-for-reliable-3d-printing-2>. Acesso em: nov. 2025.

TRIVEDI, D. *et al.* Soft Robotics: Biological Inspiration, State of the Art, and Future Research. **Applied Bionics and Biomechanics**, v. 5, n. 3, p. 99–117, 2008. DOI: [10.1155/2008/520417](https://doi.org/10.1155/2008/520417).

VICCICA, Marco; GIORDANO, Massimo; GALATI, Manuela. Additive manufacturing of flexible thermoplastic polyurethane (TPU): enhancing the material elongation through process optimisation. **Progress in Additive Manufacturing**, v. 10, p. 2877–2891, 2025. Published online 10 September 2024. DOI: [10.1007/s40964-024-00790-y](https://doi.org/10.1007/s40964-024-00790-y).

WANG, Dong *et al.* Soft Actuators and Robots Enabled by Additive Manufacturing. **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, v. 6, 2023.

WANG, Fujun *et al.* A Soft Pneumatic Glove with Multiple Rehabilitation Postures and Assisted Grasping Modes. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 347, p. 113978, 2022. DOI: [10.1016/j.sna.2022.113978](https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113978).

WANG, Tianyu *et al.* Programmable design of soft pneu-net actuators with oblique chambers can generate coupled bending and twisting motions. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 271, p. 131–138, 2018. DOI: [10.1016/j.sna.2018.01.045](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.045).

WANG, Yanmei *et al.* Advancements in Soft Robotics: A Comprehensive Review on Actuation Methods, Materials, and Applications. **Polymers**, v. 16, n. 8, p. 1087, 2024. DOI: [10.3390/polym16081087](https://doi.org/10.3390/polym16081087).

WHITESIDES, George M. Soft Robotics. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 57, n. 16, p. 4258–4273, 2018. DOI: [10.1002/anie.201800907](https://doi.org/10.1002/anie.201800907).

WICHIRAMALA, Ken Kanate *et al.* Soft Pneumatic Actuator from 3D-Printed TPU: Fabrication and Grasping Force Characterization. *In: TENCON 2023 – 2023 IEEE Region 10 Conference*. [S. l.: s. n.], 2023. p. 854–859. DOI: [10.1109/TENCON58879.2023.10322351](https://doi.org/10.1109/TENCON58879.2023.10322351).

WOLF, Martin Patrik; SALIEB-BEUGELAAR, Gati; HUNZIKER, Patrick. PDMS with Designer Functionalities: Properties, Modifications Strategies, and Applications. **Progress in Polymer Science**, v. 83, p. 97–134, 2018. DOI: [10.1016/j.progpolymsci.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.06.001).

WU, Yanyan *et al.* Modeling analysis of soft Pneu-Net actuators from low to high pressure in free space. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 239, n. 13, p. 5034–5049, 2025.

XAVIER, Matheus S.; FLEMING, Andrew J.; YONG, Yuen K. Finite Element Modeling of Soft Fluidic Actuators: Overview and Recent Developments. **Advanced Intelligent Systems**, v. 3, n. 5, p. 2000187, 2021. DOI: [10.1002/aisy.202000187](https://doi.org/10.1002/aisy.202000187).

XAVIER, Matheus S.; TAWK, Charbel D. *et al.* Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications. **IEEE Access**, v. 10, p. 59442–59485, 2022. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3179589](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179589).

YAP, Hong Kai; LIM, Jeong Hoon *et al.* Design of a soft robotic glove for hand rehabilitation of stroke patients with clenched fist deformity using inflatable plastic actuators. **Journal of Medical Devices**, American Society of Mechanical Engineers, v. 10, n. 4, p. 044504, 2016.

YAP, Hong Kai; NG, Hui Yong; YEOW, Chen-Hua. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications. **Soft Robotics**, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 3, n. 3, p. 144–158, 2016.

YASA, Oncay *et al.* An Overview of Soft Robotics. **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, v. 6, p. 1–29, 2023. DOI: [10.1146/annurev-control-062322-100607](https://doi.org/10.1146/annurev-control-062322-100607).

YEOH, O. H. Some forms of the strain-energy function for rubber. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 66, n. 5, p. 754–771, 1993. DOI: [10.5254/1.3538343](https://doi.org/10.5254/1.3538343).

ZHAI, Yichen *et al.* Desktop fabrication of monolithic soft robotic devices with embedded fluidic control circuits. **Science robotics**, American Association for the Advancement of Science, v. 8, n. 79, eadg3792, 2023.

ZHANG, Zhilin *et al.* Design and Driving Performance Study of Soft Actuators for Hand Rehabilitation Training. **Medical Devices: Evidence and Research**, v. 17, p. 237–260, 2024. DOI: [10.2147/MDER.S476464](https://doi.org/10.2147/MDER.S476464).

ZHOU, Shuai *et al.* Integrated Actuation and Sensing: Toward Intelligent Soft Robots. **Cyborg and Bionic Systems**, v. 5, p. 0105, 2024. DOI: [10.34133/cbsystems.0105](https://doi.org/10.34133/cbsystems.0105).

ZOLFAGHARIAN, Ali *et al.* 3D/4D-printed bending-type soft pneumatic actuators: fabrication, modelling, and control. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 15, n. 4, p. 373–402, 2020. DOI: [10.1080/17452759.2020.1795209](https://doi.org/10.1080/17452759.2020.1795209).