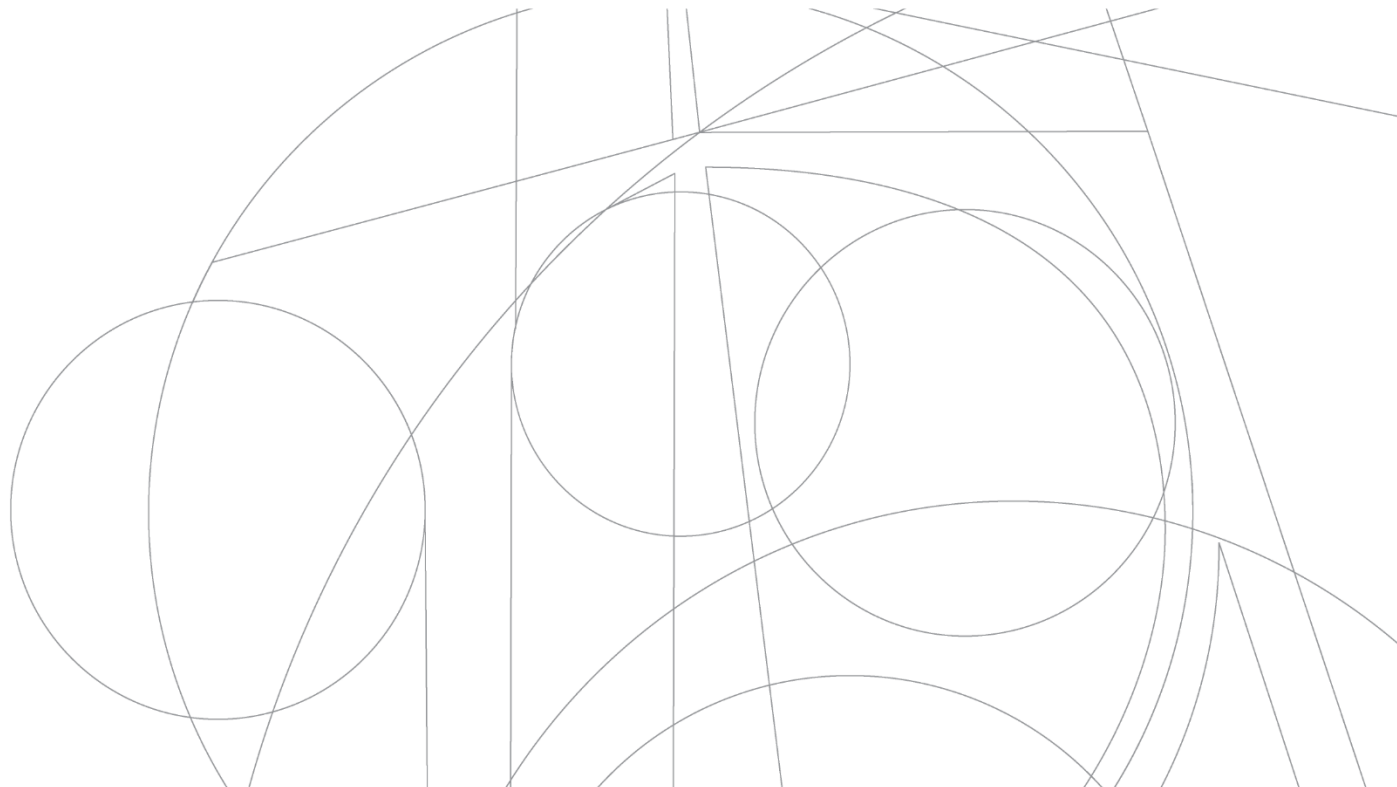
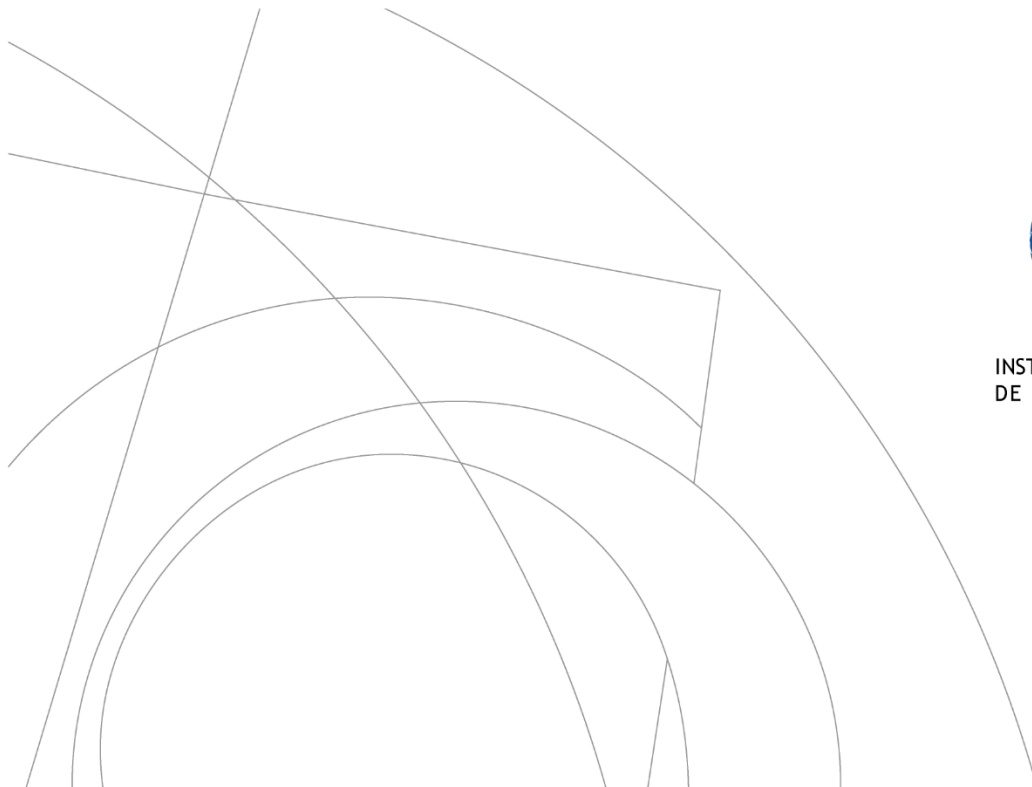




DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GARRAS BIO-INSPIRADAS
PARA SISTEMAS ROBÓTICOS INDUSTRIAIS E COLABORATIVOS

Pedro Emanuel Cerqueira Martins

2026



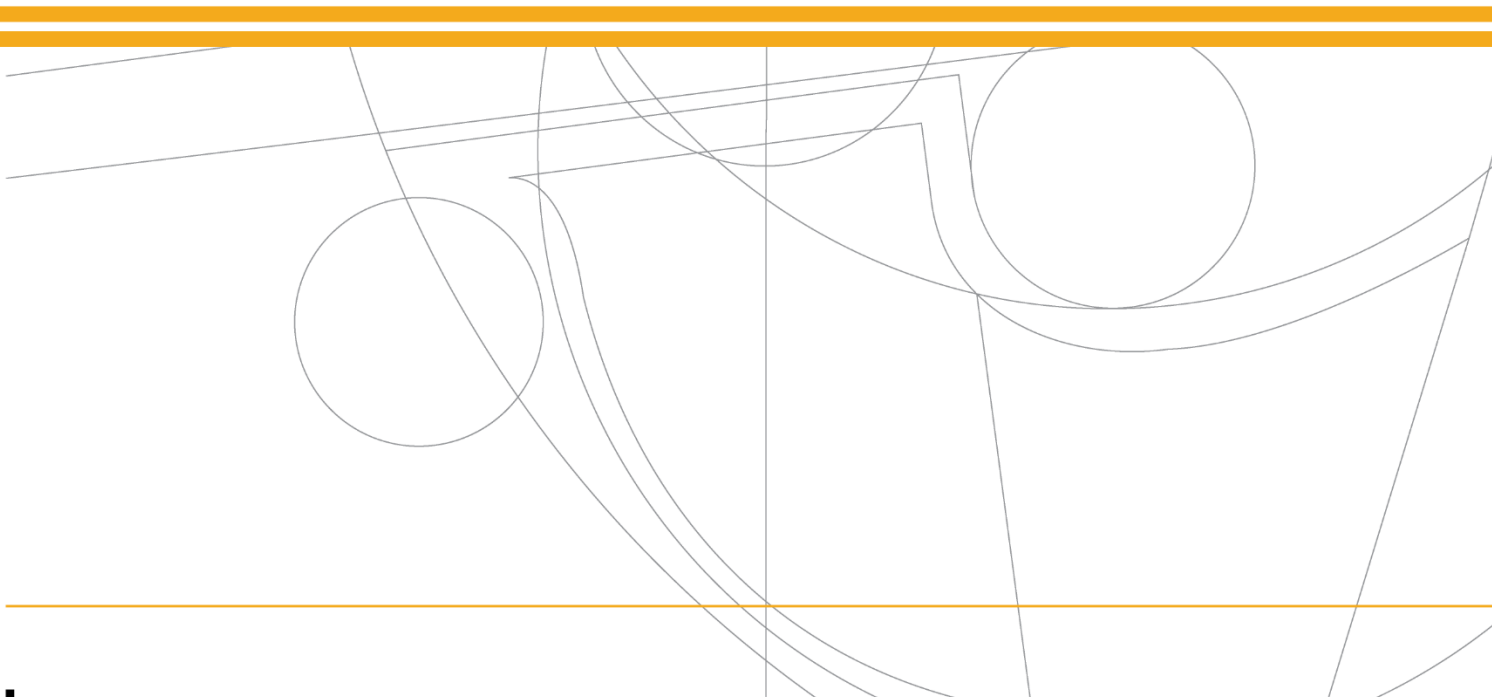
INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GARRAS BIO-INSPIRADAS PARA SISTEMAS ROBÓTICOS INDUSTRIAIS E COLABORATIVOS

Pedro Emanuel Cerqueira Martins



Escola Superior de Tecnologia e Gestão





**INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO**

Pedro Emanuel Cerqueira Martins

Desenvolvimento e caracterização de garras bio-inspiradas para sistemas robóticos industriais e colaborativos

Mestrado em Engenharia Mecânica Energia e Materiais

Trabalho efetuado sob a orientação do(s):

**Doutor Adélio Manuel de Sousa Cavadas
Prof. Adjunto, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, IPVC**

**Doutor Mário Jorge Costa Tomé
Prof. Adjunto, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, IPVC**

**Doutor César Miguel de Almeida Vasques
Prof. Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro**

MEMBROS DO JÚRI

Presidente:

Doutor Manuel Joaquim Peixoto Marques Ribeiro

Professor Coordenador com Agregação da Universidade Politécnica de Viana do Castelo

Vogal:

Doutor Sérgio Manuel de Sousa Rosa

Professor Adjunto da Universidade Politécnica de Bragança

Vogal:

Doutor Adélio Manuel de Sousa Cavadas

Professor Adjunto da Universidade Politécnica de Viana do Castelo

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo amor, pela dedicação e por estarem sempre ao meu lado. Obrigado por terem feito tudo o que estava ao vosso alcance para que eu pudesse seguir os meus sonhos e chegar até aqui. Por nunca hesitarem em ajudar-me, por me orientarem e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que eu próprio duvidei. Esta conquista também é vossa.

Aos meus avós, com quem cresci e que têm um lugar tão especial na minha vida. Obrigado pelo carinho, pela presença e pelo apoio ao longo de todo este percurso. Chegar até aqui tem ainda mais significado por poder partilhar convosco esta alegria.

À minha namorada, Marta, por acreditares em mim e por estares presente em todas as fases desta caminhada. Obrigado pela paciência para me ouvires ensaiar a apresentação, pelas palavras de incentivo e por me ajudares a ganhar confiança. Ter-te ao meu lado tornou os momentos difíceis mais leves e esta conquista ainda mais feliz.

À minha madrinha, pelo carinho, pela disponibilidade e por nunca ter faltado quando precisei. Obrigado por acompanhares o meu percurso e por me fazeres sentir que podia contar contigo.

Aos meus orientadores, pelo apoio, pela disponibilidade e pela dedicação com que acompanharam este trabalho. Obrigado pela partilha de conhecimentos, pelas sugestões e pelo cuidado em ajudar-me a tornar esta dissertação o melhor trabalho possível. Levo deste processo uma aprendizagem que vai além destas páginas e que continuará a acompanhar-me no meu percurso.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão e ao projeto ProMetheus, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e de publicar um artigo científico. Estas experiências contribuíram para a minha formação e deram um significado especial ao esforço dedicado a esta dissertação.

Ao meu colega e amigo Bruno, que me acompanha desde a licenciatura, pela amizade e pela disponibilidade para ajudar. Obrigado pela partilha de conhecimentos, pelo apoio e por estares sempre pronto a dar uma mão quando foi necessário.

Aos meus colegas Baptista, Brandão e Dias, pela companhia e pelos momentos felizes durante a bolsa de investigação. Na vossa companhia, o tempo passou mais depressa e os dias de trabalho tornaram-se mais leves e animados. Obrigado pela boa disposição e por tornarem esta etapa uma experiência que recordarei com carinho.

Aos meus colegas de curso, da licenciatura ao mestrado, pelos momentos partilhados, pela entreaajuda e pelas amizades que ficaram. Entre desafios, trabalho e momentos de descontração, tornaram esta caminhada mais leve e feliz. Levo comigo muito mais do que aquilo que aprendi nas aulas: levo também as pessoas que fizeram parte deste percurso.

Resumo

A manipulação de objetos frágeis ou irregulares motiva o desenvolvimento de garras robóticas capazes de adaptar a sua geometria ao contacto. Esta dissertação apresenta o desenvolvimento e a caracterização experimental de uma garra bio-inspirada baseada na arquitetura *SpiRobs*, fabricada em TPU por fabrico aditivo e acionada por cabo.

Foi desenvolvido um objeto cilíndrico com dois sensores resistivos de força (FSR, do inglês *Force Sensing Resistor*), utilizado numa metodologia de mapeamento circunferencial. Compararam-se duas configurações fabricadas e dois deslocamentos nominais do cabo, com quatro repetições por condição. A soma escalar das forças estimadas nos sensores foi normalizada por uma área CAD fixa, obtendo-se uma pressão média equivalente, distinta da pressão local na interface.

Os ensaios revelaram perfis angulares não uniformes. O aumento do deslocamento nominal do cabo esteve associado a maior força média, com variação mais acentuada na configuração de 20% de preenchimento. Estas tendências são específicas dos protótipos ensaiados: foi utilizado um exemplar por configuração, existiram diferenças adicionais de fabrico e a calibração do Sensor 2 foi extensamente extrapolada. A análise de sensibilidade explicita a dependência das comparações relativamente a essa contribuição.

A análise por elementos finitos (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*) e a modelação multicorpo permitiram explorar qualitativamente o fecho da garra, sem validação quantitativa. Numa segunda linha de desenvolvimento, foram fabricados dedos pneumáticos em silicone e realizada uma caracterização mecânica preliminar para modelação hiperelástica.

A contribuição central é uma metodologia experimental de baixo custo para comparar assinaturas circunferenciais de força e pressão média equivalente. A sua divulgação deu origem ao artigo publicado *Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation*.

PALAVRAS-CHAVE: robótica macia; garras bio-inspiradas; atuação por cabo; mapeamento circunferencial de força; pressão média equivalente; sensores FSR

Abstract

Handling fragile or irregular objects motivates the development of robotic grippers that adapt their geometry to contact. This dissertation presents the development and experimental characterization of a cable-driven bio-inspired gripper based on the *SpiRobs* architecture and additively manufactured from TPU.

A cylindrical object instrumented with two force-sensing resistors (FSRs) was developed for circumferential mapping. Two manufactured configurations and two nominal cable displacements were compared, with four repetitions per condition. The scalar sum of the estimated sensor forces was normalized by a fixed CAD reference area to obtain an equivalent mean pressure, distinct from local interface pressure.

The tests revealed non-uniform angular profiles. Increasing nominal cable displacement was associated with higher mean force, with a larger change in the 20% infill configuration. These trends are specific to the tested prototypes: only one specimen of each configuration was used, fabrication parameters also differed, and the calibration of Sensor 2 was extensively extrapolated. A sensitivity analysis makes the dependence of the comparisons on this contribution explicit.

Finite element analysis (FEA) and multibody modelling supported a qualitative exploration of gripper closure, without quantitative validation. As a second line of development, pneumatic silicone fingers were manufactured and a preliminary mechanical characterization was conducted to support hyperelastic modelling.

The main contribution is a low-cost experimental methodology for comparing circumferential force and equivalent mean pressure signatures. Its dissemination resulted in the published article *Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation*.

KEYWORDS: soft robotics; bio-inspired grippers; cable-driven actuation; circumferential force mapping; equivalent mean pressure; FSR sensors

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

Abreviaturas e siglas

3D	Tridimensional
ADC	Conversor analógico-digital (<i>Analog-to-Digital Converter</i>)
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CBG	Garra de flexão contínua (<i>Continuum Bending-Type Gripper</i>)
CTG	Garra de torção contínua (<i>Continuum Twisting-Type Gripper</i>)
DEA	Atuador elastomérico dielétrico (<i>Dielectric Elastomer Actuator</i>)
DIW	Escrita direta de tinta (<i>Direct Ink Writing</i>)
DLP	Processamento digital de luz (<i>Digital Light Processing</i>)
DP	Desvio-padrão
ESP32	Microcontrolador de 32 bits da família ESP32
FA	Fabrico aditivo
FDM	Modelação por deposição fundida (<i>Fused Deposition Modeling</i>)
FEA	Análise por elementos finitos (<i>Finite Element Analysis</i>)
FEM	Método dos elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FSR	Sensor resistivo de força (<i>Force Sensing Resistor</i>)
GPIO	Entrada/saída de uso geral (<i>General-Purpose Input/Output</i>)
GND	Referência elétrica de massa (<i>Ground</i>)
IA	Inteligência artificial
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado (<i>Integrated Development Environment</i>)
ID	Diâmetro interior (<i>Inner Diameter</i>)
IPMC	Compósito de polímero iônico e metal (<i>Ionic Polymer–Metal Composite</i>)

ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
NBG	Garra de flexão não contínua (<i>Non-Continuum Bending-Type Gripper</i>)
NEMA	Associação Nacional de Fabricantes Elétricos (<i>National Electrical Manufacturers Association</i>)
NEQIT	Número máximo de iterações de equilíbrio no solucionador do ANSYS
OD	Diâmetro exterior (<i>Outer Diameter</i>)
PETG	Polietileno tereftalato modificado com glicol
PLA	Ácido polilático
RD	Dinâmica de corpos rígidos (<i>Rigid Dynamics</i>)
RRM	Manipulador robótico rígido (<i>Rigid Robotic Manipulator</i>)
SLA	Estereolitografia (<i>Stereolithography</i>)
SLM	Fusão seletiva por laser (<i>Selective Laser Melting</i>)
SMA	Liga com memória de forma (<i>Shape Memory Alloy</i>)
SME	Efeito de memória de forma (<i>Shape Memory Effect</i>)
SMP	Polímero com memória de forma (<i>Shape Memory Polymer</i>)
TPE	Elastómero termoplástico
TPU	Poliuretano termoplástico

Símbolos latinos

Símbolo	Descrição	Unidade
$A(\theta)$	Região de contacto entre a garra e o objeto na orientação angular θ ; domínio da integração em área	—
A_{ref}	Área de referência obtida no modelo CAD e utilizada no cálculo da pressão média equivalente	m ²
A_0	Área inicial da secção útil dos provetes de silicone	m ²
$CV(\theta)$	Coeficiente de variação da força resultante na posição angular θ	%
D	Diâmetro do objeto cilíndrico	m

Símbolo	Descrição	Unidade
b_0	Largura inicial da zona útil dos provetes de silicone	m
F_i	Força estimada a partir da leitura do sensor i	N
$F_{S1}(\theta)$	Força transmitida ao Sensor 1 na orientação angular θ	N
$F_{S2}(\theta)$	Força transmitida ao Sensor 2 na orientação angular θ	N
$F_{med}(\theta)$	Força resultante medida, definida como soma escalar das estimativas dos sensores na orientação θ	N
$\bar{F}(\theta)$	Média da força resultante das repetições na orientação angular θ	N
$F_j(\theta)$	Força resultante do ensaio j na orientação angular θ	N
F_{eq}	Força equivalente atribuída a cada junta no modelo <i>Rigid Dynamics</i>	N
d_i	Braço perpendicular entre a linha de ação idealizada do cabo e a junta i	mm
M_i	Momento tursor equivalente aplicado à junta i	N · mm
L_0	Distância inicial entre marcas no provete de silicone, usada como comprimento de referência	m
m_i	Massa equivalente estimada para o sensor i	g
n	Número de repetições consideradas no tratamento estatístico	—
$p(\theta, s)$	Distribuição local de pressão de contacto na orientação θ e na coordenada espacial s	Pa
$p_{eq}(\theta)$	Pressão média equivalente calculada na orientação angular θ	Pa
R	Raio do objeto cilíndrico	m
R^2	Coeficiente de determinação da regressão	—
r_s, r_{spool}	Raio efetivo da polia de enrolamento do cabo	m
S_i	Sinal ADC usado na conversão do sensor i (após tara no código de aquisição)	—
S_1, S_2	Sinais ADC usados nas curvas dos Sensores 1 e 2; convenção descrita na metodologia	—

Símbolo	Descrição	Unidade
s	Coordenada espacial local na região de contacto	m
$s_F(\theta)$	Desvio-padrão amostral da força resultante na orientação angular θ	N
t_0	Espessura média inicial da zona útil dos provetes de silicone	m

Símbolos gregos e operadores

Símbolo	Descrição	Unidade
θ	Posição ou orientação angular do objeto instrumentado	rad ou °
$\Delta\theta$	Incremento angular entre vértebras ou entre posições de medição, conforme o contexto	rad ou °
ΔL	Deslocamento linear imposto ao cabo ou deslocamento registado no ensaio de tração, conforme o contexto	m
ε	Deformação nominal dos provetes de silicone	—
$\Delta\varphi$	Rotação angular da polia	rad
τ_{motor}	Binário nominal do motor de atuação	N · m
σ	Tensão nominal nos provetes de silicone	Pa
$k_{\theta,i}$	Rigidez torsional equivalente da junta i no modelo <i>Rigid Dynamics</i>	N · mm/°
$c_{\theta,i}$	Amortecimento torsional equivalente da junta i no modelo <i>Rigid Dynamics</i>	N · mm · s/°

ÍNDICE

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Problema de Investigação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Âmbito e Delimitações do Trabalho	4
1.5 Principais Contributos do Trabalho	5
1.6 Organização da Dissertação	6
2 Revisão Bibliográfica e Estado da Arte	9
2.1 Garras Robóticas – Conceitos e Classificação	9
2.1.1 Conceito e Função das Garras Robóticas	9
2.1.2 Estrutura	10
2.2 Inspiração	12
2.2.1 Inspiração em Animais	12
2.2.2 Garras Inspiradas em Plantas	14
2.3 Métodos de Atuação e Cinemática de Garras	16
2.3.1 Atuadores Pneumáticos	16
2.3.2 Sistemas Acionados por Cabos	19
2.3.3 Ligas e Polímeros com Memória de Forma (Atuadores SMA/SMP)	22
2.3.4 Outros Métodos de Atuação	26
2.4 Materiais e Técnicas de Fabrico	28
2.4.1 Materiais Aplicados a Garras Robóticas	28
2.4.2 Técnicas de Fabrico	29
2.5 Situação Atual	31
3 Metodologia Experimental e Numérica	33
3.1 Abordagem Metodológica	33
3.2 Contexto de Desenvolvimento e Delimitação do Trabalho	34
3.3 Objeto de Estudo: Atuador Flexível <i>SpiRobs</i>	35
3.4 Ferramentas, Equipamentos e Materiais	36

3.4.1	Ferramentas Computacionais	36
3.4.2	Equipamento de Fabrico Aditivo	37
3.4.3	Materiais Utilizados	38
3.5	Prototipagem e Fabrico Aditivo	39
3.6	Configuração da Simulação Numérica	40
3.6.1	Modelo Geométrico e Estratégia Incremental	40
3.6.2	Modelo de Material	40
3.6.3	Condições Fronteira, Atuação e Contactos	41
3.6.4	Malha e Controlo de Solução	42
3.6.5	Modelação do Cabo de Acionamento e Estratégia de Contacto	43
3.7	Modelação Multicorpo em <i>Rigid Dynamics</i>	46
3.7.1	Preparação Geométrica e Definição das Juntas	47
3.7.2	Momentos Torsores Equivalentes e Rampa de Atuação	47
3.7.3	Contactos, Limites Angulares e Parâmetros de Solução	49
3.8	Sistema Eletromecânico de Atuação	49
3.8.1	Microcontrolador e Driver do Motor	50
3.8.2	Polia, Suporte e Transmissão por Cabo	50
3.8.3	Interface de Comando	51
3.9	Sistema de Sensores e Calibração FSR	52
3.9.1	Circuito de Leitura e Aquisição Analógica	52
3.9.2	Procedimento de Calibração	54
3.9.3	Conversão para Força Resultante	55
3.10	Objeto Experimental Instrumentado e Transferência de Carga	56
3.10.1	Área de Referência e Pressão Média Equivalente	58
3.11	Procedimento Experimental de Mapeamento Circunferencial	60
3.11.1	Comparação entre Configurações e Deslocamentos	62
3.12	Desenvolvimento de uma Garra Pneumática em Silicone	63
3.12.1	Referência do Processo e Adaptações de Projeto	64
3.12.2	Silicone Utilizado e Preparação da Mistura	64
3.12.3	Moldagem dos Dedos Pneumáticos	66
3.12.4	Fabrico dos Componentes Rígidos e Integração Pneu- mática	69
3.12.5	Caracterização Mecânica Preliminar do Silicone	71
3.12.6	Geometria dos Provetes e do Molde	71
3.12.7	Fabrico e Moldagem dos Provetes	72
3.12.8	Ensaio de Tração e Tratamento dos Dados	74
3.12.9	Dados Experimentais para a Modelação FEA	76
3.12.10	Simulação do Dedo Pneumático	76

4	Resultados e Discussão	79
4.1	Fabrico Aditivo do Atuador Bio-inspirado (<i>SpiRobs</i>)	79
4.2	Comportamento Estrutural e Simulação Numérica (FEA)	82
4.2.1	Estudo Paramétrico: Modelo Base de 2 Elos	83
4.2.2	Escalonamento Geométrico: Modelo de 7 Elos	85
4.2.3	Limitações do Modelo Integral e Mitigação de Erros	88
4.2.4	Evolução para Modelos com Cabo de Acionamento	90
4.3	Modelação Multicorpo em <i>Rigid Dynamics</i>	98
4.3.1	Evolução Progressiva dos Modelos Multicorpo	99
4.3.2	Modelo Completo e Reprodução do Fecho Cinemático	99
4.3.3	Comparação entre FEA e <i>Rigid Dynamics</i>	101
4.4	Integração Eletromecânica e Verificação Experimental	102
4.4.1	Evolução da Arquitetura de Controlo: Do Curso Fixo ao Controlo Momentâneo	103
4.4.2	Desenho do Sistema de Transmissão e Ancoragem	103
4.4.3	Verificação da Cadeia de Aquisição e Calibração FSR	103
4.5	Resultados Experimentais do Mapeamento Circunferencial	104
4.5.1	Comparação entre Configurações Fabricadas	112
4.5.2	Influência do Deslocamento Nominal do Cabo	112
4.5.3	Repetibilidade e Interpretação da Pressão Média Equivalente	113
4.5.4	Consistência Angular dos Extremos entre Repetições	113
4.5.5	Extrapolação do Sensor 2 e Análise de Sensibilidade	114
4.6	Resultados de Fabrico e Verificação Funcional da Garra Pneumática em Silicone	116
4.6.1	Dedos Pneumáticos Moldados em Silicone	116
4.6.2	Provetes de Silicone para Caracterização do Material	119
4.6.3	Ensaio de Tração dos Provetes	121
4.6.4	Ajuste da Curva Experimental no ANSYS	124
4.6.5	Modelos Hiperelásticos Considerados	127
4.6.6	Simulação Numérica Preliminar do Dedo Pneumático em Silicone	130
5	Conclusão	137
5.1	Síntese do Trabalho Desenvolvido	137
5.2	Principais Conclusões	137
5.3	Limitações e Desafios do Trabalho	138
5.4	Trabalho Futuro	140
5.5	Considerações Finais	140

A	Dados de Calibração dos Sensores FSR	147
A.1	Dados preliminares do sensor circular FSR 400	148
A.2	Dados do Sensor 1 – FSR 406	149
A.3	Dados do Sensor 2 – FSR 406	150
A.4	Resíduos dos Ajustes de Calibração	151
B	Dados Experimentais do Mapeamento Circunferencial	155
B.1	20% — 105 mm: ensaio 1	156
B.2	20% — 105 mm: ensaio 2	158
B.3	20% — 105 mm: ensaio 3	160
B.4	20% — 105 mm: ensaio 4	162
B.5	20% — 115 mm: ensaio 1	164
B.6	20% — 115 mm: ensaio 2	166
B.7	20% — 115 mm: ensaio 3	168
B.8	20% — 115 mm: ensaio 4	170
B.9	100% — 105 mm: ensaio 1	172
B.10	100% — 105 mm: ensaio 2	174
B.11	100% — 105 mm: ensaio 3	176
B.12	100% — 105 mm: ensaio 4	178
B.13	100% — 115 mm: ensaio 1	180
B.14	100% — 115 mm: ensaio 2	182
B.15	100% — 115 mm: ensaio 3	184
B.16	100% — 115 mm: ensaio 4	186
C	Dados Complementares dos Ensaio <i>SpiRobs</i>	189
C.1	Posições do Sensor 2 Dentro do Limite Superior Calibrado . . .	192
C.2	Médias e Extremos por Repetição	192
D	Código Arduino Inicial para Aquisição Manual de Dados	195
E	Código Arduino para Comunicação com a Interface Python	201
F	Interface Python para Aquisição e Processamento dos Dados	209
G	Parâmetros Complementares da Simulação Numérica	219
H	Dados Complementares do Modelo <i>Rigid Dynamics</i>	223
H.1	Momentos torsores e rigidezes torsionais equivalentes	223
H.2	Rampa temporal de aplicação dos momentos	224
H.3	Tempos de solução dos modelos progressivos	225
I	Vista do Modelo CAD da Garra	227
J	Artigo Científico Publicado	229

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Modos de ação de garras NBG, CBG, CTG e RRM [11].	12
2.2	Exemplos de preensão bio-inspirada em animais [3], [12], [14], [15].	14
2.3	Exemplos de garras inspiradas em mecanismos vegetais [16], [18].	15
2.4	Princípio de funcionamento de um atuador pneumático [20]. . .	17
2.5	Configurações típicas de atuadores pneumáticos [19].	18
2.6	Fabrico de atuadores pneumáticos por moldagem [22].	19
2.7	Esquema de atuação por cabos [23].	20
2.8	Mão humanoide acionada por cabos [23].	21
2.9	Modelo UI Hand I acionado por tendões [24].	22
2.10	Modos de atuação com SMA [25].	24
2.11	Mecanismo de memória de forma em polímeros [31].	25
2.12	Garra impressa em 3D com polímero de memória de forma [32].	25
3.1	Fluxograma da metodologia adotada.	34
3.2	Garra <i>SpiRobs</i> : (a) modelo CAD; (b) exemplar fabricado em TPU; (c) detalhes das vértebras e zonas de flexão. A mão fornece apenas uma referência visual de dimensão.	37
3.3	Discretizações do modelo de dois elos: (a) malha inicial; (b) malha com refinamento localizado nas zonas de flexão.	42
3.4	Definição das juntas revolutas no modelo <i>Rigid Dynamics</i>	47
3.5	Configuração do modelo <i>Rigid Dynamics</i>	49
3.6	Esquema elétrico dos sensores FSR.	53
3.7	Processo de calibração dos sensores FSR.	54
3.8	Objeto cilíndrico instrumentado: montagem e componentes. . .	57
3.9	Esquema conceptual da transmissão de carga para o FSR. . . .	58
3.10	Estimativa CAD da área de referência.	59
3.11	Contacto entre a garra e o objeto instrumentado.	60
3.12	Referência de zero e sequência do mapeamento circunferencial.	61
3.13	Silicone utilizado na garra pneumática.	65
3.14	Pesagem dos componentes do silicone.	65
3.15	Sistema simples de pressão reduzida.	66

3.16	Componentes do molde dos dedos pneumáticos.	67
3.17	Primeira fase da moldagem dos dedos.	67
3.18	Segunda fase da moldagem dos dedos.	68
3.19	Moldagem e desmoldagem dos dedos pneumáticos.	68
3.20	Impressão dos encaixes rígidos.	69
3.21	Dedo pneumático montado no suporte.	70
3.22	Geometria CAD do provete baseado na ISO 37.	72
3.23	Modelo CAD do molde dos provetes de silicone.	72
3.24	Molde aberto e detalhe do escape de ar.	73
3.25	Molde fechado durante a cura, visível sob o conjunto de carga com bloco de betão.	74
4.1	Anomalias observadas na impressão de TPU.	80
4.2	Comparação da deposição entre diferentes TPU.	81
4.3	Protótipo final da garra <i>SpiRobs</i>	81
4.4	Pesagem dos protótipos <i>SpiRobs</i>	82
4.5	Esquema do projeto no ANSYS.	83
4.6	Configuração do modelo numérico de dois elos.	84
4.7	Comparação dos resultados com diferentes malhas.	85
4.8	Deslocamento total no modelo de sete elos e ampliação da legenda original. O valor de 186,5 mm no texto corresponde ao máximo arredondado.	86
4.9	Deformação elástica equivalente no modelo de sete elos.	87
4.10	Tensões de von Mises no modelo de sete elos.	88
4.11	Melhor iteração obtida no modelo integral.	89
4.12	Modelo FEA com cinco vértebras e cabo.	92
4.13	Definição manual dos contactos cabo-furo.	92
4.14	Controlos locais de malha no modelo com cabo.	93
4.15	Detalhe da malha na zona cabo-furo.	94
4.16	Deformação total no modelo com cinco vértebras.	95
4.17	Pressão local de contacto numérica no modelo com cinco vérte- bras.	95
4.18	Penetração de contacto no modelo com cinco vértebras.	96
4.19	Distância de deslizamento no contacto cabo-furo.	96
4.20	Histórico dos tempos de simulação no ANSYS.	97
4.21	Modelos progressivos em <i>Rigid Dynamics</i>	99
4.22	Modelo <i>Rigid Dynamics</i> em configuração aberta.	100
4.23	Fecho do modelo <i>Rigid Dynamics</i>	100
4.24	Força circunferencial para 20% e 105 mm.	106

4.25	Força circunferencial para 20% e 115 mm.	107
4.26	Força circunferencial para 100% e 105 mm.	108
4.27	Força circunferencial para 100% e 115 mm.	109
4.28	Força média para 20% e 105 mm.	110
4.29	Força média para 20% e 115 mm.	110
4.30	Força média para 100% e 105 mm.	111
4.31	Força média para 100% e 115 mm.	111
4.32	Garra pneumática montada.	117
4.33	Montagem da garra no robô.	118
4.34	Garra pneumática no robô.	118
4.35	Provetes de silicone com bolhas após desmoldagem.	120
4.36	Ensaio de tração de um provete de silicone.	122
4.37	Curva força–deslocamento do provete selecionado.	123
4.38	Curva tensão–deformação do provete selecionado.	124
4.39	Ajuste da curva experimental do silicone no ANSYS.	126
4.40	Fixação da base do dedo.	131
4.41	Contactos entre paredes do dedo.	131
4.42	Malha do dedo pneumático.	132
4.43	Deslocamento da ponta em função da pressão.	133
4.44	Diferença relativa de deslocamento entre modelos.	134
4.45	Deformação equivalente máxima em função da pressão.	135
4.46	Forma deformada no modelo Yeoh 2. ^a ordem.	135
4.47	Forma deformada no modelo Neo-Hookean.	135
4.48	Instabilidade numérica no modelo Mooney–Rivlin.	136
A.1	Resíduos dos polinómios publicados nos pontos de calibração. As escalas verticais são diferentes para permitir observar cada sensor; um resíduo positivo significa massa conhecida superior à estimada.	153
I.1	Vista do modelo CAD utilizado para a garra baseada na ar- quitetura <i>SpiRobs</i> de Wang et al. [6], sem escala dimensional indicada e sem cotas.	227

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Comparação qualitativa entre diferentes tipos de garras	11
2.2	Comparação dos principais métodos de atuação em garras bio- inspiradas	27
2.3	Processos de fabrico associados aos materiais considerados .	30
3.1	Parâmetros principais de impressão dos protótipos em TPU 95A.	39
3.2	Configurações de malha documentadas para o modelo de dois elos.	42
3.3	Definições numéricas adotadas no modelo corrigido com cinco vértebras e cabo quadrado.	45
3.4	Aplicação progressiva do deslocamento no cabo através de <i>Tabular Data</i> para o modelo de cinco vértebras.	46
3.5	Parâmetros de fabrico e montagem da garra pneumática em silicone.	70
4.1	Evolução dos principais resultados obtidos nos ensaios prelimi- nares com cabo circular e modelo reduzido.	90
4.2	Comparação qualitativa entre as duas estratégias geométricas utilizadas para representar o cabo e os furos no modelo numérico.	91
4.3	Resultados principais da solução convergente com cinco vérte- bras e deslocamento de 20 mm aplicado ao cabo.	94
4.4	Tempos de solução registados no ANSYS.	97
4.5	Comparação entre as abordagens FEA e <i>Rigid Dynamics</i> utiliza- das no estudo da garra <i>SpiRobs</i>	101
4.6	Tempos registados nos modelos FEA e <i>Rigid Dynamics</i>	102
4.7	Síntese das quatro condições: estimativas condicionadas pela extrapolação do Sensor 2. Os extremos referem-se ao perfil médio das quatro repetições.	105
4.8	Variações descritivas entre condições. As percentagens da força média e da pressão média equivalente coincidem; as estimativas dependem da extrapolação do Sensor 2.	112

4.9	Ângulos dos extremos por varrimento, pela ordem das repetições 1 a 4. O arco é a menor amplitude circular que contém os quatro ângulos.	113
4.10	Extensão da extrapolação superior do Sensor 2, com quatro repetições de 72 posições por condição.	114
4.11	Força média global [N] nos cenários de variação da contribuição extrapolada do Sensor 2.	115
4.12	Variação relativa da força média [%] nos cenários extremos e de referência. Cada linha usa a mesma condição de referência da Tabela 4.8.	115
4.13	Síntese dos resultados qualitativos obtidos no desenvolvimento da garra pneumática em silicone.	119
4.14	Evolução iterativa do processo de moldagem dos provetes de silicone.	121
4.15	Indicadores principais do provete selecionado para referência experimental.	123
4.16	Coeficientes e resíduos dos ajustes hiperelásticos.	127
4.17	Função das configurações hiperelásticas testadas na simulação do dedo.	132
4.18	Comparação do deslocamento da ponta entre os modelos Yeoh de segunda ordem e Neo-Hookean.	133
4.19	Comparação da deformação elástica equivalente máxima entre os modelos Yeoh de segunda ordem e Neo-Hookean.	134
5.1	Síntese dos desafios e do alcance das soluções adotadas. . . .	139
A.1	Valores experimentais obtidos durante a calibração preliminar do sensor circular FSR 400.	148
A.2	Valores experimentais obtidos durante a calibração do Sensor 1, correspondente a um sensor quadrado FSR 406.	149
A.3	Valores experimentais obtidos durante a calibração do Sensor 2, correspondente a um sensor quadrado FSR 406.	150
A.4	Indicadores dos resíduos nos pontos de calibração publicados.	151
A.5	Resíduos individuais das calibrações, calculados sem alterar os pontos originais.	151
B.1	Dados completos — 20%, 105 mm, ensaio 1	156
B.2	Dados completos — 20%, 105 mm, ensaio 2	158
B.3	Dados completos — 20%, 105 mm, ensaio 3	160
B.4	Dados completos — 20%, 105 mm, ensaio 4	162

B.5	Dados completos — 20%, 115 mm, ensaio 1	164
B.6	Dados completos — 20%, 115 mm, ensaio 2	166
B.7	Dados completos — 20%, 115 mm, ensaio 3	168
B.8	Dados completos — 20%, 115 mm, ensaio 4	170
B.9	Dados completos — 100%, 105 mm, ensaio 1	172
B.10	Dados completos — 100%, 105 mm, ensaio 2	174
B.11	Dados completos — 100%, 105 mm, ensaio 3	176
B.12	Dados completos — 100%, 105 mm, ensaio 4	178
B.13	Dados completos — 100%, 115 mm, ensaio 1	180
B.14	Dados completos — 100%, 115 mm, ensaio 2	182
B.15	Dados completos — 100%, 115 mm, ensaio 3	184
B.16	Dados completos — 100%, 115 mm, ensaio 4	186
C.1	Síntese dos indicadores globais utilizados na comparação das quatro condições experimentais da garra <i>SpiRobs</i>	189
C.2	Perfil médio por ângulo para as quatro condições experimentais, de 0° a 175°.	190
C.3	Perfil médio por ângulo para as quatro condições experimentais, de 180° a 355°.	191
C.4	Consulta das posições que não ultrapassam o limite de calibra- ção superior do Sensor 2.	192
C.5	Médias por varrimento e desvio-padrão amostral entre as quatro médias, em newtons.	193
C.6	Extremos da força resultante medida em cada repetição. Os valores mantêm a precisão dos registos tabulados.	193
G.1	Parâmetros principais de refinamento local utilizados no modelo de cinco vértebras com cabo.	219
G.2	Definições principais utilizadas no modelo de cinco vértebras com cabo.	220
G.3	Tempos de solução registados no histórico de simulações do ANSYS.	220
H.1	Momentos torsores e rigidezes torsionais equivalentes aplicados às 18 juntas do modelo <i>Rigid Dynamics</i>	224
H.2	Rampa temporal de referência utilizada para aplicar os momen- tos torsores equivalentes.	224
H.3	Tempos registados para os modelos progressivos em FEA e <i>Rigid Dynamics</i>	225

Capítulo 1

Introdução

1.1. Enquadramento

A robótica tem vindo a assumir um papel crescente em contextos industriais, domésticos, biomédicos e agrícolas, acompanhando a necessidade de sistemas capazes de interagir com ambientes menos estruturados e de manipular objetos com propriedades geométricas e mecânicas distintas. Neste contexto, a garra robótica constitui a interface física entre o manipulador e o objeto, influenciando diretamente a estabilidade da preensão, a capacidade de adaptação geométrica e a segurança da interação [1], [2].

As garras convencionais, geralmente constituídas por elos rígidos e articulações bem definidas, oferecem elevada precisão e repetibilidade quando a geometria e a posição dos objetos são conhecidas. Contudo, estas soluções podem apresentar limitações na manipulação de objetos frágeis, deformáveis ou geometricamente irregulares, uma vez que pequenas variações de posição podem originar concentrações locais de carga. As garras macias e bio-inspiradas procuram reduzir estas limitações através da utilização de estruturas flexíveis, capazes de se conformar passivamente à superfície do objeto e de distribuir o contacto por regiões mais extensas [2], [3], [4].

A inspiração biológica permite explorar estratégias de manipulação observadas em mãos, tentáculos, caudas e estruturas vegetais responsivas. Estas arquiteturas aproveitam princípios funcionais como flexibilidade distribuída, adaptação geométrica e envolvimento progressivo. Nos sistemas acionados por cabos, o motor pode ser colocado afastado da região de contacto, transmitindo o movimento através de um elemento leve e flexível. A resposta depende, contudo, da deformação estrutural, do encaminhamento do cabo e do atrito nos canais internos [5].

A arquitetura *SpiRobs*, proposta por Wang et al. [6], constitui um exemplo de estrutura flexível inspirada numa espiral logarítmica. A geometria segmentada e a variação das zonas de flexão permitem que a estrutura se curve progressivamente

e envolva objetos com diferentes dimensões. Na configuração estudada nesta dissertação, a garra é fabricada como um corpo contínuo em poliuretano termoplástico (TPU) e acionada por um cabo que percorre canais excêntricos ao longo das vértebras. A tração do cabo gera momentos de flexão distribuídos, provocando o fecho progressivo da garra em torno do objeto.

O fabrico aditivo, particularmente por modelação por deposição fundida (FDM), facilita o desenvolvimento deste tipo de estrutura, permitindo produzir geometrias complexas, canais internos e regiões de flexão numa única peça, com custos reduzidos e ciclos de alteração relativamente rápidos [7], [8]. Contudo, a resposta de componentes flexíveis impressos em 3D depende não apenas da geometria, mas também do material, percentagem e padrão de preenchimento, orientação das camadas, condições de impressão e qualidade das zonas de ligação. Estas variáveis dificultam a previsão rigorosa do comportamento da garra e tornam necessária a combinação entre ensaios experimentais e métodos de modelação.

A análise por elementos finitos (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*) permite estudar deformações, tensões e contactos. A representação de uma estrutura flexível com grandes rotações, cabo deslizante e múltiplos contactos exige, porém, modelos constitutivos adequados e estratégias de solução robustas. As dificuldades de convergência e o custo de cálculo justificam uma abordagem progressiva, apoiada por medições experimentais para futura comparação quantitativa.

A presente dissertação centra-se, assim, no desenvolvimento e caracterização de uma garra flexível *SpiRobs*, fabricada em TPU e acionada por cabo. O trabalho integra o fabrico de protótipos com 20% e 100% de preenchimento, o desenvolvimento do sistema eletromecânico de atuação, a construção de um objeto cilíndrico instrumentado com sensores resistivos de força (FSR), a realização de mapeamentos circunferenciais da força resultante e da pressão média equivalente para deslocamentos de cabo de 105 mm e 115 mm, e o desenvolvimento progressivo de modelos numéricos de apoio à interpretação do comportamento da garra.

O trabalho incluiu também uma garra pneumática com dedos moldados em silicone, explorando uma estratégia de atuação distinta. O fabrico foi acompanhado por uma caracterização mecânica preliminar do silicone, com provetes de tração baseados na ISO 37, e por modelação do dedo pressurizado.

1.2. Motivação e Problema de Investigação

A motivação central deste trabalho resulta da dificuldade em relacionar o comando do atuador com a carga transmitida ao objeto. A rotação do motor enrola o cabo,

deforma a estrutura e estabelece contacto com o objeto. Folgas, atrito, alinhamento e deformação do TPU condicionam esta sequência, pelo que a força aplicada não pode ser inferida de forma rigorosa apenas a partir da posição do motor.

O contacto também não é necessariamente uniforme: diferentes vértebras podem contactar o cilindro com orientações, áreas efetivas e braços de alavanca distintos. Para objetos frágeis, importa compreender esta variação, pois uma força total moderada pode coexistir com concentrações locais de carga.

A medição de um campo completo de pressão exigiria instrumentação distribuída na interface. Neste trabalho, o cilindro com dois sensores FSR funciona como uma sonda angular: a sua rotação no interior da garra fechada permite caracterizar a variação circunferencial da força resultante e de um indicador normalizado de pressão. O alcance desta medição e as suas limitações são delimitados na Secção 1.4.

A questão de investigação que orienta o trabalho pode ser formulada da seguinte forma:

De que forma pode ser caracterizada, por uma metodologia experimental acessível e apoiada por modelação numérica, a variação circunferencial da força resultante e da pressão média equivalente geradas por uma garra flexível SpiRobs acionada por cabo?

A resposta combina o mapeamento experimental da resposta em torno do objeto com modelos numéricos progressivos de deformação e contacto.

1.3. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste em desenvolver e caracterizar uma garra robótica flexível bio-inspirada, baseada na arquitetura *SpiRobs* e acionada por cabo, com particular incidência na avaliação experimental da variação circunferencial da força resultante e da pressão média equivalente durante a preensão de um objeto cilíndrico.

Para concretizar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar o estado da arte relativo a garras robóticas rígidas, macias e bio-inspiradas, aos respetivos métodos de atuação, materiais e processos de fabrico;
2. Adaptar, fabricar e avaliar protótipos da garra *SpiRobs* em TPU através de impressão 3D por FDM;

3. Desenvolver um sistema eletromecânico de atuação por cabo, baseado num motor de passo, polia de enrolamento, microcontrolador ESP32 e interface de controlo;
4. Selecionar e calibrar individualmente sensores FSR, estabelecendo relações empíricas entre leitura ADC, massa equivalente e força;
5. Desenvolver um objeto cilíndrico instrumentado capaz de transmitir a carga exterior para superfícies internas planas de medição e permitir o alinhamento angular durante os ensaios;
6. Implementar um protocolo de mapeamento circunferencial em incrementos de 5° , mantendo constante a condição nominal de atuação durante cada varrimento completo;
7. Realizar ensaios repetidos, analisar a força resultante e a pressão média equivalente em função da posição angular e avaliar a variabilidade entre repetições;
8. Comparar experimentalmente duas configurações fabricadas com 20% e 100% de preenchimento, reconhecendo diferenças adicionais de processamento, e avaliar a influência do deslocamento imposto ao cabo, considerando as condições de 105 mm e 115 mm;
9. Desenvolver modelos numéricos progressivos em ANSYS Mechanical, incluindo uma abordagem FEA com grandes deformações, contactos e representação explícita do cabo de atuação, e uma abordagem complementar em *Rigid Dynamics* para estudar a cinemática global de fecho;
10. Documentar o fabrico inicial de uma garra pneumática modular com dedos em silicone, desenvolver e aplicar uma metodologia preliminar de caracterização mecânica do silicone com provetes baseados na ISO 37, ajustar modelos hiperelásticos no ANSYS e realizar uma primeira simulação numérica do dedo pneumático;

1.4. Âmbito e Delimitações do Trabalho

O estudo principal incide em dois exemplares *SpiRobs* impressos em TPU, um por configuração de fabrico, e acionados por cabo de nylon. A caracterização experimental utiliza um objeto cilíndrico com 50 mm de diâmetro exterior e dois sensores FSR 406. A rotação manual do objeto permite adquirir valores em 72 posições angulares ao longo de 360° . As quatro repetições por condição avaliam

a repetibilidade do procedimento nos exemplares disponíveis, sem demonstrar reprodutibilidade entre exemplares fabricados nas mesmas condições.

Cada sensor regista a força resultante transmitida pela casca rígida do objeto para uma superfície interna plana. A pressão média equivalente resulta da normalização dessa força por uma área de referência constante obtida no modelo CAD; não corresponde à pressão local real na interface. A comparação entre condições é ainda condicionada pela extrapolação da calibração do Sensor 2 para leituras superiores à gama experimentalmente calibrada. Os indicadores obtidos devem, por isso, ser interpretados como estimativas comparativas sujeitas às limitações da cadeia de medição.

A condição de atuação é definida pelo deslocamento nominal do cabo e pela manutenção da posição do motor durante cada varrimento. A tensão no cabo não foi medida diretamente. Os resultados caracterizam, assim, a resposta aos deslocamentos utilizados, sem estabelecer uma relação experimental entre tensão no cabo e carga transmitida ao objeto. A comparação entre 20% e 100% refere-se às duas configurações fabricadas, com diferenças adicionais de processamento, e não ao efeito isolado do preenchimento.

Os modelos FEA evoluem de geometrias reduzidas para conjuntos com mais vértebras e cabo explícito. As simplificações geométricas e constitutivas permitem estudar convergência e tendências de deformação, mas limitam a sua interpretação quantitativa. O modelo multicorpo em *Rigid Dynamics* representa as vértebras como corpos rígidos ligados por juntas revolutas, permitindo estudar o fecho global com menor custo de cálculo. Esta abordagem cinemática não fornece as tensões ou deformações locais calculadas por FEA; ambas exigem comparação experimental antes de serem utilizadas como previsões quantitativamente validadas.

Na garra pneumática, documentam-se o fabrico, a montagem e a verificação funcional qualitativa. Não foram realizados ensaios controlados de pressão, curvatura e força do dedo pressurizado. A curva selecionada de um ensaio de tração do silicone foi utilizada no ajuste hiperelástico e numa primeira simulação FEA. Esta caracterização preliminar, com provetes baseados na ISO 37, não constitui uma validação constitutiva completa nem uma validação experimental do atuador.

1.5. Principais Contributos do Trabalho

Os contributos científicos e metodológicos concentram-se na caracterização experimental da interação garra–objeto:

1. Conceção de uma sonda cilíndrica externa instrumentada e de um protocolo de rotação para caracterizar a assinatura circunferencial da força resultante e da pressão média equivalente;
2. Comparação das respostas de duas configurações fabricadas *SpiRobs* e de dois deslocamentos nominais do cabo, com avaliação da repetibilidade nos exemplares ensaiados e explicitação das limitações da calibração;
3. Análise exploratória da deformação, dos contactos e da cinemática de fecho através de modelos progressivos em FEA e *Rigid Dynamics*, identificando as simplificações e dificuldades que condicionam a futura validação quantitativa.

Estes contributos foram suportados por tarefas de implementação: adaptação e fabrico dos protótipos, integração do motor, polia e ESP32, calibração dos sensores FSR e desenvolvimento da interface Python de aquisição. A bancada e o software constituem a infraestrutura experimental que permite aplicar e documentar a metodologia.

A linha pneumática acrescentou o fabrico de dedos e suporte modular, uma caracterização preliminar do silicone e o ajuste de modelos hiperelásticos para uma primeira simulação do dedo. A arquitetura *SpiRobs* é adotada da literatura; o trabalho não reivindica a criação dessa arquitetura.

A metodologia de caracterização desenvolvida na campanha inicial deu origem ao artigo científico publicado *Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation* [9], reproduzido no Apêndice J. A dissertação apresenta o desenvolvimento e as limitações do estudo, incluindo a comparação posterior das quatro condições experimentais.

1.6. Organização da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos principais, seguidos das referências bibliográficas e dos apêndices.

O Capítulo 1 apresenta o enquadramento do tema, a motivação, o problema de investigação, os objetivos, o âmbito do trabalho e os principais contributos.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica sobre classificação, inspiração biológica, atuação, materiais e técnicas de fabrico, situando o trabalho face à arquitetura *SpiRobs* de referência.

O Capítulo 3 descreve o fabrico dos protótipos, a instrumentação, a calibração e o protocolo experimental, bem como a configuração dos modelos FEA e *Rigid*

Dynamics. Inclui também o desenvolvimento da garra pneumática e a caracterização preliminar do silicone.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados de fabrico, modelação e mapeamento circunferencial, com atenção à repetibilidade e às limitações da medição. Apresenta ainda os resultados dos ensaios do silicone, do ajuste hiperelástico e da simulação do dedo pneumático.

O Capítulo 5 responde à questão de investigação, sintetiza o cumprimento dos objetivos e as limitações decisivas e apresenta propostas de desenvolvimento futuro.

Os apêndices apresentam os dados de calibração, as tabelas completas dos ensaios experimentais, os códigos utilizados no ESP32 e na interface Python, bem como informação complementar sobre os modelos numéricos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica e Estado da Arte

As garras robóticas constituem o principal meio de interação física entre um robô e o ambiente, sendo responsáveis pela capacidade de agarrar, manipular e posicionar objetos de forma segura e eficiente. A compreensão dos seus princípios estruturais e funcionais é essencial para o desenvolvimento de sistemas de preensão adaptativos e bio-inspirados.

Esta secção apresenta os conceitos fundamentais associados às garras robóticas, analisando as metodologias de classificação mais utilizadas na literatura e destacando as suas limitações face à crescente diversidade de arquiteturas emergentes.

2.1. Garras Robóticas – Conceitos e Classificação

2.1.1. Conceito e Função das Garras Robóticas

Segundo [10], a garra constitui o elemento terminal do robô que estabelece a interação física com o objeto. Por ser diretamente responsável pela preensão e manipulação, representa um componente crítico no desenvolvimento e na operação do sistema robótico.

Atualmente, não existe uma normalização consensual que defina critérios universais para classificar garras robóticas. As classificações tradicionais, baseadas no número de dedos e de graus de liberdade, no tipo de atuação ou no mecanismo cinemático, mostram-se limitadas para descrever estruturas flexíveis e contínuas, características da robótica macia e bio-inspirada. Neste contexto, [11] propõem uma divisão baseada na continuidade estrutural e no modo de deformação durante a preensão. Paralelamente, grande parte da literatura continua a agrupar as garras segundo a sua inspiração biológica, refletindo a tendência multidisciplinar de transpor soluções naturais para sistemas robóticos artificiais.

2.1.2. Estrutura

A classificação proposta por [11] distingue três tipos estruturais: garras de flexão não contínua (*Non-Continuum Bending-Type Grippers*, NBG), garras de flexão contínua (*Continuum Bending-Type Grippers*, CBG) e garras de torção contínua (*Continuum Twisting-Type Grippers*, CTG). Esta abordagem permite diferenciar estruturas rígidas articuladas de estruturas contínuas e deformáveis, alinhadas com os princípios da robótica macia. Seguidamente, descrevem-se os três tipos de garras.

Garras de flexão não contínua (NBG). As garras do tipo NBG são estruturas rígidas e discretamente articuladas, compostas por elos sólidos ligados através de juntas mecânicas ou mecanismos rotativos que permitem a adaptação ao objeto e o movimento de flexão. Apresentam pontos de dobragem definidos, semelhantes às articulações dos dedos humanos [11], e podem ser acionadas por mecanismos pneumáticos, tendões ou ligas com memória de forma. São particularmente eficazes em tarefas que exigem força, estabilidade e repetibilidade, como operações de montagem, manipulação de ferramentas ou preensão de objetos de geometria regular [2], [11]. Embora apresentem elevada precisão, possuem adaptabilidade passiva limitada, pois dependem de mecanismos e sensores para ajustar a sua configuração ao objeto. Ainda assim, continuam a ser amplamente utilizadas em aplicações industriais devido à robustez estrutural e à facilidade de controlo cinemático.

Garras de flexão contínua (CBG). As CBG distinguem-se das anteriores por possuírem uma estrutura contínua e flexível, sem articulações discretas. O movimento de preensão é obtido através de deformações distribuídas ao longo do corpo da garra, geralmente produzidas por atuadores pneumáticos, hidráulicos, dielétricos ou por materiais elastoméricos inteligentes. Estas garras são frequentemente inspiradas em elementos naturais, como gavinhas, pétalas ou folhas que se curvam em resposta a estímulos externos, apresentando um comportamento de flexão gradual e adaptativo e um número teoricamente elevado de graus de liberdade. Apesar das vantagens em termos de flexibilidade e segurança, as CBG apresentam limitações no controlo preciso da trajetória, sendo o seu movimento fortemente dependente da pressão de atuação, das propriedades do material e da geometria. Ainda assim, apresentam características favoráveis para aplicações que exigem adaptação dinâmica e interação segura com seres humanos.

Garras de torção contínua (CTG). As garras CTG combinam flexão com rotação por torção distribuída ao longo do corpo, permitindo movimentos tridimensionais de enrolamento. São inspiradas em estruturas biológicas com capacidade de torção

e envolvimento, como os tentáculos de polvo [11]. A complexidade do movimento exige modelos não lineares e pode justificar sensores distribuídos para apoiar o controlo. Estas características têm motivado aplicações exploratórias em robótica biomédica e cirúrgica, associadas a materiais flexíveis e atuação pneumática [4].

Tabela 2.1. Comparação qualitativa entre diferentes tipos de garras

Tipo	Movimento	Inspiração biológica	Aplicações representativas
NBG	Dobramento discreto em articulações	Mão humana, pés de aves	Robôs humanoides, próteses e tarefas industriais
CBG	Dobramento contínuo e distribuído	<i>Drosera</i> , fetos e plantas trepadeiras	Manipulação delicada de alimentos, tecidos e objetos deformáveis
CTG	Flexão, torção e enrolamento contínuos em 3D	Tentáculos de polvo, tromba de elefante e gavinhas	Manipulação envolvente de cabos, tubos, plantas e objetos irregulares

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação exclusivamente qualitativa. A capacidade de carga não é usada como critério direto de comparação entre classes, porque depende fortemente da geometria, do material, das dimensões, do princípio de atuação e das condições de ensaio de cada solução. Assim, valores máximos reportados para protótipos específicos não devem ser generalizados como características típicas de toda uma categoria de garras.

Os modos de flexão discreta, flexão contínua e torção distribuída distinguem-se pela forma como o movimento se distribui ao longo da estrutura, conforme a comparação esquemática da Figura 2.1.

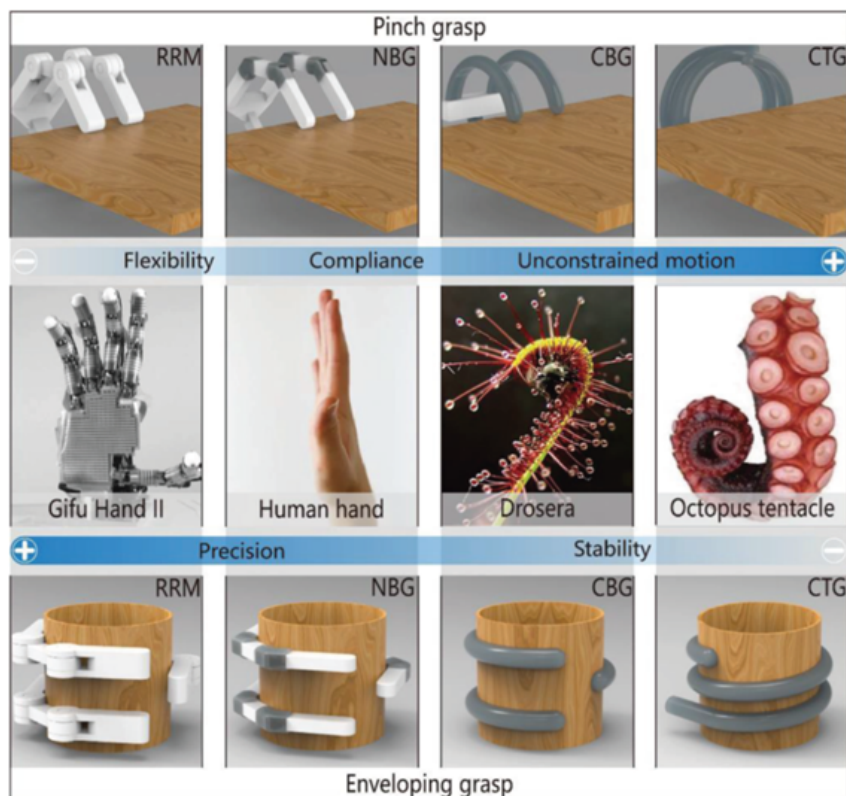


Figura 2.1. Modos de ação de garras NBG, CBG, CTG e RRM [11].

Em síntese, a classificação das garras em estruturas não contínuas, contínuas ou torsionais fornece um enquadramento útil para compreender diferentes abordagens construtivas. Contudo, estas categorias devem ser analisadas em conjunto com fatores como materiais, atuadores e inspiração biológica, que desempenham um papel determinante no desempenho funcional. Esta contextualização estabelece as bases teóricas necessárias para as secções seguintes, onde são explorados mecanismos biológicos e estratégias de atuação relevantes para o desenvolvimento da garra proposta nesta dissertação.

2.2. Inspiração

2.2.1. Inspiração em Animais

O estudo dos mecanismos de preensão presentes no reino animal constitui uma das fontes mais ricas de inspiração para o desenvolvimento de garras robóticas bio-inspiradas. Muitos animais apresentam estratégias de captura, locomoção e manipulação eficientes, capazes de combinar força, precisão e adaptabilidade com baixo consumo energético. Entre estes mecanismos incluem-se superfícies adesivas, estruturas enroláveis, geometrias aptas à preensão adaptativa e sistemas

musculares distribuídos, os quais têm sido amplamente explorados pela comunidade de robótica macia devido à sua eficiência biomecânica e funcional [1], [2].

Entre os exemplos estudados encontram-se animais arborícolas, como aves e pequenos primatas, cuja morfologia permite agarrar firmemente superfícies cilíndricas ou irregulares. Em aves que apresentam mecanismos de bloqueio tendinoso, a retenção dos ramos pode ser mantida com menor necessidade de esforço muscular contínuo. Este princípio inspirou garras robóticas capazes de reter objetos de forma passiva, reduzindo o consumo energético durante operações de transporte ou inspeção aérea [2].

Outro exemplo relevante é o dos tentáculos de polvo, cuja estrutura muscular hidrostática permite movimentos contínuos, flexíveis e adaptativos. Os tentáculos podem adaptar-se e envolver objetos com geometrias variadas, combinando preensão por envolvimento, sucção e fricção. Estes princípios naturais foram adaptados para o desenvolvimento de garras contínuas macias, utilizadas em contextos de manipulação delicada (alimentar, biomédica, laboratorial). Os exemplos incluem garras com segmentos modulares inspirados no braço do polvo e garras pneumáticas com câmaras múltiplas, capazes de executar movimentos peristálticos [1].

Outros organismos oferecem estratégias igualmente relevantes. Os geckos, por exemplo, utilizam microestruturas adesivas baseadas em forças de van der Waals [12], que lhes permitem aderir a superfícies lisas sem necessidade de adesivos químicos. Este mecanismo inspirou o desenvolvimento de garras com adesivos secos, capazes de manipular componentes frágeis, vidros e superfícies polidas com forças reduzidas. Estes sistemas têm sido explorados em aplicações industriais de elevada precisão, nomeadamente na manipulação de microeletrónica e dispositivos óticos.

Os peixes fornecem igualmente inspiração, sobretudo no design de garras baseadas no mecanismo Fin Ray [13], cuja estrutura interna permite deformação adaptativa quando o dedo é submetido a cargas externas. Este mecanismo, amplamente estudado no contexto de robótica e bioengenharia, permite que a garra se adapte ao contorno do objeto, distribuindo as forças de preensão e reduzindo o risco de dano. A sua utilização é favorecida pela simplicidade construtiva, pela compatibilidade com impressão 3D e pela capacidade de adaptação mecânica, tornando-o um conceito frequentemente utilizado no desenvolvimento de garras bio-inspiradas impressas em FDM [2], [8].

Por fim, estruturas com capacidade de enrolamento, como as observadas em serpentes e enguias, inspiraram o desenvolvimento de garras e manipuladores flexíveis capazes de envolver objetos alongados ou irregulares. Estes sistemas podem

oferecer um compromisso favorável entre flexibilidade, força e estabilidade, sendo relevantes em contextos biomédicos ou de inspeção em espaços confinados. Em contrapartida, apresentam elevada complexidade de modelação e controlo [1].

Em síntese, os mecanismos de preensão observados no reino animal — desde superfícies adesivas até estruturas musculares distribuídas ou geometrias de captura rápida — fornecem princípios funcionais que têm sido explorados no desenvolvimento de sistemas de robótica macia. A combinação de adaptabilidade, leveza, eficiência energética e potencial de fabrico por impressão 3D torna estes princípios relevantes para o desenvolvimento de garras robóticas bio-inspiradas.

A adaptação destes mecanismos a geometrias e materiais artificiais conduz a diferentes modos de retenção e envolvimento, como ilustram os exemplos reunidos na Figura 2.2.

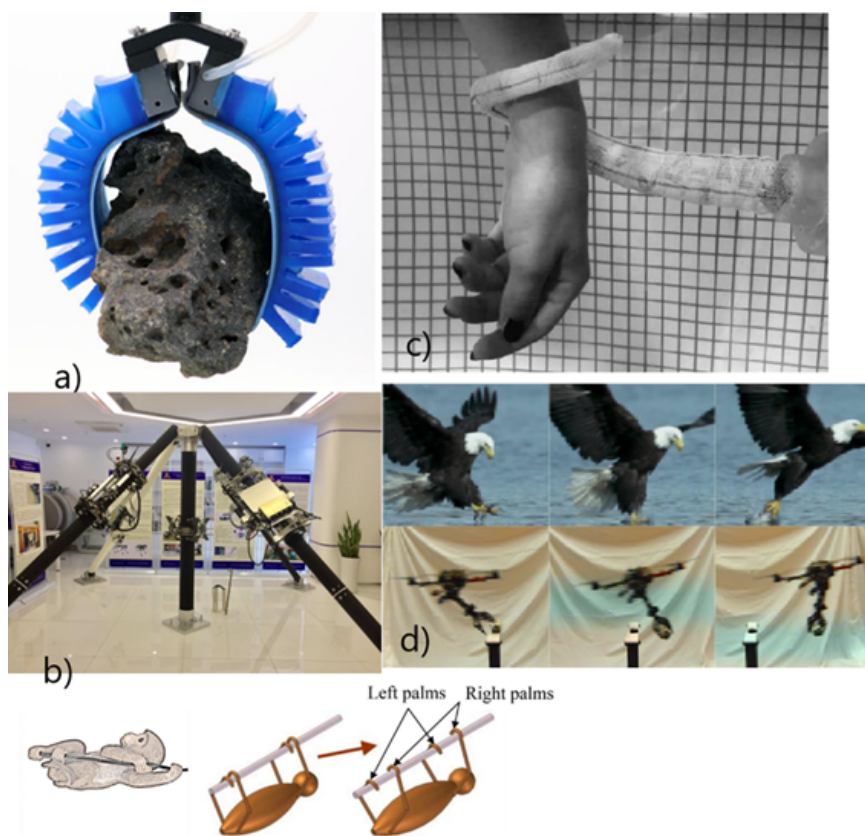


Figura 2.2. Exemplos de preensão bio-inspirada em animais [3], [12], [14], [15].

2.2.2. Garras Inspiradas em Plantas

O estudo dos mecanismos de movimento presentes nas plantas tem inspirado diversas soluções no campo da robótica macia, sobretudo no desenvolvimento de garras capazes de se deformar, fechar e adaptar a diferentes geometrias sem a necessidade de motores ou engrenagens complexas. As plantas realizam movi-

mentos através de processos passivos ou semi-ativos, baseados em variações de pressão celular, conteúdo de água, crescimento diferencial ou propriedades higroscópicas que respondem a estímulos ambientais, como humidade, temperatura ou luz. Estes princípios naturais foram adaptados pela engenharia para criar atuadores e garras bio-inspiradas que se destacam pela elevada conformabilidade e eficiência energética.

Um dos exemplos mais emblemáticos é o da *Mimosa pudica* e da *Dionaea muscipula* (conhecida como planta carnívora Venus flytrap) [16]. Estas plantas conseguem realizar movimentos de fecho extremamente rápidos quando estimuladas mecanicamente ou eletricamente, graças a um mecanismo biestável que armazena energia elástica e a liberta de forma súbita. Esse princípio foi transposto para a robótica através de atuadores hidráulicos ou pneumáticos, capazes de gerar movimentos semelhantes ao “fecho” da planta.

Outro grupo de plantas frequentemente estudado inclui as pinhas e as vagens leguminosas, cujo movimento é controlado pela higroscopicidade — a capacidade das suas fibras se expandirem ou contraírem conforme a variação da humidade. Este comportamento inspirou o desenvolvimento de atuadores higroscópicos, construídos a partir de materiais sensíveis à humidade (como compósitos de celulose ou polímeros biológicos), que alteram a sua forma quando expostos ao ar húmido [17].

Na robótica, estes princípios são concretizados através de materiais e geometrias que transformam um estímulo em deformação útil para agarrar o objeto; a Figura 2.3 reúne exemplos dessa adaptação.

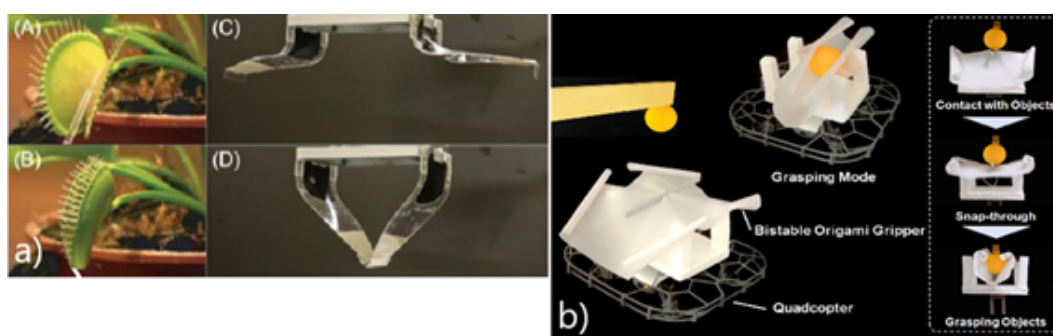


Figura 2.3. Exemplos de garras inspiradas em mecanismos vegetais [16], [18].

Em síntese, os princípios de movimento observados nas plantas — baseados em variação de pressão, absorção de humidade ou deformações estruturais — constituem soluções eficientes para o desenvolvimento de garras robóticas leves, silenciosas e adaptativas. Estas abordagens destacam-se pela simplicidade construtiva e pela segurança no contacto com objetos frágeis. Contudo, apesar da diversidade de mecanismos bio-inspirados identificados na literatura, muitos destes conceitos ainda carecem de integração otimizada com técnicas modernas de fabrico, atuadores

e requisitos estruturais, reforçando a necessidade de investigação adicional no desenvolvimento de garras bio-inspiradas funcionais e compatíveis com FA.

2.3. Métodos de Atuação e Cinemática de Garras

Os métodos de atuação determinam a forma como a energia é convertida em movimento mecânico no interior de uma garra robótica. A escolha do atuador influencia parâmetros essenciais como força de preensão, velocidade, precisão, rigidez e segurança funcional. Esta secção analisa os principais tipos de atuadores utilizados em robótica macia — pneumáticos, por cabos, e materiais inteligentes — destacando as suas características, limitações e aplicações mais relevantes.

2.3.1. Atuadores Pneumáticos

Os atuadores pneumáticos são utilizados em aplicações que exigem conformabilidade, como a manipulação de alimentos, tecidos biológicos ou componentes frágeis. A sua estrutura deformável facilita a adaptação ao objeto, embora a força, a velocidade e a segurança da interação dependam da geometria, da pressão aplicada e do sistema de alimentação e controlo [19], [20].

O funcionamento assenta na introdução de ar pressurizado em câmaras internas de um corpo elastomérico. A pressão exerce uma carga sobre as paredes e provoca a sua deformação. Quando a geometria ou a distribuição de rigidez restringe a expansão de uma região relativamente à outra, o alongamento diferencial produz a curvatura do atuador, conforme o princípio ilustrado na Figura 2.4. Assim, a flexão resulta da combinação entre pressurização, propriedades do material e assimetria estrutural, e não apenas do aumento de pressão [20].

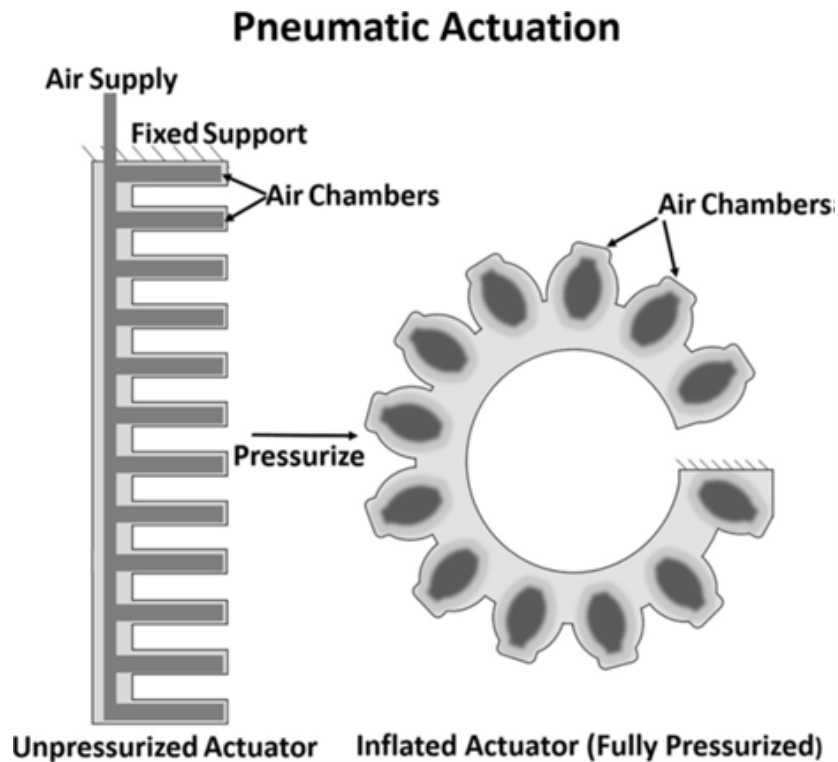


Figura 2.4. Princípio de funcionamento de um atuador pneumático [20].

A flexibilidade e a baixa rigidez podem reduzir concentrações de carga no objeto, favorecendo a manipulação delicada. Estas vantagens coexistem com a necessidade de compressores ou bombas, válvulas e tubagens. A compressibilidade do ar e o caudal disponível também condicionam a resposta dinâmica e o controlo, pelo que a adequação do atuador deve ser avaliada para cada aplicação [19].

A disposição das câmaras e das regiões que limitam a expansão permite obter diferentes formas de deformação; as configurações da Figura 2.5 exemplificam essa relação entre arquitetura interna e movimento.

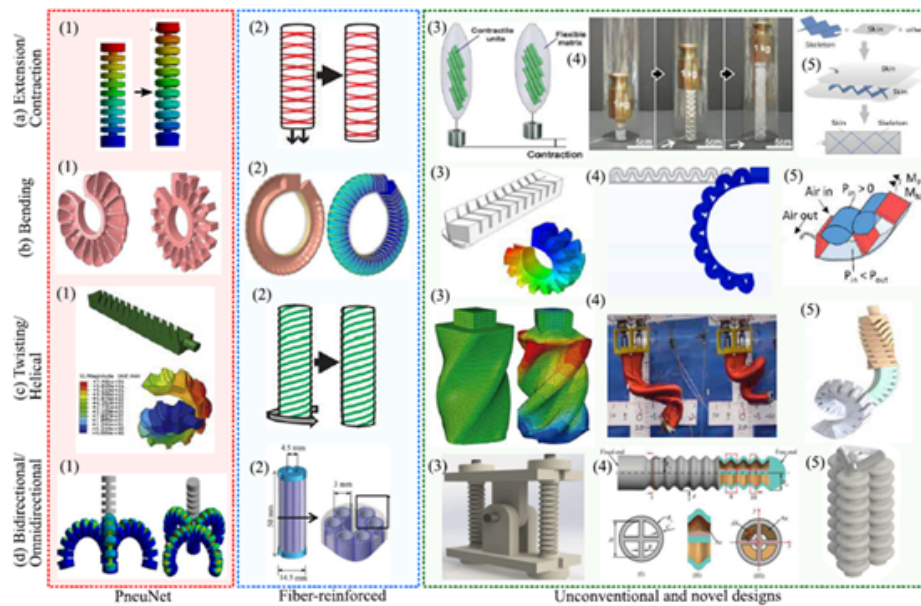


Figura 2.5. Configurações típicas de atuadores pneumáticos [19].

No estudo de [21], uma abordagem numérica foi utilizada para otimizar a geometria interna de um atuador em silicone Dragon Skin 30. Para a configuração ensaiada, os autores reportaram um ângulo de flexão de 111° sob pressão de 50 kPa, um aumento de 177% relativamente ao modelo comercial de referência e mais do dobro da força de saída. Estes resultados dizem respeito às geometrias e condições comparadas naquele estudo e ilustram a aplicação conjunta de FEA e ensaios experimentais ao desenvolvimento do atuador.

A obtenção das câmaras internas pode recorrer a moldes impressos em 3D, seguidos pela deposição e cura do silicone. A sequência de fabrico híbrido representada na Figura 2.6 permite relacionar a geometria do molde com a estrutura flexível do atuador [22].

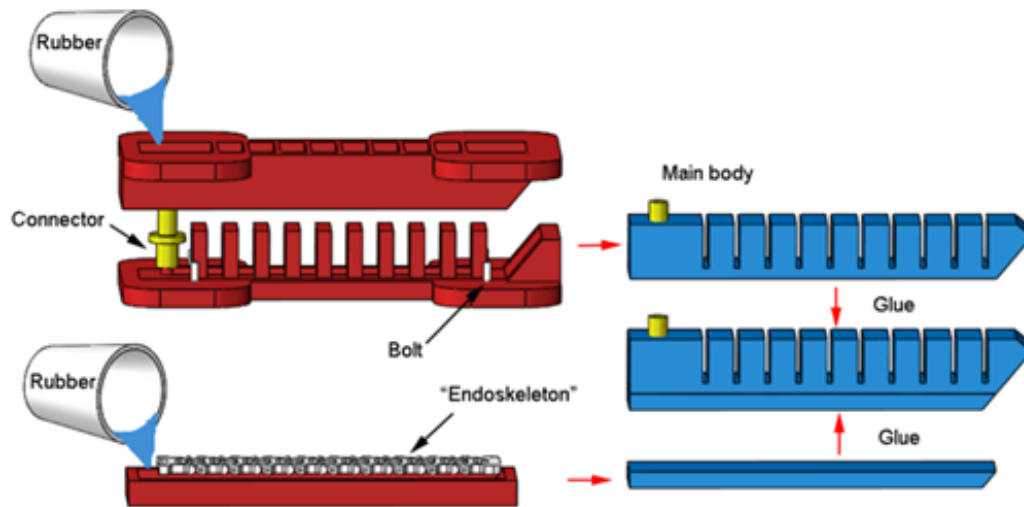


Figura 2.6. Fabrico de atuadores pneumáticos por moldagem [22].

Os atuadores pneumáticos têm também sido estudados em conjunto com sensores de pressão e deformação, procurando melhorar a realimentação sensorial e o controlo adaptativo [19].

2.3.2. Sistemas Acionados por Cabos

Os sistemas acionados por cabos permitem transmitir movimento a partir de atuadores remotos e podem ser integrados em estruturas produzidas por FA [11]. A tração do cabo provoca a flexão; a extensão exige um mecanismo de retorno, como a recuperação elástica da estrutura ou um cabo antagonista. Esta transmissão pode também ser combinada com atuação pneumática ou elementos de rigidez variável, conforme os requisitos da aplicação.

Do ponto de vista da modelação, os sistemas acionados por cabos apresentam desafios específicos associados à relação entre a cinemática da estrutura, a tensão transmitida pelo cabo e as perdas por atrito nos pontos de guiamento. Em manipuladores deste tipo, fatores como atrito cabo–polia, folgas, histerese, limites de tensão e eventual flacidez do cabo podem comprometer a repetibilidade do movimento e dificultar a previsão direta da força transmitida ao objeto. Estes aspetos justificam a necessidade de combinar modelação numérica, simplificações cinemáticas e validação experimental quando se pretende estudar garras flexíveis acionadas por tendões [5].

Entre as vantagens identificadas estão a elevada relação carga/peso, a redução de inércia graças à localização remota dos motores e a ampla área de trabalho, permitindo movimentos de grande amplitude com baixo consumo energético. No entanto, desafios como a fricção, a histerese e a gestão de tensões múltiplas

continuam a limitar a reprodutibilidade de movimentos complexos. Para mitigar esses efeitos, [5] salientam a importância de técnicas de controlo avançadas, como o controlo preditivo baseado em modelo (*Model Predictive Control*) e métodos de aprendizagem profunda, capazes de adaptar o controlo das tensões e da rigidez do sistema em tempo real.

Em termos de aplicação prática, [23] propuseram uma mão humanoide acionada por cabos e fabricada integralmente por impressão 3D, baseada num inovador sistema de transmissão elástica passiva bidirecional. O mecanismo integra dois conjuntos de cabos — de flexão e de extensão — associados a elementos elásticos que permitem movimentos suaves e reversíveis. O resultado foi um dispositivo com um compromisso favorável entre custo, peso e força.

Neste mecanismo, o movimento do motor é transmitido pelos cabos às articulações, com elementos elásticos a participar na resposta do conjunto, como esquematizado na Figura 2.7.

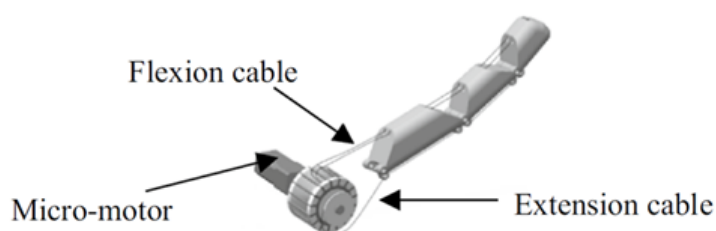


Figura 2.7. Esquema de atuação por cabos [23].

A integração desta transmissão na mão impressa em 3D permite acionar os dedos a partir dos cabos de flexão e extensão; a disposição dos componentes é apresentada na Figura 2.8.

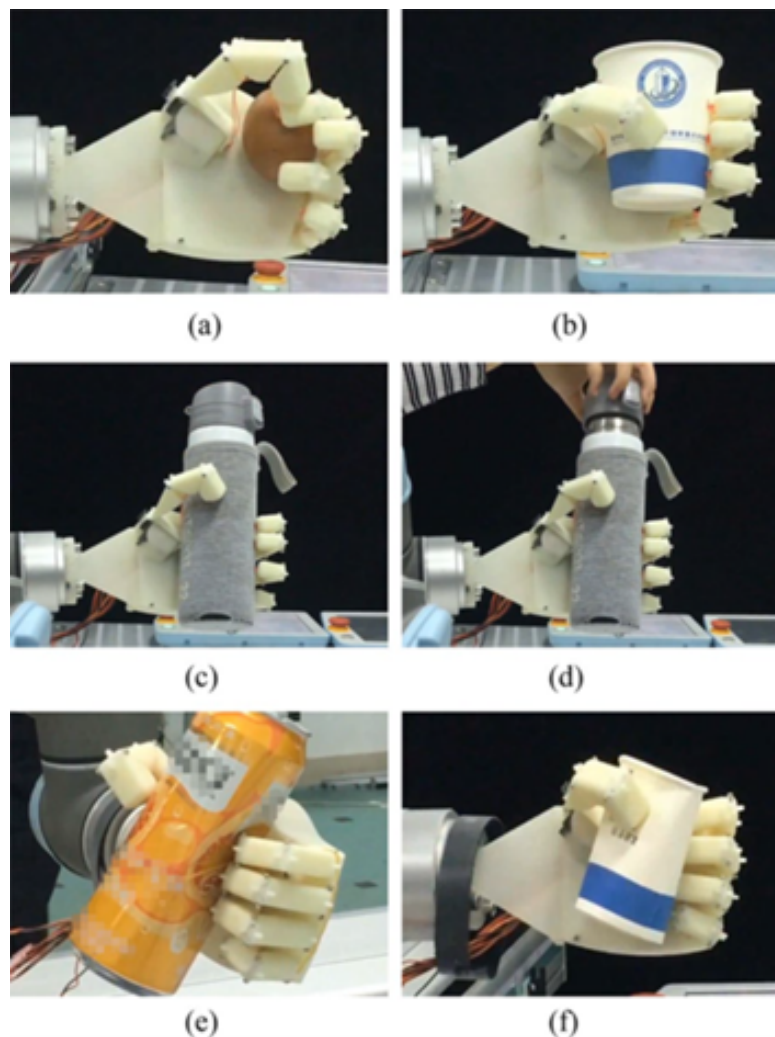


Figura 2.8. Mão humanoide acionada por cabos [23].

De modo complementar, [24] apresentaram a UI Hand I, uma mão antropomórfica modular de 26 graus de liberdade, também acionada por cabos tipo tendão (fibra Spectra®) e controlada através de aprendizagem por reforço profundo (*Deep Reinforcement Learning*). A estrutura, com cerca de 450 g e geometria fiel à anatomia humana, incorpora articulações modeladas a partir de tomografias reais e controlo por Leap Motion para tele-operação. O estudo demonstra a tendência atual de integrar IA e controlo adaptativo em sistemas acionados por cabos, permitindo otimizar as tensões nos cabos, reduzir o atrito e ajustar a rigidez em tempo real.

A geometria antropomórfica e a distribuição dos segmentos da UI Hand I, apresentada na Figura 2.9, exemplificam a integração da atuação por tendões numa estrutura modular.

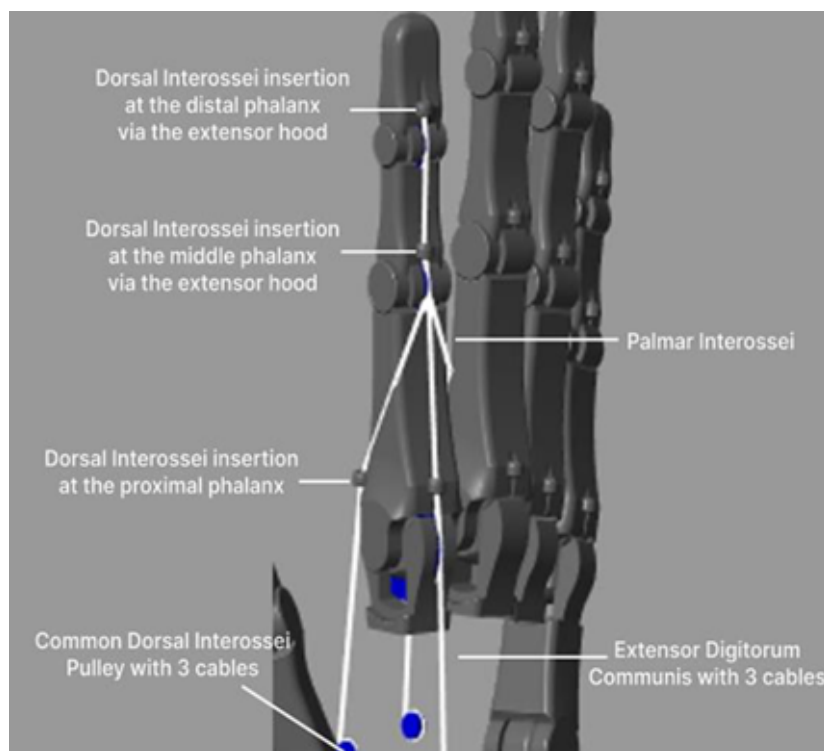


Figura 2.9. Modelo UI Hand I acionado por tendões [24].

2.3.3. Ligas e Polímeros com Memória de Forma (Atuadores SMA/SMP)

Os atuadores de ligas e polímeros com memória de forma são uma classe de materiais inteligentes com a capacidade de converter estímulos externos como calor, luz, corrente elétrica ou campos magnéticos em movimento mecânico controlado. Estes materiais conseguem memorizar uma forma original e retornar à mesma após a deformação, imitando o comportamento funcional de músculos biológicos. Tal característica torna estes materiais particularmente adequados a sistemas robóticos macios e bio-inspirados, onde a flexibilidade, compacidade e adaptação são essenciais.

De forma geral, os atuadores de memória de forma podem ser divididos em dois grandes grupos:

- **Ligas com Memória de Forma (SMA)** — ligas metálicas com transição de fase cristalina;
- **Polímeros com Memória de Forma (SMP)** — polímeros com transição de fase termomecânica.

Ambos têm atraído considerável atenção na robótica moderna pela sua simplicidade estrutural, elevada densidade de energia específica e potencial de integração em

sistemas miniaturizados [25], [26].

2.3.3.1. Ligas com memória de forma (SMA)

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys*, SMA) são materiais metálicos inteligentes capazes de converter energia térmica em movimento mecânico, apresentando um comportamento reversível de deformação. O princípio físico que rege o seu funcionamento é a transformação de fase martensítica–austenítica, desencadeada por variações de temperatura ou tensão mecânica. Durante o aquecimento, a estrutura martensítica — mais deformável — transforma-se em austenita, recuperando a forma original. Este fenómeno, designado *Shape Memory Effect* (SME), permite obter atuadores compactos, silenciosos e de elevada densidade de energia [25].

A fase martensítica, presente a temperaturas mais baixas, caracteriza-se por estruturas monoclinicas ou ortorrômbicas, elevada deformabilidade e baixa rigidez, permitindo dobragens sem dano permanente. Quando a liga é aquecida acima da temperatura crítica A_f (*Austenite finish*), ocorre a transformação para a fase austenítica, de estrutura cúbica e maior rigidez. É durante esta transição que o material recupera a forma original armazenada. Se a transformação for induzida por tensão em vez de temperatura, verifica-se o fenómeno de superelasticidade, permitindo grandes deformações reversíveis — característica particularmente útil em mecanismos de preensão flexíveis [25], [27].

O material mais amplamente utilizado é o níquel-titânio (NiTi), conhecido como Nitinol, devido à sua elevada resistência mecânica, biocompatibilidade e capacidade de gerar forças significativas em dimensões reduzidas. De acordo com [25], os atuadores SMA podem produzir densidades de energia até 20 vezes superiores às dos atuadores pneumáticos, sendo amplamente utilizados em robótica médica, próteses, microválvulas e mecanismos de preensão bio-inspirada.

Apesar das vantagens, as SMA enfrentam limitações relacionadas com baixa eficiência térmica, aquecimento lento e fadiga após múltiplos ciclos. Diversas abordagens têm sido propostas para melhorar a velocidade e a durabilidade, incluindo miniaturização e novas ligas.

A recuperação de forma das SMA pode ser aproveitada através de diferentes disposições mecânicas, produzindo os modos de atuação sintetizados na Figura 2.10.

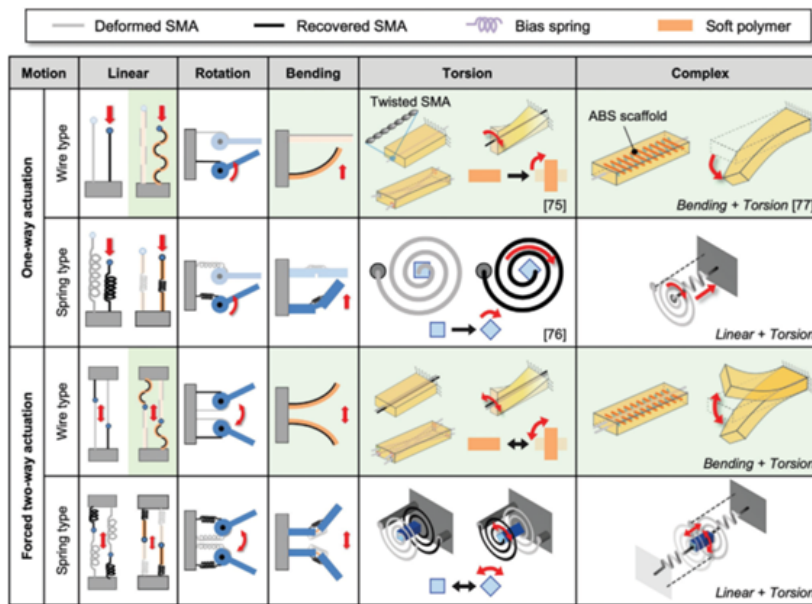


Figura 2.10. Modos de atuação com SMA [25].

No estudo de [28], foi demonstrado um atuador SMA altamente dinâmico encapsulado em silicone, capaz de movimentos rápidos e contínuos. O encapsulamento atua como elemento térmico e estrutural, permitindo deformações superiores a 20% e comportamento cíclico estável. Esta abordagem aumenta a flexibilidade do sistema, reduz o risco de sobreaquecimento e torna o atuador adequado para garras robóticas e estruturas tentaculares. Além disso, investigações recentes exploram SMA produzidas por fabrico aditivo, como fusão seletiva por laser (*Selective Laser Melting*, SLM), permitindo geometrias personalizadas e microestruturas otimizadas [29]. Estes avanços abrem caminho para atuadores mais leves, eficientes e adequados a dispositivos médicos e robótica macia.

De forma geral, as SMA destacam-se pela elevada densidade de energia, compactidade e fiabilidade, mas continuam limitadas pela resposta térmica lenta e pela complexidade de controlo. A tendência atual aponta para compósitos híbridos que combinam SMA com elastómeros ou polímeros inteligentes, produzindo atuadores adaptativos para robótica bio-inspirada.

2.3.3.2. Polímeros com Memória de Forma (SMP)

Os polímeros com memória de forma (*Shape Memory Polymers*, SMP) são materiais capazes de recuperar uma geometria previamente programada quando expostos a um estímulo externo [30]. A programação de uma forma temporária e a recuperação da forma inicial constituem o princípio de atuação representado na Figura 2.11; o ciclo realizável depende da formulação do polímero e do estímulo aplicado.

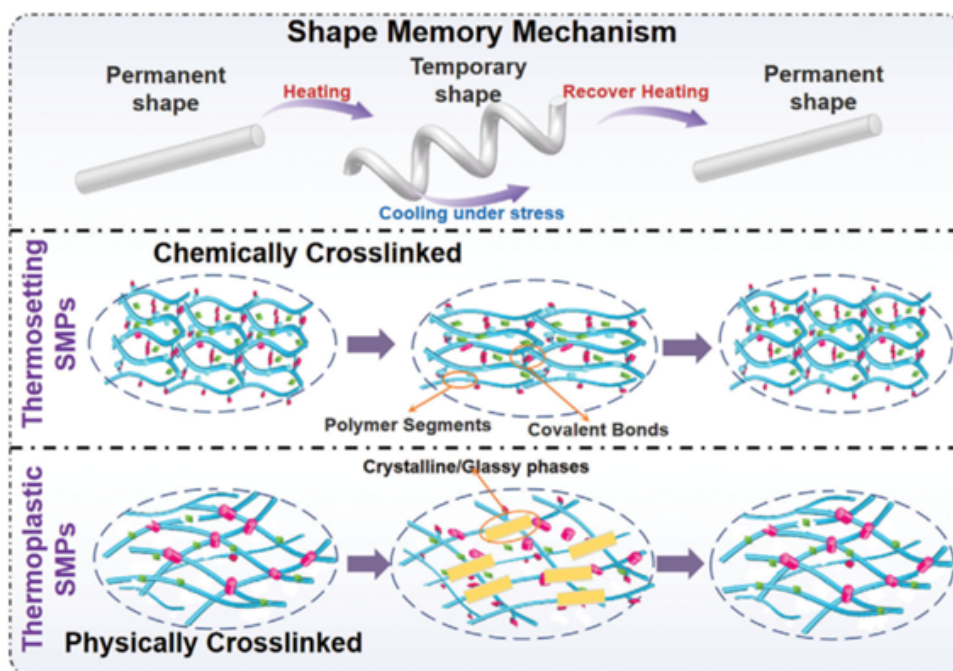


Figura 2.11. Mecanismo de memória de forma em polímeros [31].

A resposta depende da arquitetura molecular, incluindo regiões que estabilizam a forma e regiões responsáveis pela transição associada ao estímulo. Nas formulações discutidas por [31], esta organização permite combinar baixa massa com elevada deformabilidade; o comportamento deve ser avaliado para cada material e ciclo de programação.

A combinação entre programação de forma e fabrico aditivo permite incorporar este comportamento na geometria dos dedos, como na garra impressa em 3D apresentada na Figura 2.12.

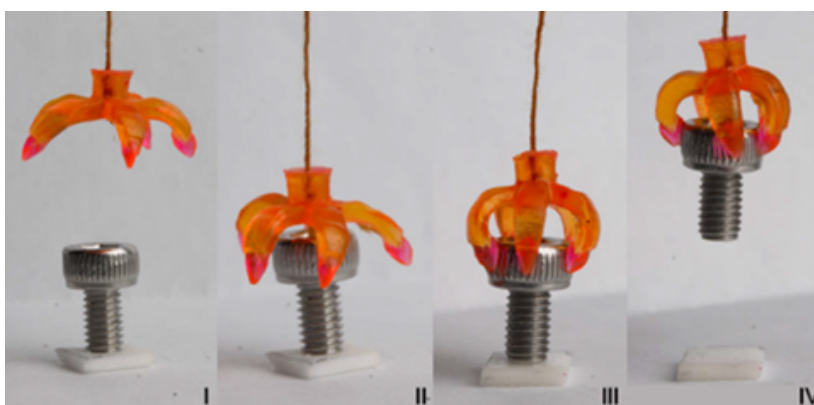


Figura 2.12. Garra impressa em 3D com polímero de memória de forma [32].

A integração dos SMP com o FA, nomeadamente escrita direta de tinta (*Direct Ink Writing*, DIW) e técnicas de extrusão, constitui outro avanço significativo. Como reportado em [33], a orientação das camadas e a formulação dos compósitos

poliméricos influenciam diretamente a velocidade de atuação, a força de recuperação e a estabilidade cíclica. Este aspeto é crucial no desenvolvimento de garras robóticas bio-inspiradas, onde a geometria complexa e a necessidade de deformações amplas beneficiam fortemente da versatilidade geométrica proporcionada pela impressão 3D.

Segundo [31], os SMP destacam-se pela elevada programabilidade estrutural, grande deformabilidade, baixo peso e compatibilidade com sistemas monomaterial, permitindo criar atuadores flexíveis, de baixo custo e altamente adaptáveis. Estas características tornam-nos especialmente adequados para manipulação de objetos frágeis, tecidos biológicos e superfícies irregulares.

Os SMP apresentam limitações de força de atuação, dependência do estímulo e degradação após ciclos repetidos. A composição química, a adição de cargas condutoras e a arquitetura interna são variáveis estudadas para melhorar estes compromissos [26], [31], [33].

2.3.4. Outros Métodos de Atuação

Outros métodos de atuação em robótica macia são apresentados de forma breve, para situar as escolhas desta dissertação face a soluções com requisitos distintos de alimentação, controlo e fabrico.

Os atuadores hidráulicos macios são estruturalmente semelhantes aos pneumáticos, mas utilizam líquidos aproximadamente incompressíveis. A alimentação hidráulica, a massa do fluido e os requisitos de vedação condicionam a sua integração, enquanto as consequências de uma fuga dependem do fluido e da aplicação. Estes compromissos devem ser considerados na seleção de uma solução para manipulação delicada [8].

Os atuadores dielétricos elastoméricos (DEAs) constituem outra categoria relevante, destacando-se pela elevada velocidade de resposta, grande relação força–peso e elevada eficiência eletromecânica. Apesar destas vantagens, o seu funcionamento requer tensões elétricas muito elevadas, o que aumenta o risco elétrico e dificulta a integração segura em garras compactas ou sistemas robóticos portáteis [31]. De forma semelhante, os atuadores magnetoativos, baseados em elastómeros com partículas ferromagnéticas dispersas, permitem deformações rápidas e controláveis através da aplicação de campos magnéticos. No entanto, necessitam de geradores de campo dedicados, o que aumenta o custo, o volume do sistema e limita a portabilidade [26].

Outro grupo de tecnologias emergentes inclui os atuadores eletroquímicos e iónicos, como os compósitos de polímero iónico e metal (IPMC, *Ionic Polymer–Metal Com-*

posite). Estes dispositivos destacam-se pela grande flexibilidade, baixo consumo energético e capacidade de atuação silenciosa, mas produzem forças reduzidas e apresentam degradação significativa ao longo do tempo devido à migração iónica, o que limita a sua aplicabilidade prática em garras funcionais [8].

Os requisitos de alimentação, controlo e fabrico destes atuadores diferem dos sistemas pneumáticos e acionados por cabos. A comparação com materiais de memória de forma permite enquadrar outras soluções compactas e programáveis descritas na literatura [26], [27]; a seleção para esta dissertação privilegia a compatibilidade com os meios de prototipagem disponíveis.

De forma geral, os diferentes métodos de atuação — pneumáticos, por cabos, SMA, SMP e outros — apresentam compromissos distintos entre força, velocidade, precisão, consumo energético e complexidade construtiva. Enquanto os atuadores pneumáticos e os sistemas acionados por cabos são amplamente utilizados pela sua eficiência prática, materiais com memória de forma oferecem soluções compactas e programáveis. A análise comparativa evidencia que não existe um atuador universalmente superior; a escolha depende fortemente dos requisitos mecânicos, do tipo de garra e do processo de fabrico adotado. Este enquadramento é fundamental para orientar a seleção do atuador mais adequado ao protótipo desenvolvido nesta dissertação.

Os compromissos descritos são reunidos na Tabela 2.2. A comparação é qualitativa e depende da configuração concreta de cada atuador.

Tabela 2.2. Comparação dos principais métodos de atuação em garras bio-inspiradas

Método de atuação	Vantagens	Limitações	Aplicações representativas
Pneumáticos [19], [21], [22], [34]	Grande deformabilidade e adaptação ao objeto. Compatibilidade com câmaras moldadas em estruturas flexíveis.	Requerem alimentação de ar, válvulas e tubagens. Compressibilidade e caudal condicionam a dinâmica e o controlo.	Manipulação delicada, agricultura, robótica biomédica e inspeção.
Acionados por cabo [5], [23], [24]	Atuação remota e baixa massa junto do contacto. Integração em estruturas articuladas ou flexíveis.	Atrito, desgaste, folgas e encaminhamento do cabo condicionam a transmissão e a repetibilidade.	Garras humanoides, próteses e manipuladores adaptativos.

Continua na página seguinte

Tabela 2.2 – continuação

Método de atuação	Vantagens	Limitações	Aplicações representativas
SMA [28], [35]	Elevada densidade de força e possibilidade de miniaturização. Atuação compacta e silenciosa.	Velocidade limitada pelos ciclos térmicos; fadiga e controlo da temperatura. Eficiência térmica reduzida.	Microgarras, robótica biomédica e mecanismos miniaturizados.
SMP [30], [36]	Baixa massa, grande deformabilidade e programação de forma. Compatibilidade com fabrico aditivo.	Força de atuação relativamente baixa. Dependência do estímulo externo e da espessura na velocidade de resposta.	Garras leves, dispositivos biomédicos e estruturas reconfiguráveis.

2.4. Materiais e Técnicas de Fabrico

O desenvolvimento de garras robóticas bio-inspiradas depende de forma crítica da seleção adequada dos materiais e das técnicas de fabrico utilizadas na sua construção. Estas escolhas determinam a flexibilidade, resistência, capacidade de deformação, durabilidade e compatibilidade com os atuadores integrados, influenciando diretamente o desempenho funcional da garra.

2.4.1. Materiais Aplicados a Garras Robóticas

Os materiais frequentemente utilizados em robótica macia incluem elastómeros, polímeros termoplásticos, compósitos poliméricos e materiais inteligentes, cada um com vantagens e limitações específicas.

Os elastómeros de silicone, amplamente analisados em [8], destacam-se pela elevada elasticidade, biocompatibilidade e resistência a deformações repetidas. Estas características tornam-nos adequados para atuadores pneumáticos e estruturas flexíveis, permitindo fabricar câmaras internas, membranas finas e geometrias complexas através de moldagem. A sua alta capacidade de alongamento e retorno elástico aproxima o seu comportamento de tecidos biológicos, sendo por isso frequentemente utilizado em garras macias.

Entre os termoplásticos utilizados em impressão 3D, TPU, PLA e PETG assumem particular relevância. O TPU distingue-se pela flexibilidade, resistência ao desgaste

e capacidade de absorção de impacto, sendo adequado para articulações, juntas flexíveis e elementos adaptativos. O PLA, apesar de rígido, é amplamente utilizado devido à sua estabilidade dimensional e facilidade de processamento. O PETG combina boa resistência mecânica, maior ductilidade que o PLA e maior estabilidade térmica, sendo uma opção robusta para elementos estruturais de garras.

Os materiais inteligentes também têm ganho destaque. Os polímeros com memória de forma (*Shape Memory Polymers*, SMP), amplamente descritos por [26], [31], permitem movimentos programáveis e recuperação de forma sob estímulos térmicos, fototérmicos ou eletrotérmicos. A sua leveza e capacidade de impressão 3D tornam-nos particularmente interessantes para garras que necessitem de deformações amplas e programáveis. De forma semelhante, materiais metálicos com memória de forma, como as SMA, apresentam elevada força específica e têm sido explorados em microgarras de precisão.

2.4.2. Técnicas de Fabrico

Impressão 3D (FDM, DIW e SLA). O fabrico aditivo (FA) é amplamente utilizado na prototipagem de garras devido à sua versatilidade e facilidade de iteração. Segundo [8], permite fabricar geometrias complexas, incorporar zonas rígidas e flexíveis na mesma peça e reduzir custos e encurtar ciclos de desenvolvimento durante a prototipagem. A possibilidade de combinar PLA, TPU, PETG ou compósitos permite obter estruturas híbridas com rigidez variável e elevada adaptabilidade.

A técnica de escrita direta de tinta (*Direct Ink Writing*, DIW), destacada por [33], permite a deposição precisa de materiais pastosos, como SMP, silicones e hidrogéis. Esta abordagem possibilita a criação de atuadores e dedos flexíveis com canais internos, gradientes funcionais e estruturas bio-inspiradas com elevada resolução geométrica.

A SLA/DLP oferece alta precisão dimensional e superfícies lisas, sendo particularmente adequada para microcomponentes ou peças com detalhes finos. No entanto, a gama de materiais flexíveis disponíveis permanece limitada, restringindo a sua aplicação em garras altamente deformáveis.

Moldagem e fabrico híbrido. A moldagem de silicones continua a ser amplamente utilizada na construção de atuadores pneumáticos e estruturas flexíveis, como amplamente documentado em [22]. Esta técnica permite obter geometrias internas complexas e paredes de espessura controlada, essenciais para movimentos suaves e previsíveis.

O fabrico híbrido, combinando impressão 3D com moldagem, tem ganho grande

relevância. Esta abordagem permite integrar estruturas rígidas (impressas em PLA, PETG ou TPU reforçado) com câmaras pneumáticas moldadas em silicone, resultando em garras com elevada adaptabilidade e resistência estrutural, mantendo simultaneamente baixo peso e custo de produção.

Tabela 2.3. Processos de fabrico associados aos materiais considerados

Material	Função na garra	Processo de fabrico associado	Justificação técnica
PLA, PETG	Estruturas rígidas (bases, suportes, interfaces mecânicas)	FDM	Materiais rígidos, estáveis e de baixo custo; apresentam boa precisão geométrica e elevada facilidade de impressão.
TPU, TPE	Articulações flexíveis, juntas, dobradiças flexíveis, zonas de conformabilidade	FDM (TPU)	Flexibilidade elevada e resistência à fadiga; adequado a zonas deformáveis e elementos de absorção de impacto.
Silicones (ex.: Dragon Skin, Ecoflex)	Atuadores pneumáticos, superfícies de contacto, dedos flexíveis	Moldagem, DIW	Elevada elasticidade, grande capacidade de deformação e resistência ao rasgo.
SMP (polímeros com memória de forma)	Mecanismos adaptativos, rigidez variável, dobragem programável	DIW, Impressão multimaterial	Permite deformação programável e recuperação de forma.
SMA (NiTi)	Atuadores compactos de alta força, mecanismos de tração ou flexão bio-inspirados	Fabrico híbrido (SMA + encapsulamento em silicone)	Alta densidade de energia, movimentos silenciosos e grande força específica; encapsulamento melhora vida útil e segurança.

Em síntese, a combinação de materiais funcionais com técnicas de FA oferece um caminho robusto para a conceção de garras robóticas personalizadas e eficientes. A possibilidade de combinar zonas rígidas, flexíveis e inteligentes numa única peça

evidencia o potencial da FA para o desenvolvimento da solução proposta nesta dissertação.

Embora a sustentabilidade não constitua uma variável experimental avaliada quantitativamente nesta dissertação, a seleção de materiais e processos de fabrico permanece relevante no contexto da robótica macia e bio-inspirada. O fabrico aditivo permite reduzir desperdício relativamente a processos subtrativos e facilita a produção local de geometrias complexas; contudo, o impacto ambiental final depende do tipo de polímero utilizado, do consumo energético da impressão e da gestão do fim de vida das peças. Assim, materiais reciclados, biopolímeros e estratégias de reutilização de filamento representam linhas de desenvolvimento relevantes para trabalhos futuros, especialmente em componentes robóticos produzidos por FDM [7], [8].

2.5. Situação Atual

A literatura recente mostra que as garras robóticas evoluíram em várias direções, combinando estruturas rígidas, elementos macios, atuação pneumática, atuação por cabos, materiais inteligentes e fabrico aditivo. Esta diversidade permite adaptar a garra à aplicação pretendida, mas também torna difícil estabelecer uma solução universal para todos os cenários de preensão. Em aplicações de manipulação delicada, a escolha da arquitetura deve equilibrar força, conformabilidade, controlo, segurança no contacto, facilidade de fabrico e custo de implementação [1], [2], [8].

As revisões de [1], [2], [8] descrevem mecanismos de abertura e fecho, dedos pneumáticos, sistemas acionados por cabos, adesão seca e estruturas com rigidez variável. Estas soluções evidenciam compromissos entre adaptabilidade, repetibilidade e facilidade de integração, sem permitir atribuir uma arquitetura única a todos os sistemas comerciais ou académicos. Para o contexto desta dissertação, interessa sobretudo conciliar instrumentação do contacto e modelação com baixo custo e simplicidade construtiva.

No caso específico das garras macias acionadas por cabos, a atuação remota reduz a massa localizada na zona de contacto e facilita a construção de estruturas flexíveis. Contudo, a relação entre movimento do motor, deslocamento do cabo, deformação da garra e força transmitida ao objeto é altamente não linear. Esta relação é influenciada pelo atrito nos canais internos, pela variação geométrica das zonas de flexão, pela rigidez local do material e pela evolução do contacto durante o fecho. Assim, mesmo quando o deslocamento do cabo é conhecido, a força aplicada ao objeto não pode ser inferida diretamente sem medições experimentais

ou modelos devidamente validados [5].

A arquitetura *SpiRobs*, proposta por Wang et al. [6], demonstra o potencial de estruturas inspiradas em espirais logarítmicas para preensão versátil. No entanto, a utilização desta arquitetura em contexto experimental levanta ainda questões relacionadas com a forma como a carga é transmitida ao objeto ao longo da superfície de contacto. Em particular, permanece relevante desenvolver métodos simples que permitam caracterizar a variação circunferencial da força resultante e obter indicadores comparativos de pressão média equivalente, sem exigir a integração de sensores diretamente no corpo da garra ou sistemas táteis complexos.

Deste modo, a lacuna que fundamenta esta dissertação situa-se na interface entre fabrico aditivo, atuação por cabo e caracterização experimental do contacto. A proposta desenvolvida procura responder a esta necessidade através de uma metodologia de baixo custo, baseada num objeto cilíndrico instrumentado que funciona como sonda angular. Esta abordagem não substitui sensores táteis distribuídos nem modelos FEA quantitativamente validados, mas permite obter uma assinatura circunferencial da força resultante e apoiar o desenvolvimento futuro de relações entre atuação, deformação e contacto em garras *SpiRobs*.

Importa distinguir claramente a base adotada do contributo desenvolvido nesta dissertação. A geometria inspirada numa espiral logarítmica e o princípio geral de atuação por cabo são baseados na arquitetura *SpiRobs* apresentada por Wang et al. [6]; não se pretende, portanto, reivindicar uma nova arquitetura de garra. A contribuição própria incide na adaptação e fabrico dos protótipos utilizados neste estudo, no desenvolvimento da bancada eletromecânica e do sistema de aquisição, e sobretudo na metodologia experimental de caracterização do contacto. Esta metodologia recorre a um cilindro externo instrumentado com dois sensores FSR, utilizado como sonda angular em incrementos de 5°, permitindo obter perfis circunferenciais de força resultante, estimar uma pressão média equivalente por uma área de referência e avaliar a repetibilidade em diferentes condições de atuação e configurações fabricadas.

Assim, existe uma oportunidade clara para conceber, fabricar e caracterizar experimentalmente uma garra robótica bio-inspirada produzida por impressão 3D, combinando adaptabilidade geométrica, atuação por cabo e instrumentação externa de contacto. Este enquadramento estabelece a base conceptual para o capítulo seguinte, dedicado à metodologia de desenvolvimento, simulação e caracterização dos protótipos.

Capítulo 3

Metodologia Experimental e Numérica

3.1. Abordagem Metodológica

O desenvolvimento da presente dissertação assenta numa metodologia experimental e numérica, combinando projeto mecânico, prototipagem física, simulação por elementos finitos e caracterização experimental com sensorização de força. O objetivo metodológico principal foi desenvolver e avaliar uma garra robótica flexível baseada na arquitetura *SpiRobs*, fabricada por Fabrico Aditivo (FA) e acionada por cabo, com capacidade de envolver objetos cilíndricos e permitir o registo de um indicador escalar de carga, designado força resultante medida, e da respetiva pressão média equivalente durante a preensão. A definição operacional destas grandezas e os limites da sua interpretação são apresentados nas Secções 3.9.3 e 3.10.

A metodologia adotada foi estruturada em fases complementares. Inicialmente, foi delimitado o objeto de estudo e definida a arquitetura *SpiRobs* como solução principal a desenvolver, devido à sua capacidade de deformação contínua, adaptação geométrica ao objeto e compatibilidade com fabrico aditivo em material flexível.

Numa segunda fase, procedeu-se à prototipagem da garra em TPU 95A por impressão 3D FDM, sendo necessário otimizar os parâmetros de fabrico para garantir a qualidade das zonas de flexão e a passagem funcional do cabo de atuação. Paralelamente, foi desenvolvido um modelo numérico em ANSYS para estudar o comportamento estrutural da garra sob grandes deformações, com especial atenção às zonas de flexão e às dificuldades de convergência associadas ao auto-contacto.

Numa terceira fase, foi concebido um sistema eletromecânico de atuação, baseado num microcontrolador ESP32, motor de passo NEMA 17, driver DRV8825 e cabo de pesca como elemento de tração. Para a caracterização experimental, foi desenvolvido um objeto cilíndrico instrumentado com sensores FSR, permitindo mapear a distribuição circunferencial da força resultante e da pressão média equivalente durante a preensão.

Numa segunda linha de desenvolvimento, foi desenvolvida uma arquitetura de preensão macia, baseada em dedos pneumáticos moldados em silicone. Esta linha de trabalho permitiu explorar um princípio de atuação distinto do acionamento por cabo, recorrendo à pressurização de câmaras internas para produzir a curvatura dos dedos. O trabalho incluiu a preparação do silicone, o fabrico dos moldes e componentes rígidos, a moldagem em duas fases, a adaptação dos encaixes, o desenvolvimento de um suporte modular inicial para três dedos, a caracterização preliminar do silicone por provetes de tração baseados na ISO 37 e a preparação de uma simulação FEA preliminar do dedo pneumático.

A Figura 3.1 resume a sequência metodológica adotada.

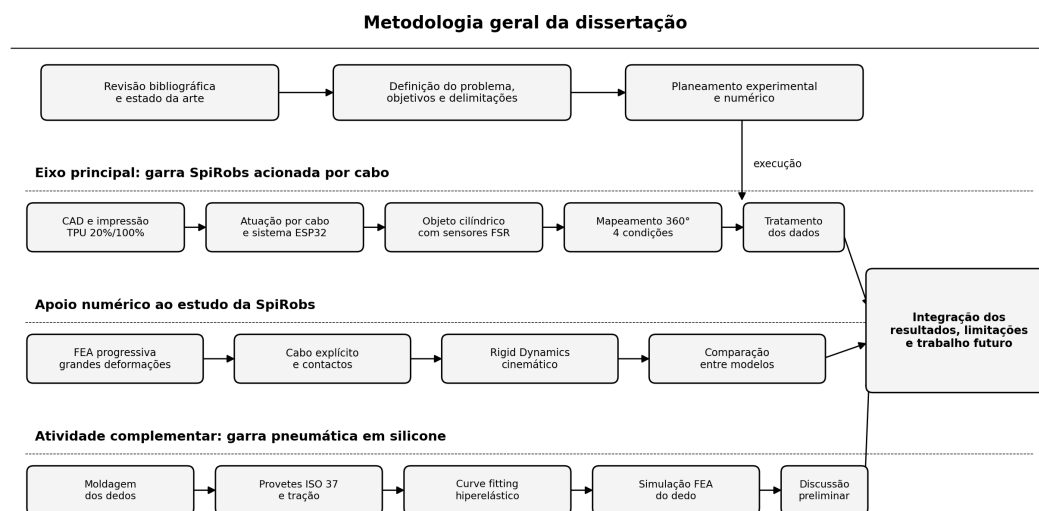


Figura 3.1. Fluxograma da metodologia adotada.

3.2. Contexto de Desenvolvimento e Delimitação do Trabalho

O presente trabalho centra-se no desenvolvimento, fabrico e caracterização de uma garra flexível bio-inspirada, baseada na arquitetura *SpiRobs*. A solução em estudo foi seleccionada pela sua capacidade de envolvimento progressivo de objetos cilíndricos e pela possibilidade de combinar fabrico aditivo, atuação por cabo, modelação numérica e caracterização experimental com sensores de força.

A investigação apresentada nesta dissertação incide sobre quatro eixos principais:

1. **Desenvolvimento e fabrico da garra *SpiRobs*:** adaptação do conceito geométrico a um atuador flexível acionado por cabo e fabricado numa única peça em TPU 95A;
2. **Modelação numérica por elementos finitos:** configuração de modelos não-lineares em ANSYS para estudar grandes deformações, zonas críticas de tensão e dificuldades de convergência associadas ao contacto e ao acionamento por cabo;
3. **Caracterização experimental com sensorização:** construção de uma bancada de ensaios com motor, cabo e sensores FSR, permitindo comparar a soma escalar das forças indicadas pelos sensores e a pressão média equivalente num objeto cilíndrico;
4. **Desenvolvimento da garra pneumática em silicone:** fabrico de dedos macios com câmaras internas, adaptação dos elementos de ligação, caracterização preliminar do silicone por tração uniaxial e simulação FEA preliminar de um dedo pneumático.

Desta forma, a componente central da dissertação corresponde ao estudo da garra flexível *SpiRobs*, ao seu fabrico, modelação e caracterização experimental. A garra pneumática em silicone é apresentada como uma segunda linha de desenvolvimento, dedicada ao fabrico, à caracterização preliminar do silicone e à modelação de outra estratégia de atuação macia. Não foi realizada uma comparação quantitativa de desempenho entre as duas arquiteturas.

3.3. Objeto de Estudo: Atuador Flexível *SpiRobs*

O objeto de estudo principal desta dissertação é uma garra flexível baseada na arquitetura *SpiRobs*, proposta por Wang, Freris e Wei [6]. A arquitetura geométrica provém desse trabalho; a presente dissertação incide sobre a sua implementação, fabrico, atuação, instrumentação e avaliação nas condições descritas. A geometria permite que a estrutura se curve progressivamente quando tracionada por um cabo interno. Ao contrário de uma garra rígida articulada, em que o movimento ocorre em juntas discretas, o atuador *SpiRobs* apresenta deformação distribuída ao longo do seu comprimento, permitindo a conformação à geometria do objeto. Esta propriedade foi observada qualitativamente, sem ensaio comparativo com uma garra rígida.

O modelo final utilizado nesta fase do trabalho é constituído por 18 elos ou segmentos sucessivos, unidos por zonas de menor espessura que funcionam como regiões

preferenciais de flexão. Estas zonas permitem que a garra se enrole em torno do objeto quando o cabo é tracionado. O atuador foi fabricado numa única peça, evitando montagens mecânicas complexas e reduzindo o número de componentes independentes.

A atuação é realizada através de um cabo de pesca que percorre canais internos ao longo de todos os elos da garra. Estes canais apresentam uma largura aproximada entre 1 mm e 2 mm, diminuindo progressivamente em direção ao elo final. A passagem excêntrica do cabo relativamente ao eixo neutro da estrutura faz com que a tração aplicada gere um momento de flexão, promovendo o fecho gradual da garra. O cabo utilizado nos ensaios experimentais foi fio de pesca de nylon com diâmetro de 0,3 mm.

A escolha desta geometria justifica-se pela sua simplicidade construtiva, compatibilidade com impressão 3D em materiais flexíveis e capacidade de envolver objetos cilíndricos ou de geometria irregular. A largura máxima medida no modelo CAD é de aproximadamente 50,57 mm, diminuindo progressivamente em direção à extremidade. Uma vez que o objetivo experimental deste trabalho incide sobre a resposta global de preensão, os detalhes geométricos locais das zonas de flexão não foram tratados como variáveis independentes de estudo.

A Figura 3.2 apresenta a geometria e um exemplar fabricado, permitindo identificar as vértebras, as zonas de flexão e os canais de passagem do cabo. Uma vista adicional do modelo CAD utilizado é apresentada no Apêndice I. A descrição do princípio geométrico e do fabrico da arquitetura original encontra-se no artigo de Wang et al. e na respetiva informação suplementar [6]. As opções de fabrico, atuação e instrumentação adotadas nesta dissertação são descritas nas secções seguintes.

3.4. Ferramentas, Equipamentos e Materiais

Para garantir a reprodutibilidade da metodologia, esta secção apresenta as ferramentas computacionais, equipamentos de fabrico, componentes eletromecânicos e materiais utilizados ao longo do estudo.

3.4.1. Ferramentas Computacionais

A modelação, simulação e preparação dos protótipos foram realizadas com recurso a diferentes ferramentas computacionais:

- **SolidWorks 2025:** utilizado para modelação CAD da garra *SpiRobs*, das peças auxiliares, do suporte do motor, da polia de enrolamento e do objeto

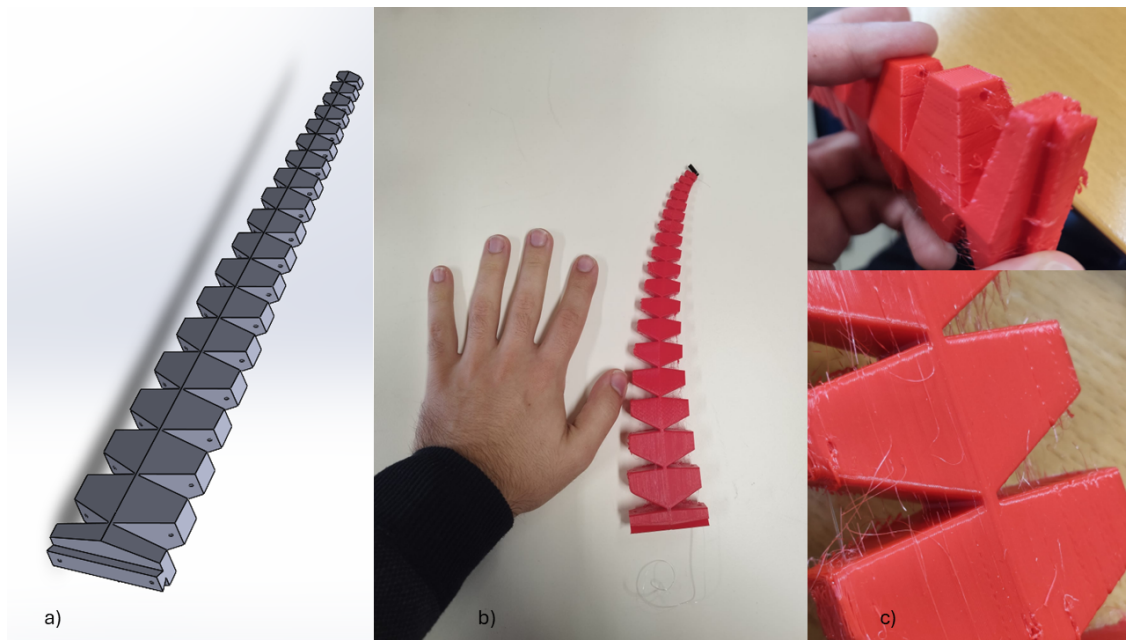


Figura 3.2. Garra *SpiRobs*: (a) modelo CAD; (b) exemplar fabricado em TPU; (c) detalhes das vértebras e zonas de flexão. A mão fornece apenas uma referência visual de dimensão.

experimental instrumentado;

- **ANSYS 2025 R2:** utilizado para a simulação numérica por elementos finitos, com análise de grandes deformações e estudo do comportamento estrutural do atuador flexível;
- **Ultimaker Cura:** utilizado para o fatiamento dos modelos tridimensionais e geração do código G necessário à impressão 3D por FDM;
- **Arduino IDE:** utilizado para programação do ESP32, controlo do motor de passo, leitura dos sensores FSR e envio dos dados para o computador;
- **Microsoft Excel:** utilizado para tratamento inicial dos dados de calibração, organização dos quatro ensaios de mapeamento e cálculo de indicadores estatísticos;
- **Python:** utilizado no desenvolvimento da interface gráfica de controlo e aquisição, visualização em tempo real, confirmação das amostras e exportação dos resultados experimentais.

3.4.2. Equipamento de Fabrico Aditivo

A produção dos protótipos físicos foi realizada através da tecnologia de Modelação por Deposição Fundida (FDM), utilizando uma impressora Creality Ender 3 V2. Esta impressora foi selecionada devido à sua disponibilidade, acessibilidade e capacidade

de processar termoplásticos flexíveis mediante parametrização adequada. A meio do desenvolvimento foi adquirida uma câmara de aquecimento, posteriormente utilizada na impressão do protótipo com 100% de preenchimento. A sua função não foi aumentar excessivamente a temperatura da peça, mas sim reduzir variações térmicas e correntes de ar durante a impressão, favorecendo uma deposição mais estável ao longo de um processo de longa duração.

3.4.3. Materiais Utilizados

A garra flexível foi fabricada em Poliuretano Termoplástico (TPU), devido à sua capacidade de deformação, resistência à flexão e compatibilidade com impressão 3D FDM. Durante a fase inicial de parametrização foram testados filamentos com diferentes durezas, nomeadamente TPU 90A, TPU 93A e TPU 95A. Os materiais mais macios apresentaram maior suscetibilidade a encravamentos, flambagem do filamento e subextrusão, sobretudo devido à configuração do sistema de extrusão da impressora.

Após esta fase exploratória, foi selecionado o TPU 95A como material principal para os protótipos funcionais. O primeiro protótipo utilizado nos ensaios experimentais foi impresso em Filaflex 95A da Recreus, com 20% de preenchimento. Foi também produzido um segundo protótipo com 100% de preenchimento, utilizado numa segunda campanha de mapeamento circunferencial para comparação direta com o protótipo de 20%.

As peças rígidas auxiliares, como a polia de enrolamento, o suporte do motor e o objeto cilíndrico instrumentado, foram fabricadas em PLA. Este material foi escolhido pela sua rigidez, facilidade de impressão, estabilidade dimensional e adequação a componentes estruturais não deformáveis.

Na linha de desenvolvimento da garra pneumática foi utilizado silicone líquido bi-componente SANAAA, com dureza nominal Shore A 15 indicada na informação comercial do produto. Os componentes A e B foram misturados numa proporção de 1:1 em massa. Os moldes, encaixes e suporte dos dedos pneumáticos foram igualmente fabricados em PLA. A alimentação de ar foi prevista através de tubo pneumático com 6 mm de diâmetro exterior e 4 mm de diâmetro interior, ligado por conectores de encaixe rápido compatíveis com tubo de 6 mm e rosca M5.

3.5. Prototipagem e Fabrico Aditivo

A transição do modelo CAD para o protótipo físico exigiu a otimização dos parâmetros de impressão, uma vez que a impressão de TPU apresenta desafios superiores aos de termoplásticos rígidos, como PLA ou PETG. A elevada flexibilidade do filamento favorece fenómenos de flambagem no sistema de tração da impressora, podendo originar subextrusão, encravamentos e deposição irregular.

Durante a fase inicial, foram realizados testes com diferentes durezas de TPU e diferentes diâmetros de bico extrusor. A utilização de bicos de menor diâmetro aumentou a contrapressão no conjunto de fusão do sistema de extrusão, agravando os problemas de alimentação do filamento. A utilização de um bico de 0,6 mm no primeiro protótipo funcional permitiu reduzir a resistência ao escoamento do polímero fundido, favorecendo uma deposição mais estável.

O protótipo de 20% de preenchimento, utilizado na primeira campanha experimental, foi impresso com bico de 0,6 mm e tempo aproximado de fabrico de 8 h. Posteriormente, foi produzido um segundo protótipo com 100% de preenchimento, padrão *grid*, bico de 0,4 mm e tempo de impressão aproximado de 36 h. Este segundo protótipo foi fabricado com recurso à câmara de aquecimento e utilizado para avaliar a resposta de prensão sob o mesmo protocolo experimental aplicado ao protótipo de 20%.

A Tabela 3.1 resume os principais parâmetros de impressão utilizados nos protótipos em TPU 95A.

Tabela 3.1. Parâmetros principais de impressão dos protótipos em TPU 95A.

Parâmetro	Protótipo 20%	Protótipo 100%
Material	Filaflex TPU 95A	Filaflex TPU 95A
Impressora	Creality Ender 3 V2	Creality Ender 3 V2
Temperatura do bico [°C]	210	210
Temperatura da mesa [°C]	60	60
Altura de camada [mm]	0,2	0,2
Diâmetro do bico [mm]	0,6	0,4
Preenchimento [%]	20	100
Padrão de preenchimento	Grelha (<i>grid</i>)	Grelha (<i>grid</i>)
Retração	Ativada	Ativada
Adesão à base	Aba periférica (<i>brim</i>)	Aba periférica (<i>brim</i>)
Suportes	Sim	Sim
Câmara de aquecimento	Não	Sim
Tempo de impressão [h]	8	36
Massa final [g]	54,48	70,99

A pesagem após o fabrico indicou uma massa de 54,48 g para o protótipo com 20% de preenchimento e de 70,99 g para o protótipo com 100%. A comparação

experimental entre as configurações foi realizada utilizando o mesmo objeto instrumentado, os mesmos sensores, as mesmas equações de calibração, a mesma área de referência e o mesmo procedimento de aquisição. Foram consideradas duas condições nominais de deslocamento do cabo, 105 mm e 115 mm, permitindo comparar a resposta das configurações fabricadas e o efeito do deslocamento de atuação. Como os protótipos foram produzidos em condições de fabrico distintas, esta comparação não deve ser interpretada como isolamento exclusivo do efeito da percentagem de preenchimento.

3.6. Configuração da Simulação Numérica

A análise numérica do atuador *SpiRobs* foi realizada no ANSYS 2025 R2, através de um estudo *Static Structural*. Apesar de se tratar de uma análise estrutural estática, o problema apresenta forte não-linearidade devido às grandes deformações do TPU, às rotações significativas dos elos e à ocorrência de contacto entre diferentes regiões da própria garra. Por este motivo, a opção *Large Deflection* foi ativada em todas as simulações relevantes.

3.6.1. Modelo Geométrico e Estratégia Incremental

A simulação direta do modelo integral, composto por 18 elos, revelou-se computacionalmente exigente devido ao número elevado de zonas de flexão e regiões de auto-contacto. Por esse motivo, foi adotada uma estratégia incremental. Inicialmente, foram analisados modelos simplificados com menor número de elos, permitindo estudar a influência da malha, das condições fronteira, da aplicação da carga e da definição dos contactos.

A abordagem iniciou-se com um modelo de 2 elos, destinado a isolar o comportamento de uma única zona de flexão. Posteriormente, os parâmetros foram progressivamente extrapolados para modelos com maior extensão geométrica, incluindo modelos intermédios e um modelo de 7 elos. Esta metodologia permitiu compreender a evolução da deformação, identificar problemas de convergência e definir configurações mais estáveis antes da tentativa de simulação do atuador completo.

3.6.2. Modelo de Material

Nos modelos iniciais da garra sem cabo explícito, o TPU 95A foi representado por um modelo hiperelástico de Yeoh de segunda ordem, definido como uma aproximação preliminar ao comportamento flexível do material. Nos modelos posteriores com

cabo explícito, foi utilizada a aproximação linear elástica descrita adiante. A não linearidade geométrica associada às grandes rotações foi mantida em ambas as fases.

Importa salientar que, nesta fase, não foi realizada uma caracterização experimental hiperelástica do Filaflex 95A. As constantes do modelo foram definidas de forma aproximada, com o objetivo de obter um comportamento qualitativamente compatível com um elastómero flexível. Consequentemente, os resultados numéricos devem ser interpretados sobretudo como uma ferramenta comparativa para avaliar tendências de deformação, zonas críticas e dificuldades de convergência, não como uma previsão quantitativa final da resistência ou falha do material.

Nas simulações específicas com cabo de acionamento, foi também utilizada uma formulação linear elástica preliminar para reduzir a complexidade numérica do problema e testar a estratégia de contacto cabo–garra. Nesses ensaios, a estrutura em TPU foi aproximada por um módulo de Young de 20 MPa e coeficiente de Poisson de 0,45, enquanto o cabo foi modelado como um material mais rígido, com módulo de Young de 2000 MPa e coeficiente de Poisson de 0,30. Esta aproximação não substitui uma caracterização hiperelástica final, mas permitiu estabilizar o modelo e avaliar qualitativamente a transmissão de movimento pelo cabo.

3.6.3. Condições Fronteira, Atuação e Contactos

A base da garra foi restringida através de uma condição de suporte fixo (*Fixed Support*). Esta condição idealiza um engastamento: os deslocamentos das faces selecionadas são impedidos, restringindo o movimento da base. A fixação representa a montagem física do atuador, sem incluir a flexibilidade ou eventuais folgas do suporte. A atuação foi testada através de duas abordagens principais: aplicação de força de tração e imposição de deslocamento. Durante o estudo paramétrico foram testadas forças de 1 N, 2 N e 10 N, bem como deslocamentos impostos de 10 mm, 20 mm e 25 mm.

A utilização de força permite representar de forma simplificada a tração exercida pelo cabo, mas pode dificultar a convergência quando a estrutura perde rigidez durante grandes rotações. Por esse motivo, também foram testados deslocamentos impostos, permitindo controlar a evolução do fecho da garra de forma mais gradual.

Relativamente aos contactos, foram testadas configurações *frictionless* e *frictional*, com o objetivo de avaliar a influência do atrito e do auto-contacto na estabilidade da solução. Em algumas iterações, foram utilizadas definições automáticas do ANSYS para a formulação do contacto, enquanto noutras foram definidos pares de contacto manualmente entre superfícies críticas. Esta etapa foi particularmente importante

devido à tendência da garra para entrar em contacto consigo própria durante o processo de enrolamento.

3.6.4. Malha e Controlo de Solução

Foram comparadas duas discretizações do modelo de dois elos: uma malha inicial com elementos de primeira ordem e uma malha com refinamento localizado nas zonas de flexão e elementos de segunda ordem. A Figura 3.3 apresenta as duas configurações, e a Tabela 3.2 reúne as contagens transcritas dos registos do ANSYS. Esta comparação permite observar sensibilidade à discretização, mas não constitui um estudo de independência de malha: a densidade e a ordem dos elementos foram alteradas simultaneamente, impedindo isolar o efeito de cada alteração.

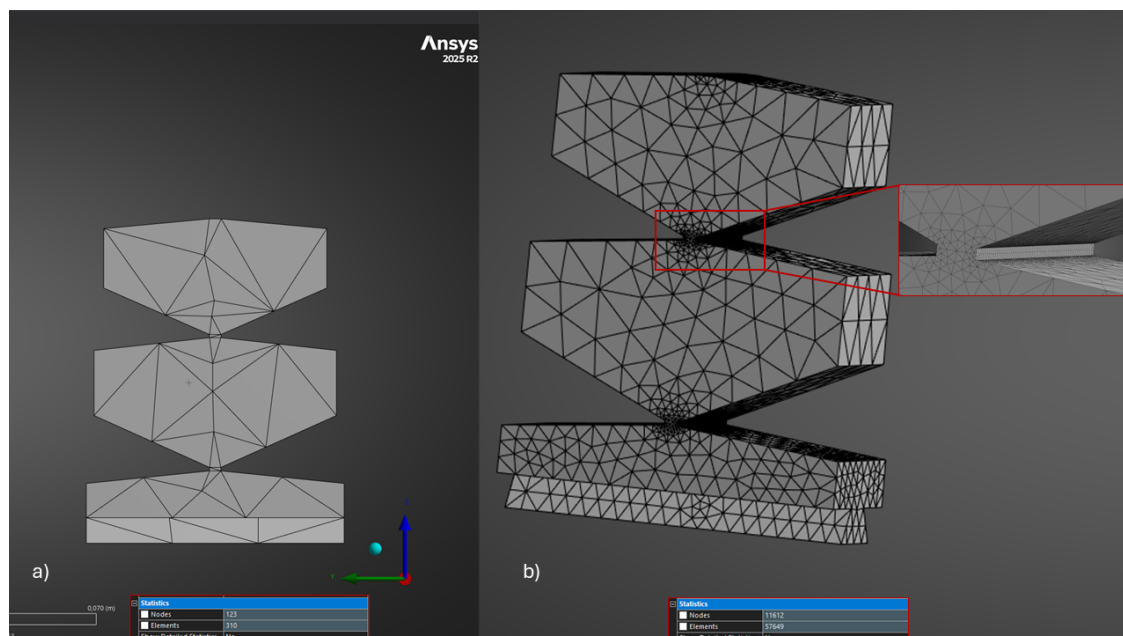


Figura 3.3. Discretizações do modelo de dois elos: (a) malha inicial; (b) malha com refinamento localizado nas zonas de flexão.

Tabela 3.2. Configurações de malha documentadas para o modelo de dois elos.

Configuração	Ordem dos elementos	Nós	Elementos
Malha inicial	Primeira	123	310
Refinamento localizado	Segunda	11 612	57 649

O refinamento nas zonas de flexão procurou representar os gradientes locais de deformação e reduzir a sensibilidade à discretização. A identificação isolada de rigidez artificial exigiria comparações adicionais com a mesma ordem de elementos e diferentes densidades de malha. O carregamento foi aplicado de forma gradual, recorrendo a subpassos de cálculo, de modo a melhorar a estabilidade do método de Newton-Raphson e reduzir a probabilidade de divergência.

Os resultados principais extraídos das simulações foram o deslocamento total, a deformação elástica equivalente e a tensão equivalente de von Mises. A tensão de von Mises foi utilizada apenas como indicador comparativo para localizar regiões críticas, uma vez que a avaliação definitiva de falha em elastómeros deve considerar também deformação admissível, resistência ao rasgamento, fadiga e propriedades experimentais do material.

3.6.5. Modelação do Cabo de Acionamento e Estratégia de Contacto

Numa fase posterior do desenvolvimento numérico, foi introduzido no modelo o cabo de acionamento da garra, com o objetivo de aproximar a simulação do princípio físico real de funcionamento do sistema. Nesta abordagem, a deformação da estrutura deixa de ser provocada apenas por uma carga ou deslocamento aplicado diretamente às vértebras, passando a resultar da tração de um cabo que percorre os canais internos da garra.

O cabo foi modelado como um corpo independente da estrutura em TPU, permitindo a criação de contactos específicos entre o cabo e os canais/furos da garra. A extremidade distal do cabo foi definida com contacto do tipo *bonded*, representando a zona de fixação do tendão à estrutura. O contacto entre o cabo e os furos foi definido como *frictionless*, de forma a permitir o deslizamento relativo do cabo durante a atuação. Esta simplificação permite estudar a transmissão de movimento sem introduzir, nesta fase, o efeito adicional do atrito.

Inicialmente foram realizados ensaios com cabo circular e furos circulares, por corresponderem de forma mais próxima à geometria física do protótipo. Contudo, esta configuração revelou elevada complexidade geométrica nas regiões de contacto, dificultando a geração de malha e aumentando a tendência para elementos distorcidos durante grandes deformações. Por esse motivo, numa etapa seguinte, foi adotada uma simplificação geométrica baseada em cabo de secção quadrada e furos quadrados. Esta alteração não pretende representar de forma exata o cabo físico, mas mantém a função mecânica principal do tendão: transmitir deslocamento à estrutura e provocar a flexão progressiva das vértebras. Consequentemente, os valores de pressão local de contacto, penetração e deslizamento obtidos neste modelo não devem ser comparados quantitativamente com o cabo circular real; a sua utilidade principal é avaliar a estabilidade da estratégia numérica e a tendência global de atuação.

Os contactos cabo–furo foram definidos manualmente e de forma individual para as regiões críticas, reduzindo a incerteza associada à deteção automática de contactos. Foi utilizada a formulação *Augmented Lagrange*, por apresentar boa robustez em

problemas de contacto não linear com controlo de penetração. A opção *Small Sliding* foi definida como *Off*, uma vez que o cabo apresenta deslocamentos relativos significativos dentro dos furos. As simulações consideradas para discussão foram realizadas com *Large Deflection* ativo, dado que o fecho da garra envolve grandes deslocamentos, rotações e alteração contínua da configuração geométrica.

Durante os testes com cabo, verificou-se que a aplicação direta de um deslocamento final elevado podia originar falhas de convergência devido às alterações bruscas do estado dos contactos. Assim, a atuação passou a ser aplicada através de *Tabular Data*, impondo o deslocamento do cabo de forma progressiva. Esta estratégia permite que o solver acompanhe gradualmente a deformação da garra e a evolução dos contactos cabo–furo, reduzindo a probabilidade de divergência em zonas críticas.

Parâmetro	Definição adotada	Justificação
Tipo de análise	<i>Static Structural</i>	Adequado para avaliar o fecho quase-estático da garra
<i>Large Deflection</i>	<i>On</i>	Necessário devido às grandes rotações e deslocamentos
Ordem dos elementos	Linear	Redução do custo computacional e melhoria da robustez de convergência
Contacto cabo–furo	<i>Frictionless</i>	Permite o deslizamento relativo do cabo durante a atuação
Formulação do contacto	<i>Augmented Lagrange</i>	Formulação robusta para contacto não linear com controlo de penetração
<i>Small Sliding</i>	<i>Off</i>	Necessário devido ao elevado deslizamento relativo entre cabo e furos
<i>Interface Treatment</i>	<i>Add Offset, No Ramping</i>	Apresentou melhor estabilidade global nas simulações corrigidas
<i>Normal Stiffness Factor</i>	1	Evita rigidez excessiva nos contactos
<i>Update Stiffness</i>	<i>Each Iteration</i>	Atualiza a rigidez de contacto ao longo da deformação
<i>Pinball Radius</i>	0,5 mm	Permite deteção adequada sem exagerar a zona de influência do contacto
<i>Auto Time Stepping</i>	<i>On</i>	Essencial para problemas com contacto e grandes deformações
<i>Initial Substeps</i>	100	Aplicação gradual do carregamento
<i>Minimum Substeps</i>	100	Evita incrementos demasiado grandes
<i>Maximum Substeps</i>	2000	Permite ao solver reduzir o incremento em zonas críticas

Tabela 3.3. Definições numéricas adotadas no modelo corrigido com cinco vértebras e cabo quadrado.

Para a solução numericamente convergente do modelo com cinco vértebras, o deslocamento máximo de 20 mm foi aplicado progressivamente de acordo com a Tabela 3.4. O tempo definido na análise não representa necessariamente o tempo físico de atuação, mas sim um parâmetro numérico para distribuir o carregamento ao longo da solução.

Tempo [s]	Deslocamento imposto no cabo [mm]
0,00	0
0,20	4
0,40	8
0,60	12
0,75	15
0,85	17
0,90	18,4
0,97	19,4
1,00	20

Tabela 3.4. Aplicação progressiva do deslocamento no cabo através de *Tabular Data* para o modelo de cinco vértebras.

Esta componente da modelação foi desenvolvida até ao modelo de cinco vértebras com cabo explícito, adotado como aproximação intermédia entre os modelos reduzidos e a garra integral. A extrapolação desta abordagem FEA para um número superior de vértebras não foi prosseguida no âmbito da dissertação, devido ao aumento significativo da complexidade dos contactos, do custo computacional e das dificuldades de convergência. A análise do comportamento cinemático do modelo integral foi posteriormente complementada através da abordagem *Rigid Dynamics* apresentada na Secção 3.7. Os parâmetros complementares de refinamento de malha, definições de solução e tempos registados nesta fase são apresentados no Apêndice G.

3.7. Modelação Multicorpo em *Rigid Dynamics*

Como complemento à abordagem FEA, foi desenvolvido um modelo multicorpo em *Rigid Dynamics* no ANSYS Mechanical. O objetivo desta abordagem foi reproduzir a cinemática global de fecho da garra *SpiRobs* com uma complexidade numérica significativamente inferior, permitindo evoluir progressivamente de configurações reduzidas até ao modelo completo. Ao contrário do FEA, as vértebras foram tratadas como corpos rígidos; por isso, o modelo não foi utilizado para prever deformação local do TPU, tensões internas ou pressão local de contacto.

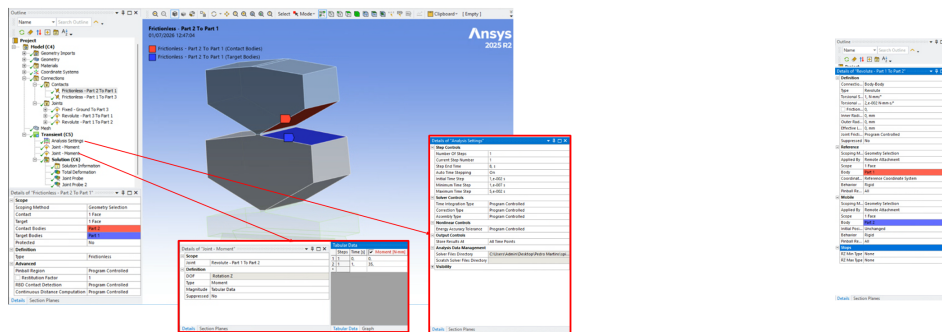
A metodologia foi organizada de forma incremental, começando por uma base fixa e uma única vértebra, seguindo-se modelos com duas, cinco e sete vértebras, até ao modelo integral. Esta progressão permitiu verificar, em cada etapa, a orientação das juntas, o sentido de rotação, a estabilidade temporal e a aplicação dos momentos antes de aumentar o número de corpos.

3.7.1. Preparação Geométrica e Definição das Juntas

O modelo contínuo foi dividido no CAD nas regiões flexíveis de dobragem, de forma que cada segmento entre duas zonas de flexão passasse a constituir um corpo independente. No modelo multicorpo, a base foi ligada ao solo através de uma *Body–Ground Joint* do tipo *Fixed/Weld*. Cada vértebra foi ligada ao corpo anterior por uma *Body–Body Joint* do tipo *Revolute*, deixando livre apenas a rotação em torno do eixo local Z , orientado perpendicularmente ao plano de fecho.

A convenção de ligação foi mantida em toda a cadeia: o corpo mais próximo da base foi definido como *reference body* e o corpo mais próximo da ponta como *mobile body*. Esta convenção permitiu preservar o sentido de rotação e evitar inversões locais quando o número de vértebras aumentou. Nas etapas iniciais, foram utilizados valores exploratórios de rigidez torsional de $1 \text{ N} \cdot \text{mm}/^\circ$ e amortecimento torsional de $0,02 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{s}/^\circ$, apenas para verificar a cinemática e reduzir oscilações.

A Figura 3.4 mostra a definição das juntas revolutas no modelo multicorpo.



(a) Exemplo de ligação entre a base e a primeira vértebra.

(b) Propriedades da junta revoluta entre corpos adjacentes.

Figura 3.4. Definição das juntas revolutas no modelo *Rigid Dynamics*.

3.7.2. Momentos Torsores Equivalentes e Rampa de Atuação

A atuação física da garra é produzida pela tração de um cabo de nylon. Para manter o modelo multicorpo leve, a trajetória do cabo e o contacto cabo–furo não foram representados explicitamente nesta abordagem. Em alternativa, a ação do cabo foi substituída por momentos torsores equivalentes aplicados às juntas revolutas.

A força máxima teórica no cabo foi estimada a partir do binário nominal do motor e do raio da polia de enrolamento. Considerando $\tau_{\text{motor}} = 0,5 \text{ N} \cdot \text{m}$ e $r_{\text{spool}} = 20 \text{ mm}$, obtém-se

$$F_{\text{cabo,max}} = \frac{\tau_{\text{motor}}}{r_{\text{spool}}} = \frac{0,5}{0,02} = 25 \text{ N}. \quad (3.1)$$

Este valor constitui uma referência ideal obtida do binário nominal e do raio adotado;

não corresponde a uma medição da tensão no cabo durante o ensaio. Foi utilizado apenas para construir uma entrada cinemática equivalente. No modelo *Rigid Dynamics*, não se pretendeu representar a distribuição física real da tensão ao longo de um cabo contínuo, uma vez que esta distribuição é afetada por atrito, contactos cabo-furo, deformação local e binário efetivamente disponível no motor durante o ensaio. Assim, assumiu-se uma força equivalente por junta de $F_{eq} = 25/18 \simeq 1,39$ N como parâmetro de modelação, destinado a reproduzir qualitativamente o fecho global da garra. A divisão por 18 não é uma lei de distribuição da tensão num cabo contínuo nem resulta de calibração experimental das juntas. Para cada junta i , foi medido no CAD o braço perpendicular d_i entre o eixo de rotação e a linha de ação idealizada do cabo, sendo o momento aplicado definido por

$$M_i = F_{eq} d_i. \quad (3.2)$$

Para obter uma rotação nominal próxima de 30° em condição de fecho livre, foi adotada a rigidez torsional equivalente

$$k_{\theta,i} = \frac{M_i}{30^\circ}. \quad (3.3)$$

Com d_i em mm, os momentos M_i são expressos em N·mm e as rigidezes $k_{\theta,i}$ em N·mm/°. Estes parâmetros não representam diretamente as propriedades constitutivas do TPU. A rigidez foi escolhida a partir da rotação nominal pretendida, pelo que obter aproximadamente 30° no modelo não constitui uma validação independente da resposta da garra. Os valores completos de d_i , M_i e $k_{\theta,i}$ são apresentados no Apêndice H.

A aplicação instantânea dos momentos provocou acelerações iniciais elevadas. Por esse motivo, foi utilizada uma rampa temporal de 8 s: 0 s com momento nulo, 2 s com $M_i/3$, 4 s com $2M_i/3$, 6 s com M_i e manutenção do momento até aos 8 s. A Figura 3.5 ilustra a definição dos contactos exploratórios, a aplicação de momentos torsores tabulados e os principais parâmetros temporais adotados.

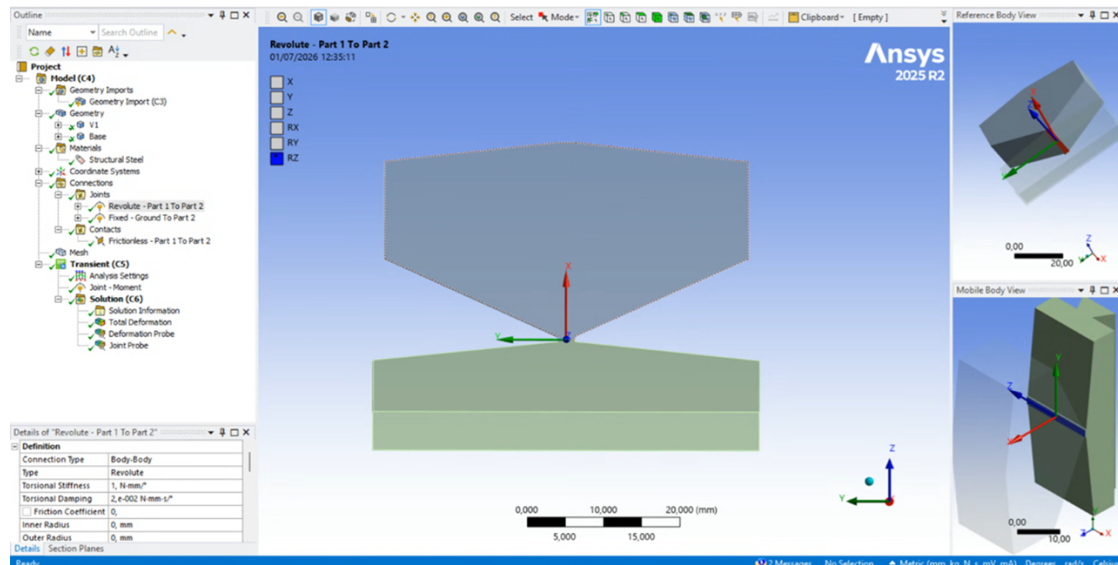


Figura 3.5. Configuração do modelo *Rigid Dynamics*.

3.7.3. Contactos, Limites Angulares e Parâmetros de Solução

Nos modelos reduzidos foram explorados contactos *frictionless* entre vértebras adjacentes. Contudo, quando várias vértebras atingiam simultaneamente a configuração de fecho, os impactos e a redução dos incrementos temporais aumentavam o custo computacional. No modelo cinemático final, os contactos vértebra–vértebra foram substituídos por limites angulares nas juntas (*joint stops*), definidos aproximadamente entre a posição aberta e 30° de fecho. Esta escolha impediu sobre-rotação sem exigir a resolução contínua do contacto entre todas as faces.

As análises foram conduzidas em *Rigid Dynamics* com *Auto Time Stepping* ativo. Nas configurações finais sem objeto, foi utilizado um tempo total de 8 s, passo inicial de 0,01 s, passo mínimo de 1×10^{-7} s e passo máximo de 0,05 s. Os parâmetros foram ajustados iterativamente nos modelos progressivos para assegurar uma evolução suave dos momentos e uma resposta estável da cadeia.

3.8. Sistema Eletromecânico de Atuação

A verificação física da garra exigiu o desenvolvimento de um sistema eletromecânico capaz de tracionar o cabo de forma controlada. O sistema foi constituído por um microcontrolador ESP32, um motor de passo NEMA 17, um driver DRV8825, uma polia impressa em 3D e um fio de pesca como elemento de tração. Na campanha experimental final foi utilizado apenas um motor para acionar o cabo principal. As

versões de código apresentadas nos apêndices mantêm algumas rotinas preparadas para controlo de dois motores, uma vez que essa possibilidade foi considerada para desenvolvimento futuro, mas essa configuração não foi utilizada nos ensaios finais descritos nesta dissertação.

3.8.1. Microcontrolador e Driver do Motor

O ESP32 foi utilizado como unidade de controlo central, sendo responsável pela leitura dos botões físicos, geração dos sinais de passo e direção para o driver DRV8825, aquisição dos sinais analógicos dos sensores FSR e envio dos dados para o computador por comunicação série.

O motor NEMA 17 foi comandado através do driver DRV8825. A alimentação de potência do motor foi fornecida por uma fonte de bancada regulável, permitindo ajustar a tensão de alimentação de acordo com os requisitos do conjunto motor-driver. A eletrónica de controlo e aquisição dos sensores foi realizada através do ESP32, garantindo a separação funcional entre o circuito de potência do motor e o circuito de leitura dos sensores.

3.8.2. Polia, Suporte e Transmissão por Cabo

A transmissão mecânica entre o motor e a garra foi realizada através de uma polia impressa em PLA, desenhada especificamente para o veio do motor. A polia apresenta um raio efetivo aproximado de 20 mm e tem como função enrolar o fio de pesca, convertendo o movimento rotativo do motor em deslocamento linear do cabo. Para um raio de enrolamento r_s , o deslocamento linear imposto ao cabo pode ser estimado por

$$\Delta L = r_s \Delta \phi, \quad (3.4)$$

onde ΔL representa o deslocamento do cabo e $\Delta \phi$ a rotação da polia em radianos. Nos ensaios de mapeamento circunferencial foram utilizadas duas condições nominais de deslocamento imposto no cabo: aproximadamente 105 mm e 115 mm. Estes valores foram definidos a partir da rotação comandada do motor e do raio efetivo inicial da polia. Como o cabo se enrola progressivamente sobre a própria polia, o raio efetivo pode sofrer pequenas alterações durante a atuação; por esse motivo, os valores são tratados como deslocamentos nominais de referência e não como medições diretas da extensão real do cabo sob carga. Após atingir o deslocamento definido para cada condição experimental, o motor permaneceu imobilizado durante a rotação completa do objeto instrumentado.

O motor foi fixo à bancada através de um suporte estrutural também impresso em PLA e desenhado especificamente para este sistema. Esta fixação teve como objetivo reduzir deslocamentos indesejados do motor durante a atuação, garantindo que a tração gerada fosse transmitida ao cabo e, conseqüentemente, à deformação da garra. Embora o sistema atual seja fixo à mesa de ensaios, prevê-se no futuro a sua integração numa versão mais compacta e portátil.

O cabo utilizado foi fio de pesca de nylon com diâmetro de 0,3 mm. Este material foi escolhido pela sua baixa espessura, flexibilidade e facilidade de passagem nos canais internos da garra. O comprimento total instalado não foi utilizado como variável experimental, uma vez que a condição de atuação foi definida pelo deslocamento imposto no cabo, correspondente a 105 mm ou 115 mm consoante a condição analisada.

3.8.3. Interface de Comando

A interface de comando foi composta por três microbotões. Dois botões foram utilizados para controlar o movimento do motor em sentidos opostos, permitindo abrir ou fechar a garra. O terceiro botão foi utilizado para iniciar a aquisição de uma amostra dos sensores de força.

Numa fase inicial, o sistema foi programado para executar um curso fixo de atuação. No entanto, esta abordagem revelou-se pouco adequada, uma vez que objetos de diferentes dimensões exigem diferentes níveis de aperto. Além disso, um curso fixo poderia impor deformações excessivas à garra em TPU ou gerar tensões demasiado elevadas no cabo.

Por esse motivo, foi adotado um controlo momentâneo. Nesta configuração, o motor apenas se move enquanto o operador mantém pressionado o botão correspondente. Esta solução permite ajustar manualmente o nível de fecho da garra, interromper a atuação no instante desejado e aumentar a segurança operacional do sistema. A evolução do sistema de aquisição e controlo encontra-se documentada nos Apêndices D a F: o Apêndice D apresenta o código inicial de aquisição manual, o Apêndice E apresenta a versão do ESP32 preparada para comunicação com a interface e o Apêndice F reúne o código Python da interface gráfica utilizada na aquisição e exportação dos dados.

3.9. Sistema de Sensores e Calibração FSR

A medição experimental foi realizada com dois sensores resistivos de força FSR 406 (*Force-Sensing Resistors*), instalados no interior do objeto cilíndrico instrumentado. Os sensores utilizados correspondem à referência FSR 406 adquirida através da Mauser, cuja informação comercial indica uma área sensível de aproximadamente $38,1 \text{ mm} \times 38,1 \text{ mm}$ e uma gama de detecção de 100 g a 10 kg [37]. A documentação técnica da série FSR 400 da Interlink Electronics descreve estes dispositivos como sensores resistivos de película polimérica cuja resistência diminui com o aumento da força aplicada e salienta que a resposta depende da interface mecânica e do circuito de medição [38].

Os dois sensores foram calibrados individualmente, uma vez que os FSR apresentam resposta não linear, histerese e variabilidade entre unidades. Na fase inicial da instrumentação, foi identificada uma curva experimental de conversão para cada sensor, adotada como referência para os ensaios. Esta opção permitiu converter as leituras analógicas em massa equivalente e força com curvas próprias, em vez de utilizar apenas uma relação força–sinal de catálogo.

3.9.1. Circuito de Leitura e Aquisição Analógica

Cada FSR foi ligado ao ESP32 através de um divisor de tensão independente com uma resistência fixa de $10 \text{ k}\Omega$. O Sensor 1 foi ligado à entrada GPIO34 e o Sensor 2 à entrada GPIO35, utilizando a alimentação de 3,3 V e a referência GND do microcontrolador. O ESP32 realizou a conversão analógico-digital com resolução nominal de 12 bits, correspondente a valores brutos entre 0 e 4095.

A Figura 3.6 apresenta o circuito de leitura dos sensores.

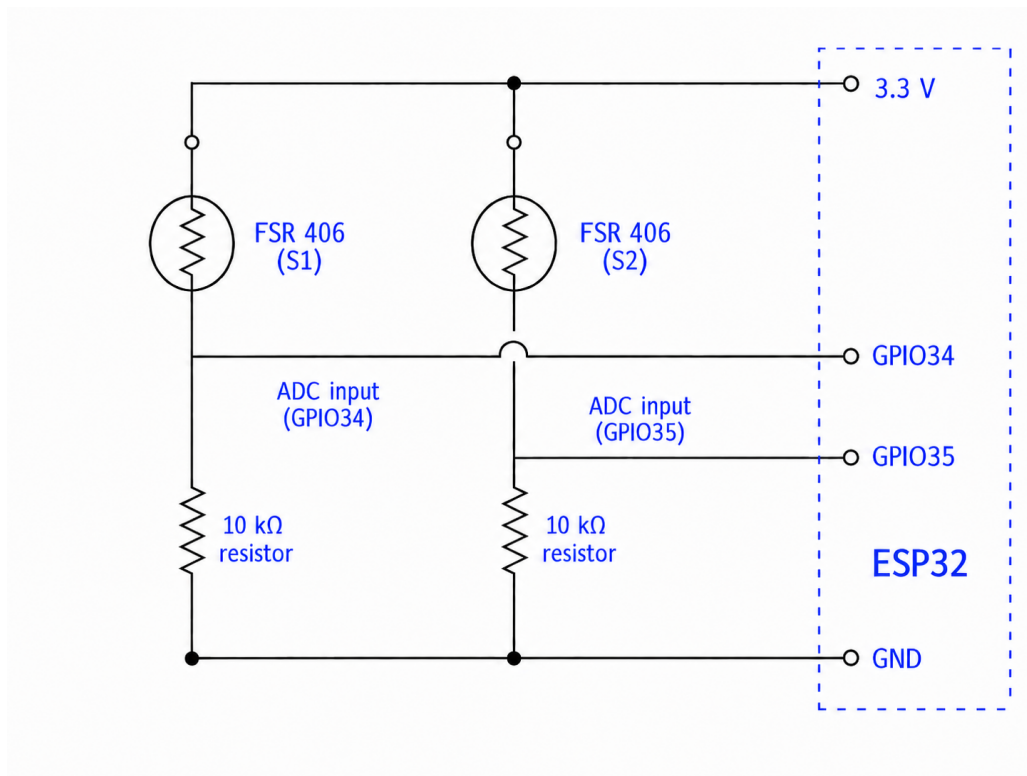


Figura 3.6. Esquema elétrico dos sensores FSR.

O código do ESP32 apresentado no Apêndice E calcula uma tara independente para cada sensor a partir da média de 50 leituras iniciais, obtidas com intervalos nominais de 10 ms. Durante a aquisição, subtrai essa tara a cada leitura ADC bruta. Valores corrigidos inferiores a 25 contagens são colocados a zero; aos restantes aplica-se a função polinomial do respetivo sensor. A função devolve massa nula para entrada não positiva e limita a zero eventuais massas negativas.

Em cada posição angular, são recolhidas 200 leituras por sensor, com intervalo nominal de 10 ms, correspondendo a uma janela de aproximadamente 2 s e frequência próxima de 100 Hz. A massa é calculada para cada leitura corrigida e só depois é feita a média das 200 massas; esta média é convertida em força. Para um polinómio de segunda ordem, esta sequência não é, em geral, equivalente a aplicar a curva à média das leituras ADC. A aquisição dos dados médios deve distinguir-se do sinal instantâneo utilizado para visualização na interface.

Nas equações de conversão, S_i designa a entrada ADC efetivamente fornecida ao polinómio: a leitura após subtração da tara e aplicação do limiar de 25 contagens. A média ADC enviada pelo programa de aquisição também resulta dessas leituras corrigidas. Os valores ADC utilizados na calibração seguem esta referência de aquisição. A tara eletrónica do ADC e a tara da balança são operações distintas. Na conversão dos ensaios, mantém-se a sequência implementada no código: primeiro a conversão de cada leitura, depois a média das massas.

3.9.2. Procedimento de Calibração

A calibração foi realizada com uma balança de resolução indicada de 0,01 g, um recipiente de fundo plano e adição progressiva de água. O sensor foi colocado sobre a balança com a área ativa orientada para cima, sendo o recipiente posicionado diretamente sobre a região sensível. A balança foi tarada com a montagem completa antes da aplicação das cargas.

Em cada nível de carga, foram registados a massa indicada pela balança e a média temporal dos valores ADC tratados pelo procedimento de aquisição descrito na Secção 3.9.1. Após o acionamento do botão, eram recolhidas 200 leituras por sensor numa janela de aproximadamente 2 s. Os incrementos de massa não foram fixos, procurando-se distribuir os pontos ao longo da gama abrangida pela calibração.

A Figura 3.7 ilustra o procedimento de calibração experimental.



Figura 3.7. Processo de calibração dos sensores FSR.

Os pares massa–ADC foram ajustados por regressão polinomial de segunda ordem. As equações seguintes apresentam os coeficientes publicados para as curvas utilizadas na conversão; no código do Sensor 1 são conservadas mais casas decimais, como documentado no Apêndice E:

$$m_1 = 2,91 \times 10^{-4} S_1^2 + 0,453 S_1 + 44,54, \quad (3.5)$$

$$m_2 = 5,92 \times 10^{-5} S_2^2 - 0,0576 S_2 + 68,90, \quad (3.6)$$

onde m_1 e m_2 representam as massas equivalentes em gramas, e S_1 e S_2 as entradas ADC das respectivas curvas. A calibração do Sensor 1 contém 20 pontos, entre 112,69 e 1289,99 g; a do Sensor 2 contém 15 pontos, entre 48,44 e 222,95 g. Os coeficientes de determinação superiores a 0,98 descrevem a proximidade global do ajuste, mas não demonstram, isoladamente, a exatidão da medição.

A reaplicação das Equações 3.5 e 3.6 aos pontos tabulados produziu raízes do erro quadrático médio (RMSE) de aproximadamente 43,0 g e 5,80 g, respetivamente, e resíduos absolutos máximos de 99,4 g e 10,5 g. Estes valores caracterizam os resíduos das equações publicadas face aos pontos de calibração; não são uma estimativa da incerteza total nem permitem quantificar o erro fora da gama calibrada. O procedimento de cálculo, as métricas e os resíduos por ponto encontram-se na Secção A.4. Foi utilizado um único conjunto de pontos de calibração por sensor, comum ao artigo publicado [9] e ao tratamento dos ensaios desta dissertação. Não foram realizados ciclos independentes de repetição da calibração, de carga e descarga, pelo que a repetibilidade, a histerese e a deriva não foram quantificadas separadamente. A média temporal de cada ponto reduz flutuações durante a leitura, mas não substitui ciclos independentes de calibração. A realização desses ciclos constitui uma melhoria futura da caracterização metrológica do sistema.

A gama nominal de deteção do componente indicada pelo fornecedor [37] deve distinguir-se da gama coberta pela calibração própria. A resposta depende também da mecânica de aplicação da carga e do circuito de leitura [38]. No Sensor 2, a equação foi utilizada acima de 222,95 g até estimativas próximas de 499 g. Essa extrapolação afeta 1138 das 1152 leituras médias dos ensaios, aproximadamente 98,8%, abrangendo as quatro condições experimentais. Assim, os resultados devem ser interpretados como estimativas com incerteza acrescida e não como medições validadas em toda a gama. A Secção 4.5.5 identifica as condições afetadas e avalia a sensibilidade dos indicadores à conversão adotada. Esta análise não substitui uma calibração que cubra toda a gama utilizada.

3.9.3. Conversão para Força Resultante

A massa equivalente foi convertida em força através de

$$F_i = m_i \cdot 0,00981, \quad (3.7)$$

onde F_i representa a força indicada por cada sensor em newtons e m_i a massa equivalente em gramas. Para cada posição angular, define-se um indicador escalar operacional, designado nesta dissertação por força resultante medida, através da

soma das duas indicações não negativas:

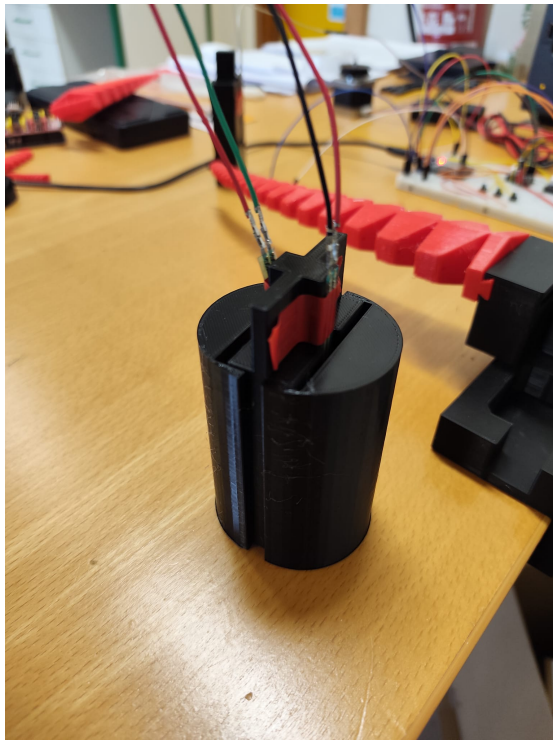
$$F_{\text{med}}(\theta) = F_{S1}(\theta) + F_{S2}(\theta). \quad (3.8)$$

O símbolo F_{med} mantém esta definição ao longo da dissertação. Como os sensores estão instalados em posições aproximadamente opostas, as suas direções de medição não coincidem. A soma dos valores escalares não corresponde à resultante vetorial das forças exteriores sobre o objeto, nem demonstra que toda a carga de contacto seja transmitida exclusivamente aos dois sensores. A sua utilização é comparativa e depende da montagem e da cadeia de calibração descritas.

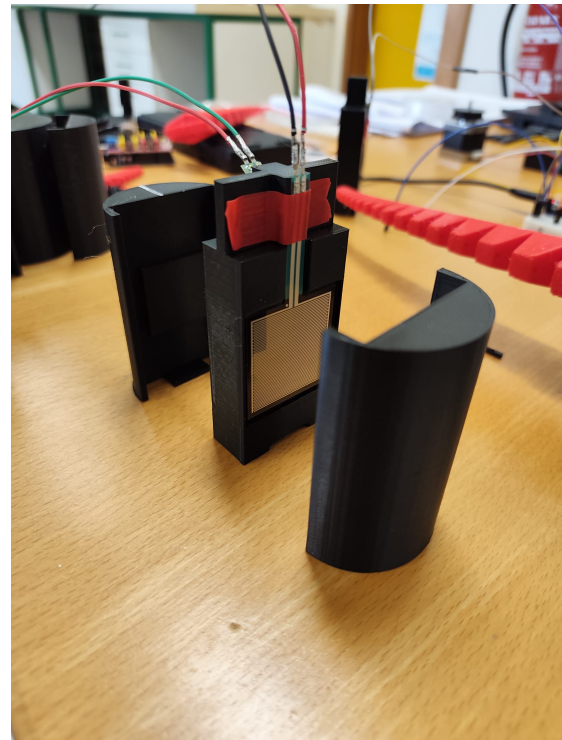
3.10. Objeto Experimental Instrumentado e Transferência de Carga

Foi desenvolvido um objeto cilíndrico modular em PLA, com diâmetro exterior de 50 mm e altura aproximada de 80 mm. O conjunto foi dividido em duas meias-cascas e integrou dois sensores FSR 406 em posições opostas, separadas aproximadamente por 180°. Cada sensor foi colocado entre superfícies internas planas de 30 mm × 30 mm, evitando a sua flexão direta sobre a superfície cilíndrica.

A Figura 3.8 apresenta o objeto instrumentado montado e uma vista com as meias-cascas afastadas. A segunda vista permite observar o suporte interno, a superfície plana de instalação de um dos sensores e as ligações elétricas.



(a) Objeto montado.



(b) Vista com as meias-casas afastadas.

Figura 3.8. Objeto cilíndrico instrumentado: configuração montada e componentes afastados para observar a montagem interna de um dos sensores FSR.

A garra aplica sobre a casca exterior uma distribuição de carga desconhecida e espacialmente variável. Cada FSR responde à compressão transmitida à sua superfície interna plana através da montagem. Essa transmissão depende das direções das forças exteriores, dos pontos de apoio, do atrito e dos possíveis caminhos de carga entre as peças. Não foi demonstrado experimentalmente que a totalidade da carga exterior atravessasse os sensores ou que a relação entre pressão exterior e leitura seja invariável com a orientação. Por isso, as leituras não permitem reconstruir um campo de pressão espacialmente resolvido.

A Figura 3.9 ilustra o princípio pretendido de transmissão de carga. Trata-se de um esquema conceptual, não de uma validação do equilíbrio e dos caminhos de carga na montagem real.

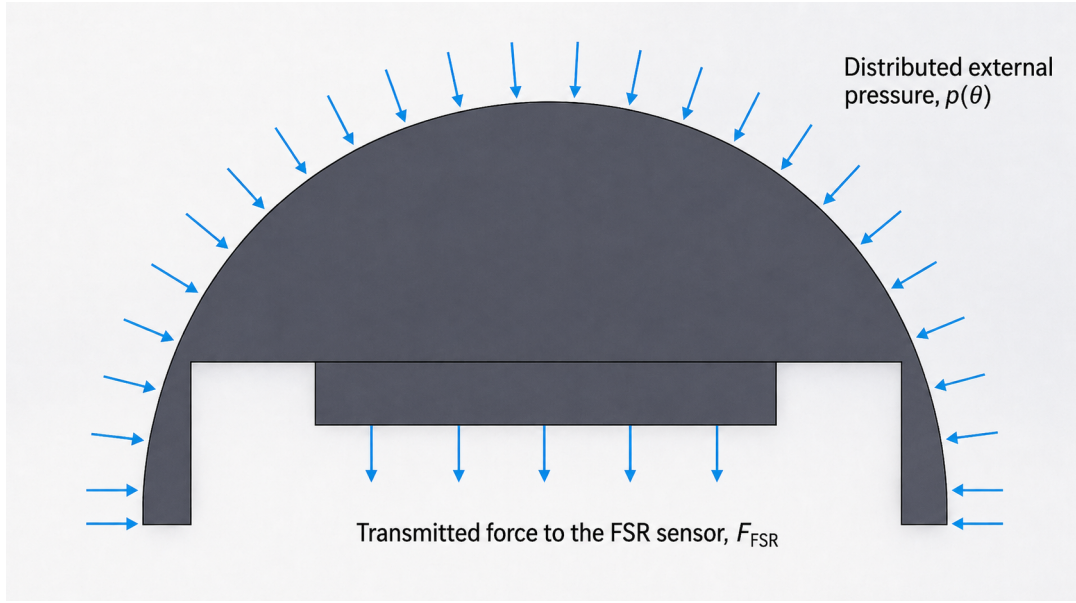


Figura 3.9. Esquema conceptual da transmissão de carga para o FSR.

Para distinguir a grandeza física contínua do indicador medido, a resultante vetorial das forças normais de contacto numa orientação θ pode escrever-se como

$$\mathbf{R}_n(\theta) = \int_{A(\theta)} p(\theta, s) \mathbf{n}(\theta, s) dA, \quad (3.9)$$

onde s identifica uma posição na superfície de contacto, $p(\theta, s)$ é a pressão local nessa posição, $A(\theta)$ a região de contacto e $\mathbf{n}(\theta, s)$ a normal unitária orientada no sentido da força de compressão aplicada ao objeto. Esta expressão considera apenas a componente normal; as forças tangenciais de atrito exigiriam termos adicionais. Numa superfície cilíndrica, as normais variam ao longo do contacto, pelo que a integração escalar de p não é, em geral, o módulo de $\mathbf{R}_n$.

Relacionar esta distribuição com cada leitura FSR exigiria conhecer as projeções nas direções sensíveis, o equilíbrio de cada casca e os caminhos de transmissão de carga. Essas condições não foram caracterizadas quantitativamente. Consequentemente, não se assume a igualdade entre F_{med} , o módulo da resultante vetorial ou a integral escalar da pressão exterior.

3.10.1. Área de Referência e Pressão Média Equivalente

Para normalizar o indicador escalar F_{med} e permitir a comparação entre posições angulares e ensaios repetidos, foi definida uma área de referência a partir do modelo CAD. Foram selecionadas as faces exteriores das vértebras consideradas potencialmente envolvidas no contacto com o cilindro, obtendo-se

$$A_{\text{ref}} = 1233,41 \text{ mm}^2 = 1,23341 \times 10^{-3} \text{ m}^2. \quad (3.10)$$

O valor indicado conserva a precisão numérica da seleção no CAD para permitir reproduzir os cálculos. Não representa uma medição da área efetiva de contacto com essa exatidão; na discussão, pode ser referido de forma arredondada como aproximadamente $1,23 \times 10^3 \text{ mm}^2$.

A Figura 3.10 mostra a área CAD usada como referência.

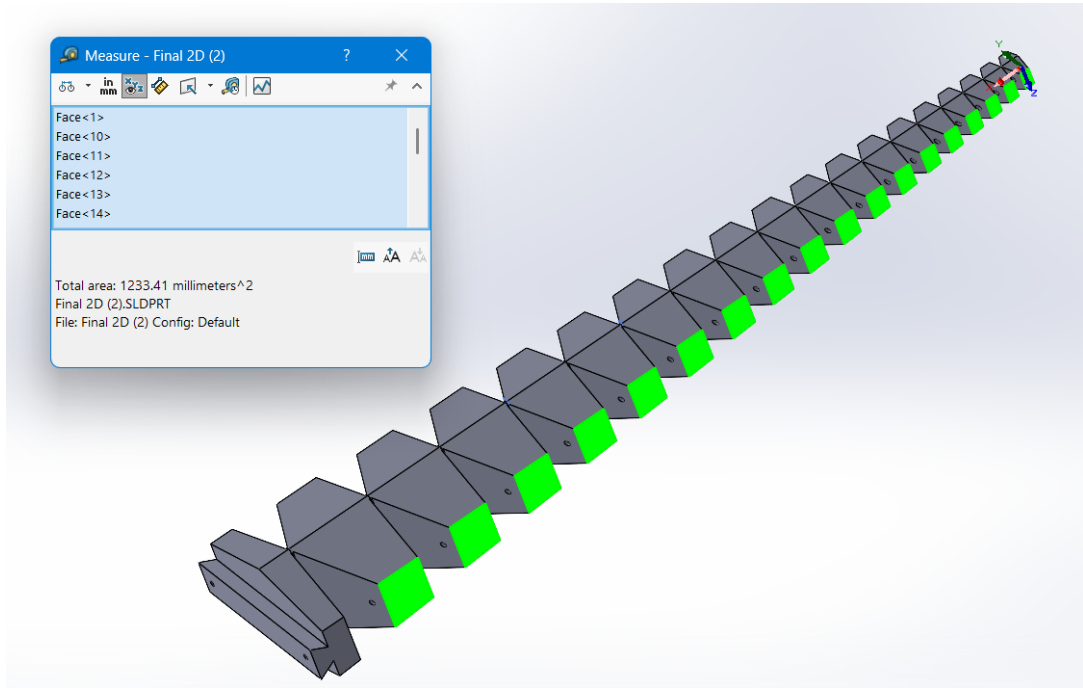


Figura 3.10. Estimativa CAD da área de referência.

A pressão média equivalente foi calculada por

$$p_{\text{eq}}(\theta) = \frac{F_{\text{med}}(\theta)}{A_{\text{ref}}}. \quad (3.11)$$

A grandeza p_{eq} é uma normalização do indicador escalar de carga pela área de referência. A área efetiva pode variar com a deformação e a posição angular, enquanto A_{ref} permanece constante. A equivalência dimensional a uma pressão não transforma esta métrica numa medição local ou numa média espacial demonstrada da pressão real. Como a área de referência é constante, as variações percentuais de F_{med} e p_{eq} são iguais e não constituem resultados independentes.

A Figura 3.11 mostra o posicionamento do objeto na garra.

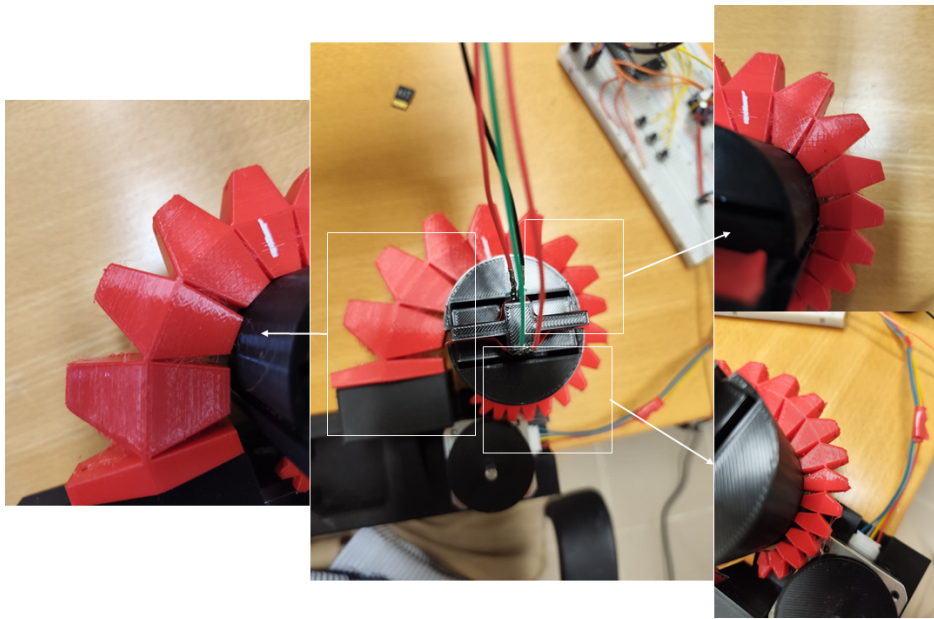


Figura 3.11. Contacto entre a garra e o objeto instrumentado.

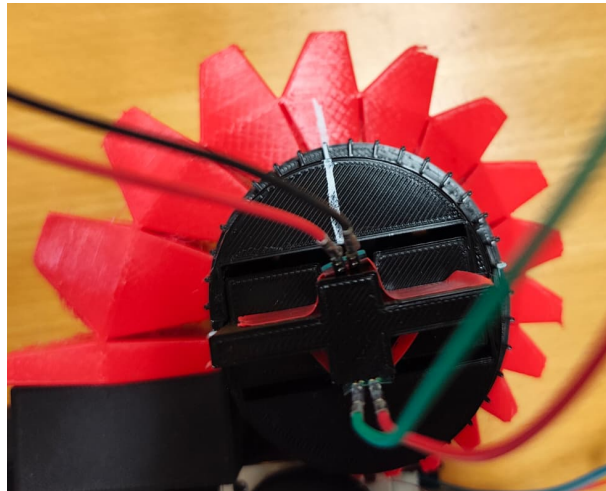
3.11. Procedimento Experimental de Mapeamento Circunferencial

Em cada ensaio, o objeto instrumentado foi colocado no interior da garra e o motor foi acionado até impor o deslocamento definido para a condição experimental em análise, correspondente a aproximadamente 105 mm ou 115 mm. Após a obtenção de uma preensão estável, a posição do motor foi mantida constante durante toda a volta, assegurando uma condição nominal de atuação fixa para cada ensaio.

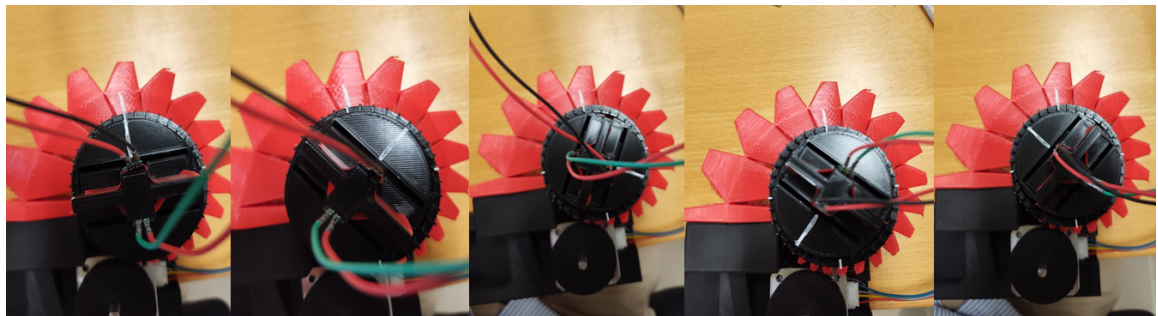
O objeto foi rodado manualmente no interior da garra fechada com o auxílio do disco de indexação angular. A posição inicial foi definida pelo alinhamento visual de uma marca numa única vértebra da garra com a referência da peça de controlo da rotação, documentado na Figura 3.12a. Esse alinhamento foi adotado como zero para a leitura do disco de indexação. A marca estabelece uma referência inicial comum, sem identificar todas as vértebras em contacto nem associar cada pico de força a uma vértebra específica. A rotação foi realizada sempre no mesmo sentido, em incrementos de 5° ao longo de 360° , totalizando 72 posições por ensaio. Após cada rotação, aguardou-se a estabilização visual da montagem antes da aquisição da amostra. Não ficou documentado um intervalo de espera fixo e cronometrado; este critério visual não permite garantir o mesmo estado de acomodação viscoelástica em todas as posições. O ângulo θ representa a orientação do objeto instrumentado relativamente à referência inicial da garra; durante cada varrimento mantém-se fixa a posição comandada do motor. Esta condição não garante que a geometria

deformada ou a área de contacto se mantenham constantes. Como os sensores permanecem fixos no interior do objeto, a rotação alinha sucessivamente diferentes regiões da interface garra–objeto com as zonas de medição.

A Figura 3.12 documenta a referência física de 0° e exemplifica o procedimento de rotação manual.



(a) Referência de 0°: alinhamento da marca numa vértebra com a referência da peça de controlo da rotação.



(b) Exemplos de posições durante a rotação manual do objeto.

Figura 3.12. Referência de zero e sequência do mapeamento circunferencial. A fotografia em (a) documenta o alinhamento inicial; não constitui uma medição da área de contacto.

Foi adotada uma estimativa operacional de $\pm 2,5^\circ$ para o posicionamento, correspondente a metade do incremento angular. Este valor é uma hipótese de leitura do disco, não uma incerteza determinada por calibração angular nem um limite experimentalmente confirmado. Mantiveram-se o suporte, a referência inicial da garra, o deslocamento nominal do cabo, o número de amostras, o intervalo nominal de aquisição e o procedimento de processamento.

O mapeamento completo foi repetido quatro vezes. Para cada ângulo, foram calculados a média das quatro forças resultantes, o desvio-padrão amostral e o coeficiente de variação,

$$\bar{F}(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F_j(\theta), \quad n = 4, \quad (3.12)$$

$$s_F(\theta) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [F_j(\theta) - \bar{F}(\theta)]^2}{n - 1}}, \quad (3.13)$$

$$CV(\theta) = 100 \frac{s_F(\theta)}{\bar{F}(\theta)}. \quad (3.14)$$

Este tratamento descreve a variabilidade entre quatro varrimentos do mesmo exemplar. Não estima a variabilidade entre protótipos independentes, e o desvio-padrão entre repetições não inclui, por si só, o erro sistemático da calibração. A consistência das posições angulares dos picos é analisada na Secção 4.5.4; a interpretação geométrica permanece limitada pela ausência de uma correspondência experimental inequívoca entre ângulo e vértebra em contacto.

3.11.1. Comparação entre Configurações e Deslocamentos

Após a conclusão da campanha inicial de mapeamento circunferencial, o protocolo experimental foi consolidado para comparar duas configurações fabricadas da garra e o efeito do deslocamento imposto ao cabo. Foram analisadas quatro condições experimentais principais: 20% de preenchimento com deslocamento de 105 mm, 20% de preenchimento com deslocamento de 115 mm, 100% de preenchimento com deslocamento de 105 mm e 100% de preenchimento com deslocamento de 115 mm.

Em todas as condições foram utilizados o mesmo objeto instrumentado, os mesmos dois sensores FSR, as mesmas equações de calibração e a mesma área de referência de 1233,41 mm². Cada ensaio incluiu 72 posições angulares, distribuídas entre 0° e 355° com incrementos de 5°, e uma janela de aquisição de 2 s por posição. Para cada condição foram realizados quatro varrimentos completos, permitindo calcular, em cada posição angular, a força média, o desvio-padrão amostral, a pressão média equivalente e o coeficiente de variação.

Em todas as condições, o indicador F_{med} e a pressão média equivalente foram calculados pelas Equações 3.8 e 3.11, com a mesma área de referência. Mantêm-se, portanto, os limites de interpretação definidos nas Secções 3.9.3 e 3.10.1, bem como a limitação de calibração do Sensor 2 analisada na Secção 4.5.5.

A comparação entre as configurações fabricadas com 20% e 100% de preenchimento, mantendo o mesmo deslocamento, permite avaliar diferenças de resposta entre os

protótipos produzidos, mas não isola exclusivamente o efeito do preenchimento, uma vez que existiram diferenças adicionais de fabrico. A comparação entre 105 mm e 115 mm, mantendo o mesmo protótipo, permite avaliar de forma mais direta a influência da variável de atuação. A diferença percentual entre duas condições foi calculada por

$$\Delta X(\%) = 100 \frac{X_{\text{comp}} - X_{\text{ref}}}{X_{\text{ref}}}, \quad (3.15)$$

onde X_{ref} representa o indicador da condição de referência e X_{comp} o indicador da condição comparada.

Este procedimento constitui um sistema de mapeamento experimental da interação entre a garra e o objeto. O método não mede o campo contínuo e local de pressão, mas permite obter perfis circunferenciais discretos da força resultante e da pressão média equivalente, possibilitando comparar configurações de fabrico e condições de atuação em termos de intensidade global de contacto e repetibilidade. Os dados completos das quatro repetições de cada condição são apresentados no Apêndice B, enquanto a síntese global e os perfis médios por ângulo são reunidos no Apêndice C.

3.12. Desenvolvimento de uma Garra Pneumática em Silicone

Como segunda linha de desenvolvimento associada ao tema das garras bio-inspiradas, foi iniciado o fabrico de uma segunda arquitetura de preensão macia baseada em dedos pneumáticos moldados em silicone. Nesta configuração, a introdução de ar pressurizado nas câmaras internas provoca a expansão diferencial das paredes do atuador e, consequentemente, a curvatura do dedo. Esta abordagem permitiu explorar uma estratégia de atuação distinta da atuação por cabo e, simultaneamente, desenvolver competências de fabrico por moldagem de elastómeros.

A linha pneumática foi organizada em duas etapas de trabalho. A primeira correspondeu ao fabrico dos dedos pneumáticos e do respetivo suporte modular, recorrendo a moldes e a um procedimento geral de moldagem baseados num tutorial prático disponível publicamente. A segunda correspondeu ao desenvolvimento de moldes próprios para produzir provetes de silicone, com geometria baseada na norma ISO 37, de modo a iniciar a caracterização mecânica do material utilizado. Esta segunda etapa foi considerada necessária porque o silicone adquirido não dispunha de uma ficha técnica completa com parâmetros constitutivos adequados para simulação

por elementos finitos.

Embora o eixo experimental principal da dissertação seja a garra *SpiRobs*, o desenvolvimento da garra pneumática é apresentado como uma segunda linha de trabalho dentro do mesmo tema e como base para trabalho futuro. Ainda assim, a documentação do processo é relevante, pois demonstra a passagem de uma solução inspirada num tutorial para uma tentativa de caracterização própria do material, com vista à sua posterior utilização em modelos FEA.

3.12.1. Referência do Processo e Adaptações de Projeto

O procedimento geral de moldagem dos dedos pneumáticos foi baseado no tutorial audiovisual *DIY a Food-Grade Soft Gripper for Your Delta X S Robot for Just \$10*, disponibilizado na plataforma YouTube.¹ Os moldes dos dedos foram utilizados de acordo com a solução apresentada nessa referência, servindo sobretudo para compreender a sequência de produção dos atuadores pneumáticos em silicone.

Apesar de os moldes dos dedos terem sido utilizados com base no tutorial, alguns componentes rígidos associados à montagem tiveram de ser adaptados. As peças STL disponibilizadas pelo autor foram modificadas em SolidWorks, nomeadamente através da divisão de alguns componentes em partes mais simples, de forma a facilitar a impressão e a permitir a integração com os suportes desenvolvidos no âmbito desta dissertação. Esta adaptação foi necessária para melhorar a imprimibilidade das peças, permitir a fixação por parafusos e assegurar um alinhamento mais adequado dos dedos no suporte.

O suporte inicial para três dedos foi desenhado especificamente pelo autor e fabricado em PLA. Esta configuração foi escolhida como primeira solução funcional por ser suficiente para demonstrar a montagem modular dos dedos pneumáticos. A extensão para suportes com maior número de dedos, nomeadamente seis dedos, foi mantida como proposta de desenvolvimento futuro.

3.12.2. Silicone Utilizado e Preparação da Mistura

Os dedos pneumáticos e os provetes de caracterização foram produzidos com silicone líquido bicomponente da marca SANAAA. A informação comercial do produto indica uma dureza nominal Shore A 15 e uma proporção de mistura de 1:1 em massa.² A dureza deve ser interpretada como uma indicação nominal do fabricante, uma vez que não foi realizada uma medição independente de dureza após cura.

¹Tutorial consultado: <https://www.youtube.com/watch?v=Eo3y-UqJ100>.

²Informação comercial consultada na página da marca SANAAA na Amazon.es: <https://www.amazon.es/stores/page/428AFA46-EE30-428B-B3A4-49B129894731>.

A Figura 3.13 identifica o silicone utilizado nesta componente.



Figura 3.13. Silicone utilizado na garra pneumática.

A pesagem dos componentes foi realizada numa balança de laboratório. Cada componente foi vertido a partir da respetiva embalagem para um gobelé até se atingir a massa pretendida, mantendo a proporção 1:1. No fabrico dos dedos pneumáticos foram preparados dois lotes: o primeiro com 20 g do componente A e 20 g do componente B, totalizando 40 g, e o segundo com 15 g de cada componente, totalizando 30 g. Após a pesagem, os componentes foram misturados manualmente até se obter uma aparência visualmente homogênea. Por se tratar de um processo manual, a homogeneidade e a introdução de bolhas dependem da técnica de mistura, constituindo uma fonte de variabilidade experimental.

A Figura 3.14 mostra a pesagem dos componentes antes da mistura.

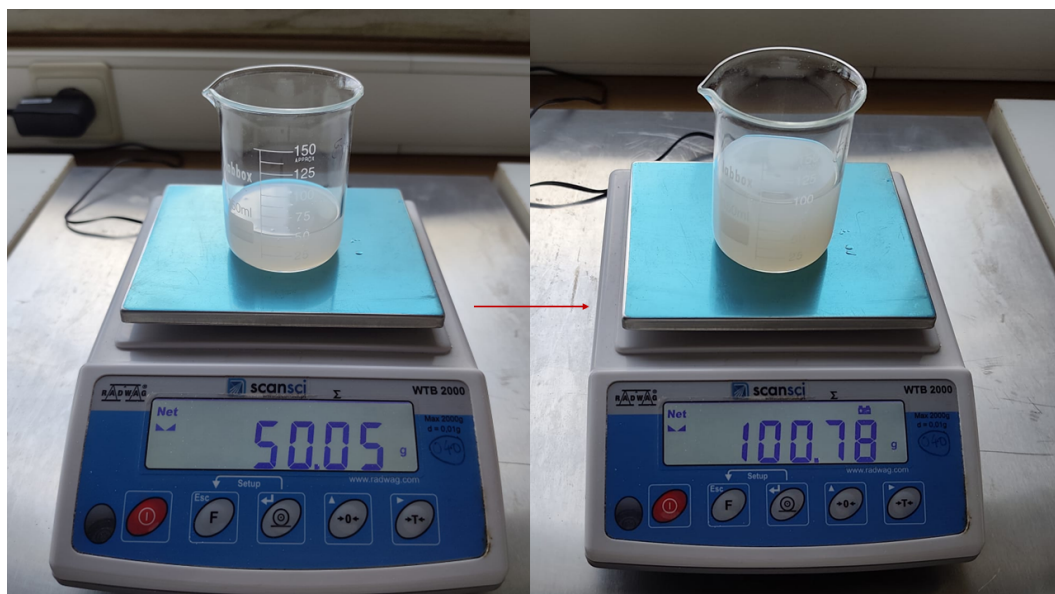


Figura 3.14. Pesagem dos componentes do silicone.

Após a mistura, o silicone foi colocado num sistema simples de pressão reduzida, constituído por um saco de armazenamento com válvula de extração de ar. O silicone permaneceu nesse ambiente durante, pelo menos, 10 min, sendo depois inspecionado visualmente para avaliar a presença de bolhas. Esta inspeção foi auxiliada pela incidência de luz sobre a superfície do silicone, de forma a tornar mais visíveis bolhas remanescentes por reflexão. Como a pressão interna não foi medida, este procedimento deve ser entendido como uma técnica qualitativa de redução de bolhas, e não como desgaseificação em vácuo laboratorial controlado.

A Figura 3.15 apresenta o sistema simples usado para reduzir bolhas.



Figura 3.15. Sistema simples de pressão reduzida.

3.12.3. Moldagem dos Dedos Pneumáticos

O molde dos dedos pneumáticos é constituído por três componentes principais, identificados como peças 1, 2 e 3, e por pinos auxiliares utilizados durante o alinhamento e a formação da região de ligação pneumática. A peça 1 funciona como elemento base comum às duas fases de moldagem. Na primeira fase é combinada com a peça 3 e com os pinos auxiliares, enquanto na segunda fase é combinada com a peça 2 para fechar a geometria do atuador e completar as câmaras internas.

A Figura 3.16 identifica os componentes do molde dos dedos.

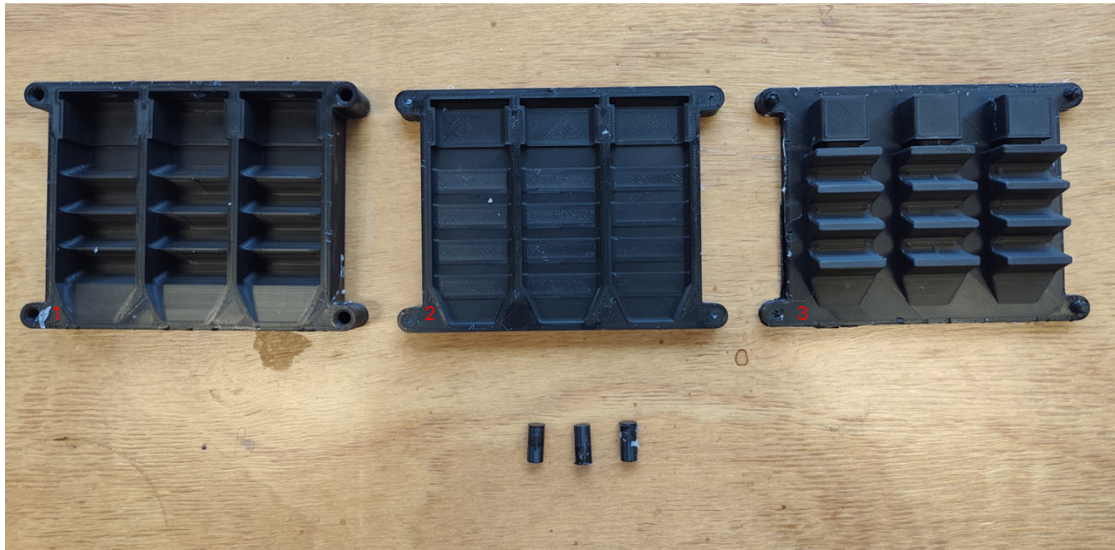


Figura 3.16. Componentes do molde dos dedos pneumáticos.

Na primeira fase, o silicone foi vertido no conjunto formado pelas peças 1 e 3. Esta etapa permitiu formar a primeira metade do dedo e preservar a região destinada à ligação pneumática. O silicone permaneceu em cura à temperatura ambiente durante aproximadamente 7 h. Após este período, a primeira metade apresentou rigidez suficiente para permitir a continuação do processo sem deformação aparente significativa.

A Figura 3.17 mostra a primeira fase de moldagem.



Figura 3.17. Primeira fase da moldagem dos dedos.

Na segunda fase, a peça 2 foi utilizada para completar a geometria exterior e fechar

as câmaras pneumáticas internas. Esta fase permaneceu em cura até à manhã do dia seguinte, por conveniência operacional, uma vez que não seria viável proceder à desmoldagem durante a noite. Após a cura, os dedos foram removidos dos moldes sem necessidade de desmoldante ou esforço adicional significativo.

A Figura 3.18 mostra a segunda fase de moldagem.



Figura 3.18. Segunda fase da moldagem dos dedos.

A Figura 3.19 apresenta o preenchimento do molde e os primeiros dedos obtidos após as duas fases de cura. Os três dedos produzidos ficaram completos, sem bolhas visíveis relevantes, sem fugas evidentes durante a insuflação manual e com geometria compatível com a montagem no suporte.



Figura 3.19. Moldagem e desmoldagem dos dedos pneumáticos.

3.12.4. Fabrico dos Componentes Rígidos e Integração Pneumática

Os moldes, os encaixes dos dedos e o suporte foram fabricados em PLA por impressão 3D. Foi utilizada uma temperatura do bico extrusor de 200 °C e uma temperatura da mesa de 50 °C. A velocidade de impressão foi ajustada diretamente na impressora como 80% da velocidade configurada, não tendo sido registado o valor absoluto em mm/s.

A Figura 3.20 apresenta a impressão dos encaixes rígidos.

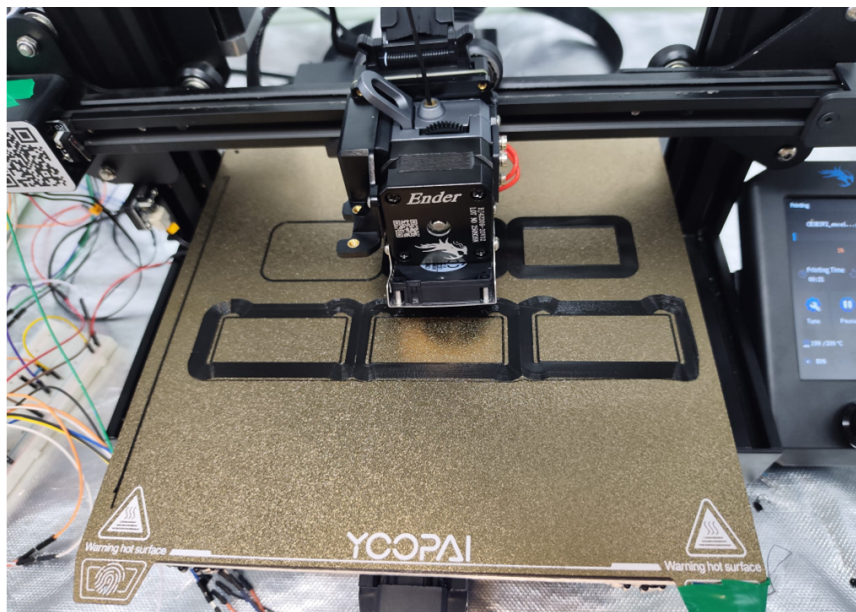


Figura 3.20. Impressão dos encaixes rígidos.

A alimentação pneumática de cada dedo foi prevista através de tubo flexível com 6 mm de diâmetro exterior (OD) e 4 mm de diâmetro interior (ID), utilizando conectores pneumáticos de encaixe rápido compatíveis com tubo de 6 mm OD e rosca M5. Cada dedo apresenta aproximadamente 89 mm de comprimento e 32 mm de largura, não incluindo a projeção do conector pneumático. A Figura 3.21 apresenta a montagem de um dos atuadores no respetivo encaixe e suporte rígido. O suporte foi ainda dimensionado de forma compatível com a montagem preliminar no robô disponível no laboratório, embora a operação ativa da garra dependa de um sistema pneumático regulado.

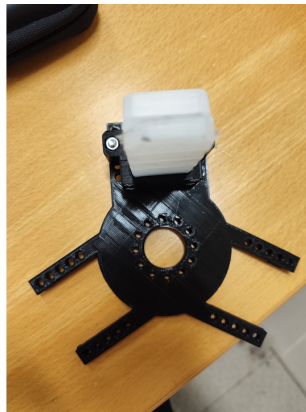


Figura 3.21. Dedo pneumático montado no suporte.

A Tabela 3.5 resume os principais parâmetros documentados para o fabrico e montagem da garra pneumática em silicone.

Tabela 3.5. Parâmetros de fabrico e montagem da garra pneumática em silicone.

Parâmetro	Valor ou condição adotada
Silicone	SANAAA, dureza nominal Shore A 15
Proporção de mistura	1:1 em massa
Primeiro lote dos dedos	40 g no total: 20 g do componente A + 20 g do componente B
Segundo lote dos dedos	30 g no total: 15 g do componente A + 15 g do componente B
Técnica de redução de bolhas	Pressão reduzida qualitativa em saco com extração de ar
Cura da primeira fase	Aproximadamente 7 h à temperatura ambiente
Cura da segunda fase	Até à manhã seguinte, por conveniência operacional
Material dos moldes, encaixes e suporte	PLA
Temperatura do bico extrusor	200 °C
Temperatura da mesa	50 °C
Velocidade de impressão	80% da velocidade configurada na impressora
Dimensões aproximadas de cada dedo	89 mm de comprimento por 32 mm de largura
Tubo pneumático	6 mm OD × 4 mm ID
Conector pneumático	Encaixe rápido para tubo de 6 mm OD com rosca M5

3.12.5. Caracterização Mecânica Preliminar do Silicone

Para além do fabrico dos dedos pneumáticos, foi iniciado um procedimento de caracterização mecânica do silicone utilizado. Esta etapa surgiu da necessidade de definir o material no ANSYS com parâmetros mais representativos, uma vez que o silicone foi adquirido comercialmente sem uma ficha técnica completa que fornecesse dados constitutivos adequados para simulação FEA. Assim, em vez de utilizar apenas propriedades genéricas retiradas da literatura ou de copiar diretamente o comportamento esperado a partir do tutorial, foi desenvolvida uma metodologia própria para obter dados experimentais do material.

O objetivo desta caracterização foi obter curvas de força–deslocamento e, a partir das dimensões iniciais dos provetes, curvas tensão–deformação. Estes dados foram posteriormente utilizados para ajustar uma formulação hiperelástica, nomeadamente um modelo de Yeoh de segunda ordem, e para comparar a qualidade de ajuste com outras formulações constitutivas. Esta caracterização deve ser entendida como preliminar, pois foi realizada com os meios laboratoriais disponíveis e sem extensómetro dedicado.

3.12.6. Geometria dos Provetes e do Molde

Os provetes foram desenhados em SolidWorks com geometria do tipo haltere, tomando como referência o provete tipo 1 associado à ISO 37. A ISO 37:2024 especifica métodos para a determinação de propriedades tensão–deformação de borrachas vulcanizadas e termoplásticas [39]; para a definição dimensional do provete foi também consultado o resumo técnico da norma disponibilizado pela Mecmesin [40]. No presente trabalho, estas referências foram utilizadas para orientar a geometria dos provetes e do molde, não sendo reivindicado o cumprimento integral de todos os requisitos experimentais da ISO 37 nem uma certificação segundo a norma.

A Figura 3.22 apresenta a geometria utilizada no molde. O provete apresenta comprimento total de 115 mm, extremidades de fixação com largura de 25 mm, zona estreita com largura de aproximadamente 6,20 mm e comprimento útil de 33 mm. A espessura nominal pretendida foi de 2 mm, definida pela profundidade da cavidade do molde e pela tampa superior.

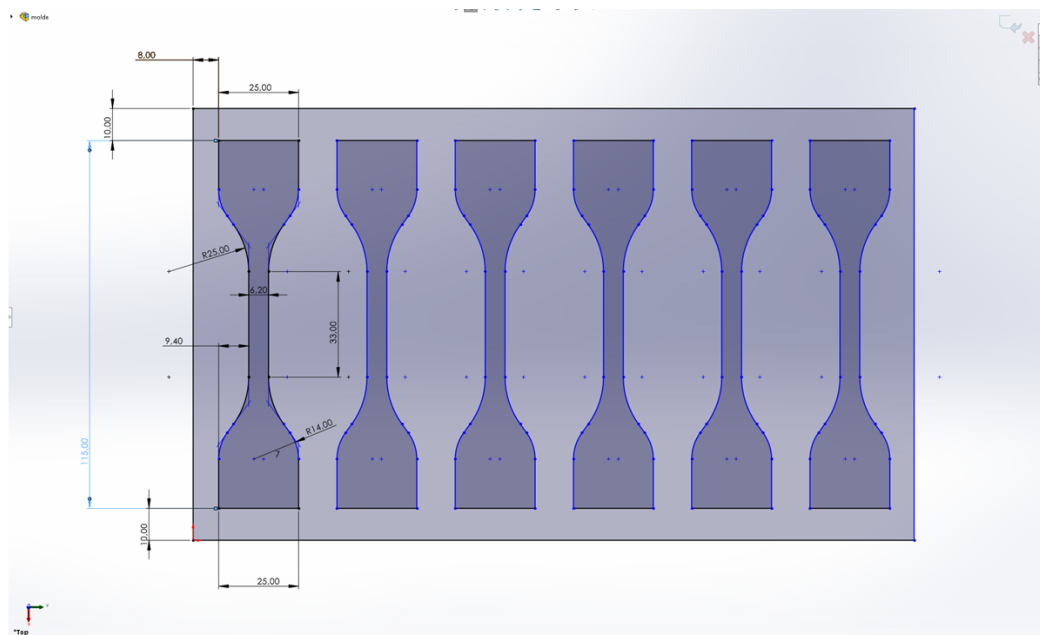
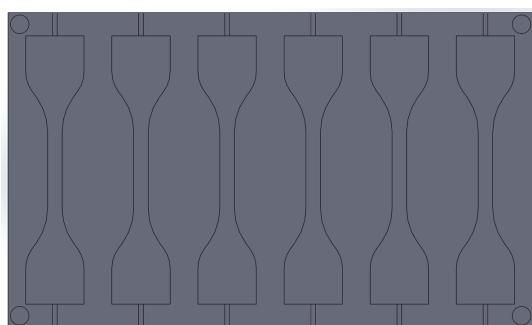


Figura 3.22. Geometria CAD do provete baseado na ISO 37.

O molde foi concebido para produzir seis provetes por moldagem. A parte inferior contém as seis cavidades com a forma dos provetes, enquanto a parte superior funciona como tampa, garantindo a espessura nominal e a compressão do silicone durante a cura. A Figura 3.23 apresenta as duas peças principais do molde em CAD. A Figura 3.23a mostra a peça inferior e a Figura 3.23b mostra a tampa superior do molde dos provetes.



(a) Peça inferior do molde dos provetes.



(b) Tampa superior utilizada para definir a espessura nominal dos provetes.

Figura 3.23. Modelo CAD do molde dos provetes de silicone.

3.12.7. Fabrico e Moldagem dos Provetes

O molde dos provetes foi fabricado em PLA numa impressora Bambu Lab P1S. Esta impressora foi utilizada porque, no período em que os trabalhos foram realizados, a impressora disponível no laboratório não permitia garantir uma impressão adequada dos moldes. Os parâmetros principais de impressão foram: bico extrusor de 0,4 mm,

temperatura do bico de 220 °C, temperatura da mesa de 50 °C, altura de camada de 0,2 mm e preenchimento com padrão *gyroid*. Não foram utilizados suportes nem *brim*. O tempo de impressão foi de aproximadamente 3 h 01 min para a peça inferior e 2 h 13 min para a tampa.

Numa primeira versão, o molde era constituído apenas pelas cavidades e pela tampa. No entanto, os primeiros provetes apresentaram uma quantidade significativa de bolhas, especialmente nas extremidades e em algumas zonas da região útil. Para tentar mitigar este problema, foi adicionada uma cavidade de escape de ar em cada ponta dos provetes, com 2 mm de largura e 0,2 mm de altura. A Figura 3.24 mostra o molde final aberto, destacando a região de escape criada para favorecer a saída de ar durante o fecho do molde.

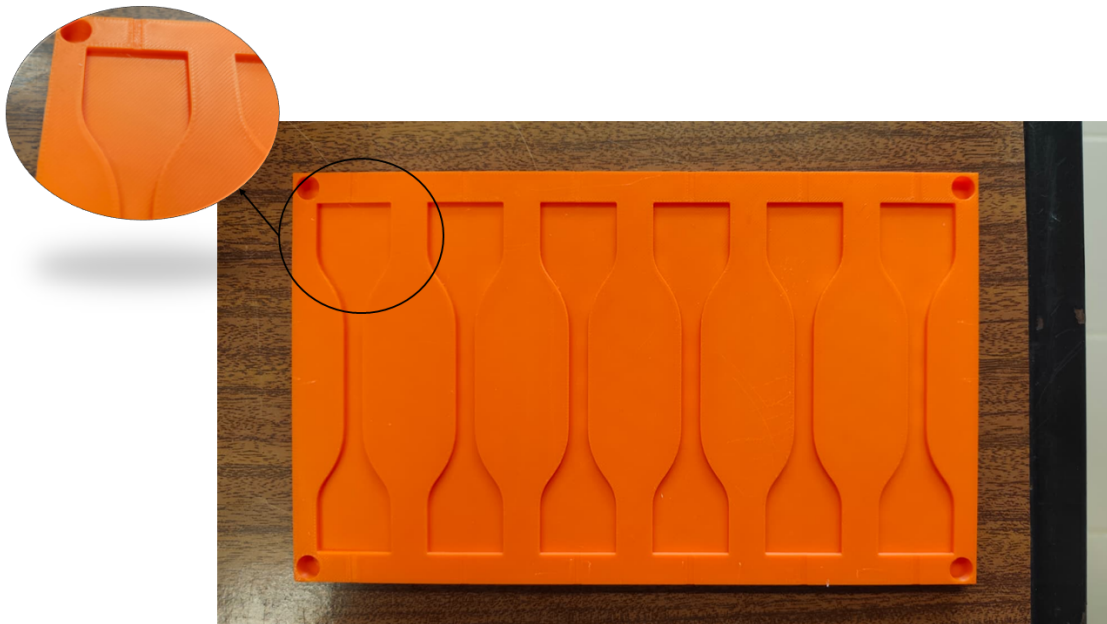


Figura 3.24. Molde aberto e detalhe do escape de ar.

Na versão final, para além das cavidades de escape, foram também introduzidos furos na tampa na zona das extremidades dos provetes. Estes furos foram criados com o objetivo de facilitar a saída de bolhas e de ar aprisionado. O silicone era depositado diretamente nas cavidades, não existindo canais de injeção dedicados. Após o enchimento, a tampa era colocada sobre o molde e era aplicado um peso na superfície superior para garantir o fecho e a espessura dos provetes. A presença de algum silicone vazado para fora do molde foi interpretada como excesso de material expelido durante a compressão.

A Figura 3.25 documenta a montagem durante a cura. O molde fechado é visível na base do conjunto, sob a peça de distribuição de carga e o bloco de betão utilizado como peso.



Figura 3.25. Molde fechado durante a cura, visível sob o conjunto de carga com bloco de betão.

A estratégia de moldagem foi ajustada de forma iterativa. A tentativa de manter o molde completo dentro do saco de pressão reduzida durante toda a cura não produziu melhoria; pelo contrário, agravou a formação de bolhas nos provetes. Na última tentativa, o silicone foi depositado nas cavidades e deixado em repouso durante aproximadamente 10 a 15 min antes da colocação da tampa. Este intervalo permitiu que parte das bolhas formadas durante a deposição subisse e desaparecesse. Após a colocação da tampa, o conjunto permaneceu novamente em repouso durante 10 a 15 min antes da aplicação do peso. Esta estratégia permitiu observar melhor o escape de ar e reduzir a quantidade de bolhas em relação às tentativas anteriores. O tempo nominal de cura do silicone é de aproximadamente 7 a 8 h. Por conveniência operacional, os provetes permaneceram geralmente no molde até ao dia seguinte.

3.12.8. Ensaio de Tração e Tratamento dos Dados

Foram ensaiados provetes de silicone com o objetivo de obter dados experimentais para uma primeira caracterização mecânica do material. Antes do ensaio, foram medidas as dimensões da zona útil de cada provete, nomeadamente a largura e a espessura. Para reduzir o efeito de pequenas irregularidades de fabrico, a largura e a espessura foram medidas em três pontos, sendo utilizada a média de cada conjunto de medições no cálculo da área inicial. Este registo dimensional é essencial, uma vez que pequenas variações de espessura têm influência direta no cálculo da tensão nominal.

Os ensaios foram realizados sem extensómetro. Assim, a deformação foi estimada a partir do deslocamento fornecido pelo software da máquina de ensaio. Esta opção

permite obter uma primeira aproximação da curva tensão–deformação, mas deve ser interpretada com cautela, pois o deslocamento medido pela máquina pode incluir deformações do sistema, escorregamento nas amarras e acomodação inicial do provete. No tratamento dos dados foi utilizada uma correção da força de base inicial e foi definido automaticamente o início útil do ensaio quando a força corrigida ultrapassou o maior dos seguintes valores: 0,05 N ou 1% da força máxima do respetivo provete.

A velocidade de ensaio definida foi de 500 mm/min. A máquina exportou valores de tempo, força, deslocamento e tensão. Para uniformizar o tratamento, a tensão nominal foi calculada a partir da força corrigida e da área inicial de cada provete,

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad A_0 = b_0 t_0, \quad (3.16)$$

em que F representa a força aplicada, A_0 a área inicial da secção útil, b_0 a largura inicial da zona útil e t_0 a espessura média inicial. A deformação nominal foi estimada por

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad (3.17)$$

em que ΔL corresponde ao deslocamento corrigido registado pela máquina e $L_0 = 20$ mm à distância inicial entre as marcas de referência no provete. Esta distância entre marcas distingue-se dos 33 mm de comprimento geométrico da zona estreita representada no CAD. A identificação de L_0 não equivale à medição contínua do afastamento das marcas: como não foi utilizado extensómetro, o numerador resulta do deslocamento da máquina. A deformação calculada deve, por isso, ser interpretada como aparente, podendo incluir as contribuições da montagem e das amarras referidas anteriormente.

Após o tratamento dos ensaios, foi seleccionada para importação no ANSYS uma curva individual, escolhida por apreciação qualitativa dos resultados dos provetes medidos. A utilização de uma única curva delimitou esta componente preliminar de caracterização do silicone e forneceu uma referência para a modelação do dedo pneumático, mantendo o foco principal no estudo da garra *SpiRobs*. Não foi aplicado um critério estatístico de seleção nem quantificada a dispersão entre provetes.

Esta escolha pode introduzir viés de seleção e não demonstra que a curva represente o comportamento médio do silicone. Os parâmetros ajustados são, assim, atribuídos ao provete escolhido e utilizados como referência preliminar. Uma futura caracterização do material deverá comparar os provetes a níveis de deformação comuns e

quantificar a dispersão. Os resultados do ensaio selecionado são apresentados na Secção 4.6.3.

3.12.9. Dados Experimentais para a Modelação FEA

A caracterização dos provetes teve como finalidade apoiar a definição numérica do silicone utilizado nos dedos pneumáticos. Num modelo FEA de um dedo isolado, o silicone deve ser representado por uma formulação hiperelástica e a pressão interna deve ser aplicada às superfícies das câmaras. A curva experimental selecionada foi, por isso, utilizada como entrada no módulo *Engineering Data* do ANSYS, através de dados uniaxiais de tensão–deformação.

Os modelos numéricos dos dedos pneumáticos são tratados como exploratórios. A caracterização uniaxial fornece uma curva própria de referência, mas a previsão quantitativa depende da confirmação da medida de deformação, da dispersão entre provetes, da qualidade dos ajustes constitutivos e da comparação experimental direta entre pressão e deformação do dedo.

3.12.10. Simulação do Dedo Pneumático

Após a caracterização mecânica preliminar do silicone e o ajuste da curva experimental no ANSYS, foi preparada uma simulação numérica de um dedo pneumático isolado. O objetivo desta etapa consistiu em obter uma primeira aproximação ao comportamento de deformação do atuador quando sujeito a pressão interna nas câmaras pneumáticas, permitindo avaliar a influência do modelo hiperelástico adotado e identificar a gama de pressão numericamente estável.

A análise foi realizada no módulo *Static Structural* do ANSYS Mechanical. Embora o problema represente uma atuação pneumática, foi assumida uma aproximação quasi-estática, considerando que o interesse principal desta fase era avaliar a forma deformada e o deslocamento global do dedo para diferentes níveis de pressão, e não a resposta dinâmica transiente do sistema. A opção *Large Deflection* foi ativada, uma vez que a atuação do dedo envolve grandes deformações, rotações significativas e alteração relevante da geometria durante o carregamento.

A geometria utilizada incluiu o dedo pneumático de silicone e o respetivo suporte rígido. A base do conjunto foi restringida através de uma condição de suporte fixo, procurando representar a zona de fixação do atuador ao suporte físico. A pressão foi aplicada nas superfícies internas das câmaras pneumáticas responsáveis pela expansão diferencial do silicone. Foram ainda definidos contactos do tipo *frictionless* entre faces das paredes do dedo suscetíveis de entrar em contacto durante a

pressurização, com o objetivo de impedir interpenetração numérica sem introduzir atrito adicional nesta fase preliminar. O suporte foi modelado de forma simplificada como material rígido comparativamente ao silicone, uma vez que a sua deformação não constitui o foco da análise.

O silicone foi representado através de modelos hiperelásticos ajustados a partir da curva experimental uniaxial selecionada anteriormente. Foram avaliadas três formulações: Yeoh de segunda ordem, Neo-Hookean e Mooney–Rivlin de dois parâmetros. O modelo Yeoh de segunda ordem foi adotado como formulação principal de exploração, atendendo à aproximação visual da curva e à estabilidade obtida nas condições testadas. O modelo Neo-Hookean foi utilizado como formulação simplificada de comparação. O modelo Mooney–Rivlin de dois parâmetros foi testado, mas não foi adotado após a avaliação visual do ajuste e a ocorrência de instabilidade numérica. As três formulações foram ajustadas exclusivamente com o critério *Normalized Error*, utilizando exatamente os mesmos pontos experimentais, sem alterações ou exclusões entre modelos. Os coeficientes obtidos com este critério foram os utilizados nas simulações. A comparação dos resíduos globais reportados pelo ANSYS é apresentada na Secção 4.6.4.

A pressão interna foi aplicada de forma incremental, considerando valores entre 0,001 MPa e 0,010 MPa, equivalentes a 1 kPa e 10 kPa. Esta gama correspondeu ao intervalo para o qual os modelos considerados na comparação apresentaram convergência numérica. Tentativas para pressões superiores originaram dificuldades de convergência e distorção excessiva de elementos, pelo que foram excluídas da comparação. O limite obtido caracteriza o modelo e as hipóteses de solução, não a pressão admissível do dedo físico.

Para comparar os modelos foi definido um ponto de controlo na extremidade do dedo, através de uma *Deformation Probe*. Esta abordagem foi utilizada porque a comparação direta do valor máximo global de deformação pode ser pouco consistente, uma vez que a região de maior deformação pode deslocar-se ao longo da geometria consoante a pressão aplicada e o modelo material. Assim, o deslocamento da ponta foi utilizado como indicador global de curvatura do atuador. Complementarmente, foi analisada a deformação elástica equivalente máxima, com o objetivo de comparar a severidade da deformação prevista por cada formulação hiperelástica.

Importa salientar que esta simulação deve ser interpretada como uma aproximação numérica preliminar. A caracterização material foi baseada apenas em tração uniaxial e sem extensómetro, enquanto o dedo pneumático real apresenta estados de deformação multiaxiais. Além disso, não foi realizada uma validação experimental direta da relação pressão–curvatura do dedo. Consequentemente, os resultados são utilizados para estudar tendências de deformação e estabilidade numérica, e não

como previsão quantitativa completa do atuador real.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nas diferentes fases de desenvolvimento da garra flexível bio-inspirada *SpiRobs*. A organização segue a progressão metodológica do trabalho: fabrico aditivo do atuador, modelação numérica por elementos finitos, integração eletromecânica, campanha experimental de mapeamento circunferencial e desenvolvimento da garra pneumática em silicone. A interpretação dos resultados respeita o alcance de cada método, evitando equiparar a pressão média equivalente inferida pelos sensores a um campo espacial ou a uma pressão local exata na interface garra–objeto.

4.1. Fabrico Aditivo do Atuador Bio-inspirado (*SpiRobs*)

A materialização do conceito bio-inspirado *SpiRobs* constituiu um dos primeiros grandes desafios tecnológicos deste estudo, exigindo uma transição rigorosa do ambiente virtual (CAD) para o Fabrico Aditivo (FA). A produção do atuador integralmente flexível foi realizada através da tecnologia FDM (Creality Ender 3 V2), focando-se na otimização da processabilidade de elastómeros termoplásticos (TPU).

Conforme detalhado na secção metodológica, a impressão 3D de materiais de baixa rigidez estrutural acarreta dificuldades acrescidas. Na configuração de hardware utilizada (sistema de extrusão Bowden), a elevada flexibilidade do filamento resultou em severas anomalias durante os primeiros ensaios.

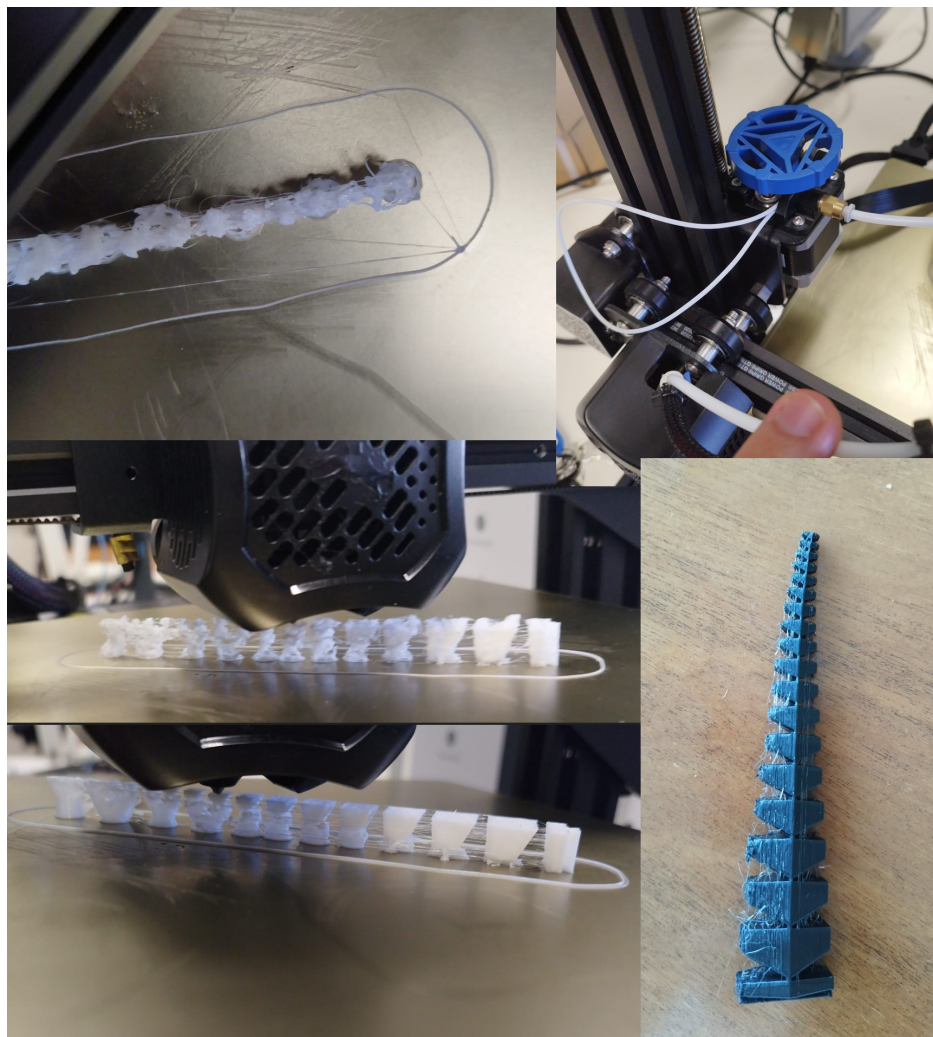


Figura 4.1. Anomalias observadas na impressão de TPU.

Como ilustrado na Figura 4.1, as tentativas iniciais com TPU macio originaram a flambagem (*buckling*) do filamento no sistema de tração da extrusora, resultando em subextrusão, encravamento total e formação de fios soltos (*stringing*), fatores que comprometeriam a viabilidade do atuador.

Para contornar estas limitações e determinar os parâmetros ideais de forma eficiente, procedeu-se a uma avaliação iterativa. Por forma a otimizar o consumo de recursos (material e tempo) durante esta fase de parametrização inicial, os provetes de teste foram impressos a uma escala reduzida de 1/10 face ao modelo original, testando-se diferentes durezas comerciais (Eryone 90A, TPU 93A e PolyFlex 95A).

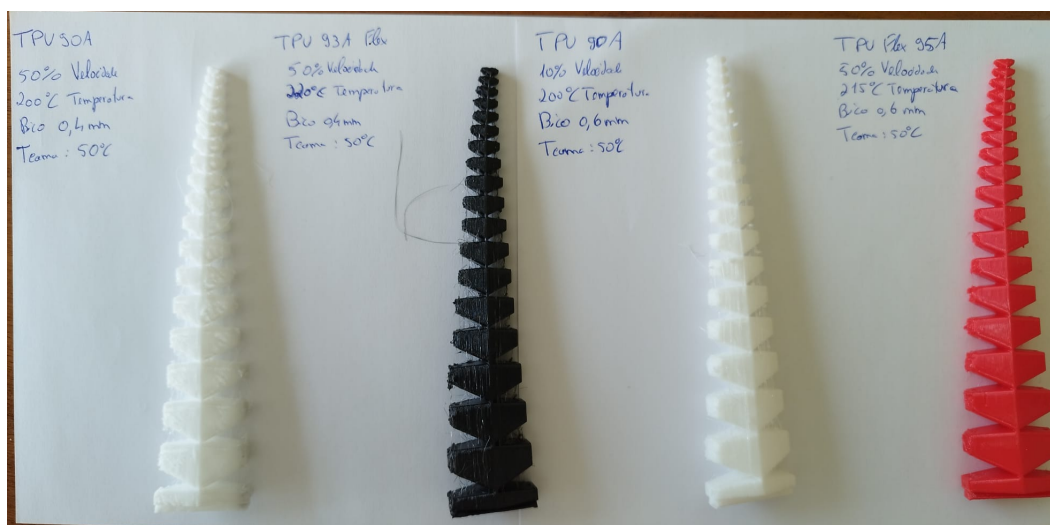


Figura 4.2. Comparação da deposição entre diferentes TPU.

Um dos passos cruciais nesta otimização (Figura 4.2) foi a alteração do diâmetro do bico extrusor de 0,4 mm para 0,6 mm. Na extrusão de elastômeros, diâmetros muito reduzidos geram elevada contrapressão no conjunto de fusão do sistema de extrusão, agravando o fenómeno de flambagem. O aumento do diâmetro para 0,6 mm facilitou o escoamento do polímero fundido e reduziu a pressão interna. Simultaneamente, constatou-se que os filamentos mais macios (90A e 93A) mantinham uma qualidade de superfície irregular. A transição definitiva para o **TPU 95A** garantiu a rigidez de coluna necessária para o filamento ser tracionado pelas engrenagens sem dobrar, resultando numa deposição limpa e estável.

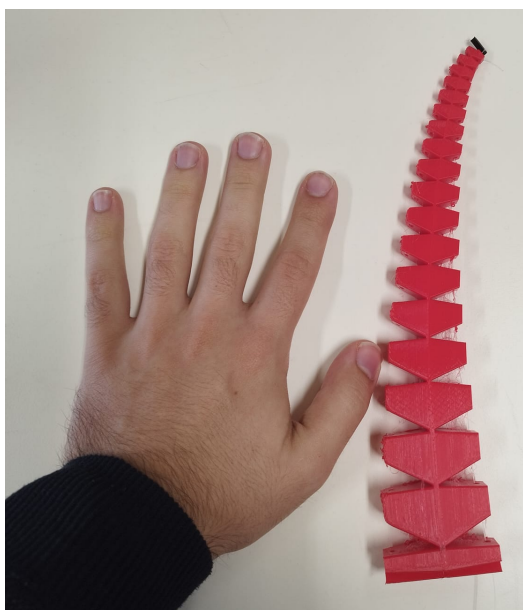


Figura 4.3. Protótipo final da garra *SpiRobs*.

A impressão do protótipo final à escala real (1:1), ilustrada na Figura 4.3, decorreu

com sucesso técnico. O processo de fabrico do protótipo com 20% de preenchimento teve uma duração aproximada de 8 h e resultou numa massa final de 54,48 g. O segundo protótipo, produzido com 100% de preenchimento, apresentou uma massa de 70,99 g.

A Figura 4.4 apresenta a massa final de cada protótipo.

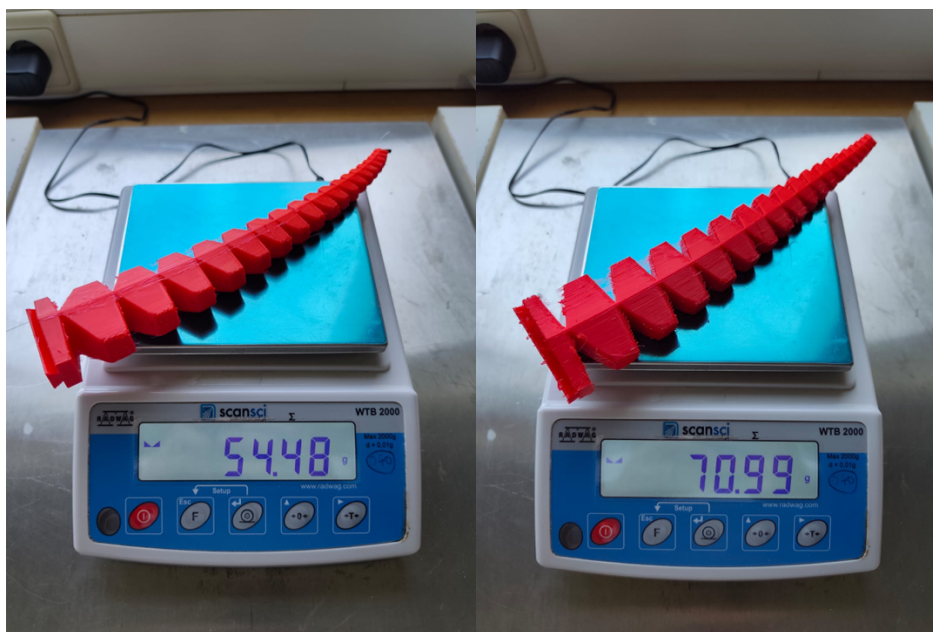


Figura 4.4. Pesagem dos protótipos *SpiRobs*.

4.2. Comportamento Estrutural e Simulação Numérica (FEA)

O estudo numérico da garra *SpiRobs* constituiu uma das etapas de modelação mais complexas e iterativas deste projeto. A simulação da topologia integral do atuador envolveu um problema numérico dominado por três fontes simultâneas de não-linearidade: a não-linearidade geométrica associada a grandes deslocamentos e rotações (*Large Deflection*); a não-linearidade do material, governada pelo comportamento hiperelástico do TPU 95A (modelado matematicamente pela formulação de Yeoh de 2.^a ordem); e as interações de auto-contacto (*self-contact*) que ocorrem durante o fecho da estrutura.

Dada a elevada exigência computacional do problema, não foi possível obter convergência imediata para o modelo completo. Por conseguinte, adotou-se uma metodologia de simulação estritamente incremental. Nos modelos iniciais sem cabo foi utilizada uma formulação hiperelástica de Yeoh de segunda ordem para aproximar o comportamento flexível do TPU. Na fase com cabo explícito, recorreu-se a proprie-

dades lineares elásticas aproximadas para reduzir a instabilidade numérica e estudar especificamente a estratégia de contacto cabo–furo. Esta distinção é importante, pois os resultados das diferentes fases não têm o mesmo grau de representatividade física.

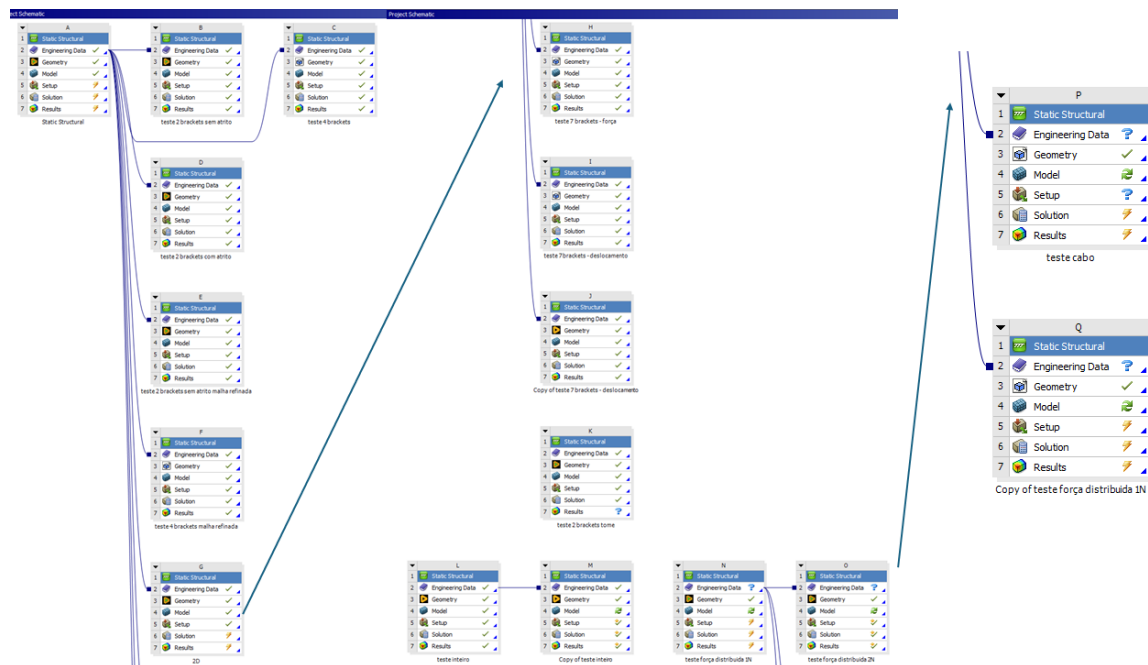


Figura 4.5. Esquema do projeto no ANSYS.

O fluxo de trabalho estruturado, ilustrado na Figura 4.5, demonstra a transição progressiva das simulações. A abordagem consistiu em isolar o problema num modelo de apenas dois elos, permitindo estudar exhaustivamente a influência da malha e das condições de fronteira antes de se introduzir o escalonamento geométrico para 4 elos, 7 elos e, finalmente, o modelo integral.

4.2.1. Estudo Paramétrico: Modelo Base de 2 Elos

O modelo base de dois elos foi configurado para isolar o comportamento de uma única zona de flexão. A configuração incluiu a fixação da base (*Fixed Support*), a aplicação de uma força direcional na extremidade oposta para simular a tração do cabo, e a definição das faces de contacto interno como *Frictionless* (Figura 4.6).

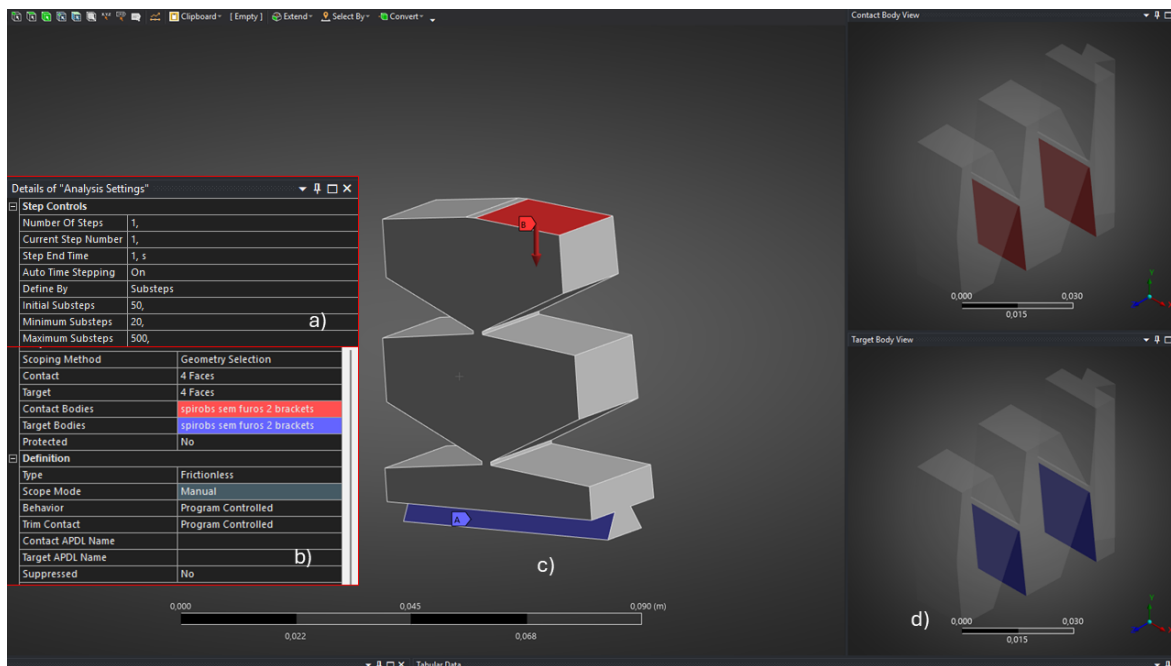


Figura 4.6. Configuração do modelo numérico de dois elos.

O modelo de dois elos permitiu avaliar a sensibilidade à discretização. As malhas apresentadas na Figura 3.3 correspondem às contagens registradas no ANSYS: 123 nós e 310 elementos na configuração grosseira e 11.612 nós e 57.649 elementos na configuração refinada. Entre as duas configurações foram alterados o refinamento local e a ordem dos elementos; por isso, os seus efeitos não foram isolados.

A comparação das duas discretizações (Figura 4.7) mostrou sensibilidade numérica relevante. O deslocamento máximo aumentou de 38,4 mm para 43,1 mm, cerca de 12,2%. Esta alteração é compatível com uma representação mais flexível e com melhor resolução espacial, mas os dois ensaios não permitem atribuir isoladamente a diferença à eliminação de *shear locking*. A convergência do solver deve distinguir-se da independência de malha: esta última exigiria uma sequência de refinamentos comparáveis e um critério de estabilização dos resultados.

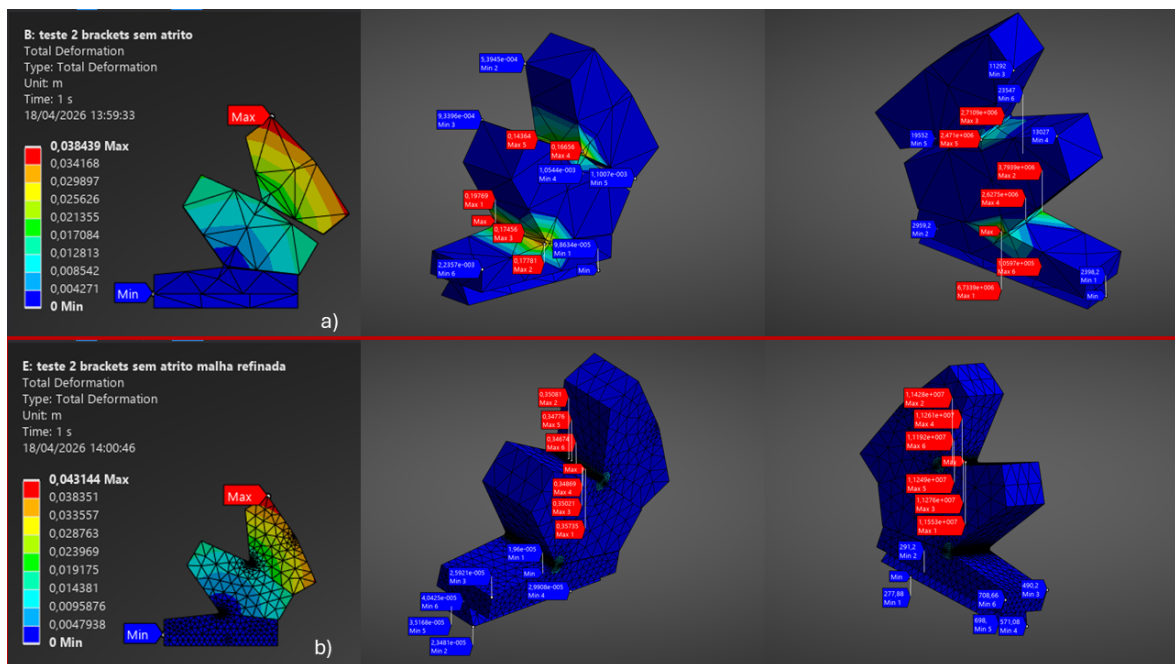


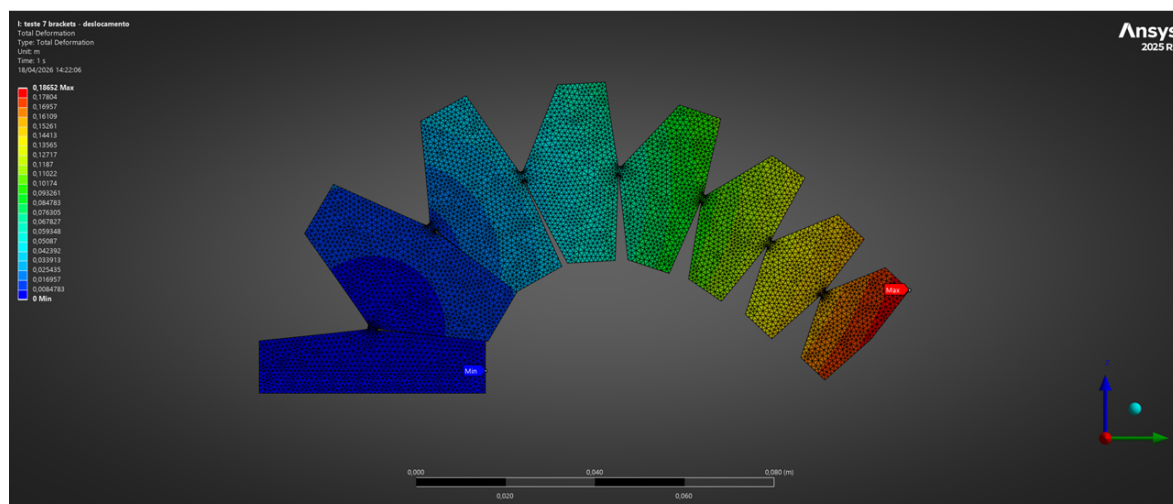
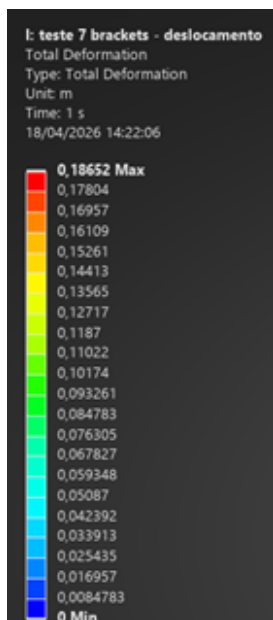
Figura 4.7. Comparação dos resultados com diferentes malhas.

Também foi observado impacto na distribuição das tensões de von Mises. A malha inicial apresentou uma tensão máxima de 6,73 MPa, com transições de cor abruptas e menor capacidade de representar gradientes locais. Por sua vez, a malha refinada revelou uma tensão máxima de 11,55 MPa, concentrada no raio de concordância interno da zona de flexão, uma região geometricamente crítica durante a flexão. Este resultado deve ser interpretado como sensível à malha, ao modelo material e às hipóteses de contacto adotadas.

4.2.2. Escalonamento Geométrico: Modelo de 7 Elos

Após obter uma solução numericamente convergente no modelo de 2 elos, os parâmetros de cálculo foram extrapolados de forma iterativa, culminando num modelo de 7 elos estável para as condições testadas. Esta simulação foi importante para estudar numericamente o princípio de funcionamento da garra bio-inspirada, evidenciando como a acumulação de pequenas flexões sequenciais resulta num movimento de preensão macroscópico.

A resposta cinemática revelou-se coerente (Figura 4.8), atingindo um deslocamento total máximo na ordem dos 186,5 mm, conforme a grandeza *Total Deformation* apresentada pelo ANSYS.



Leitura da escala original

Grandeza: deslocamento total.

Unidade da imagem: m.

Mínimo: 0; máximo: 0,18652 m (186,52 mm).

À esquerda, ampliação da legenda do mesmo resultado ANSYS. A ampliação não altera a escala nem os valores.

Figura 4.8. Deslocamento total no modelo de sete elos e ampliação da legenda original. O valor de 186,5 mm no texto corresponde ao máximo arredondado.

A análise da deformação elástica equivalente (*Equivalent Elastic Strain*), documentada na Figura 4.9, evidencia que os segmentos rígidos permanecem praticamente inalterados, enquanto os maiores valores de deformação elástica equivalente se concentram nas zonas de flexão, atingindo cerca de 0,37. Este indicador equivalente não deve ser confundido com o alongamento nominal uniaxial de um provete.

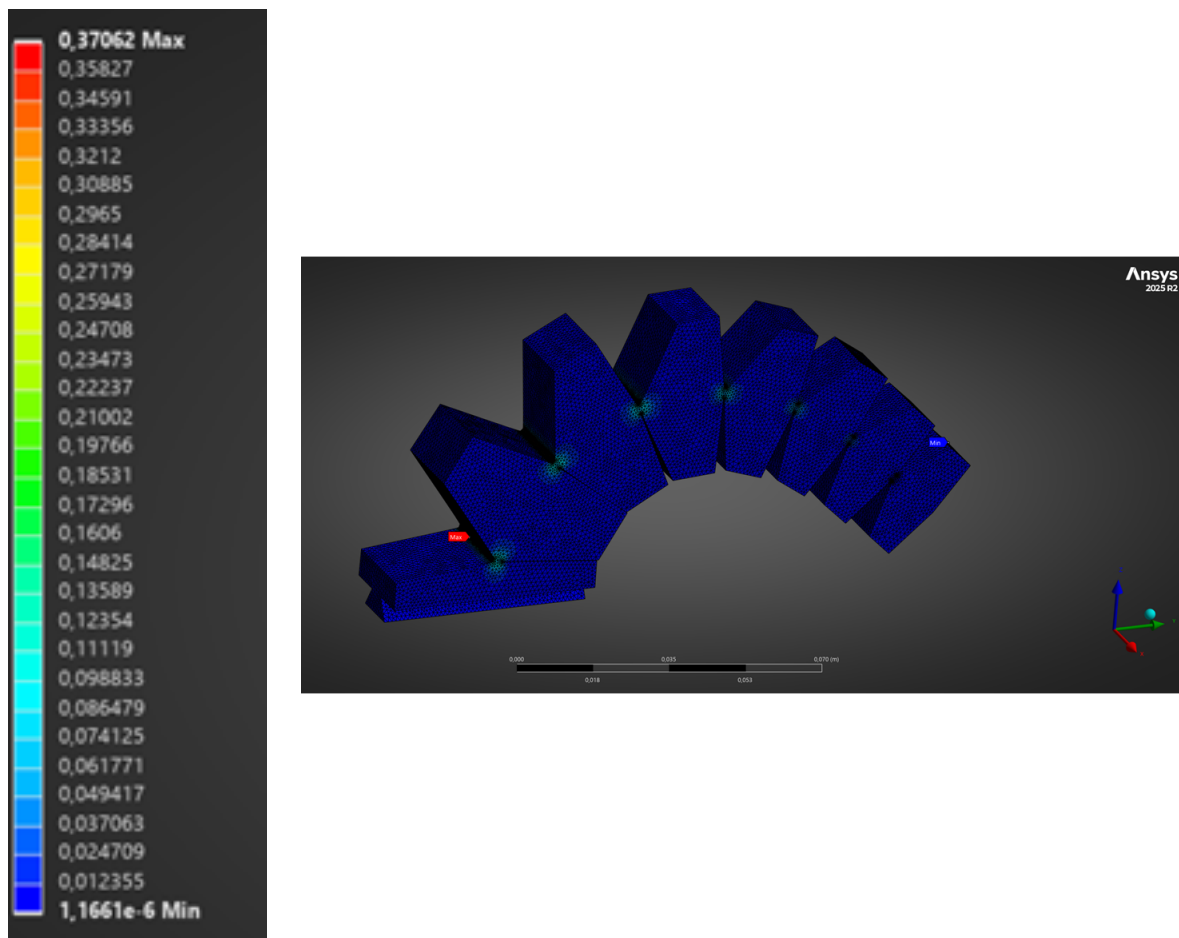


Figura 4.9. Deformação elástica equivalente no modelo de sete elos, com ampliação da escala original. Grandeza adimensional, expressa em m/m no ANSYS; máximo de 0,37062.

A distribuição de tensões de von Mises (Figura 4.10) indicou acumulação progressiva de esforço nas zonas de flexão mais próximas da base, onde o momento fletor é superior. O valor máximo de tensão registado alcançou os 12,1 MPa. Este valor deve ser entendido como indicador comparativo do modelo numérico e como ponto de partida para estudos futuros de fadiga e rasgamento do TPU 95A, não como previsão definitiva do ciclo de vida da garra.

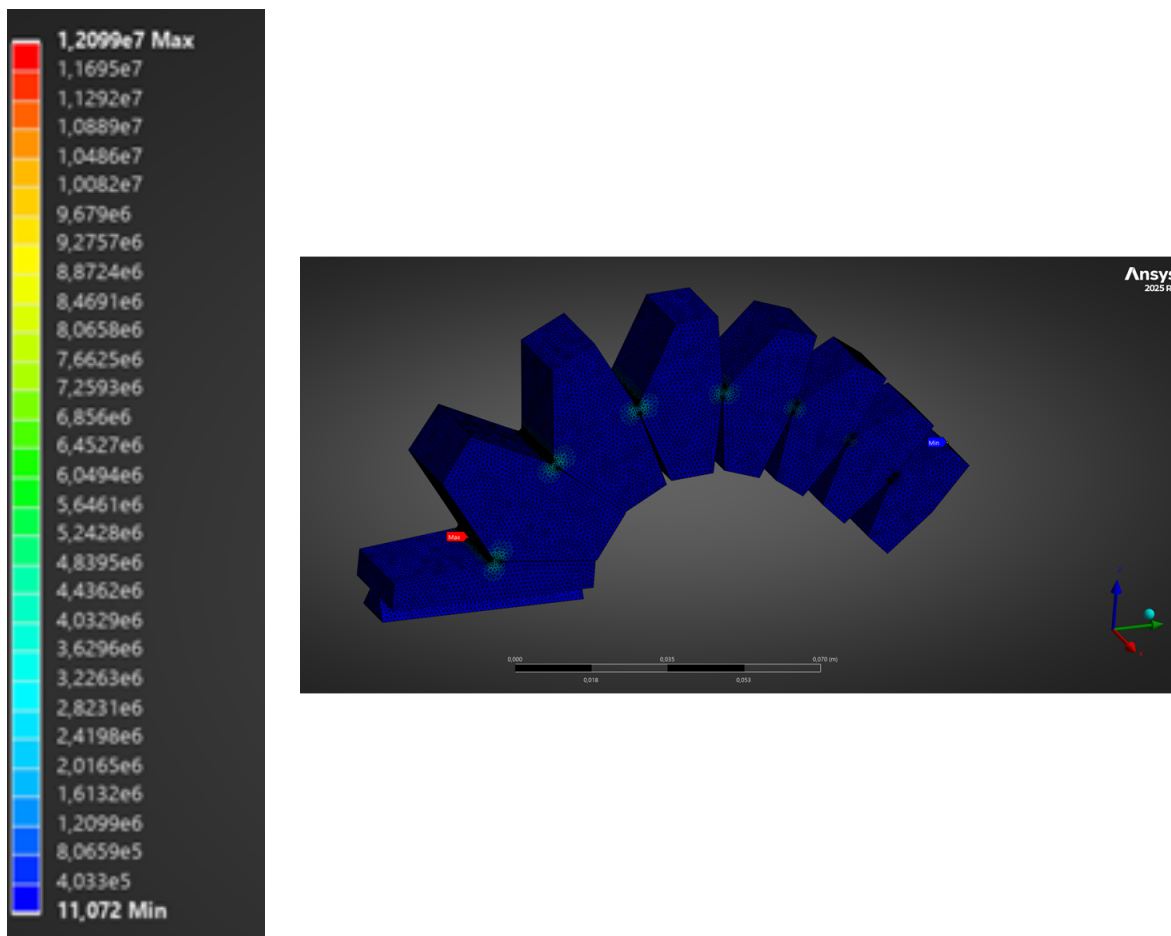


Figura 4.10. Tensões de von Mises no modelo de sete elos, com ampliação da escala original. A escala está em Pa; o máximo de $1,2099 \times 10^7$ Pa corresponde a aproximadamente 12,1 MPa.

4.2.3. Limitações do Modelo Integral e Mitigação de Erros

Apesar da estabilidade numérica obtida com 7 elos, a transição final para a simulação do atuador *SpiRobs* completo revelou-se um obstáculo computacional significativo.

Na melhor iteração conseguida para o modelo inteiro (Figura 4.11), o *solver* atingiu um deslocamento máximo de 358,4 mm antes de perder convergência. A perda de convergência do método de Newton–Raphson foi acompanhada de distorção excessiva dos elementos. As grandes rotações e o aumento do número de regiões de auto-contacto constituem fatores plausíveis de dificuldade numérica, mas a contribuição de cada mecanismo não foi isolada nos ensaios realizados.

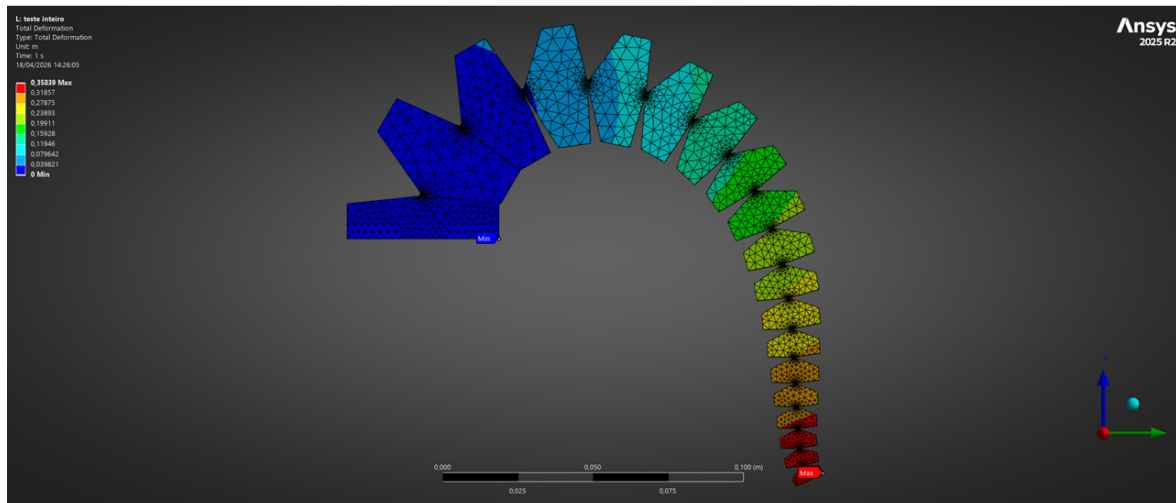


Figura 4.11. Melhor iteração obtida no modelo integral.

Perante a divergência sistemática do modelo integral, realizou-se um processo de diagnóstico e resolução de problemas. As abordagens de mitigação incluíram alterações de modelação e parametrização:

1. **Reformulação do Carregamento (Controlo por Deslocamento):** A força de tração pura foi substituída pela imposição direta de deslocamento. Em problemas não lineares, a redução da rigidez tangente pode dificultar o seguimento da resposta por controlo de força. O controlo por deslocamento foi testado para orientar incrementalmente a evolução da solução; nesta configuração, porém, persistiu a limitação associada à distorção da malha.
2. **Distribuição Vetorial de Carga:** Testou-se a aplicação de forças distribuídas ao longo de todos os furos de passagem do cabo, minimizando as singularidades de tensão originadas por uma carga concentrada única numa só extremidade.
3. **Gestão Explícita de Contactos:** A deteção global automática foi substituída pela criação manual e laboriosa de pares de contacto face-a-face para cada segmento da garra. Esta técnica visou reduzir a sobrecarga computacional associada ao algoritmo de pesquisa de superfícies do ANSYS.

Não obstante todas as otimizações implementadas na árvore de projeto, a instabilidade final manteve-se. Concluiu-se que o refinamento adicional deste modelo ultrapassaria o custo computacional considerado compatível com o âmbito da dissertação. O estudo paramétrico realizado com 2, 4 e 7 elos cumpriu, ainda assim,

uma função essencial: permitiu identificar os parâmetros de malha, contacto e carregamento mais relevantes para a estabilidade numérica e serviu de base para a evolução posterior do modelo com cabo de acionamento.

4.2.4. Evolução para Modelos com Cabo de Acionamento

A introdução do cabo de acionamento no modelo numérico representou uma das etapas mais exigentes do trabalho de simulação. Até esta fase, a deformação da garra tinha sido estudada através de carregamentos ou deslocamentos simplificados. Com a inclusão do cabo, o modelo passou a representar de forma mais próxima o princípio real de atuação da garra *SpiRobs*, uma vez que o movimento deixou de ser imposto diretamente às vértebras e passou a resultar da interação de contacto entre o cabo e os furos internos.

Esta alteração aumentou significativamente a complexidade numérica. O problema passou a combinar grandes deformações, contacto cabo–furo, contacto potencial entre vértebras, forte dependência da malha local e variações abruptas no estado de contacto durante o carregamento. Por esse motivo, o processo não foi linear: várias configurações foram testadas até se obter um modelo com comportamento fisicamente coerente e convergência aceitável.

Os primeiros ensaios foram realizados com modelos reduzidos constituídos pela base e por duas vértebras, utilizando cabo circular e furos circulares. Para deslocamentos moderados, estes modelos permitiram confirmar que o cabo conseguia induzir movimento na estrutura e que o contacto cabo–garra se mantinha numericamente estável. No entanto, com o aumento do deslocamento imposto e com a introdução de contactos adicionais, verificaram-se dificuldades de convergência, sobretudo na fase final do carregamento. Estas dificuldades estiveram associadas à combinação entre superfícies curvas, elevada deformação local e alteração progressiva das zonas de contacto.

Modelo	Desloc.	Def. máx.	Def. média	Força reação	Pressão máx.	Penetração máx.	Estado
Cabo circular / furos circulares – 2 vértebras	2 mm	4,0488 mm	1,2427 mm	0,6195 N	0,0715 MPa	0,0016 mm	Convergente
Cabo circular / furos circulares – 2 vértebras	5 mm	10,124 mm	3,4231 mm	1,5301 N	0,25553 MPa	0,005705 mm	Convergente
Cabo circular / furos circulares – 2 vértebras	10 mm	20,268 mm	6,0902 mm	3,0001 N	2,722 MPa	0,017883 mm	Convergente
Cabo circular / furos circulares – 2 vértebras	15 mm	30,211 mm	9,945 mm	4,4274 N	6,4713 MPa	0,023857 mm	Convergente
Cabo circular / furos circulares – 2 vértebras com contactos	19,25 mm	38,486 mm	12,59 mm	5,7501 N	13,701 MPa	0,0230 mm	Convergente

Tabela 4.1. Evolução dos principais resultados obtidos nos ensaios preliminares com cabo circular e modelo reduzido.

A Tabela 4.1 mostra que a deformação máxima e a força de reação aumentaram de forma progressiva com o deslocamento imposto no cabo. A pressão máxima de contacto numérica apresentou uma evolução mais acentuada, evidenciando que, para deslocamentos superiores, a interação local entre o cabo e os furos se torna mais intensa. Apesar de estes resultados serem úteis para compreender a evolução do modelo, a geometria circular revelou-se mais difícil de estabilizar em deslocamentos elevados.

Para melhorar a estabilidade numérica, foi adotada uma estratégia de simplificação geométrica, substituindo o cabo circular e os furos circulares por uma representação quadrada. Esta alteração não pretende reproduzir exatamente o cabo físico utilizado na garra experimental, mas sim reduzir a complexidade das superfícies de contacto e permitir a continuação do estudo numérico. Como a secção quadrada altera a geometria local do contacto, a distribuição de pressão e o caminho de deslizamento relativamente ao cabo circular real, os resultados desta fase não são quantitativamente comparáveis ao contacto físico cabo–furo do protótipo. A Tabela 4.2 resume a comparação qualitativa entre as duas abordagens.

Critério	Cabo circular / furos circulares	Cabo quadrado / furos quadrados
Realismo geométrico	Mais próximo da geometria física original	Geometria simplificada para estabilização numérica
Complexidade do contacto cabo–garra	Elevada, devido às superfícies curvas	Menor, devido ao contacto entre faces mais planas
Facilidade de malha	Mais difícil, com tendência para elementos irregulares	Melhor, sobretudo nas zonas de contacto cabo–furo
Convergência em deslocamentos baixos	Boa	Boa
Convergência em deslocamentos elevados	Mais difícil, sobretudo com contactos adicionais	Melhorou com substeps elevados, NEQIT, 80 e carregamento progressivo
Problemas principais	Contacto abrupto, penetração local e instabilidade em deslocamentos elevados	Necessidade de confirmação física posterior e simplificação da geometria real
Estado atual	Útil como referência inicial	Mais promissor para prosseguir os testes com várias vértebras

Tabela 4.2. Comparação qualitativa entre as duas estratégias geométricas utilizadas para representar o cabo e os furos no modelo numérico.

A etapa mais relevante consistiu no desenvolvimento de um modelo com cinco vértebras e cabo quadrado, mantendo *Large Deflection* ativo, *Small Sliding* desativado e contactos cabo–furo definidos manualmente. A Figura 4.12 apresenta a configuração geral do modelo, incluindo a trajetória do cabo ao longo dos furos das vértebras.

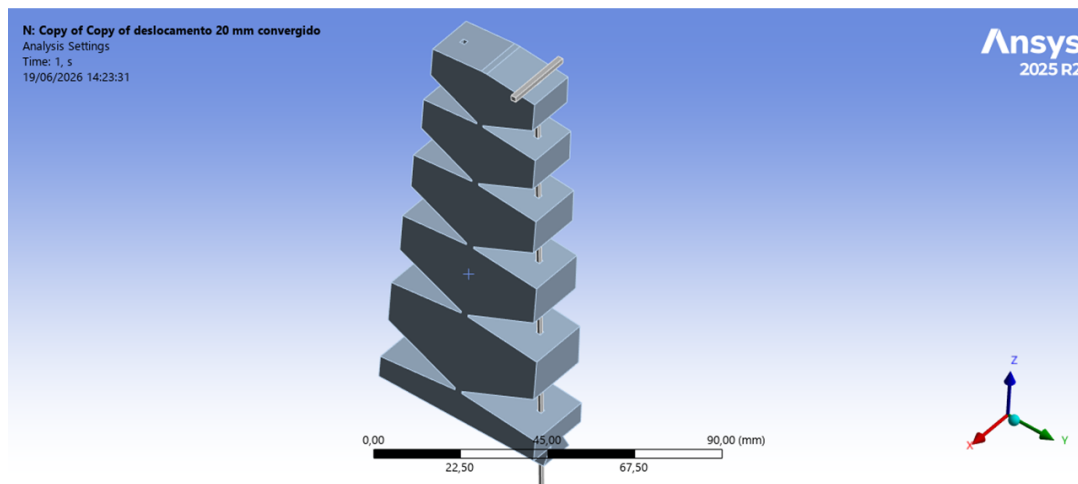


Figura 4.12. Modelo FEA com cinco vértebras e cabo.

A definição manual dos contactos foi necessária porque a identificação automática nem sempre seleccionava corretamente as superfícies relevantes entre o cabo e os furos. A Figura 4.13 ilustra um exemplo da seleção das faces de contacto e dos corpos alvo, evidenciando a necessidade de controlar localmente as interações entre o cabo e a estrutura.

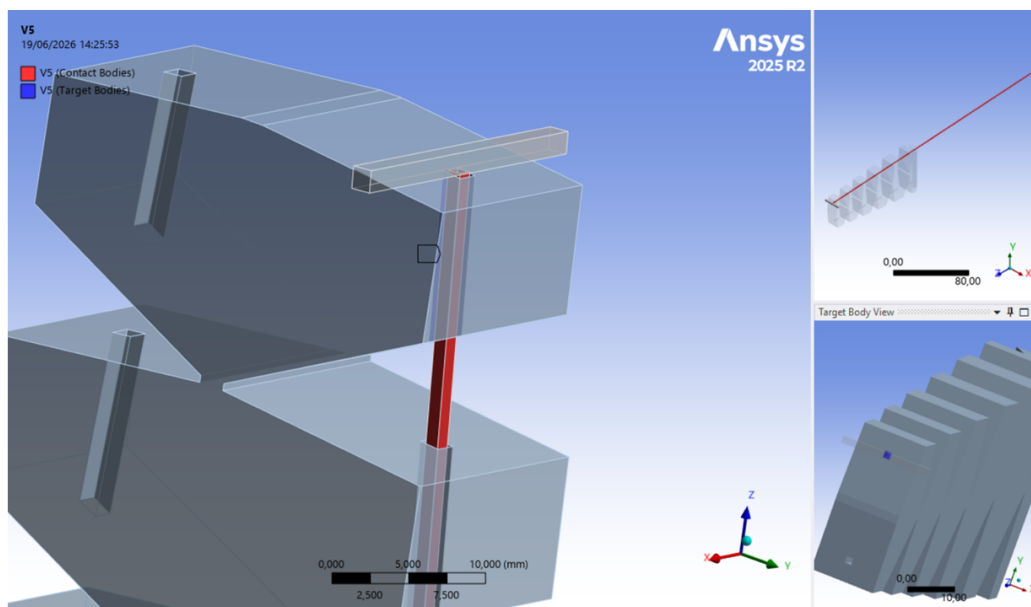
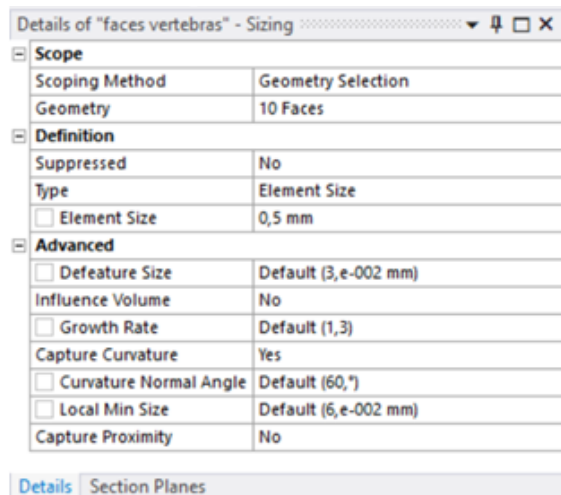
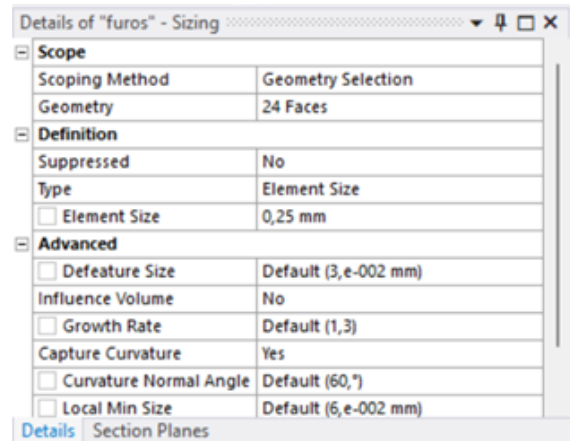


Figura 4.13. Definição manual dos contactos cabo–furo.

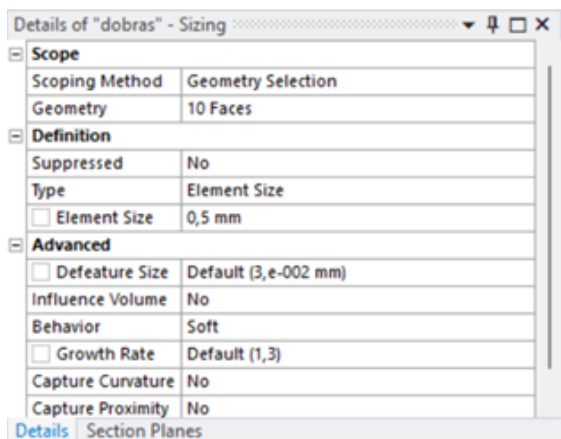
A malha foi refinada nas regiões consideradas críticas, nomeadamente nas zonas de dobra, nos furos e no cabo. A Figura 4.14 apresenta os principais controlos de tamanho local utilizados, enquanto a Figura 4.15 mostra o detalhe da malha nas proximidades do contacto cabo–furo.



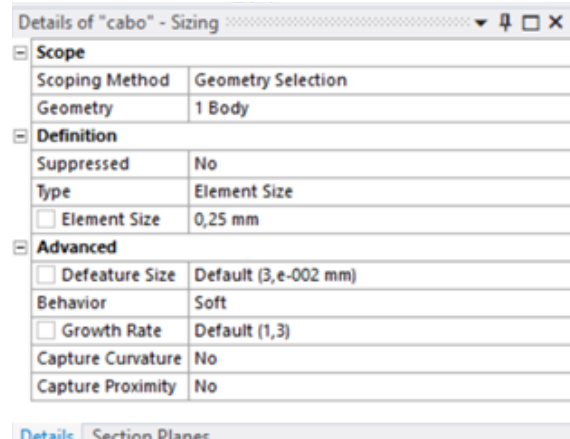
(a) Faces das vértebras.



(b) Furos.



(c) Zonas de flexão.



(d) Cabo.

Figura 4.14. Controlos locais de malha no modelo com cabo: ampliações dos quatro painéis de propriedades da captura original. Os tamanhos definidos são 0,5 mm nas faces e zonas de flexão e 0,25 mm nos furos e no cabo.

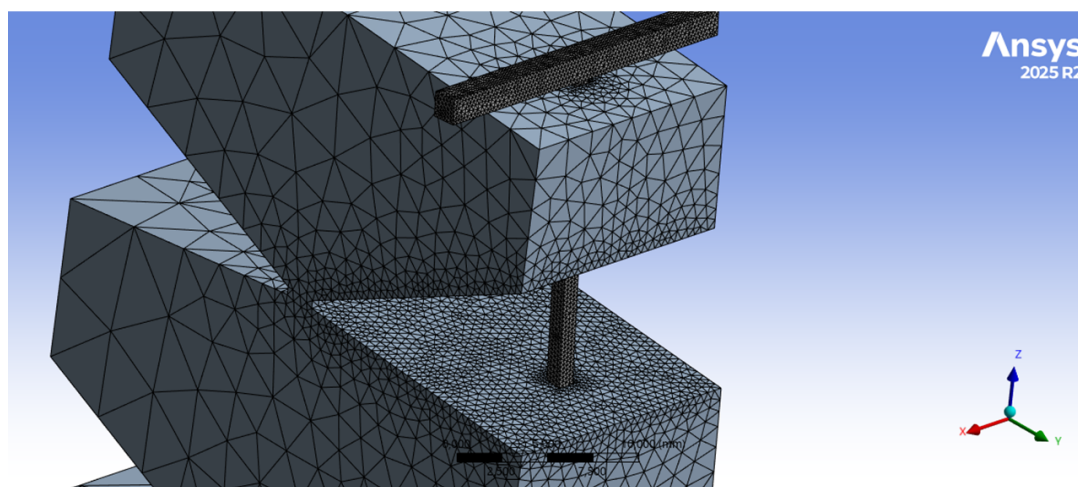


Figura 4.15. Detalhe da malha na zona cabo–furo.

Com estas definições, foi obtida uma solução numericamente convergente para 20 mm de deslocamento imposto no cabo. Esta solução combinou convergência numérica, deformação global coerente e valores reduzidos de penetração no contacto. A Tabela 4.3 resume os principais resultados extraídos do pós-processamento.

Grandeza avaliada	Valor obtido	Observação
Deslocamento aplicado ao cabo	20 mm	Aplicado progressivamente ao longo da análise
Deslocamento total máximo	106,16 mm	Valor máximo reportado pelo ANSYS; não corresponde ao deslocamento imposto no cabo
Pressão máxima de contacto	11,221 MPa	Valor local máximo nos contactos cabo–furo
Penetração máxima	0,013405 mm	Valor reduzido face às dimensões globais do modelo
<i>Sliding Distance</i> máxima	28,332 mm	Associada ao deslizamento relativo do cabo nos furos
Estado da análise	Convergente	Primeira solução numericamente convergente do modelo com cinco vértebras e cabo

Tabela 4.3. Resultados principais da solução convergente com cinco vértebras e deslocamento de 20 mm aplicado ao cabo.

A Figura 4.16 mostra a deformação total obtida para o modelo de cinco vértebras. A curvatura global segue a direção esperada de fecho da garra, indicando que o cabo

conseguiu transmitir movimento à estrutura através dos furos.

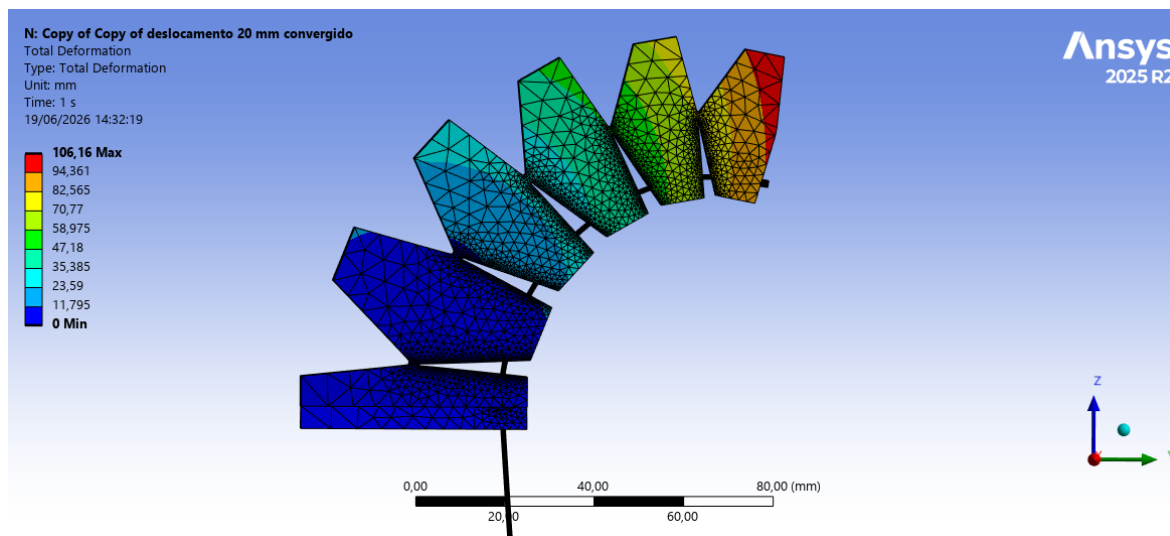


Figura 4.16. Deformação total no modelo com cinco vértebras.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam as principais grandezas associadas ao contacto. A pressão local de contacto numérica concentrou-se nas zonas de passagem do cabo pelos furos, como esperado para uma atuação por tração. A penetração máxima manteve-se reduzida, o que sugere que a formulação de contacto foi aceitável para esta fase do estudo. A distância de deslizamento, por sua vez, confirmou a existência de movimento relativo significativo entre o cabo e a estrutura, compatível com o princípio de atuação por cabo.

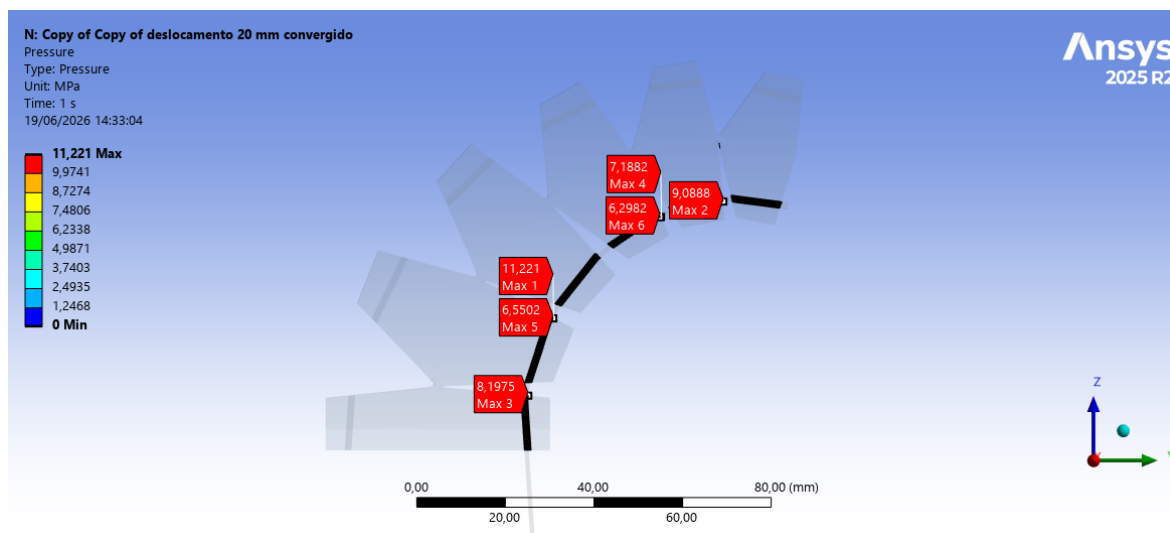


Figura 4.17. Pressão local de contacto numérica no modelo com cinco vértebras.

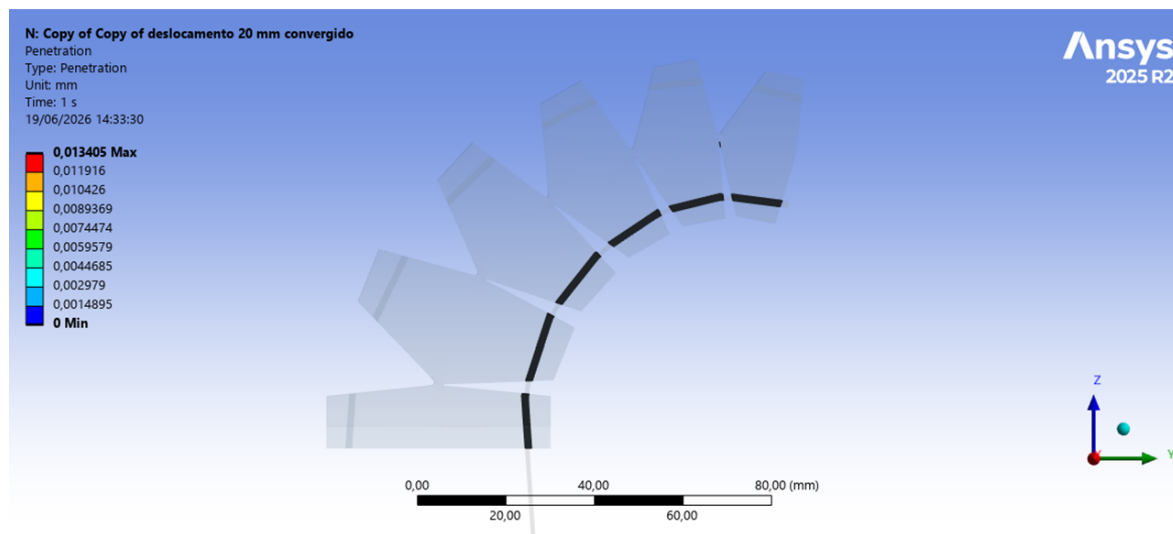


Figura 4.18. Penetração de contacto no modelo com cinco vértebras.

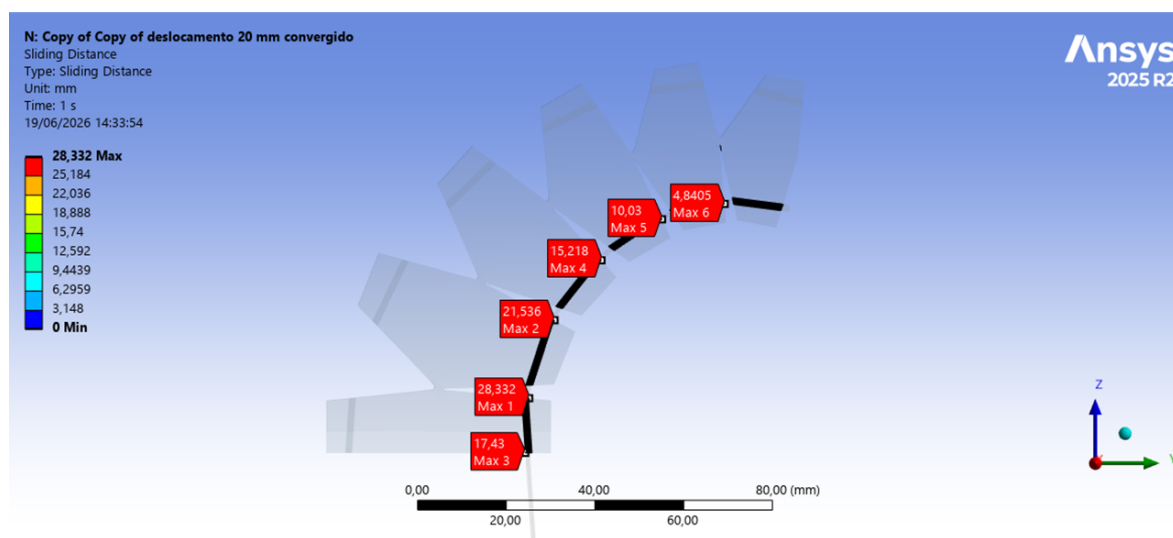


Figura 4.19. Distância de deslizamento no contacto cabo-furo.

Para além dos resultados mecânicos, é importante salientar o custo computacional associado a este tipo de simulação. A Figura 4.20 apresenta o histórico de dez soluções executadas no ANSYS durante o desenvolvimento dos modelos. Os tempos registados foram de 22,75 min, 20,63 min, 82,28 min, 38,68 min, 61,85 min, 61,82 min, 282,67 min, 646,83 min, 628,67 min e 323,00 min, respetivamente. O maior tempo registado correspondeu à simulação 8, com 646,83 min, ou seja,

aproximadamente 10 h 47 min. O tempo acumulado destas dez tentativas foi de cerca de 2169,18 min, equivalente a aproximadamente 36 h 09 min de processamento.

Simulação	Tempo registado	Tempo aproximado
1	22,75 min	0 h 23 min
2	20,63 min	0 h 21 min
3	82,28 min	1 h 22 min
4	38,68 min	0 h 39 min
5	61,85 min	1 h 02 min
6	61,82 min	1 h 02 min
7	282,67 min	4 h 43 min
8	646,83 min	10 h 47 min
9	628,67 min	10 h 29 min
10	323,00 min	5 h 23 min

Tabela 4.4. Tempos de solução registados no ANSYS.

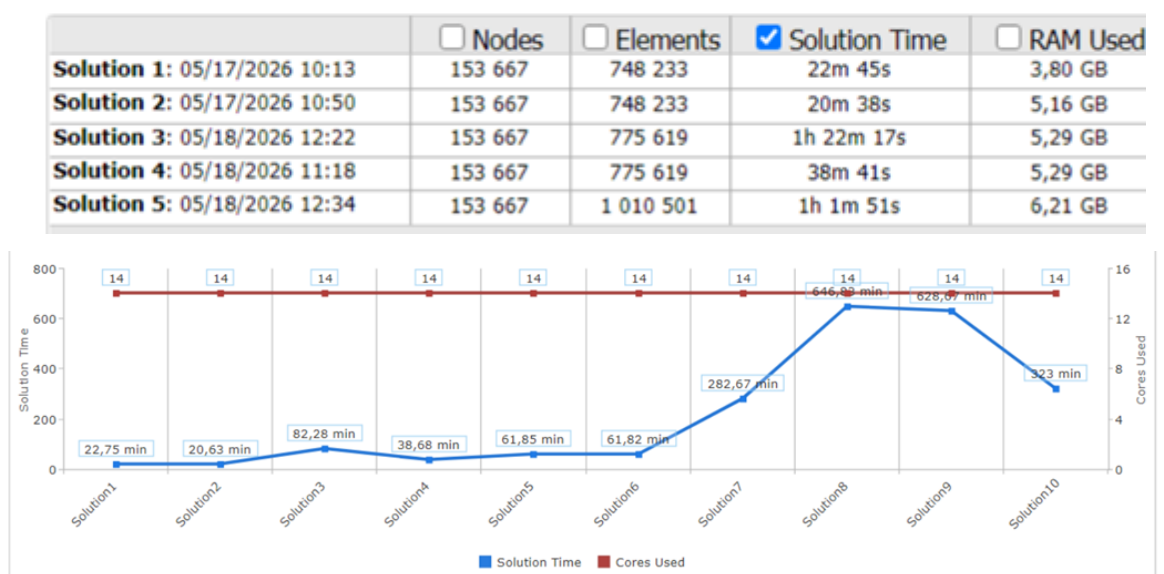


Figura 4.20. Histórico dos tempos de simulação no ANSYS. Em cima, ampliação das contagens de nós e elementos, tempo de solução e memória RAM dos cinco registos visíveis. Em baixo, gráfico original das dez soluções: tempo em minutos no eixo esquerdo e número de núcleos no eixo direito.

Este aspeto foi particularmente relevante no contexto da dissertação, uma vez que a aprendizagem do software e a definição correta de contactos, malha, substeps e critérios de convergência exigiram sucessivas tentativas. Pequenas alterações na geometria, na malha ou na formulação de contacto podiam transformar uma simulação aparentemente estável numa análise sem convergência, após várias horas de processamento. Este problema foi especialmente limitativo porque os tempos apresentados dizem respeito a modelos reduzidos, incluindo configurações

com apenas cinco vértebras. Assim, a extrapolação direta para a garra completa implicaria um custo computacional ainda mais elevado e uma probabilidade acrescida de instabilidade numérica.

Em várias tentativas, o tempo de espera não resultou numa solução aproveitável, devido a falhas de convergência, distorção de elementos, alteração abrupta do estado de contacto ou dificuldade em estabilizar a interação cabo–furo. Por este motivo, a estratégia adotada passou por verificar progressivamente modelos mais simples, começando por poucas vértebras e aumentando gradualmente a complexidade. Esta abordagem permitiu identificar quais os parâmetros mais sensíveis, nomeadamente o refinamento local da malha, a definição manual dos contactos, a desativação de *Small Sliding*, a utilização de substeps automáticos e o aumento do número máximo de iterações de equilíbrio.

Assim, os resultados obtidos com o modelo de cinco vértebras devem ser interpretados como uma demonstração numérica exploratória e não como validação completa da garra real. Apesar das simplificações adotadas, nomeadamente a utilização de cabo quadrado e de uma representação reduzida da garra, o modelo permitiu avaliar a viabilidade da abordagem numérica com cabo. A simulação convergente a 20 mm mostrou que é possível representar qualitativamente a transmissão de movimento por contacto cabo–furo, identificar zonas de pressão local de contacto numérica no modelo FEA, avaliar penetração e observar o deslizamento relativo do cabo. A continuação natural deste trabalho passará pela extensão gradual do modelo, pela melhoria da representação do material e pela comparação experimental das forças de atuação.

4.3. Modelação Multicorpo em *Rigid Dynamics*

A abordagem *Rigid Dynamics* foi desenvolvida como complemento ao FEA, com o objetivo de reproduzir a cinemática global de fecho da garra sem resolver a deformação contínua do TPU ou o contacto explícito cabo–furo. Cada vértebra foi tratada como corpo rígido e as zonas de dobragem foram representadas por juntas revolutas com momentos torsores e rigidezes torsionais equivalentes. Assim, os mapas de *Total Deformation* apresentados nas figuras seguintes devem ser interpretados como visualização do deslocamento global dos corpos rígidos e não como deformação elástica do material.

4.3.1. Evolução Progressiva dos Modelos Multicorpo

O desenvolvimento começou com um modelo de uma vértebra para verificar a criação da junta revoluta, a orientação do eixo local e o sentido de rotação. O modelo de duas vértebras permitiu confirmar a transmissão cinemática ao longo de uma cadeia articulada. Posteriormente, os modelos de cinco e sete vértebras foram utilizados para verificar a repetibilidade da configuração e a escalabilidade da abordagem antes da montagem integral.

A Figura 4.21 mostra a evolução incremental dos modelos multicorpo.

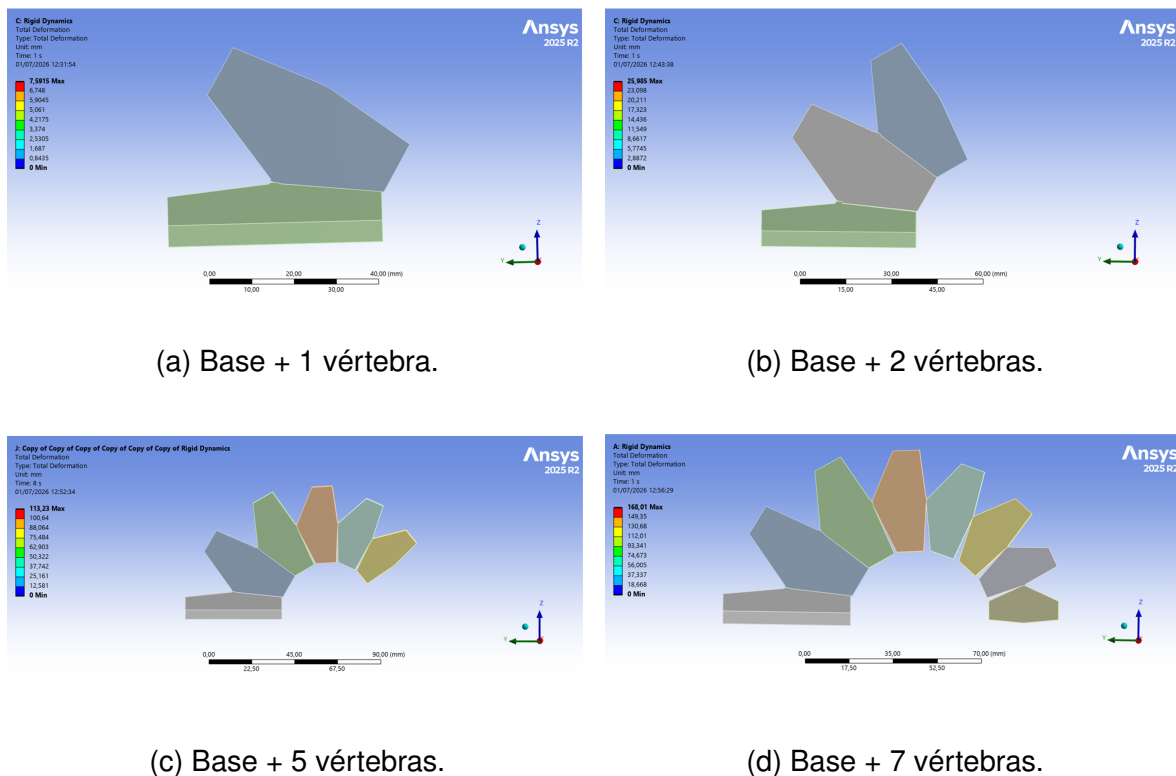


Figura 4.21. Modelos progressivos em *Rigid Dynamics*.

A progressão foi decisiva para evitar transferir diretamente uma configuração ainda não verificada para o modelo integral. Nos modelos iniciais, pequenos erros na orientação de uma junta ou na escolha de *reference body* e *mobile body* alteravam completamente o sentido de fecho. A verificação sucessiva permitiu uniformizar a convenção adotada e reduzir o número de tentativas no modelo completo.

4.3.2. Modelo Completo e Reprodução do Fecho Cinemático

Depois de verificada a cadeia em modelos reduzidos, foi construído o modelo integral com 18 juntas revolutas em série e uma junta fixa entre a base e o solo. Os momentos foram individualizados de acordo com o braço perpendicular medido para

cada vértebra e aplicados através de uma rampa temporal. A utilização de limites angulares nas juntas (*joint stops*) próximos de 30° substituiu o contacto contínuo entre vértebras e impediu sobre-rotação sem introduzir o custo computacional associado à deteção simultânea de múltiplas regiões de contacto.

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram a configuração aberta e o fecho obtido com momentos torsores individualizados.

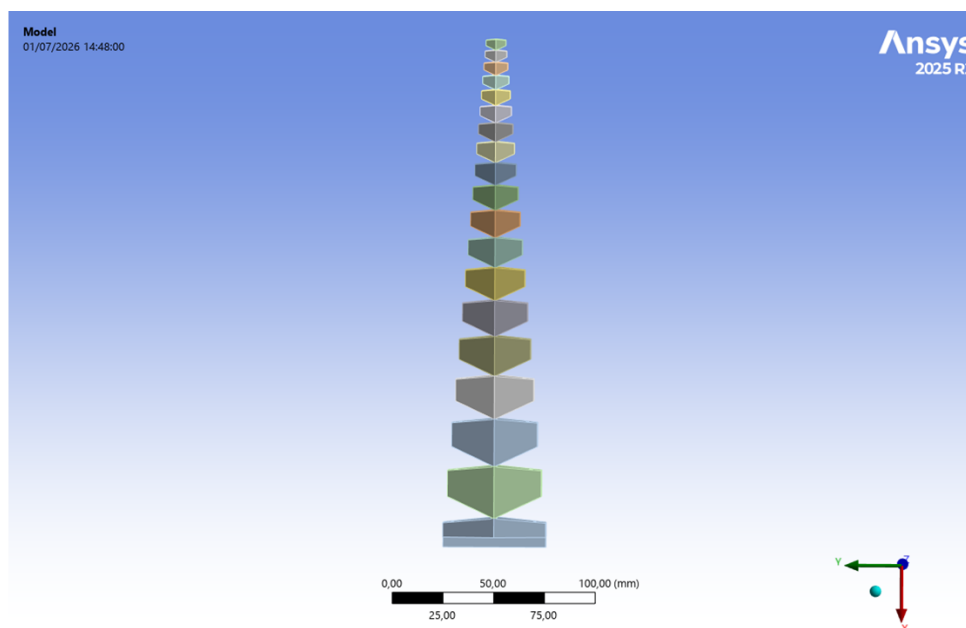


Figura 4.22. Modelo *Rigid Dynamics* em configuração aberta.

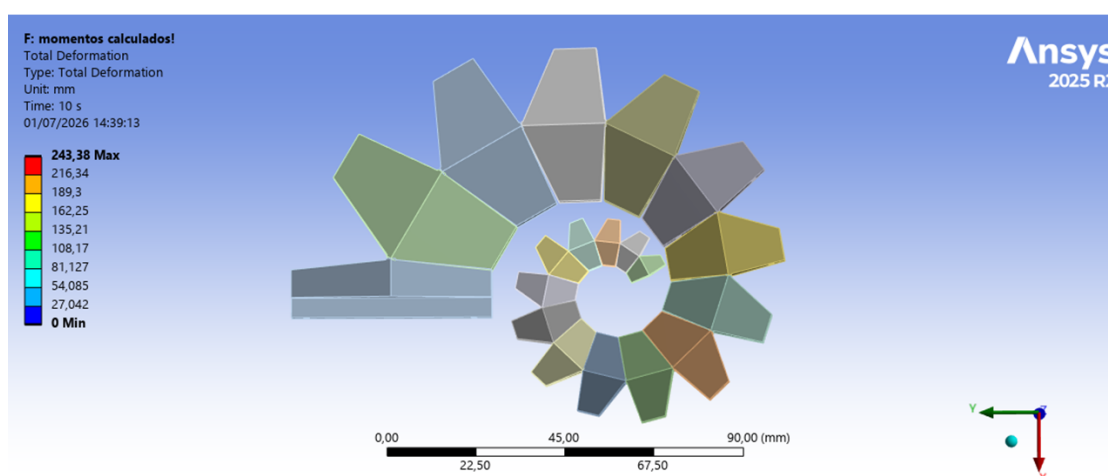


Figura 4.23. Fecho do modelo *Rigid Dynamics*.

O fecho completo obtido não deve ser interpretado como validação da deformação

real do TPU. O resultado indica que a distribuição de momentos e a sequência de juntas são capazes de reproduzir qualitativamente a forma global de enrolamento observada na garra física. Esta é precisamente a principal utilidade do modelo multicorpo: estudar trajetória, coordenação das juntas, limites angulares e interação cinemática global sem depender da resolução de uma malha deformável com contactos complexos.

4.3.3. Comparação entre FEA e *Rigid Dynamics*

As duas abordagens numéricas têm objetivos diferentes e devem ser interpretadas como complementares. O FEA representa a estrutura como corpo deformável e permite observar grandezas locais, enquanto o *Rigid Dynamics* simplifica as vértebras como corpos rígidos articulados e privilegia a eficiência no estudo da cinemática. A Tabela 4.5 resume as principais diferenças.

Critério	FEA não linear	<i>Rigid Dynamics</i>
Representação estrutural	TPU deformável, com grandes deformações e material aproximado	Vértebras rígidas ligadas por juntas revolutas com propriedades torsionais equivalentes
Atuação	Cabo explícito, deslocamento imposto e contacto cabo-furo	Momentos torsores equivalentes aplicados em cada junta
Grandezas acessíveis	Deformação, tensão/indicadores, pressão local de contacto numérica, penetração e deslizamento	Rotações, reações nas juntas, momentos equivalentes, trajetória e configuração global
Contactos	Necessários para representar cabo-furo e auto-contacto; fortemente penalizadores para a convergência	Podem ser substituídos por limites angulares nas juntas no estudo cinemático; contacto com objeto requer calibração própria
Principal vantagem	Maior detalhe físico local	Elevada eficiência para estudar fecho global e modelos com muitas vértebras
Principal limitação	Tempos elevados e forte sensibilidade a malha, material e contacto	Não fornece tensão, deformação local do TPU nem pressão local de contacto

Tabela 4.5. Comparação entre as abordagens FEA e *Rigid Dynamics* utilizadas no estudo da garra *SpiRobs*.

A diferença de custo computacional é visível nos tempos registados durante o desenvolvimento. Para os modelos de uma, duas e cinco vértebras, o *Rigid Dynamics*

apresentou tempos de solução de 2 min 48 s, 22 s e 6 min 10 s, respetivamente. Nos modelos FEA comparáveis, os tempos foram 38 min 33 s, 1 h 30 min e 5 h 22 min. Embora estes valores não constituam uma comparação de desempenho rigorosa — porque as formulações, contactos, malhas e critérios de solução são distintos — evidenciam uma redução prática substancial do tempo de cálculo para o estudo cinemático.

Modelo	Tempo FEA	Tempo <i>Rigid Dynamics</i>	Redução
Base + 1 vértebra	38 min 33 s	2 min 48 s	13,8×
Base + 2 vértebras	1 h 30 min	22 s	245,5×
Base + 5 vértebras	5 h 22 min	6 min 10 s	52,2×
Base + 7 vértebras	—	2 min 12 s	—
Modelo completo	Não obtido como solução FEA integral	55 min 30 s	—

Tabela 4.6. Tempos registados nos modelos FEA e *Rigid Dynamics*.

O tempo de resolução do modelo de sete vértebras foi inferior ao do modelo de cinco vértebras porque corresponde a uma configuração final diferente, com parâmetros e contactos distintos. Por isso, os tempos não seguem necessariamente uma progressão monotónica com o número de vértebras. Ainda assim, o resultado central mantém-se: foi possível resolver o modelo completo em menos de uma hora, enquanto as tentativas FEA com modelos reduzidos podiam exigir várias horas e, em alguns casos, não produzir uma solução utilizável.

Em síntese, o FEA foi indispensável para explorar a interação local cabo–furo e compreender as limitações associadas ao material flexível e ao contacto. O *Rigid Dynamics* permitiu, por sua vez, avançar para o modelo integral e reproduzir o comportamento global de fecho. A utilização conjunta das duas abordagens fornece uma perspetiva mais completa: o FEA apoia a interpretação local e o modelo multicorpo apoia a análise de movimento e de atuação equivalente.

4.4. Integração Eletromecânica e Verificação Experimental

Concluída a fase de projeto e simulação, o desenvolvimento transitou para a materialização física do sistema experimental. Esta etapa foi iterativa e exigiu a resolução sucessiva de problemas de eletrónica, controlo e transmissão mecânica. As falhas identificadas durante os testes iniciais permitiram ajustar a arquitetura até se obter

uma solução mais robusta para a atuação e aquisição de dados.

4.4.1. Evolução da Arquitetura de Controlo: Do Curso Fixo ao Controlo Momentâneo

Os testes de integração conduziram à arquitetura com ESP32 e três microinterruptores descrita na Secção 3.8. A identificação dos pares de bobinas por continuidade elétrica permitiu obter rotação controlada. O curso fixo inicial mostrou-se pouco adaptável aos objetos e aos níveis de aperto ensaiados, motivando a adoção do comando momentâneo: o motor opera enquanto o botão direcional se mantém premido. O terceiro botão desencadeia a aquisição após estabilização visual da condição de aperto. Esta evolução melhorou a adaptação manual do fecho, sem constituir um controlo automático da força aplicada.

4.4.2. Desenho do Sistema de Transmissão e Ancoragem

A transmissão mecânica foi um desafio de fidelidade. Projetou-se uma polia CAD personalizada para o veio do motor, reduzindo o risco de escorregamento ou sobreposição irregular do fio. Para suportar o binário gerado pelo motor sem que este se deslocasse na bancada, desenhou-se um suporte estrutural para fixação direta à mesa de trabalho. Esta ancoragem rígida reduziu os deslocamentos e as vibrações do conjunto durante a atuação, favorecendo uma transmissão mais estável da tração para o cabo.

4.4.3. Verificação da Cadeia de Aquisição e Calibração FSR

A calibração individual dos dois sensores FSR 406 forneceu relações empíricas entre leitura ADC e massa equivalente. Aplicando as Equações 3.5 e 3.6 aos 20 e 15 pontos publicados, respetivamente, obtiveram-se R^2 de aproximadamente 0,9846 e 0,9870. Os RMSE foram 43,05 g no Sensor 1 e 5,80 g no Sensor 2; os maiores resíduos absolutos foram 99,40 g e 10,51 g. A Tabela A.4 e a Figura A.1 apresentam estes indicadores e os resíduos. Estes valores descrevem o ajuste aos pontos calibrados; não são incertezas de medição nem limites de erro garantidos fora dessa gama.

A utilização de duas curvas independentes revelou-se necessária devido à variabilidade entre unidades FSR. Durante os ensaios, cada leitura foi processada com a equação específica do respetivo sensor, sendo as forças posteriormente somadas para obter a força resultante transmitida através do objeto instrumentado.

A calibração direta do Sensor 2 terminou em 222,95 g, enquanto as estimativas

da campanha atingiram aproximadamente 499 g. A extrapolação superior afetou 279, 285, 286 e 288 dos 288 pontos das condições 20%–105 mm, 20%–115 mm, 100%–105 mm e 100%–115 mm, respetivamente. A permanência abaixo da gama comercial indicada para o componente não valida a curva ajustada nessa região. As posições afetadas e a dependência das comparações em relação à contribuição extrapolada são analisadas na Secção 4.5.5.

A designação operacional de força resultante medida corresponde à soma escalar das forças normais estimadas nos dois sensores, conforme a Secção 3.10; não corresponde à resultante vetorial de todas as forças na superfície do objeto. A divisão por 1233,41 mm² fornece uma pressão média equivalente de referência, condicionada pela transmissão mecânica das cascas e pela calibração. Esta métrica permite comparações exploratórias, mas não constitui um mapa de pressão local.

4.5. Resultados Experimentais do Mapeamento Circunferencial

A campanha experimental de mapeamento circunferencial da garra *SpiRobs* foi finalizada com quatro condições experimentais: 20% de preenchimento com deslocamentos de 105 mm e 115 mm, e 100% de preenchimento com deslocamentos de 105 mm e 115 mm. Em cada condição foram realizadas quatro repetições completas, com 72 posições angulares e incremento de 5°. Os registos completos de cada repetição encontram-se no Apêndice B, e a síntese estatística complementar dos quatro casos encontra-se no Apêndice C.

O objetivo desta análise não é obter uma medição local exata do campo de pressão, mas sim aplicar e verificar um sistema experimental preliminar capaz de mapear, de forma discreta e comparativa, a distribuição circunferencial da força resultante e a respetiva pressão média equivalente. Esta abordagem permite comparar diferentes configurações da garra sob condições controladas e identificar tendências associadas à configuração fabricada, ao deslocamento imposto ao cabo e à repetibilidade dos ensaios.

A Tabela 4.7 apresenta os principais indicadores globais obtidos para as quatro condições experimentais.

A leitura destes indicadores deve considerar duas limitações importantes. Em primeiro lugar, foram realizadas quatro repetições por condição, o que permite avaliar a repetibilidade do procedimento de ensaio, mas não a reprodutibilidade estatística entre vários protótipos independentes. Em segundo lugar, foi utilizado

Tabela 4.7. Síntese das quatro condições: estimativas condicionadas pela extrapolação do Sensor 2. Os extremos referem-se ao perfil médio das quatro repetições.

Condição	$\bar{F}$ [N]	$\bar{p}_{eq}$ [kPa]	Máximo [N; °]	Mínimo [N; °]	CV [%]
20% – 105 mm	8,79	7,12	11,32; 350	5,78; 125	16,41
20% – 115 mm	11,42	9,26	13,18; 90	7,82; 310	10,95
100% – 105 mm	11,63	9,43	13,83; 175	7,67; 115	12,92
100% – 115 mm	12,38	10,04	14,06; 0	9,41; 130	11,41

apenas um exemplar de cada configuração fabricada; por isso, a comparação entre 20% e 100% deve ser interpretada como comparação entre os protótipos produzidos e não como efeito isolado do preenchimento interno.

Os mapas polares das Figuras 4.24 a 4.27 apresentam os quatro varrimentos de cada condição. Os perfis são não uniformes e combinam os efeitos da orientação do objeto, da transmissão mecânica aos sensores e do procedimento de rotação. A relação com uma vértebra ou mecanismo particular não pode ser isolada a partir destes gráficos; a consistência dos extremos entre repetições é examinada na Secção 4.5.4.

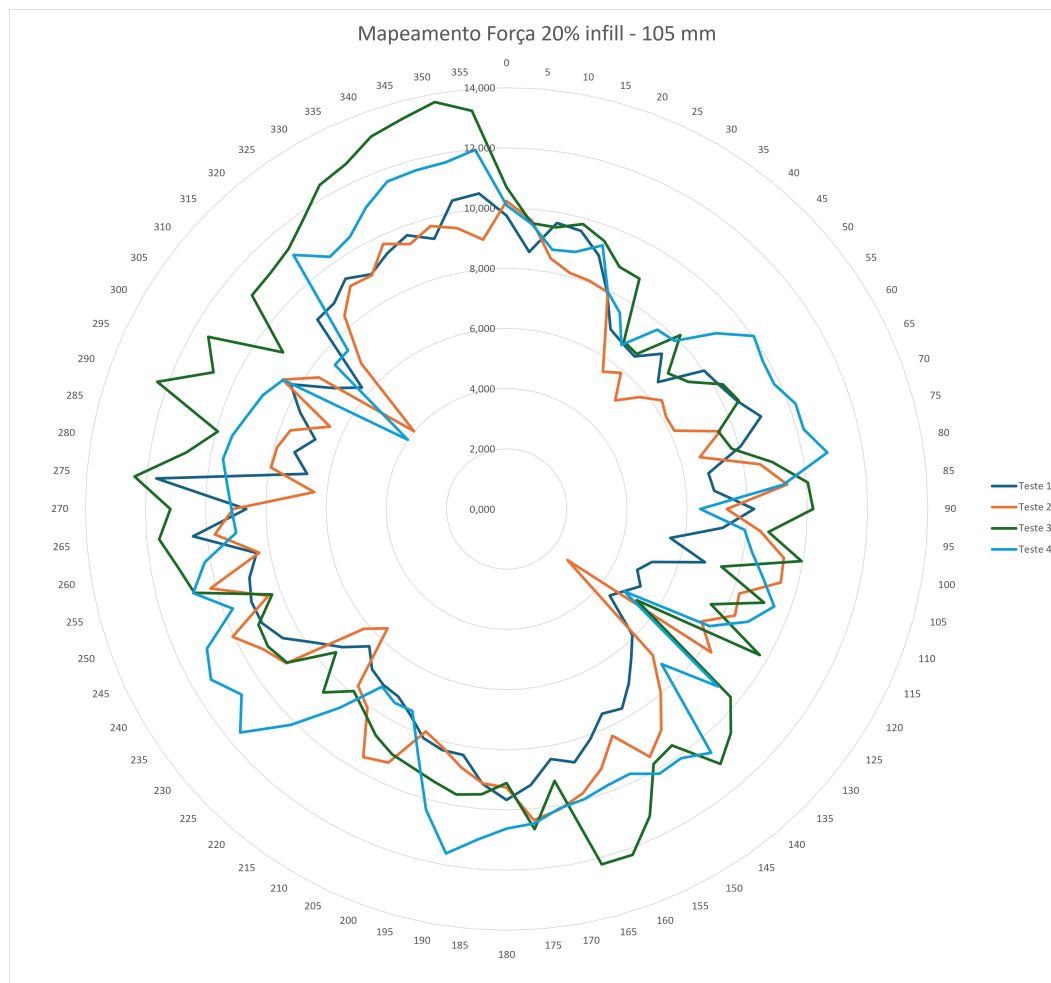


Figura 4.24. Força circunferencial para 20% e 105 mm. Coordenada angular: orientação [°]; coordenada radial: força resultante medida [N]. As quatro curvas correspondem aos quatro varrimentos.

A Figura 4.25 apresenta o perfil circunferencial para 20% e 115 mm.

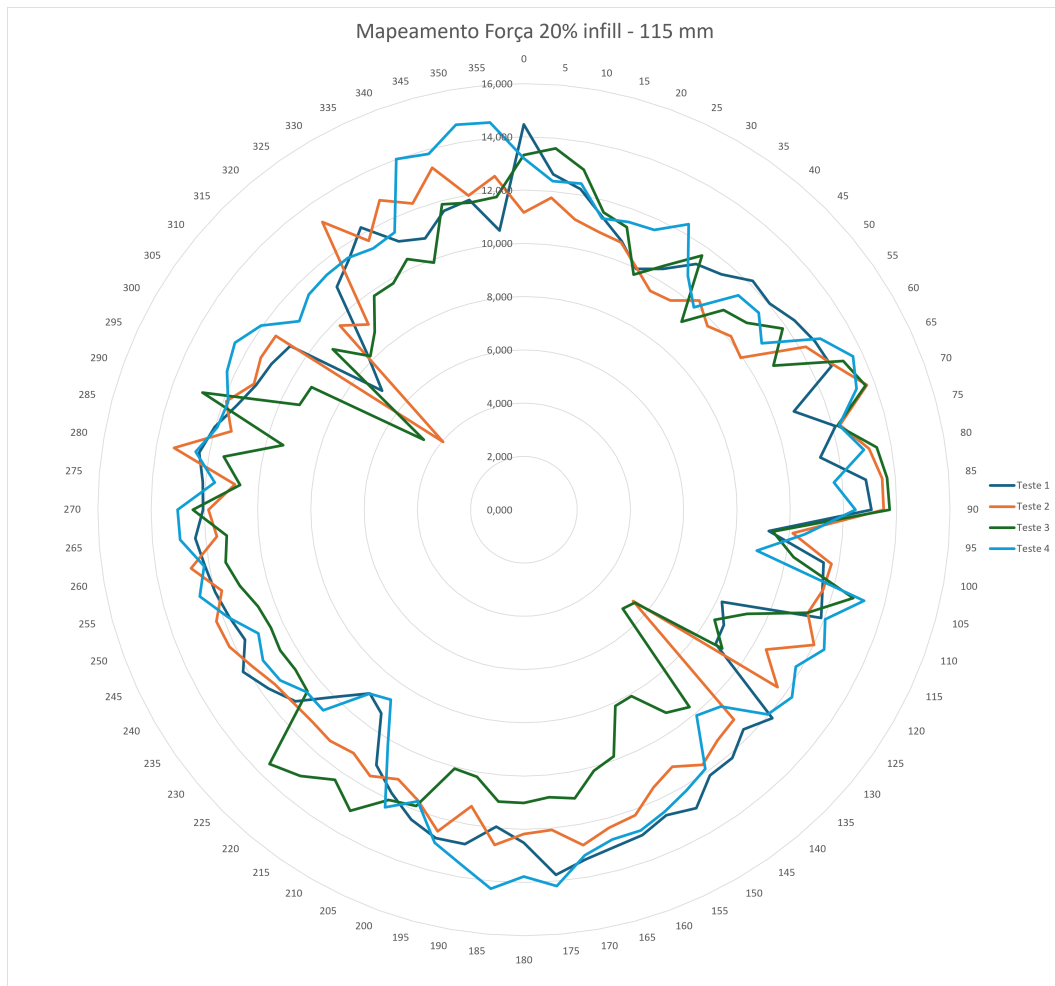


Figura 4.25. Força circunferencial para 20% e 115 mm. Coordenada angular: orientação [°]; coordenada radial: força resultante medida [N]. As quatro curvas correspondem aos quatro varrimentos.

A Figura 4.26 apresenta o perfil circunferencial para 100% e 105 mm.

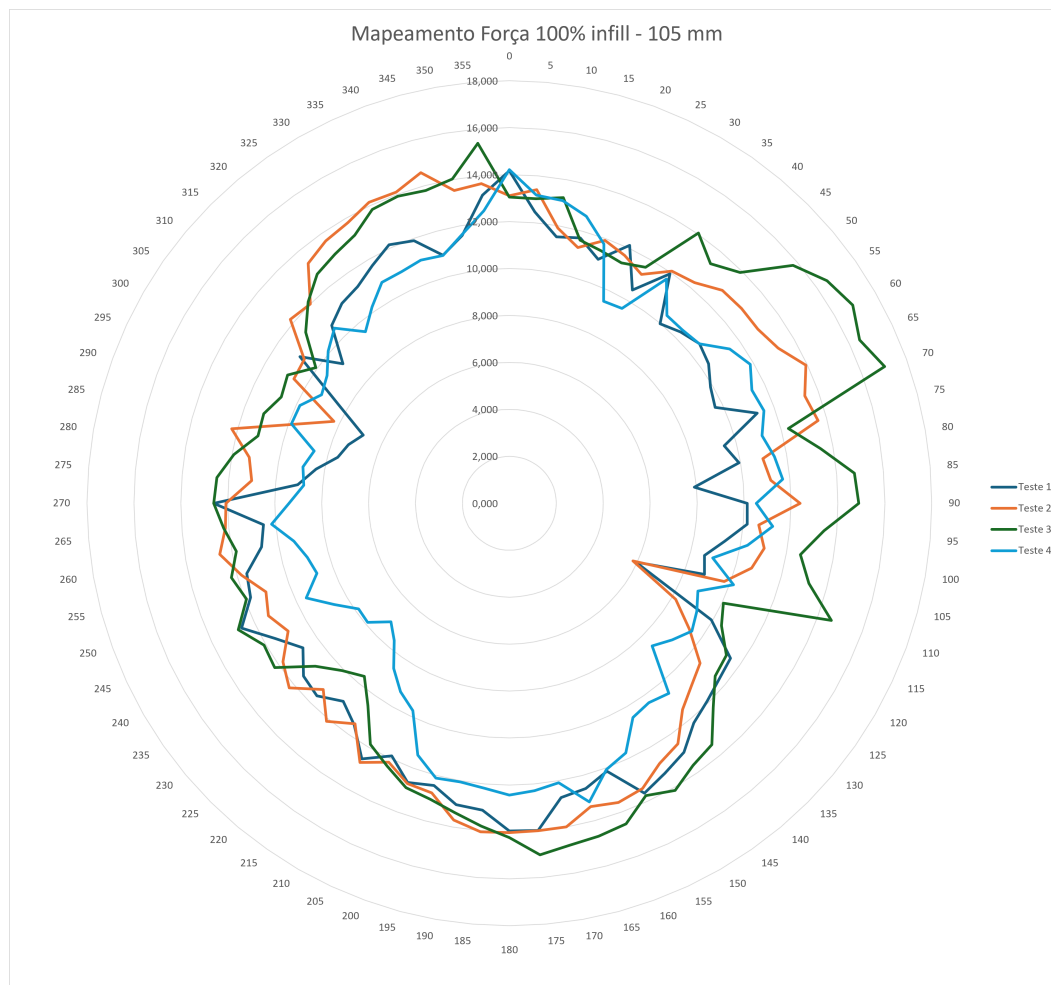


Figura 4.26. Força circunferencial para 100% e 105 mm. Coordenada angular: orientação [°]; coordenada radial: força resultante medida [N]. As quatro curvas correspondem aos quatro varrimentos.

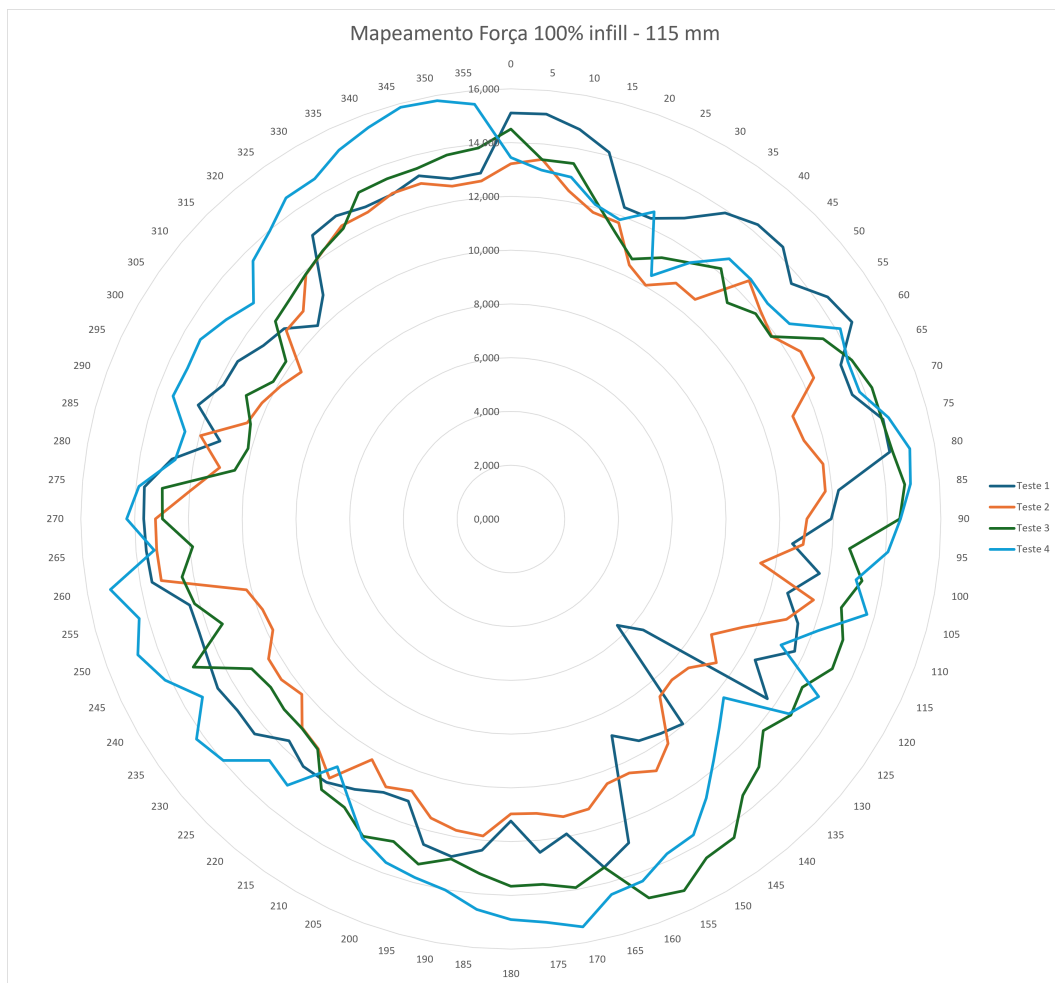


Figura 4.27. Força circunferencial para 100% e 115 mm. Coordenada angular: orientação [°]; coordenada radial: força resultante medida [N]. As quatro curvas correspondem aos quatro varrimentos.

As Figuras 4.28 a 4.31 apresentam, para cada condição, a curva média da força resultante e os limites correspondentes à média $\pm$ desvio-padrão amostral. Estes gráficos permitem avaliar simultaneamente a intensidade média da força e a dispersão entre as quatro repetições.

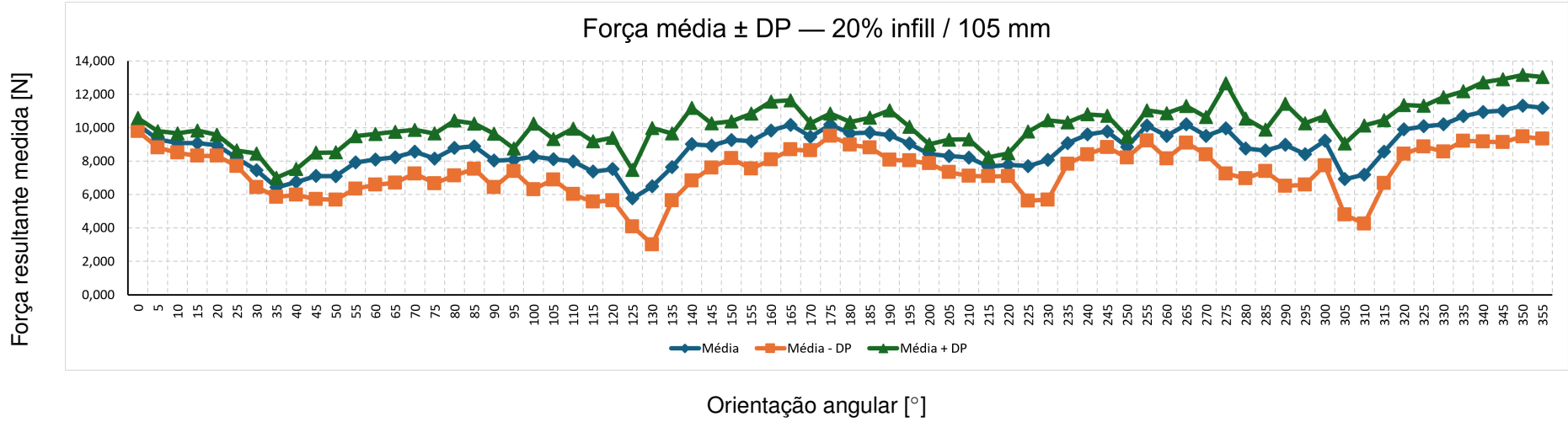


Figura 4.28. Força média para 20% e 105 mm. DP: desvio-padrão amostral entre quatro varrimentos; média $\pm$ DP não é intervalo de confiança. Valores condicionados pela extrapolação do Sensor 2.

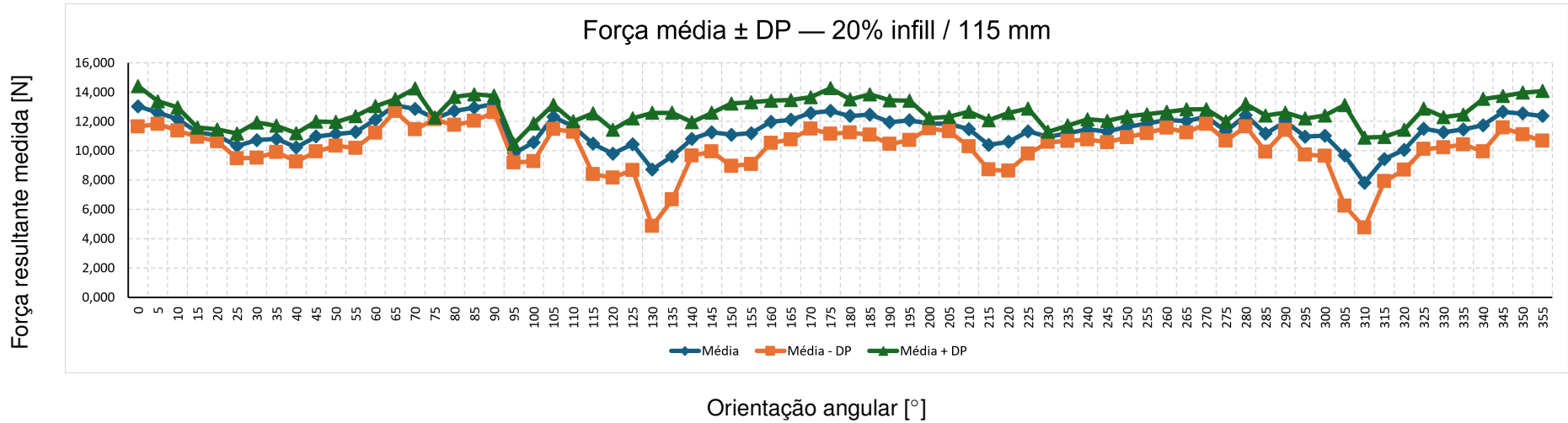


Figura 4.29. Força média para 20% e 115 mm. DP: desvio-padrão amostral entre quatro varrimentos; média $\pm$ DP não é intervalo de confiança. Valores condicionados pela extrapolação do Sensor 2.

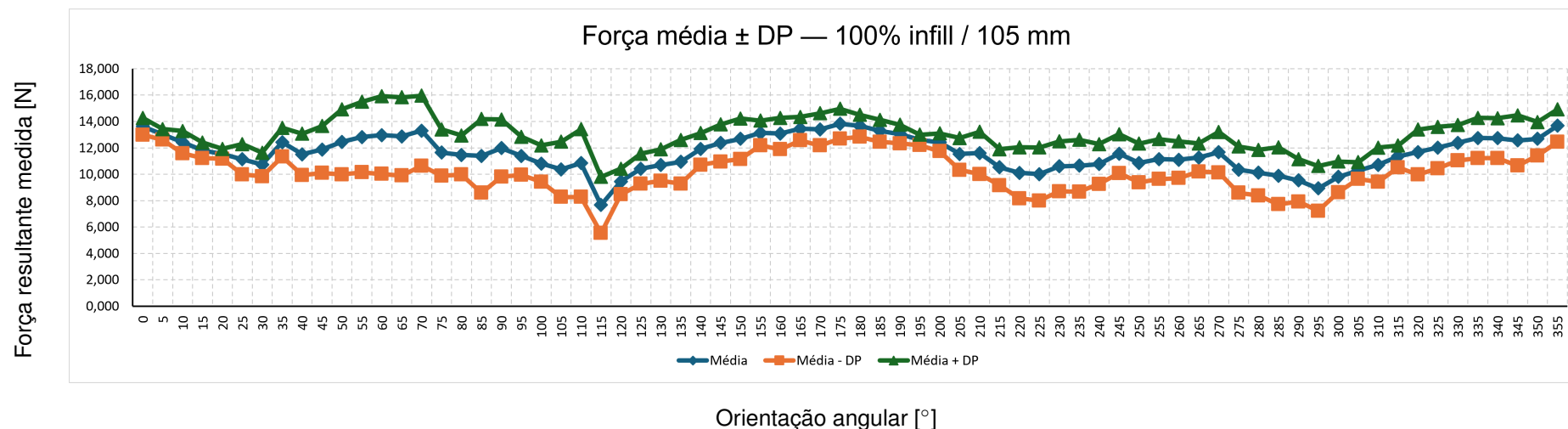


Figura 4.30. Força média para 100% e 105 mm. DP: desvio-padrão amostral entre quatro varrimentos; média $\pm$ DP não é intervalo de confiança. Valores condicionados pela extrapolação do Sensor 2.

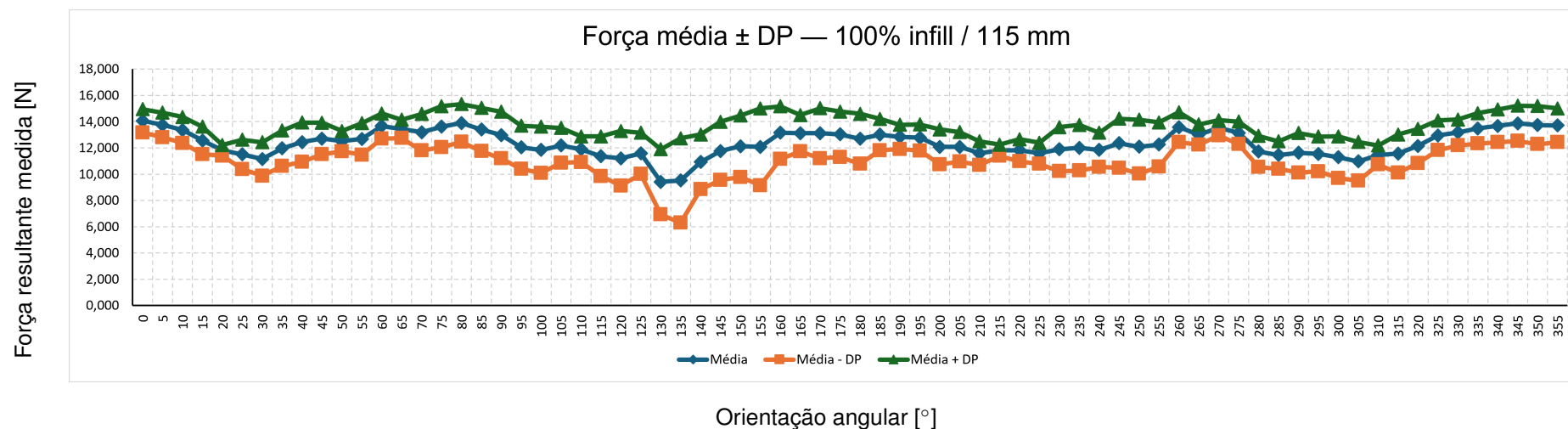


Figura 4.31. Força média para 100% e 115 mm. DP: desvio-padrão amostral entre quatro varrimentos; média $\pm$ DP não é intervalo de confiança. Valores condicionados pela extrapolação do Sensor 2.

A Tabela 4.8 resume as principais variações relativas entre condições experimentais.

Tabela 4.8. Variações descritivas entre condições. As percentagens da força média e da pressão média equivalente coincidem; as estimativas dependem da extrapolação do Sensor 2.

Comparação	Referência	Comparada	$\Delta \bar{F}$ [%]	ΔCV [p.p.]
Deslocamento, 20%	20% – 105 mm	20% – 115 mm	+30,0	–5,46
Deslocamento, 100%	100% – 105 mm	100% – 115 mm	+6,5	–1,51
Configurações, 105 mm	20% – 105 mm	100% – 105 mm	+32,3	–3,49
Configurações, 115 mm	20% – 115 mm	100% – 115 mm	+8,4	+0,46
Condições extremas	20% – 105 mm	100% – 115 mm	+40,9	–5,00

Como a pressão média equivalente foi calculada dividindo a força resultante pela mesma área de referência em todas as condições, as variações percentuais de força média e de pressão média equivalente são matematicamente iguais. Assim, a pressão média equivalente não deve ser interpretada como uma grandeza independente da força, mas como uma normalização útil para expressar a intensidade média de contacto relativamente à área de referência definida.

4.5.1. Comparação entre Configurações Fabricadas

Para 105 mm, a configuração de 100% apresentou uma força média global de 11,63 N, face a 8,79 N na configuração de 20%: uma diferença descritiva de +32,3%. Para 115 mm, as médias foram 12,38 N e 11,42 N, respetivamente, reduzindo a diferença para +8,4%. Estes valores caracterizam os dois exemplares fabricados, que diferiram também no bico, tempo de impressão e utilização da câmara aquecida; não isolam o preenchimento interno. A influência da extrapolação do Sensor 2 nestas comparações é examinada na Secção 4.5.5.

4.5.2. Influência do Deslocamento Nominal do Cabo

No protótipo de 20%, a alteração de 105 mm para 115 mm elevou a força média global de 8,79 N para 11,42 N (+30,0%). No protótipo de 100%, o aumento foi de 11,63 N para 12,38 N (+6,5%). A resposta incremental média foi, portanto, diferente nos dois exemplares dentro das duas condições de atuação ensaiadas. A proximidade entre 20%–115 mm e 100%–105 mm, cuja diferença descritiva é de –1,8%, não demonstra equivalência entre as condições nem compensação mecânica geral pelo deslocamento: não foi avaliada a incerteza dessa diferença nem a variabilidade entre exemplares independentes.

4.5.3. Repetibilidade e Interpretação da Pressão Média Equivalente

O CV médio passou de 16,41% para 10,95% no protótipo de 20% e de 12,92% para 11,41% no de 100%, ao aumentar o deslocamento. Observou-se, assim, menor dispersão relativa nas condições de 115 mm, sem que isso constitua uma caracterização completa da precisão do sistema. Os desvios-padrão entre quatro repetições descrevem a variabilidade do procedimento e não incorporam, por si, erros sistemáticos de calibração, transmissão mecânica ou extrapolação.

A condição 100%–115 mm apresentou a maior média observada, 12,38 N, correspondente a 10,04 kPa com a área de referência adotada. A pressão média equivalente é uma normalização da soma escalar das forças estimadas nos sensores. Não é uma medição local de pressão e não acrescenta informação estatística independente à força. A análise angular seguinte e a análise por cenários delimitam o que pode ser concluído a partir destes valores.

4.5.4. Consistência Angular dos Extremos entre Repetições

A análise dos extremos por repetição permite distinguir um máximo do perfil médio de uma posição de pico repetida em todos os ensaios. A Tabela 4.9 apresenta os ângulos dos máximos e mínimos de cada um dos quatro varrimentos. Para respeitar a periodicidade, calculou-se também o menor arco circular que contém as quatro posições de cada tipo de extremo, obtido removendo o maior intervalo sem extremos na circunferência. A amplitude desse arco é uma descrição geométrica destas quatro posições, não um intervalo de confiança.

Tabela 4.9. Ângulos dos extremos por varrimento, pela ordem das repetições 1 a 4. O arco é a menor amplitude circular que contém os quatro ângulos.

Condição	Máximos [°]	Mínimos [°]	Arco máx. [°]	Arco mín. [°]
20% – 105 mm	275, 175, 350, 355	130, 130, 125, 305	180	180
20% – 115 mm	0, 70, 90, 350	310, 310, 305, 215	100	95
100% – 105 mm	0, 345, 70, 0	115, 115, 220, 225	85	110
100% – 115 mm	5, 5, 155, 345	135, 135, 285, 130	170	155

Os máximos não ocorreram numa posição única nas quatro repetições de nenhuma condição. Na configuração 100%–105 mm, três máximos ficaram junto da referência angular, a 345°, 0° e 0°, mas o terceiro varrimento atingiu o máximo a 70°. Na condição 100%–115 mm, três máximos ocorreram a 345°, 5° e 5°, enquanto o terceiro varrimento apresentou o máximo a 155°. Assim, picos próximos de 0°/360°

surtem com frequência, mas não constituem uma posição de máximo invariável.

Alguns mínimos mostram maior concordância em parte das repetições. Na condição 20%–105 mm, os três primeiros mínimos ocorreram entre 125° e 130°, e o quarto a 305°. Para 20%–115 mm, os três primeiros mínimos ficaram entre 305° e 310°, e o quarto ocorreu a 215°. Nas condições de 100%, os mínimos também mudaram entre setores nas diferentes repetições. Os valores das forças e os ângulos individuais são reunidos na Tabela C.6.

Esta variabilidade recomenda a interpretação dos perfis como uma assinatura angular do conjunto garra–objeto–sensores nas condições do protocolo. A fotografia da Figura 3.12a documenta a marca colocada numa única vértebra da garra para alinhamento com a referência da peça de controlo da rotação, definindo a posição de 0°. A marca destinou-se à orientação inicial da montagem; não foi efetuada uma identificação individual das restantes vértebras nem estabelecida uma correspondência entre cada pico e uma vértebra específica. Além disso, rodar o objeto altera a orientação dos sensores e pode modificar o contacto e o atrito. Como a posição do motor permanece fixa e a sequência angular decorre no tempo, a resposta pode incluir acomodação e evolução temporal durante o varrimento. Os resultados permitem identificar setores de interesse para observação futura, mas não localizar diretamente picos de pressão numa vértebra ou separar todas estas contribuições.

4.5.5. Extrapolação do Sensor 2 e Análise de Sensibilidade

A análise da calibração descrita na Secção 3.9 deve acompanhar a comparação das condições. Dos 1152 pares de estimativas dos sensores, 1138 incluem uma massa do Sensor 2 superior ao limite diretamente calibrado de 222,95 g. Trata-se de 98,8% das estimativas desse sensor, não de uma percentagem de erro da força total. A Tabela 4.10 discrimina esta situação; as 14 posições que não ultrapassam esse limite são identificadas por condição e repetição na Tabela C.4. Todas as restantes posições do Apêndice B estão acima do limite.

Tabela 4.10. Extensão da extrapolação superior do Sensor 2, com quatro repetições de 72 posições por condição.

Condição	Acima de 222,95 g	Percentagem [%]	Maior estimativa [g]
20% – 105 mm	279/288	96,9	499,08
20% – 115 mm	285/288	99,0	493,72
100% – 105 mm	286/288	99,3	492,57
100% – 115 mm	288/288	100,0	476,06

Para quantificar a dependência das comparações em relação à contribuição extrapolada, foi realizada uma análise por cenários. Para cada repetição j e orientação θ ,

definiu-se

$$F_j^{(\delta)}(\theta) = F_j(\theta) + \delta I_j(\theta) F_{S2,j}(\theta), \quad (4.1)$$

em que $I_j(\theta) = 1$ quando a massa estimada pelo Sensor 2 ultrapassa 222,95 g e $I_j(\theta) = 0$ nas restantes posições. Foram considerados os fatores

$$\delta \in \{-0,20; -0,10; 0; 0,10; 0,20\},$$

aplicando o mesmo fator relativo a todas as contribuições extrapoladas, nas quatro condições. As estimativas do Sensor 1 e as posições do Sensor 2 abaixo do limite permaneceram inalteradas. Os cálculos usam as forças tabuladas no Apêndice B, pelo que pequenas diferenças na última casa decimal podem decorrer do arredondamento desses registos. Nas tabelas de síntese, as forças são apresentadas com duas casas decimais e as variações percentuais com uma; as comparações foram calculadas antes desse arredondamento de apresentação.

Os fatores de $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$ são hipóteses de sensibilidade escolhidas para explorar a dependência do resultado. Não foram obtidos da calibração e não representam probabilidades, correções conhecidas, incertezas de medição ou intervalos de confiança. Em cada cenário, calculou-se a média das 72 posições de cada varrimento e, depois, a média dos quatro varrimentos; mantém-se $n = 4$ repetições por condição.

Tabela 4.11. Força média global [N] nos cenários de variação da contribuição extrapolada do Sensor 2.

Condição	$\delta = -20\%$	-10%	0%	$+10\%$	$+20\%$
20% – 105 mm	8,15	8,47	8,79	9,11	9,42
20% – 115 mm	10,67	11,05	11,42	11,80	12,18
100% – 105 mm	10,89	11,26	11,63	12,00	12,37
100% – 115 mm	11,62	12,00	12,38	12,77	13,15

Nos cinco cenários comuns, manteve-se a ordenação das médias: 20%–105 mm, 20%–115 mm, 100%–105 mm e 100%–115 mm, por ordem crescente. Contudo, a amplitude das diferenças depende do fator aplicado. A Tabela 4.12 apresenta essa dependência para as principais comparações; a normalização pela área constante produz as mesmas variações percentuais de pressão média equivalente.

Tabela 4.12. Variação relativa da força média [%] nos cenários extremos e de referência. Cada linha usa a mesma condição de referência da Tabela 4.8.

Comparação	$\delta = -20\%$	0%	$+20\%$
Deslocamento, 20%	30,9	30,0	29,2
Deslocamento, 100%	6,7	6,5	6,3
Configurações, 105 mm	33,6	32,3	31,2
Configurações, 115 mm	8,9	8,4	8,0
Condições extremas	42,6	40,9	39,5

A manutenção da ordenação é válida apenas para a perturbação comum ensaiada. Não demonstra que a ordenação sobreviva a erros diferentes entre condições, a alterações não lineares da curva extrapolada ou a mudanças na transmissão mecânica da carga. A análise não substitui uma calibração alargada e não permite atribuir significância estatística às diferenças observadas. A dispersão das médias dos quatro varrimentos é apresentada no Apêndice C, sem tratar as 72 orientações como repetições experimentais independentes.

4.6. Resultados de Fabrico e Verificação Funcional da Garra Pneumática em Silicone

A linha de desenvolvimento dedicada à garra pneumática e ao silicone teve dois resultados principais: a obtenção de dedos pneumáticos funcionais, fabricados por moldagem em duas fases, e o desenvolvimento de provetes de tração destinados à caracterização preliminar do material. Os resultados relativos aos dedos pneumáticos são qualitativos, uma vez que a garra pneumática ainda não foi submetida a uma campanha quantitativa de pressão–curvatura ou de força de preensão. Em contrapartida, os provetes de silicone foram ensaiados em tração e os dados exportados da máquina foram tratados para obter curvas força–deslocamento e tensão–deformação, permitindo seleccionar uma curva experimental de referência para a modelação FEA preliminar do dedo pneumático.

4.6.1. Dedos Pneumáticos Moldados em Silicone

Foram produzidos três dedos pneumáticos com aproximadamente 89 mm de comprimento e 32 mm de largura, recorrendo a silicone SANAAA de dureza nominal Shore A 15 e a moldagem em duas fases. Os dois lotes de silicone mantiveram a proporção mássica de 1:1, utilizando-se 20 g de cada componente no primeiro lote e 15 g de cada componente no segundo.

A primeira fase de cura, com duração aproximada de 7 h à temperatura ambiente, permitiu obter uma metade suficientemente estável para a continuação do processo. A segunda fase permaneceu em cura até à manhã seguinte, por conveniência operacional. Após a desmoldagem, os três atuadores apresentaram a geometria prevista, sem danos aparentes nas paredes exteriores ou nas zonas associadas às câmaras internas.

A verificação funcional foi efetuada por insuflação manual de ar. Em todos os dedos foi observada curvatura na direção esperada e não foram identificadas fugas

evidentes durante esta solicitação manual de curta duração. Esta observação indica que as câmaras internas foram formadas corretamente e que a união entre as duas fases de moldagem se apresentou funcional para a verificação qualitativa realizada. Contudo, como a pressão não foi medida nem controlada, não é possível determinar a estanquidade quantitativa, a pressão máxima admissível, a relação pressão–curvatura ou a força de preensão.

A alteração dos encaixes permitiu a fixação por parafusos e melhorou o posicionamento mecânico dos dedos. Foi igualmente produzido um suporte inicial para três atuadores. A integração pneumática foi preparada para tubo de 6 mm de diâmetro exterior e 4 mm de diâmetro interior, utilizando conectores de encaixe rápido para tubo de 6 mm com rosca M5.

A Figura 4.32 mostra a garra pneumática com os três dedos montados no suporte modular. As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam a montagem preliminar do conjunto no robô disponível no laboratório, confirmando a compatibilidade física da estrutura com a plataforma robótica. Esta integração demonstra que a componente mecânica da garra foi concluída, ficando a operação funcional dependente da implementação de um sistema pneumático regulado, com alimentação de ar, controlo de pressão e eventual instrumentação dedicada.

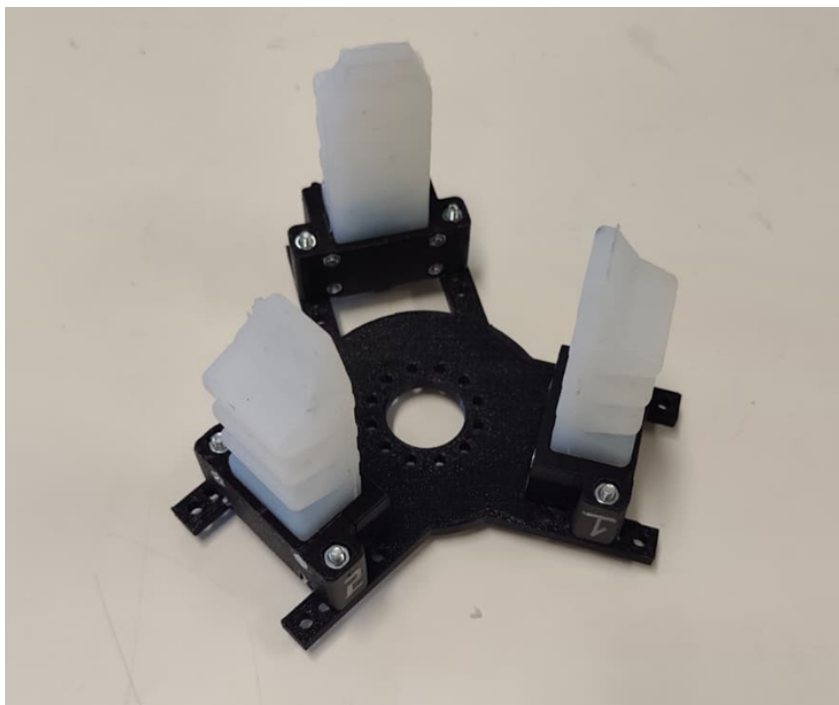


Figura 4.32. Garra pneumática montada.



Figura 4.33. Montagem da garra no robô.

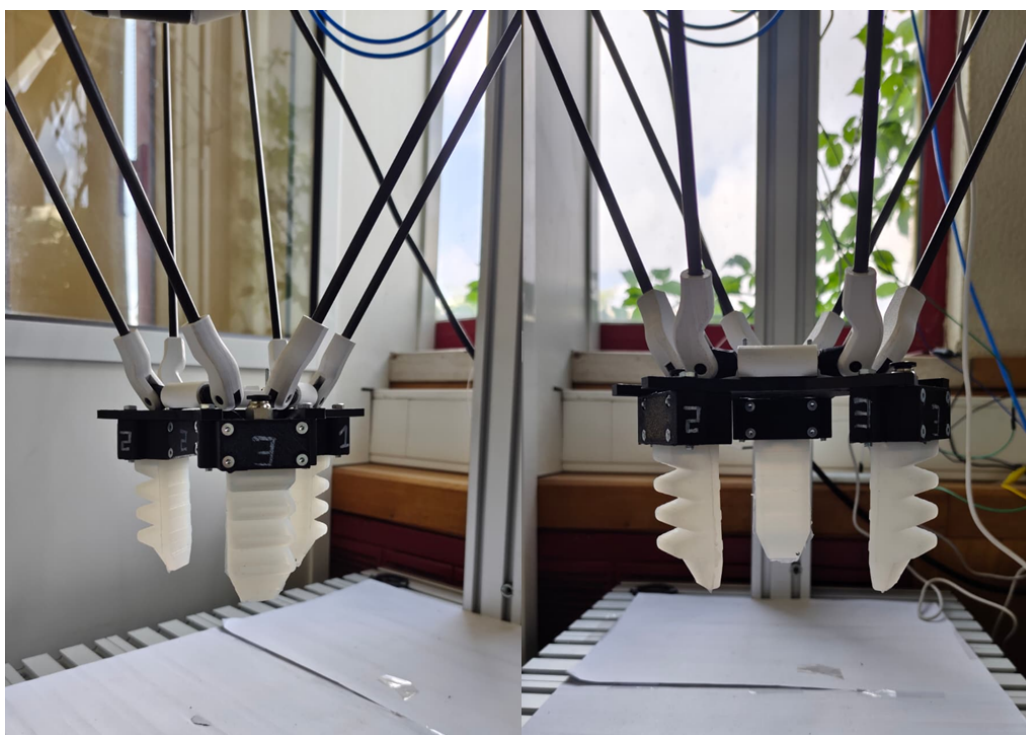


Figura 4.34. Garra pneumática no robô.

Tabela 4.13. Síntese dos resultados qualitativos obtidos no desenvolvimento da garra pneumática em silicone.

Aspetto avaliado	Resultado observado
Número de dedos produzidos	3
Dimensões aproximadas de cada dedo	89 mm de comprimento por 32 mm de largura
Desmoldagem	Realizada sem danos aparentes
Formação das câmaras internas	Geometria obtida conforme esperado
Verificação de estanquidade	Sem fugas evidentes durante insuflação manual
Resposta à insuflação	Curvatura observada na direção esperada
Configuração mecânica atual	Suporte inicial desenvolvido para três dedos e montado preliminarmente no robô

Os resultados confirmam a viabilidade inicial da moldagem em duas fases, da união das metades do dedo e da integração dos conectores pneumáticos. Ainda assim, não permitem comparar quantitativamente esta arquitetura com a garra *SpiRobs*, nem concluir sobre força, repetibilidade, eficiência ou segurança de atuação sob pressão conhecida.

4.6.2. Provetes de Silicone para Caracterização do Material

A ausência de uma ficha técnica completa do silicone motivou o desenvolvimento de provetes de tração, com o objetivo de obter dados experimentais próprios para o ajuste de modelos hiperelásticos e para a simulação preliminar do dedo pneumático. Este processo revelou-se mais crítico do que a moldagem dos dedos pneumáticos, sobretudo devido à reduzida espessura dos provetes e à tendência para retenção de bolhas durante o enchimento e o fecho do molde.

As primeiras moldagens, realizadas com um molde constituído apenas por cavidades e tampa, resultaram em provetes com quantidade significativa de bolhas. Esses provetes foram utilizados em ensaios exploratórios de tração para observar a tendência geral de resposta do material, mas não foram considerados ideais para caracterização final devido à presença de defeitos.

Na segunda tentativa, foram introduzidos canais de escape de ar com 2 mm de largura e 0,2 mm de altura nas pontas dos provetes. Apesar desta alteração, continuaram a observar-se bolhas em vários provetes. Numa terceira tentativa, foram adicionados furos na tampa e o conjunto foi mantido no sistema de pressão reduzida durante todo o tempo de cura. Esta estratégia não melhorou os resultados;

pelo contrário, conduziu a maior presença de bolhas, indicando que o sistema de pressão reduzida improvisado não era adequado para esta etapa quando aplicado ao molde fechado durante a cura.

A solução mais favorável foi obtida na última tentativa. O silicone foi depositado nas cavidades e deixado em repouso ao ar livre durante 10 a 15 min antes da colocação da tampa. Este intervalo permitiu que parte das bolhas formadas durante a deposição subisse à superfície. Após a colocação da tampa com furos, o molde permaneceu novamente em repouso durante 10 a 15 min, sendo depois aplicado um peso sobre a tampa. Esta abordagem permitiu observar o escape gradual de ar e reduzir a presença de bolhas relativamente às tentativas anteriores.

A Figura 4.35 apresenta uma tentativa de fabrico em que são visíveis bolhas e defeitos em diferentes zonas dos provetes. A presença destes vazios é particularmente crítica quando ocorre na zona útil, uma vez que altera a área resistente, introduz concentrações locais de deformação e pode antecipar a rotura durante o ensaio de tração.



Figura 4.35. Provetes de silicone com bolhas após desmoldagem.

A Tabela 4.14 sintetiza o processo iterativo realizado para reduzir os defeitos nos provetes.

Tabela 4.14. Evolução iterativa do processo de moldagem dos provetes de silicone.

Tentativa	Configuração do molde/processo	Problema observado	Conclusão ou alteração seguinte
1. ^a	Cavidades e tampa, sem canais de escape dedicados.	Provetes com elevada presença de bolhas.	Os provetes permitiram ensaios exploratórios, mas a qualidade não era adequada para caracterização final.
2. ^a	Introdução de canais de escape com 2 mm × 0,2 mm nas pontas.	As bolhas continuaram presentes em vários provetes.	Os escapes foram úteis, mas insuficientes por si só para eliminar ar aprisionado.
3. ^a	Canais de escape, furos na tampa e molde mantido em pressão reduzida durante a cura.	A presença de bolhas agravou-se.	Concluiu-se que o sistema de pressão reduzida improvisado não era adequado para o molde fechado durante a cura.
4. ^a	Deposição do silicone, repouso 10–15 min, colocação da tampa, novo repouso 10–15 min e aplicação posterior de peso.	Redução visual das bolhas formadas durante a deposição.	Estratégia considerada mais favorável com os meios disponíveis, por permitir a saída gradual do ar antes da compressão final.

4.6.3. Ensaio de Tração dos Provetes

Foram realizados ensaios de tração em provetes de silicone fabricados nos moldes baseados na ISO 37. O objetivo desta etapa não foi apenas verificar a resistência dos provetes, mas sobretudo obter uma curva experimental adequada para servir de base à definição preliminar do material no ANSYS. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 500 mm/min e sem extensómetro, tendo sido utilizado o deslocamento fornecido pelo software da máquina para estimar a deformação nominal. Esta opção deve ser interpretada como uma limitação metodológica, uma vez que o deslocamento da máquina pode incluir deformação do sistema de fixação, acomodação inicial nas amarras e eventual escorregamento do provete.

A Figura 4.36 apresenta um exemplo de provete montado na máquina de tração e o aspecto final após o ensaio. A imagem evidencia que a geometria fabricada permitiu a fixação nas amarras e a realização do ensaio até à rotura, confirmando a viabilidade prática do molde desenvolvido para esta caracterização preliminar.

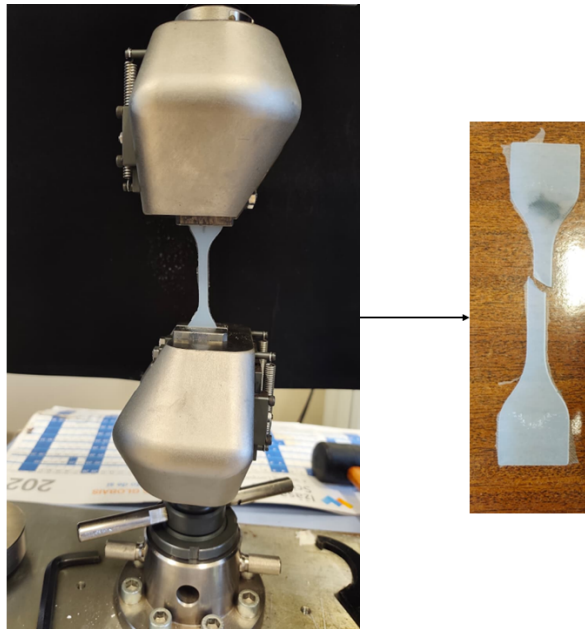


Figura 4.36. Ensaio de tração de um provete de silicone.

No tratamento dos dados foi removida a força de base inicial de cada ensaio e foi definido automaticamente o início útil da curva quando a força corrigida ultrapassou o maior dos seguintes valores: 0,05 N ou 1% da força máxima corrigida. A partir desse ponto, o deslocamento foi corrigido de forma a iniciar a curva útil em zero. A tensão nominal foi calculada através da área inicial medida individualmente e a deformação nominal foi obtida pela normalização do deslocamento corrigido pela distância inicial entre marcas no provete, $L_0 = 20$ mm. Como o alongamento provém do deslocamento da máquina, a deformação assim calculada é aparente, conforme discutido na metodologia.

Para o ajuste hiperelástico foi escolhida a curva do provete considerado qualitativamente pelo autor como tendo os melhores resultados entre os ensaiados. A adoção de uma única curva delimitou esta componente à exploração preliminar da modelação do dedo pneumático, mantendo o foco principal na garra *SpiRobs*. A utilização dos mesmos pontos nos três modelos permite comparar os respetivos ajustes para uma entrada experimental comum. Esta finalidade é distinta da caracterização da variabilidade do silicone, que exigiria analisar conjuntamente os provetes. A seleção foi qualitativa, sem critério estatístico previamente definido, e pode introduzir viés; a curva constitui uma referência individual, sem representatividade estatística demonstrada. A dispersão entre provetes não foi quantificada e fica identificada

como desenvolvimento futuro.

Tabela 4.15. Indicadores principais do provete selecionado para referência experimental.

Grandeza	Valor
Área inicial da secção útil, A_0	12,06 mm ²
Velocidade de ensaio	500 mm/min
Distância inicial entre marcas, L_0	20 mm
Força máxima corrigida	30,50 N
Tensão nominal máxima	2,53 MPa
Deformação nominal no ponto de tensão máxima, ε [–]	9,67 (967%)

A Figura 4.37 apresenta a curva força–deslocamento corrigida do provete selecionado. Observa-se um aumento progressivo da força com o alongamento, seguido de uma queda abrupta associada à rotura. Este comportamento é coerente com um ensaio de tração de elastómero, no qual a resposta é inicialmente mais complacente e se torna progressivamente mais resistente com o aumento da deformação.

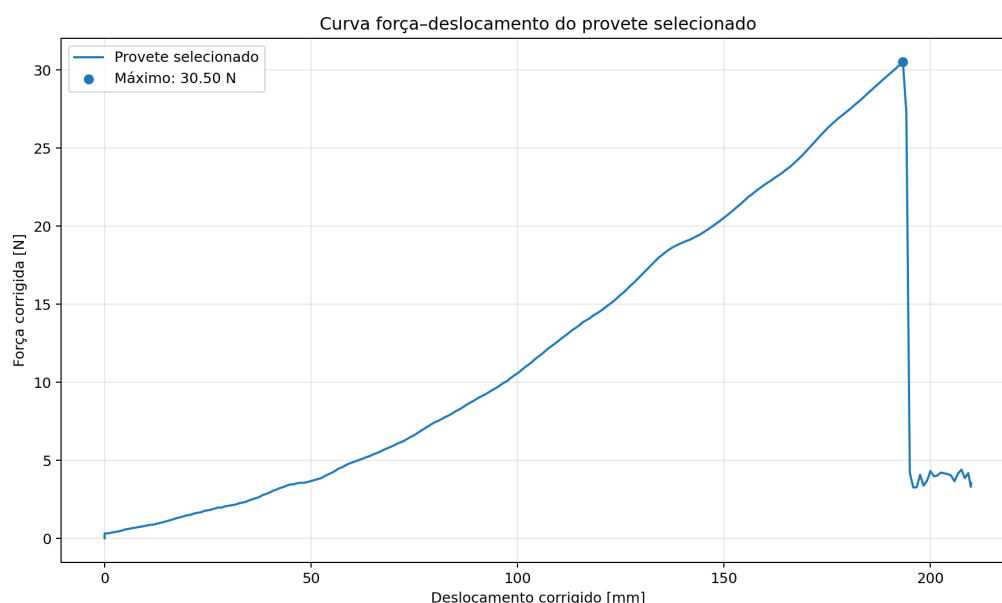


Figura 4.37. Curva força–deslocamento do provete selecionado.

A Figura 4.38 apresenta a curva tensão–deformação nominal calculada para o provete selecionado. Esta curva foi utilizada no ajuste hiperelástico. Os parâmetros obtidos descrevem a aproximação a este ensaio específico; não foram calculados a partir de uma curva média dos provetes.

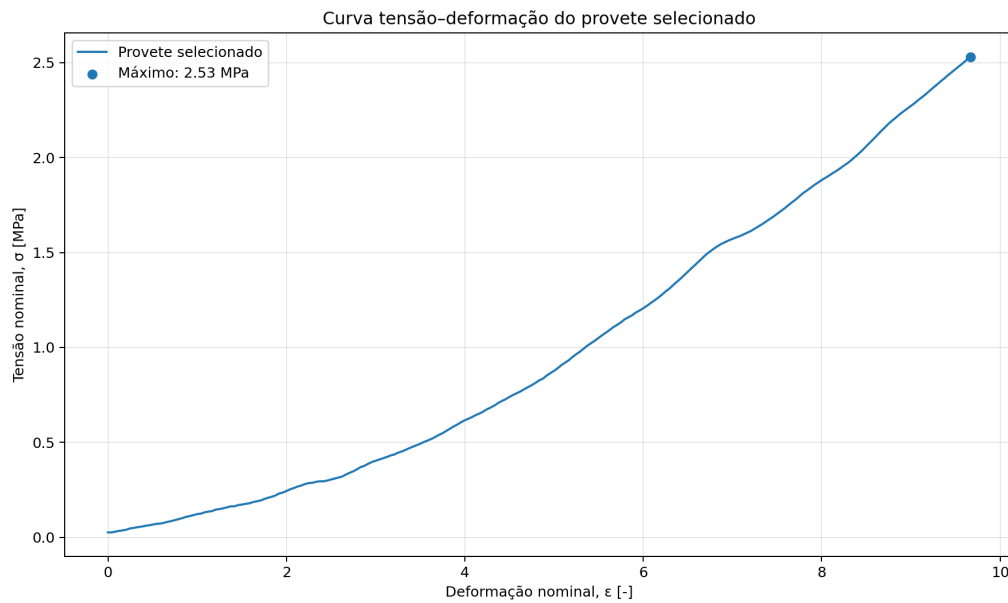


Figura 4.38. Curva tensão–deformação do provete selecionado.

Os resultados obtidos não constituem uma caracterização constitutiva completa do silicone, uma vez que o ensaio foi uniaxial, sem extensômetro e sem ensaios complementares de compressão ou corte. Ainda assim, fornecem uma base experimental própria para substituir a utilização exclusiva de propriedades genéricas de literatura. A curva selecionada foi utilizada no ANSYS para ajustar inicialmente um modelo hiperelástico de Yeoh de segunda ordem e, posteriormente, comparar o comportamento com formulações alternativas disponíveis no software.

4.6.4. Ajuste da Curva Experimental no ANSYS

Os dados da curva individual selecionada foram utilizados para definir uma aproximação hiperelástica do silicone no ANSYS. A referência é limitada ao ensaio e ao processamento descritos; não demonstra, por si só, o comportamento médio do material. A área inicial de 12,06 mm² e a força máxima corrigida de 30,50 N conduzem a 2,53 MPa de tensão nominal máxima. A deformação nominal indicada, 9,67, é adimensional e equivale a 967% na normalização por $L_0 = 20$ mm; corresponde à deformação aparente obtida pelo deslocamento da máquina, e não a uma medição contínua da variação da distância entre marcas.

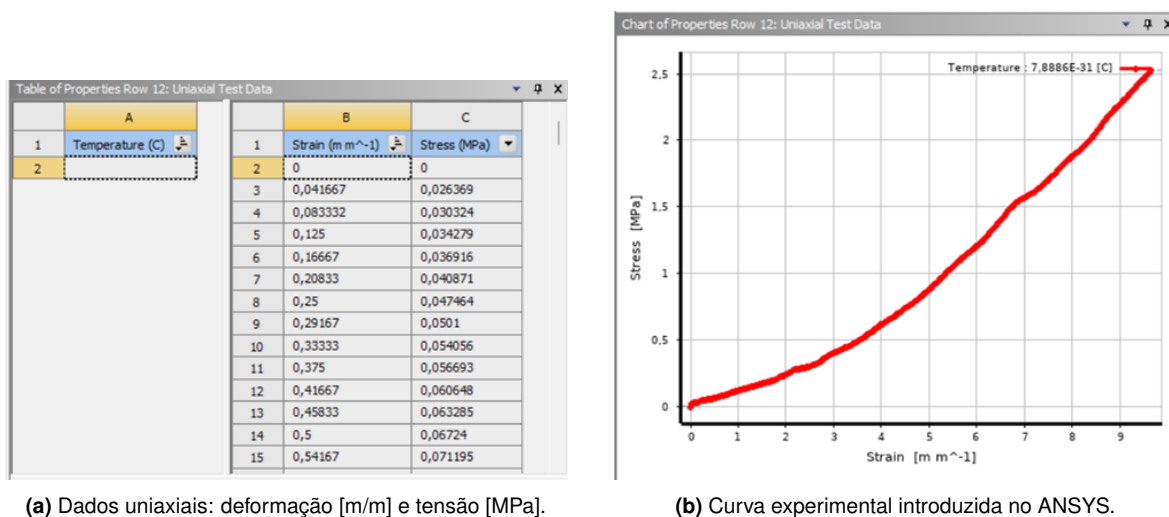
Os dados experimentais foram introduzidos no módulo *Engineering Data* do ANSYS, através da opção *Uniaxial Test Data*. Nesta tabela são definidos os pares de deformação nominal e tensão nominal obtidos no ensaio de tração. A deformação foi introduzida em unidades adimensionais, expressa em m/m, enquanto a tensão foi definida em MPa. A documentação do *Engineering Data* indica que o ajuste

de curvas calcula os coeficientes do modelo constitutivo que melhor aproximam os dados experimentais fornecidos, podendo utilizar dados uniaxiais, biaxiais, de corte e volumétricos nos modelos hiperelásticos suportados [41].

O ajuste procura os coeficientes que aproximam a resposta prevista dos pontos experimentais. Neste trabalho foi utilizado exclusivamente o critério de erro normalizado (*Normalized Error*) para os três modelos hiperelásticos [41]. Os valores de *Residual* são reproduzidos tal como reportados pelo ANSYS, sem os identificar como RMSE ou percentagens. A comparação mantém o mesmo critério de ajuste e a mesma tabela de pontos experimentais.

Foi adotado um modelo Yeoh de segunda ordem como referência preliminar. Os parâmetros desviatórios C_{10} e C_{20} utilizados são apresentados na Tabela 4.16. Na ausência de dados volumétricos, o ajuste considera o limite incompressível na configuração do ANSYS [41]; os valores nulos de D_1 e D_2 registam essa opção do software, não uma medição experimental da compressibilidade.

A Figura 4.39 apresenta o ambiente utilizado para a definição do material. O painel (a) mostra os primeiros pares de deformação e tensão introduzidos; o painel (b) apresenta a curva tensão–deformação utilizada; e o painel (c) reúne os parâmetros e as opções do ajuste Yeoh de segunda ordem. Desta forma, o material definido no ANSYS passa a ser representado por constantes obtidas a partir dos dados experimentais do silicone utilizado neste trabalho, em vez de valores genéricos ou retirados da literatura.



Properties of Outline Row 4: Silicone experimental				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Uniaxial Test Data	Tabular		
3	Scale	1		
4	Offset	0	MPa	
5	Yeoh 2nd Order			
6	Material Constant C10	35953	Pa	
7	Material Constant C20	463,44	Pa	
8	Incompressibility Parameter D1	0	Pa^-1	
9	Incompressibility Parameter D2	0	Pa^-1	
10	Curve Fitting	Fit Type: Yeoh 2nd Order		
11	Error Norm for Fit	Normalized Error		
12	Uniaxial Test Data	Tabular		
13	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
14	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		
15	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.		

(c) Parâmetros e opções de ajuste Yeoh de segunda ordem.

Figura 4.39. Ajuste da curva experimental do silicone no ANSYS: ampliações de três regiões da captura original.

A Tabela 4.16 reúne os coeficientes e os resíduos dos três modelos ajustados com erro normalizado à mesma tabela de pontos uniaxiais, sem alterações ou exclusões entre modelos. Os parâmetros de incompressibilidade apresentados são nulos em todos os casos: $D_1 = 0 \text{ Pa}^{-1}$ e, para Yeoh, também $D_2 = 0 \text{ Pa}^{-1}$. O parâmetro μ do Neo-Hookean é o módulo de corte inicial; na convenção energética usada adiante, corresponde a $2C_{10}$ [42].

Tabela 4.16. Coeficientes e resíduos globais dos três modelos ajustados à mesma curva experimental com o critério *Normalized Error*, transcritos de *Calculated Value* no ANSYS.

Modelo	Critério	Parâmetros calculados [Pa]	Residual ANSYS
Yeoh, 2. ^a ordem	Normalizado	$C_{10} = 35\,953$; $C_{20} = 463,44$	2,381
Mooney–Rivlin, 2 parâmetros	Normalizado	$C_{10} = 82\,226$; $C_{01} = -82\,201$	17,559
Neo-Hookean	Normalizado	$\mu = 103\,520$	37,328

Com o critério de erro normalizado, a ordenação dos resíduos foi Yeoh, Mooney–Rivlin e Neo-Hookean, por ordem crescente. O Yeoh de segunda ordem apresentou, portanto, o menor resíduo entre os ajustes documentados desta curva individual. Esta comparação fornece suporte quantitativo à escolha do modelo, mas não estabelece a sua superioridade para outros provetes, estados multiaxiais ou condições de carregamento. O menor resíduo também não dispensa a verificação da admissibilidade física dos coeficientes.

Os coeficientes utilizados nas simulações correspondem aos ajustes por erro normalizado apresentados na Tabela 4.16. Para o Yeoh adotado como referência principal, foram utilizados $C_{10} = 35\,953$ Pa e $C_{20} = 463,44$ Pa.

4.6.5. Modelos Hiperelásticos Considerados

O silicone utilizado no fabrico dos dedos pneumáticos apresenta um comportamento mecânico não linear quando sujeito a grandes deformações. Por este motivo, a sua resposta não deve ser descrita apenas através de propriedades lineares, como o módulo de Young ou o coeficiente de Poisson. Para representar este tipo de comportamento, foram considerados modelos hiperelásticos, nos quais a resposta mecânica do material é definida a partir de uma função de energia de deformação, abordagem clássica na descrição de materiais tipo borracha [43], [44], [45].

De forma simplificada, estes modelos assumem que a tensão desenvolvida no material resulta da energia armazenada durante a deformação. Assim, em vez de se definir uma relação linear direta entre tensão e deformação, define-se uma função W , que representa a densidade de energia de deformação do material. A partir dessa função, o ANSYS calcula a resposta mecânica do silicone durante a análise não linear.

Neste trabalho foram avaliados três modelos hiperelásticos: Neo-Hookean, Mooney–Rivlin de dois parâmetros e Yeoh de segunda ordem, todos ajustados pelo critério de erro normalizado. Estes modelos estão incluídos entre as formulações disponibiliza-

das pelo ANSYS para ajuste a dados experimentais hiperelásticos [41], [42]. Como apenas foi utilizada a curva experimental de tração uniaxial e não foram fornecidos dados volumétricos, o ajuste foi tratado como aproximadamente incompressível. Esta limitação é relevante, pelo que os parâmetros obtidos são interpretados como uma aproximação constitutiva preliminar.

Nas formulações simplificadas apresentadas, W representa a densidade de energia de deformação, $\bar{I}_1$ e $\bar{I}_2$ representam invariantes associados ao estado de deformação do material, e C_{10} , C_{01} e C_{20} são constantes materiais obtidas através do ajuste à curva experimental. Os termos $(\bar{I}_1 - 3)$ e $(\bar{I}_2 - 3)$ representam a alteração da deformação relativamente ao estado inicial indeformado. No estado indeformado, considera-se $\bar{I}_1 = 3$ e $\bar{I}_2 = 3$, pelo que a energia de deformação é nula. Para manter a explicação simples e adequada ao âmbito deste trabalho, são apresentadas apenas as formas incompressíveis simplificadas dos modelos.

4.6.5.1. Modelo Neo-Hookean

O modelo Neo-Hookean corresponde a uma das formas mais simples da função de energia hiperelástica, retendo apenas a contribuição do primeiro invariante de deformação [42], [45]. Na forma simplificada para materiais incompressíveis, a função de energia de deformação é dada por

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3). \quad (4.2)$$

Neste modelo, a resposta do material é controlada apenas pela constante C_{10} . Esta constante influencia diretamente a rigidez inicial do material, isto é, quanto maior for o valor de C_{10} , maior será a resistência do material à deformação. Como o modelo depende apenas do primeiro invariante de deformação e de uma única constante, apresenta uma formulação simples e geralmente estável do ponto de vista numérico.

A principal vantagem do modelo Neo-Hookean é a sua simplicidade. No entanto, essa simplicidade também limita a sua capacidade de representar com precisão curvas experimentais fortemente não lineares. Quando o silicone apresenta alteração significativa de rigidez com o aumento da deformação, este modelo pode não acompanhar corretamente toda a curva experimental.

O modelo Neo-Hookean foi utilizado como comparação simplificada na simulação do dedo. A sua resposta convergente pode ser comparada com a do Yeoh nas condições ensaiadas, mas a diferença entre deslocamentos simulados não é uma medida do erro de ajuste à curva de tração nem permite identificar qual previsão é fisicamente mais exata sem validação experimental.

4.6.5.2. Modelo Mooney–Rivlin de Dois Parâmetros

O modelo Mooney–Rivlin de dois parâmetros introduz contribuições associadas ao primeiro e ao segundo invariantes de deformação, permitindo uma formulação mais flexível do que o modelo Neo-Hookean [43], [44], [45]. Na forma simplificada para materiais incompressíveis, a função de energia de deformação é dada por

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3). \quad (4.3)$$

Neste modelo, C_{10} está associado à contribuição do primeiro invariante de deformação, enquanto C_{01} está associado à contribuição do segundo invariante. A existência de duas constantes permite ao modelo ajustar de forma mais flexível a resposta do material, quando comparado com o modelo Neo-Hookean.

Em termos práticos, o modelo Mooney–Rivlin permite maior liberdade de ajuste do que o Neo-Hookean, mantendo uma formulação relativamente simples. O ANSYS permite ajustar modelos hiperelásticos recorrendo a dados uniaxiais, biaxiais, de corte e volumétricos [41]; como neste trabalho foi utilizada apenas tração uniaxial, os parâmetros obtidos não são assumidos como uma caracterização completa do comportamento do silicone em estados de deformação mais complexos.

O modelo Mooney–Rivlin de dois parâmetros foi testado, mas a configuração utilizada apresentou dificuldades de convergência e distorção excessiva de elementos. Por isso, não foi incluída na comparação dos resultados convergentes. A ocorrência de uma falha numérica não demonstra, isoladamente, a inadequação geral desta formulação ao silicone: depende também dos parâmetros ajustados, da malha, dos contactos e do carregamento. A Tabela 4.16 permite agora comparar os resíduos de ajuste, separadamente dos resultados de convergência.

4.6.5.3. Modelo Yeoh de Segunda Ordem

O modelo Yeoh é uma formulação hiperelástica baseada apenas no primeiro invariante de deformação, proposta para representar o comportamento de materiais tipo borracha através de termos de ordem crescente em $\bar{I}_1 - 3$ [45]. No ANSYS, o modelo Yeoh pode ser utilizado com diferentes ordens no ajuste hiperelástico [42]. Para a segunda ordem adotada neste trabalho, a função de energia de deformação pode ser escrita como

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2. \quad (4.4)$$

Neste modelo, C_{10} controla principalmente a rigidez inicial do material, enquanto C_{20} permite ajustar a evolução da resposta mecânica à medida que a deformação aumenta. Assim, o termo quadrático oferece maior flexibilidade para aproximar a

curvatura da resposta tensão–deformação do que a formulação Neo-Hookean, sem introduzir um número elevado de parâmetros. Neste trabalho, o menor resíduo do Yeoh é demonstrado pela comparação dos ajustes da Tabela 4.16, e não apenas pela maior flexibilidade da formulação.

A principal vantagem do modelo Yeoh de segunda ordem é o equilíbrio entre simplicidade e capacidade de ajuste. O modelo é mais flexível do que o Neo-Hookean, porque inclui um termo quadrático, mas continua mais simples do que formulações com muitos parâmetros. Esta característica é particularmente importante neste trabalho, uma vez que a caracterização experimental do silicone foi baseada apenas em tração uniaxial.

O modelo Yeoh de segunda ordem foi adotado como referência principal da análise preliminar. A escolha inicial baseou-se na forma qualitativa da curva e na obtenção de soluções convergentes; a comparação dos resíduos globais passou a sustentá-la quantitativamente para os pontos experimentais adotados. Esta conclusão sobre o ajuste não constitui validação das previsões do atuador. A pressão de 0,010 MPa (0,10 bar) é o maior nível para o qual se obteve convergência na gama apresentada, não uma pressão máxima admissível do dedo físico.

Assim, o Yeoh é utilizado como referência preliminar e o Neo-Hookean como comparação de resposta; a configuração Mooney–Rivlin não forneceu os resultados convergentes necessários à mesma comparação. Estas funções distinguem a escolha de um modelo de trabalho da validação constitutiva do silicone, que permanece dependente de dados complementares e de comparação com o atuador real.

4.6.6. Simulação Numérica Preliminar do Dedo Pneumático em Silicone

Após o ajuste da curva experimental do silicone, foi desenvolvido um modelo preliminar do dedo pneumático no ANSYS Mechanical. Esta análise teve como objetivo avaliar a resposta global do atuador quando sujeito a pressão interna nas câmaras, comparando diferentes formulações hiperelásticas ajustadas a partir dos dados uniaxiais disponíveis. A simulação foi conduzida como uma análise *Static Structural* com *Large Deflection* ativo, base restringida e pressão aplicada nas superfícies internas das câmaras pneumáticas.

As Figuras 4.40, 4.41 e 4.42 apresentam os principais elementos da configuração numérica. A base do dedo foi restringida para representar a fixação ao suporte, a pressão foi aplicada nas faces internas das câmaras pneumáticas e a malha foi gerada procurando equilibrar custo computacional e capacidade de representar as grandes deformações do silicone. Adicionalmente, foram definidos contactos

do tipo *frictionless* entre as faces das paredes suscetíveis de entrar em contacto durante a pressurização. Estes contactos não correspondem às faces pressurizadas; servem apenas para evitar interpenetração numérica entre paredes opostas sem aumentar excessivamente a complexidade do modelo. Como se trata de uma primeira aproximação, a interpretação dos resultados foi limitada à forma deformada, ao deslocamento da ponta e à deformação equivalente máxima.

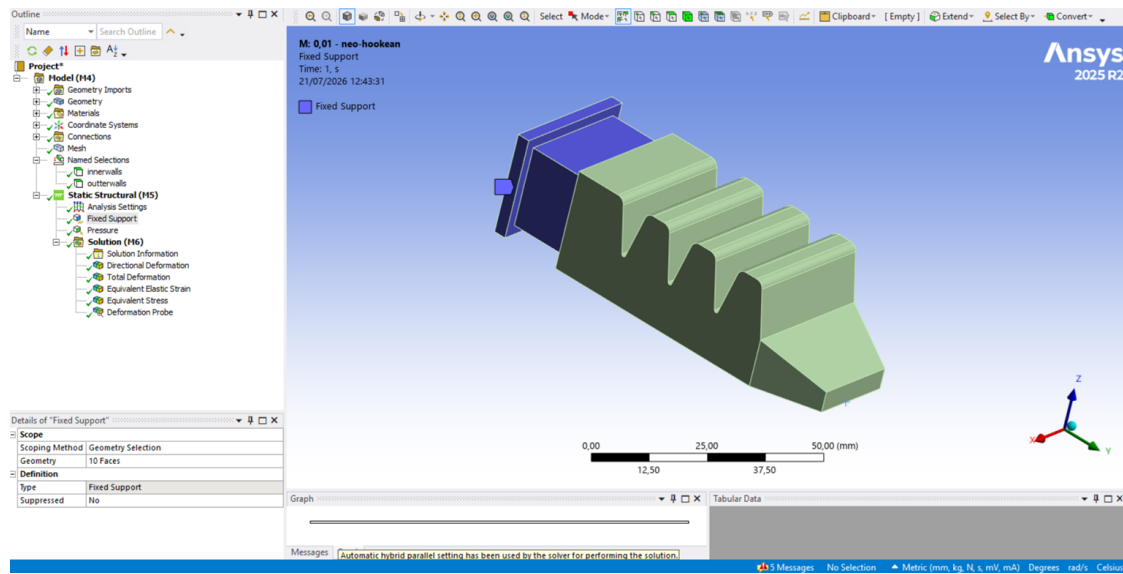


Figura 4.40. Fixação da base do dedo.

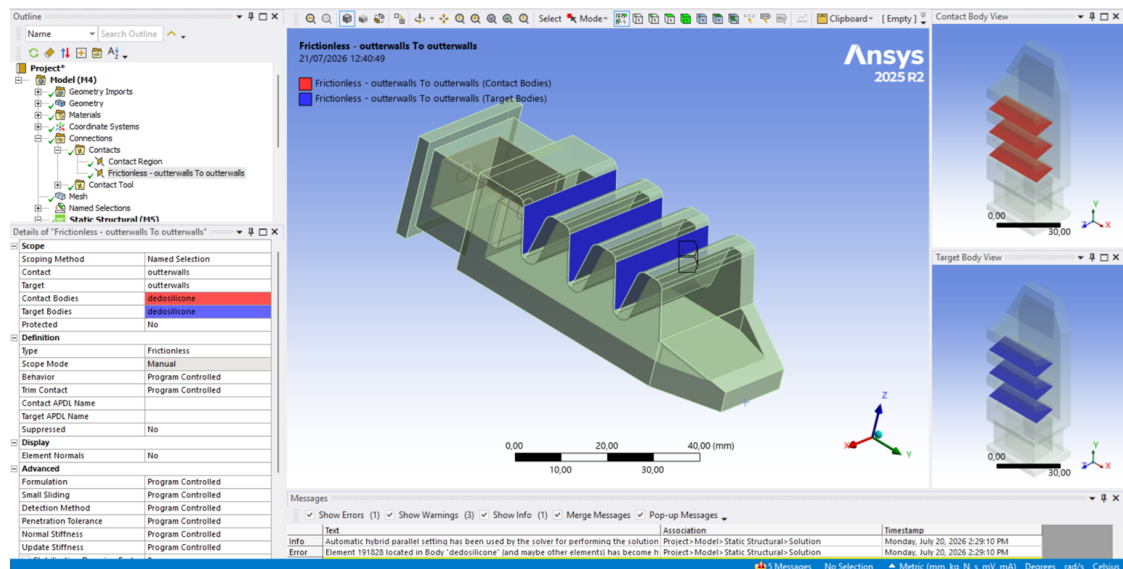


Figura 4.41. Contactos entre paredes do dedo.

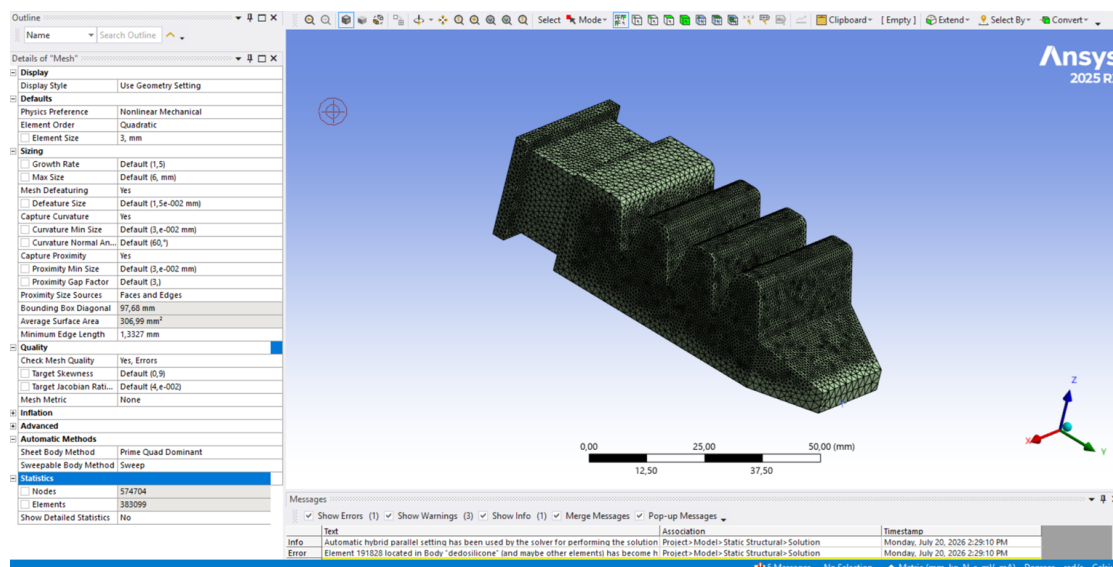


Figura 4.42. Malha do dedo pneumático.

Foram testadas as três formulações resumidas na Tabela 4.17. A comparação seguinte incide nos deslocamentos e deformações obtidos com as configurações convergentes Yeoh e Neo-Hookean. A comparação dos resíduos constitutivos é apresentada separadamente na Tabela 4.16.

Tabela 4.17. Função das configurações hiperelásticas testadas na simulação do dedo.

Modelo	Função	Resultado documentado
Yeoh, segunda ordem	Referência individual preliminar	Parâmetros registados e soluções convergentes na gama apresentada.
Neo-Hookean	Comparação simplificada de resposta	Soluções convergentes para comparação com Yeoh.
Mooney–Rivlin, dois parâmetros	Configuração exploratória	Dificuldades de convergência; sem resultados equivalentes de deslocamento para comparação.

A gama de pressão analisada situou-se entre 0,001 MPa e 0,010 MPa, correspondente a 0,01–0,10 bar. Os modelos Yeoh de 2.^a ordem e Neo-Hookean, utilizados na comparação quantitativa, convergiram até 0,010 MPa. O modelo Mooney–Rivlin de dois parâmetros não foi incluído nessa comparação devido à ausência de uma solução convergente na configuração ensaiada. Acima de 0,010 MPa foram observadas dificuldades de convergência e distorção excessiva de elementos, pelo que este valor foi assumido como limite superior da análise numérica. Este limite não deve ser interpretado como pressão máxima admissível do dedo real, mas apenas como a pressão máxima numericamente convergente para o modelo desenvolvido e para as hipóteses adotadas.

A Tabela 4.18 apresenta o deslocamento da ponta obtido através da *Deformation*

Probe para os modelos Yeoh de segunda ordem e Neo-Hookean. Em toda a gama analisada, o modelo Yeoh previu deslocamentos superiores aos do Neo-Hookean. Para 0,010 MPa, o deslocamento da ponta foi de 72,683 mm no modelo Yeoh e de 63,466 mm no modelo Neo-Hookean.

Tabela 4.18. Comparação do deslocamento da ponta entre os modelos Yeoh de segunda ordem e Neo-Hookean.

Pressão [MPa]	Pressão [bar]	Yeoh 2. ^a ordem [mm]	Neo-Hookean [mm]	Diferença [mm]	Diferença vs. Yeoh [%]
0,001	0,01	11,855	8,507	3,348	28,2
0,002	0,02	21,753	15,822	5,931	27,3
0,005	0,05	50,036	38,027	12,009	24,0
0,008	0,08	66,597	54,988	11,609	17,4
0,010	0,10	72,683	63,466	9,217	12,7

A Figura 4.43 representa graficamente os deslocamentos da ponta.

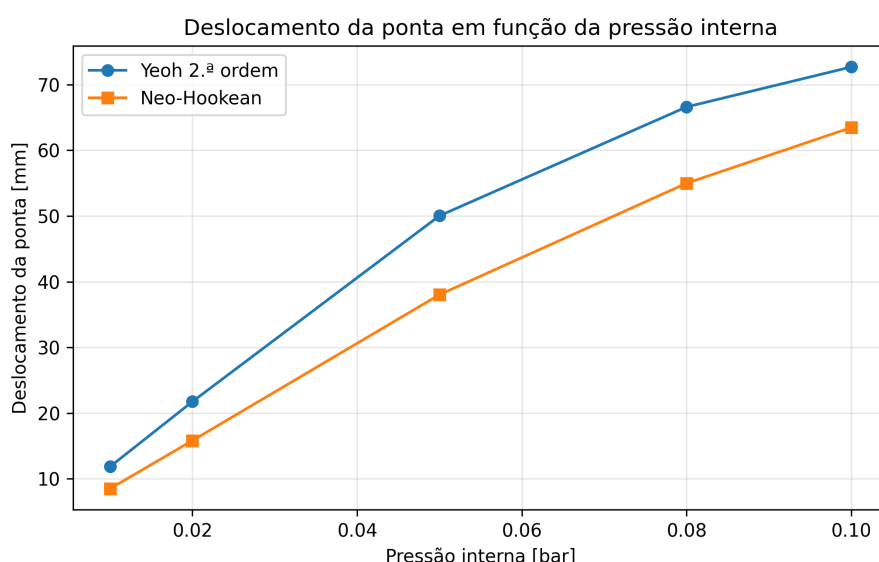


Figura 4.43. Deslocamento da ponta em função da pressão.

A diferença relativa no deslocamento da ponta diminuiu com o aumento da pressão, passando de 28,2% a 0,01 bar para 12,7% a 0,10 bar. Esta tendência indica que, apesar de o modelo Yeoh prever sempre maior deslocamento, os dois modelos convergentes aproximam-se na previsão global do movimento à medida que a pressão aumenta dentro da gama analisada.

A Figura 4.44 apresenta a diferença relativa entre os modelos.

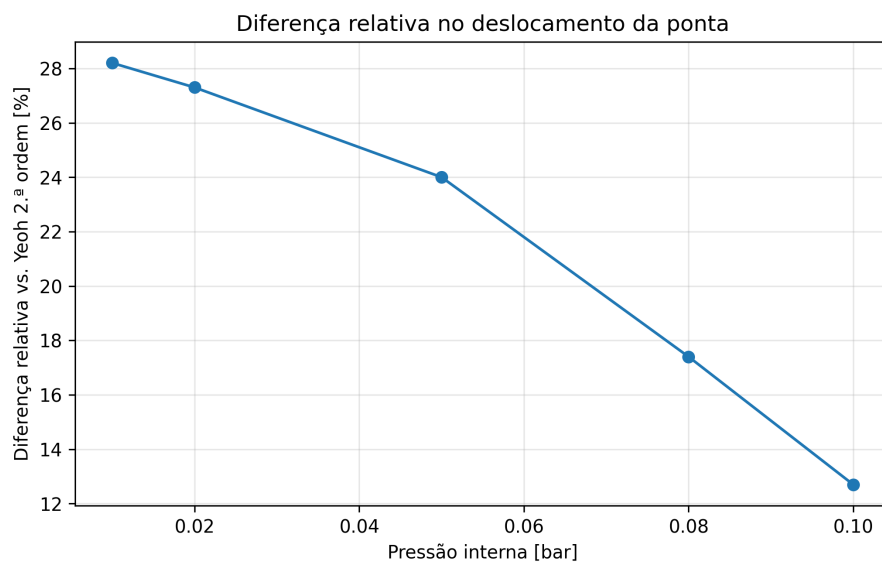


Figura 4.44. Diferença relativa de deslocamento entre modelos.

A deformação elástica equivalente máxima apresentou igualmente crescimento progressivo com a pressão. A Tabela 4.19 resume os valores obtidos. Para a pressão máxima convergente, 0,010 MPa, o modelo Yeoh apresentou deformação elástica equivalente máxima de 1,8535, enquanto o modelo Neo-Hookean apresentou 1,3293.

Tabela 4.19. Comparação da deformação elástica equivalente máxima entre os modelos Yeoh de segunda ordem e Neo-Hookean.

Pressão [MPa]	Pressão [bar]	Yeoh 2.ª ordem [-]	Neo-Hookean [-]	Diferença [-]	Diferença vs. Yeoh [%]
0,001	0,01	0,21092	0,14791	0,06301	29,9
0,002	0,02	0,39849	0,28770	0,11079	27,8
0,005	0,05	0,86961	0,66219	0,20742	23,9
0,008	0,08	1,40520	1,03200	0,37320	26,6
0,010	0,10	1,85350	1,32930	0,52420	28,3

A Figura 4.45 representa a evolução da deformação equivalente máxima.

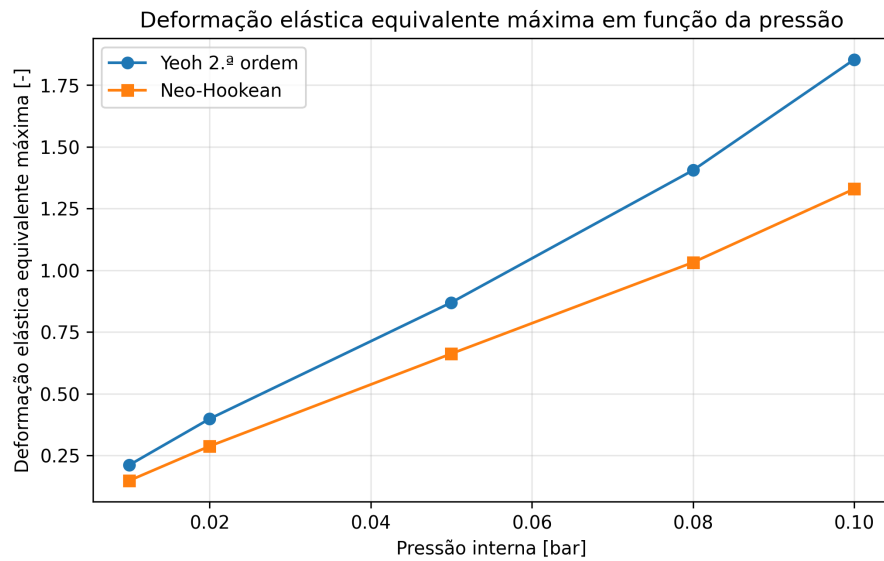


Figura 4.45. Deformação equivalente máxima em função da pressão.

As Figuras 4.46 e 4.47 apresentam a comparação visual das formas deformadas obtidas nos modelos Yeoh de segunda ordem e Neo-Hookean. Embora ambos os modelos reproduzam a mesma tendência de curvatura do dedo, o modelo Yeoh prevê deformações mais elevadas, coerentes com os valores registados pela *Deformation Probe*.

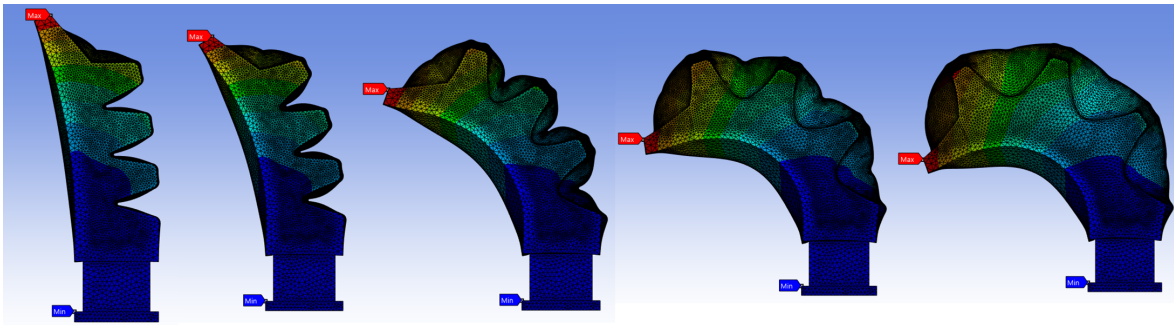


Figura 4.46. Forma deformada no modelo Yeoh 2.ª ordem.

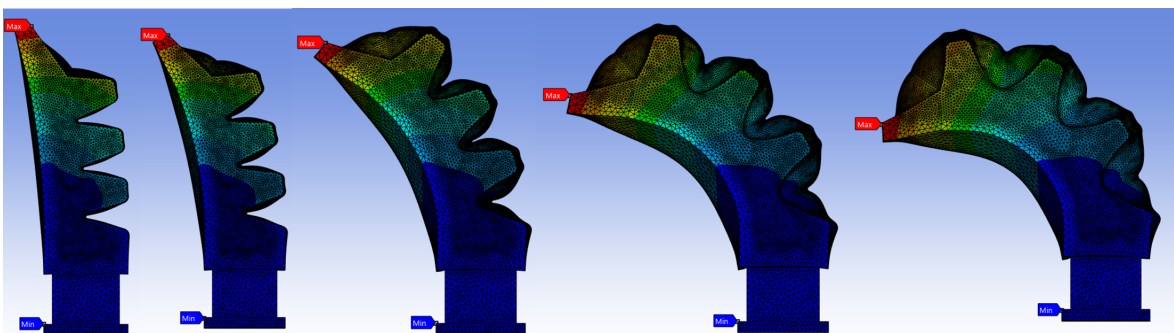


Figura 4.47. Forma deformada no modelo Neo-Hookean.

A configuração Mooney–Rivlin de dois parâmetros não foi incluída na comparação quantitativa final porque a simulação apresentou distorção excessiva de elementos e não forneceu uma solução convergente comparável. A Figura 4.48 documenta a falha observada. Esta ocorrência não permite separar, por si, os efeitos dos parâmetros materiais, da malha, dos contactos e do carregamento, nem classificar quantitativamente a qualidade do ajuste constitutivo.

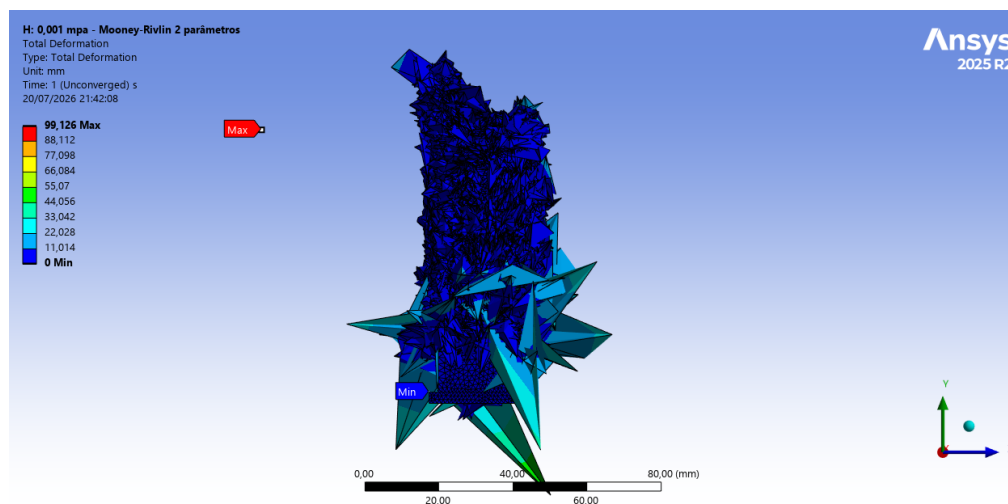


Figura 4.48. Instabilidade numérica no modelo Mooney–Rivlin.

Os resultados obtidos indicam que a simulação reproduz a tendência física esperada: o aumento da pressão interna provoca aumento progressivo da curvatura e do deslocamento da ponta. No entanto, esta análise deve ser interpretada como preliminar. A curva material foi obtida a partir de ensaio uniaxial sem extensômetro e não foi realizada validação experimental direta da deformação do dedo sob pressão controlada. Assim, a pressão de 0,010 MPa representa apenas o limite superior numericamente convergente para a aproximação adotada, e não a pressão máxima física suportada pelo atuador real.

Capítulo 5

Conclusão

5.1. Síntese do Trabalho Desenvolvido

Esta dissertação integrou fabrico aditivo, atuação por cabo, instrumentação e modelação numérica no estudo de uma garra flexível baseada na arquitetura *SpiRobs*. A questão de investigação foi abordada através de um objeto cilíndrico instrumentado, utilizado para comparar a variação circunferencial da força resultante medida e da pressão média equivalente. A linha pneumática em silicone permitiu explorar uma segunda estratégia de atuação e uma caracterização constitutiva preliminar.

Foram concretizados os objetivos de fabrico dos protótipos, integração da bancada e aplicação do protocolo de mapeamento. A modelação numérica e a caracterização do silicone atingiram um nível exploratório; a validação quantitativa dos modelos e a demonstração de segurança na manipulação delicada permanecem por completar.

5.2. Principais Conclusões

O fabrico em TPU 95A permitiu obter protótipos funcionais, capazes de fechar e envolver o objeto de estudo. A metodologia com dois sensores FSR produziu perfis circunferenciais não uniformes e permitiu avaliar a repetibilidade de quatro varrimentos por condição. A força resultante medida corresponde, por definição operacional, à soma escalar das estimativas dos sensores; a pressão média equivalente é a sua normalização por uma área fixa. As duas grandezas contêm, portanto, a mesma informação relativa e não constituem resultados independentes.

Nas condições estudadas, o aumento do deslocamento nominal do cabo esteve associado a maior força média global, com uma variação de aproximadamente 30% na configuração de 20% de preenchimento e de 6,5% na de 100%. Estes valores descrevem os exemplares ensaiados. A comparação entre configurações não isola o efeito do preenchimento, pois os parâmetros de fabrico também diferiram.

A interpretação quantitativa está ainda condicionada pela extensa extrapolação da calibração do Sensor 2, avaliada através dos cenários da Secção 4.5.5. Esses cenários exploram a dependência dos indicadores relativamente à contribuição extrapolada, sem estabelecer intervalos de confiança ou limites de erro do sensor.

O modelo FEA reduzido de cinco vértebras com cabo explícito alcançou convergência numérica, permitindo estudar a estratégia de contacto e as simplificações necessárias. O modelo multicorpo em *Rigid Dynamics* reproduziu qualitativamente a cinemática de fecho do modelo integral. A convergência e o menor custo de solução não demonstram validade física quantitativa: ambos os modelos permanecem exploratórios, com funções e hipóteses distintas.

A linha pneumática resultou em dedos de silicone, suporte modular e montagem funcional preliminar. Uma curva individual de tração foi utilizada como referência para a modelação hiperelástica. Os três modelos hiperelásticos foram ajustados com o critério de erro normalizado aos mesmos pontos experimentais. O Yeoh de segunda ordem apresentou o menor resíduo entre os três ajustes. Este resultado sustenta a escolha para a curva adotada, sem demonstrar representatividade entre provetes ou validade constitutiva geral. Os resultados numéricos não estabelecem a pressão máxima admissível do atuador real.

5.3. Limitações e Desafios do Trabalho

A principal limitação quantitativa é a utilização da curva do Sensor 2 acima do limite calibrado de 222,95 g em 1138 das 1152 leituras médias desse sensor, aproximadamente 98,8%. Cada leitura média corresponde a uma posição angular de um varrimento. A gama nominal do componente não valida esta extrapolação. Os resíduos de ajuste apresentados na Secção A.4 descrevem o comportamento nos pontos calibrados e não quantificam o erro fora dessa gama. A calibração inicial teve como objetivo obter uma curva de aproximação por sensor; não foram planeados ciclos independentes de repetição, pelo que a repetibilidade da calibração não foi avaliada. A transmissão de carga entre as cascas e os sensores também não foi validada por posição.

Foi utilizado um exemplar por configuração. Os quatro varrimentos avaliam repetibilidade do procedimento, sem demonstrar reprodutibilidade entre protótipos. A rotação manual associa orientação e evolução temporal; atrito, acomodação e deriva não foram separados. A área real de contacto e a tensão no cabo não foram medidas, pelo que os perfis não devem ser interpretados como mapas locais de pressão ou como distribuições de força por vértebra.

Na caracterização do silicone, os 20 mm são a distância inicial entre marcas; o alongamento provém da máquina, sem extensometria. A curva individual foi adotada para a exploração preliminar dos modelos, sem quantificar a dispersão entre provetes nem demonstrar representatividade estatística. Os ajustes foram comparados pelos resíduos globais do ANSYS, sem análise ponto a ponto.

A Tabela 5.1 sintetiza as limitações do trabalho.

Tabela 5.1. Síntese dos desafios e do alcance das soluções adotadas.

Área	Limitação	Resposta e alcance
Fabrico em TPU	Defeitos de deposição e diferenças de processamento entre protótipos.	Obtenção de protótipos funcionais; comparação entre configurações fabricadas, sem isolar o preenchimento.
Atuação e aquisição	Curso sob carga e tensão no cabo não medidos.	Comando nominal e aquisição repetida; a posição do motor não garante força constante.
Calibração FSR	Extrapolação extensa do Sensor 2; calibração sem ciclos independentes de repetição.	Curvas, resíduos e sensibilidade; mantém-se a necessidade de calibração alargada.
Contacto e rotação	Transferência mecânica não validada por posição, indexação manual e área de contacto variável.	Indicador escalar e pressão média equivalente; sem recuperação do campo local de pressão.
FEA da garra	Sensibilidade à malha, contacto e materiais aproximados.	Modelo reduzido com cabo convergente; modelo integral sem cabo não convergente; extensão integral com cabo por desenvolver.
<i>Rigid Dynamics</i>	Corpos rígidos e atuação equivalente sem cabo explícito.	Estudo qualitativo do fecho; não fornece tensões no TPU nem pressão local de contacto.
Silicone e provetes	Bolhas de moldagem, ausência de extensometria e dispersão não quantificada.	Fabrico melhorado e curva individual de referência; conformidade integral com ISO 37 não demonstrada.
Dedo pneumático	Ajustes limitados a uma curva uniaxial; ausência de validação pressão–curvatura.	Yeoh com menor resíduo no critério normalizado; previsões exploratórias e limite de convergência.

5.4. Trabalho Futuro

A prioridade experimental é alargar a calibração dos FSR à gama efetivamente utilizada, com a mesma interface mecânica e eletrónica, ciclos repetidos de carga e descarga e registo inequívoco da tara. A aplicação de cargas conhecidas em diferentes posições das cascas permitirá avaliar a transferência de carga e estimar a incerteza da cadeia de medição. Como aprendizagem metodológica, a repetibilidade deverá integrar o planeamento de futuras utilizações do sistema, antes da campanha experimental. Uma nova calibração deverá ser documentada e avaliada face às condições e aos registos originais, sem substituir retroativamente as curvas usadas no trabalho sem essa verificação.

A integração de uma célula de carga em série com o cabo e de uma medição independente do seu deslocamento permitirá relacionar atuação e resposta. A indexação angular deverá ser acompanhada de tempos de estabilização documentados, leituras de retorno à posição inicial e varrimentos em sentidos alternados. A produção de vários exemplares por configuração e a variação controlada de um parâmetro de fabrico de cada vez permitirão estudar reprodutibilidade e efeitos de processamento.

Os modelos FEA deverão utilizar propriedades medidas do TPU, estudos de sensibilidade à malha e ao contacto e comparação quantitativa com deformações e forças experimentais. A geometria circular do cabo poderá ser reintroduzida quando a estratégia numérica estiver estabilizada.

Na linha pneumática, importa completar a caracterização dos provetes com dimensões, identificação, extensometria e dispersão, analisar os resíduos ponto a ponto e realizar ensaios controlados de pressão–curvatura, força de bloqueio, histerese e estanquidade. Estes passos permitirão distinguir a qualidade do ajuste constitutivo da estabilidade da simulação do atuador.

5.5. Considerações Finais

O trabalho estabeleceu uma base experimental para estudar a interação circunferencial garra–objeto, divulgada no artigo publicado *Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation* [9]. A extensão a outros objetos e à definição de limites de manipulação segura exige as verificações metrológicas e mecânicas identificadas. As conclusões permanecem delimitadas às condições ensaiadas e ao carácter exploratório dos modelos.

Bibliografia

- [1] R. Raja e A. Shoushtari, «Bio-inspired Soft Grippers for Biological Applications,» *ArXiv*, vol. abs/2407.14324, 2024. DOI: [10.48550/arXiv.2407.14324](https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.14324)
URL: <https://arxiv.org/abs/2407.14324>
- [2] V. P. Nguyen, S. B. Dhyan, V. Mai, B. S. Han e W. T. Chow, «Bioinspiration and Biomimetic Art in Robotic Grippers,» *Micromachines*, vol. 14, n.º 9, set. de 2023, ISSN: 2072666X. DOI: [10.3390/mi14091772](https://doi.org/10.3390/mi14091772)
- [3] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador e P. Dario, «Soft robot arm inspired by the octopus,» *Advanced Robotics*, vol. 26, n.º 7, pp. 709–727, 2012, ISSN: 01691864. DOI: [10.1163/156855312X626343](https://doi.org/10.1163/156855312X626343)
- [4] D. Rus e M. T. Tolley, «Design, fabrication and control of soft robots,» *Nature*, vol. 521, n.º 7553, pp. 467–475, mai. de 2015, ISSN: 14764687. DOI: [10.1038/nature14543](https://doi.org/10.1038/nature14543)
- [5] R. Wang, J. Li e Y. Li, «A Review on Design, Modeling and Control Technology of Cable-Driven Parallel Robots,» *Robotics*, vol. 14, n.º 9, set. de 2025, ISSN: 22186581. DOI: [10.3390/robotics14090116](https://doi.org/10.3390/robotics14090116)
- [6] Z. Wang, N. M. Freris e X. Wei, «SpiRobs: Logarithmic spiral-shaped robots for versatile grasping across scales,» *Device*, vol. 3, n.º 4, abr. de 2025, ISSN: 26669986. DOI: [10.1016/j.device.2024.100646](https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100646)
- [7] N. Shahrubudin, T. C. Lee e R. Ramlan, «An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications,» em *Procedia Manufacturing*, vol. 35, Elsevier B.V., 2019, pp. 1286–1296. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.06.089](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089)
- [8] E. S. Keneth, A. Kamyshny, M. Totaro, L. Beccai e S. Magdassi, «3D Printing Materials for Soft Robotics,» *Advanced Materials*, vol. 33, n.º 19, mai. de 2021, ISSN: 15214095. DOI: [10.1002/adma.202003387](https://doi.org/10.1002/adma.202003387)
- [9] P. E. C. Martins, C. M. A. Vasques, M. J. C. Tomé e A. M. S. Cavadas, «Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation,» *Engineering Proceedings*, vol. 145, n.º 1, 2026,

- art. 9. DOI: [10.3390/engproc2026145009](https://doi.org/10.3390/engproc2026145009) URL: <https://www.mdpi.com/2673-4591/145/1/9>
- [10] M. Chitroda e D. B. K. Patle, «A Review on Technologies in Robotic Gripper,» *International Journal of Advanced Engineering and Nano Technology*, vol. 10, n.º 5, pp. 1–5, mai. de 2023. DOI: [10.35940/ijaent.c7232.0511523](https://doi.org/10.35940/ijaent.c7232.0511523) URL: <http://dx.doi.org/10.35940/ijaent.C7232.0511523>
- [11] L. Zhou, L. Ren, Y. Chen, S. Niu, Z. Han e L. Ren, «Bio-Inspired Soft Grippers Based on Impactive Gripping,» *Advanced Science*, vol. 8, n.º 9, mai. de 2021, ISSN: 21983844. DOI: [10.1002/advs.202002017](https://doi.org/10.1002/advs.202002017)
- [12] P. Glick, S. A. Suresh, D. Ruffatto, M. Cutkosky, M. T. Tolley e A. Parness, «A Soft Robotic Gripper with Gecko-Inspired Adhesive,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, n.º 2, pp. 903–910, abr. de 2018, ISSN: 23773766. DOI: [10.1109/LRA.2018.2792688](https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2792688)
- [13] W. Crooks, G. Vukasin, M. O’Sullivan, W. Messner e C. Rogers, «Fin Ray® effect inspired soft robotic gripper: From the robosoft grand challenge toward optimization,» *Frontiers Robotics AI*, vol. 3, n.º NOV, nov. de 2016, ISSN: 22969144. DOI: [10.3389/frobt.2016.00070](https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00070)
- [14] Z. Zheng e N. Ding, «Design and Implementation of CCRobot-II: a Palm-based Cable Climbing Robot for Cable-stayed Bridge Inspection,» em *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2019, pp. 9747–9753. DOI: [10.1109/ICRA.2019.8793562](https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793562) URL: <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793562>
- [15] J. Thomas, J. Polin, K. Sreenath e V. Kumar, «Avian-inspired grasping for quadrotor Micro UAVs,» em *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, vol. 6 A, American Society of Mechanical Engineers, 2013. DOI: [10.1115/DETC2013-13289](https://doi.org/10.1115/DETC2013-13289)
- [16] Y. Z. Wang, U. Gupta, N. Parulekar e J. Zhu, «A soft gripper of fast speed and low energy consumption,» *Science China Technological Sciences*, vol. 62, n.º 1, pp. 31–38, jan. de 2019, ISSN: 18691900. DOI: [10.1007/s11431-018-9358-2](https://doi.org/10.1007/s11431-018-9358-2)
- [17] L. Fu et al., «A Humidity-Powered Soft Robot with Fast Rolling Locomotion,» *Research*, vol. 2022, jan. de 2022, ISSN: 26395274. DOI: [10.34133/2022/9832901](https://doi.org/10.34133/2022/9832901)
- [18] S. Okamoto, Y. Fukatsu, C. Premachandra e H. Shigemune, «Paper-Based Bistable Origami Gripper to Make Quadcopters Multi-Functional,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, n.º 5, pp. 4511–4518, mai. de 2024, ISSN: 23773766. DOI: [10.1109/LRA.2024.3376972](https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3376972)

-
- [19] M. S. Xavier et al., «Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 59442–59485, 2022, ISSN: 21693536. DOI: [10.1109/ACCESS.2022.3179589](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179589)
- [20] S. Zaidi, M. Maselli, C. Laschi e M. Cianchetti, «Actuation Technologies for Soft Robot Grippers and Manipulators: A Review,» *Current Robotics Reports*, vol. 2, pp. 355–369, 2021. DOI: [10.1007/s43154-021-00054-5](https://doi.org/10.1007/s43154-021-00054-5) URL: <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00054-5>
- [21] C. H. Liu, L. J. Chen, J. C. Chi e J. Y. Wu, «Topology Optimization Design and Experiment of a Soft Pneumatic Bending Actuator for Grasping Applications,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, n.º 2, pp. 2086–2093, abr. de 2022, ISSN: 23773766. DOI: [10.1109/LRA.2022.3142910](https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3142910)
- [22] H. Li, D. Xie e Y. Xie, «A Soft Pneumatic Gripper with Endoskeletons Resisting Out-of-Plane Bending,» *Actuators*, vol. 11, n.º 9, set. de 2022, ISSN: 20760825. DOI: [10.3390/act11090246](https://doi.org/10.3390/act11090246)
- [23] T. Chen, X. Zhao, G. Ma, B. Tao e Z. Yin, «Design of 3D-printed Cable Driven Humanoid Hand Based on Bidirectional Elastomeric Passive Transmission,» *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 34, n.º 1, dez. de 2021, ISSN: 21928258. DOI: [10.1186/s10033-021-00595-y](https://doi.org/10.1186/s10033-021-00595-y)
- [24] D. O. Adejumo et al., «A Low-Cost, Modular, Cable-Driven, Anthropomorphic Robotic Hand: A Conceptual Design and Application in Biomimetic Study,» *Journal European des Systemes Automatises*, vol. 56, n.º 4, pp. 627–639, set. de 2023, ISSN: 21167087. DOI: [10.18280/jesa.560412](https://doi.org/10.18280/jesa.560412)
- [25] M. S. Kim et al., «Shape Memory Alloy (SMA) Actuators: The Role of Material, Form, and Scaling Effects,» *Advanced Materials*, vol. 35, n.º 33, ago. de 2023, ISSN: 15214095. DOI: [10.1002/adma.202208517](https://doi.org/10.1002/adma.202208517)
- [26] T. Dayyoub, A. V. Maksimkin, O. V. Filippova, V. V. Tcherdyntsev e D. V. Telyshev, «Shape Memory Polymers as Smart Materials: A Review,» *Polymers*, vol. 14, n.º 17, set. de 2022, ISSN: 20734360. DOI: [10.3390/polym14173511](https://doi.org/10.3390/polym14173511)
- [27] G. Scalet, «Two-way and multiple-way shape memory polymers for soft robotics: An overview,» *Actuators*, vol. 9, n.º 1, mar. de 2020, ISSN: 20760825. DOI: [10.3390/act9010010](https://doi.org/10.3390/act9010010)
- [28] X. Huang et al., «Highly Dynamic Shape Memory Alloy Actuator for Fast Moving Soft Robots,» *Advanced Materials Technologies*, vol. 4, n.º 4, abr. de 2019, ISSN: 2365709X. DOI: [10.1002/admt.201800540](https://doi.org/10.1002/admt.201800540)

- [29] J. H. Lee, Y. S. Chung e H. Rodrigue, «Long Shape Memory Alloy Tendon-based Soft Robotic Actuators and Implementation as a Soft Gripper,» *Scientific reports*, vol. 9, n.º 1, p. 11 251, ago. de 2019, ISSN: 20452322. DOI: [10.1038/s41598-019-47794-1](https://doi.org/10.1038/s41598-019-47794-1)
- [30] K. Ghosh e S. Kar-Narayan, «3D-printed photothermal-responsive shape-memory polymer for soft robotic applications,» *Chemical Communications*, vol. 60, n.º 92, pp. 13 538–13 541, out. de 2024, ISSN: 1364548X. DOI: [10.1039/d4cc03549f](https://doi.org/10.1039/d4cc03549f)
- [31] L. Luo, F. Zhang, L. Wang, Y. Liu e J. Leng, «Recent Advances in Shape Memory Polymers: Multifunctional Materials, Multiscale Structures, and Applications,» *Advanced Functional Materials*, vol. 34, n.º 14, abr. de 2024, ISSN: 16163028. DOI: [10.1002/adfm.202312036](https://doi.org/10.1002/adfm.202312036)
- [32] Q. Ge, A. H. Sakhaei, H. Lee, C. K. Dunn, N. X. Fang e M. L. Dunn, «Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers,» *Scientific Reports*, vol. 6, ago. de 2016, ISSN: 20452322. DOI: [10.1038/srep31110](https://doi.org/10.1038/srep31110)
- [33] T. Cersoli, A. Cresanto, C. Herberger, E. Macdonald e P. Cortes, «3d printed shape memory polymers produced via direct pellet extrusion,» *Micromachines*, vol. 12, n.º 1, pp. 1–12, jan. de 2021, ISSN: 2072666X. DOI: [10.3390/mi12010087](https://doi.org/10.3390/mi12010087)
- [34] A. Galley, G. K. Knopf e M. Kashkoush, «Pneumatic hyperelastic actuators for grasping curved organic objects,» *Actuators*, vol. 8, n.º 4, dez. de 2019, ISSN: 20760825. DOI: [10.3390/ACT8040076](https://doi.org/10.3390/ACT8040076)
- [35] S. Rodinò e C. Maletta, «Design considerations and applications of shape memory alloy-based actuation in morphing structures: A systematic review,» *Progress in Engineering Science*, vol. 1, n.º 4, dez. de 2024, ISSN: 29504252. DOI: [10.1016/j.pes.2024.100021](https://doi.org/10.1016/j.pes.2024.100021)
- [36] R. Islam, S. Maparathne, P. Chinwangso e T. R. Lee, «Review of Shape-Memory Polymer Nanocomposites and Their Applications,» *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, n.º 5, mar. de 2025, ISSN: 20763417. DOI: [10.3390/app15052419](https://doi.org/10.3390/app15052419)
- [37] Robert Mauser, Lda. «Sensor de pressão quadrado 43x43mm – Force Sensitive Resistor – FSR406,» acedido em 3 de set. de 2026. URL: <https://mauser.pt/096-6324/sensor-de-pressao-quadrado-43x43mm-force-sensitive-resistor-fsr406>

-
- [38] Interlink Electronics, Inc., *FSR 400 Series Data Sheet*, PDS-10004-C, Interlink Electronics, Inc., 2012. acessado em 3 de set. de 2026. URL: <https://www.interlinkelectronics.com/downloads/datasheets/fsr-400-series-datasheet.pdf>
- [39] International Organization for Standardization. «ISO 37:2024 – Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties,» acessado em 3 de set. de 2026. URL: <https://www.iso.org/standard/86892.html>
- [40] Mecmesin. «ISO 37 – Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties,» acessado em 3 de set. de 2026. URL: <https://www.mecmesin.com/standard/iso-37>
- [41] ANSYS, Inc. «Mechanical Material Curve Fitting – Engineering Data User's Guide, Release 2025 R2,» acessado em 3 de set. de 2026. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v252/en/wb_eda/eda_ans_mat_curve_fit.html
- [42] ANSYS, Inc., *Mechanical APDL Material Reference*, Release 2025 R2, ANSYS, Inc., 2025. acessado em 3 de set. de 2026. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v252/en/pdf/ANSYS_Mechanical_APDL_Material_Reference.pdf
- [43] M. Mooney, «A Theory of Large Elastic Deformation,» *Journal of Applied Physics*, vol. 11, n.º 9, pp. 582–592, 1940. DOI: [10.1063/1.1712836](https://doi.org/10.1063/1.1712836)
- [44] R. S. Rivlin, «Large Elastic Deformations of Isotropic Materials IV. Further Developments of the General Theory,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 241, pp. 379–397, 1948. DOI: [10.1098/rsta.1948.0024](https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0024)
- [45] O. H. Yeoh, «Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber,» *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 66, n.º 5, pp. 754–771, 1993. DOI: [10.5254/1.3538343](https://doi.org/10.5254/1.3538343)

Apêndice A

Dados de Calibração dos Sensores FSR

Neste apêndice apresentam-se os dados experimentais utilizados durante a calibração dos sensores resistivos de força (FSR). Estes dados foram utilizados para obter as curvas de regressão polinomial empregues na conversão da leitura analógica do ESP32 para massa equivalente e, posteriormente, para força.

Durante uma fase preliminar foi analisado um sensor circular FSR 400. Nos ensaios finais de mapeamento polar foram utilizados sensores quadrados FSR 406, designados ao longo do trabalho como Sensor 1 e Sensor 2. Os valores ADC tabulados para estes dois sensores correspondem às médias de 200 leituras, após subtração da tara e aplicação do limiar de 25 contagens, recolhidas durante aproximadamente 2 s após o acionamento do botão de aquisição. Esta é a referência de entrada das curvas, conforme o processamento descrito na Secção 3.9.1. Foi identificado um único conjunto de calibração por sensor na fase inicial da instrumentação, comum ao artigo publicado e aos ensaios da dissertação.

A.1. Dados preliminares do sensor circular FSR 400

Leitura ADC (ESP32)	Massa conhecida (g)
393	48,6
396	72,6
601	111,54
789	139,45
1251	255,21
1482	300,57
1677	344,35
1870	400,77
1978	448,96
2090	544,33
2355	656,81
2546	788,38
2629	871,54
2747	966,38
2830	1032,27
2981	1228,3
3034	1271,73

Tabela A.1. Valores experimentais obtidos durante a calibração preliminar do sensor circular FSR 400.

A.2. Dados do Sensor 1 – FSR 406

Leitura ADC (ESP32)	Massa conhecida (g)
119	112,69
179	152,73
349	255,9
463	311,39
599	372,35
650	406,24
690	441,46
712	487,99
747	537,35
783	603,04
855	661,02
905	717,52
957	783,85
1007	842,49
1045	935,1
1246	1005,03
1311	1066,63
1340	1151,59
1358	1184,73
1388	1289,99

Tabela A.2. Valores experimentais obtidos durante a calibração do Sensor 1, correspondente a um sensor quadrado FSR 406.

A.3. Dados do Sensor 2 – FSR 406

Leitura ADC (ESP32)	Massa conhecida (g)
556,02	48,44
716,45	56,67
778,03	60,01
822,14	62,88
976,49	73,52
1087,38	81,58
1155,95	86,93
1236,86	94,82
1402,56	104,35
1568,24	113,65
1715,70	135,68
1823,00	153,37
1882,31	169,28
1960,38	185,67
2123,09	222,95

Tabela A.3. Valores experimentais obtidos durante a calibração do Sensor 2, correspondente a um sensor quadrado FSR 406.

A calibração do Sensor 2 foi realizada de forma independente, tendo sido obtida a seguinte relação polinomial entre a leitura ADC e a massa equivalente

$$m_2 = 5,92 \times 10^{-5} S_2^2 - 0,0576 S_2 + 68,90. \quad (\text{A.1})$$

onde m_2 representa a massa equivalente, em gramas, e S_2 a leitura ADC do Sensor 2. O ajuste apresentou um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,987$. A calibração direta deste sensor terminou em 222,95 g. Sempre que os valores estimados nos ensaios ultrapassam esta gama, a conversão deve ser interpretada como extrapolação da curva de calibração própria, com incerteza acrescida. Esta extrapolação afeta todas as quatro condições experimentais, ainda que os valores permaneçam abaixo do limite superior da gama de deteção indicada para a referência comercial adquirida [37].

A.4. Resíduos dos Ajustes de Calibração

Para complementar R^2 , foram calculados os resíduos dos polinômios efetivamente apresentados nas Equações 3.5 e 3.6, aplicados aos pontos das Tabelas A.2 e A.3. Para cada ponto k , definiu-se $e_k = m_k - \hat{m}(S_k)$, em gramas, e calculou-se

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k^2}, \quad e_{\max, \text{abs}} = \max_k |e_k|. \quad (\text{A.2})$$

Aqui, N é o número de pontos de calibração, distinto das quatro repetições do mapeamento. Foram utilizados os coeficientes arredondados publicados, sem refazer a regressão nem modificar os registos experimentais. Por essa razão, a última casa decimal pode diferir da obtida com coeficientes guardados com maior precisão no código.

Tabela A.4. Indicadores dos resíduos nos pontos de calibração publicados.

Indicador	Sensor 1	Sensor 2
Número de pontos	20	15
Intervalo de massa [g]	112,69–1289,99	48,44–222,95
R^2 com a equação publicada	0,9846	0,9870
RMSE [g]	43,0494	5,8008
Maior resíduo absoluto [g]	99,3957	10,5145
RMSE convertido para força [N]	0,4223	0,0569
Maior resíduo absoluto convertido para força [N]	0,9751	0,1031

Os resíduos avaliam a concordância do ajuste com estes pontos. Não são uma incerteza expandida da cadeia de aquisição, não constituem limites de erro garantidos e não quantificam o erro de extrapolação do Sensor 2. Não foram realizadas séries independentes de calibração com ciclos repetidos de carga e descarga; as quatro repetições do mapeamento e as 200 leituras de cada janela de aquisição não substituem essa avaliação. A repetição independente da calibração, incluindo ciclos de carga e descarga e avaliação do efeito da interface mecânica, constitui uma melhoria futura para quantificar a repetibilidade, a histerese e a deriva.

Tabela A.5. Resíduos individuais das calibrações, calculados sem alterar os pontos originais.

Sensor 1			Sensor 2		
ADC	Massa [g]	Resíduo [g]	ADC	Massa [g]	Resíduo [g]
119,00	112,69	10,12	556,02	48,44	-6,74
179,00	152,73	17,78	716,45	56,67	-1,35
349,00	255,90	17,82	778,03	60,01	0,09
463,00	311,39	-5,27	822,14	62,88	1,32
599,00	372,35	-47,95	976,49	73,52	4,42

Tabela A.5 (continuação)

Sensor 1			Sensor 2		
ADC	Massa [g]	Resíduo [g]	ADC	Massa [g]	Resíduo [g]
650,00	406,24	-55,70	1087,38	81,58	5,32
690,00	441,46	-54,20	1155,95	86,93	5,51
712,00	487,99	-26,61	1236,86	94,82	6,60
747,00	537,35	-7,96	1402,56	104,35	-0,22
783,00	603,04	25,39	1568,24	113,65	-10,51
855,00	661,02	16,44	1715,70	135,68	-8,66
905,00	717,52	24,68	1823,00	153,37	-7,27
957,00	783,85	39,28	1882,31	169,28	-0,95
1007,00	842,49	46,69	1960,38	185,67	2,18
1045,00	935,10	99,40	2123,09	222,95	9,50
1246,00	1005,03	-55,73	—	—	—
1311,00	1066,63	-71,94	—	—	—
1340,00	1151,59	-22,49	—	—	—
1358,00	1184,73	-11,64	—	—	—
1388,00	1289,99	56,06	—	—	—

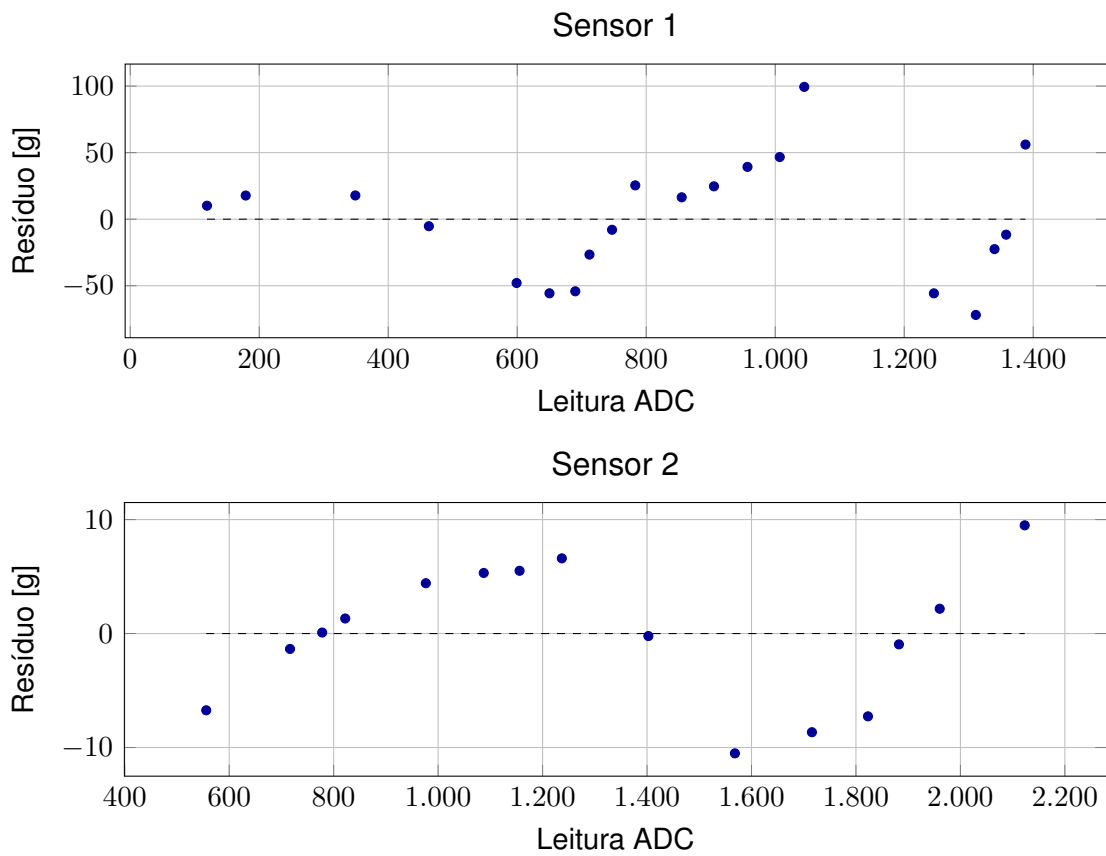


Figura A.1. Resíduos dos polinômios publicados nos pontos de calibração. As escalas verticais são diferentes para permitir observar cada sensor; um resíduo positivo significa massa conhecida superior à estimada.

Apêndice B

Dados Experimentais do Mapeamento Circunferencial

Este apêndice apresenta os dados completos das quatro condições finais de mapeamento circunferencial realizadas com a garra *SpiRobs*. As condições analisadas resultam da combinação entre duas configurações fabricadas, com 20% e 100% de preenchimento, e dois deslocamentos nominais impostos ao cabo de atuação, 105 mm e 115 mm. Para cada condição foram realizados quatro ensaios completos, com 72 posições angulares por ensaio, distribuídas ao longo de 360° com incrementos de 5°.

Para uniformizar a apresentação, as massas equivalentes são expressas em gramas, as forças em newtons e a pressão média equivalente em quilopascals, calculada com a área de referência $A_{\text{ref}} = 1233,41 \text{ mm}^2$. Os valores apresentados nas tabelas seguintes correspondem aos dados utilizados no tratamento estatístico e nos gráficos de síntese apresentados no Capítulo 4.

Os dados são apresentados por condição experimental e por repetição, seguindo a ordem lógica: 20% de preenchimento com 105 mm, 20% de preenchimento com 115 mm, 100% de preenchimento com 105 mm e 100% de preenchimento com 115 mm. Esta organização facilita a comparação direta entre o efeito do deslocamento para o mesmo protótipo e as diferenças entre configurações fabricadas para o mesmo deslocamento.

O ficheiro digital `tratamento_dados_spirobs_4_casos.xlsx`, incluído no projeto da dissertação, conserva as folhas de cálculo utilizadas no tratamento dos dados e permite consultar os valores com maior precisão numérica.

B.1. Ensaio 1 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.1. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	584,94	5,7383	408,30	4,0054	9,7437	7,900
5	470,81	4,6186	402,78	3,9513	8,5699	6,948
10	578,17	5,6718	405,78	3,9807	9,6525	7,826
15	561,00	5,5034	413,81	4,0595	9,5629	7,753
20	532,01	5,2190	381,51	3,7426	8,9616	7,266
25	465,07	4,5623	342,21	3,3571	7,9194	6,421
30	364,80	3,5787	338,80	3,3236	6,9023	5,596
35	372,78	3,6570	312,00	3,0607	6,7177	5,446
40	362,80	3,5591	312,00	3,0607	6,6198	5,367
45	423,43	4,1538	320,10	3,1402	7,2940	5,914
50	334,42	3,2807	334,66	3,2830	6,5637	5,322
55	432,33	4,2412	383,94	3,7665	8,0076	6,492
60	426,94	4,1883	407,69	3,9994	8,1877	6,638
65	455,83	4,4717	407,30	3,9956	8,4673	6,865
70	526,66	5,1665	390,32	3,8290	8,9956	7,293
75	449,85	4,4130	370,83	3,6378	8,0509	6,527
80	354,26	3,4753	340,10	3,3364	6,8117	5,523
85	379,66	3,7245	326,20	3,2000	6,9245	5,614
90	465,47	4,5663	372,53	3,6545	8,2208	6,665
95	399,48	3,9189	335,06	3,2869	7,2058	5,842
100	291,51	2,8597	271,36	2,6620	5,5218	4,477
105	375,92	3,6878	319,75	3,1367	6,8245	5,533
110	257,11	2,5222	267,00	2,6193	5,1415	4,169
115	232,52	2,2810	256,28	2,5141	4,7951	3,888
120	233,26	2,2883	290,05	2,8454	5,1337	4,162
125	211,27	2,0726	274,36	2,6915	4,7640	3,862
130	204,55	2,0066	250,96	2,4619	4,4686	3,623
135	273,17	2,6798	329,58	3,2332	5,9130	4,794
140	292,94	2,8737	364,33	3,5741	6,4478	5,228
145	352,01	3,4532	369,55	3,6253	7,0785	5,739
150	381,92	3,7466	398,87	3,9129	7,6596	6,210
155	375,32	3,6819	389,59	3,8219	7,5038	6,084
160	438,19	4,2986	391,48	3,8404	8,1391	6,599
165	483,04	4,7386	404,82	3,9713	8,7099	7,062
170	445,82	4,3735	413,69	4,0583	8,4318	6,836
175	517,06	5,0724	421,30	4,1330	9,2053	7,463

Tabela B.1. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	546,91	5,3652	438,77	4,3043	9,6695	7,840
185	514,44	5,0467	420,31	4,1232	9,1699	7,435
190	434,14	4,2589	411,75	4,0393	8,2982	6,728
195	437,80	4,2948	407,15	3,9941	8,2890	6,720
200	413,28	4,0543	412,55	4,0471	8,1014	6,568
205	379,06	3,7186	390,66	3,8324	7,5510	6,122
210	365,97	3,5902	367,60	3,6062	7,1963	5,834
215	369,74	3,6271	357,75	3,5095	7,1367	5,786
220	373,71	3,6661	335,00	3,2864	6,9524	5,637
225	361,23	3,5437	296,42	2,9079	6,4515	5,231
230	347,40	3,4080	379,85	3,7263	7,1343	5,784
235	392,03	3,8458	397,13	3,8958	7,7417	6,277
240	445,61	4,3714	429,81	4,2164	8,5879	6,963
245	473,99	4,6498	440,17	4,3181	8,9679	7,271
250	482,22	4,7306	437,27	4,2896	9,0202	7,313
255	462,60	4,5381	438,92	4,3058	8,8439	7,170
260	431,72	4,2352	427,99	4,1986	8,4338	6,838
265	586,32	5,7518	479,81	4,7069	10,4587	8,480
270	454,59	4,4595	427,89	4,1976	8,6571	7,019
275	691,88	6,7873	499,08	4,8960	11,6833	9,472
280	366,20	3,5924	320,13	3,1405	6,7329	5,459
285	384,24	3,7694	359,27	3,5244	7,2938	5,914
290	358,47	3,5166	331,28	3,2499	6,7664	5,486
295	409,08	4,0131	361,85	3,5497	7,5628	6,132
300	469,04	4,6013	375,61	3,6847	8,2860	6,718
305	366,36	3,5940	347,75	3,4114	7,0054	5,680
310	356,15	3,4938	283,72	2,7833	6,2771	5,089
315	509,16	4,9949	397,56	3,9001	8,8949	7,212
320	507,68	4,9803	401,88	3,9424	8,9228	7,234
325	517,34	5,0751	434,62	4,2636	9,3387	7,571
330	490,47	4,8115	427,34	4,1922	9,0037	7,300
335	537,71	5,2749	418,26	4,1031	9,3781	7,603
340	550,88	5,4041	435,37	4,2710	9,6751	7,844
345	529,53	5,1947	417,72	4,0978	9,2925	7,534
350	604,25	5,9277	456,27	4,4760	10,4037	8,435
355	608,21	5,9665	463,99	4,5517	10,5183	8,528

B.2. Ensaio 2 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.2. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	714,74	7,0116	327,76	3,2153	10,2268	8,291
5	663,46	6,5085	317,42	3,1139	9,6224	7,801
10	559,84	5,4920	301,57	2,9584	8,4504	6,851
15	530,89	5,2080	296,88	2,9124	8,1204	6,584
20	514,99	5,0521	306,81	3,0098	8,0619	6,536
25	519,57	5,0970	290,53	2,8501	7,9472	6,443
30	391,08	3,8365	275,60	2,7036	6,5401	5,302
35	300,23	2,9453	267,59	2,6251	5,5704	4,516
40	326,91	3,2070	274,99	2,6977	5,9046	4,787
45	293,48	2,8790	226,66	2,2235	5,1024	4,137
50	335,42	3,2905	253,31	2,4850	5,7756	4,683
55	380,05	3,7283	261,57	2,5660	6,2943	5,103
60	373,72	3,6662	250,00	2,4525	6,1187	4,961
65	399,33	3,9174	227,87	2,2354	6,1528	4,988
70	497,49	4,8804	271,23	2,6608	7,5411	6,114
75	436,91	4,2861	240,50	2,3593	6,6454	5,388
80	579,79	5,6877	291,77	2,8623	8,5499	6,932
85	633,76	6,2172	320,73	3,1464	9,3637	7,592
90	509,85	5,0016	236,14	2,3165	7,3181	5,933
95	570,28	5,5944	292,58	2,8702	8,4646	6,863
100	633,84	6,2180	319,52	3,1345	9,3525	7,583
105	634,06	6,2201	327,81	3,2158	9,4359	7,650
110	544,23	5,3389	294,83	2,8923	8,2312	6,674
115	551,77	5,4129	301,54	2,9581	8,3710	6,787
120	476,44	4,6739	285,01	2,7959	7,4697	6,056
125	544,56	5,3421	301,04	2,9532	8,2953	6,726
130	172,45	1,6917	96,91	0,9507	2,6424	2,142
135	469,77	4,6084	230,46	2,2608	6,8692	5,569
140	544,36	5,3402	268,39	2,6329	7,9731	6,464
145	604,45	5,9297	309,29	3,0341	8,9637	7,267
150	636,49	6,2440	332,90	3,2657	9,5098	7,710
155	526,82	5,1681	321,36	3,1525	8,3205	6,746
160	610,04	5,9845	326,12	3,1992	9,1837	7,446
165	663,61	6,5100	333,21	3,2688	9,7788	7,928
170	694,77	6,8157	339,06	3,3262	10,1420	8,223
175	718,70	7,0504	339,04	3,3260	10,3765	8,413

Tabela B.2. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	621,91	6,1009	321,38	3,1527	9,2536	7,502
185	623,16	6,1132	309,18	3,0331	9,1462	7,415
190	588,78	5,7759	299,27	2,9358	8,7117	7,063
195	559,89	5,4925	275,62	2,7038	8,1963	6,645
200	502,99	4,9343	298,66	2,9299	7,8642	6,376
205	630,45	6,1847	317,28	3,1125	9,2972	7,538
210	637,57	6,2546	333,16	3,2683	9,5229	7,721
215	514,90	5,0512	307,64	3,0179	8,0691	6,542
220	508,78	4,9911	273,36	2,6817	7,6727	6,221
225	319,84	3,1376	250,95	2,4618	5,5994	4,540
230	384,29	3,7699	247,17	2,4247	6,1947	5,022
235	612,81	6,0117	297,95	2,9229	8,9345	7,244
240	660,90	6,4834	290,42	2,8490	9,3323	7,566
245	709,25	6,9577	315,08	3,0909	10,0486	8,147
250	567,77	5,5698	291,10	2,8557	8,4255	6,831
255	744,45	7,3031	294,43	2,8884	10,1915	8,263
260	572,35	5,6148	278,26	2,7297	8,3445	6,765
265	700,91	6,8759	291,09	2,8556	9,7315	7,890
270	635,32	6,2325	291,55	2,8601	9,0927	7,372
275	360,34	3,5349	294,39	2,8880	6,4229	5,207
280	461,86	4,5308	348,54	3,4192	7,9500	6,446
285	469,82	4,6089	335,21	3,2884	7,8974	6,403
290	454,52	4,4588	324,33	3,1817	7,6405	6,195
295	368,78	3,6177	290,90	2,8537	6,4714	5,247
300	550,86	5,4039	325,80	3,1961	8,6000	6,973
305	444,87	4,3642	331,28	3,2499	7,6141	6,173
310	267,90	2,6281	141,21	1,3853	4,0134	3,254
315	456,23	4,4756	241,41	2,3682	6,8438	5,549
320	560,17	5,4953	293,78	2,8820	8,3773	6,792
325	644,71	6,3246	277,52	2,7225	9,0471	7,335
330	637,55	6,2544	275,88	2,7064	8,9607	7,265
335	668,81	6,5610	320,92	3,1482	9,7092	7,872
340	692,19	6,7904	262,51	2,5752	9,3656	7,593
345	687,18	6,7412	305,30	2,9950	9,7362	7,894
350	666,79	6,5412	298,71	2,9303	9,4715	7,679
355	614,00	6,0233	301,52	2,9579	8,9813	7,282

B.3. Ensaio 3 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.3. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	698,67	6,8540	390,89	3,8346	10,6885	8,666
5	635,67	6,2359	335,58	3,2920	9,5279	7,725
10	638,62	6,2649	330,36	3,2408	9,5057	7,707
15	634,52	6,2246	364,55	3,5762	9,8008	7,946
20	623,64	6,1179	342,00	3,3550	9,4728	7,680
25	579,06	5,6806	325,02	3,1884	8,8690	7,191
30	637,13	6,2502	263,48	2,5847	8,8349	7,163
35	438,70	4,3036	254,24	2,4941	6,7977	5,511
40	472,60	4,6362	212,72	2,0868	6,7230	5,451
45	567,45	5,5667	265,16	2,6012	8,1679	6,622
50	494,36	4,8497	220,14	2,1596	7,0093	5,683
55	535,44	5,2527	215,65	2,1155	7,3683	5,974
60	592,17	5,8092	252,52	2,4772	8,2864	6,718
65	577,72	5,6674	290,00	2,8449	8,5123	6,901
70	545,33	5,3497	218,98	2,1482	7,4979	6,079
75	531,18	5,2109	258,30	2,5339	7,7448	6,279
80	576,77	5,6581	337,47	3,3106	8,9687	7,271
85	666,74	6,5407	357,38	3,5059	10,0466	8,145
90	673,00	6,6021	365,17	3,5823	10,1844	8,257
95	563,55	5,5284	327,33	3,2111	8,7395	7,086
100	657,06	6,4458	357,70	3,5090	9,9548	8,071
105	443,87	4,3544	309,24	3,0336	7,3880	5,990
110	578,45	5,6746	350,23	3,4358	9,1103	7,386
115	442,49	4,3408	321,08	3,1498	7,4905	6,073
120	644,40	6,3216	345,43	3,3887	9,7102	7,873
125	319,99	3,1391	218,27	2,1412	5,2803	4,281
130	656,02	6,4356	334,30	3,2795	9,7151	7,877
135	744,90	7,3075	329,04	3,2279	10,5354	8,542
140	764,78	7,5025	362,77	3,5588	11,0613	8,968
145	621,65	6,0984	355,28	3,4853	9,5838	7,770
150	650,00	6,3765	346,79	3,4020	9,7785	7,928
155	792,28	7,7723	355,30	3,4855	11,2578	9,127
160	885,72	8,6889	361,00	3,5414	12,2303	9,916
165	874,25	8,5764	371,50	3,6444	12,2208	9,908
170	618,34	6,0659	316,47	3,1046	9,1705	7,435
175	759,80	7,4536	329,15	3,2290	10,6826	8,661

Tabela B.3. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	609,06	5,9749	319,16	3,1310	9,1059	7,383
185	646,85	6,3456	322,74	3,1661	9,5117	7,712
190	651,20	6,3883	330,75	3,2447	9,6331	7,810
195	630,17	6,1820	325,37	3,1919	9,3740	7,600
200	615,46	6,0377	316,48	3,1047	9,1424	7,412
205	586,22	5,7508	331,02	3,2473	8,9982	7,295
210	577,28	5,6631	309,24	3,0336	8,6967	7,051
215	541,04	5,3076	298,94	2,9326	8,2401	6,681
220	507,92	4,9827	297,24	2,9159	7,8986	6,404
225	571,22	5,6037	307,93	3,0208	8,6246	6,992
230	447,49	4,3899	307,34	3,0150	7,4049	6,004
235	536,32	5,2613	371,74	3,6468	8,9082	7,222
240	543,75	5,3342	389,13	3,8174	9,1515	7,420
245	537,06	5,2686	390,36	3,8294	9,0980	7,376
250	472,71	4,6373	372,26	3,6519	8,2892	6,721
255	691,89	6,7874	403,52	3,9585	10,7458	8,712
260	725,41	7,1163	406,13	3,9841	11,1003	9,000
265	752,92	7,3861	428,53	4,2039	11,5900	9,397
270	701,05	6,8773	437,57	4,2926	11,1699	9,056
275	803,89	7,8862	461,55	4,5278	12,4139	10,065
280	776,29	7,6154	325,67	3,1948	10,8103	8,765
285	570,98	5,6013	441,31	4,3293	9,9306	8,051
290	779,36	7,6455	480,02	4,7090	12,3544	10,016
295	671,20	6,5845	424,21	4,1615	10,7460	8,712
300	716,93	7,0331	449,89	4,4134	11,4465	9,280
305	521,42	5,1151	403,50	3,9583	9,0734	7,356
310	801,51	7,8628	324,82	3,1865	11,0493	8,958
315	803,18	7,8792	327,91	3,2168	11,0960	8,996
320	839,84	8,2388	309,67	3,0379	11,2767	9,143
325	849,77	8,3362	349,24	3,4260	11,7622	9,536
330	912,03	8,9470	355,16	3,4841	12,4311	10,079
335	938,13	9,2031	350,53	3,4387	12,6417	10,249
340	959,31	9,4108	383,12	3,7584	13,1691	10,677
345	977,39	9,5882	389,71	3,8231	13,4113	10,873
350	1000,99	9,8197	398,34	3,9077	13,7274	11,130
355	962,72	9,4443	390,93	3,8350	13,2792	10,766

B.4. Ensaio 4 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.4. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	709,97	6,9648	318,71	3,1265	10,0912	8,182
5	658,47	6,4596	311,51	3,0559	9,5155	7,715
10	607,98	5,9643	283,53	2,7814	8,7457	7,091
15	576,32	5,6537	324,58	3,1841	8,8378	7,165
20	625,19	6,1331	324,88	3,1871	9,3202	7,556
25	518,43	5,0858	293,60	2,8802	7,9661	6,459
30	485,40	4,7618	282,14	2,7678	7,5296	6,105
35	408,50	4,0074	269,03	2,6392	6,6466	5,389
40	494,08	4,8469	298,95	2,9327	7,7795	6,307
45	503,71	4,9414	301,05	2,9533	7,8947	6,401
50	596,52	5,8519	330,07	3,2380	9,0899	7,370
55	675,45	6,6262	346,50	3,3992	10,0254	8,128
60	676,62	6,6376	325,33	3,1915	9,8291	7,969
65	673,64	6,6084	326,33	3,2013	9,8097	7,953
70	692,85	6,7969	349,10	3,4247	10,2216	8,287
75	713,65	7,0009	327,89	3,2166	10,2175	8,284
80	767,45	7,5287	335,66	3,2928	10,8215	8,774
85	612,99	6,0134	327,84	3,2161	9,2296	7,483
90	373,09	3,6600	283,05	2,7767	6,4367	5,219
95	484,87	4,7566	323,68	3,1753	7,9319	6,431
100	515,85	5,0605	328,67	3,2243	8,2848	6,717
105	568,25	5,5745	330,65	3,2437	8,8182	7,149
110	626,73	6,1482	338,09	3,3167	9,4649	7,674
115	567,10	5,5633	335,40	3,2903	8,8536	7,178
120	488,97	4,7968	304,77	2,9898	7,7866	6,313
125	318,72	3,1266	168,47	1,6527	4,7793	3,875
130	606,23	5,9471	328,47	3,2223	9,1694	7,434
135	446,87	4,3838	295,71	2,9009	7,2847	5,906
140	705,35	6,9195	372,39	3,6531	10,5726	8,572
145	643,89	6,3166	387,02	3,7967	10,1133	8,199
150	647,31	6,3501	387,79	3,8042	10,1544	8,233
155	604,62	5,9313	384,46	3,7716	9,7029	7,867
160	607,28	5,9574	389,07	3,8168	9,7742	7,925
165	624,99	6,1312	392,30	3,8485	9,9797	8,091
170	637,10	6,2500	392,54	3,8508	10,1008	8,189
175	661,41	6,4884	407,95	4,0020	10,4904	8,505

Tabela B.4. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	676,55	6,6370	406,37	3,9865	10,6235	8,613
185	715,71	7,0211	407,67	3,9992	11,0203	8,935
190	816,80	8,0128	367,94	3,6095	11,6222	9,423
195	707,34	6,9390	347,49	3,4089	10,3479	8,390
200	556,04	5,4548	324,13	3,1797	8,6345	7,001
205	472,60	4,6362	282,12	2,7676	7,4038	6,003
210	516,18	5,0637	242,12	2,3752	7,4389	6,031
215	478,19	4,6910	257,03	2,5215	7,2124	5,848
220	572,09	5,6122	306,27	3,0045	8,6167	6,986
225	729,51	7,1565	304,50	2,9871	10,1436	8,224
230	829,77	8,1400	347,87	3,4126	11,5525	9,366
235	774,20	7,5949	322,19	3,1607	10,7556	8,720
240	852,48	8,3628	303,92	2,9815	11,3443	9,198
245	800,69	7,8548	319,72	3,1365	10,9912	8,911
250	709,61	6,9613	277,47	2,7220	9,6832	7,851
255	777,45	7,6268	321,26	3,1516	10,7784	8,739
260	744,67	7,3052	293,80	2,8822	10,1874	8,260
265	648,50	6,3618	271,40	2,6624	9,0243	7,317
270	662,73	6,5014	269,67	2,6455	9,1468	7,416
275	666,48	6,5382	283,63	2,7824	9,3206	7,557
280	695,29	6,8208	279,80	2,7448	9,5656	7,755
285	680,33	6,6740	281,57	2,7622	9,4361	7,650
290	638,53	6,2640	293,93	2,8835	9,1474	7,416
295	612,29	6,0066	298,71	2,9303	8,9369	7,246
300	597,60	5,8625	276,67	2,7141	8,5766	6,954
305	251,36	2,4658	157,68	1,5468	4,0126	3,253
310	525,59	5,1560	233,58	2,2914	7,4474	6,038
315	534,35	5,2420	225,57	2,2128	7,4548	6,044
320	794,50	7,7940	328,99	3,2274	11,0213	8,936
325	745,15	7,3099	297,47	2,9182	10,2281	8,293
330	794,27	7,7918	269,19	2,6408	10,4326	8,458
335	800,58	7,8537	326,26	3,2006	11,0543	8,962
340	837,75	8,2183	342,79	3,3628	11,5811	9,389
345	833,71	8,1787	353,53	3,4681	11,6468	9,443
350	857,86	8,4156	333,65	3,2731	11,6888	9,477
355	884,53	8,6772	336,51	3,3012	11,9784	9,712

B.5. Ensaio 1 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.5. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	1022,17	10,0275	452,13	4,4354	14,4629	11,726
5	879,12	8,6242	409,41	4,0163	12,6405	10,248
10	842,11	8,2611	404,32	3,9664	12,2276	9,914
15	781,40	7,6655	378,94	3,7174	11,3829	9,229
20	729,94	7,1607	364,07	3,5715	10,7322	8,701
25	662,90	6,5030	353,66	3,4694	9,9723	8,085
30	713,22	6,9967	351,35	3,4467	10,4434	8,467
35	776,73	7,6197	371,47	3,6441	11,2639	9,132
40	797,08	7,8194	378,46	3,7127	11,5320	9,350
45	849,76	8,3361	388,38	3,8100	12,1461	9,848
50	810,81	7,9540	416,31	4,0840	12,0380	9,760
55	862,40	8,4601	400,75	3,9314	12,3915	10,047
60	880,46	8,6373	406,07	3,9835	12,6208	10,232
65	883,02	8,6624	415,69	4,0779	12,7402	10,329
70	740,34	7,2627	359,22	3,5239	10,7866	8,745
75	836,23	8,2034	398,51	3,9093	12,1128	9,821
80	772,27	7,5760	379,35	3,7214	11,2975	9,160
85	889,84	8,7293	424,14	4,1608	12,8901	10,451
90	903,26	8,8610	426,68	4,1857	13,0467	10,578
95	619,65	6,0788	320,63	3,1454	9,2242	7,479
100	801,88	7,8664	362,54	3,5565	11,4229	9,261
105	797,23	7,8208	385,21	3,7789	11,5996	9,405
110	820,36	8,0477	389,81	3,8240	11,8717	9,625
115	587,04	5,7589	248,97	2,4424	8,2013	6,649
120	622,66	6,1083	260,90	2,5594	8,6677	7,027
125	634,77	6,2271	261,35	2,5638	8,7909	7,127
130	881,77	8,6502	359,86	3,5302	12,1804	9,875
135	835,02	8,1915	353,71	3,4699	11,6614	9,455
140	885,34	8,6852	355,41	3,4866	12,1718	9,868
145	875,78	8,5914	365,92	3,5897	12,1811	9,876
150	920,61	9,0312	398,32	3,9075	12,9387	10,490
155	904,18	8,8700	386,52	3,7918	12,6618	10,266
160	958,41	9,4020	367,39	3,6041	13,0062	10,545
165	967,90	9,4951	368,87	3,6186	13,1137	10,632
170	977,49	9,5892	381,96	3,7470	13,3361	10,812
175	1013,91	9,9465	389,53	3,8213	13,7678	11,162

Tabela B.5. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	894,92	8,7792	379,99	3,7277	12,5069	10,140
185	850,60	8,3444	367,25	3,6027	11,9471	9,686
190	887,81	8,7094	412,40	4,0456	12,7549	10,341
195	887,80	8,7093	413,79	4,0593	12,7686	10,352
200	870,20	8,5367	391,90	3,8445	12,3812	10,038
205	803,05	7,8779	394,31	3,8682	11,7460	9,523
210	757,23	7,4284	371,66	3,6460	11,0744	8,979
215	620,42	6,0863	331,17	3,2488	9,3351	7,569
220	643,48	6,3125	274,63	2,6941	9,0066	7,302
225	674,70	6,6188	336,94	3,3054	9,9242	8,046
230	790,35	7,7533	351,42	3,4474	11,2006	9,081
235	867,94	8,5145	326,28	3,2008	11,7153	9,498
240	907,00	8,8977	333,78	3,2744	12,1721	9,869
245	846,42	8,3034	331,60	3,2530	11,5564	9,369
250	865,69	8,4924	335,08	3,2871	11,7795	9,550
255	864,87	8,4844	357,66	3,5086	11,9930	9,723
260	882,67	8,6590	357,40	3,5061	12,1651	9,863
265	855,96	8,3970	407,02	3,9929	12,3899	10,045
270	823,58	8,0793	404,87	3,9718	12,0511	9,771
275	827,88	8,1215	405,90	3,9819	12,1034	9,813
280	849,12	8,3299	412,53	4,0469	12,3768	10,035
285	826,37	8,1067	399,06	3,9148	12,0215	9,747
290	781,75	7,6690	386,89	3,7954	11,4644	9,295
295	765,58	7,5103	364,59	3,5766	11,0869	8,989
300	741,20	7,2712	374,58	3,6746	10,9458	8,874
305	728,86	7,1501	362,58	3,5569	10,7070	8,681
310	418,32	4,1037	289,75	2,8424	6,9461	5,632
315	499,28	4,8979	353,07	3,4636	8,3615	6,779
320	759,65	7,4522	353,85	3,4713	10,9235	8,856
325	805,75	7,9044	362,20	3,5532	11,4575	9,289
330	843,02	8,2700	404,67	3,9698	12,2398	9,924
335	773,60	7,5890	359,72	3,5289	11,1179	9,014
340	727,33	7,1352	377,97	3,7079	10,8430	8,791
345	809,00	7,9363	375,03	3,6790	11,6153	9,417
350	833,27	8,1744	370,92	3,6387	11,8131	9,578
355	697,91	6,8465	375,42	3,6829	10,5294	8,537

B.6. Ensaio 2 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.6. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	747,56	7,3336	389,62	3,8222	11,1557	9,045
5	783,48	7,6859	415,43	4,0754	11,7613	9,536
10	733,48	7,1954	393,75	3,8627	11,0581	8,965
15	716,57	7,0296	384,69	3,7738	10,8034	8,759
20	725,61	7,1182	362,90	3,5600	10,6782	8,657
25	680,22	6,6730	340,47	3,3400	10,0131	8,118
30	637,08	6,2498	329,50	3,2324	9,4822	7,688
35	650,76	6,3840	326,38	3,2018	9,5858	7,772
40	697,88	6,8462	346,93	3,4034	10,2495	8,310
45	622,60	6,1077	371,55	3,6449	9,7526	7,907
50	650,53	6,3817	383,04	3,7576	10,1394	8,221
55	624,15	6,1229	389,09	3,8170	9,9399	8,059
60	832,99	8,1716	413,02	4,0517	12,2232	9,910
65	891,18	8,7425	417,70	4,0976	12,8401	10,410
70	966,92	9,4855	429,40	4,2124	13,6979	11,106
75	855,37	8,3912	396,17	3,8864	12,2776	9,954
80	930,11	9,1244	411,29	4,0348	13,1592	10,669
85	967,59	9,4921	408,73	4,0096	13,5017	10,947
90	973,58	9,5508	403,64	3,9597	13,5105	10,954
95	729,80	7,1593	303,05	2,9729	10,1322	8,215
100	819,46	8,0389	375,50	3,6837	11,7226	9,504
105	789,76	7,7475	394,93	3,8743	11,6219	9,423
110	790,30	7,7528	366,22	3,5926	11,3454	9,198
115	848,90	8,3277	376,54	3,6939	12,0217	9,747
120	726,27	7,1247	343,99	3,3745	10,4992	8,512
125	800,11	7,8491	384,57	3,7726	11,6217	9,422
130	375,08	3,6795	169,81	1,6658	5,3453	4,334
135	755,11	7,4076	380,73	3,7350	11,1426	9,034
140	782,88	7,6801	369,70	3,6268	11,3068	9,167
145	816,13	8,0062	375,63	3,6849	11,6911	9,479
150	792,85	7,7779	343,70	3,3717	11,1496	9,040
155	808,32	7,9296	365,19	3,5825	11,5121	9,334
160	880,59	8,6386	364,43	3,5751	12,2137	9,902
165	882,96	8,6618	377,42	3,7025	12,3643	10,024
170	914,55	8,9717	389,42	3,8202	12,7920	10,371
175	851,93	8,3574	378,12	3,7094	12,0668	9,783

Tabela B.6. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	857,55	8,4126	384,24	3,7694	12,1820	9,877
185	892,19	8,7524	395,43	3,8792	12,6316	10,241
190	776,81	7,6205	376,31	3,6916	11,3121	9,171
195	884,62	8,6781	390,29	3,8287	12,5069	10,140
200	804,50	7,8921	380,42	3,7319	11,6239	9,424
205	782,79	7,6792	355,77	3,4901	11,1693	9,056
210	802,94	7,8768	373,61	3,6651	11,5419	9,358
215	788,28	7,7330	349,59	3,4295	11,1625	9,050
220	772,85	7,5817	382,24	3,7498	11,3315	9,187
225	755,47	7,4112	391,25	3,8382	11,2494	9,121
230	756,80	7,4242	394,68	3,8718	11,2960	9,158
235	756,79	7,4241	407,41	3,9967	11,4208	9,260
240	780,68	7,6585	419,04	4,1108	11,7693	9,542
245	813,55	7,9809	429,32	4,2116	12,1925	9,885
250	812,14	7,9671	440,44	4,3207	12,2878	9,962
255	749,03	7,3479	447,97	4,3946	11,7425	9,520
260	840,86	8,2488	453,15	4,4454	12,6942	10,292
265	745,62	7,3145	433,41	4,2518	11,5663	9,377
270	801,05	7,8583	406,18	3,9846	11,8429	9,602
275	699,97	6,8667	410,27	4,0247	10,8914	8,830
280	920,83	9,0333	438,98	4,3064	13,3397	10,815
285	772,69	7,5801	385,91	3,7858	11,3659	9,215
290	819,02	8,0346	393,90	3,8642	11,8988	9,647
295	759,40	7,4497	380,23	3,7301	11,1798	9,064
300	774,58	7,5986	387,77	3,8040	11,4027	9,245
305	791,47	7,7643	368,41	3,6141	11,3784	9,225
310	228,22	2,2388	175,21	1,7188	3,9575	3,209
315	654,13	6,4170	342,63	3,3612	9,7782	7,928
320	598,30	5,8693	327,69	3,2146	9,0839	7,365
325	936,17	9,1838	408,29	4,0053	13,1891	10,693
330	809,16	7,9379	379,01	3,7181	11,6560	9,450
335	913,75	8,9639	393,66	3,8618	12,8257	10,399
340	847,41	8,3131	399,70	3,9211	12,2342	9,919
345	930,73	9,1305	424,08	4,1602	13,2906	10,776
350	824,51	8,0884	396,65	3,8911	11,9795	9,713
355	854,35	8,3812	426,86	4,1875	12,5687	10,190

B.7. Ensaio 3 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.7. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	900,52	8,8341	456,96	4,4828	13,3169	10,797
5	912,10	8,9477	476,49	4,6744	13,6221	11,044
10	866,11	8,4965	455,06	4,4641	12,9607	10,508
15	758,54	7,4413	418,82	4,1086	11,5499	9,364
20	809,17	7,9380	341,28	3,3480	11,2860	9,150
25	672,73	6,5995	319,48	3,1341	9,7337	7,892
30	746,25	7,3207	332,20	3,2589	10,5796	8,578
35	819,39	8,0382	368,39	3,6139	11,6521	9,447
40	621,45	6,0964	317,20	3,1117	9,2081	7,466
45	731,94	7,1803	348,78	3,4215	10,6017	8,595
50	756,98	7,4260	355,70	3,4894	10,9154	8,850
55	829,45	8,1369	379,86	3,7264	11,8634	9,618
60	729,82	7,1595	373,23	3,6614	10,8209	8,773
65	946,08	9,2811	401,75	3,9411	13,2222	10,720
70	976,88	9,5832	414,03	4,0616	13,6448	11,063
75	829,73	8,1397	412,28	4,0445	12,1842	9,878
80	958,26	9,4005	412,68	4,0484	13,4490	10,904
85	975,40	9,5687	419,78	4,1180	13,6867	11,097
90	979,69	9,6108	419,73	4,1176	13,7284	11,130
95	625,33	6,1345	330,66	3,2438	9,3782	7,604
100	686,37	6,7333	361,12	3,5426	10,2759	8,331
105	884,51	8,6770	420,96	4,1296	12,8066	10,383
110	770,46	7,5582	384,26	3,7696	11,3278	9,184
115	571,04	5,6019	371,28	3,6423	9,2442	7,495
120	506,01	4,9640	336,83	3,3043	8,2683	6,704
125	575,09	5,6416	351,18	3,4451	9,0867	7,367
130	301,13	2,9541	252,25	2,4746	5,4286	4,401
135	304,23	2,9845	230,96	2,2657	5,2502	4,257
140	618,76	6,0700	367,23	3,6025	9,6725	7,842
145	594,39	5,8310	354,01	3,4728	9,3039	7,543
150	514,33	5,0456	309,35	3,0347	8,0803	6,551
155	508,47	4,9881	320,19	3,1411	8,1291	6,591
160	666,57	6,5391	338,80	3,3236	9,8628	7,996
165	679,14	6,6624	355,15	3,4840	10,1465	8,226
170	738,55	7,2452	383,25	3,7597	11,0049	8,922
175	726,80	7,1299	377,79	3,7061	10,8360	8,785

Tabela B.7. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	732,87	7,1895	390,17	3,8276	11,0172	8,932
185	728,02	7,1419	393,51	3,8603	11,0023	8,920
190	662,55	6,4996	376,07	3,6892	10,1888	8,261
195	650,96	6,3859	374,78	3,6766	10,0626	8,158
200	792,07	7,7702	414,63	4,0675	11,8377	9,598
205	801,05	7,8583	424,50	4,1643	12,0226	9,747
210	846,94	8,3085	483,84	4,7465	13,0549	10,584
215	803,27	7,8801	458,44	4,4973	12,3774	10,035
220	847,50	8,3140	483,55	4,7436	13,0576	10,587
225	883,16	8,6638	493,72	4,8434	13,5072	10,951
230	642,55	6,3034	439,14	4,3080	10,6114	8,603
235	638,10	6,2598	429,46	4,2130	10,4728	8,491
240	658,01	6,4551	418,70	4,1074	10,5625	8,564
245	642,17	6,2997	426,16	4,1806	10,4802	8,497
250	646,69	6,3440	435,68	4,2740	10,6180	8,609
255	684,87	6,7186	441,13	4,3275	11,0460	8,956
260	732,26	7,1835	427,12	4,1900	11,3735	9,221
265	713,24	6,9969	428,80	4,2065	11,2035	9,083
270	841,96	8,2596	424,83	4,1676	12,4272	10,075
275	731,59	7,1769	359,09	3,5227	10,6996	8,675
280	781,06	7,6622	385,97	3,7864	11,4485	9,282
285	616,47	6,0476	337,43	3,3102	9,3578	7,587
290	891,73	8,7479	417,34	4,0941	12,8421	10,412
295	594,82	5,8352	353,40	3,4669	9,3020	7,542
300	609,42	5,9784	329,37	3,2311	9,2096	7,467
305	272,28	2,6711	195,28	1,9157	4,5868	3,719
310	608,63	5,9707	346,54	3,3996	9,3703	7,597
315	525,64	5,1565	305,83	3,0002	8,1567	6,613
320	573,97	5,6306	314,71	3,0873	8,7179	7,068
325	664,17	6,5155	334,58	3,2822	9,7977	7,944
330	663,31	6,5071	337,15	3,3074	9,8145	7,957
335	715,07	7,0148	343,48	3,3695	10,3843	8,419
340	654,14	6,4171	352,42	3,4572	9,8743	8,006
345	788,96	7,7397	421,64	4,1363	11,8760	9,629
350	776,72	7,6196	416,78	4,0886	11,7082	9,493
355	784,04	7,6914	417,99	4,1005	11,7919	9,560

B.8. Ensaio 4 — protótipo com 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.8. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	956,87	9,3869	387,80	3,8043	13,1912	10,695
5	880,80	8,6406	381,90	3,7464	12,3870	10,043
10	890,03	8,7312	377,01	3,6985	12,4297	10,078
15	736,00	7,2202	417,50	4,0957	11,3159	9,175
20	776,07	7,6132	395,86	3,8834	11,4966	9,321
25	771,29	7,5664	410,23	4,0244	11,5908	9,397
30	858,00	8,4170	403,50	3,9583	12,3754	10,033
35	738,74	7,2470	354,21	3,4748	10,7218	8,693
40	647,82	6,3551	363,85	3,5694	9,9244	8,046
45	788,25	7,7327	371,49	3,6443	11,3771	9,224
50	783,83	7,6894	388,76	3,8137	11,5032	9,326
55	713,36	6,9981	397,53	3,8998	10,8978	8,836
60	883,02	8,6624	426,85	4,1874	12,8498	10,418
65	950,22	9,3217	439,29	4,3094	13,6311	11,052
70	909,37	8,9209	444,97	4,3652	13,2861	10,772
75	793,56	7,7848	455,06	4,4641	12,2488	9,931
80	882,82	8,6605	437,91	4,2959	12,9564	10,505
85	766,62	7,5205	424,21	4,1615	11,6820	9,471
90	841,76	8,2577	426,81	4,1870	12,4447	10,090
95	683,19	6,7021	395,62	3,8810	10,5831	8,580
100	567,51	5,5673	337,71	3,3129	8,8802	7,200
105	897,81	8,8075	450,33	4,4177	13,2252	10,722
110	794,32	7,7923	432,64	4,2442	12,0365	9,759
115	833,65	8,1781	434,16	4,2591	12,4372	10,084
120	780,71	7,6588	420,43	4,1244	11,7833	9,553
125	831,65	8,1585	420,05	4,1207	12,2791	9,955
130	798,39	7,8322	420,08	4,1210	11,9532	9,691
135	703,99	6,9061	362,06	3,5518	10,4579	8,479
140	673,79	6,6099	353,91	3,4719	10,0819	8,174
145	837,29	8,2138	373,75	3,6665	11,8803	9,632
150	853,75	8,3753	388,30	3,8092	12,1845	9,879
155	876,50	8,5985	399,00	3,9142	12,5127	10,145
160	901,79	8,8466	404,96	3,9727	12,8194	10,393
165	885,59	8,6876	421,62	4,1361	12,8237	10,397
170	916,91	8,9949	426,40	4,1830	13,1778	10,684
175	996,66	9,7772	449,87	4,4132	14,1903	11,505

Tabela B.8. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 20% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	988,38	9,6960	415,51	4,0762	13,7722	11,166
185	994,37	9,7548	462,51	4,5372	14,2920	11,587
190	936,74	9,1894	443,56	4,3513	13,5407	10,978
195	882,05	8,6529	438,07	4,2975	12,9504	10,500
200	830,96	8,1517	357,14	3,5035	11,6553	9,450
205	831,91	8,1610	425,55	4,1746	12,3356	10,001
210	670,04	6,5731	372,47	3,6539	10,2270	8,292
215	522,05	5,1213	365,46	3,5852	8,7065	7,059
220	548,29	5,3787	371,36	3,6430	9,0217	7,314
225	663,83	6,5122	421,85	4,1383	10,6505	8,635
230	660,62	6,4807	425,73	4,1764	10,6571	8,640
235	695,32	6,8211	443,25	4,3483	11,1694	9,056
240	727,01	7,1320	426,30	4,1820	11,3140	9,173
245	716,83	7,0321	405,10	3,9740	11,0061	8,923
250	775,05	7,6032	429,17	4,2102	11,8134	9,578
255	854,94	8,3870	429,67	4,2151	12,6021	10,217
260	803,99	7,8871	438,57	4,3024	12,1895	9,883
265	875,74	8,5910	445,15	4,3669	12,9579	10,506
270	899,72	8,8263	425,27	4,1719	12,9982	10,538
275	763,02	7,4852	424,51	4,1644	11,6496	9,445
280	849,72	8,3358	426,18	4,1808	12,5166	10,148
285	806,29	7,9097	408,97	4,0120	11,9216	9,666
290	793,37	7,7830	411,35	4,0353	11,8184	9,582
295	836,48	8,2059	416,82	4,0890	12,2949	9,968
300	851,36	8,3518	426,34	4,1824	12,5341	10,162
305	802,79	7,8754	425,14	4,1706	12,0460	9,766
310	715,52	7,0193	407,10	3,9937	11,0130	8,929
315	754,56	7,4022	410,43	4,0263	11,4285	9,266
320	760,31	7,4586	413,28	4,0543	11,5129	9,334
325	760,99	7,4653	415,44	4,0755	11,5408	9,357
330	744,30	7,3016	410,45	4,0265	11,3281	9,184
335	763,30	7,4880	407,57	3,9983	11,4863	9,313
340	966,73	9,4836	461,00	4,5224	14,0059	11,355
345	948,02	9,3001	461,44	4,5267	13,8269	11,210
350	1013,81	9,9455	481,94	4,7278	14,6733	11,897
355	998,72	9,7974	488,67	4,7939	14,5913	11,830

B.9. Ensaio 1 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.9. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	968,74	9,5033	475,38	4,6635	14,1668	11,486
5	831,40	8,1560	438,46	4,3013	12,4573	10,100
10	770,71	7,5607	404,33	3,9665	11,5272	9,346
15	752,78	7,3848	439,72	4,3137	11,6985	9,485
20	718,96	7,0530	408,88	4,0111	11,0641	8,970
25	795,76	7,8064	440,52	4,3215	12,1278	9,833
30	673,70	6,6090	395,97	3,8845	10,4935	8,508
35	776,67	7,6191	439,17	4,3083	11,9274	9,670
40	640,94	6,2876	376,67	3,6951	9,9828	8,094
45	671,27	6,5852	381,13	3,7389	10,3241	8,370
50	704,64	6,9125	373,47	3,6637	10,5762	8,575
55	677,59	6,6472	379,35	3,7214	10,3686	8,406
60	664,08	6,5146	344,92	3,3837	9,8983	8,025
65	645,43	6,3317	341,10	3,3462	9,6779	7,846
70	760,59	7,4614	384,55	3,7724	11,2338	9,108
75	640,11	6,2795	326,50	3,2030	9,4825	7,688
80	673,79	6,6099	338,60	3,3217	9,9316	8,052
85	512,93	5,0318	293,59	2,8801	7,9119	6,415
90	646,29	6,3401	387,05	3,7970	10,1371	8,219
95	649,46	6,3712	387,54	3,8018	10,1730	8,248
100	599,62	5,8823	350,06	3,4341	9,3164	7,553
105	533,22	5,2309	344,45	3,3791	8,6101	6,981
110	571,08	5,6023	331,07	3,2478	8,8501	7,175
115	396,11	3,8858	208,73	2,0476	5,9334	4,811
120	680,20	6,6728	332,80	3,2648	9,9375	8,057
125	836,63	8,2073	336,31	3,2992	11,5065	9,329
130	847,24	8,3114	341,97	3,3547	11,6661	9,458
135	856,31	8,4004	358,58	3,5177	11,9181	9,663
140	880,58	8,6385	364,73	3,5780	12,2165	9,905
145	932,84	9,1512	387,98	3,8061	12,9573	10,505
150	941,97	9,2407	410,70	4,0290	13,2697	10,759
155	953,10	9,3499	436,16	4,2787	13,6286	11,050
160	852,71	8,3651	385,08	3,7776	12,1427	9,845
165	870,18	8,5365	412,25	4,0442	12,5806	10,200
170	870,61	8,5407	426,91	4,1880	12,7286	10,320
175	952,50	9,3440	474,34	4,6533	13,9973	11,348

Tabela B.9. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	947,80	9,2979	475,16	4,6613	13,9592	11,318
185	884,44	8,6764	453,57	4,4495	13,1259	10,642
190	876,97	8,6031	451,77	4,4319	13,0350	10,568
195	837,67	8,2175	431,01	4,2282	12,4457	10,090
200	850,48	8,3432	440,36	4,3199	12,6631	10,267
205	837,82	8,2190	372,22	3,6515	11,8705	9,624
210	853,47	8,3725	427,77	4,1964	12,5689	10,190
215	759,77	7,4533	415,20	4,0731	11,5264	9,345
220	716,20	7,0259	407,30	3,9956	11,0215	8,936
225	777,79	7,6301	404,52	3,9683	11,5984	9,404
230	772,93	7,5824	395,42	3,8791	11,4614	9,292
235	791,46	7,7642	304,18	2,9840	10,7482	8,714
240	839,97	8,2401	333,92	3,2758	11,5159	9,337
245	848,44	8,3232	434,87	4,2661	12,5893	10,207
250	769,68	7,5506	426,31	4,1821	11,7327	9,512
255	773,85	7,5915	407,53	3,9979	11,5894	9,396
260	703,03	6,8967	389,95	3,8254	10,7222	8,693
265	708,07	6,9462	363,90	3,5699	10,5161	8,526
270	850,17	8,3402	434,66	4,2640	12,6042	10,219
275	598,30	5,8693	324,54	3,1837	9,0530	7,340
280	523,08	5,1314	329,23	3,2297	8,3612	6,779
285	485,01	4,7579	286,68	2,8123	7,5702	6,138
290	476,21	4,6716	267,80	2,6271	7,2987	5,917
295	452,19	4,4360	248,90	2,4417	6,8777	5,576
300	562,60	5,5191	295,64	2,9002	8,4193	6,826
305	736,85	7,2285	373,81	3,6671	10,8956	8,834
310	609,95	5,9836	333,21	3,2688	9,2524	7,501
315	743,56	7,2943	348,53	3,4191	10,7135	8,686
320	767,33	7,5275	365,54	3,5859	11,1134	9,010
325	775,64	7,6090	373,08	3,6599	11,2689	9,136
330	801,75	7,8652	389,69	3,8229	11,6881	9,476
335	836,64	8,2074	401,23	3,9361	12,1435	9,845
340	810,15	7,9476	403,51	3,9584	11,9060	9,653
345	730,84	7,1695	383,81	3,7652	10,9348	8,866
350	785,27	7,7035	395,16	3,8765	11,5799	9,389
355	903,10	8,8594	439,65	4,3130	13,1723	10,680

B.10. Ensaio 2 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.10. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	870,86	8,5431	464,97	4,5614	13,1045	10,625
5	899,08	8,8200	467,80	4,5891	13,4091	10,872
10	786,34	7,7140	426,78	4,1867	11,9007	9,649
15	737,65	7,2363	411,61	4,0379	11,2742	9,141
20	797,18	7,8203	417,06	4,0914	11,9117	9,658
25	779,81	7,6499	406,90	3,9917	11,6416	9,439
30	749,30	7,3506	398,89	3,9131	11,2637	9,132
35	846,89	8,3080	383,74	3,7645	12,0725	9,788
40	865,34	8,4890	385,72	3,7839	12,2729	9,950
45	924,11	9,0655	383,40	3,7612	12,8267	10,399
50	934,56	9,1680	381,30	3,7406	12,9085	10,466
55	916,35	8,9894	401,43	3,9380	12,9274	10,481
60	945,06	9,2710	402,95	3,9529	13,2239	10,721
65	1006,61	9,8748	413,92	4,0606	13,9354	11,298
70	962,79	9,4450	402,55	3,9490	13,3940	10,859
75	975,39	9,5686	413,33	4,0548	13,6234	11,045
80	751,04	7,3677	367,32	3,6034	10,9711	8,895
85	782,83	7,6796	357,56	3,5077	11,1873	9,070
90	862,17	8,4579	400,97	3,9335	12,3913	10,046
95	736,80	7,2280	350,50	3,4384	10,6664	8,648
100	744,45	7,3031	379,47	3,7226	11,0257	8,939
105	731,44	7,1754	357,99	3,5119	10,6873	8,665
110	663,98	6,5136	328,94	3,2269	9,7405	7,897
115	379,10	3,7190	213,37	2,0932	5,8122	4,712
120	554,40	5,4387	280,42	2,7509	8,1896	6,640
125	632,31	6,2030	322,10	3,1598	9,3629	7,591
130	748,78	7,3455	332,24	3,2593	10,6048	8,598
135	772,26	7,5759	346,37	3,3979	10,9738	8,897
140	815,54	8,0004	353,82	3,4710	11,4714	9,301
145	899,47	8,8238	376,33	3,6918	12,5156	10,147
150	913,70	8,9634	391,82	3,8438	12,8072	10,384
155	949,49	9,3145	417,68	4,0974	13,4119	10,874
160	961,36	9,4309	421,74	4,1373	13,5682	11,001
165	934,09	9,1634	429,30	4,2114	13,3748	10,844
170	988,87	9,7008	437,87	4,2955	13,9963	11,348
175	988,74	9,6995	439,06	4,3072	14,0067	11,356

Tabela B.10. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	989,87	9,7106	440,17	4,3181	14,0287	11,374
185	996,14	9,7721	436,69	4,2839	14,0559	11,396
190	958,43	9,4022	438,25	4,2992	13,7014	11,109
195	888,93	8,7204	413,61	4,0575	12,7779	10,360
200	879,46	8,6275	415,43	4,0754	12,7030	10,299
205	832,65	8,1683	407,59	3,9985	12,1668	9,864
210	881,71	8,6496	417,67	4,0973	12,7469	10,335
215	767,96	7,5337	400,63	3,9302	11,4639	9,294
220	827,76	8,1203	408,67	4,0091	12,1294	9,834
225	748,24	7,3402	395,79	3,8827	11,2228	9,099
230	827,77	8,1204	420,13	4,1215	12,2419	9,925
235	790,54	7,7552	410,74	4,0294	11,7846	9,554
240	730,33	7,1645	379,00	3,7180	10,8824	8,823
245	765,01	7,5047	390,22	3,8281	11,3328	9,188
250	742,02	7,2792	382,95	3,7567	11,0359	8,947
255	800,49	7,8528	404,37	3,9669	11,8198	9,583
260	842,32	8,2632	435,18	4,2691	12,5323	10,161
265	813,44	7,9798	424,63	4,1656	12,1454	9,847
270	813,88	7,9842	417,54	4,0961	12,0803	9,794
275	724,33	7,1057	399,20	3,9162	11,0219	8,936
280	749,93	7,3568	397,48	3,8993	11,2561	9,126
285	849,37	8,3323	399,29	3,9170	12,2493	9,931
290	668,67	6,5597	333,13	3,2680	9,8277	7,968
295	533,52	5,2338	307,46	3,0162	8,2500	6,689
300	722,60	7,0887	358,13	3,5133	10,6020	8,596
305	709,54	6,9606	378,67	3,7148	10,6754	8,655
310	847,01	8,3092	394,66	3,8716	12,1808	9,876
315	802,56	7,8731	420,69	4,1270	12,0002	9,729
320	911,25	8,9394	448,12	4,3961	13,3355	10,812
325	934,19	9,1644	457,13	4,4844	13,6488	11,066
330	940,62	9,2275	465,76	4,5691	13,7966	11,186
335	971,95	9,5348	470,66	4,6172	14,1520	11,474
340	967,92	9,4953	470,22	4,6129	14,1083	11,438
345	1015,75	9,9645	470,31	4,6137	14,5782	11,819
350	930,19	9,1252	449,27	4,4073	13,5325	10,972
355	942,43	9,2452	450,37	4,4181	13,6633	11,078

B.11. Ensaio 3 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.11. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	906,16	8,8894	423,62	4,1557	13,0450	10,576
5	921,74	9,0423	405,50	3,9780	13,0204	10,556
10	934,00	9,1625	413,16	4,0531	13,2156	10,715
15	789,03	7,7404	394,60	3,8710	11,6113	9,414
20	785,21	7,7029	380,82	3,7358	11,4387	9,274
25	785,96	7,7103	365,38	3,5844	11,2947	9,157
30	803,99	7,8871	379,53	3,7232	11,6103	9,413
35	1021,55	10,0214	410,89	4,0308	14,0522	11,393
40	958,20	9,3999	400,62	3,9301	13,3299	10,807
45	1018,59	9,9924	398,72	3,9114	13,9038	11,273
50	1159,92	11,3788	448,25	4,3973	15,7761	12,791
55	1209,22	11,8624	474,94	4,6592	16,5215	13,395
60	1240,69	12,1712	481,16	4,7202	16,8915	13,695
65	1221,40	11,9819	457,62	4,4893	16,4712	13,354
70	1242,45	12,1884	492,57	4,8321	17,0205	13,800
75	841,87	8,2587	412,80	4,0496	12,3084	9,979
80	964,58	9,4625	407,70	3,9995	13,4620	10,914
85	1077,91	10,5743	426,19	4,1809	14,7552	11,963
90	1090,78	10,7006	426,72	4,1861	14,8867	12,070
95	991,50	9,7266	380,83	3,7359	13,4625	10,915
100	911,47	8,9415	372,13	3,6506	12,5921	10,209
105	953,44	9,3532	393,40	3,8593	13,2125	10,712
110	1062,06	10,4188	427,03	4,1892	14,6080	11,844
115	687,44	6,7438	338,05	3,3163	10,0601	8,156
120	718,65	7,0500	344,74	3,3819	10,4319	8,458
125	794,78	7,7968	356,04	3,4928	11,2896	9,153
130	795,65	7,8053	371,71	3,6465	11,4518	9,285
135	863,89	8,4748	388,83	3,8144	12,2892	9,964
140	961,95	9,4367	406,28	3,9856	13,4223	10,882
145	969,69	9,5127	420,37	4,1238	13,6365	11,056
150	1012,31	9,9308	427,84	4,1971	14,1280	11,454
155	977,21	9,5864	423,99	4,1593	13,7457	11,144
160	1049,55	10,2961	432,19	4,2398	14,5359	11,785
165	1057,17	10,3708	440,23	4,3187	14,6896	11,910
170	1071,06	10,5071	436,75	4,2845	14,7916	11,992
175	1087,01	10,6636	445,06	4,3660	15,0296	12,185

Tabela B.11. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	1018,27	9,9892	433,88	4,2564	14,2456	11,550
185	983,57	9,6488	424,16	4,1610	13,8098	11,196
190	953,59	9,3547	410,44	4,0264	13,3811	10,849
195	929,30	9,1164	400,89	3,9327	13,0491	10,580
200	910,32	8,9302	404,00	3,9632	12,8934	10,453
205	864,05	8,4763	394,38	3,8689	12,3453	10,009
210	830,13	8,1436	378,41	3,7122	11,8557	9,612
215	742,23	7,2813	329,01	3,2276	10,5089	8,520
220	660,84	6,4828	320,49	3,1440	9,6268	7,805
225	668,89	6,5618	358,32	3,5151	10,0769	8,170
230	729,54	7,1568	370,88	3,6383	10,7952	8,752
235	868,20	8,5170	376,40	3,6925	12,2095	9,899
240	844,20	8,2816	386,66	3,7931	12,0747	9,790
245	901,38	8,8425	397,82	3,9026	12,7452	10,333
250	818,99	8,0343	396,91	3,8937	11,9279	9,671
255	841,45	8,2546	408,57	4,0081	12,2627	9,942
260	805,75	7,9044	398,60	3,9103	11,8147	9,579
265	835,35	8,1948	410,44	4,0264	12,2212	9,908
270	867,27	8,5079	417,59	4,0966	12,6045	10,219
275	856,93	8,4065	418,95	4,1099	12,5164	10,148
280	801,67	7,8644	413,70	4,0584	11,9228	9,667
285	741,15	7,2707	389,87	3,8246	11,0953	8,996
290	743,91	7,2978	392,01	3,8456	11,1434	9,035
295	738,01	7,2399	355,22	3,4847	10,7246	8,695
300	727,53	7,1371	385,78	3,7845	10,9217	8,855
305	662,92	6,5032	364,32	3,5740	10,0772	8,170
310	794,78	7,7968	360,47	3,5362	11,3330	9,188
315	861,36	8,4499	375,35	3,6822	12,1321	9,836
320	909,75	8,9246	389,10	3,8171	12,7417	10,330
325	935,80	9,1802	385,46	3,7814	12,9616	10,509
330	951,54	9,3346	392,46	3,8500	13,1846	10,690
335	996,46	9,7753	411,76	4,0394	13,8148	11,200
340	999,99	9,8099	418,38	4,1043	13,9142	11,281
345	993,43	9,7455	413,02	4,0517	13,7972	11,186
350	1002,29	9,8325	427,25	4,1913	14,0239	11,370
355	1123,65	11,0230	444,96	4,3651	15,3881	12,476

B.12. Ensaio 4 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm

Tabela B.12. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	1040,99	10,2121	407,79	4,0004	14,2125	11,523
5	948,58	9,3056	394,76	3,8726	13,1782	10,684
10	935,26	9,1749	398,96	3,9138	13,0887	10,612
15	900,54	8,8343	389,33	3,8193	12,6536	10,259
20	828,40	8,1266	370,18	3,6315	11,7581	9,533
25	668,04	6,5535	299,37	2,9368	9,4903	7,694
30	664,69	6,5206	312,83	3,0689	9,5895	7,775
35	842,67	8,2666	346,10	3,3952	11,6618	9,455
40	737,49	7,2348	326,93	3,2072	10,4420	8,466
45	735,50	7,2153	328,77	3,2252	10,4405	8,465
50	747,50	7,3330	329,71	3,2345	10,5675	8,568
55	815,32	7,9983	352,42	3,4572	11,4555	9,288
60	865,45	8,4901	342,39	3,3588	11,8489	9,607
65	812,14	7,9671	350,34	3,4368	11,4039	9,246
70	805,76	7,9045	371,52	3,6446	11,5492	9,364
75	787,69	7,7272	349,15	3,4252	11,1524	9,042
80	811,57	7,9615	357,05	3,5027	11,4642	9,295
85	835,25	8,1938	356,45	3,4968	11,6907	9,478
90	736,53	7,2254	336,30	3,2991	10,5245	8,533
95	828,72	8,1297	319,75	3,1367	11,2664	9,134
100	749,65	7,3541	300,64	2,9493	10,3034	8,354
105	664,99	6,5236	249,94	2,4519	8,9755	7,277
110	745,86	7,3169	290,24	2,8473	10,1642	8,241
115	657,96	6,4546	245,78	2,4111	8,8657	7,188
120	672,23	6,5946	267,26	2,6218	9,2164	7,472
125	683,86	6,7087	284,15	2,7875	9,4962	7,699
130	652,86	6,4046	269,42	2,6430	9,0476	7,335
135	609,12	5,9755	267,52	2,6244	8,5998	6,972
140	782,36	7,6750	295,37	2,8976	10,5726	8,572
145	730,18	7,1631	326,60	3,2039	10,3670	8,405
150	763,91	7,4940	309,66	3,0378	10,5318	8,539
155	867,31	8,5083	329,29	3,2303	11,7386	9,517
160	880,60	8,6387	350,32	3,4366	12,0753	9,790
165	992,93	9,7406	349,16	3,4253	13,1660	10,674
170	911,68	8,9436	320,49	3,1440	12,0876	9,800
175	916,14	8,9873	336,49	3,3010	12,2883	9,963

Tabela B.12. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 105 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	920,00	9,0252	347,33	3,4073	12,4326	10,080
185	905,10	8,8790	337,51	3,3110	12,1900	9,883
190	879,59	8,6288	349,44	3,4280	12,0567	9,775
195	892,06	8,7511	343,87	3,3734	12,1245	9,830
200	836,88	8,2098	326,40	3,2020	11,4118	9,252
205	672,12	6,5935	320,93	3,1483	9,7419	7,898
210	643,27	6,3105	302,31	2,9657	9,2762	7,521
215	593,59	5,8231	282,33	2,7697	8,5928	6,967
220	527,33	5,1731	250,28	2,4552	7,6283	6,185
225	488,43	4,7915	240,00	2,3544	7,1459	5,794
230	524,23	5,1427	280,55	2,7522	7,8949	6,401
235	530,67	5,2059	268,96	2,6385	7,8444	6,360
240	571,83	5,6097	307,28	3,0144	8,6241	6,992
245	634,49	6,2243	339,34	3,3289	9,5532	7,745
250	581,38	5,7033	307,91	3,0206	8,7239	7,073
255	590,20	5,7899	319,15	3,1309	8,9208	7,233
260	611,86	6,0023	339,00	3,3256	9,3279	7,563
265	693,00	6,7983	344,44	3,3790	10,1773	8,251
270	621,38	6,0957	336,36	3,2997	9,3954	7,617
275	583,03	5,7195	313,22	3,0727	8,7923	7,128
280	596,15	5,8482	314,33	3,0836	8,9317	7,241
285	596,31	5,8498	281,38	2,7603	8,6101	6,981
290	679,61	6,6670	328,29	3,2205	9,8875	8,016
295	683,29	6,7031	320,30	3,1421	9,8451	7,982
300	644,93	6,3268	297,52	2,9187	9,2456	7,496
305	654,38	6,4195	312,17	3,0624	9,4819	7,688
310	704,96	6,9157	323,39	3,1725	10,0882	8,179
315	741,30	7,2722	333,39	3,2706	10,5427	8,548
320	659,15	6,4663	313,50	3,0754	9,5417	7,736
325	715,19	7,0160	324,41	3,1825	10,1985	8,269
330	762,76	7,4827	345,38	3,3882	10,8709	8,814
335	770,27	7,5563	338,97	3,3253	10,8816	8,822
340	783,77	7,6888	340,40	3,3393	11,0282	8,941
345	761,31	7,4685	352,23	3,4554	10,9240	8,857
350	806,55	7,9123	378,51	3,7132	11,6255	9,425
355	873,01	8,5642	401,46	3,9383	12,5024	10,136

B.13. Ensaio 1 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.13. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	1126,51	11,0511	412,78	4,0494	15,1005	12,243
5	1119,93	10,9865	421,45	4,1344	15,1209	12,259
10	1081,21	10,6067	418,84	4,1088	14,7155	11,931
15	1028,33	10,0879	410,66	4,0286	14,1166	11,445
20	884,90	8,6809	372,55	3,6547	12,3356	10,001
25	880,86	8,6412	376,23	3,6908	12,3320	9,998
30	920,97	9,0347	395,82	3,8830	12,9178	10,473
35	1002,25	9,8321	414,22	4,0635	13,8956	11,266
40	1043,60	10,2377	413,23	4,0538	14,2916	11,587
45	1051,50	10,3152	407,15	3,9941	14,3093	11,601
50	995,02	9,7611	394,06	3,8657	13,6268	11,048
55	1039,72	10,1997	427,14	4,1902	14,3898	11,667
60	1067,30	10,4702	425,97	4,1788	14,6490	11,877
65	964,88	9,4655	415,87	4,0797	13,5451	10,982
70	966,88	9,4851	411,22	4,0341	13,5191	10,961
75	1035,08	10,1541	426,61	4,1850	14,3391	11,626
80	1032,96	10,1333	426,36	4,1826	14,3159	11,607
85	883,99	8,6719	363,17	3,5627	12,2346	9,919
90	844,49	8,2844	370,23	3,6320	11,9164	9,661
95	762,19	7,4771	309,41	3,0353	10,5123	8,523
100	848,35	8,3223	339,70	3,3325	11,6548	9,449
105	764,10	7,4958	322,11	3,1599	10,6557	8,639
110	828,05	8,1232	330,92	3,2463	11,3695	9,218
115	833,33	8,1750	354,25	3,4752	11,6502	9,446
120	761,26	7,4680	308,61	3,0275	10,4955	8,509
125	842,13	8,2613	345,80	3,3923	11,6536	9,448
130	380,14	3,7292	275,10	2,6987	6,4279	5,212
135	316,60	3,1058	253,57	2,4875	5,5933	4,535
140	648,17	6,3585	366,04	3,5909	9,9495	8,067
145	633,65	6,2161	358,86	3,5204	9,7365	7,894
150	621,21	6,0941	350,16	3,4351	9,5292	7,726
155	552,50	5,4200	354,35	3,4762	8,8962	7,213
160	907,15	8,8991	400,06	3,9246	12,8237	10,397
165	958,80	9,4058	408,65	4,0089	13,4147	10,876
170	859,11	8,4279	353,22	3,4651	11,8930	9,642
175	911,18	8,9387	358,54	3,5173	12,4560	10,099

Tabela B.13. Dados completos do ensaio 1 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	801,71	7,8648	343,91	3,3738	11,2386	9,112
185	920,37	9,0288	340,31	3,3384	12,3672	10,027
190	945,51	9,2755	354,21	3,4748	12,7503	10,337
195	935,66	9,1788	342,35	3,3585	12,5373	10,165
200	829,66	8,1390	309,13	3,0326	11,1716	9,057
205	842,99	8,2697	300,67	2,9496	11,2193	9,096
210	876,47	8,5982	308,01	3,0216	11,6198	9,421
215	917,67	9,0023	301,70	2,9597	11,9620	9,698
220	903,44	8,8627	321,60	3,1549	12,0176	9,743
225	864,39	8,4797	325,79	3,1960	11,6756	9,466
230	885,39	8,6857	383,30	3,7602	12,4458	10,091
235	882,61	8,6584	382,82	3,7555	12,4139	10,065
240	890,45	8,7353	393,59	3,8611	12,5964	10,213
245	873,49	8,5689	392,76	3,8530	12,4219	10,071
250	864,83	8,4840	393,31	3,8584	12,3423	10,007
255	864,63	8,4820	396,37	3,8884	12,3704	10,029
260	964,13	9,4581	418,14	4,1020	13,5600	10,994
265	967,77	9,4938	420,19	4,1221	13,6158	11,039
270	971,17	9,5272	421,03	4,1303	13,6575	11,073
275	973,92	9,5542	421,79	4,1378	13,6920	11,101
280	903,24	8,8608	401,68	3,9405	12,8012	10,379
285	795,35	7,8024	346,89	3,4030	11,2054	9,085
290	892,65	8,7569	370,03	3,6300	12,3870	10,043
295	813,34	7,9789	389,38	3,8198	11,7986	9,566
300	824,70	8,0903	371,17	3,6412	11,7315	9,511
305	784,46	7,6956	361,61	3,5474	11,2430	9,115
310	759,25	7,4482	363,91	3,5700	11,0183	8,933
315	701,64	6,8831	334,88	3,2852	10,1683	8,244
320	768,77	7,5416	339,08	3,3264	10,8680	8,811
325	919,62	9,0215	393,06	3,8559	12,8774	10,440
330	933,05	9,1532	394,29	3,8680	13,0213	10,557
335	922,19	9,0467	383,26	3,7598	12,8065	10,383
340	924,46	9,0690	386,44	3,7910	12,8601	10,426
345	943,43	9,2550	404,11	3,9643	13,2193	10,718
350	911,16	8,9385	398,54	3,9097	12,8482	10,417
355	911,41	8,9409	405,51	3,9781	12,9190	10,474

B.14. Ensaio 2 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.14. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	911,52	8,9420	435,11	4,2684	13,2104	10,710
5	963,79	9,4548	404,73	3,9704	13,4253	10,885
10	875,56	8,5892	388,22	3,8084	12,3976	10,051
15	831,89	8,1608	371,87	3,6480	11,8088	9,574
20	832,80	8,1698	362,11	3,5523	11,7221	9,504
25	689,75	6,7664	372,10	3,6503	10,4167	8,445
30	672,38	6,5960	350,38	3,4372	10,0332	8,134
35	734,57	7,2061	356,86	3,5008	10,7069	8,681
40	751,73	7,3745	334,95	3,2859	10,6604	8,643
45	921,80	9,0429	356,20	3,4943	12,5372	10,165
50	876,65	8,5999	357,09	3,5031	12,1030	9,813
55	850,02	8,3387	357,69	3,5089	11,8476	9,606
60	905,31	8,8811	363,63	3,5672	12,4483	10,093
65	903,71	8,8654	363,84	3,5693	12,4347	10,082
70	818,12	8,0258	319,18	3,1312	11,1570	9,046
75	828,89	8,1314	321,31	3,1521	11,2834	9,148
80	881,60	8,6485	320,28	3,1419	11,7904	9,559
85	865,90	8,4945	331,05	3,2476	11,7420	9,520
90	799,90	7,8470	322,95	3,1681	11,0150	8,931
95	780,87	7,6603	331,71	3,2541	10,9144	8,849
100	658,75	6,4623	302,63	2,9688	9,4311	7,646
105	848,79	8,3266	339,71	3,3326	11,6592	9,453
110	806,46	7,9114	305,55	2,9974	10,9087	8,844
115	651,01	6,3864	319,58	3,1351	9,5215	7,720
120	556,88	5,4630	320,92	3,1482	8,6112	6,982
125	641,83	6,2964	309,20	3,0333	9,3296	7,564
130	572,79	5,6191	306,51	3,0069	8,6259	6,994
135	566,79	5,5602	297,06	2,9142	8,4743	6,871
140	581,22	5,7018	298,38	2,9271	8,6289	6,996
145	725,67	7,1188	313,55	3,0759	10,1947	8,265
150	757,26	7,4287	345,91	3,3934	10,8221	8,774
155	682,78	6,6981	380,23	3,7301	10,4283	8,455
160	716,66	7,0304	351,39	3,4471	10,4775	8,495
165	789,48	7,7448	349,24	3,4260	11,1707	9,057
170	794,38	7,7929	351,50	3,4482	11,2411	9,114
175	772,16	7,5749	348,23	3,4161	10,9910	8,911

Tabela B.14. Dados completos do ensaio 2 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	764,83	7,5030	353,60	3,4688	10,9718	8,896
185	862,09	8,4571	344,90	3,3835	11,8406	9,600
190	836,32	8,2043	362,06	3,5518	11,7561	9,531
195	819,32	8,0375	354,21	3,4748	11,5123	9,334
200	763,70	7,4919	333,59	3,2725	10,7644	8,727
205	805,85	7,9054	315,33	3,0934	10,9988	8,917
210	724,42	7,1066	328,85	3,2260	10,3326	8,377
215	843,96	8,2792	356,09	3,4932	11,7724	9,545
220	785,92	7,7099	350,74	3,4408	11,1507	9,041
225	778,21	7,6342	341,02	3,3454	10,9796	8,902
230	706,12	6,9270	329,46	3,2320	10,1590	8,236
235	741,86	7,2776	321,24	3,1514	10,4290	8,455
240	717,38	7,0375	343,82	3,3729	10,4104	8,440
245	631,56	6,1956	363,78	3,5687	9,7644	7,917
250	637,93	6,2581	364,83	3,5790	9,8371	7,976
255	667,39	6,5471	371,34	3,6428	10,1900	8,262
260	952,65	9,3455	393,93	3,8645	13,2100	10,710
265	954,38	9,3625	394,07	3,8658	13,2283	10,725
270	954,16	9,3603	394,37	3,8688	13,2291	10,726
275	881,90	8,6514	339,30	3,3285	11,9799	9,713
280	799,04	7,8386	322,11	3,1599	10,9985	8,917
285	871,82	8,5526	346,90	3,4031	11,9558	9,693
290	742,65	7,2854	321,81	3,1570	10,4424	8,466
295	720,23	7,0655	321,14	3,1504	10,2159	8,283
300	687,16	6,7410	320,67	3,1458	9,8868	8,016
305	680,47	6,6754	290,35	2,8483	9,5238	7,721
310	770,35	7,5571	341,22	3,3474	10,9045	8,841
315	781,72	7,6687	331,96	3,2565	10,9252	8,858
320	846,38	8,3030	363,16	3,5626	11,8656	9,620
325	877,82	8,6114	363,21	3,5631	12,1745	9,871
330	903,88	8,8671	380,35	3,7312	12,5983	10,214
335	899,54	8,8245	384,79	3,7748	12,5993	10,215
340	925,54	9,0795	388,51	3,8113	12,8908	10,451
345	921,98	9,0446	395,03	3,8752	12,9197	10,475
350	878,60	8,6191	403,15	3,9549	12,5740	10,194
355	875,18	8,5855	411,14	4,0333	12,6188	10,231

B.15. Ensaio 3 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.15. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	1003,46	9,8439	475,04	4,6601	14,5041	11,759
5	909,06	8,9179	458,34	4,4963	13,4142	10,876
10	914,85	8,9747	453,47	4,4485	13,4231	10,883
15	826,24	8,1054	421,17	4,1317	12,2371	9,921
20	760,78	7,4633	395,79	3,8827	11,3459	9,199
25	732,51	7,1859	355,29	3,4854	10,6713	8,652
30	771,92	7,5725	371,50	3,6444	11,2169	9,094
35	797,22	7,8207	388,22	3,8084	11,6291	9,428
40	831,91	8,1610	407,47	3,9973	12,1582	9,857
45	748,60	7,3438	411,48	4,0366	11,3804	9,227
50	798,03	7,8287	413,40	4,0555	11,8843	9,635
55	804,53	7,8924	401,03	3,9341	11,8265	9,588
60	945,40	9,2744	421,93	4,1391	13,4135	10,875
65	986,84	9,6809	439,36	4,3101	13,9910	11,343
70	1015,91	9,9661	440,68	4,3231	14,2892	11,585
75	1009,65	9,9047	447,34	4,3884	14,2931	11,588
80	1059,29	10,3916	411,18	4,0337	14,4253	11,695
85	1058,96	10,3884	440,58	4,3221	14,7105	11,927
90	1048,49	10,2857	426,11	4,1801	14,4658	11,728
95	875,23	8,5860	414,03	4,0616	12,6476	10,254
100	916,36	8,9895	436,14	4,2785	13,2681	10,757
105	890,78	8,7386	406,67	3,9894	12,7280	10,319
110	928,10	9,1047	412,07	4,0424	13,1472	10,659
115	937,90	9,2008	406,84	3,9911	13,1918	10,695
120	868,94	8,5243	407,07	3,9934	12,5176	10,149
125	888,11	8,7124	408,07	4,0032	12,7156	10,309
130	832,54	8,1672	416,72	4,0880	12,2552	9,936
135	899,72	8,8263	430,95	4,2276	13,0539	10,584
140	931,58	9,1388	436,72	4,2842	13,4230	10,883
145	1024,80	10,0533	450,44	4,4188	14,4721	11,733
150	1022,92	10,0348	461,45	4,5268	14,5616	11,806
155	1099,10	10,7822	455,68	4,4702	15,2524	12,366
160	1072,75	10,5237	456,60	4,4792	15,0029	12,164
165	931,12	9,1343	437,24	4,2893	13,4237	10,883
170	978,36	9,5977	441,57	4,3318	13,9295	11,294
175	942,50	9,2459	447,95	4,3944	13,6403	11,059

Tabela B.15. Dados completos do ensaio 3 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	950,15	9,3210	442,08	4,3368	13,6579	11,073
185	932,77	9,1505	417,73	4,0979	13,2484	10,741
190	869,40	8,5288	439,38	4,3103	12,8391	10,409
195	909,05	8,9178	445,65	4,3718	13,2896	10,775
200	865,26	8,4882	436,57	4,2828	12,7710	10,354
205	899,24	8,8215	428,14	4,2001	13,0216	10,557
210	841,87	8,2587	420,80	4,1280	12,3866	10,043
215	837,20	8,2129	415,35	4,0746	12,2874	9,962
220	761,31	7,4685	379,22	3,7201	11,1885	9,071
225	736,38	7,2239	385,55	3,7822	11,0061	8,923
230	737,81	7,2379	385,42	3,7810	11,0188	8,934
235	735,26	7,2129	376,93	3,6977	10,9107	8,846
240	746,93	7,3274	388,87	3,8148	11,1422	9,034
245	892,81	8,7585	436,17	4,2788	13,0372	10,570
250	781,91	7,6705	382,40	3,7513	11,4217	9,260
255	857,08	8,4080	384,41	3,7711	12,1791	9,874
260	857,40	8,4111	409,48	4,0170	12,4282	10,076
265	828,76	8,1301	382,34	3,7508	11,8809	9,633
270	883,49	8,6670	438,09	4,2977	12,9648	10,511
275	888,67	8,7179	438,61	4,3028	13,0207	10,557
280	695,91	6,8269	367,71	3,6072	10,4342	8,460
285	672,15	6,5938	359,83	3,5299	10,1238	8,208
290	693,38	6,8021	356,97	3,5019	10,3040	8,354
295	746,29	7,3211	361,92	3,5504	10,8716	8,814
300	682,18	6,6922	359,09	3,5227	10,2148	8,282
305	686,38	6,7334	354,78	3,4804	10,2137	8,281
310	781,48	7,6663	384,58	3,7727	11,4390	9,274
315	812,28	7,9685	371,16	3,6411	11,6096	9,413
320	839,69	8,2374	371,61	3,6455	11,8829	9,634
325	870,40	8,5386	372,21	3,6514	12,1900	9,883
330	894,14	8,7715	377,70	3,7052	12,4767	10,116
335	981,07	9,6243	385,38	3,7806	13,4049	10,868
340	981,16	9,6252	391,57	3,8413	13,4665	10,918
345	987,57	9,6881	388,41	3,8103	13,4984	10,944
350	992,97	9,7410	407,72	3,9997	13,7408	11,140
355	1001,46	9,8243	410,19	4,0240	13,8483	11,228

B.16. Ensaio 4 — protótipo com 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm

Tabela B.16. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm.

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
0	935,02	9,1725	435,37	4,2710	13,4435	10,899
5	891,39	8,7445	436,54	4,2825	13,0270	10,562
10	865,85	8,4940	450,16	4,4161	12,9101	10,467
15	794,61	7,7951	440,16	4,3180	12,1130	9,821
20	776,16	7,6141	431,48	4,2328	11,8469	9,605
25	859,25	8,4292	425,15	4,1707	12,5998	10,215
30	722,00	7,0828	342,97	3,3645	10,4473	8,470
35	778,28	7,6349	407,85	4,0010	11,6359	9,434
40	857,04	8,4076	430,88	4,2269	12,6345	10,244
45	851,64	8,3546	434,50	4,2624	12,6170	10,229
50	848,77	8,3264	422,36	4,1434	12,4698	10,110
55	863,68	8,4727	426,31	4,1821	12,6548	10,260
60	967,07	9,4870	475,18	4,6615	14,1485	11,471
65	959,84	9,4160	450,21	4,4166	13,8327	11,215
70	953,80	9,3568	454,05	4,4542	13,8110	11,197
75	1033,14	10,1351	449,82	4,4127	14,5479	11,795
80	1065,15	10,4491	470,86	4,6191	15,0682	12,217
85	1054,42	10,3439	466,32	4,5746	14,9184	12,095
90	1016,74	9,9742	461,05	4,5229	14,4971	11,754
95	981,90	9,6324	453,56	4,4494	14,0819	11,417
100	910,19	8,9290	419,55	4,1158	13,0448	10,576
105	964,19	9,4587	434,43	4,2618	13,7205	11,124
110	867,16	8,5068	371,80	3,6474	12,1542	9,854
115	779,94	7,6512	350,24	3,4359	11,0871	8,989
120	940,98	9,2310	406,90	3,9917	13,2227	10,720
125	900,13	8,8303	387,53	3,8017	12,6320	10,242
130	705,36	6,9196	348,83	3,4220	10,3416	8,385
135	767,75	7,5316	349,59	3,4295	10,9611	8,887
140	815,19	7,9970	380,28	3,7305	11,7275	9,508
145	901,91	8,8477	390,59	3,8317	12,6794	10,280
150	967,62	9,4924	416,22	4,0831	13,5755	11,006
155	980,05	9,6143	420,61	4,1262	13,7406	11,140
160	1043,06	10,2324	418,57	4,1062	14,3386	11,625
165	1048,42	10,2850	425,09	4,1701	14,4551	11,720
170	1121,72	11,0041	449,17	4,4064	15,4105	12,494
175	1110,01	10,8892	425,44	4,1736	15,0628	12,212

Tabela B.16. Dados completos do ensaio 4 realizado com o protótipo de 100% de preenchimento e deslocamento de 115 mm (continuação).

Posição (°)	Massa S1 (g)	Força S1 (N)	Massa S2 (g)	Força S2 (N)	Força total (N)	Pressão eq. (kPa)
180	1080,33	10,5980	439,10	4,3076	14,9056	12,085
185	1064,36	10,4414	421,80	4,1379	14,5793	11,820
190	1025,86	10,0637	403,15	3,9549	14,0185	11,366
195	1007,54	9,8840	400,30	3,9269	13,8109	11,197
200	996,38	9,7745	389,81	3,8240	13,5984	11,025
205	938,09	9,2027	395,63	3,8811	13,0838	10,608
210	838,10	8,2218	391,39	3,8395	12,0613	9,779
215	774,23	7,5952	373,14	3,6605	11,2558	9,126
220	899,22	8,8213	419,04	4,1108	12,9321	10,485
225	886,84	8,6999	407,98	4,0023	12,7022	10,298
230	986,22	9,6748	438,49	4,3016	13,9764	11,332
235	1020,00	10,0062	436,15	4,2786	14,2848	11,582
240	922,24	9,0472	428,64	4,2050	13,2522	10,744
245	995,54	9,7662	450,86	4,4229	14,1891	11,504
250	1033,16	10,1353	472,25	4,6328	14,7682	11,973
255	1001,60	9,8257	457,55	4,4886	14,3143	11,605
260	1066,72	10,4645	476,06	4,6701	15,1346	12,271
265	924,01	9,0645	434,13	4,2588	13,3233	10,802
270	997,79	9,7883	459,26	4,5053	14,2936	11,589
275	970,94	9,5249	444,92	4,3647	13,8896	11,261
280	874,81	8,5819	417,61	4,0968	12,6788	10,279
285	864,04	8,4762	414,97	4,0709	12,5471	10,173
290	943,43	9,2550	420,36	4,1237	13,3787	10,847
295	936,90	9,1910	416,13	4,0822	13,2731	10,761
300	942,68	9,2477	417,84	4,0990	13,3467	10,821
305	927,74	9,1011	390,30	3,8288	12,9298	10,483
310	882,90	8,6612	391,15	3,8372	12,4984	10,133
315	974,35	9,5584	409,27	4,0149	13,5733	11,005
320	1001,41	9,8238	422,26	4,1424	13,9663	11,323
325	1042,07	10,2227	444,58	4,3613	14,5839	11,824
330	1054,22	10,3419	435,07	4,2680	14,6099	11,845
335	1091,92	10,7117	451,66	4,4308	15,1425	12,277
340	1120,00	10,9872	459,52	4,5079	15,4951	12,563
345	1149,10	11,2727	466,71	4,5784	15,8511	12,851
350	1161,07	11,3901	448,87	4,4034	15,7935	12,805
355	1121,93	11,0061	456,71	4,4803	15,4864	12,556

Apêndice C

Dados Complementares dos Ensaio *SpiRobs*

Este apêndice reúne os dados de suporte utilizados para construir os gráficos de média, desvio-padrão e pressão média equivalente apresentados no Capítulo 4. Os valores resultam de quatro repetições por condição experimental, com 72 posições angulares por repetição e incremento de 5°. A pressão média equivalente foi calculada com a área de referência corrigida de 1233,41 mm².

Condição	Preench. (%)	Desloc. (mm)	$\bar{F}$ global (N)	DP angular de $\bar{F}$ (N)	DP médio entre rep. (N)	$\bar{P}_{eq}$ global (kPa)	DP angular de $\bar{P}_{eq}$ (kPa)	CV médio (%)
20% – 105 mm	20	105	8,787	1,193	1,399	7,124	0,968	16,406
20% – 115 mm	20	115	11,424	1,057	1,196	9,262	0,857	10,946
100% – 105 mm	100	105	11,629	1,274	1,470	9,429	1,033	12,915
100% – 115 mm	100	115	12,384	0,973	1,386	10,040	0,789	11,410

Tabela C.1. Síntese dos indicadores globais utilizados na comparação das quatro condições experimentais da garra *SpiRobs*.

Na Tabela C.1, o desvio-padrão angular do perfil médio corresponde à dispersão das 72 forças médias angulares em torno da força média global de cada condição. Por sua vez, o desvio-padrão médio entre repetições corresponde à média dos desvios-padrão amostrais calculados, em cada posição angular, a partir das quatro repetições. Assim, a primeira métrica descreve a não uniformidade circunferencial do perfil médio, enquanto a segunda descreve a variabilidade experimental entre repetições.

Nas Tabelas C.2 e C.3 apresentam-se, para cada ângulo, a força média $\bar{F}$, o desvio-padrão da força DP_F , a pressão média equivalente $\bar{P}_{eq}$ e o respectivo desvio-padrão $DP_{P,eq}$. Estes valores permitem reproduzir os gráficos de força média $\pm$ desvio-padrão e de pressão média equivalente $\pm$ desvio-padrão.

Apêndice C. Dados Complementares dos Ensaios SpiRobs

Ângulo	20% – 105 mm				20% – 115 mm				100% – 105 mm				100% – 115 mm			
(°)	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$
0	10,19	0,39	8,26	0,32	13,03	1,38	10,57	1,12	13,63	0,64	11,05	0,52	14,06	0,89	11,40	0,72
5	9,31	0,49	7,55	0,40	12,60	0,77	10,22	0,63	13,02	0,41	10,55	0,33	13,75	0,93	11,15	0,76
10	9,09	0,58	7,37	0,47	12,17	0,80	9,87	0,65	12,43	0,85	10,08	0,69	13,36	0,99	10,83	0,81
15	9,08	0,76	7,36	0,62	11,26	0,32	9,13	0,26	11,81	0,59	9,57	0,48	12,57	1,05	10,19	0,85
20	8,95	0,63	7,26	0,51	11,05	0,41	8,96	0,33	11,54	0,38	9,36	0,30	11,81	0,41	9,58	0,33
25	8,18	0,46	6,63	0,38	10,33	0,85	8,37	0,69	11,14	1,15	9,03	0,93	11,50	1,12	9,33	0,91
30	7,45	1,01	6,04	0,82	10,72	1,21	8,69	0,98	10,74	0,90	8,71	0,73	11,15	1,27	9,04	1,03
35	6,43	0,58	5,22	0,47	10,81	0,90	8,76	0,73	12,43	1,10	10,08	0,89	11,97	1,36	9,70	1,10
40	6,76	0,77	5,48	0,63	10,23	0,97	8,29	0,79	11,51	1,57	9,33	1,27	12,44	1,50	10,08	1,21
45	7,11	1,39	5,77	1,13	10,97	1,03	8,89	0,83	11,87	1,78	9,63	1,44	12,71	1,21	10,31	0,98
50	7,11	1,42	5,76	1,15	11,15	0,81	9,04	0,66	12,46	2,47	10,10	2,00	12,52	0,78	10,15	0,63
55	7,92	1,57	6,42	1,27	11,27	1,08	9,14	0,88	12,82	2,68	10,39	2,17	12,68	1,20	10,28	0,98
60	8,11	1,52	6,57	1,23	12,13	0,91	9,83	0,74	12,97	2,95	10,51	2,39	13,66	0,96	11,08	0,78
65	8,24	1,52	6,68	1,23	13,11	0,41	10,63	0,33	12,87	2,97	10,44	2,41	13,45	0,70	10,91	0,57
70	8,56	1,31	6,94	1,06	12,85	1,39	10,42	1,13	13,30	2,66	10,78	2,15	13,19	1,39	10,70	1,13
75	8,16	1,50	6,62	1,21	12,21	0,07	9,90	0,06	11,64	1,76	9,44	1,43	13,62	1,56	11,04	1,26
80	8,79	1,65	7,12	1,33	12,72	0,97	10,31	0,78	11,46	1,48	9,29	1,20	13,90	1,44	11,27	1,17
85	8,89	1,36	7,21	1,10	12,94	0,91	10,49	0,73	11,39	2,80	9,23	2,27	13,40	1,65	10,87	1,33
90	8,04	1,60	6,52	1,30	13,18	0,57	10,69	0,46	11,98	2,17	9,72	1,76	12,97	1,78	10,52	1,44
95	8,09	0,68	6,56	0,55	9,83	0,64	7,97	0,52	11,39	1,45	9,24	1,18	12,04	1,65	9,76	1,34
100	8,28	1,96	6,71	1,59	10,58	1,29	8,57	1,05	10,81	1,38	8,76	1,12	11,85	1,76	9,61	1,43
105	8,12	1,22	6,58	0,99	12,31	0,83	9,98	0,67	10,37	2,10	8,41	1,70	12,19	1,33	9,88	1,07
110	7,99	1,97	6,48	1,59	11,65	0,36	9,44	0,29	10,84	2,57	8,79	2,08	11,89	0,98	9,64	0,79
115	7,38	1,81	5,98	1,47	10,48	2,08	8,49	1,68	7,67	2,13	6,22	1,73	11,36	1,52	9,21	1,23
120	7,53	1,88	6,10	1,52	9,80	1,64	7,95	1,33	9,44	0,97	7,66	0,79	11,21	2,08	9,09	1,69
125	5,78	1,69	4,69	1,37	10,44	1,76	8,47	1,43	10,41	1,14	8,44	0,93	11,58	1,58	9,39	1,28
130	6,50	3,49	5,27	2,83	8,73	3,86	7,08	3,13	10,69	1,19	8,67	0,96	9,41	2,48	7,63	2,01
135	7,65	2,01	6,20	1,63	9,63	2,96	7,81	2,40	10,95	1,66	8,87	1,34	9,52	3,22	7,72	2,61
140	9,01	2,18	7,31	1,77	10,81	1,14	8,76	0,93	11,92	1,21	9,66	0,98	10,93	2,09	8,86	1,69
145	8,93	1,32	7,24	1,07	11,26	1,32	9,13	1,07	12,37	1,41	10,03	1,14	11,77	2,22	9,54	1,80
150	9,28	1,11	7,52	0,90	11,09	2,14	8,99	1,73	12,68	1,54	10,28	1,25	12,12	2,34	9,83	1,90
155	9,20	1,65	7,46	1,34	11,20	2,11	9,08	1,71	13,13	0,94	10,65	0,76	12,08	2,93	9,79	2,37
160	9,83	1,74	7,97	1,41	11,98	1,45	9,71	1,17	13,08	1,19	10,61	0,96	13,16	2,01	10,67	1,63
165	10,17	1,48	8,25	1,20	12,11	1,35	9,82	1,09	13,45	0,89	10,91	0,72	13,12	1,39	10,63	1,12
170	9,46	0,82	7,67	0,66	12,58	1,07	10,20	0,87	13,40	1,22	10,87	0,99	13,12	1,91	10,64	1,55
175	10,19	0,67	8,26	0,54	12,72	1,55	10,31	1,26	13,83	1,14	11,21	0,92	13,04	1,73	10,57	1,40

Tabela C.2. Perfil médio por ângulo para as quatro condições experimentais, de 0° a 175°.

Ângulo	20% – 105 mm				20% – 115 mm				100% – 105 mm				100% – 115 mm			
(°)	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$	$\bar{F}$	DP_F	$\bar{P}_{eq}$	$DP_{P,eq}$
180	9,66	0,68	7,83	0,55	12,37	1,13	10,03	0,92	13,67	0,83	11,08	0,67	12,69	1,91	10,29	1,55
185	9,71	0,89	7,87	0,72	12,47	1,39	10,11	1,12	13,30	0,84	10,78	0,68	13,01	1,20	10,55	0,97
190	9,57	1,48	7,76	1,20	11,95	1,49	9,69	1,21	13,04	0,71	10,58	0,58	12,84	0,93	10,41	0,75
195	9,05	1,02	7,34	0,82	12,07	1,35	9,79	1,10	12,60	0,40	10,22	0,33	12,79	1,00	10,37	0,81
200	8,44	0,57	6,84	0,46	11,87	0,35	9,63	0,28	12,42	0,68	10,07	0,55	12,08	1,33	9,79	1,08
205	8,31	0,97	6,74	0,79	11,82	0,50	9,58	0,40	11,53	1,21	9,35	0,98	12,08	1,13	9,79	0,91
210	8,21	1,09	6,66	0,89	11,47	1,19	9,30	0,96	11,61	1,60	9,41	1,30	11,60	0,90	9,40	0,73
215	7,66	0,57	6,21	0,46	10,40	1,68	8,43	1,36	10,52	1,37	8,53	1,11	11,82	0,43	9,58	0,35
220	7,79	0,69	6,31	0,56	10,60	1,97	8,60	1,59	10,10	1,94	8,19	1,57	11,82	0,84	9,59	0,68
225	7,70	2,07	6,25	1,67	11,33	1,55	9,19	1,25	10,01	2,02	8,12	1,64	11,59	0,81	9,40	0,65
230	8,07	2,38	6,54	1,93	10,94	0,36	8,87	0,29	10,60	1,90	8,59	1,54	11,90	1,68	9,65	1,36
235	9,08	1,24	7,37	1,01	11,19	0,53	9,08	0,43	10,65	1,97	8,63	1,59	12,01	1,74	9,74	1,41
240	9,60	1,20	7,79	0,98	11,45	0,69	9,29	0,56	10,77	1,51	8,74	1,23	11,85	1,30	9,61	1,06
245	9,78	0,94	7,93	0,76	11,31	0,73	9,17	0,60	11,56	1,48	9,37	1,20	12,35	1,87	10,02	1,52
250	8,85	0,64	7,18	0,52	11,62	0,71	9,42	0,58	10,86	1,47	8,80	1,19	12,09	2,06	9,80	1,67
255	10,14	0,90	8,22	0,73	11,85	0,64	9,60	0,52	11,15	1,51	9,04	1,23	12,26	1,69	9,94	1,37
260	9,52	1,35	7,72	1,10	12,11	0,55	9,81	0,44	11,10	1,40	9,00	1,13	13,58	1,14	11,01	0,92
265	10,20	1,10	8,27	0,89	12,03	0,79	9,75	0,64	11,27	1,07	9,13	0,87	13,01	0,77	10,55	0,63
270	9,52	1,12	7,72	0,91	12,33	0,51	10,00	0,41	11,67	1,54	9,46	1,25	13,54	0,58	10,97	0,47
275	9,96	2,70	8,08	2,19	11,34	0,66	9,19	0,53	10,35	1,76	8,39	1,42	13,15	0,86	10,66	0,70
280	8,76	1,79	7,11	1,45	12,42	0,77	10,07	0,63	10,12	1,74	8,20	1,41	11,73	1,19	9,51	0,97
285	8,64	1,25	7,00	1,01	11,17	1,24	9,05	1,01	9,88	2,16	8,01	1,75	11,46	1,05	9,29	0,85
290	8,98	2,46	7,28	1,99	12,01	0,59	9,73	0,48	9,54	1,61	7,73	1,31	11,63	1,51	9,43	1,22
295	8,43	1,84	6,83	1,50	10,97	1,24	8,89	1,00	8,92	1,71	7,24	1,38	11,54	1,33	9,36	1,07
300	9,23	1,49	7,48	1,21	11,02	1,38	8,94	1,12	9,80	1,17	7,94	0,95	11,29	1,59	9,16	1,29
305	6,93	2,13	5,62	1,72	9,68	3,44	7,85	2,79	10,28	0,64	8,34	0,52	10,98	1,48	8,90	1,20
310	7,20	2,94	5,83	2,38	7,82	3,07	6,34	2,49	10,71	1,30	8,69	1,05	11,47	0,73	9,30	0,59
315	8,57	1,89	6,95	1,53	9,43	1,51	7,65	1,23	11,35	0,83	9,20	0,68	11,57	1,46	9,38	1,18
320	9,90	1,46	8,03	1,19	10,06	1,37	8,16	1,11	11,68	1,71	9,47	1,39	12,15	1,30	9,85	1,06
325	10,09	1,22	8,18	0,99	11,50	1,38	9,32	1,12	12,02	1,57	9,74	1,28	12,96	1,13	10,50	0,92
330	10,21	1,63	8,28	1,32	11,26	1,03	9,13	0,84	12,39	1,34	10,04	1,09	13,18	0,98	10,68	0,80
335	10,70	1,49	8,67	1,20	11,45	1,02	9,29	0,83	12,75	1,52	10,34	1,23	13,49	1,15	10,94	0,94
340	10,95	1,78	8,88	1,44	11,74	1,79	9,52	1,46	12,74	1,51	10,33	1,23	13,68	1,24	11,09	1,01
345	11,02	1,89	8,94	1,53	12,65	1,07	10,26	0,87	12,56	1,91	10,18	1,55	13,87	1,34	11,25	1,09
350	11,32	1,84	9,18	1,49	12,54	1,42	10,17	1,15	12,69	1,27	10,29	1,03	13,74	1,46	11,14	1,18
355	11,19	1,85	9,07	1,50	12,37	1,70	10,03	1,38	13,68	1,23	11,09	1,00	13,72	1,29	11,12	1,05

Tabela C.3. Perfil médio por ângulo para as quatro condições experimentais, de 180° a 355°.

O ficheiro digital `tratamento_dados_spirobs_4_casos.xlsx` contém os dados organizados por repetição, os cálculos por ângulo, os indicadores estatísticos e as folhas utilizadas para gerar os gráficos apresentados no Capítulo 4.

C.1. Posições do Sensor 2 Dentro do Limite Superior Calibrado

A Tabela C.4 identifica os 14 registos cuja massa estimada do Sensor 2 não ultrapassa 222,95 g. As restantes posições de cada repetição, entre 0° e 355° em passos de 5°, estão acima desse limite e foram sinalizadas na análise da Secção 4.5.5. A classificação usa a massa estimada tabulada e o limite superior de calibração; não demonstra exatidão das posições classificadas dentro da gama.

Tabela C.4. Consulta das posições que não ultrapassam o limite de calibração superior do Sensor 2.

Condição	Repetição	Ângulos [°]	Quantidade
20% – 105 mm	1	Nenhuma	0
20% – 105 mm	2	130, 310	2
20% – 105 mm	3	40, 50, 55, 70, 125	5
20% – 105 mm	4	125, 305	2
20% – 115 mm	1	Nenhuma	0
20% – 115 mm	2	130, 310	2
20% – 115 mm	3	305	1
20% – 115 mm	4	Nenhuma	0
100% – 105 mm	1	115	1
100% – 105 mm	2	115	1
100% – 105 mm	3	Nenhuma	0
100% – 105 mm	4	Nenhuma	0
100% – 115 mm	1	Nenhuma	0
100% – 115 mm	2	Nenhuma	0
100% – 115 mm	3	Nenhuma	0
100% – 115 mm	4	Nenhuma	0

C.2. Médias e Extremos por Repetição

A Tabela C.5 apresenta as médias dos quatro varrimentos de cada condição, calculadas a partir das 72 posições de cada repetição. O desvio-padrão amostral entre estas quatro médias descreve a dispersão da média global entre varrimentos. É diferente do desvio-padrão angular do perfil médio e da média dos desvios-padrão por ângulo, definidos na Tabela C.1. Não representa a incerteza total da medição nem um intervalo de confiança.

Tabela C.5. Médias por varrimento e desvio-padrão amostral entre as quatro médias, em newtons.

Condição	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	DP [N]
20% – 105 mm	7,9002	8,1030	9,7947	9,3518	0,9289
20% – 115 mm	11,5354	11,4156	10,7221	12,0231	0,5367
100% – 105 mm	11,0550	12,0859	12,9185	10,4583	1,0911
100% – 115 mm	12,2477	11,1636	12,6379	13,4859	0,9638

Tabela C.6. Extremos da força resultante medida em cada repetição. Os valores mantêm a precisão dos registos tabulados.

Condição	Rep.	Máx. [N]	Ângulo [°]	Mín. [N]	Ângulo [°]
20% – 105 mm	1	11,6833	275	4,4686	130
20% – 105 mm	2	10,3765	175	2,6424	130
20% – 105 mm	3	13,7274	350	5,2803	125
20% – 105 mm	4	11,9784	355	4,0126	305
20% – 115 mm	1	14,4629	0	6,9461	310
20% – 115 mm	2	13,6979	70	3,9575	310
20% – 115 mm	3	13,7284	90	4,5868	305
20% – 115 mm	4	14,6733	350	8,7065	215
100% – 105 mm	1	14,1668	0	5,9334	115
100% – 105 mm	2	14,5782	345	5,8122	115
100% – 105 mm	3	17,0205	70	9,6268	220
100% – 105 mm	4	14,2125	0	7,1459	225
100% – 115 mm	1	15,1209	5	5,5933	135
100% – 115 mm	2	13,4253	5	8,4743	135
100% – 115 mm	3	15,2524	155	10,1238	285
100% – 115 mm	4	15,8511	345	10,3416	130

Os ângulos resultam de uma grelha de 5° e do posicionamento manual; não têm precisão superior à permitida pelo protocolo. Máximos de varrimentos individuais e máximos de um perfil médio são estatísticas diferentes, pelo que os seus ângulos não têm de coincidir. A interpretação dos setores e dos arcos circulares que contêm os extremos encontra-se na Secção 4.5.4.

Apêndice D

Código Arduino Inicial para Aquisição Manual de Dados

Neste apêndice apresenta-se a versão inicial do código desenvolvido em Arduino IDE para controlo da garra e aquisição manual dos dados experimentais. Esta versão foi utilizada nos primeiros ensaios de mapeamento polar, nos quais o utilizador definia a posição angular, acionava a recolha da amostra e registava manualmente os valores médios apresentados no monitor série.

O código calcula a tara de cada sensor a partir de 50 leituras iniciais. Após o acionamento do botão de amostra, recolhe 200 leituras durante aproximadamente 2 s, subtrai a tara e coloca a zero as entradas inferiores a 25 contagens. Converte cada leitura tratada em massa equivalente e calcula a média das 200 massas, a partir da qual obtém a força individual de cada sensor e a soma das forças indicadas.

Listing D.1. Código Arduino inicial utilizado para aquisição manual dos dados experimentais.

```
1 // --- PINOS DO MOTOR 1 (Garra - Esquerda) ---
2 #define STEP_PIN 18
3 #define DIR_PIN 19
4
5 // --- PINOS DO MOTOR 2 (Garra - Direita) ---
6 #define STEP2_PIN 26
7 #define DIR2_PIN 27
8
9 // --- PINOS DOS 2 SENSORES ---
10 #define FSR1_PIN 34 // Sensor 1 (Dedo Esquerdo)
11 #define FSR2_PIN 35 // Sensor 2 (Dedo Direito)
12
13 // --- PINOS DOS 3 BOTÕES FÍSICOS ---
14 #define BTN_DIREITA 22 // Botão para fechar a garra (M1 e M2 em sentidos opostos)
15 #define BTN_ESQUERDA 23 // Botão para abrir a garra (M1 e M2 em sentidos opostos)
16 #define BTN_AMOSTRA 21 // Botão para extrair a amostra de 2 segundos
17
18 const int velocidadePulsos = 150;
19
20 // Variáveis para o Gráfico e Sensores
21 bool mostrarGrafico = false;
22 unsigned long tempoAnterior = 0;
```

```
23 const int intervaloAtualizacao = 100;
24
25 // Taras independentes para cada sensor
26 int taraSensor1 = 0;
27 int taraSensor2 = 0;
28
29 // Variáveis para Controlo Manual e Posição
30 bool motorEmMovimento = false;
31
32 // --- NOVA VARIÁVEL DE POSIÇÃO (ÂNGULO) ---
33 int anguloAtual = 0;
34 int incrementoAngulo = 10; // Variável agora pode ser mudada pelas teclas 1 e 5
35
36 void setup() {
37     // Inicializa o Motor 1
38     pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
39     pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
40     digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
41     digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
42
43     // Inicializa o Motor 2
44     pinMode(STEP2_PIN, OUTPUT);
45     pinMode(DIR2_PIN, OUTPUT);
46     digitalWrite(STEP2_PIN, LOW);
47     digitalWrite(DIR2_PIN, LOW);
48
49     // Ativa as resistências internas para os 3 botões
50     pinMode(BTN_DIREITA, INPUT_PULLUP);
51     pinMode(BTN_ESQUERDA, INPUT_PULLUP);
52     pinMode(BTN_AMOSTRA, INPUT_PULLUP);
53
54     Serial.begin(115200);
55     delay(1000);
56
57     Serial.println("=====");
58     Serial.println(" PAINEL DE CONTROLO SPIROBS (DUAL-MOTOR & DUAL-SENSOR) ");
59     Serial.println("=====");
60     Serial.println("A calibrar as taras iniciais (Nao toque)...");
61
62     long soma1 = 0;
63     long soma2 = 0;
64     for(int i = 0; i < 50; i++) {
65         soma1 += analogRead(FSR1_PIN);
66         soma2 += analogRead(FSR2_PIN);
67         delay(10);
68     }
69     taraSensor1 = soma1 / 50;
70     taraSensor2 = soma2 / 50;
71
72     Serial.print("Zero Sensor 1 (Pino 34): "); Serial.println(taraSensor1);
73     Serial.print("Zero Sensor 2 (Pino 35): "); Serial.println(taraSensor2);
74     Serial.println("-----");
75     Serial.println(">>> [BOTAO 1 - Pino 22] Fechar Garra");
76     Serial.println(">>> [BOTAO 2 - Pino 23] Abrir Garra");
77     Serial.println(">>> [BOTAO 3 - Pino 21] Tirar Amostra Dupla (2s)");
78     Serial.println(">>> [TECLA '5']          Medir de 5 em 5 graus");
79     Serial.println(">>> [TECLA '1']          Medir de 10 em 10 graus");
80     Serial.println(">>> [TECLA 'R']          Resetar o angulo para 0 graus");
81     Serial.println(">>> [TECLA 'P']          Definir angulo especifico (Ex: P45)");
```



```

82   Serial.println("-----");
83 }
84
85 // -----
86 // FUNÇÃO DE MOVIMENTO SINCRONIZADO
87 // -----
88 void darPassoSincronizado(bool direcaoM1, bool direcaoM2) {
89     digitalWrite(DIR_PIN, direcaoM1);
90     digitalWrite(DIR2_PIN, direcaoM2);
91
92     digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
93     digitalWrite(STEP2_PIN, HIGH);
94     delayMicroseconds(velocidadePulsos);
95
96     digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
97     digitalWrite(STEP2_PIN, LOW);
98     delayMicroseconds(velocidadePulsos);
99 }
100
101 // -----
102 // FUNÇÕES DE CÁLCULO INDEPENDENTES PARA CADA SENSOR
103 // -----
104 float calcularGramasSensor1(int leitura) {
105     if (leitura <= 0) return 0.0;
106     float gramas = (0.00029079127 * leitura * leitura) + (0.45285940 * leitura) +
107         44.540846;
108     if (gramas < 0) gramas = 0.0;
109     return gramas;
110 }
111 // --- NOVA EQUAÇÃO DO SENSOR 2 APLICADA AQUI ---
112 float calcularGramasSensor2(int leitura) {
113     if (leitura <= 0) return 0.0;
114     float gramas = (0.0000592 * leitura * leitura) - (0.0576 * leitura) + 68.9;
115     if (gramas < 0) gramas = 0.0;
116     return gramas;
117 }
118 // -----
119
120 void loop() {
121     // -----
122     // 1. LER OS BOTÕES FÍSICOS DO MOTOR
123     // -----
124     if (digitalRead(BTN_DIREITA) == LOW) {
125         darPassoSincronizado(LOW, HIGH);
126         motorEmMovimento = false;
127     }
128     else if (digitalRead(BTN_ESQUERDA) == LOW) {
129         darPassoSincronizado(HIGH, LOW);
130         motorEmMovimento = false;
131     }
132
133     // -----
134     // 2. LER O BOTÃO DE AMOSTRA
135     // -----
136     else if (digitalRead(BTN_AMOSTRA) == LOW) {
137         motorEmMovimento = false;
138         mostrarGrafico = false;
139

```

```
140 Serial.print("\n>>> [A MEDIR POSICAO ");
141 Serial.print(anguloAtual);
142 Serial.println(" GRAUS] A analisar estabilidade (2 seg)...");
143
144 // Variáveis Sensor 1
145 float somaMassa1 = 0; float maxMassa1 = -1.0; float minMassa1 = 999999.0;
146
147 // Variáveis Sensor 2
148 float somaMassa2 = 0; float maxMassa2 = -1.0; float minMassa2 = 999999.0;
149
150 // Amostragem de 2 segundos
151 for(int i = 0; i < 200; i++) {
152     // Sensor 1
153     int lBruta1 = analogRead(FSR1_PIN);
154     int lReal1 = lBruta1 - taraSensor1;
155     if (lReal1 < 25) lReal1 = 0;
156     float m1 = calcularGramasSensor1(lReal1);
157     somaMassa1 += m1;
158     if (m1 > maxMassa1) maxMassa1 = m1;
159     if (m1 < minMassa1) minMassa1 = m1;
160
161     // Sensor 2
162     int lBruta2 = analogRead(FSR2_PIN);
163     int lReal2 = lBruta2 - taraSensor2;
164     if (lReal2 < 25) lReal2 = 0;
165     float m2 = calcularGramasSensor2(lReal2);
166     somaMassa2 += m2;
167     if (m2 > maxMassa2) maxMassa2 = m2;
168     if (m2 < minMassa2) minMassa2 = m2;
169
170     delay(10);
171 }
172
173 // Correções de vazios
174 if (minMassa1 == 999999.0) minMassa1 = 0.0; if (maxMassa1 == -1.0) maxMassa1 = 0.0;
175 if (minMassa2 == 999999.0) minMassa2 = 0.0; if (maxMassa2 == -1.0) maxMassa2 = 0.0;
176
177 // Cálculos Finais Sensor 1
178 float media1 = somaMassa1 / 200.0;
179 float forca1 = (media1 / 1000.0) * 9.81;
180 float var1 = maxMassa1 - minMassa1;
181
182 // Cálculos Finais Sensor 2
183 float media2 = somaMassa2 / 200.0;
184 float forca2 = (media2 / 1000.0) * 9.81;
185 float var2 = maxMassa2 - minMassa2;
186
187 // Força Total
188 float forcaTotal = forca1 + forca2;
189
190 // Impressão do Relatório
191 Serial.println("=====");
192 Serial.print("      RELATORIO DE PREENSAO - ");
193 Serial.print(anguloAtual);
194 Serial.println(" GRAUS      ");
195 Serial.println("=====");
196 Serial.println("--- SENSOR 1 (Pino 34) ---");
```

```

197 Serial.print("Massa Media: "); Serial.print(media1); Serial.println(" g");
198 Serial.print("Forca Media: "); Serial.print(forca1); Serial.println(" N");
199 Serial.print("Pico Maximo: "); Serial.print(maxMassa1); Serial.println(" g");
200 Serial.print("Pico Minimo: "); Serial.print(minMassa1); Serial.println(" g");
201 Serial.print("Variacao (ruído): "); Serial.print(var1); Serial.println(" g");
202 Serial.println("-----");
203 Serial.println("--- SENSOR 2 (Pino 35) ---");
204 Serial.print("Massa Media: "); Serial.print(media2); Serial.println(" g");
205 Serial.print("Forca Media: "); Serial.print(forca2); Serial.println(" N");
206 Serial.print("Pico Maximo: "); Serial.print(maxMassa2); Serial.println(" g");
207 Serial.print("Pico Minimo: "); Serial.print(minMassa2); Serial.println(" g");
208 Serial.print("Variacao (ruído): "); Serial.print(var2); Serial.println(" g");
209 Serial.println("=====");
210 Serial.print(">> FORCA TOTAL (S1 + S2): "); Serial.print(forcaTotal); Serial.
    println(" N");
211 Serial.println("=====");
212
213 // Prepara para a próxima medição somando o salto atual
214 anguloAtual += incrementoAngulo;
215 if (anguloAtual >= 360) {
216     anguloAtual = 0; // Volta a zero depois de dar a volta completa
217 }
218
219 Serial.print("\n[PROXIMA MEDICAO DEFINIDA PARA: ");
220 Serial.print(anguloAtual);
221 Serial.println(" GRAUS]");
222
223 delay(500);
224 }
225
226 // -----
227 // 3. COMANDOS DO TECLADO (Terminal)
228 // -----
229 if (Serial.available() > 0) {
230     char comando = Serial.read();
231
232     if (comando == 'c' || comando == 'C') {
233         long soma1 = 0; long soma2 = 0;
234         for(int i = 0; i < 50; i++) {
235             soma1 += analogRead(FSR1_PIN);
236             soma2 += analogRead(FSR2_PIN);
237             delay(10);
238         }
239         taraSensor1 = soma1 / 50;
240         taraSensor2 = soma2 / 50;
241         Serial.println("\n>>> NOVOS ZEROS DEFINIDOS PARA AMBOS OS SENSORES");
242     }
243     else if (comando == 'g' || comando == 'G') {
244         mostrarGrafico = !mostrarGrafico;
245     }
246     else if (comando == 'r' || comando == 'R') {
247         anguloAtual = 0;
248         Serial.println("\n=====");
249         Serial.println(">>> POSICAO RESETADA PARA 0 GRAUS <<<");
250         Serial.println("=====");
251     }
252     // --- FUNÇÕES DE SALTO (5 e 1) E POSIÇÃO MANUAL (P) ---
253     else if (comando == '5') {
254         incrementoAngulo = 5;

```

```
255     Serial.println("\n[CONFIGURACAO] O salto passou a ser de 5 em 5 graus.");
256 }
257 else if (comando == '1') {
258     incrementoAngulo = 10;
259     Serial.println("\n[CONFIGURACAO] O salto passou a ser de 10 em 10 graus.");
260 }
261 else if (comando == 'p' || comando == 'P') {
262     int novoAngulo = Serial.parseInt(); // Lê o número após a letra P
263     anguloAtual = novoAngulo;
264     Serial.print("\n>>> POSICAO PERSONALIZADA DEFINIDA PARA: ");
265     Serial.print(anguloAtual);
266     Serial.println(" GRAUS <<<");
267 }
268 }
269
270 // -----
271 // 4. GRÁFICO EM TEMPO REAL
272 // -----
273 if (mostrarGrafico && (millis() - tempoAnterior >= intervaloAtualizacao)) {
274     tempoAnterior = millis();
275
276     int lBruta1 = analogRead(FSR1_PIN);
277     int lReal1 = lBruta1 - taraSensor1;
278     if (lReal1 < 25) { lReal1 = 0; }
279
280     int lBruta2 = analogRead(FSR2_PIN);
281     int lReal2 = lBruta2 - taraSensor2;
282     if (lReal2 < 25) { lReal2 = 0; }
283
284     Serial.print("Sensor_1:");
285     Serial.print(calcularGramasSensor1(lReal1));
286     Serial.print(", Sensor_2:");
287     Serial.println(calcularGramasSensor2(lReal2));
288 }
289 }
```

Apêndice E

Código Arduino para Comunicação com a Interface Python

Neste apêndice apresenta-se a versão evoluída do código implementado no ESP32 para comunicação com a interface Python. Ao contrário da versão inicial, esta implementação foi preparada para enviar dados estruturados através da porta série, distinguindo mensagens de visualização em tempo real e mensagens de medição final.

O código permite controlar a atuação, seleccionar o tipo de sensor e executar medições sob pedido da interface ou do botão de amostra. A tara é calculada a partir de 50 leituras iniciais por sensor. Em cada medição, são recolhidas 200 leituras durante aproximadamente 2 s, com subtração da tara e aplicação do limiar de 25 contagens antes da conversão. O programa envia a média dos valores ADC corrigidos e calcula a força a partir da média das massas convertidas individualmente, enviando também a soma das forças e a pressão média equivalente. Embora a campanha final tenha utilizado apenas um motor, esta versão do código conserva variáveis e rotinas preparadas para uma eventual configuração futura com dois motores.

Listing E.1. Código Arduino desenvolvido para comunicação entre o ESP32 e a interface Python.

```
1 #define STEP_PIN 18
2 #define DIR_PIN 19
3
4 #define STEP2_PIN 26
5 #define DIR2_PIN 27
6
7 #define FSR1_PIN 34
8 #define FSR2_PIN 35
9
10 #define BTN_DIREITA 22
11 #define BTN_ESQUERDA 23
12 #define BTN_AMOSTRA 21
13
14 const int velocidadePulsos = 150;
15 const float AREA_CONTACTO = 0.00123341;
16
```

```
17 // ===== DISTÂNCIA DO CABO =====
18 const float RAI0_SPOOL_MM = 20.0;
19 const int PASSOS_MOTOR_VOLTA = 200;
20 const int MICROSTEPPING = 32;
21 const float PASSOS_POR_VOLTA = PASSOS_MOTOR_VOLTA * MICROSTEPPING;
22 const float MM_POR_PASSO = (2.0 * 3.14159265 * RAI0_SPOOL_MM) / PASSOS_POR_VOLTA;
23
24 long contadorPassosCabo = 0;
25 unsigned long ultimoTempoDist = 0;
26 unsigned long ultimoTempoPlot = 0;
27
28 int taraSensor1 = 0;
29 int taraSensor2 = 0;
30 int anguloAtual = 0;
31
32 int estadoMotorSerial = 0;
33 // 1 = fechar garra / puzar cabo / distância aumenta
34 // -1 = abrir garra / libertar cabo / distância diminui
35 // 0 = parado
36
37 bool movimentoDistanciaAtivo = false;
38 long alvoPassosCabo = 0;
39
40 int tipoSensor = 0;
41 // 0 = quadrado
42 // 1 = redondo
43
44 void setup() {
45     pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
46     pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
47
48     pinMode(STEP2_PIN, OUTPUT);
49     pinMode(DIR2_PIN, OUTPUT);
50
51     pinMode(BTN_DIREITA, INPUT_PULLUP);
52     pinMode(BTN_ESQUERDA, INPUT_PULLUP);
53     pinMode(BTN_AMOSTRA, INPUT_PULLUP);
54
55     Serial.begin(115200);
56     delay(1000);
57
58     long soma1 = 0;
59     long soma2 = 0;
60
61     for (int i = 0; i < 50; i++) {
62         soma1 += analogRead(FSR1_PIN);
63         soma2 += analogRead(FSR2_PIN);
64         delay(10);
65     }
66
67     taraSensor1 = soma1 / 50;
68     taraSensor2 = soma2 / 50;
69
70     Serial.println("SISTEMA_PRONTO");
71 }
72
73 float obterDistanciaCaboMM() {
74     return contadorPassosCabo * MM_POR_PASSO;
75 }
```

```
76
77 void enviarDistancia() {
78     Serial.print("DIST:");
79     Serial.println(obterDistanciaCaboMM(), 3);
80 }
81
82 void darPassoSincronizado(bool direcaoM1, bool direcaoM2, int sentidoCabo) {
83     digitalWrite(DIR_PIN, direcaoM1);
84     digitalWrite(DIR2_PIN, direcaoM2);
85
86     digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
87     digitalWrite(STEP2_PIN, HIGH);
88     delayMicroseconds(velocidadePulsos);
89
90     digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
91     digitalWrite(STEP2_PIN, LOW);
92     delayMicroseconds(velocidadePulsos);
93
94     contadorPassosCabo += sentidoCabo;
95
96     if (contadorPassosCabo < 0) {
97         contadorPassosCabo = 0;
98     }
99 }
100
101 void fecharGarraUmPasso() {
102     // FECHAR = PUXAR CABO = DISTÂNCIA AUMENTA
103     darPassoSincronizado(HIGH, LOW, 1);
104 }
105
106 void abrirGarraUmPasso() {
107     // ABRIR = LIBERTAR CABO = DISTÂNCIA DIMINUI
108     darPassoSincronizado(LOW, HIGH, -1);
109 }
110
111 float calcularGramasQuadradoSensor1(int leitura) {
112     if (leitura <= 0) return 0.0;
113
114     float gramas = (0.00029079127 * leitura * leitura)
115                   + (0.45285940 * leitura)
116                   + 44.540846;
117
118     return (gramas < 0) ? 0.0 : gramas;
119 }
120
121 float calcularGramasQuadradoSensor2(int leitura) {
122     if (leitura <= 0) return 0.0;
123
124     float gramas = (0.0000592 * leitura * leitura)
125                   - (0.0576 * leitura)
126                   + 68.9;
127
128     return (gramas < 0) ? 0.0 : gramas;
129 }
130
131 float calcularGramasRedondo(int leitura) {
132     if (leitura <= 0) return 0.0;
133
134     float gramas = (0.00018467041 * leitura * leitura)
```

```
135         - (0.20335822 * leitura)
136         + 149.56255;
137
138     return (gramas < 0) ? 0.0 : gramas;
139 }
140
141 float calcularGramas(int leitura, int sensorID) {
142     if (tipoSensor == 1) {
143         return calcularGramasRedondo(leitura);
144     }
145
146     if (sensorID == 1) {
147         return calcularGramasQuadradoSensor1(leitura);
148     }
149
150     return calcularGramasQuadradoSensor2(leitura);
151 }
152
153 void executarMedicao() {
154     float somaMassa1 = 0;
155     float somaMassa2 = 0;
156     long somaADC1 = 0;
157     long somaADC2 = 0;
158
159     for (int i = 0; i < 200; i++) {
160         int lReal1 = analogRead(FSR1_PIN) - taraSensor1;
161         int lReal2 = analogRead(FSR2_PIN) - taraSensor2;
162
163         if (lReal1 < 25) lReal1 = 0;
164         if (lReal2 < 25) lReal2 = 0;
165
166         somaADC1 += lReal1;
167         somaADC2 += lReal2;
168
169         somaMassa1 += calcularGramas(lReal1, 1);
170         somaMassa2 += calcularGramas(lReal2, 2);
171
172         Serial.print("PLOT:");
173         Serial.print(lReal1);
174         Serial.print(",");
175         Serial.println(lReal2);
176
177         delay(10);
178     }
179
180     float mediaADC1 = somaADC1 / 200.0;
181     float mediaADC2 = somaADC2 / 200.0;
182
183     float massaMedia1 = somaMassa1 / 200.0;
184     float massaMedia2 = somaMassa2 / 200.0;
185
186     float forca1 = (massaMedia1 / 1000.0) * 9.81;
187     float forca2 = (massaMedia2 / 1000.0) * 9.81;
188     float forcaTotal = forca1 + forca2;
189     float pressao = forcaTotal / AREA_CONTACTO;
190
191     Serial.print("DATA:");
192     Serial.print(anguloAtual);
193     Serial.print(",");
```



```
194 Serial.print(mediaADC1);
195 Serial.print(",");
196 Serial.print(forca1, 4);
197 Serial.print(",");
198 Serial.print(mediaADC2);
199 Serial.print(",");
200 Serial.print(forca2, 4);
201 Serial.print(",");
202 Serial.print(forcaTotal, 4);
203 Serial.print(",");
204 Serial.print(pressao, 2);
205 Serial.print(",");
206 Serial.println(obterDistanciaCaboMM(), 3);
207 }
208
209 void executarMovimentoDistancia() {
210     if (!movimentoDistanciaAtivo) return;
211
212     if (contadorPassosCabo < alvoPassosCabo) {
213         fecharGarraUmPasso();
214     }
215     else if (contadorPassosCabo > alvoPassosCabo) {
216         abrirGarraUmPasso();
217     }
218     else {
219         movimentoDistanciaAtivo = false;
220         estadoMotorSerial = 0;
221         enviarDistancia();
222     }
223 }
224
225 void loop() {
226     bool btnFecharPressionado = (digitalRead(BTN_DIREITA) == LOW);
227     bool btnAbrirPressionado = (digitalRead(BTN_ESQUERDA) == LOW);
228
229     if (movimentoDistanciaAtivo) {
230         executarMovimentoDistancia();
231     }
232     else {
233         if (btnFecharPressionado || estadoMotorSerial == 1) {
234             fecharGarraUmPasso();
235         }
236         else if (btnAbrirPressionado || estadoMotorSerial == -1) {
237             abrirGarraUmPasso();
238         }
239     }
240
241     if (digitalRead(BTN_AMOSTRA) == LOW) {
242         executarMedicao();
243     }
244
245     if (millis() - ultimoTempoPlot >= 50) {
246         ultimoTempoPlot = millis();
247
248         int r1 = analogRead(FSR1_PIN) - taraSensor1;
249         int r2 = analogRead(FSR2_PIN) - taraSensor2;
250
251         if (r1 < 25) r1 = 0;
252         if (r2 < 25) r2 = 0;
```

```
253
254     Serial.print("PLOT:");
255     Serial.print(r1);
256     Serial.print(",");
257     Serial.println(r2);
258 }
259
260 if (millis() - ultimoTempoDist >= 100) {
261     ultimoTempoDist = millis();
262     enviarDistancia();
263 }
264
265 if (Serial.available() > 0) {
266     char cmd = Serial.read();
267
268     if (cmd == 'M' || cmd == 'm') {
269         executarMedicao();
270     }
271
272     else if (cmd == 'O' || cmd == 'o') {
273         estadoMotorSerial = 1;
274         movimentoDistanciaAtivo = false;
275     }
276
277     else if (cmd == 'C' || cmd == 'c') {
278         estadoMotorSerial = -1;
279         movimentoDistanciaAtivo = false;
280     }
281
282     else if (cmd == 'S' || cmd == 's') {
283         estadoMotorSerial = 0;
284         movimentoDistanciaAtivo = false;
285     }
286
287     else if (cmd == 'P' || cmd == 'p') {
288         anguloAtual = Serial.parseInt();
289     }
290
291     else if (cmd == 'Q' || cmd == 'q') {
292         tipoSensor = 0;
293         Serial.println("MOD0:QUADRADO");
294     }
295
296     else if (cmd == 'R' || cmd == 'r') {
297         tipoSensor = 1;
298         Serial.println("MOD0:REDONDO");
299     }
300
301     else if (cmd == 'Z' || cmd == 'z') {
302         contadorPassosCabo = 0;
303         movimentoDistanciaAtivo = false;
304         estadoMotorSerial = 0;
305         enviarDistancia();
306     }
307
308     else if (cmd == 'D' || cmd == 'd') {
309         float distanciaAlvoMM = Serial.parseFloat();
310
311         if (distanciaAlvoMM < 0) distanciaAlvoMM = 0;
```

```
312  
313     alvoPassosCabo = distanciaAlvoMM / MM_POR_PASSO;  
314     movimentoDistanciaAtivo = true;  
315     estadoMotorSerial = 0;  
316 }  
317 }  
318 }
```


Apêndice F

Interface Python para Aquisição e Processamento dos Dados

Neste apêndice apresenta-se a interface gráfica desenvolvida em Python para facilitar o controlo experimental da garra *SpiRobs* e a aquisição sistemática dos dados dos sensores. A interface permite seleccionar o tipo de sensor utilizado, controlar a abertura e o fecho da garra, definir o intervalo angular do ensaio, executar medições, confirmar ou repetir amostras, reiniciar o processo e exportar os dados adquiridos para ficheiro Excel.

Esta ferramenta foi desenvolvida para reduzir erros associados ao registo manual dos valores e tornar o processo experimental mais reproduzível.

Listing F.1. Código Python da interface gráfica desenvolvida para controlo, aquisição e exportação dos dados experimentais.

```
1 import customtkinter as ctk
2 import serial
3 import threading
4 import pandas as pd
5 import time
6 import collections
7 import os
8 from tkinter import messagebox
9 from matplotlib.figure import Figure
10 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
11
12 PORTA_COM = "COM15"
13 BAUD_RATE = 115200
14
15 ctk.set_appearance_mode("Dark")
16 ctk.set_default_color_theme("blue")
17
18
19 class SpirobApp(ctk.CTk):
20     def __init__(self):
21         super().__init__()
22
23         self.title("SpiRob Dashboard - Pro")
24         self.geometry("1220x850")
```

```
25
26     self.arduino = None
27     self.dados_guardados = []
28     self.ultima_medicao = None
29
30     self.tipo_sensor = "Quadrado"
31     self.distancia_cabo_mm = 0.0
32
33     self.backup_csv = f"backup_spirob_{time.strftime('%Y%m%d_%H%M%S')}.csv"
34
35     self.hist_s1 = collections.deque([0] * 100, maxlen=100)
36     self.hist_s2 = collections.deque([0] * 100, maxlen=100)
37
38     try:
39         self.arduino = serial.Serial(PORTA_COM, BAUD_RATE, timeout=1)
40         time.sleep(2)
41         self.arduino.reset_input_buffer()
42     except Exception as e:
43         messagebox.showerror("Erro de Conexão", str(e))
44
45     self.main_frame = ctk.CTkFrame(self)
46     self.main_frame.pack(fill="both", expand=True, padx=20, pady=10)
47
48     self.left = ctk.CTkScrollableFrame(self.main_frame, width=260)
49     self.left.pack(side="left", fill="y", padx=10, pady=10)
50
51     ctk.CTkLabel(self.left, text="Tipo de Sensor", font=("Arial", 14, "bold")).
52         pack(pady=(10, 5))
53
54     self.combo_sensor = ctk.CTkComboBox(
55         self.left,
56         values=["Quadrado", "Redondo"],
57         command=self.alterar_tipo_sensor
58     )
59     self.combo_sensor.set("Quadrado")
60     self.combo_sensor.pack(pady=5)
61
62     ctk.CTkLabel(self.left, text="Motores", font=("Arial", 14, "bold")).pack(pady
63         =(20, 10))
64
65     self.btn_fechar = ctk.CTkButton(self.left, text="Fechar Garra / Puxar Cabo")
66     self.btn_fechar.pack(pady=5)
67     self.btn_fechar.bind("<ButtonPress-1>", lambda e: self.enviar("0"))
68     self.btn_fechar.bind("<ButtonRelease-1>", lambda e: self.enviar("S"))
69
70     self.btn_abrir = ctk.CTkButton(self.left, text="Abrir Garra / Libertar Cabo")
71     self.btn_abrir.pack(pady=5)
72     self.btn_abrir.bind("<ButtonPress-1>", lambda e: self.enviar("C"))
73     self.btn_abrir.bind("<ButtonRelease-1>", lambda e: self.enviar("S"))
74
75     ctk.CTkLabel(self.left, text="Controlo por Distância", font=("Arial", 14, "
76         bold")).pack(pady=(20, 5))
77
78     ctk.CTkLabel(self.left, text="Puxar até distância (mm)").pack(pady=(5, 2))
79     self.entry_puxar_mm = ctk.CTkEntry(self.left)
80     self.entry_puxar_mm.insert(0, "10")
81     self.entry_puxar_mm.pack(pady=5)
82
83     self.btn_puxar = ctk.CTkButton(self.left, text="Puxar X mm", command=self.
```

```

        puxar_distancia)
81 self.btn_puxar.pack(pady=5)
82
83 self.btn_reset_dist = ctk.CTkButton(
84     self.left,
85     text="Reset Distância Cabo",
86     fg_color="orange",
87     command=self.reset_distancia
88 )
89 self.btn_reset_dist.pack(pady=5)
90
91 ctk.CTkLabel(self.left, text="Amostras por Ângulo", font=("Arial", 14, "bold")
92             ).pack(pady=(20, 5))
93
94 ctk.CTkLabel(self.left, text="Ângulo Atual (°)").pack(pady=(5, 2))
95 self.entry_angulo = ctk.CTkEntry(self.left)
96 self.entry_angulo.insert(0, "0")
97 self.entry_angulo.pack(pady=5)
98
99 ctk.CTkLabel(self.left, text="Incremento entre medições (°)").pack(pady=(5, 2))
100
101 self.combo_incremento = ctk.CTkComboBox(
102     self.left,
103     values=["5", "10", "15", "20", "30", "45"]
104 )
105 self.combo_incremento.set("10")
106 self.combo_incremento.pack(pady=5)
107
108 self.btn_registar = ctk.CTkButton(self.left, text="Registar Amostra", command=
109     self.registar_amostra)
110 self.btn_registar.pack(pady=5)
111
112 self.btn_confirmar = ctk.CTkButton(
113     self.left,
114     text="Confirmar Amostra",
115     state="disabled",
116     command=self.confirmar_amostra
117 )
118 self.btn_confirmar.pack(pady=5)
119
120 self.btn_repetir = ctk.CTkButton(
121     self.left,
122     text="Repetir Medição",
123     state="disabled",
124     command=self.repetir_medicao
125 )
126 self.btn_repetir.pack(pady=5)
127
128 self.btn_reset_medicoes = ctk.CTkButton(
129     self.left,
130     text="Reset Medições",
131     fg_color="darkorange",
132     command=self.reset_medicoes
133 )
134 self.btn_reset_medicoes.pack(pady=10)
135
136 self.btn_excel = ctk.CTkButton(self.left, text="Exportar Excel", command=self.
137     exportar_excel)
```

```
135         self.btn_excel.pack(pady=10)
136
137         self.right = ctk.CTkFrame(self.main_frame)
138         self.right.pack(side="right", fill="both", expand=True, padx=10, pady=10)
139
140         self.fig = Figure(figsize=(6, 2.5))
141         self.ax = self.fig.add_subplot(111)
142         self.ax.set_xlim(0, 99)
143         self.ax.set_ylim(0, 15)
144         self.ax.set_ylabel("Força (N)")
145         self.ax.set_xlabel("Amostras")
146
147         self.l1, = self.ax.plot([], [], label="Sensor 1")
148         self.l2, = self.ax.plot([], [], label="Sensor 2")
149         self.ax.legend()
150
151         self.canvas = FigureCanvasTkAgg(self.fig, master=self.right)
152         self.canvas.get_tk_widget().pack(fill="x", padx=10, pady=5)
153
154         ctk.CTkLabel(self.right, text="Distância do Cabo", font=("Arial", 14, "bold"))
155             .pack(anchor="w", padx=10)
156
157         self.frame_dist = ctk.CTkFrame(self.right)
158         self.frame_dist.pack(fill="x", padx=10, pady=(0, 10))
159
160         self.lbl_distancia = ctk.CTkLabel(
161             self.frame_dist,
162             text="Distância puxada: 0.000 mm",
163             font=("Arial", 22, "bold")
164         )
165         self.lbl_distancia.pack(side="left", padx=10, pady=10)
166
167         ctk.CTkLabel(self.right, text="Medição Atual", font=("Arial", 14, "bold")).
168             pack(anchor="w", padx=10)
169
170         self.texto = ctk.CTkTextbox(self.right, height=180)
171         self.texto.pack(fill="x", padx=10, pady=(0, 10))
172
173         ctk.CTkLabel(
174             self.right,
175             text="Registro de Amostras Confirmadas",
176             font=("Arial", 14, "bold")
177         ).pack(anchor="w", padx=10)
178
179         self.tabela = ctk.CTkTextbox(self.right)
180         self.tabela.pack(fill="both", expand=True, padx=10, pady=(0, 10))
181
182         self.alterar_tipo_sensor("Quadrado")
183
184         threading.Thread(target=self.ler_serial, daemon=True).start()
185         self.atualizar_grafico()
186
187         def enviar(self, cmd):
188             if self.arduino and self.arduino.is_open:
189                 self.arduino.write((cmd + "\n").encode())
190
191         def alterar_tipo_sensor(self, escolha):
192             self.tipo_sensor = escolha
193             self.hist_s1 = collections.deque([0] * 100, maxlen=100)
```



```
192         self.hist_s2 = collections.deque([0] * 100, maxlen=100)
193
194         if escolha == "Quadrado":
195             self.enviar("Q")
196         else:
197             self.enviar("R")
198
199     def calcular_gramas(self, adc, sensor_num):
200         if adc <= 0:
201             return 0.0
202
203         if self.tipo_sensor == "Redondo":
204             gramas = (0.00018467041 * adc * adc) - (0.20335822 * adc) + 149.56255
205         else:
206             if sensor_num == 1:
207                 gramas = (0.00029079127 * adc * adc) + (0.45285940 * adc) + 44.540846
208             else:
209                 gramas = (0.0000592 * adc * adc) - (0.0576 * adc) + 68.9
210
211         return max(0.0, gramas)
212
213     def puxar_distancia(self):
214         try:
215             distancia = float(self.entry_puxar_mm.get().replace(",", "."))
216         except:
217             messagebox.showwarning("Erro", "Insere uma distância válida em mm.")
218             return
219
220         if distancia < 0:
221             messagebox.showwarning("Erro", "A distância não pode ser negativa.")
222             return
223
224         self.enviar(f"D{distancia}")
225
226     def reset_distancia(self):
227         self.enviar("Z")
228         self.distancia_cabo_mm = 0.0
229         self.atualizar_distancia()
230
231     def registrar_amostra(self):
232         try:
233             angulo = int(float(self.entry_angulo.get().replace(",", ".")))
234         except:
235             messagebox.showwarning("Erro", "Insere um ângulo válido.")
236             return
237
238         if angulo < 0 or angulo > 360:
239             messagebox.showwarning("Erro", "O ângulo deve estar entre 0 e 360°.")
240             return
241
242         self.ultima_medicao = None
243
244         self.texto.delete("0.0", "end")
245         self.texto.insert("0.0", f"A medir posição {angulo}°...\nAguarda pela leitura.")
246
247         self.btn_confirmar.configure(state="disabled")
248         self.btn_repetir.configure(state="disabled")
249
```

```
250         self.enviar(f"P{angulo}")
251         self.after(300, lambda: self.enviar("M"))
252
253     def repetir_medicao(self):
254         self.registar_amostra()
255
256     def confirmar_amostra(self):
257         if not self.ultima_medicao:
258             messagebox.showwarning("Aviso", "Ainda não existe medição para confirmar."
259                                     )
260             return
261
262         d = self.ultima_medicao.copy()
263         self.dados_guardados.append(d)
264
265         self.guardar_backup_csv()
266
267         linha = (
268             f"{d['Angulo']:>3}° | "
269             f"Dist: {d['DistanciaCabo_mm']:.3f} mm | "
270             f"S1: {d['Gramas1']:.1f} g ({d['Forca1']:.3f} N) | "
271             f"S2: {d['Gramas2']:.1f} g ({d['Forca2']:.3f} N) | "
272             f"P: {d['Pressao']:.1f} Pa\n"
273         )
274
275         self.tabela.insert("end", linha)
276         self.tabela.see("end")
277
278         self.btn_confirmar.configure(state="disabled")
279         self.btn_repetir.configure(state="normal")
280
281         try:
282             incremento = int(self.combo_incremento.get())
283             proximo = d["Angulo"] + incremento
284
285             if proximo <= 360:
286                 self.entry_angulo.delete(0, "end")
287                 self.entry_angulo.insert(0, str(proximo))
288         except:
289             pass
290
291     def guardar_backup_csv(self):
292         if not self.dados_guardados:
293             return
294
295         df = pd.DataFrame(self.dados_guardados)
296
297         df.rename(columns={
298             "TipoSensor": "Tipo de Sensor",
299             "Angulo": "Ângulo / Posição (°)",
300             "DistanciaCabo_mm": "Distância Cabo (mm)",
301             "ADC1": "ADC Sensor 1",
302             "Gramas1": "Massa Sensor 1 (g)",
303             "Forca1": "Força Sensor 1 (N)",
304             "ADC2": "ADC Sensor 2",
305             "Gramas2": "Massa Sensor 2 (g)",
306             "Forca2": "Força Sensor 2 (N)",
307             "TotalForca": "Força Total (N)",
308             "Pressao": "Pressão Total (Pa)"
```

```
308         }, inplace=True)
309
310         df.to_csv(self.backup_csv, index=False, sep=";", decimal=",")
311
312     def reset_medicoes(self):
313         confirmar = messagebox.askyesno(
314             "Confirmar reset",
315             "Tens a certeza que queres apagar as medições da interface?\n\n"
316             f"Nota: o backup automático fica guardado em:\n{os.path.abspath(self.
317                 backup_csv)}"
318         )
319
320         if not confirmar:
321             return
322
323         self.dados_guardados.clear()
324         self.ultima_medicao = None
325
326         self.tabela.delete("0.0", "end")
327         self.texto.delete("0.0", "end")
328
329         self.entry_angulo.delete(0, "end")
330         self.entry_angulo.insert(0, "0")
331
332         self.btn_confirmar.configure(state="disabled")
333         self.btn_repetir.configure(state="disabled")
334
335     def ler_serial(self):
336         while True:
337             try:
338                 if self.arduino and self.arduino.in_waiting:
339                     linha = self.arduino.readline().decode(errors="ignore").strip()
340
341                     if linha.startswith("DIST:"):
342                         self.distancia_cabo_mm = float(linha.replace("DIST:", ""))
343                         self.after(0, self.atualizar_distancia)
344
345                     elif linha.startswith("PLOT:"):
346                         v = linha.replace("PLOT:", "").split(",")
347
348                         if len(v) == 2:
349                             adc1 = float(v[0])
350                             adc2 = float(v[1])
351
352                             g1 = self.calcular_gramas(adc1, 1)
353                             g2 = self.calcular_gramas(adc2, 2)
354
355                             self.hist_s1.append((g1 / 1000) * 9.81)
356                             self.hist_s2.append((g2 / 1000) * 9.81)
357
358                     elif linha.startswith("DATA:"):
359                         d = linha.replace("DATA:", "").split(",")
360
361                         if len(d) == 8:
362                             ang = int(d[0])
363                             adc1 = float(d[1])
364                             f1 = float(d[2])
365                             adc2 = float(d[3])
366                             f2 = float(d[4])
```

```

366         total = float(d[5])
367         pressao = float(d[6])
368         distancia = float(d[7])
369
370         g1 = (f1 / 9.81) * 1000
371         g2 = (f2 / 9.81) * 1000
372
373         self.distancia_cabo_mm = distancia
374
375         self.ultima_medicao = {
376             "TipoSensor": self.tipo_sensor,
377             "Angulo": ang,
378             "DistanciaCabo_mm": distancia,
379             "ADC1": adc1,
380             "Gramas1": g1,
381             "Forca1": f1,
382             "ADC2": adc2,
383             "Gramas2": g2,
384             "Forca2": f2,
385             "TotalForca": total,
386             "Pressao": pressao
387         }
388
389         self.after(0, self.atualizar_distancia)
390         self.after(0, self.atualizar_texto)
391
392     except Exception:
393         pass
394
395     time.sleep(0.01)
396
397     def atualizar_distancia(self):
398         self.lbl_distancia.configure(
399             text=f"Distância puxada: {self.distancia_cabo_mm:.3f} mm"
400         )
401
402     def atualizar_texto(self):
403         d = self.ultima_medicao
404
405         txt = f"Sensor: {d['TipoSensor']}\n"
406         txt += f"Posição / Ângulo: {d['Angulo']}\n"
407         txt += f"Distância cabo: {d['DistanciaCabo_mm']:.3f} mm\n\n"
408         txt += f"Sensor 1:\n"
409         txt += f"    ADC: {d['ADC1']:.1f}\n"
410         txt += f"    Massa: {d['Gramas1']:.1f} g\n"
411         txt += f"    Força: {d['Forca1']:.3f} N\n\n"
412         txt += f"Sensor 2:\n"
413         txt += f"    ADC: {d['ADC2']:.1f}\n"
414         txt += f"    Massa: {d['Gramas2']:.1f} g\n"
415         txt += f"    Força: {d['Forca2']:.3f} N\n\n"
416         txt += f"Força total: {d['TotalForca']:.3f} N\n"
417         txt += f"Pressão total: {d['Pressao']:.1f} Pa\n\n"
418         txt += "Confirma esta amostra ou repete a medição."
419
420         self.texto.delete("0.0", "end")
421         self.texto.insert("0.0", txt)
422
423         self.btn_confirmar.configure(state="normal")
424         self.btn_repetir.configure(state="normal")

```

```
425
426 def atualizar_grafico(self):
427     self.l1.set_data(range(len(self.hist_s1)), self.hist_s1)
428     self.l2.set_data(range(len(self.hist_s2)), self.hist_s2)
429
430     max_val = max(max(self.hist_s1), max(self.hist_s2))
431     self.ax.set_ylim(0, max(15, max_val + 2))
432
433     self.canvas.draw_idle()
434     self.after(100, self.atualizar_grafico)
435
436 def exportar_excel(self):
437     if not self.dados_guardados:
438         return messagebox.showwarning("Aviso", "Não há dados para exportar.")
439
440     df = pd.DataFrame(self.dados_guardados)
441
442     df.rename(columns={
443         "TipoSensor": "Tipo de Sensor",
444         "Angulo": "Ângulo / Posição (°)",
445         "DistanciaCabo_mm": "Distância Cabo (mm)",
446         "ADC1": "ADC Sensor 1",
447         "Gramas1": "Massa Sensor 1 (g)",
448         "Forca1": "Força Sensor 1 (N)",
449         "ADC2": "ADC Sensor 2",
450         "Gramas2": "Massa Sensor 2 (g)",
451         "Forca2": "Força Sensor 2 (N)",
452         "TotalForca": "Força Total (N)",
453         "Pressao": "Pressão Total (Pa)"
454     }, inplace=True)
455
456     nome = f"dados_{self.tipo_sensor}_{time.strftime('%H%M%S')}.xlsx"
457     df.to_excel(nome, index=False)
458
459     messagebox.showinfo(
460         "OK",
461         f"Excel guardado:\n{nome}\n\nBackup automático:\n{os.path.abspath(self.backup_csv)}"
462     )
463
464
465 if __name__ == "__main__":
466     app = SpirobApp()
467     app.mainloop()
```


Apêndice G

Parâmetros Complementares da Simulação Numérica

Este apêndice apresenta informação complementar associada aos modelos de elementos finitos desenvolvidos no ANSYS. A informação deve ser interpretada como apoio à reprodutibilidade do processo numérico, uma vez que as simulações foram desenvolvidas de forma iterativa e exigiram sucessivos ajustes de geometria, malha, contacto e definição do carregamento.

Região	Tamanho local	Entidades	Objetivo
Faces das vértebras	0,5 mm	10 faces	Refinar zonas de contacto potencial entre vértebras
Furos de passagem do cabo	0,25 mm	24 faces	Melhorar a representação do contacto cabo–furo
Zonas de dobra	0,5 mm	10 faces	Aumentar a resolução nas regiões de maior deformação
Cabo	0,25 mm	1 corpo	Refinar a malha do corpo atuador e estabilizar o contacto

Tabela G.1. Parâmetros principais de refinamento local utilizados no modelo de cinco vértebras com cabo.

Parâmetro	Definição utilizada	Justificação
Tipo de análise	<i>Static Structural</i>	Avaliação quase-estática da deformação induzida pelo cabo
Grandes deformações	Ativo	Necessário devido à elevada flexão das vértebras
<i>Small Sliding</i>	Desativado	Permitir maior variação relativa nas superfícies de contacto
Contactos cabo–furo	Definição manual	Evitar seleção incorreta de faces pela deteção automática
Carregamento	Deslocamento imposto no cabo	Representação simplificada da tração aplicada ao cabo
Comando de iterações	NEQIT, 80	Aumentar o número máximo de iterações de equilíbrio por substep

Tabela G.2. Definições principais utilizadas no modelo de cinco vértebras com cabo.

Simulação	Tempo registado	Tempo aproximado
1	22,75 min	0 h 23 min
2	20,63 min	0 h 21 min
3	82,28 min	1 h 22 min
4	38,68 min	0 h 39 min
5	61,85 min	1 h 02 min
6	61,82 min	1 h 02 min
7	282,67 min	4 h 43 min
8	646,83 min	10 h 47 min
9	628,67 min	10 h 29 min
10	323,00 min	5 h 23 min

Tabela G.3. Tempos de solução registados no histórico de simulações do ANSYS.

Os dez tempos registados totalizam aproximadamente 2169,18 min, correspondentes a cerca de 36 h 09 min de processamento acumulado. As simulações 8 e 9 ultrapassaram dez horas cada, apesar de o estudo ainda estar limitado a modelos reduzidos. Este resultado evidencia a dificuldade prática de desenvolver uma simulação completa da garra *SpiRobs* com contacto cabo–furo, grandes deformações e várias vértebras.

A Tabela G.3 apresenta apenas parte do histórico registado. Durante o desenvolvimento dos modelos foram executadas várias tentativas adicionais, algumas com duração significativamente superior, como indicado no histórico de solução apre-

sentado no Capítulo 4. Estes tempos ilustram a natureza iterativa do processo de desenvolvimento do modelo numérico e a dificuldade de obter convergência em problemas com grandes deformações e múltiplos contactos.

Apêndice H

Dados Complementares do Modelo *Rigid Dynamics*

Este apêndice reúne os parâmetros utilizados na definição dos momentos torsores equivalentes e os tempos registados durante o desenvolvimento dos modelos multicorpo em *Rigid Dynamics*. Estes dados complementam a metodologia e os resultados apresentados nos Capítulos 3 e 4.

H.1. Momentos torsores e rigidezes torsionais equivalentes

A força máxima teórica no cabo foi estimada em 25 N e distribuída uniformemente por 18 juntas, conduzindo a $F_{eq} = 1,3889$ N por junta. Para cada junta, o momento foi calculado por $M_i = F_{eq}d_i$ e a rigidez equivalente por $k_{\theta,i} = M_i/30^\circ$.

Junta	Braço d_i [mm]	F_{eq} [N]	Momento M_i [N · mm]	Rigidez $k_{\theta,i}$ [N · mm/°]
J1 / V1	17,01	1,3889	23,6250	0,7875
J2 / V2	15,22	1,3889	21,1389	0,7046
J3 / V3	13,58	1,3889	18,8611	0,6287
J4 / V4	12,10	1,3889	16,8056	0,5602
J5 / V5	10,74	1,3889	14,9167	0,4972
J6 / V6	9,50	1,3889	13,1944	0,4398
J7 / V7	8,36	1,3889	11,6111	0,3870
J8 / V8	7,33	1,3889	10,1806	0,3394
J9 / V9	6,39	1,3889	8,8750	0,2958
J10 / V10	5,53	1,3889	7,6806	0,2560
J11 / V11	4,75	1,3889	6,5972	0,2199
J12 / V12	4,03	1,3889	5,5972	0,1866
J13 / V13	3,38	1,3889	4,6944	0,1565
J14 / V14	2,78	1,3889	3,8611	0,1287
J15 / V15	2,24	1,3889	3,1111	0,1037
J16 / V16	1,74	1,3889	2,4167	0,0806
J17 / V17	1,29	1,3889	1,7917	0,0597
J18 / V18	0,87	1,3889	1,2083	0,0403

Tabela H.1. Momentos torsores e rigidezes torsionais equivalentes aplicados às 18 juntas do modelo *Rigid Dynamics*.

H.2. Rampa temporal de aplicação dos momentos

Tempo [s]	Momento aplicado em cada junta	Multiplicador de M_i
0	0	0
2	$M_i/3$	0,3333
4	$2M_i/3$	0,6667
6	M_i	1,0000
8	M_i	1,0000

Tabela H.2. Rampa temporal de referência utilizada para aplicar os momentos torsores equivalentes.

H.3. Tempos de solução dos modelos progressivos

Modelo	Tempo FEA	Tempo <i>Rigid Dynamics</i>
Base + 1 vértebra	38 min 33 s	2 min 48 s
Base + 2 vértebras	1 h 30 min	22 s
Base + 5 vértebras	5 h 22 min	6 min 10 s
Base + 7 vértebras	–	2 min 12 s
Modelo completo	Não obtido como solução FEA integral	55 min 30 s

Tabela H.3. Tempos registados para os modelos progressivos em FEA e *Rigid Dynamics*.

Os tempos apresentados correspondem às configurações finais registadas para cada modelo. Não devem ser interpretados como uma relação linear direta entre o número de vértebras e o tempo de cálculo, pois as condições de contacto, os passos temporais e as opções de solução variaram durante o desenvolvimento.

Apêndice I

Vista do Modelo CAD da Garra

A Figura I.1 identifica o modelo CAD utilizado, descrito na Secção 3.3. A arquitetura geométrica provém do artigo de Wang, Freris e Wei e da respetiva informação suplementar [6]; esta dissertação incide sobre a sua implementação, fabrico, atuação, instrumentação e avaliação. A vista mostra os segmentos, as regiões de flexão e os canais do cabo. Não constitui um desenho técnico cotado para fabrico.

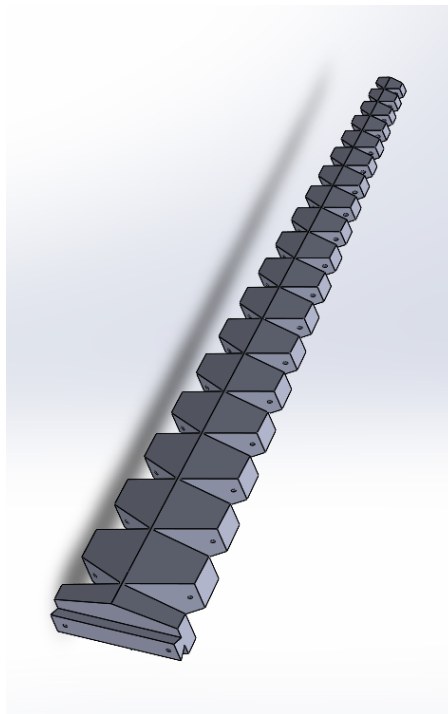


Figura I.1. Vista do modelo CAD utilizado para a garra baseada na arquitetura *SpiRobs* de Wang et al. [6], sem escala dimensional indicada e sem cotas.

Apêndice J

Artigo Científico Publicado

Este apêndice reproduz integralmente o artigo científico publicado a partir da campanha experimental inicial desenvolvida no âmbito desta dissertação. A sua inclusão documenta a divulgação científica do trabalho e complementa a apresentação dos métodos e resultados, cujo desenvolvimento e limitações são discutidos no corpo da dissertação.

Referência da publicação

P. E. C. Martins et al., «Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation,» *Engineering Proceedings*, vol. 145, n.º 1, 2026, art. 9. DOI: [10.3390/engproc2026145009](https://doi.org/10.3390/engproc2026145009)
URL: <https://www.mdpi.com/2673-4591/145/1/9>

Data de publicação: 5 de agosto de 2026.

DOI: [10.3390/engproc2026145009](https://doi.org/10.3390/engproc2026145009).

Atribuição e licença

© 2026 Pedro E. C. Martins, César M. A. Vasques, Mário J. C. Tomé e Adélio M. S. Cavadas. Publicado por MDPI, Basileia, Suíça, em *Engineering Proceedings*, volume 145, artigo 9. Reprodução da versão publicada, ao abrigo da licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

As 18 páginas seguintes conservam o conteúdo e a composição editorial da publicação, com redução uniforme de escala para inclusão na dissertação. Mantém-se a numeração original do artigo e acrescenta-se, no rodapé exterior à reprodução, a numeração contínua da dissertação.

Characterization of Deformation and Pressure Fields in SpiRob Soft Grippers for Delicate Manipulation [†]

Pedro E. C. Martins ¹, César M. A. Vasques ^{1,2,*}, Mário J. C. Tomé ¹ and Adélio M. S. Cavadas ¹

¹ Research Unit on Materials, Energy and Environment for Sustainability (proMetheus), School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Viana do Castelo (IPVC), 4900-347 Viana do Castelo, Portugal; pedro.m@ipvc.pt (P.E.C.M.); mariotome@estg.ipvc.pt (M.J.C.T.); adelioc@estg.ipvc.pt (A.M.S.C.)

² Centre for Mechanical Technology and Automation (TEMA), Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

* Correspondence: cmavasques@ua.pt

[†] Presented at the 3rd International Electronic Conference on Machines and Applications, 12–14 May 2026; Available online: <https://sciforum.net/event/IECMA2026>.

Abstract

This work presents a low-cost experimental methodology to estimate the circumferential variation in resultant contact force and equivalent mean pressure generated by a cable-driven SpiRob soft gripper during grasping. A cylindrical object instrumented with internal force sensing resistors (FSRs[®]) was used as an angular scanning probe. Under a fixed actuation condition, the object was manually rotated inside the closed gripper in 5° increments, allowing the transmitted contact force to be mapped as a function of angular position. The measured forces were converted into equivalent mean pressure values using a reference contact area. Four repeated mapping tests were performed to evaluate repeatability. The results showed a non-uniform circumferential contact-force signature, together with moderate between-test variability. The proposed method does not spatially resolve interface loading; instead, it provides a practical experimental approach for identifying regions of higher contact intensity and supporting future studies on actuation, deformation, and pressure-related behaviour in SpiRob-type soft grippers.

Keywords: soft robotics; cable-driven grippers; SpiRob; contact-force mapping; equivalent mean pressure; FSR sensors; grasping measurement

1. Introduction

Soft robotic grippers have received increasing attention because they provide compliant, adaptive, and safer interaction with objects when compared with conventional rigid end-effectors. This is particularly relevant for delicate manipulation, where the object may be fragile, deformable, irregularly shaped, or sensitive to local contact-pressure concentrations. Broad reviews of the field show that soft grippers have been developed using several actuation principles, material systems, fabrication strategies, and sensing approaches, with applications ranging from industrial handling and service robotics to medical, agricultural, and underwater manipulation [1–3]. The integration of additive manufacturing has further expanded the design space of soft grippers, enabling rapid prototyping, compliant monolithic structures, multimaterial concepts, and increasingly compact actuation and sensing solutions [4].

A central advantage of soft grippers is their ability to exploit mechanical compliance and morphological adaptation. Instead of requiring highly accurate object models



Academic Editor: Marco Ceccarelli

Published: 5 August 2026

Copyright: © 2026 by the authors.

Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

This article is an open access article distributed under the terms and

conditions of the [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

and complex control laws, compliant fingers can passively conform to object geometry and distribute contact over larger regions. Bioinspired designs, such as Fin-Ray-type structures, tendon-driven compliant fingers, continuum-inspired mechanisms, and spiral-shaped grippers, use geometry and material flexibility to generate adaptive wrapping or enveloping grasping behaviours [5–8]. Within this context, the SpiRob concept introduced a logarithmic-spiral-inspired architecture capable of versatile grasping across scales using a cable-driven actuation strategy [9]. However, although such morphologies are promising for adaptable grasping, their deformation and contact behaviour are difficult to predict because local bending, tendon routing, friction, and evolving contact regions interact during actuation.

In cable- or tendon-driven soft grippers, the motor input is not transmitted directly to the object. Instead, the actuation is transferred through a tendon routed along or inside a deformable structure, producing bending, shape adaptation, frictional losses, and changing contact conditions during grasping. This creates a highly nonlinear relationship between cable displacement, structural deformation, contact force, and pressure-related response. For delicate manipulation, this is particularly important because object damage is often associated not only with the total grasping force, but also with local force or pressure concentrations. Therefore, understanding how contact loads vary around the gripper–object interface is essential for defining safer actuation conditions and improving future control strategies.

Several approaches have been proposed to improve contact perception and force control in robotic grippers. Flexible tactile sensing technologies have been widely explored for object recognition, human–machine interaction, grasp stabilisation, and robotic manipulation, providing information about local contact events, force, pressure, vibration, slip, and other interaction quantities [10,11]. Large-area and low-cost tactile sensors have also been investigated for soft robotic applications, showing the potential of flexible sensing layers for detecting contact position and applied load over deformable interfaces [12]. These developments demonstrate the importance of tactile information in soft robotic systems, but they also highlight challenges related to sensor calibration, hysteresis, drift, integration, durability, signal processing, and repeatability.

Sensorised grippers and tactile fingertips provide more direct contact information during grasping. Recent examples include tactile sensor-integrated fingertips for precise contact-force detection, Fin-Ray-inspired soft grippers with embedded force feedback, reconfigurable tactile Fin-Ray grippers with FSR-based skins, and compliant fingers capable of tactile force and slip sensing for delicate manipulation [5,6,13,14]. Force-control strategies using tactile or force feedback have also been used to regulate grasping force and reduce the risk of object instability or excessive loading [15–17]. However, these solutions are often specific to a given gripper architecture, require sensor integration directly into the fingers, and may increase fabrication complexity, wiring effort, calibration requirements, and design constraints.

In parallel, continuum and tendon-driven robotic systems have been extensively studied from a modelling perspective. Continuum robots deform through continuous bending rather than discrete joints, allowing smooth shape adaptation and distributed contact with the environment. Tendon- or cable-driven actuation is particularly useful because it enables remote actuation and reduces the mass located near the contact region. Nevertheless, modelling these systems accurately remains challenging because of cable friction, nonlinear material response, large deformation, contact interaction, changing boundary conditions, and the need to select suitable kinematic or static assumptions [7,8,18]. Previous work has also shown that estimating both profile and contact force is important when cable-driven continuum robots interact with obstacles or external objects [19].

Finite Element Analysis (FEA) can provide detailed information about deformation and contact mechanics, including local stress and pressure fields. However, for highly deformable 3D-printed TPU structures with internal tendon routing, FEA requires reliable material models, contact definitions, friction parameters, mesh refinement, and nonlinear solver settings. These requirements can be difficult to satisfy during early-stage prototype development, especially when the objective is to obtain a practical first assessment of contact behaviour rather than a fully resolved numerical description. Consequently, there is value in experimental methods that provide contact-related information without requiring detailed finite element models.

Alternative approaches have been proposed to estimate or analyse contact pressure and grasping loads using external sensing or perception. Vision-based methods have been investigated for estimating contact pressure in grippers, showing that pressure-related information can be inferred without relying exclusively on embedded tactile skins [20,21]. Instrumented-object approaches have also been used to analyse grasping forces in soft grippers. For example, a recent FinRay-type gripper study developed an object with multiple two-axis force sensors distributed around the object surface to investigate normal and tangential components of the grasping force [22]. These works are highly relevant because they show the growing interest in measuring contact-force and pressure-related behaviour at the gripper-object interface. However, many such systems require more complex sensor arrays, specialised hardware, or higher-cost measurement setups.

Considering this state of the art, there remains a need for simple, low-cost, experimentally reproducible methods capable of characterising the circumferential variation in contact force in cable-driven SpiRob-type grippers without requiring detailed finite element models or embedded sensing structures. Table 1 summarises representative approaches used to obtain contact-related information in robotic grippers and continuum systems, together with their main capabilities and limitations. This gap is particularly relevant for grippers based on spiral or continuum-inspired geometries, where the contact interaction changes continuously around the object as the structure wraps around it.

This work uses the SpiRob architecture as a case study for the experimental characterisation of contact interaction in a cable-driven soft gripper. The SpiRob concept is based on a logarithmic-spiral-inspired soft structure designed for versatile grasping across scales [9]. In the present study, the focus is not the spatial resolution of deformation or pressure over the complete interface. Instead, the work provides a first experimental step towards linking cable-driven actuation, structural deformation, transmitted contact force, and equivalent mean pressure.

The proposed methodology follows the conceptual chain from motor rotation and cable displacement to structural deformation, contact-force generation, and equivalent mean pressure estimation. Related studies have addressed parts of this chain by combining tactile sensing, force feedback, vision-based pressure estimation, instrumented objects, or contact-force estimation in robotic grippers and continuum robots [13,15,17,19–22]. In contrast, the present work focuses on a low-cost external, instrumented-object strategy that does not require sensor integration into the SpiRob body. Under a fixed actuation condition, a cylindrical object instrumented with internal Force Sensing Resistors (FSRs) is used as an angular scanning probe. As the object is manually rotated inside the closed gripper, different angular regions of the gripper-object interface become aligned with the sensing region. This allows the resultant transmitted contact force to be mapped as a function of angular position.

The main contribution of this work is therefore a reproducible experimental methodology for obtaining a circumferential contact-force signature and the angular variation in equivalent mean pressure in a cable-driven SpiRob gripper. The method does not aim to replace spatial deformation measurements, distributed pressure sensing, tactile skins, instrumented multi-axis objects, vision-based pressure estimation, or detailed FEA. Instead,

it provides a practical experimental basis for identifying regions of higher contact intensity, supporting future actuation–deformation–contact studies, and informing numerical model validation and gripper design improvements.

Although the present work does not spatially resolve the complete deformation or pressure response, it investigates the final stages of the actuation–deformation–contact chain. The measured circumferential contact-force signature provides indirect experimental information on how the SpiRob structure deforms and generates contact loads around the object. Therefore, the proposed methodology represents a first experimental step towards the broader characterisation of deformation and pressure-related behaviour in SpiRob soft grippers. An overview of the complete experimental methodology is presented in Figure 1.

Table 1. Representative approaches for obtaining contact-related information in robotic grippers and continuum systems.

Approach	Capability	Main Limitation	Examples
Soft-gripper technology reviews and design studies	Broad overview of actuation principles, materials, fabrication strategies, applications, and design trends	Usually provide general design guidance rather than direct local contact-force measurements	[1–4]
Embedded tactile skins or fingertip sensors	Local contact detection and force feedback integrated into the gripper	Requires sensor integration into the gripper structure and is often architecture-specific	[5,6,12–14]
Force-control methods using tactile or force feedback	Regulation of grasping force during manipulation of fragile or deformable objects	Depends on sensing hardware, controller design, and gripper-specific calibration	[15–17]
Continuum/tendon-driven modelling and contact estimation	Relates actuation, shape, and contact interaction in deformable robotic structures	Requires modelling assumptions, material data, friction parameters, and validation	[7,8,18,19]
Vision-based or external contact-pressure estimation	Can infer or measure pressure/contact-related information without necessarily embedding sensors inside the gripper body	May require cameras, learning-based models, specialised calibration, or complex instrumented objects	[20–22]
External instrumented object, present work	Low-cost circumferential mapping of resultant contact force and equivalent mean pressure in a SpiRob-type gripper	Does not spatially resolve local interface loading and is limited by angular and sensor resolution	[9] and this work

Experimental methodology overview



Figure 1. Graphical overview of the experimental methodology. A cable-driven SpiRob gripper holds an instrumented cylindrical object under a fixed actuation condition. The object is rotated in angular increments, the transmitted force is measured by internal FSR sensors, and the measured force is converted into equivalent mean pressure.

2. Materials and Methods

2.1. SpiRob Geometry

The experimental testbed was developed around a cable-driven SpiRob soft gripper. The SpiRob architecture consists of a continuous segmented structure inspired by a logarithmic spiral and designed to progressively wrap around a target object during actuation. Although the gripper contains repeated compliant segments, it was manufactured as a single flexible body, allowing continuous global deformation during closing.

The gripper used in this study had an overall length of approximately 250 mm (249.68 mm in the technical drawing) and consisted of 18 compliant vertebra-like segments. The thickness of the flexible regions was not constant, decreasing progressively from the proximal base towards the distal tip. This geometric variation produces a gradual change in structural compliance along the gripper. Because the detailed SpiRob geometry and construction rationale are the central focus of the original SpiRob publication [9], only the geometrical information required to interpret the experimental methodology is discussed here.

The soft structure was manufactured from Filaflex TPU 95A (Recreus, Elda, Spain) using Fused Deposition Modeling (FDM) on a Creality Ender 3 V2 3D printer (Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd., Shenzhen, China). The main printing parameters were a layer height of 0.2 mm, an infill density of 30%, a nozzle temperature of 220 °C, and a build-plate temperature of 60 °C.

2.2. Cable-Driven Actuation Principle

Actuation was achieved through a tendon-driven mechanism. A nylon fishing line with a diameter of 0.3 mm was routed through off-centre internal channels along the soft structure. Because the tendon path is offset relative to the neutral axis of the gripper, cable pulling generates a bending moment along the structure, causing the gripper to progressively close around the object.

The cable was anchored at the distal region of the gripper and pulled at the proximal region by a NEMA 17 stepper motor coupled to a spool with a radius of approximately 20 mm. When the motor rotates, the spool winds the cable and imposes a linear cable displacement. For a spool radius r , the imposed cable displacement can be estimated as

$$\Delta L = r \Delta\phi, \quad (1)$$

where ΔL is the imposed cable displacement and $\Delta\phi$ is the angular rotation of the spool in radians.

The NEMA 17 stepper motor was operated using a microstepping resolution of 1/32. For all four mapping tests, an imposed cable displacement of approximately 105 mm was applied. After this displacement was reached and a stable grasp was achieved, the motor position was maintained constant throughout the complete angular sweep.

Figure 2 illustrates the tendon-driven actuation principle considered in this work. The off-axis tendon path converts the imposed cable displacement into a bending moment, producing the progressive closing motion of the SpiRob gripper. The general SpiRob architecture and its design rationale are described in detail in the original SpiRob publication [9].

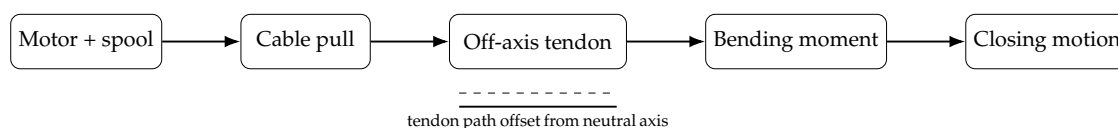


Figure 2. Schematic representation of the cable-driven actuation principle. The tendon is routed away from the neutral axis, so cable pulling generates a bending moment and produces the closing motion of the SpiRob gripper.

2.3. Conceptual Actuation–Deformation–Contact Framework

The experimental methodology was designed to investigate the relationship between motor actuation, cable displacement, cable tension, structural deformation, resultant contact force, and equivalent mean pressure.

Although the present work does not spatially resolve the complete deformation or pressure response, it investigates the final stages of the actuation–deformation–contact chain. The measured circumferential contact-force signature provides indirect experimental information on how the SpiRob structure deforms and generates contact loads around the object.

Figure 3 summarizes the physical chain considered in this work. Motor rotation produces cable displacement and cable tension, which generate structural deformation of the SpiRob gripper. The deformed structure interacts with the object, producing a resultant contact force that is experimentally measured and converted into an equivalent mean pressure.

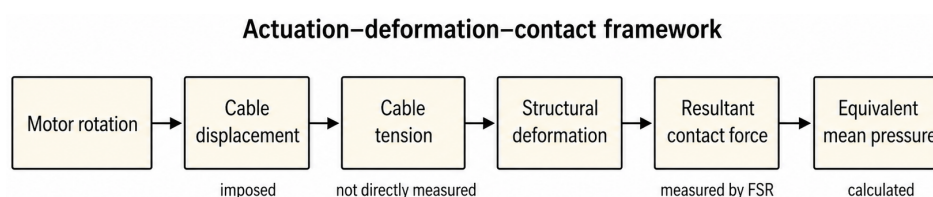


Figure 3. Horizontal actuation–deformation–contact framework considered in this work. The motor imposes cable displacement, which produces cable tension and structural deformation. The resulting gripper–object interaction generates a transmitted contact force measured by the FSR sensors and converted into equivalent mean pressure.

2.4. Instrumented Cylindrical Object

To measure the contact force applied by the gripper, a custom cylindrical object instrumented with two Force Sensing Resistors (FSR 406, Interlink Electronics, Inc., Fremont, CA, USA) was developed. These sensors were selected because of their thin profile and active sensing area of 38.1×38.1 mm.

The instrumented object had an external diameter of 50 mm and a height of 80 mm. It was designed as a modular cylindrical assembly divided into two half-shells. Each half-shell included an external curved surface contacted by the gripper and an internal flat contact pad where the FSR sensor was positioned.

The object was manufactured by FDM in PLA using a layer height of 0.2 mm, 30% infill, a nozzle temperature of 200 °C, and a build-plate temperature of 50 °C. The printed shell was treated as a rigid support for transferring the external contact load to the internal flat sensing surfaces.

The two sensors were installed on opposite sides of the object, with an angular separation of 180°. The sensors were positioned between internal flat faces with dimensions of 30×30 mm. This arrangement was intended to reduce the influence of shear, local bending, and irregular curved contact on the sensor response.

Figure 4 presents the exploded and assembled CAD views of the instrumented object. The object also includes a 3D-printed angular indexing disk attached to its upper section. The disk contains radial markings spaced every 5° and was used to control the manual rotation of the object during the mapping procedure.

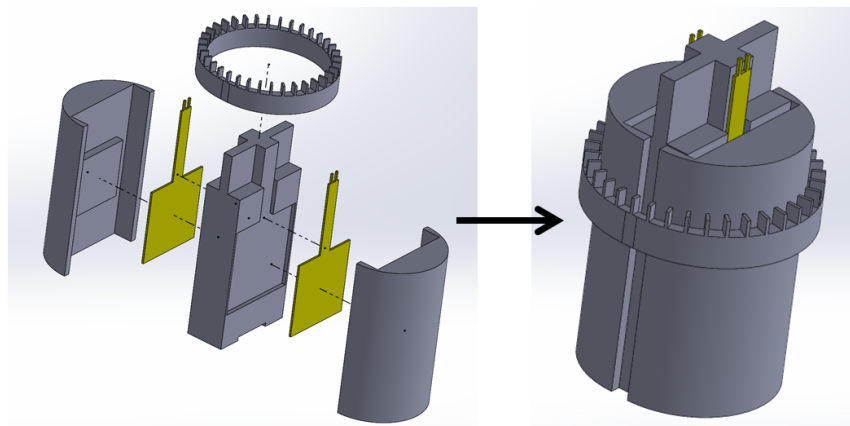


Figure 4. CAD representation of the instrumented cylindrical object. The yellow highlighted components indicate the two FSR locations, which are positioned on opposite internal flat sensing surfaces. The figure shows the exploded configuration and the assembled object with the angular indexing disk.

2.5. Load-Transfer Mechanism

The gripper applies an unknown distributed contact load over the external curved surface of the instrumented object. This distributed load generates a resultant force that is transmitted through the rigid object shell to the internal flat sensing surfaces. Each FSR sensor measures the resultant normal force transmitted through the object shell to its internal flat sensing region. The measured value therefore represents the integral effect of the unknown external contact loading over the region mechanically coupled to the sensor, rather than a spatially resolved surface quantity.

Figure 5 illustrates this load-transfer mechanism. The external arrows represent the unknown distributed contact loading, denoted by $p(\theta)$ in the resultant-force formulation. The load is transmitted through the object shell and produces an approximately normal force on the internal FSR sensing surface.

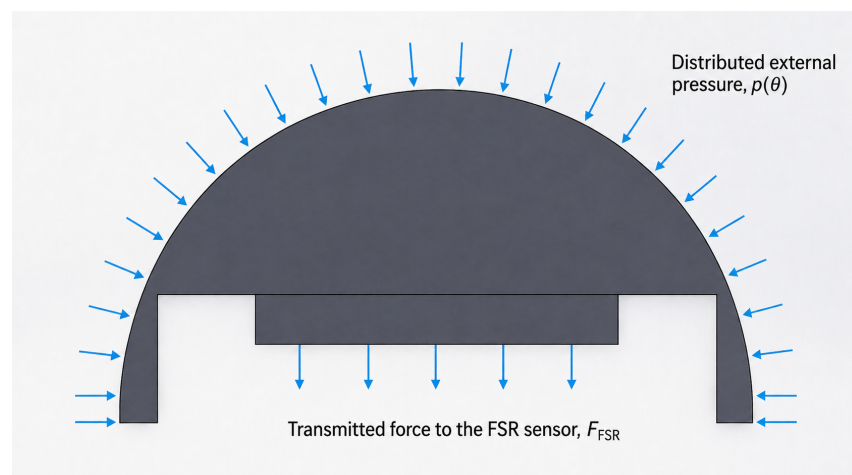


Figure 5. Free-body representation of one half of the instrumented cylindrical object. The outer arrows represent the unknown distributed contact loading applied by the soft gripper over the curved shell. This load is transmitted through the object structure to the internal flat sensing surface, where the FSR measures the resultant normal force.

For a given angular orientation θ , the measured resultant force may be expressed as

$$F_{\text{meas}}(\theta) = \int_A p(\theta) dA, \quad (2)$$

where $p(\theta)$ denotes the unknown distributed contact loading and A is the external contact region mechanically coupled to the sensing area. The angle θ represents the orientation of the instrumented object relative to the fixed deformed configuration of the gripper. Equation (2) expresses the physical interpretation of the measurement: the FSR output corresponds to a resultant transmitted force rather than a spatially resolved surface measurement.

2.6. Reference Contact Area and Equivalent Mean Pressure

To provide a normalized metric for comparing measurements obtained at different angular positions, the measured resultant force was converted into an equivalent mean pressure

$$p_{\text{eq}}(\theta) = \frac{F_{\text{meas}}(\theta)}{A_{\text{ref}}}, \quad (3)$$

where A_{ref} is the reference contact area used to normalize the measured resultant force. In this study, the reference area was defined as

$$A_{\text{ref}} = 1233.41 \text{ mm}^2. \quad (4)$$

This value was obtained from the CAD model by selecting the external gripper surfaces considered likely to contact the cylindrical object during grasping. The highlighted regions shown in Figure 6 were summed to obtain the reference area used for equivalent mean pressure calculation. A CAD-based estimate was adopted because the contact surfaces are distributed over multiple vertebra-like segments with varying geometry, making direct physical measurement difficult.

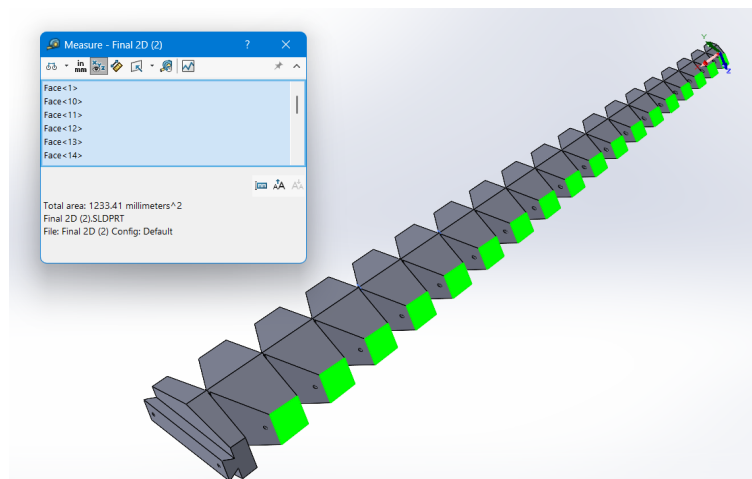


Figure 6. CAD-based estimation of the reference contact area used for equivalent mean pressure calculation. The highlighted regions correspond to the external gripper surfaces considered to be potentially involved in contact with the cylindrical object, resulting in $A_{\text{ref}} = 1233.41 \text{ mm}^2$.

The equivalent mean pressure should be interpreted as a normalized contact-force metric rather than as a spatially resolved surface quantity. The effective contact area may vary with angular position and gripper deformation, whereas the same reference area is used for all measurements. Consequently, $p_{\text{eq}}(\theta)$ enables consistent comparison between

angular positions and repeated tests, but it does not identify the spatial magnitude or location of interface loading concentrations.

The assembled experimental testbed and the gripper–object arrangement are shown in Figure 7.

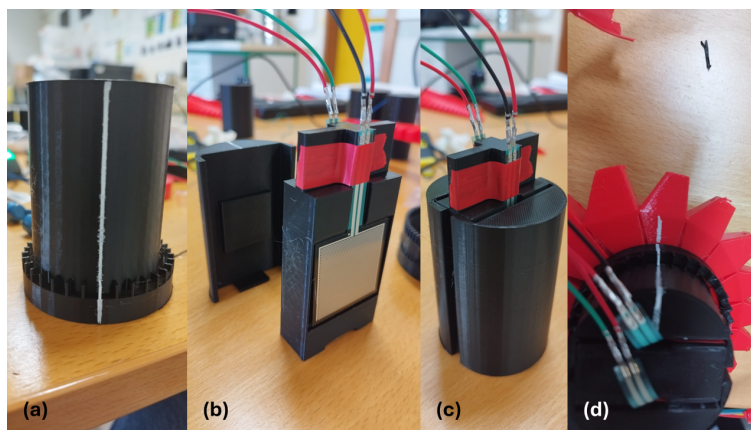


Figure 7. Experimental testbed: (a) rotational alignment protocol; (b) exploded view of the instrumented object; (c) assembled target; (d) gripping process with the SpiRob gripper.

2.7. Rotational Mapping Protocol

At the beginning of each test, the object was placed inside the SpiRob gripper. The motor was actuated until the imposed cable displacement of approximately 105 mm was reached and the gripper securely held the object. The motor position and cable displacement were then maintained constant throughout the complete angular sweep.

The object was manually rotated inside the static closed gripper using the angular indexing disk. Measurements were performed every 5° over a complete 360° rotation, resulting in 72 angular positions. The angle θ represents the angular orientation of the instrumented object relative to the fixed deformed configuration of the SpiRob gripper. The FSR sensors remain fixed inside the object. Consequently, as the object rotates, different regions of the gripper–object interface become aligned with the sensing regions. In this sense, the instrumented cylinder behaves as an angular scanning probe. Figure 8 illustrates representative positions of the rotational mapping procedure.

At each angular position, the FSR signals were recorded for 2 s at a sampling rate of 100 Hz, resulting in 200 samples per sensor. The final value used for each sensor and angular position corresponded to the average of these samples. Because the object was manually aligned with the angular markings, the positioning uncertainty was estimated as $\pm 2.5^\circ$, corresponding to half of the angular increment.

To reduce variability during manual rotation, the motor remained energized to maintain the imposed cable displacement, the object was rotated slowly and in the same direction, the gripper was not released between angular positions, and a short stabilization period was allowed before recording each point. The same support, gripper position, cable displacement, acquisition time, sampling rate, operator, rotation direction, and processing procedure were used in all tests. The complete sweep was repeated four times to quantify between-test variability and to reduce the influence of isolated noise or accidental repositioning effects on the interpretation of the circumferential force signature.

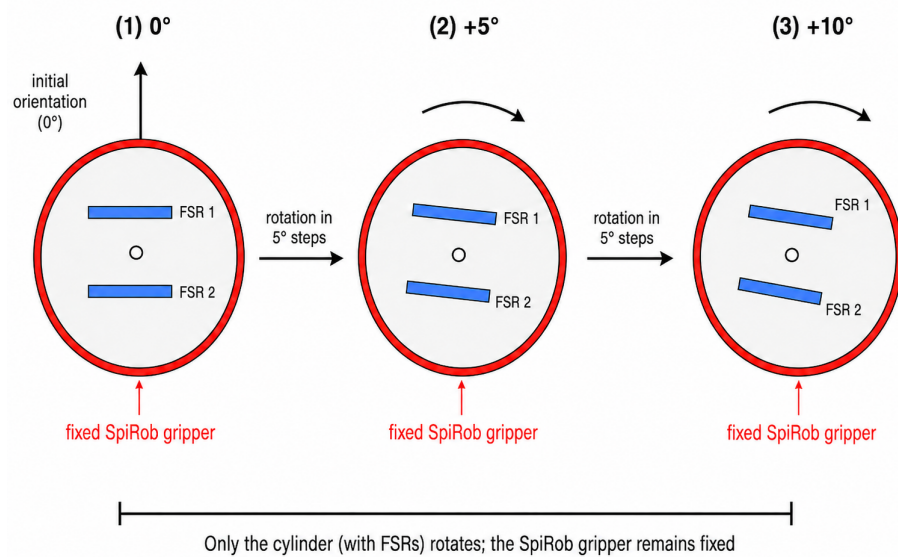


Figure 8. Representative sequence and schematic interpretation of the rotational mapping procedure. The SpiRob gripper remains fixed after actuation, while the instrumented cylinder is manually rotated in 5° increments. The internal FSR sensors remain fixed relative to the cylinder and therefore rotate together with it, while remaining opposite to each other at 180°. Consequently, different angular regions of the gripper–object interface become aligned with the sensing regions during the sweep.

2.8. FSR Calibration and Electronic Acquisition

Before the grasping experiments, each FSR sensor was calibrated individually because FSR sensors exhibit nonlinear behaviour and sensor-to-sensor variability. The objective of the calibration was to obtain an empirical relationship between the raw analog-to-digital converter (ADC) value read by the ESP32 and the mass applied to each sensor.

The calibration procedure follows the general empirical calibration approach commonly adopted for this type of force-sensitive resistor. It was not intended as a universal manufacturer calibration; instead, it was an in-house empirical calibration performed with the same acquisition circuit, supply voltage, sensor placement, and loading configuration later used in the experiments. This strategy was adopted to account for the nonlinear and sensor-specific response of the FSRs over the operating range relevant to the grasping tests.

Each FSR sensor was connected to the ESP32 through an independent voltage-divider circuit with a fixed 10 kΩ resistor. Sensor 1 was connected to GPIO34 and Sensor 2 to GPIO35, using the 3.3 V supply and GND reference of the ESP32. The circuit shown in Figure 9 is included to document the signal-acquisition configuration used during calibration and testing.

The FSR behaves as a variable resistor whose electrical resistance decreases as the applied normal load increases. The voltage divider converts this resistance variation into a voltage signal that can be measured by the ESP32. The ESP32 uses a 12-bit ADC scale, corresponding to raw values between 0 and 4095.

The calibration setup consisted of a precision scale with a resolution of 0.01 g, an FSR 406 sensor, a flat-bottom glass beaker, an ESP32 microcontroller, and a data-acquisition script. The FSR sensor was placed on the scale with its active area facing upward. The beaker was positioned directly over the sensor to distribute the load as uniformly as possible. The scale was then tared with the complete assembly in place. The complete calibration setup and the positioning of the sensor and loading components are shown in Figure 10.

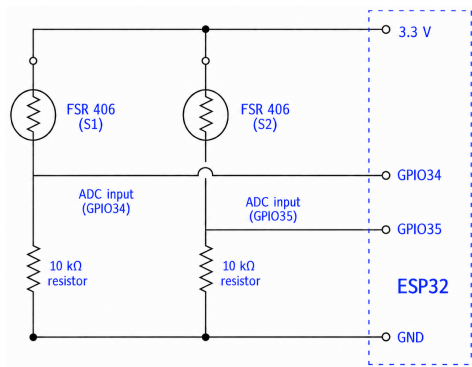


Figure 9. Supporting schematic of the FSR acquisition circuit. Each sensor was connected to an independent ESP32 ADC input through a 10 kΩ voltage divider.

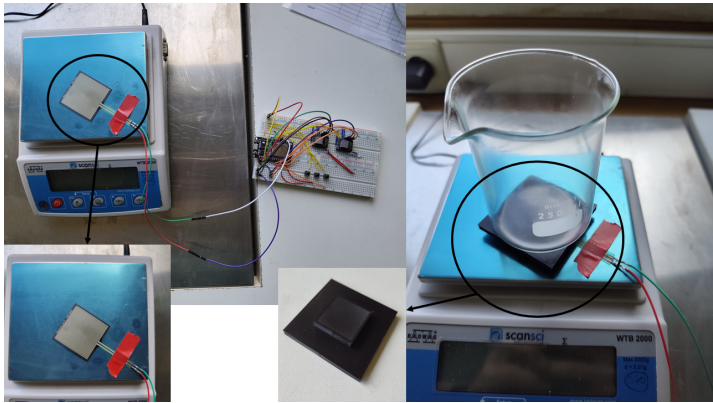


Figure 10. Calibration setup and sensor positioning: FSR sensor placed on the precision scale, ESP32-based acquisition circuit, stabilizing support, and beaker positioned over the sensing region for controlled loading.

Water was progressively added to the beaker to increase the applied mass. The mass increments were not fixed, since the objective was to collect multiple calibration points over the useful operating range of the sensor. At each loading step, the mass indicated by the scale and the corresponding ADC value read by the ESP32 were recorded after signal stabilization. Representative stages of this incremental loading procedure are shown in Figure 11.



Figure 11. Representative sequence of the FSR calibration process using incremental water loading. The beaker mass was progressively increased while the corresponding ADC values were recorded with the ESP32.

For each sensor, the collected mass–ADC data were fitted using a second-order polynomial regression. The calibration equations were

$$m_1 = (2.9079 \times 10^{-4})S_1^2 + 0.4529S_1 + 44.54, \quad (5)$$

$$m_2 = (5.92 \times 10^{-5})S_2^2 - 0.0576S_2 + 68.90, \quad (6)$$

where m_i is the estimated mass in grams and S_i is the raw ADC value for each sensor ($i = 1, 2$). The calibration curves presented coefficients of determination of $R^2 = 0.9846$ for Sensor 1 and $R^2 = 0.9870$ for Sensor 2. Figure 12 summarizes the fitted calibration curves used to convert ADC readings into estimated mass values for both sensors.

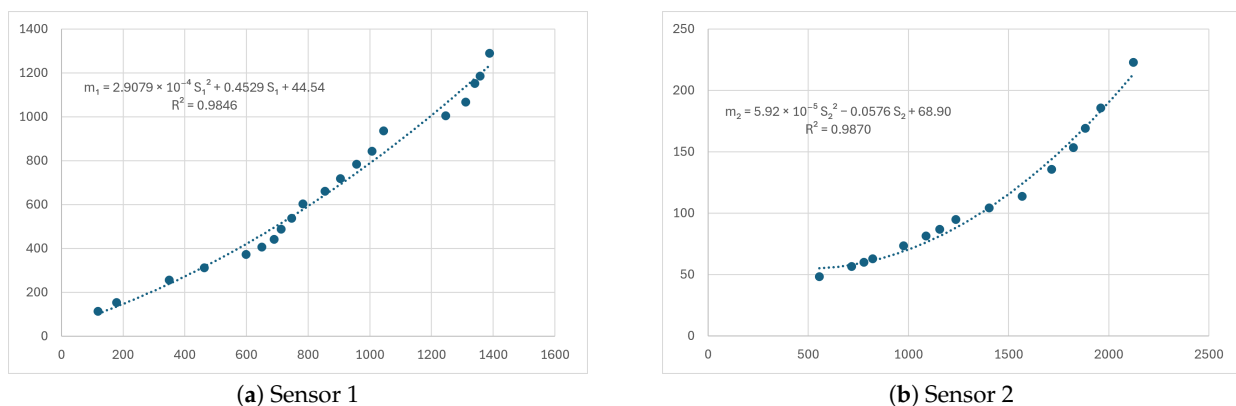


Figure 12. Calibration curves for the two FSR sensors. The markers correspond to the experimental mass–ADC data points and the dotted curves correspond to the second-order polynomial regressions used in the data-processing procedure: (a) Sensor 1; (b) Sensor 2.

2.9. Data Processing

The acquired signals were processed through the sequence ADC signal, calibrated mass, sensor force, total measured force, and equivalent mean pressure. The calibrated mass values were converted into force using

$$F_i = m_i \cdot 0.00981, \quad (7)$$

where F_i is the force in Newtons and m_i is the calibrated mass in grams.

For each angular orientation, the total measured force was calculated as

$$F_{\text{meas}}(\theta) = F_{S1}(\theta) + F_{S2}(\theta). \quad (8)$$

The equivalent mean pressure was then calculated using Equation (3) and the CAD-estimated reference area. The complete circumferential mapping procedure was repeated four times. For each angular position, the mean, sample standard deviation, and coefficient of variation were calculated from the four measurements to assess between-test repeatability.

3. Results and Discussion

3.1. Calibration Results and Data Processing

The individual calibration of the FSR sensors allowed the raw analog values acquired by the ESP32 to be converted into physical quantities for the grasping experiments. For each sensor, experimental mass–ADC pairs were obtained using the progressive water-loading procedure described in Section 2.8. As expected for FSR sensors, the response was nonlinear, which justified the use of second-order polynomial regression.

The calibration curves obtained for both sensors presented coefficients of determination above $R^2 = 0.98$, indicating that the fitted models adequately represented the sensor response within the tested operating range. During the grasping experiments, each ADC reading was converted into an equivalent mass using the corresponding calibration equation. The mass was then converted into force, and the forces measured by Sensor 1 and Sensor 2 were summed to obtain the total measured force for each angular position.

The sensors measure the resultant force transmitted through the instrumented object shell. This force represents the integral effect of the unknown distributed contact loading over the mechanically coupled region. The reported equivalent mean pressure is obtained by normalizing the resultant force by the CAD-estimated reference area of 1233.41 mm² and is used as an inferred pressure-related metric for comparison between angular positions and repeated tests.

3.2. Circumferential Contact-Force Mapping

Following the rotational mapping protocol, the contact interaction was mapped over 72 angular positions using 5° increments. Since the motor position and imposed cable displacement remained constant during the full angular sweep, the measured variations are mainly attributed to the relative angular position between the instrumented object and the deformed SpiRob gripper, rather than to changes in actuation.

Cable tension was not directly measured in this setup. Therefore, the actuation input is represented by the experimentally defined fixed motor position and the corresponding imposed cable displacement. This actuation condition deforms the SpiRob structure and generates the contact loads transmitted to the internal FSR sensors through the object shell.

The complete circumferential mapping procedure was repeated four times to evaluate the repeatability of the proposed method. The additional three repetitions were performed after discussion with the co-authors to improve data treatment and verify whether the observed circumferential behaviour was recurring. Four repetitions provide enough repeated observations to calculate a mean response, sample standard deviation, and coefficient of variation at each angular position, while keeping the manual experimental procedure feasible within a single setup configuration. Each test included 72 angular positions with increments of 5°, using the same gripper, instrumented object, acquisition system, and data-processing procedure.

The mean measured force obtained in the individual tests ranged from 8.08 N to 9.56 N, while the corresponding mean equivalent pressure ranged from 6.55 kPa to 7.75 kPa. Considering all four tests, the overall mean force was 8.88 N, corresponding to an equivalent mean pressure of approximately 7.20 kPa.

For each angular position, the mean and sample standard deviation of the four measurements were calculated. The mean between-test standard deviation was approximately 1.40 N, while the mean coefficient of variation was 16.4%. These values indicate moderate repeatability of the global circumferential contact-force pattern, together with noticeable variability in the magnitude and angular position of individual local peaks.

Table 2 summarizes the main results obtained from the four repeated mapping tests.

Figure 13 presents the four circumferential contact-force profiles together with the polar mean curve and the corresponding one-standard-deviation envelope. All tests show a non-uniform angular distribution, with recurring regions of lower and higher resultant contact force. A relatively consistent low-force region is observed between approximately 110° and 140°. Higher force values are frequently observed near the final part of the angular sweep, particularly between approximately 330° and 355°.

Table 2. Summary of the four repeated circumferential mapping tests using $A_{ref} = 1233.41 \text{ mm}^2$.

Test	Mean Force (N)	Angular SD (N)	Minimum Force (N)	Maximum Force (N)	Mean Pressure (kPa)
Test 1	8.08	1.46	4.47 at 130°	11.68 at 275°	6.55
Test 2	8.36	1.54	2.64 at 130°	10.38 at 175°	6.78
Test 3	9.56	1.78	5.28 at 125°	13.73 at 350°	7.75
Test 4	9.54	1.57	4.01 at 305°	11.98 at 355°	7.74
Overall mean	8.88	–	–	–	7.20

However, the exact angular position and magnitude of the local maxima vary between tests. Test 1 presents a pronounced maximum at 275°, whereas Tests 3 and 4 reach their highest values at 350° and 355°, respectively. The maximum force measured across all experiments was 13.73 N in Test 3 at 350°, corresponding to an equivalent mean pressure of approximately 11.13 kPa.

Figure 14 presents the mean resultant contact-force curve calculated from the four tests, together with the upper and lower limits corresponding to one sample standard deviation. The mean curve reached its minimum value near 125°, with approximately 5.78 N, corresponding to an equivalent mean pressure of approximately 4.69 kPa. Its maximum value occurred near 350°, with approximately 11.32 N, corresponding to an equivalent mean pressure of approximately 9.18 kPa.

The width of the standard-deviation envelope varies with angular position. Narrower regions indicate greater agreement between repeated measurements, whereas wider regions indicate increased sensitivity to local contact conditions and manual repositioning.

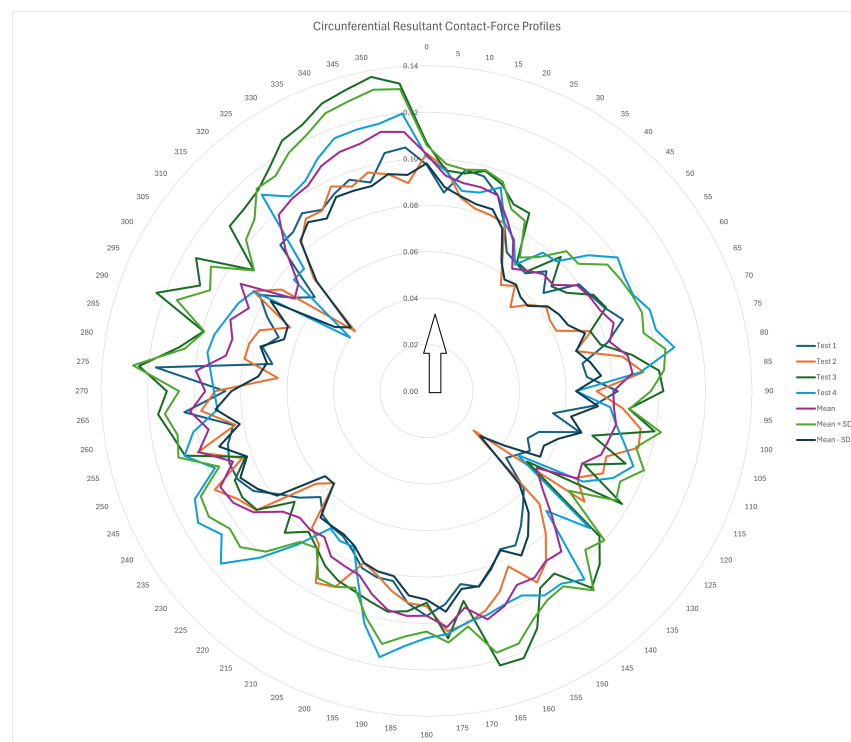


Figure 13. Circumferential resultant contact-force profiles obtained from four repeated mapping tests. The polar plot includes the individual tests, the mean curve, and the mean $\pm$ one-standard-deviation curves. The arrow indicates the initial gripper orientation relative to the polar plot; the internal FSR direction is perpendicular to this reference.

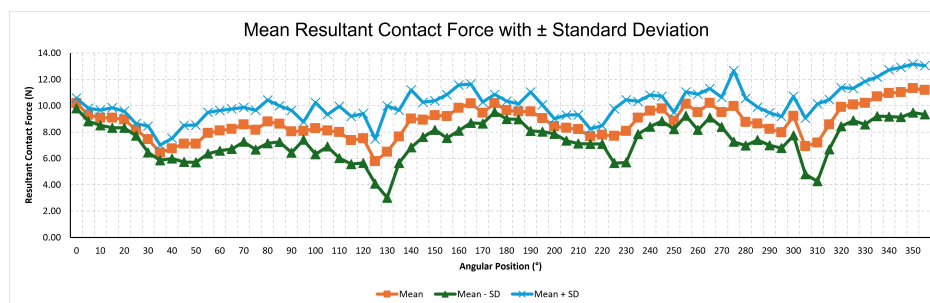


Figure 14. Mean circumferential resultant contact-force profile obtained from four repeated mapping tests. The upper and lower curves represent the mean value plus and minus one sample standard deviation at each angular position, respectively.

3.3. Discussion of Circumferential Variability and Mechanical Asymmetry

The four repeated tests consistently revealed a non-uniform circumferential contact-force signature. This behaviour is mechanically consistent with a tendon-driven compliant structure. Because the tendon is routed away from the neutral axis, cable pulling generates bending of the SpiRob gripper while also producing asymmetric transmission of internal forces along its length.

Several geometric and mechanical factors may contribute to the observed angular variation. The vertebra-like segments do not have uniform dimensions, and the thickness of the flexible regions decreases progressively from the proximal base towards the distal tip. Consequently, the local bending stiffness and deformation response vary along the gripper. Friction between the tendon and the internal routing channels may also produce tension losses and uneven force transmission between proximal and distal regions.

In addition, contact does not occur continuously and uniformly over the complete gripper surface. Individual segments may contact the cylindrical object with different orientations, effective contact areas, and local normal directions. As the instrumented object is rotated relative to the fixed deformed gripper, different combinations of segments become mechanically aligned with the internal sensing regions. This produces angular variations in the resultant normal force transmitted through the object shell.

The exact magnitude and angular position of the maximum force varied between repeated tests. Test 1 presented a pronounced maximum at 275°, whereas Tests 3 and 4 reached their highest values near 350° and 355°, respectively. This variation indicates that isolated peaks are sensitive to small differences in object repositioning, local friction, initial alignment, and segment-level contact conditions.

Therefore, individual maxima should not be interpreted as fixed local contact-intensity concentrations occurring at precisely the same angular position in every test. The more robust experimental result is the consistent presence of a non-uniform global circumferential contact-force signature. The method is thus better suited to identifying general angular regions of higher and lower contact intensity than to locating spatially exact and perfectly repeatable contact-intensity peaks.

3.4. Experimental Limitations

The proposed methodology provides a practical way to estimate the circumferential variation in resultant contact force and equivalent mean pressure. However, several limitations should be acknowledged.

First, the measurements rely on FSR sensors, which are known to present nonlinear behaviour, hysteresis, drift, and sensitivity to loading conditions. Although individual calibration curves were obtained for each sensor, the sensor response may still be affected by time-dependent effects, local load distribution, and small variations in how the force

is transmitted through the object shell. Therefore, the measured force values should be interpreted as calibrated estimates rather than absolute force references.

Second, the angular positioning was performed manually using the 3D-printed indexing disk. The angular uncertainty was estimated as $\pm 2.5^\circ$, corresponding to half of the 5° angular increment. Manual repositioning may also introduce small variations due to friction between the gripper and the object, slight changes in local contact conditions, or small disturbances during rotation.

Third, the spatial resolution of the system is limited by the use of two internal sensing elements. The method does not spatially resolve interface loading peaks over the contact surface. Instead, it provides resultant transmitted forces and equivalent mean pressures for each angular orientation. Consequently, the reported values should be interpreted as experimentally inferred pressure-related indicators of circumferential contact-force variation.

Finally, although four repeated mapping runs were performed, the present results remain specific to one gripper design, one instrumented object geometry, and one nominal actuation condition. Additional experiments with controlled cable displacement, different object diameters, surface materials, and gripper configurations are required to assess the broader applicability of the method. Future finite element analysis of the instrumented semi-cylinder would also help quantify how shell stiffness, material, and infill affect load transfer from the external curved surface to the internal flat sensing pad. Direct cable-tension measurement, deformation tracking, and additional sensing elements would further improve the interpretation of the actuation–deformation–contact relationship.

4. Conclusions

This work presented a low-cost experimental methodology for estimating the circumferential variation in resultant contact force and equivalent mean pressure in a cable-driven SpiRob soft gripper. The study represents a first experimental step towards understanding the relationship between cable-driven actuation, structural deformation, contact-force generation, and pressure-related behaviour.

The instrumented cylindrical object was used as an angular scanning probe. Under a nominally fixed actuation condition, four complete mapping tests were performed over 72 angular positions with 5° increments. This allowed the circumferential force pattern and the between-test variability to be evaluated.

Across the four tests, the mean resultant contact force ranged from 8.08 N to 9.56 N, while the mean equivalent pressure ranged from 6.55 kPa to 7.75 kPa. The overall mean force was 8.88 N, corresponding to an equivalent mean pressure of approximately 7.20 kPa. The maximum force measured across all tests was 13.73 N at 350° , corresponding to an equivalent mean pressure of approximately 11.13 kPa.

The mean circumferential curve reached its minimum near 125° , with approximately 5.78 N and 4.69 kPa, and its maximum near 350° , with approximately 11.32 N and 9.18 kPa. The mean between-test standard deviation was approximately 1.40 N, and the mean coefficient of variation was 16.4%.

The repeated measurements consistently showed a non-uniform circumferential contact-force signature. However, the exact magnitude and angular position of local maxima varied between tests. Therefore, the method should be interpreted as a tool for characterizing the global angular variation in resultant contact force and equivalent mean pressure, rather than for spatially resolving interface loading peaks.

The main contribution of this work is the experimental methodology itself. It provides a reproducible and computationally lightweight approach for studying the gripper–object interaction without requiring embedded sensing structures or detailed finite element models. Future work should include direct cable-tension measurements, controlled cable

displacement, deformation tracking, additional sensing points, and experiments with different object geometries and materials.

Author Contributions: Conceptualization, P.E.C.M., C.M.A.V., M.J.C.T. and A.M.S.C.; methodology, P.E.C.M. and C.M.A.V.; software, P.E.C.M.; validation, P.E.C.M. and C.M.A.V.; investigation, P.E.C.M., C.M.A.V., A.M.S.C. and M.J.C.T.; resources, C.M.A.V. and A.M.S.C.; writing—original draft preparation, P.E.C.M.; writing—review and editing, P.E.C.M., C.M.A.V. and A.M.S.C.; funding acquisition, C.M.A.V. and A.M.S.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors gratefully acknowledge the funding provided by the Foundation for Science and Technology (FCT), Portugal, through the Research Unit in Materials, Energy and Environment for Sustainability (proMetheus) at the Polytechnic Institute of Viana do Castelo (IPVC), Viana do Castelo, Portugal, and through the Centre for Mechanical Technology and Automation (TEMA) at the University of Aveiro, Aveiro, Portugal. Additional support was provided within the scope of the project “Agenda DRIVOLUTION: Transition to the Factory of the Future” (project no. C632394276-00466981; operation code 02/C05-i01.02/2022.PC644913740-00000022), under the Agendas/Mobilizing Alliances for Reindustrialization initiative of the Portuguese Recovery and Resilience Plan (PRR).

Data Availability Statement: The data presented in this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

- Shintake, J.; Cacucciolo, V.; Floreano, D.; Shea, H. Soft Robotic Grippers. *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1707035. [CrossRef] [PubMed]
- AboZaid, Y.A.; Aboelrayat, M.T.; Fahim, I.S.; Radwan, A.G. Soft robotic grippers: A review on technologies, materials, and applications. *Sens. Actuators A Phys.* **2024**, *372*, 115380. [CrossRef]
- Qu, J.; Yu, Z.; Tang, W.; Xu, Y.; Mao, B.; Zhou, K. Advanced Technologies and Applications of Robotic Soft Grippers. *Adv. Mater. Technol.* **2024**, *9*, 2301004. [CrossRef]
- Goh, G.D.; Goh, G.L.; Lyu, Z.; Ariffin, M.Z.; Yeong, W.Y.; Lum, G.Z.; Campolo, D.; Han, B.S.; Wong, H.Y.A. 3D Printing of Robotic Soft Grippers: Toward Smart Actuation and Sensing. *Adv. Mater. Technol.* **2022**, *7*, 2101672. [CrossRef]
- Yang, Y.; Jin, K.; Zhu, H.; Song, G.; Lu, H.; Kang, L. A 3D-Printed Fin Ray Effect Inspired Soft Robotic Gripper with Force Feedback. *Micromachines* **2021**, *12*, 1141. [CrossRef] [PubMed]
- Cong, Q.; Fan, W.; Zhang, D. TacFR-Gripper: A Reconfigurable Fin-Ray-Based Gripper with Tactile Skin for In-Hand Manipulation. *Actuators* **2024**, *13*, 521. [CrossRef]
- Wu, Q.; Yi, Z.; Wang, H.; Yuan, H. Design and Experiment of a Soft Gripper Based on Cable-Driven Continuum Structures. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Sanya, China, 27–31 December 2021*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021; pp. 637–642. [CrossRef]
- Mawah, S.C.; Park, Y.J. Tendon-Driven Variable-Stiffness Pneumatic Soft Gripper Robot. *Robotics* **2023**, *12*, 128. [CrossRef]
- Wang, Z.; Freris, N.M.; Wei, X. SpiRobs: Logarithmic spiral-shaped robots for versatile grasping across scales. *Device* **2025**, *3*, 100646. [CrossRef]
- Jin, J.; Wang, S.; Zhang, Z.; Mei, D.; Wang, Y. Progress on flexible tactile sensors in robotic applications on objects properties recognition, manipulation and human-machine interactions. *Soft Sci.* **2023**, *3*, 8. [CrossRef]
- Hegde, C.; Su, J.; Tan, J.M.R.; He, K.; Chen, X.; Magdassi, S. Sensing in Soft Robotics. *ACS Nano* **2023**, *17*, 15277–15307. [CrossRef] [PubMed]
- Pagoli, A.; Chapelle, F.; Corrales-Ramon, J.-A.; Mezouar, Y.; Lapusta, Y. Large-Area and Low-Cost Force/Tactile Capacitive Sensor for Soft Robotic Applications. *Sensors* **2022**, *22*, 4083. [CrossRef] [PubMed]
- Park, J.; Jung, D.; Lee, Y.; Park, D.; Choi, J.; Kim, U. Tactile Sensor Integrated Fingertip Capable of Detecting Precise Contact Force for Robotic Grippers. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2025**, *72*, 5105–5115. [CrossRef]
- Shang, S.; Seo, M.; Zhu, Y.; Chin, L. FORTE: Tactile Force and Slip Sensing on Compliant Fingers for Delicate Manipulation. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **2026**, *11*, 4473–4480. [CrossRef]
- Deng, Z.; Jonetzko, Y.; Zhang, L.; Zhang, J. Grasping Force Control of Multi-Fingered Robotic Hands through Tactile Sensing for Object Stabilization. *Sensors* **2020**, *20*, 1050. [CrossRef] [PubMed]
- Mohammadi, V.; Shahbad, R.; Hosseini, M.; Gholampour, M.H.; Shiry Ghidary, S.; Najafi, F.; Behboodi, A. Development of a Two-Finger Haptic Robotic Hand with Novel Stiffness Detection and Impedance Control. *Sensors* **2024**, *24*, 2585. [CrossRef] [PubMed]

<https://doi.org/10.3390/engproc2026145009>

17. Wen, R.; Yuan, K.; Wang, Q.; Heng, S.; Li, Z. Force-Guided High-Precision Grasping Control of Fragile and Deformable Objects Using sEMG-Based Force Prediction. *IEEE Robot. Autom. Lett.* **2020**, *5*, 2762–2769. [[CrossRef](#)]
18. Rao, P.; Peyron, Q.; Lilge, S.; Burgner-Kahrs, J. How to Model Tendon-Driven Continuum Robots and Benchmark Modelling Performance. *Front. Robot. AI* **2021**, *7*, 630245. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Ashwin, K.P.; Mahapatra, S.K.; Ghosal, A. Profile and Contact Force Estimation of Cable-Driven Continuum Robots in Presence of Obstacles. *Mech. Mach. Theory* **2021**, *164*, 104404. [[CrossRef](#)]
20. Grady, P.; Collins, J.A.; Brahmabhatt, S.; Twigg, C.D.; Tang, C.; Hays, J.; Kemp, C.C. Visual Pressure Estimation and Control for Soft Robotic Grippers. *arXiv* **2022**, arXiv:2204.07268. [[CrossRef](#)]
21. Collins, J.A.; Houff, C.; Grady, P.; Kemp, C.C. Visual Contact Pressure Estimation for Grippers in the Wild. In *Proceedings of the 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Detroit, MI, USA, 1–5 October 2023; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2023; pp. 10947–10954. [[CrossRef](#)]
22. Kitamura, T.; Matsushita, K.; Nakatani, N.; Tsuchiyama, S. Development and Investigation of a Grasping Analysis System with Two-Axis Force Sensors at Each of the 16 Points on the Object Surface for a Hardware-Based FinRay-Type Soft Gripper. *Sensors* **2024**, *24*, 4896. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.