



Felipe dos Santos Scofano

**Desenvolvimento de um Elo Pneumático de
3 Graus de Liberdade para Manipuladores
Robóticos Flexíveis**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro



Felipe dos Santos Scofano

**Desenvolvimento de um Elo Pneumático de
3 Graus de Liberdade para Manipuladores
Robóticos Flexíveis**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Prof. Mauro Speranza Neto

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

D.Sc. Ricardo Rodrigues da Cunha Pinto

PETROBRAS

M.Sc. Alander Ornellas Machado

PETROBRAS

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 18 de abril de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Felipe dos Santos Scofano

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação, com ênfase em elétrica, na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro). Desenvolve projetos vinculados a área de robótica.

Ficha Catalográfica

Scofano, Felipe dos Santos

Desenvolvimento de um elo pneumático de 3 graus de liberdade para manipuladores robóticos flexíveis / Felipe dos Santos Scofano; orientador: Marco Antonio Meggiolaro. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

200 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Manipulador de longo alcance. 3. Elo flexível. 4. Músculo pneumático. I. Meggiolaro, Marco Antonio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

aos meus pais, Iara e Pedro Paulo

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Marco Antonio Meggiolaro pela parceria e apoio para a realização deste trabalho.

Ao Professor Mauro Speranza pela confiança e reconhecimento.

Ao CNPq, à PUC-Rio e à PETROBRAS, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu amigo Felipe Belo por todo o apoio, companheirismo e cumplicidade.

Aos meus amigos Rodrigo Carvalho e Ilana Nigri por toda a colaboração.

Aos meus pais, pelo amor, pela educação, pelo apoio, atenção e carinho de todas as horas.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Scofano, Felipe dos Santos. **Desenvolvimento de um Elo Pneumático de 3 Graus de Liberdade para Manipuladores Robóticos Flexíveis**. Rio de Janeiro, 2006. 200p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Recentemente, grande interesse tem se voltado na robótica para o conceito de manipuladores flexíveis. Estes dispositivos apresentam uma coluna vertebral deformável continuamente, em oposição aos tradicionais manipuladores robóticos elo/junta/elos com elos rígidos. Sistemas flexíveis oferecem um aumento em potencial da capacidade de interação com o ambiente, estando aptos a se ajustarem às limitações do meio através de sua deformação. Robôs flexíveis oferecem possibilidades atrativas para o uso em diversas aplicações, como em posicionamento em ambientes complexos com obstáculos, endoscópios ativos, e manuseamento de materiais frágeis. O uso de polímeros, em particular elastômeros, tem sido explorado nestes manipuladores para promover simplicidade de operação e menor rigidez, necessária para uma interação homem-máquina com maior segurança. Usufruindo-se destes conceitos, esta dissertação aborda o desenvolvimento de um manipulador pneumático flexível de longo alcance. O manipulador é composto por uma estrutura modular, formada por vários elos ligados serialmente, permitindo que em sua extremidade sejam acopladas ferramentas que auxiliem a execução de diferentes tarefas. O sistema é baseado em um atuador pneumático denominado Músculo Artificial Pneumático (Pneumatic Artificial Muscles, PAM). Ao serem pressurizados, estes dispositivos se contraem, exercendo uma força em sua extremidade proporcional à pressão aplicada. A movimentação do manipulador desenvolvido é obtida a partir da diferença de pressão entre câmaras independentes localizadas em seu interior. Modelos analíticos dos sistemas desenvolvidos foram elaborados. O controle do manipulador é feito a partir de servoválvulas pneumáticas controladas por computador. Experimentos foram realizados para verificar os modelos desenvolvidos. O sistema desenvolvido pode ser aplicado à tarefa de inspeção interna de reservatórios de combustíveis. Inspeções internas atualmente requerem um completo esvaziamento do reservatório, se tornando muito trabalhosas e resultando em altos custos. Uma versão do manipulador é adaptada para executar esta tarefa sem a necessidade de esvaziar os tanques, devido à segurança intrínseca do sistema pneumático.

Palavras-chave

Manipulador de longo alcance, elo flexível, músculo pneumático artificial

Abstract

Scofano, Felipe dos Santos. **Development of a Three Degree-of-Freedom Pneumatic Link for Flexible Robotic Manipulators**. Rio de Janeiro, 2006. 200p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Recently, the concept of flexible manipulators has attract great interest. These devices present a continuously deforming vertebral column, in opposition to the traditional robotic manipulators link/joint/link with rigid links. Flexible systems offer a potential increase in the capacity of interaction with the environment, being apt to adjust itself to the constraints through its deformation. Flexible robots offer attractive possibilities for usage in many applications, as complex environments positioning with active obstacles, endoscopies, and manipulating fragile materials. Polymers, specially elastomers, have been explored in these manipulators to guarantee simple operation and minor rigidity, necessary for a higher security man-machine interaction. Making a good use of these conceptions, this dissertation presents the development of a long-reach flexible pneumatic manipulator. The manipulator is composed of a modular structure, formed by links attached serially, allowing tools to be connected in its end-point for assistance in different tasks. The system is based on a pneumatic actuator called Pneumatic Artificial Muscle (PAM). When pressurized, these devices contract themselves, exerting a proportional force in its end-points proportional to the applied pressure. The manipulator's motion is obtained from the pressure difference between the independent chambers located in its interior. Developed systems analytical models have been elaborated. Pneumatic valves, commanded by computer, control the manipulator. Experiments have been carried through to test the developed models. The developed system can be applied to internal inspection of fuel tanks. Internal inspections currently require a complete tank ullage, becoming very laborious and resulting in high costs. A manipulator's version is adapted to execute this task in a full fueled tank, due to intrinsic security of the pneumatic system.

Keywords

Long-reach manipulator, flexible link, artificial pneumatic muscle

Sumário

1	Introdução	17
1.1.	Motivação	19
1.2.	Objetivo	21
1.3.	Organização da Tese	22
2	Sistemas Robóticos Flexíveis	23
2.1.	Princípios de Atuação	23
2.2.	Sistemas Existentes	26
2.3.	Músculos Pneumáticos Artificiais	32
2.3.1.	Propriedades	33
2.3.2.	Tipos de Músculos	37
2.3.3.	Aplicações	47
3	Concepção e Modelagem do Sistema	48
3.1.	Mangueiras sem Reforço	51
3.1.1.	Modelagem	52
3.1.2.	Experimento	57
3.2.	Mangueiras Reforçadas por Anéis	59
3.2.1.	Modelagem	59
3.2.2.	Experimento	65
3.3.	Mangueiras Reforçadas por Fios	73
3.3.1.	Modelagem	74
3.3.2.	Experimento	75
3.4.	Músculo MAS-10 da FESTO	77
3.4.1.	Experimentos	79
3.5.	Montagem dos Elos	81
3.5.1.	Modelo 3D	81
3.5.2.	Desenvolvimento de Espaçadores	85
3.5.3.	Elo com Corrugado	107

4	Resultados Experimentais com o Manipulador	112
4.1.	Montagem do sistema	112
4.2.	Modelagem	119
4.3.	Resultados Experimentais	123
5	Aplicação em Inspeção de Tanques de Combustível	126
5.1.	Sistemas de Inspeção Existentes	126
5.2.	Descrição do Sistema	127
5.3.	Tipos de Tanques	129
5.3.1.	Tanques de Teto Fixo (Fixed Roof)	130
5.3.2.	Tanques de Teto Móvel (<i>Lifting Roof</i>)	132
5.3.3.	Tanques de Teto Fixo com Diafragma Flexível (<i>Diaphragm</i>)	132
5.3.4.	Tanques de Teto Flutuante (Floating-Roof)	133
5.3.5.	Tanques de Postos de Serviço	138
5.3.6.	Bocais e Acessórios	139
5.4.	Aplicação	145
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	146
6.1.	Contribuições neste Trabalho	146
6.2.	Sugestões para Trabalhos Futuros	149
	Referências bibliográficas	150
	ANEXO	153

Lista de figuras

Figura 1: Esquema ilustrando a construção dos dedos de borracha	24
Figura 2: Esquema do prendedor macio	25
Figura 3: Esquema do <i>rubbertuator</i> fabricado pela <i>Bridgestone</i>	25
Figura 4: Músculo pneumático MAS da FESTO, disponível em três diâmetros, 10, 20 e 40mm	26
Figura 5: Robô contínuo tipo tentáculo	27
Figura 6: Garra hidráulica do manipulador AMADEUS	28
Figura 7: Fole cilíndrico de metal corrugado; pressão interna causando expansão longitudinal	29
Figura 8: Tentáculo KSI	29
Figura 9: Dedos de borracha atuados pneumáticamente segurando e apertando objetos	30
Figura 10: Robô <i>AirBug</i> com atuadores MAS-20 da FESTO	31
Figura 11: Braço pneumático com atuadores MAS-10 da FESTO	31
Figura 12: Braço protético com músculos de <i>McKibben</i>	32
Figura 13: Diagrama isobárico de força-contração do Músculo Artificial Pneumático	34
Figura 14: Tubo reforçado com malha de fibras trançadas	39
Figura 15: Músculo Trançado (Músculo de <i>McKibben</i>)	39
Figura 16: Músculo com Pregas; totalmente esticado e inflado	40
Figura 17: Músculo de Yarlott	41
Figura 18: ROMAC, versão padrão (a) e versão em miniatura (b)	42
Figura 19: Músculo de <i>Kukolj</i>	43
Figura 20: Diferentes <i>protejos</i> do Músculo de <i>Morin</i> de acordo com a pressão utilizada; (a) <i>protejo</i> para sobrepressão (vista do corte transversal longitudinal), (b) <i>protejo</i> para subpressão e (c) com membranas concêntricas	44
Figura 21: Músculo do tipo Baldwin	45
Figura 22: Músculo Paynter Hiperbólico	46
Figura 23: Torção de Kleinwachter	47

Figura 24: Representação de um elo do manipulador composto por duas câmaras	48
Figura 25: Modelo 2D do manipulador pneumático com 3 elos em série, sendo a posição da sua extremidade representada pelas coordenadas x_e , y_e e α_e	49
Figura 26: Elo do manipulador aproximado por um arco de círculo	49
Figura 27: Mangueiras flexíveis diversas	52
Figura 28: Mangueira sem pressão	52
Figura 29: Mangueira pressurizada	53
Figura 30: Perfil da mangueira com parede fina	53
Figura 31: Forças resultantes geradas pela tensão axial	53
Figura 32: Forças resultantes geradas pela tensão circunferencial	54
Figura 33: Perfil da mangueira com parede grossa	56
Figura 34: Ruptura da mangueira de silicone pelo excesso de pressão aplicada	58
Figura 35: Mangueira de silicone pressurizada reforçada com anéis circulares	59
Figura 36: Tensões radiais presentes na mangueira	60
Figura 37: Anéis reforçando a mangueira, espaçados de uma distância Δx	63
Figura 38: Tensões agindo sobre o anel	63
Figura 39: Anéis flexíveis	66
Figura 40: Mangueira de silicone com os anéis flexíveis	66
Figura 41: Comprimento da mangueira de silicone com anéis flexíveis em função da pressão interna inserida	67
Figura 42: Escorregamento dos anéis durante a pressurização da mangueira	68
Figura 43: Anéis cortados a partir de uma mangueira rígida reforçada com fibras	69
Figura 44: Desenho em corte longitudinal da área deformável (em azul) da mangueira em função do tipo de anel, circular ou quadrado	70
Figura 45: Anéis rígidos	70
Figura 46: Mangueira de silicone montada com anéis rígidos	71
Figura 47: Anéis rígidos amontoados durante a curvatura da mangueira	72
Figura 48: Mangueira de silicone montada com anéis rígidos e flexíveis intercalados	73

Figura 49: Anéis rígidos e flexíveis durante a curvatura da mangueira	73
Figura 50: Ilustração da deformação de uma mangueira envolta por um fio	74
Figura 51: Mangueira de silicone envolta pelo fio rígido de polipropileno	75
Figura 52: Deformação axial da mangueira reforçada com o fio de polipropileno	76
Figura 53: Músculo pneumático MAS-20 da FESTO, totalmente contraído na parte superior da figura e no seu comprimento inicial na parte inferior	77
Figura 54: Diagrama da faixa de operação do MAS -10	78
Figura 55: Montagem do experimento com o músculo	79
Figura 56: Gráfico da faixa de operação do MAS-10 a partir dos dados experimentais	80
Figura 57: Gráfico comparativo entre as curvas fornecidas pelo fabricante e os dados experimentais	80
Figura 58: Esquema de um elo do manipulador com as suas três câmaras independentes	82
Figura 59: Modelo analítico de cada elo	83
Figura 60: 1ª Geração, mangueiras siliconadas presas com cola de poliuretano reforçadas com abraçadeiras	86
Figura 61: 1ª Geração, outra vista	86
Figura 62: Extremidades das mangueiras, fechadas com espigões e presas através de abraçadeiras	87
Figura 63: Desenho de um corte em perfil da 1ª geração	87
Figura 64: 2ª Geração, mangueiras de silicone revestidas com cola de poliuretano	88
Figura 65: Desenho de um corte em perfil da 2ª geração	88
Figura 66: 3ª Geração, mangueiras de silicone reforçadas com fio de polipropileno, revestidas com cola de poliuretano	89
Figura 67: Rompimento da cola de poliuretano devido à força exercida pelos músculos	90
Figura 68: Desenho de um corte em perfil da 3ª geração	90
Figura 69: 4ª Geração, mangueiras de silicone reforçadas com anéis flexíveis de butadieno-acrilonitrila, agrupadas com abraçadeiras	91

Figura 70: Desenho de um corte em perfil da 4ª geração	92
Figura 71: Espaçadores de Fenolite	92
Figura 72: 4ª Geração, mangueiras de silicone reforçadas com anéis flexíveis e rígidos, agrupadas com espaçadores de Fenolite	93
Figura 73: Desenho de um corte em perfil da 4ª geração com anéis rígidos (representados pelos círculos amarelo, verde e azul) e com o espaçador de Fenolite	93
Figura 74: 5ª Geração, músculos MAS -10 da FESTO revestidos com fita flexível	95
Figura 75: Conexões dos MAS -10	95
Figura 76: Desenho de um corte em perfil da 5ª geração	96
Figura 77: Amostra do espaçador feito de mangueiras siliconadas	96
Figura 78: 6ª Geração, músculos MAS -10 com espaçador de mangueira siliconada, revestidos com fita flexível	97
Figura 79: 6ª Geração, músculos MAS -10 com espaçador de mangueira siliconada, revestidos com fita flexível	98
Figura 80: Desenho de um corte em perfil da 6ª geração	98
Figura 81: Flambagem de um dos músculos devido à pressão interna muito baixa	98
Figura 82: Comparação entre a curvatura do elo e um círculo de raio R	99
Figura 83: Espaçador rígido de polipropileno (branco) e espaçador flexível de silicone (preto)	100
Figura 84: Desenho do espaçador com as suas funções	100
Figura 85: 7ª Geração, músculos MAS-10 com espaçadores de polipropileno e de silicone intercalados	101
Figura 86: Movimentação desordenada dos músculos no interior dos espaçadores gerando formas aleatórias.	102
Figura 87: Desenho de um corte em perfil da 7ª geração	102
Figura 88: Demonstração da baixa rigidez axial do elo	103
Figura 89: Dimensões do termo retrátil	104
Figura 90: Montagem do termo retrátil no elo	104
Figura 91: Comparação entre a curvatura do elo e um círculo representando a curvatura de gerações anteriores sob mesma	

diferença de pressão	105
Figura 92: Montagem da atadura elástica no elo, com espaçadores internos siliconados	106
Figura 93: Elo revestido com atadura elástica com acabamento de tubo termo-retrátil	106
Figura 94: Comparação entre a curvatura de protótipos iguais com revestimentos diferentes (do menor ao maior raio: elo sem revestimento, revestido com atadura elástica e revestido com tubo termo-retrátil)	107
Figura 95: Mangueira de poliuretano revestida com fio de aço cobreado	108
Figura 96: Tubo corrugado de PTFE	109
Figura 97: Tubo corrugado de PTFE com suas dimensões características	109
Figura 98: Mangueira de PVC modelo KV	110
Figura 99: Elo reforçado com mangueira de poliuretano externa	111
Figura 100: Detalhe da mangueira de poliuretano externa	111
Figura 101: Protótipo final utilizado nos experimentos com as servo-válvulas	113
Figura 102: Protótipo final; detalhe da montagem com a mangueira de poliuretano reforçada	113
Figura 103: Válvula proporcional controlada por tensão (Bosch-Rexroth)	115
Figura 104: Compressor CSI 7,4/50 (SCHULZ)	115
Figura 105: Placa <i>ISA Bus Servo I/O Card</i> utilizada nos experimentos	116
Figura 106: Interface do programa de controle desenvolvido em LabView	117
Figura 107: Bancada de experimento	118
Figura 108: Equipamentos utilizados nos experimentos (da esquerda para a direita – servoválvulas, fonte de alimentação e o sistema manual de válvulas)	118
Figura 109: Aproximação da curvatura do elo por um arco de círculo	119
Figura 110: Corte transversal do elo, com os músculos pneumáticos em preto e o espaçador em azul	121
Figura 111: Obtenção de medidas da extremidade do manipulador	124
Figura 112: Esquema do manipulador em operação no interior de um reservatório de combustível	128

Figura 113: Tanques de armazenamento	129
Figura 114: Teto cônico suportado. Componentes da estrutura de sustentação. Vigas radiais, vigas transversais e colunas	130
Figura 115: Teto fixo cônico	131
Figura 116: Teto fixo curvo	131
Figura 117: Teto fixo em gomos	132
Figura 118: Teto móvel	133
Figura 119: Teto flutuante simples	134
Figura 120: Teto flutuante com flutuador	135
Figura 121: Teto flutuante <i>Buoyroof</i>	135
Figura 122: Teto flutuante duplo	136
Figura 123 Tanques de posto de serviço	138
Figura 124: Tanque e acessórios -Terminologia	141
Figura 125: Escotilhas de medição	143
Figura 126: Desenho esquemático de um tanque jaquetado, pleno, com seus bocais e acessórios	144

Lista de tabelas

Tabela 1: Comprimento da mangueira de silicone em função da pressão interna inserida	67
Tabela 2: Comprimento da mangueira de silicone em função da pressão interna inserida	71
Tabela 3: Dados experimentais do MAS-10	80
Tabela 4: Comprimento do elo em função da pressão interna inserida	94
Tabela 5: Especificações técnicas do termo retrátil	104
Tabela 6: Especificações da mangueira de poliuretano	108
Tabela 7: Especificações do tubo de PTFE	109
Tabela 8: Especificações da mangueira de PVC Kanaflex KV	110
Tabela 9: Principais características da válvula proporcional	114
Tabela 10: Principais características do compressor	115
Tabela 11: Posicionamento <i>xy</i> da extremidade do manipulador	125
Tabela 12: Tipo de tanque em função do produto armazenado	137
Tabela 13: Capacidade e dimensões de tanque	139
Tabela 14: Bocas de visita, portas de limpeza e drenos de fundo dos tanques	142