



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

Rio de Janeiro, abril de 2006



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/elo 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 constrants 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 xy 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

1 Introdução

Em muitas aplicações em engenharia se faz necessário o uso de sistemas de inspeção e manutenção operados remotamente. Exemplos de tais operações são o reparo de torres de alta tensão de linhas de transmissão, inspeção de tanques de armazenamento subterrâneos, reparo de pontes e manutenção de sistemas espaciais. Devido a problemas relacionados ao acesso e a periculosidade destes locais, são necessárias máquinas que possam carregar sensores, sistemas de medição, ferramentas ou até mesmo pequenos manipuladores até as proximidades das posições onde determinada tarefa deve ser realizada. Uma classe promissora de sistemas capazes de serem inseridos nestas aplicações são os manipuladores de longo alcance.

Um manipulador de longo alcance consiste em uma estrutura de posicionamento de grande volume de trabalho, capaz de carregar uma ferramenta ou um pequeno manipulador. A estrutura de longo alcance levaria o acessório (acoplado à sua extremidade) até as proximidades do local de realização da tarefa e manteria as suas juntas imóveis para que a mesma fosse executada. No entanto, por serem estruturas tão grandes e rígidas, estes dispositivos acabam apresentando algumas desvantagens: são extremamente pesados, tanto a sua fabricação como a sua manutenção envolvem equipamentos e materiais dispendiosos, e qualquer tarefa que englobe esses sistemas acaba sendo difícil de ser realizada devido às suas características físicas. Transformar a estrutura rígida dos manipuladores de longo alcance em estruturas flexíveis poderia acrescentar ao sistema inúmeras vantagens.

Recentemente, muito interesse tem se voltado na robótica para o novo conceito de “manipuladores contínuos” (Robinson & Davids, 1999). Estes dispositivos “invertebrados” apresentam uma coluna vertebral deformável continuamente, em oposição aos tradicionais manipuladores robóticos elo/junta/elo com estrutura “vertebrada”, apresentando elos rígidos. Arquiteturas contínuas oferecem um aumento em potencial no que diz respeito à interação com o ambiente, estando apto a se ajustar às limitações do meio através de sua

deformação. Robôs flexíveis contínuos (Davies, 1996) oferecem possibilidades atrativas para o uso em diversas aplicações. Esses dispositivos oferecem naturalmente uma segurança passiva durante imprecisões em movimentos realizados, dispondo de um mínimo de partes móveis. Algumas outras áreas com potencial aplicação desses dispositivos são, por exemplo, em defesa civil, posicionamento em volumes de trabalho com obstáculos como construções desmoronadas, manuseamento de materiais frágeis, medicina (endoscópios ativos), pesquisa espacial, inspeção de ambientes perigosos e/ou de difícil acesso, dentre outras.

O estudo do material utilizado se faz necessário durante o desenvolvimento de estruturas flexíveis e contínuas. Materiais de baixa rigidez como elastômeros começam a ser amplamente estudados com a finalidade de implantá-los no projeto do robô. A vantagem principal seria a simplicidade do mecanismo, resultando em segurança e em menor custo. Elastômeros também proporcionam uma deformação contínua, por exemplo, dedos obedientes que podem se deformar para se ajustarem às formas de diferentes objetos. Uma mão de borracha pneumática com dedos de borracha flexíveis seria um exemplo de um sistema flexível, possuindo muitas vantagens (Suzumori et al, 1992). Uma delas é poder segurar objetos com diferentes formas e rigidez com estabilidade. Outra vantagem é possibilitar que uma força excessiva não seja aplicada ao objeto seguro devido à flexibilidade do sistema: o objeto pode ser gentilmente seguro. Dessa forma, essa maneira “suave” de mover-se é útil para o desenvolvimento de um robô mais amigável com os humanos, podendo prover diversos serviços (Kazerooni, 1995). Além disso, se as deformações sofridas pelos dedos puderem ser medidas facilmente, seria possível reconhecer o tamanho do objeto. Um sensor tátil poderia detectar a posição e a força de contato para reconhecer a sua dureza e o seu formato. Portanto, uma mão pneumática feita de elastômeros poderia ser usada para classificar diversos tipos de peças sem necessitar de sistemas visuais caros. A partir dessas idéias, não somente os materiais começam a se tornar alvo de estudos mais aprofundados que visam à eficiência desses novos sistemas propostos, como também a forma com que esses sistemas serão atuados.

Atuadores pneumáticos, normalmente cilindros, são amplamente utilizados na indústria automatizada. Ultimamente, a robótica também se utiliza da pneumática como a principal fonte de potência para gerar movimento. Uma das

atrações principais com relação à pneumática é o baixo peso e o comportamento flexível natural dos seus atuadores. Essa flexibilidade é devida à compressibilidade do ar e, como tal, poder ser influenciada pelo controle da pressão de operação. Esta é uma característica importante sempre que existe a interação entre homem e máquina ou quando operações delicadas devem ser executadas (e.g. segurar objetos frágeis). Graças a essa flexibilidade, um contato suave e uma interação segura podem ser facilmente garantidos. Movimentos conduzidos por forças elétricas ou hidráulicas, em contrapartida, possuem um comportamento muito rígido e somente podem atuar de uma maneira mais flexível através de estratégias de controle complexas. Muitos tipos de atuadores pneumáticos – e.g. cilindros, foles, motores pneumáticos e até motores de passo pneumáticos – são comumente utilizados hoje em dia. Um tipo menos conhecido é chamado de Músculo Artificial Pneumático (*Pneumatic Artificial Muscles, PAMs*). Estes são de fato foles inversos, isto é, eles se contraem enquanto inflam. Sua força não depende somente da pressão mas também do estado de contração. Eles são extremamente leves devido ao seu principal elemento se tratar de uma membrana e, ainda, eles podem transferir a mesma quantidade de energia de um cilindro que opere com a mesma faixa de pressão e volume. Músculos que trabalham com fluidos possuem a vantagem de exercerem elevadas forças se comparadas ao tamanho e ao peso do atuador. Além disso, eles alcançam velocidades relativamente altas durante a contração, assim como uma eficiência alta vinculada à energia (Chou & Hannaford, 1996). Por estas razões, eles carregam um enorme potencial se aplicados em robôs flexíveis e robôs móveis potentes, onde eles ainda têm vantagens adicionais, como conexões diretas, fácil substituição (modularidade) e operação segura.

1.1. Motivação

Uma pesquisa desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS) (2005) concluiu que fungos e bactérias podem comprometer a durabilidade de peças dos motores dos veículos. Os técnicos observaram que a

ação de fungos e bactérias na deterioração do óleo diesel acarreta a conseqüente diminuição da vida útil das peças de motores de caminhões e ônibus.

O estudo concluiu que a bomba injetora, peça que leva o combustível ao motor, é uma das mais sujeitas à deterioração. Essa corrosão, segundo os especialistas, não é devida à qualidade do óleo diesel, mas causada pelas condições do armazenamento do combustível nos tanques em postos ou outros locais que estoquem o produto.

Os fungos e bactérias surgem em um lastro de águas que se forma no fundo desses tanques decorrente da umidade do ar em seu interior, da entrada de água de chuva, de manuseio inadequado, de contaminação acidental ou do próprio processo de produção. A água, se presente no tanque de armazenamento de óleo diesel, leva ao desenvolvimento e multiplicação de colônias de microorganismos (bactérias, fungos e leveduras) que se alimentam do diesel, gerando um material com aspecto de lama, cor marrom ou escura e que se denomina borra. A borra química é constituída de colônias de bactérias e de produto de corrosão dos tanques. Além da borra são gerados ácidos orgânicos, álcoois e ésteres. Os fungos, que se alimentam em parte do próprio óleo, se reproduzem na interface entre a água e o óleo produzindo substâncias corrosivas e tornando a água mais ácida. Quando o diesel é bombeado dos reservatórios para o tanque de ônibus, caminhões e utilitários, transporta junto a água com os fungos que se mistura ao combustível. Os produtos químicos formados pelos microorganismos, além de provocarem corrosão dos tanques de armazenagem, estabilizam a emulsão entre água e diesel, podendo gerar problemas de contaminação do meio ambiente. O diesel com essas substâncias fica deteriorado e apresenta um cheiro forte e azedo, tornando difícil a separação desta água.

Os problemas não ficam somente nos tanques de armazenamento de diesel. Os tanques que armazenam gasolina, por serem normalmente construídos em aço-carbono, sofrem oxidação e com o passar do tempo o óxido formado pode se incorporar à gasolina, prejudicando sua qualidade. O envelhecimento da gasolina é outro fator que compromete muito a sua qualidade. A gasolina sofre oxidações que a degradam e levam à formação de goma, que é prejudicial aos motores dos veículos. A corrosão também pode causar furos nos tanques, levando à ocorrência de vazamentos com conseqüente perda de produto e contaminação do meio ambiente.

Visando evitar o prejuízo e uma possível contaminação do meio ambiente, preservando as características da gasolina e do diesel, é recomendável a adoção de uma rotina de limpeza e inspeção do sistema de armazenagem. Em muitos casos, não é possível efetuar inspeções das paredes externas devido ao aterramento do reservatório. Inspeções internas são muito trabalhosas, pois implicam no completo esvaziamento do reservatório antes que ele possa ser inspecionado, o que resulta em altos custos, direta e indiretamente. Em média, um reservatório de combustível se torna um candidato para inspeção a cada três anos, mesmo sendo de dez anos o prazo máximo exigido por norma. Isto significa que é provável que este tanque já tenha acumulado detritos suficientes para passar por um processo de limpeza. O grande problema é que não se sabe realmente se o tanque em questão necessita mesmo ser limpo, podendo acarretar num custo de tempo e dinheiro em vão caso o tanque esteja em boas condições após ser esvaziado. Com isso, surge uma necessidade de se otimizar a questão da limpeza dos reservatórios de combustível, de modo a realizar esse procedimento somente quando for estritamente necessário. Essa questão pode ser resolvida realizando-se uma inspeção visual do interior do tanque por meio de uma câmera acoplada a um sistema que permita conduzi-la pelo volume interno do reservatório, por exemplo. Além disso, há a possibilidade de reduzir os problemas causados pela ação dos microorganismos no interior dos tanques a partir de uma análise da borra e seus derivados presentes. Se for possível coletar amostras deste material, análises químicas poderão ser realizadas a fim de encontrar soluções que venham a erradicar a presença de microorganismos que prejudicam a qualidade do combustível e comprometem a estrutura do reservatório, e avaliar a real necessidade de manutenção.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um manipulador robótico pneumático flexível de longo alcance. O sistema se caracteriza por ser extremamente versátil, podendo ser utilizado em tarefas diversas, em ambientes hostis e no contato com estruturas delicadas. O manipulador é composto por uma estrutura modular, podendo ser formado por vários elos ligados serialmente, permitindo ainda que em sua extremidade sejam acopladas ferramentas que auxiliem a execução de um determinado trabalho desejado.

1.3. Organização da Tese

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em 5 partes principais, sendo cada uma delas um capítulo da dissertação.

O Capítulo II apresenta alguns sistemas robóticos flexíveis existentes em conjunto com os seus principais mecanismos de atuação.

O Capítulo III é responsável pela concepção e modelagem do manipulador proposto. O desenvolvimento mecânico de um elo do manipulador é apresentado através de várias gerações de protótipos, em conjunto com os respectivos modelos analíticos de cada sistema. Primeiramente, experimentos são realizados visando ao desenvolvimento de um atuador pneumático flexível. Posteriormente, os atuadores desenvolvidos são agrupados na formação de um elo do manipulador. As vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas são discutidas.

Um dos sistemas desenvolvidos é submetido a testes com o objetivo de validar o protótipo em função dos modelos desenvolvidos. O Capítulo IV introduz os procedimentos utilizados durante os experimentos e apresenta os resultados obtidos.

O Capítulo V relata uma aplicação do manipulador desenvolvido como um sistema de inspeção de tanques de combustível. É elaborada uma introdução a respeito dos tipos de reservatórios existentes e como o sistema seria adaptado para atuar nas condições desta aplicação.

No Capítulo VI são apresentadas as conclusões e são formuladas algumas sugestões para o aperfeiçoamento do sistema em pesquisas futuras.

2 Sistemas Robóticos Flexíveis

2.1. Princípios de Atuação

Coletores solares infláveis para satélites de comunicação, superfícies de controle flexíveis para aviões ou veículos submersos, membros obedientes e dispositivos de garras para robôs, e os “bio-materiais”, tais como ligamentos artificiais, são exemplos de alguns dos dispositivos recentes que se utilizam de materiais flexíveis embutidos no campo de elastômeros reforçados por fibras (*Fiber-Reinforced Elastomers, FRE*) (Peel & Jensen, 1998). Os *FREs* têm a potencialidade de agir de uma maneira adaptativa ou ativa, permitindo novas aplicações. Os compostos avançados típicos são úteis não somente devido ao seu peso leve, mas também em função de sua rigidez e força. Entretanto, geralmente são muito rígidos. Em algumas aplicações, pode ser vantajoso utilizar um material que seja altamente flexível em ao menos uma direção, isto é, tendo um módulo de elasticidade (razão entre a tensão aplicada e a deformação resultante dentro do limite elástico do material) diversas ordens mais baixo do que em uma outra direção, e/ou possuir um material que permita deformações elásticas elevadas. Tais materiais podem ser obtidos adaptando fibras de reforço em uma matriz elastomérica. Estes materiais são chamados elastômeros reforçados por fibras, compostos de elastômeros ou compostos flexíveis.

Engenheiros e cientistas japoneses estão desenvolvendo pesquisas na área de estruturas flexíveis baseadas em elastômeros reforçados por fibras, principalmente no que diz respeito a pesquisas aplicadas. Diversos tipos diferentes de aplicações em *FRE* estão sendo desenvolvidas em ambientes industriais e acadêmicos. Micro-atuadores flexíveis (*Flexible Micro-Actuators, FMA*) podem ser considerados como um exemplo de *FRE*, conhecidos como "dedos de borracha", (Suzumori et al., 1991). A Fig. 1 ilustra a sua fabricação. Consiste em um cilindro de borracha que é dividido longitudinalmente em três câmaras. Uma fibra é enrolada circunferencialmente em torno das três câmaras e mais borracha é aplicada. A ponta do "dedo" pode ser rotacionada variando-se a pressão de ar nas

três câmaras. Alguns *FMA*s de Suzumori são usados em um endoscópio e o Museu de Ciência de Toshiba operou alguns de seu *FMA*s durante sete anos em um de seus robôs, para capturar e mover objetos.

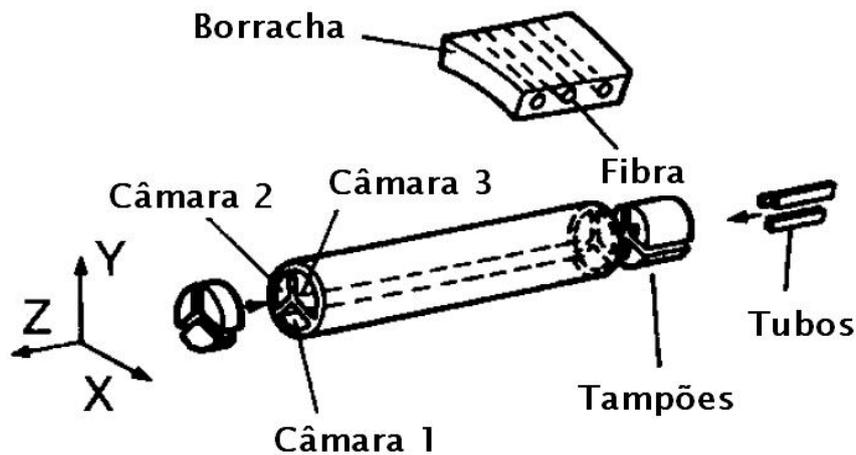


Figura 1: Esquema ilustrando a construção dos dedos de borracha

Um tipo diferente de atuador foi desenvolvido também na Universidade de Okayama, no Japão (Tanaka, 1993; Tanaka et al., 1996). Também consiste em um tubo de borracha envolvido com fibras circunferenciais, porém, mais fibra é aplicada axialmente ao longo de um lado separado do tubo, aplicando posteriormente mais borracha sobre ela. O "dedo" dobrar-se-á no sentido da fibra quando inflado. Ar é utilizado para inflar e fornecer a pressão interna necessária. Pesquisas também estão sendo realizadas com líquidos eletro-reológicos para fornecer a energia necessária para a pressurização. Uma aplicação também foi elaborada com um sensor tátil feito de duas bobinas de cobre separadas por uma camada de borracha condutora, aplicado à extremidade dos "dedos de borracha".

Um tipo similar da garra de borracha ou dedo, chamado de "prendedor macio", também foi desenvolvido, como mostra a Fig. 2. Neste caso, a mesma fibra é utilizada nas direções axiais e circunferenciais. Isto foi feito envolvendo a fibra tanto nas direções circunferenciais como nas axiais, como uma malha trançada. Os pesquisadores desenvolveram também um medidor de forças de alta deformação e uma pintura condutora adaptados a este sistema (Dohta, 1997).

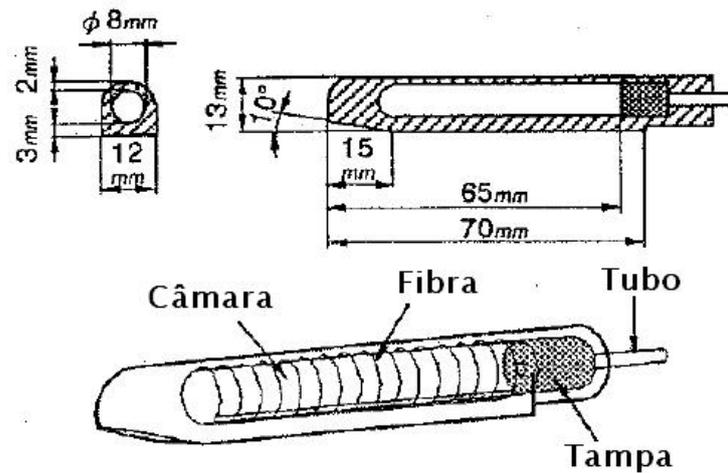


Figura 2: Esquema do prendedor macio

Em uma outra área que utiliza muitas técnicas com *FRE*, foi desenvolvido um atuador pneumático de borracha chamado de "*rubbertuator*", produzido oficialmente pela *Bridgestone* (*Bridgestone*, 1989). Este atuador, ilustrado na Fig. 3, consiste basicamente de um tubo de borracha interno, cercado por uma camada exterior de fibra trançada. O atuador é fechado nas extremidades com encaixes de metal que permitem que o ar entre e saia, provendo ainda pontos para conexões. Embora as fibras não sejam embutidas na borracha ou no elastômero, o comportamento do atuador é equivalente à situação das fibras estarem embutidas.

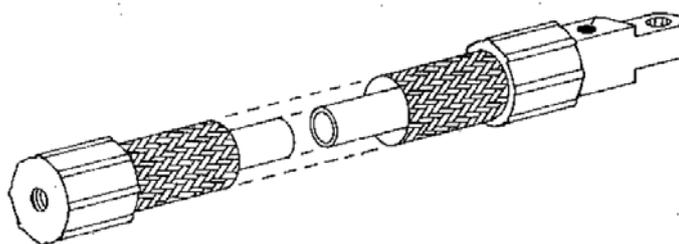


Figura 3: Esquema do *rubbertuator* fabricado pela *Bridgestone*

O *rubbertuator* ("músculo de borracha") é um tipo de atuador de borracha pneumático de *McKibben* (*Tondu & Lopez*, 2000). A *Bridgestone* parou de fabricar os atuadores de borracha devido às perdas financeiras atreladas ao risco do empreendimento.

Um novo tipo de músculo artificial apelidado de “MAS”, baseado no músculo de *McKibben*, foi recentemente lançado pela FESTO (Fig. 4). Ao contrário do músculo pneumático artificial de *McKibben*, a fibra do MAS é embutida no próprio tubo, pode ser montado facilmente e apresenta melhorias com relação à histerese (tendência de um sistema, dispositivo ou circuito de se comportar de maneira diferente dependendo da direção da alteração feita em um parâmetro de entrada) e à não-linearidade em comparação ao convencional. Ao ser pressurizado com ar, o seu diâmetro aumenta ao passo que o atuador contrai-se no sentido axial, fazendo com que a força neste sentido também aumente. O músculo é constituído por um tubo flexível que suporta cargas elevadas e por uma estrutura tridimensional composta de fibras trançadas de alta resistência. Embutir as fibras completamente dentro do tubo minimiza a fricção entre as partes, aumentando a sua vida útil.



Figura 4: Músculo pneumático MAS da FESTO, disponível em três diâmetros, 10, 20 e 40mm

Embora existam atuadores com mecanismos e estruturas diferentes dos que foram comentados nesta seção, o princípio de funcionamento geralmente é o mesmo. A seção seguinte aborda aplicações destes atuadores flexíveis em diferentes sistemas robóticos.

2.2. Sistemas Existentes

Os manipuladores robóticos tradicionais são baseados no modelo (vertebrado) humano, com um pequeno número de elos rígidos conectados por juntas. Há muitos exemplos na natureza onde uma filosofia de projeto diferente

prova ser mais vantajosa. Por exemplo, em estruturas contínuas tais como línguas, trombas e tentáculos, a manipulação altamente habilidosa pode ser produzida através de estruturas compactas que se curvam ao longo do comprimento da estrutura. Os tentáculos de um polvo ou até mesmo a tromba de um elefante podem executar movimentos em ambientes densos que vão além da potencialidade de membros convencionais. A habilidade de serpentes de se curvarem em pontos essencialmente arbitrários ao longo de seu corpo permite sua locomoção eficaz em terrenos inacessíveis a veículos com rodas, esteiras ou até mesmo que possuam pernas. A Fig. 5 apresenta um exemplo de um robô flexível contínuo com esqueleto, inspirado na movimentação de um tentáculo (Walker, 2000).



Figura 5: Robô contínuo tipo tentáculo

Alguns robôs flexíveis são utilizados em tarefas sub-aquáticas por apresentarem características interessantes de serem exploradas nesse meio. São naturalmente flexíveis, possibilitando a correção de erros de posicionamento devido à falta de acurácia, possuem um projeto simples e o mínimo de partes móveis. Conseqüentemente, são bem adaptados para trabalharem com garras hábeis capazes de reduzir danos provocados pela operação e de executar tarefas delicadas, manuseando objetos frágeis.

A Fig. 6 mostra uma garra (AMADEUS) atuada hidraulicamente formada por três dedos flexíveis como atuadores (Lane et al., 1999).

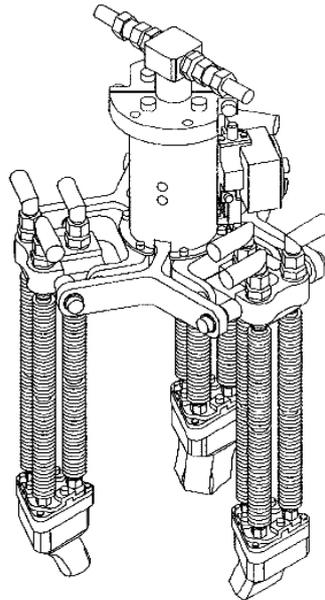


Figura 6: Garra hidráulica do manipulador AMADEUS

Esta garra é parte integrante de um manipulador robótico utilizado em operações sub-aquáticas. A curvatura do dedo é produzida através da ação de pressões hidráulicas diferenciais em três tubos flexíveis mecanicamente acoplados.

A operação dos dedos se baseia na deformação elástica do fole cilíndrico de metal com as paredes finas corrugadas, como ilustra a Fig. 7. O corrugado faz com que o conjunto fique significativamente mais rígido radial do que longitudinalmente, fazendo com que a extensão longitudinal seja conseqüentemente muito maior do que a radial ao ser pressurizado. Quanto maior for a diferença de pressão entre os foles, maior será a deflexão resultante na ponta do dedo. Além da curvatura, o arranjo triangular permite o controle do sentido do movimento da ponta do dedo.

As vantagens deste tipo de construção estão relacionadas à simplicidade do mecanismo do dedo (ausência de parte móvel) e à flexibilidade intrínseca. A flexibilidade lateral permite ao dedo fletir de acordo com restrições físicas externas. Há um raio mínimo de curvatura que pode ser produzido por esse mecanismo. Este raio é influenciado pela espessura da parede, pelo passo do corrugado e pelo material utilizado nos atuadores flexíveis. Quanto maior for a deflexão máxima requerida na ponta do dedo, mais longo deve ser o comprimento do atuador.

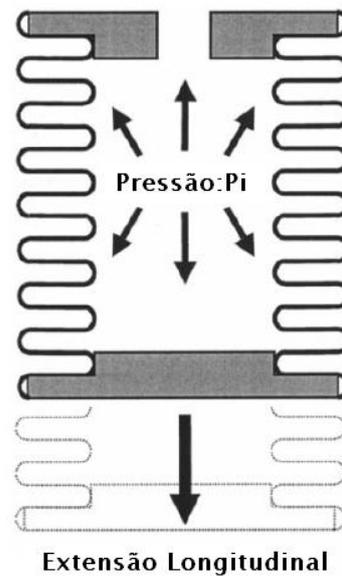


Figura 7: Fole cilíndrico de metal corrugado; pressão interna causando expansão longitudinal

A Fig. 8 mostra um robô híbrido eletro-pneumático (Tentáculo KSI) (Immega & Antonelli, 1995). Este robô utiliza três atuadores do tipo fole e três cabos fazendo o papel de tendões espaçados uniformemente, possibilitando curvar-se em todos os sentidos. O manipulador é composto por dois elos ligados serialmente resultando em seis graus de liberdade em sua extremidade, podendo se estender mais de cinco vezes em relação ao seu comprimento contraído.

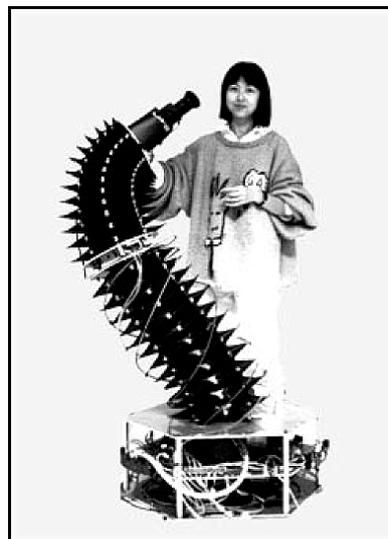


Figura 8: Tentáculo KSI

A Fig. 9 apresenta uma aplicação dos atuadores flexíveis *FMA*s exercendo a função de dedos pneumáticos. Os dedos de borracha podem ser utilizados para segurar, apertar ou manusear objetos de diferentes formatos e durezas (Suzumori et al., 1991).

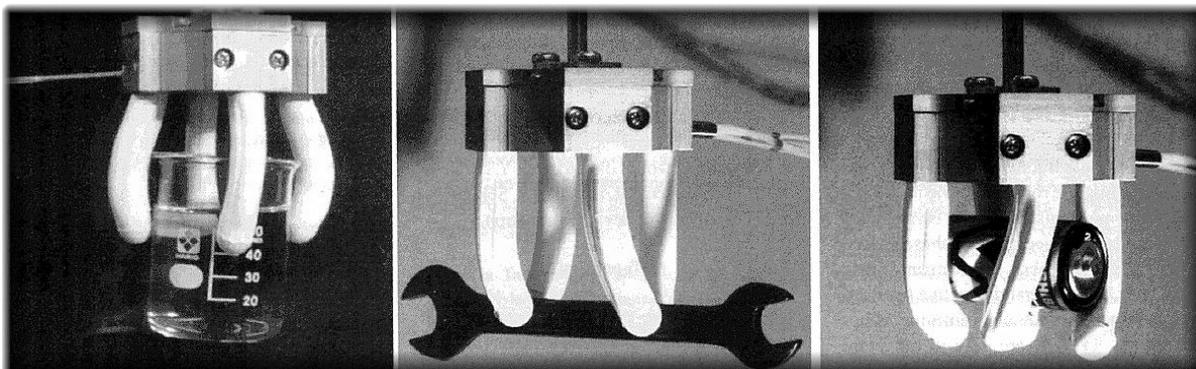


Figura 9: Dedos de borracha atuados pneumaticamente segurando e apertando objetos

Robôs humanóides e robôs escaladores são normalmente impulsionados utilizando motores elétricos combinados com engrenagens especiais e mecanismos simples de amortecimento. Durante a locomoção destas máquinas, um contato inesperado com o chão ou com algum obstáculo poderia ocasionar um forte distúrbio do movimento ou até mesmo provocar danos mecânicos. Mesmo os controles com flexibilidade ativa são muito rígidos para cobrir estes problemas de impacto, especialmente nos casos de movimentos rápidos. A implementação de outros tipos de atuadores, como músculos artificiais, em máquinas que se locomovem, possibilita recriar mecanismos de locomoção similares ao dos animais.

Aplicações do músculo pneumático MAS em dois sistemas robóticos são comentadas a seguir. Primeiramente, o robô *AirBug* (Fig. 10), desenvolvido com músculos fluídicos MAS-20, simula o comportamento de um aracnídeo com 6 pernas (Kerscher, 2002). A Fig. 11 ilustra o desenvolvimento de um braço pneumático do tipo humanóide portátil e de simples instalação (Nakamura et al., 2002). Este braço pneumático utiliza atuadores pneumáticos do tipo MAS-10. Possui 6 graus de liberdade em sua extremidade. Há poucos relatos de aplicações

que utilizaram músculos pneumáticos em braços robóticos do tipo humanóide devido à alta histerese intrínseca do atuador.

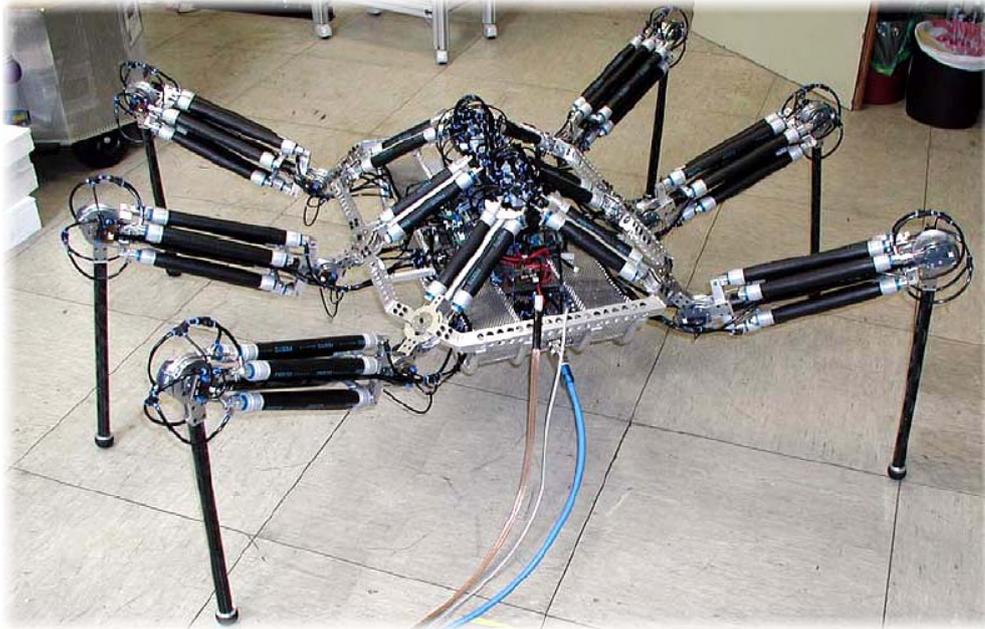


Figura 10: Robô *AirBug* com atuadores MAS-20 da FESTO

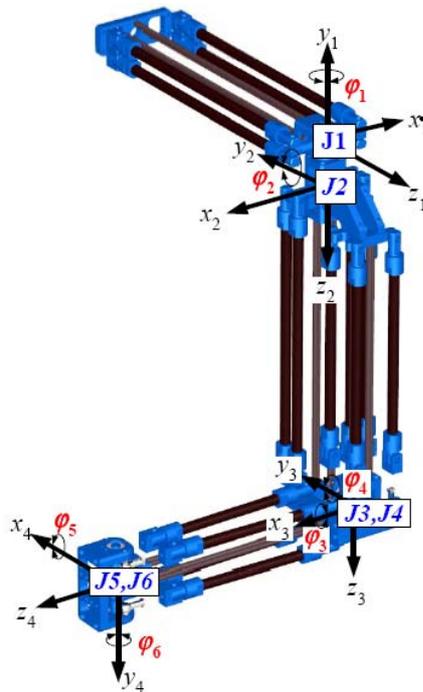


Figura 11: Braço pneumático com atuadores MAS-10 da FESTO

Uma outra aplicação envolvendo atuadores pneumáticos flexíveis é desenvolvida a partir de próteses de membros de baixo custo utilizando músculos

artificiais como auxílio na locomoção de pacientes (Wongsiri & Laksanacharoen, 2004). Projetos recentes mostram também interesses no estudo do movimento do braço humano. A Fig. 12 mostra um protótipo de um braço protético com um grau de liberdade na junção do cotovelo, com um simples controle *feed forward* acionado pelo pé do paciente através de um interruptor.



Figura 12: Braço protético com músculos de *McKibben*

O desenvolvimento de atuadores leves, flexíveis e ao mesmo tempo potentes, permite que robôs flexíveis estejam cada vez mais presentes em tarefas que exijam limitação de forças durante a sua execução. Dessa forma, um estudo mais aprofundado destes atuadores se faz necessário visando ao aperfeiçoamento de sistemas robóticos flexíveis. A próxima seção apresenta uma abordagem mais específica sobre esses atuadores.

2.3. Músculos Pneumáticos Artificiais

Os Músculos Artificiais Pneumáticos (*PAMs*) são mecanismos de movimento linear e contrátil operados por pressão gasosa (Daerden & Lefeber, 2002). O seu elemento principal é uma membrana reforçada flexível, cujas extremidades são presas em acessórios, possibilitando assim a transferência da potência mecânica para a carga. Por ser flexível, esta membrana é constituída na

maioria dos casos por elastômeros e reforçada com fibras resistentes, como por exemplo as Aramidas. À medida em que a membrana é inflada ou o gás é expelido para fora dela, ela se expande ou se comprime, respectivamente. Juntamente com essa expansão ou contração radial, a membrana se contrai axialmente e através disso exerce uma força de arrasto na sua carga. Dessa forma, a força e o movimento gerados por este tipo de atuador são lineares e unidirecionais. Essa operação de contração distingue o *PAM* de foles, que se expandem quando são inflados.

Na literatura, diferentes nomes são relacionados aos *PAMs*: *Pneumatic Muscle Actuator* (Caldwell, 1993), *Fluid Actuator* (Yarlott, 1972), *Fluid-Driven Tension Actuator* (Paynter, 1988), *Axially Contractible Actuator* (Immega & Kukulj, 1990; Kukulj 1988), *Tension Actuator* (Immega, 1989; Paynter, 1988).

A fonte de energia dos músculos pneumáticos artificiais é normalmente o ar ambiente, o qual é injetado ou extraído do músculo. Dessa forma, a energia do atuador é fruto da diferença de pressão do gás interno em relação à sua vizinhança. Ainda que seja possível projetar um músculo operado com pressão negativa (Marcincin & Palko, 1993; Morin, 1953), *PAMs* normalmente são operados com pressões acima da pressão atmosférica: gerar e fornecer gás comprimido é mais fácil de se realizar e, com a pressão atmosférica na maioria das vezes em torno de 100 kPa, muito mais energia pode ser conduzida por sobrepressão do que por subpressão. Carregando um *PAM* de sobrepressão com gás pressurizado permite que ele mova uma carga, e ao descarregar, ao contrário, faz com que ele seja movido pela carga.

As propriedades dos *PAMs* serão descritas a seguir.

2.3.1. Propriedades

Os Músculos Pneumáticos Artificiais apresentam as seguintes propriedades:

a. Características com carga estática

O comprimento de equilíbrio do *PAM* em condições estáticas vai ser determinado pelo nível de pressão, pela carga externa e pelo volume por comprimento disponível do músculo em questão. Considere a hipótese de um músculo pressurizado com uma pressão p , contendo uma massa infinitesimal dm

de gás sob pressão dentro dele durante um intervalo de tempo dt . Supondo que o volume da sua membrana aumente de dV , ocorrendo um incremento de trabalho $p dV$. Durante o mesmo período dt , o comprimento do atuador mudará de dl (< 0 na contração) e uma carga F será deslocada por uma mesma distância, exigindo um ganho de trabalho $-F dl$. Sem levar em conta o trabalho necessário para deformar a membrana e assumindo condições quasi-estáticas, pode-se escrever:

$$F = -p \frac{dV}{dl} \quad (1)$$

Na realidade, porém, a força desenvolvida terá um valor menor devido principalmente à deformação da membrana. Comparando a expressão de força-comprimento do músculo pneumático artificial com a dos cilindros pneumáticos, $-dV/dl$ é definido como sendo a “área efetiva” do atuador (Paynter, 1988).

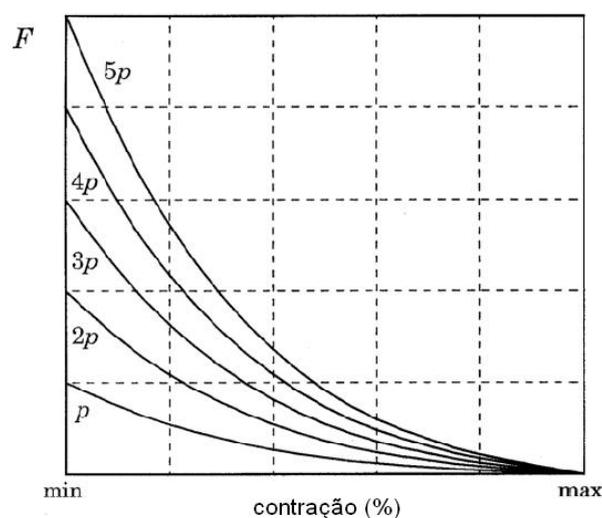


Figura 13: Diagrama isobárico de força-contração do Músculo Artificial Pneumático

Definindo contração como sendo a mudança no comprimento relativa ao seu máximo valor dividida pelo seu comprimento máximo – por exemplo, uma contração de 10% denota um encurtamento para 9/10 do comprimento máximo – as características estáticas da carga podem ser descritas como mostra a Fig.13. Cada curva apresenta os valores de força do músculo gerados em função da contração sob um determinado valor constante de pressão pneumática. Todas as

curvas são similares, a pressão é na verdade um fator de escala como pode ser concluído através da eq. (1). A curva básica é característica do tipo de membrana e do seu modo de inflar-se. Qualquer que seja o tipo sendo considerado, a força sempre irá diminuir do seu valor mais alto, no maior comprimento do músculo, até zero, totalmente inflada e contraída. É por causa dessa característica que estes atuadores são referenciados como sendo músculos, uma vez que os músculos do corpo humano também apresentam uma diminuição monotônica na relação carga-contracção.

b. Flexibilidade

Devido à compressibilidade do gás, todos os atuadores pneumáticos mostram um comportamento flexível. Além disso, o *PAM* possui seu decréscimo de força na curva de contracção como uma segunda fonte de flexibilidade: mesmo se a pressão for mantida num nível fixo, o músculo se comporta como uma mola devido à mudança de força em relação ao comprimento.

c. Ativação Contrária

Atuadores fluídicos são dispositivos contráteis e podem, conseqüentemente, gerar movimento em somente uma direção. Como com os músculos do corpo humano, são necessários dois atuadores em conjunto para que seja possível gerar um movimento bidirecional. Enquanto um move a carga, o outro irá atuar como um freio para parar a carga na posição desejada. Para mover a carga na direção oposta, os músculos trocam de papel. Essa conexão oposta dos músculos à carga é geralmente referida como sendo uma “ativação contrária” (*antagonistic set-up*). Esse conjunto antagônico pode ser usado tanto para movimentos lineares quanto para rotacionais.

d. Semelhança com os Músculos do Corpo Humano

Os *PAMs* se assemelham aos músculos do corpo humano enquanto ambos são mecanismos lineares que possibilitam a contracção, tendo uma relação de decréscimo carga-contracção monotônico (embora isto nem sempre ocorra com os músculos do corpo humano). Ambos devem ser ativados de forma contrária para que se tenha um movimento bidirecional e ambos são capazes de controlar juntas

flexíveis. Muitas diferenças, entretanto, existem (McMahon, 1984), pois os músculos do corpo humano:

- não alteram de volume durante a contração;
- possuem uma estrutura modular, eles são de fato uma vasta conexão paralela e em série de sistemas contráteis microscópicos;
- são organizados em unidades cuja ativação depende do nível de carga externa;
- podem ter reações rápidas ou lentas, de acordo com a necessidade de sustentação de uma ação ou velocidade;
- possuem múltiplas forças integradas e sensores de deformação;
- possuem energia armazenada e energia sendo transformada rapidamente através deles;
- podem servir como fonte de energia ou até mesmo como “material de construção” para músculos de outros sistemas biológicos, em outras palavras, eles são comestíveis.

A última característica de distinção é talvez a mais extraordinária: um sistema biológico pode desintegrar um outro atuador em níveis moleculares e usar isto como fonte de energia para construir os seus próprios atuadores.

e. Leveza e Força

Como mencionado anteriormente, estes atuadores são extremamente leves pelo fato do seu componente principal ser uma membrana elastomérica. Apesar disso, eles podem ser feitos para suportar forças que alcançam milhares de Newtons. As taxas de potência em função do peso são da ordem da magnitude de muitos kW/kg.

f. Conexão Direta

Em muitas aplicações, por exemplo sistemas posicionadores, os atuadores elétricos em geral necessitam de uma redução de velocidade devido às suas altas velocidades de rotação e baixos valores de torque. Essas reduções introduzem fenômenos não desejados no sistema, como retrocessos e inércias adicionais.

PAMs podem ser diretamente conectados à estrutura a ser atuada: eles facilmente se ajustam porque são pequenos e, mais importante, os seus valores de velocidade e força geralmente se encontram na faixa de valores necessária para a aplicação, sendo diretamente influenciados pela composição do seu material.

g. Rápida Manutenção

Devido à conexão direta, a substituição de um músculo defeituoso é muito fácil e rápida de ser feita. Ela se dá somente desconectando o músculo da máquina, o tubo pneumático e conectando um novo.

h. Utilização Isenta de Riscos

Considerando os seus efeitos nas vizinhanças das operações, uma vez que um gás inerte é utilizado, esses atuadores não causam poluição, não geram riscos. Como é o caso de todos os sistemas pneumáticos, não existe perigo de fogo ou explosão. Além disso, em detrimento da sua flexibilidade intrínseca e ajustável, ele pode ser projetado para ter um toque macio, proporcionando dessa forma uma interação segura entre o homem e a máquina.

A próxima seção classifica os músculos pneumáticos artificiais já desenvolvidos segundo suas características.

2.3.2. Tipos de Músculos

Muitos atuadores pneumáticos com comportamento similar aos músculos do corpo humano vêm sendo desenvolvidos desde o seu primeiro conceito em 1930, por um inventor Russo chamado S. Garasiev (Marcincin & Palko, 1993). Cada um deles pode ser classificado de acordo com o seu protejo e a sua operação:

- operação pneumática ou hidráulica;
- operação sobrepessão ou subpessão;
- contendo uma membrana trançada ou embutida
- contendo uma membrana deformável ou auto-organizável.

Os atributos chaves destes músculos artificiais são a sua deformação e a capacidade de serem inflados. Devido à necessidade de flexibilidade para esta finalidade e, conseqüentemente, o limitado poder de alongamento do material, a pressão utilizada deve ser limitada. Valores típicos máximos aplicados a esses músculos variam em torno de 500kPa até 800kPa. As operações hidráulicas em torno destes valores sofrem desde a baixa potência até a sua taxa de peso, fazendo com que elas não sejam muito atrativas. A terceira característica é referente ao elemento de tensão carregado do músculo: a estrutura ou é abraçada pela membrana ou é embutida na membrana. A última característica se refere à maneira com que a membrana se infla: para ser possível se expandir radialmente, ou o material da membrana deve se esticar ou a seção radial deve ser alterada através de rearrumação da superfície da membrana. No caso de uma nova organização de sua superfície, a mesma deve ser constante, sem levar em conta a contração e o volume. Isso permite que uma grande tensão seja desenvolvida sem que nenhuma energia seja colocada no material elástico da membrana. Esta revisão focará em dois tipos de Músculos Pneumáticos Artificiais: os Músculos Trançados (*Braided Muscles*), que são os mais utilizados, e os Músculos Pneumáticos Artificiais Dobrados (*Plated Pneumatic Artificial Muscles*), que foram desenvolvidos recentemente como um aprimoramento baseado nas desvantagens dos protejos trançados.

Músculos Trançados (*Braided muscles*)

Músculos do tipo trançados são compostos por um tubo elástico envolto por uma capa entrelaçada (malha trançada), como mostram as Figs. 14 e 15. As fibras trançadas são dispostas helicoidalmente ao longo do eixo axial do músculo em ângulo (chamados de *pitch angle*, *braid angle*, *weave angle*) de $+\theta$ e $-\theta$. Ao pressurizar o tubo, a capa trançada é solicitada. Dessa forma, a pressão interna é balanceada pela tensão da fibra trançada devido à curvatura da fibra sobre o tubo. A tensão da fibra é integrada nos extremos da malha trançada para balancear o efeito da carga externa. Uma vez que a pressão de contato entre o tubo e a malha é absolutamente necessária para conduzir a carga, músculos trançados não podem ser operados com subpressão.



Figura 14: Tubo reforçado com malha de fibras trançadas

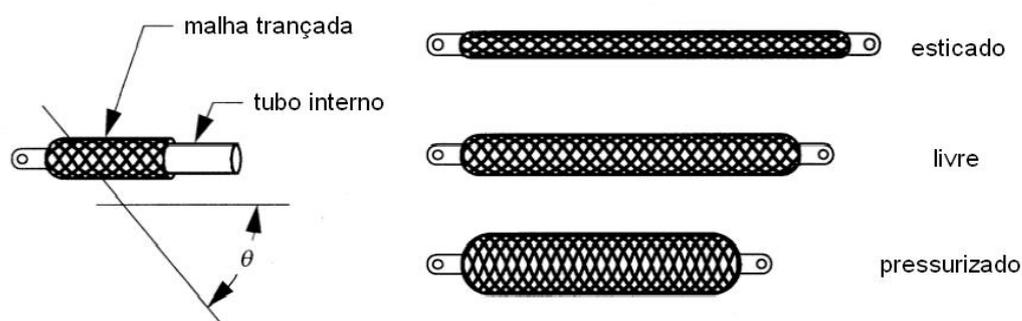


Figura 15: Músculo Trançado (Músculo de *McKibben*)

Em geral, o comportamento deste músculo em relação ao formato, tensão e contração quando inflado irá depender da geometria da parte elástica interna, da malha livre (isto é, sem estar pressurizada ou com carga) e dos materiais utilizados. Normalmente, músculos trançados possuem um corpo cilíndrico por serem na realidade uma “bexiga cilíndrica” e devido ao constante ângulo *pitch* da fibra por toda a malha. Dois tipos básicos de músculos trançados podem ser definidos:

- **Músculo de *McKibben*:** é o tipo de músculo pneumático mais utilizado e estudado na literatura até hoje. Trata-se de um músculo cilíndrico trançado que possui tanto o tubo quanto a malha de fibras conectados em ambos os lados a acessórios que não somente transferem a tensão da fibra, como também servem como encapsulamento para o gás;
- ***Sleeved Bladder Muscle*:** este tipo se diferencia do músculo de *McKibben* no projeto da bexiga interna: ela não é conectada à

malha de fibras, não resultando numa força-mola passiva adicionada à tensão do músculo.

Músculo com Pregas (*Pleated PAM*)

Este atuador possui uma membrana do tipo auto-organizável. Isto significa que não existe deformação de material durante o processo de contração do músculo. A forma com que isso é feito é mostrada na Fig. 16. A membrana do músculo possui um certo número de pregas na direção axial – como o filtro de ar de um carro – e quando ela se expande, as pregas se abrem. Nenhuma fricção é envolvida neste processo. Além disso, a tensão da membrana na direção paralela (perpendicular ao eixo axial) é insignificante e ainda diminui com o aumento do número de pregas. Como resultado, praticamente nenhuma energia é necessária para expandir a membrana. Devido à abstinência de fricção, este *protejo* mostra praticamente nenhuma histerese. Somente a flexão da membrana quando ela se enche é que requer alguma energia.

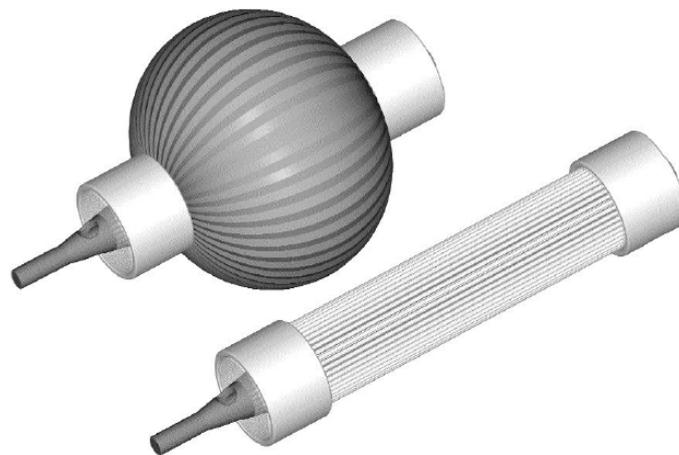


Figura 16: Músculo com Pregas; totalmente esticado e inflado

Músculos Emaranhados (*Netted Muscles*)

A diferença entre músculos trançados e músculos emaranhados é a densidade das fibras envolvidas na membrana, sendo os emaranhados uma rede com espaços relativamente largos ao passo que os trançados possuem espaços

pequenos, como um tecido. Por esse motivo, se a membrana for do tipo deformável, ela somente suportará baixas pressões. Desse modo, este tipo de atuador fluídico normalmente terá um diafragma do tipo auto-organizável.

Músculo Yarlott

Este tipo de músculo fluídico engloba uma bexiga elástica de forma esférica alongada nos pólos, trançada por cordas ou fios que percorrem axialmente o músculo de ponta a ponta. A bexiga é reforçada radialmente por fios para resistir a expansões elásticas. Isto também pode ser feito através de uma corda única enrolada helicoidalmente sobre a sua superfície, como mostra a Fig. 17. No seu estado totalmente inflado, este atuador assume a forma de uma bexiga esferoidal. Quando alongado, as fibras axiais se arrumam e forçam a bexiga a uma forma caracterizada por uma série de regos e vales, como ilustrado na vista frontal da Fig. 17. A área da casca possui uma superfície continua mais ou menos constante e a superfície segue se re-arrumando ao inflar-se. À medida que a superfície estica menos, mais energia pneumática pode ser transformada em potência mecânica. Se ela for totalmente alongada, as fibras axiais estarão totalmente esticadas e a pressurização será então levada a uma tensão infinitamente alta. Contudo, devido ao comportamento das fibras do material, isto nunca seria alcançado. Aparentemente, *Yarlott* projetou este músculo para operar em medidas baixas de pressão.

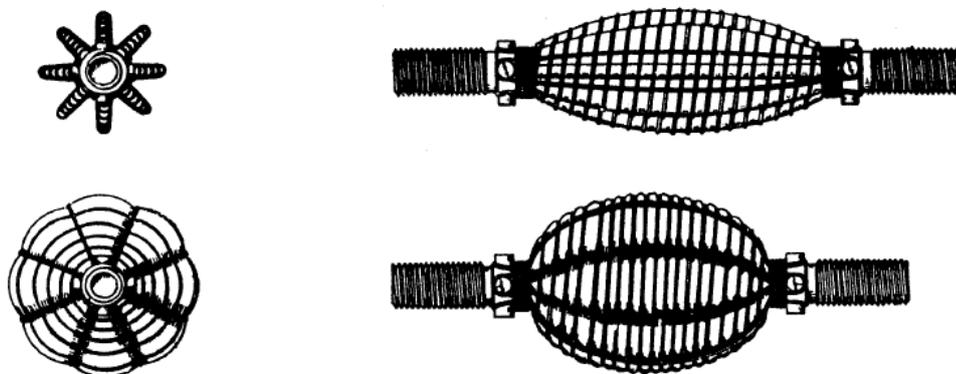


Figura 17: Músculo de Yarlott

ROMAC

Este atuador consiste em uma bexiga com muitos lóbulos armados por uma rede de fios e fechada em ambos os lados por acessórios, como mostra a Fig. 18. A bexiga é feita de uma bainha, que é caracterizada por sua alta rigidez de tensão, é flexível e mantém o fluido em compressão. A rede ou armação é comprimida por tensões flexíveis de elos não elásticos que são ligados em nós para formar um diamante de quatro lados. A rede de fios é compreendida por ligações de elos flexíveis não elásticos tensionados que são unidos em nós para dar a forma de um diamante de quatro lados com aberturas na rede, como ilustrado na Fig. 18. A armação expande-se radialmente e contrai-se axialmente, mudando assim a base de cada lóbulo projetado. Em consequência deste mecanismo, ocorrem mudanças no volume interno. A superfície total deste atuador é constante, sem levar em consideração a contração-alongamento devido à rigidez de tensão do material da membrana. Cada lado base de uma saliência ou de um lóbulo é conectado a um outro lado base de um lóbulo adjacente por uma emenda flexível ou por uma dobra contínua que funciona abaixo de um fio. Devido à ausência de fricção e de estiramento da membrana, uma força muito mais elevada e a histerese quase insignificante são alcançadas se comparadas aos músculos que esticam suas membranas.

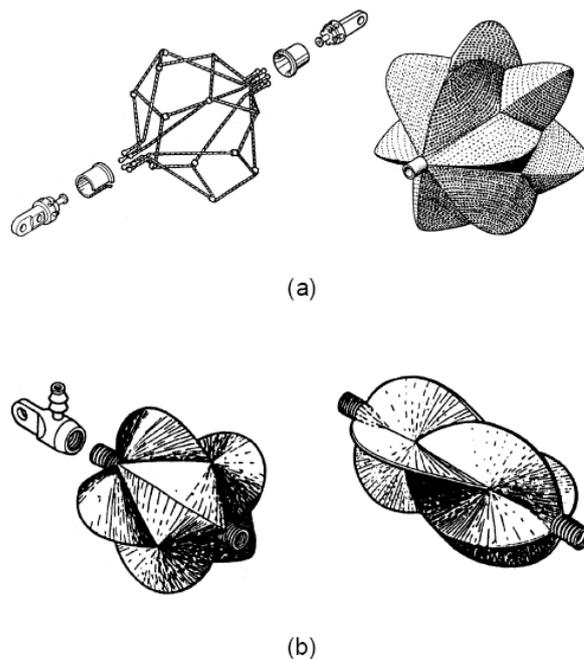


Figura 18: ROMAC, versão padrão (a) e versão em miniatura (b)

Músculo *Kukolj*

A Fig. 19 mostra o Músculo de *Kukolj* inicialmente despressurizado, sem carga e, em uma aplicação, levantando um peso que está preso em um braço articulado, nas condições de totalmente esticado e parcialmente contraído.

Este tipo de atuador é, em sua essência básica, uma variação do músculo de *McKibben*. A diferença principal entre eles é a luva: os músculos de *McKibben* possuem uma malha trançada firmemente tecida enquanto que o projeto de *Kukolj* utiliza uma rede emaranhada aberta. Na sua condição sem carga, há uma abertura entre a rede e a membrana que desaparece somente diante de uma tensão de carga apropriadamente elevada. A condição de não-pressurizada e com carga, tal que a rede se ajuste ao diafragma, é a condição mais prolongada. A razão para a abertura é citada como sendo a tendência da rede contrair-se mais rapidamente do que a membrana, resultando na formação de ondas próximas às suas extremidades. O estiramento inicial impede que isto aconteça.

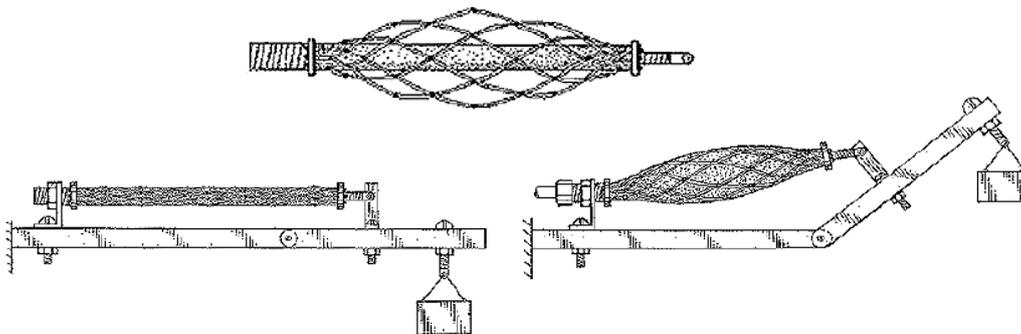


Figura 19: Músculo de *Kukolj*

Músculos Embutidos (*Embedded Muscles*)

Como mencionado anteriormente, a estrutura que carrega a carga deste tipo de músculo fluídico é embutida em sua membrana. Existem muitos tipos de músculos com este tipo de protejo, dentre os quais:

- **Músculo de *Morin*:** este músculo possui um diafragma elástico adaptado para suportar a pressão de qualquer fluido e adaptado para transmitir qualquer tipo de variação de pressão do fluido em questão a um determinado dispositivo de controle, como instrumentos de medição. Ele possui o mesmo princípio de operação e foi a origem do Músculo de *McKibben*. No seu *protejo*, um tubo de borracha é embutido por fios com alta rigidez de tensão. Estes fios podem ser dirigidos ao longo do eixo axial do atuador ou espiralmente sobre esse eixo. A membrana bifásica é apertada por dois encaixes nas extremidades, servindo para selar e unir a carga. A carga totalmente tensionada está segura pelas fibras enquanto o elastômero se estica para permitir a contração, vide Fig. 20.

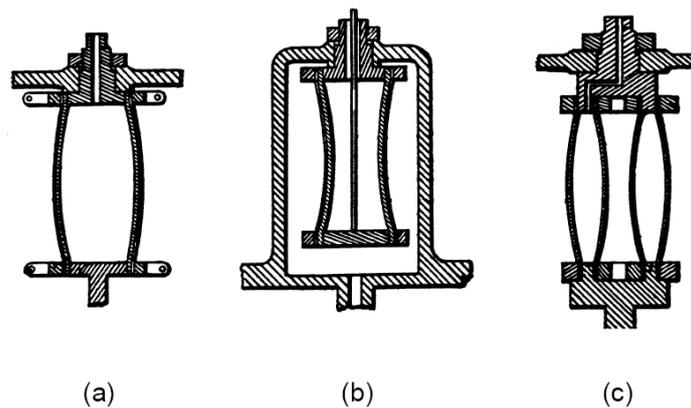


Figura 20: Diferentes *protejos* do Músculo de *Morin* de acordo com a pressão utilizada; (a) *protejo* para sobrepressão (vista do corte transversal longitudinal), (b) *protejo* para subpressão e (c) com membranas concêntricas

- **Músculo de *Baldwin*:** este tipo de músculo é baseado no *protejo* de *Morin*, consistindo de uma membrana elástica e de uma borracha cirúrgica muito fina, incrustada por filamentos de vidro na direção axial. A membrana resultante possui módulo de elasticidade na direção da fibra muito maior do que na direção perpendicular às fibras. A Fig. 21 esboça este tipo de músculo.

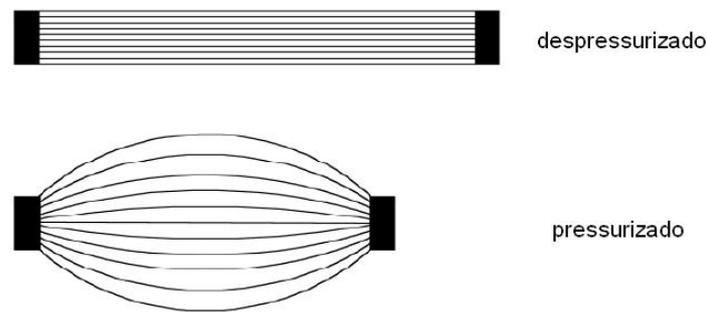


Figura 21: Músculo do tipo Baldwin

Devido à ausência da fricção e da membrana muito fina, este músculo apresenta menos histerese e uma pressão limiar muito baixa se comparada aos músculos trançados. No entanto, como a expansão radial é muito elevada, as pressões medidas têm que ser limitadas a valores baixos, tipicamente 10-100 kPa.

- **Músculo com Subpressão (*UPAM - UnderPressure Artificial Muscle*):** este músculo possui um protejo parecido com o músculo de *Morin* mostrado na Fig. 20 (b). Um gás é sugado para fora da membrana e ela colapsa numa direção não axi-simétrica, ou seja, ele é comprimido e achatado no meio.
- **Músculo de *Paynter* Enrugado (*Paynter Knitted Muscle*) :** este atuador possui uma bexiga esférica reforçada por uma estrutura enrugada de fibras fortes, duras e flexíveis. Esta estrutura foi projetada para ter o mesmo formato esférico que a bexiga para que ela se ajuste e possa ser facilmente unida a ela. A bexiga é feita de um elastômero. Ao ser inflada, a bexiga não se estica como no caso dos músculos de *McKibben*. Quando ela está totalmente inflada, o músculo possui a forma da bexiga original e da esfera enrugada. Se for estendida a partir daí, ela gradualmente tomará a forma de uma superfície com estrias. Sem pressão, o músculo pode se estender a um comprimento igual à metade da circunferência da esfera.

- Músculo de *Paynter* Hiperbólico:** com um protejo alternativo em relação ao *Paynter*, consiste em um músculo cuja membrana, no seu estado de total alongamento, possui a forma de um hiperbolóide de revolução. A membrana elástica é incrustada por uma manta de fios inextensíveis e flexíveis que são presos às extremidades. Com o atuador esticado, estes fios se alongam através de uma linha reta do início ao fim, definindo a superfície do hiperbolóide. Uma quantidade de fios segue em uma direção no eixo axial e outra quantidade igual segue no sentido oposto. A Fig. 22 (a) mostra um esboço deste tipo de músculo. Quando inflado, a membrana se enche se aproximando da forma de uma superfície esférica totalmente contraída, como mostra a Fig. 22 (b).

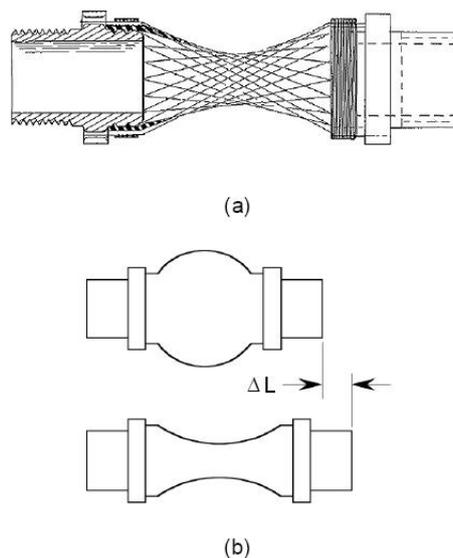


Figura 22: Músculo Paynter Hiperbólico

- Músculo de Torção *Kleinwachter*:** este músculo é referenciado como um músculo de torção, ilustrado na Fig. 23. Ele possui um diafragma tipo toróide unido em sua borda exterior a uma estrutura com uma forma de anel e em sua borda interna a um eixo. O diafragma é embutido com filamentos rígidos que seguem a direção axial obliquamente da estrutura exterior até o eixo. Quando inflado, a membrana se enche e os filamentos giram o eixo no

sentido φ , como indicado na figura. A rotação e o torque são conseguidos assim.

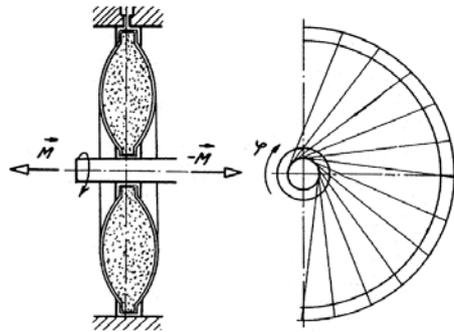


Figura 23: Torção de Kleinwachter

Algumas aplicações destes músculos são comentadas na seção seguinte.

2.3.3. Aplicações

Os *PAMs* nunca foram realmente produzidos comercialmente, com exceção dos atuadores de borracha (*rubbertuators*), que foram produzidos e comercializados pela Bridgestone Co. por algum tempo. Atualmente, músculos do tipo *McKibben* estão sendo introduzidos no mercado pela Festo Ag. & Co., mostrando um grande interesse renovado nestes dispositivos. *PAMs*, hoje em dia, são utilizados principalmente como atuadores robóticos em aplicações onde flexibilidade e alta relação de potência versus peso são importantes, por exemplo máquinas que andam ou correm, robôs humanóides, braços antropomórficos, dedos pneumáticos, dentre outras (Daerden & Lefeber, 2002). Outras aplicações não tiveram tanto êxito na prática, como motores rotativos, suspensão ativa de veículos e direcionamento de boroscópios.

O próximo capítulo apresenta a concepção do manipulador proposto a partir de modelos cinemáticos. O desenvolvimento mecânico de alguns músculos pneumáticos será discutido, assim como a construção dos primeiros protótipos.

3 Concepção e Modelagem do Sistema

Neste capítulo, o manipulador pneumático flexível será introduzido através de seus modelos analíticos para nos casos 2D e 3D. Os cálculos referentes à cinemática direta de ambos os casos serão comentados e, posteriormente, o desenvolvimento dos protótipos preliminares será mostrado. Experimentos relacionados a cada modelo desenvolvido serão apresentados.

Uma versão 2D do manipulador pneumático proposto é formada por n elos ligados em série, atuados pneumaticamente. Cada elo é formado pela união de duas câmaras, atuadas pelas pressões p_1 e p_2 , conforme a Fig. 24.

elo individual

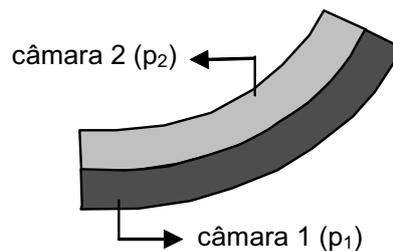


Figura 24: Representação de um elo do manipulador composto por duas câmaras

A diferença das pressões colocadas em cada câmara faz com que o manipulador se curve para uma determinada direção ou simplesmente se mantenha retilíneo, no caso de pressões iguais. Isso ocorre devido ao fato de que, ao pressurizar uma determinada câmara de um elo, a mesma sofrerá um alongamento (se ela possuir uma boa resistência a tensões radiais) ou retração (se ela permitir grandes deformações radiais, como é o caso do *Músculo de McKibben*) de tamanho ΔL . Como não existe movimentação entre as câmaras, isto é, as câmaras são fixas umas às outras, a câmara que não estiver sendo pressurizada terá que se ajustar ao novo tamanho da câmara que está presa a ela, tendendo então a se curvar para compensar a diferença de comprimento. Se a diferença de pressão for zero entre as câmaras, o comprimento de ambas será

igual e neste caso nenhuma curvatura será verificada. A Fig. 25 representa o modelo completo do manipulador 2D para um caso exemplo com três elos.

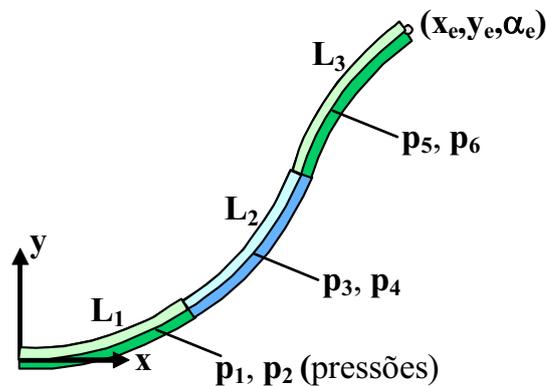


Figura 25: Modelo 2D do manipulador pneumático com 3 elos em série, sendo a posição da sua extremidade representada pelas coordenadas x_e , y_e e α_e

Neste caso, o manipulador possui 3 graus de liberdade (*Degree of Freedom – DOF*) em sua extremidade. Cada diferença de pressão gera um *DOF* de movimento e a média das pressões de cada elo gera mais um *DOF* relacionado à sua rigidez. O cálculo da cinemática direta, na robótica, consiste em, conhecendo-se os ângulos que as juntas de um sistema genérico de n -*DOF* fazem com o referencial da base e o comprimento de cada elo que o compõe, calcular qual a posição da extremidade do manipulador. No cálculo da cinemática direta do manipulador em estudo, os elos foram aproximados por arcos de círculo, como ilustra a Fig. 26.

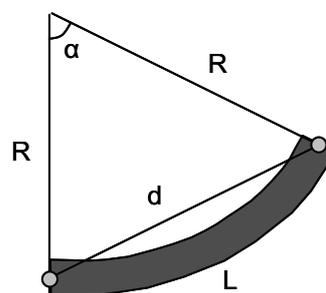


Figura 26: Elo do manipulador aproximado por um arco de círculo

Assumindo que o elo de comprimento L se deforme como um arco de círculo de ângulo α e raio R , o comprimento d da corda associada é:

$$d = 2R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2)$$

Sabendo que L é dado por:

$$L = R \cdot \alpha \quad (3)$$

podemos reescrever a eq. (2) da seguinte forma:

$$d = L \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2}} \quad (4)$$

Projetando as cordas de cada um dos elos nas direções x e y , obtêm-se as equações da cinemática direta do manipulador. As eqs. (5) e (6) descrevem a posição (x_e, y_e) da extremidade do manipulador. As constantes k_1 , k_2 e k_3 explicitadas na eq. (7) estão relacionadas à rigidez de cada elo do manipulador. Neste exemplo, considerou-se uma relação linear entre as diferenças de pressões e os ângulos α_1 , α_2 e α_3 das extremidades de cada elo. Dependendo do tipo de músculo utilizado, relações não-lineares podem estar presentes (como, por exemplo, os músculos artificiais MAS fabricados pela FESTO). De qualquer forma, as eqs. (5) e (6) continuam válidas desde que seja mantida a configuração em arco de círculo.

$$x_e = L_1 \cos\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}{\frac{\alpha_1}{2}} + L_2 \cos\left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}{\frac{\alpha_2}{2}} + L_3 \cos\left(\alpha_1 + \alpha_2 + \frac{\alpha_3}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}{\frac{\alpha_3}{2}} \quad (5)$$

$$y_e = L_1 \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}{\frac{\alpha_1}{2}} + L_2 \sin\left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_2}{2}\right)}{\frac{\alpha_2}{2}} + L_3 \sin\left(\alpha_1 + \alpha_2 + \frac{\alpha_3}{2}\right) \frac{\sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}{\frac{\alpha_3}{2}} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_2 - p_1 \\ p_4 - p_3 \\ p_6 - p_5 \end{bmatrix} \quad (7)$$

O ângulo α_e da extremidade do manipulador é dado por

$$\alpha_e = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (8)$$

A partir das equações acima descritas, é possível conhecer a posição e a orientação da extremidade do manipulador dadas as diferenças de pressões como entradas. As próximas seções desta dissertação apresentarão os diversos protótipos construídos para se desenvolver um músculo pneumático artificial de baixo custo que pudesse ser aplicado como atuador do manipulador pneumático proposto. Diversos projetos serão analisados, apresentando-se as vantagens e desvantagens detectadas em cada uma das gerações. O desenvolvimento de atuadores utilizando mangueiras sem reforço será visto a seguir.

3.1. Mangueiras sem Reforço

Inicialmente, mangueiras flexíveis de diversos diâmetros, espessuras, durezas e materiais foram pesquisadas com a finalidade de utilizá-las como membrana do músculo. Diversos experimentos foram realizados com os tipos mais comuns encontrados no mercado com o intuito de se adquirir experiência com os materiais disponíveis e verificar quais seriam os mais promissores para a construção do músculo. Optou-se pelo desenvolvimento de um músculo que se expandisse ao ser pressurizado devido à maior simplicidade de construção. A Fig. 27 ilustra algumas mangueiras utilizadas nos testes. Modelos analíticos baseados em algumas hipóteses serão vistos a seguir.



Figura 27: Mangueiras flexíveis diversas

3.1.1. Modelagem

A Fig. 28 ilustra a modelagem de uma mangueira de comprimento L_0 inicialmente sem pressão relativa ($p = 0$), sendo suas tensões axial, circunferencial e radial representadas por σ_a , σ_θ e σ_r , respectivamente, iguais a zero. A mangueira possui raio r_0 e espessura t_0 . Ao ser aplicada uma pressão, a mangueira sofre deformações, expandindo o seu comprimento de L_0 até L . A seguir, hipóteses são feitas com a finalidade de se conhecer a deformação causada por cada uma das tensões presentes na mangueira pressurizada. A Fig. 29 ilustra a mangueira pressurizada.

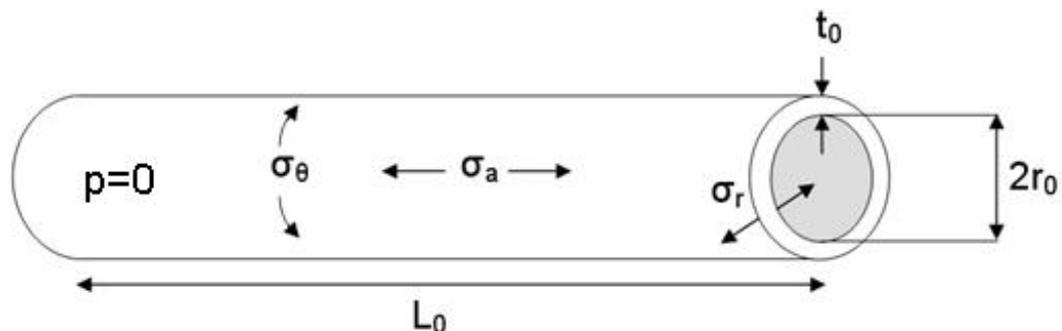


Figura 28: Mangueira sem pressão

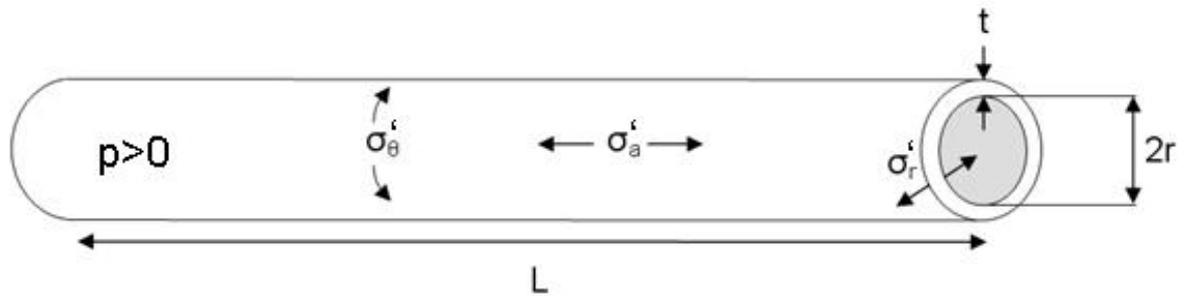


Figura 29: Mangueira pressurizada

Hipótese 1-a: Mangueira com paredes finas ($r_i \approx r_e \approx r$, $t \ll r$)

Numa primeira aproximação, considerou-se uma mangueira com paredes finas, vide Fig. 30. Sendo assim, pode-se aproximar o raio interno (r_i) e o raio externo (r_e) da mangueira por r , o raio médio.

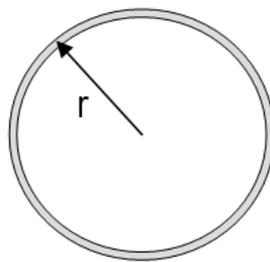


Figura 30: Perfil da mangueira com parede fina

As forças resultantes geradas pela tensão axial são ilustradas na Fig. 31.

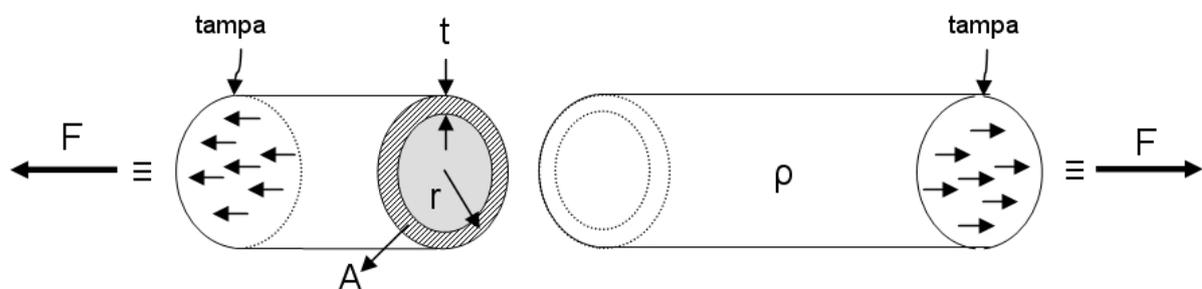


Figura 31: Forças resultantes geradas pela tensão axial

Dada uma mangueira fechada com tampas em suas extremidades, a tensão axial (σ_a) sofrida por ela será:

$$\sigma_a = \frac{F}{A} = \frac{p \cdot \pi r^2}{2\pi r \cdot t} = \frac{pr}{2t} \quad (9)$$

Para o cálculo da tensão circunferencial, tem-se (vide Fig. 32):

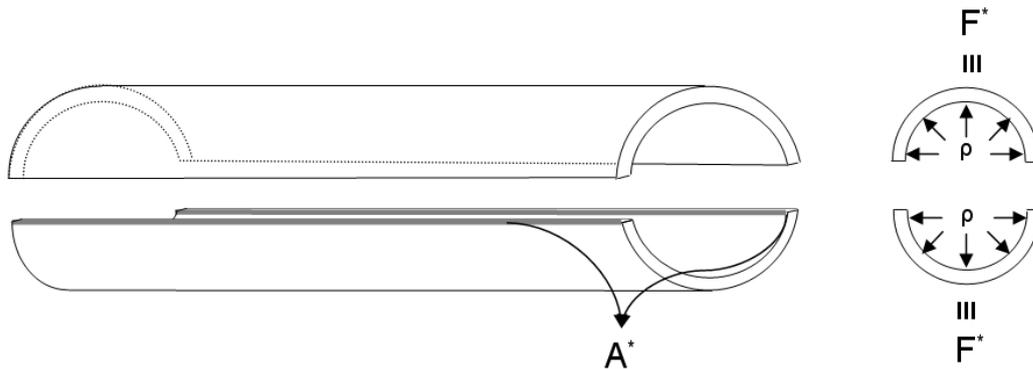


Figura 32: Forças resultantes geradas pela tensão circunferencial

$$\sigma_\theta = \frac{F^*}{A^*} = \frac{p \cdot 2r \cdot L}{2 \cdot t \cdot L} = \frac{pr}{t} \quad (10)$$

Por fim, a tensão radial se resume na pressão inserida dentro da mangueira, para parede interna

$$\sigma_r = -p \quad (11)$$

e para parede externa

$$\sigma_r = 0 \quad (12)$$

As deformações de engenharia são:

$$\varepsilon_{eng_a} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{eng_\theta} = \frac{2\pi r - 2\pi r_0}{2\pi r_0} = \frac{r - r_0}{r_0} \quad (14)$$

$$\varepsilon_{eng_r} = \frac{t - t_0}{t_0} \quad (15)$$

Como neste modelo são tratadas grandes deformações, é preciso usar deformações reais:

$$\varepsilon_a = \ln \frac{L}{L_0} \quad (16)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0} \quad (17)$$

$$\varepsilon_r = \ln \frac{t}{t_0} \quad (18)$$

e assim calcular as tensões σ_a , σ_θ e σ_r pela Lei de *Hooke*:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} (\sigma_a - \nu \cdot (\sigma_\theta + \sigma_r)) \quad (19)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \cdot (\sigma_a + \sigma_r)) \quad (20)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \cdot (\sigma_a + \sigma_\theta)) \quad (21)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material e ν o coeficiente de *Poisson*.

Hipótese 1-b: Mangueira com paredes grossas ($r_i < r_* < r_e$)

Nesta hipótese é considerada uma mangueira com paredes grossas. Sendo assim, a diferença existente entre o raio interno e o raio externo da mangueira é levado em consideração nos cálculos, assim como o parâmetro variável (r_*), como ilustra a Fig. 33.

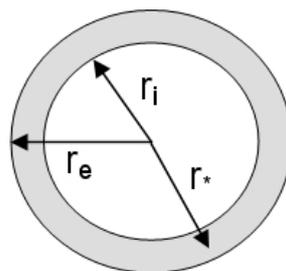


Figura 33: Perfil da mangueira com parede grossa

Partindo para o cálculo das tensões, tem-se a solução analítica exata:

$$\sigma_a = \frac{pr_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (22)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_a \left(1 + \frac{r_e^2}{r_*^2}\right) \quad (23)$$

$$\sigma_r = \sigma_a \left(1 - \frac{r_e^2}{r_*^2}\right) \quad (24)$$

Com isso, as deformações reais ficam:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} (\sigma_a - \nu \cdot (\sigma_a + \sigma_a)) = \frac{1}{E} (\sigma_a - 0,5 \cdot (\sigma_a + \sigma_a)) = 0 \quad (25)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \left(\sigma_a + \sigma_a \frac{r_e^2}{r_*^2} - \nu \cdot (2\sigma_a - \sigma_a \frac{r_e^2}{r_*^2}) \right) = \frac{1}{E} \cdot \frac{3}{2} \sigma_a \frac{r_e^2}{r_*^2} = \frac{1}{E} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{pr_i^2 r_e^2}{(r_e^2 - r_i^2) r_*^2} \quad (26)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left(\sigma_a - \sigma_a \frac{r_e^2}{r_*^2} - \nu \cdot (2\sigma_a + \sigma_a \frac{r_e^2}{r_*^2}) \right) = -\frac{1}{E} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{pr_i^2 r_e^2}{(r_e^2 - r_i^2) r_*^2} = -\varepsilon_\theta \quad (27)$$

Na parede interna, $r_* = r_i$, portanto

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{pr_e^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (28)$$

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta \quad (29)$$

$$r_i = r_{i0} e^{\varepsilon_r} \quad (30)$$

A eq. (30) deve ser resolvida de forma iterativa. Na parede externa, $r_* = r_e$,

logo

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{pr_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (31)$$

$$t \cong t_0 e^{\varepsilon_\theta} \quad (32)$$

$$r_e = r_{e_0} e^{\varepsilon_r} \quad (33)$$

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_\theta \quad (34)$$

As eqs. (32) e (33) precisam ser resolvidas iterativamente pois para grandes deformações não há expressões analíticas fechadas. Alguns experimentos realizados com mangueiras sem reforço são apresentados a seguir.

3.1.2. Experimento

O primeiro experimento realizado consistia em aumentar a pressão interna da mangueira utilizando-se um compressor para tal. Após alguns testes com vários tipos de mangueiras diferentes, optou-se pelo uso de mangueiras de silicone ($E = 7,5\text{MPa}$, $\nu = 0,5$) por apresentarem a melhor relação resistência-flexibilidade dentre as mangueiras disponíveis comercialmente, permitindo deformações significativas mesmo em pressões relativamente baixas como 6 bar. A mangueira utilizada no teste possuía as seguintes características: $L_0 = 750\text{mm}$ (comprimento inicial), $r_0 = 7,25\text{mm}$ (raio médio inicial), $t_0 = 2,5\text{mm}$ (espessura da parede inicial). Como visto anteriormente, a diferença de pressão entre as câmaras de um elo do manipulador faz com que o mesmo se curve em uma determinada direção. Para que a mangueira exercesse bem a sua função de membrana do músculo, ela teria que permitir uma boa deformação radial e uma boa resistência à deformação axial para que o seu comprimento fosse significativamente reduzido; ou então o inverso, apresentar uma boa resistência radial e uma boa deformação axial para que o seu comprimento fosse aumentado. Materiais que permitam deformações a partir de 15% do seu comprimento inicial já são fortes candidatos. Em qualquer uma das hipóteses a mangueira estaria pronta para ser utilizada como membrana. Utilizando:

$$\sigma_a \cong \frac{pr}{2t} \quad (35)$$

$$\sigma_\theta \cong \frac{pr}{t} \quad (36)$$

$$\sigma_r \cong 0 \quad (37)$$

tem-se (fazendo $\nu \cong 0,5$ para o silicone)

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \left(\frac{pr}{2t} - 0,5 \frac{pr}{t} \right) \cong 0 \quad (38)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \left(\frac{pr}{t} - 0,5 \frac{pr}{2t} \right) \cong \frac{1}{E} \cdot \frac{3}{4} \frac{pr}{t} \Rightarrow r = r_0 \cdot e^{\varepsilon_\theta} \quad (39)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left(0 - 0,5 \left(\frac{pr}{2t} + \frac{pr}{t} \right) \right) \cong -\frac{1}{E} \cdot \frac{3}{4} \frac{pr}{t} \Rightarrow t = t_0 \cdot e^{\varepsilon_r} \quad (40)$$

Como a mangueira quase não alonga, pode-se assumir que $L \cong L_0$ e por isso a deformação axial é considerada zero, como mostra a eq. (38). As eqs. (39) e (40) devem ser resolvidas de forma iterativa, pois não apresentam soluções analíticas fechadas. Desse modo, temos $L \cong L_0$, $r > r_0$ e $t < t_0$.

Como esperado pelas equações acima, o comprimento da mangueira sem reforço quase não se alterou, uma vez que o coeficiente de *Poisson* do silicone é aproximadamente 0,5. A pressão máxima que cada uma das mangueiras suportou antes do rompimento variou entre 1 e 2 bar (estipulou-se como pressão máxima a ser utilizada durante os testes o valor de 7 bar por se tratar de um valor típico comercial e por estar dentro dos limites dos equipamentos utilizados durante os experimentos). Neste limiar de pressão, nenhuma das mangueiras sem reforço apresentou boas características para ser utilizada como membrana. A deformação radial aumentava até ocasionar a ruptura do material (Fig. 34) sem que houvesse uma mudança de comprimento significativo.



Figura 34: Ruptura da mangueira de silicone pelo excesso de pressão aplicada

Diversas configurações e arranjos envolvendo mangueiras com este tipo de material foram experimentados e serão analisados posteriormente. Como as mangueiras sem reforço utilizadas não apresentaram uma boa resistência radial por serem flexíveis nesta direção, alguns reforços foram aplicados para melhorar a resistência radial. O próximo item descreve a aplicação de anéis como reforço estrutural destas mangueiras.

3.2. Mangueiras Reforçadas por Anéis

Visto que os materiais das mangueiras sem reforço não apresentavam uma boa resistência na direção radial, alternativas que melhorassem essa resistência foram buscadas. Anéis utilizados em vedação (*o-rings*) foram acoplados às mangueiras para aumentar a sua resistência radial, permitindo a sua livre expansão axial.

Modelos matemáticos baseados em algumas hipóteses com a inclusão dos anéis são comentados a seguir.

3.2.1. Modelagem

A Fig. 35 ilustra a modelagem de uma mangueira de silicone reforçada com anéis muito rígidos. A seguir, hipóteses são feitas com a finalidade de se conhecer a deformação causada pelas tensões presentes na mangueira pressurizada.

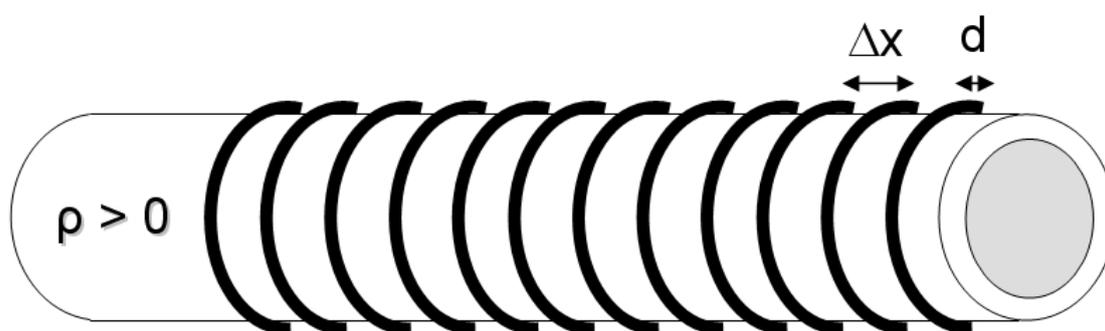


Figura 35: Mangueira de silicone pressurizada reforçada com anéis circulares

Hipótese 2-a: Mangueira com paredes finas ($r_i \approx r_e \approx r, t \ll r$)

Como os anéis não influenciam diretamente no alongamento, no caso da tensão axial, tem-se que:

$$\sigma_a = \frac{pr}{2t} \quad (41)$$

$$\sigma_\theta = (p - p_e) \frac{r}{t} \quad (42)$$

$$\sigma_r \cong 0 \quad (43)$$

A pressão externa é dada por p_e , sendo esta aproximadamente uniforme causada pelos anéis, vide Fig. 36. Considerando $\frac{r}{t} \gg 1$, a tensão radial é desprezada em comparação a σ_a e σ_θ .

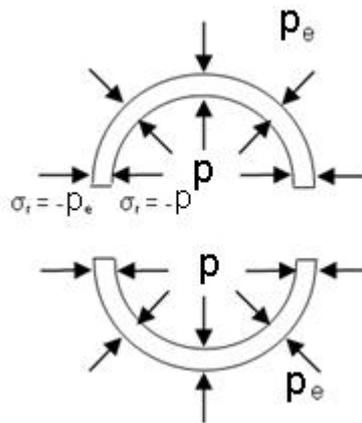


Figura 36: Tensões radiais presentes na mangueira

Conhecendo-se o valor final de r para o anel utilizado e sabendo que

$\varepsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0}$, tem-se que:

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0} = \frac{1}{E} \left[(p - p_e) \frac{r}{t} - \nu \left(\frac{pr}{2t} \right) \right] = \frac{1}{E} \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) p - p_e \right] \frac{r}{t} \quad (44)$$

Assim, a pressão p_e do anel que causaria o valor final de r será

$$p_e = -E \frac{t}{r} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) + \left(1 - \frac{\nu}{2} \right) p \quad (45)$$

e as deformações radiais e axiais serão

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left[0 - \nu \left(\frac{pr}{2t} + \frac{pr}{t} - \frac{p_e r}{t} \right) \right] = \frac{1}{E} \left[-\frac{3\nu}{2} \frac{pr}{t} + \nu \left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \frac{pr}{t} - \frac{\nu E}{2} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \right] = -\frac{1}{E} \frac{\nu(\nu+1)}{2} \frac{pr}{t} - \nu \ln \frac{r}{r_0} \quad (46)$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \left[\frac{pr}{2t} - \nu \left((p - p_e) \frac{r}{t} \right) \right] = \frac{1}{E} \left[\frac{pr}{t} + (0,5 - \nu) + \nu \frac{p_e r}{t} \right] = \frac{1}{E} 0,5(1 - \nu^2) \frac{pr}{t} - \nu \ln \frac{r}{r_0} \quad (47)$$

Na hipótese de se considerar σ_r diferente de zero, obtém-se um modelo mais refinado:

$$\sigma_r \cong -\frac{(p + p_e)}{2} \quad (48)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0} = \frac{1}{E} \left[(p - p_e) \frac{r}{t} - \nu \left[\frac{pr}{2t} + \frac{-(p + p_e)}{2} \right] \right] = \frac{1}{E} \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) p - p_e \right] \frac{r}{t} + \frac{1}{E} \nu \frac{p + p_e}{2} \quad (49)$$

Assim,

$$E \ln \frac{r}{r_0} = p \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \frac{r}{t} + \frac{\nu}{2} \right] - p_e \left[\frac{r}{t} - \frac{\nu}{2} \right] \quad (50)$$

$$p_e = \frac{p \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \frac{r}{t} + \frac{\nu}{2} \right] - E \ln \frac{r}{r_0}}{\frac{r}{t} - \frac{\nu}{2}} \quad (51)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \left[-\frac{p + p_e}{2} - \nu \left(\frac{pr}{2t} + \frac{pr}{t} - \frac{p_e r}{t} \right) \right] \quad (52)$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \left[\frac{pr}{2t} - \nu \left[(p - p_e) \frac{r}{t} - \frac{(p + p_e)}{2} \right] \right] \quad (53)$$

Hipótese 2-b: Anel infinitamente rígido ($r = r_0$)

No caso de anéis muito mais rígidos que a mangueira, o raio final r seria igual ao inicial r_0 . Nesse caso, a pressão externa e as deformações estariam definidas por

$$p_e = \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)p \Rightarrow \sigma_\theta = \frac{\nu}{2} \frac{pr}{t} \quad (54)$$

$$\varepsilon_\theta = 0 \quad (55)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{1}{E} \frac{\nu(\nu+1)}{2} \frac{pr}{t} \Rightarrow t = t_0 e^{\varepsilon_r} \quad (56)$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} \frac{(1-\nu^2)}{2} \frac{pr}{t} \Rightarrow L = L_0 e^{\varepsilon_a} \quad (57)$$

Note que $\varepsilon_r = -\varepsilon_a$

As eqs. (56) e (57) devem ser resolvidas de forma iterativa devido à ausência de equações analíticas fechadas para a sua solução. A deformação axial máxima seria definida por

$$\varepsilon_{aMáximo} = \frac{1}{E} (1-\nu^2) \left(\frac{pr}{2t}\right)_{Máximo} = \frac{1}{E} (1-\nu^2) \sigma_R = (1-\nu^2) \varepsilon_{elR} \quad (58)$$

onde σ_R seria a tensão de ruptura e ε_{elR} a máxima deformação elástica do material antes da ruptura.

Na hipótese de se considerar σ_r :

$$p_e = \frac{p \left[\left(1 - \frac{\nu}{2}\right) \frac{r_0}{t} + \frac{\nu}{2} \right]}{\frac{r_0}{t} - \frac{\nu}{2}} \quad (59)$$

Nesta consideração, as eqs. (56) e (57) referentes às deformações radial e axial não sofreriam alterações. A deformação circunferencial ε_θ seria igual a zero devido ao reforço do anel rígido.

Hipótese 2-c: Anel com rigidez E' e *Poisson* ν'

Nesta situação, cada anel, de espessura d , tem que suportar a pressão p_e ao longo de uma distância $(d+\Delta x)$, onde Δx é a distância de espaçamento entre dois anéis consecutivos, vide Fig. 37.

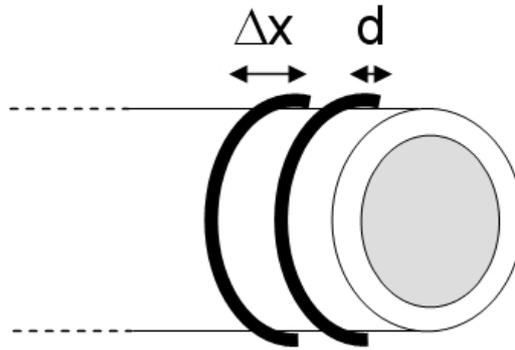


Figura 37: Anéis reforçando a mangueira, espaçados de uma distância Δx

A Fig. 38 apresenta a tensões agindo sobre o anel

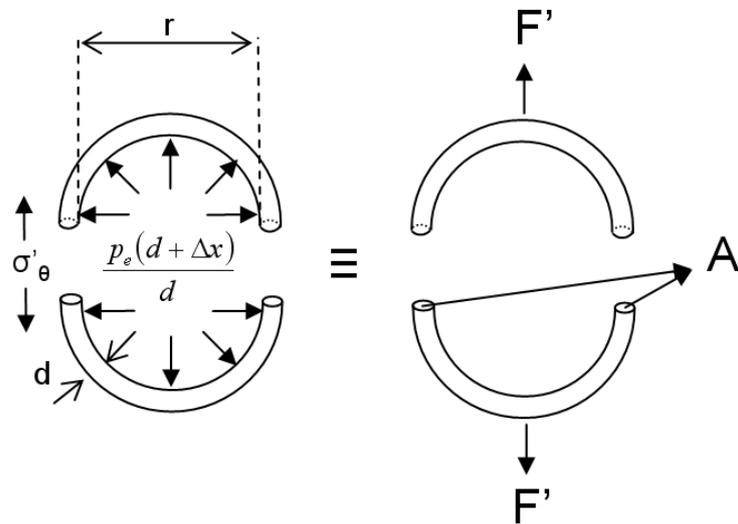


Figura 38: Tensões agindo sobre o anel

As tensões circunferenciais em cada anel são dadas por

$$\sigma'_{\theta} = \frac{F'}{A'} = \frac{p_e \frac{L}{n} 2r}{2\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{p_e d_0 \frac{L}{L_0} 2r}{2\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{p_e \frac{d + \Delta x}{d} 2r}{2\pi \frac{d^2}{4}} \quad (60)$$

Se houver n anéis, note que:

$$\begin{aligned} L_0 &= nd_0 \\ L &= n(d + \Delta x) \end{aligned} \rightarrow \frac{d + \Delta x}{d} = \frac{L}{L_0} \quad (61)$$

Assim,

$$\sigma'_{\theta} = p_e \frac{L}{L_0} \frac{4rd_0}{\pi d^2} \quad (62)$$

$$\sigma'_a = 0 \quad (63)$$

e como $\frac{r}{d} \gg 1$, então

$$\sigma'_r \cong 0 \quad (64)$$

Tem-se então

$$\varepsilon'_{\theta} = \frac{1}{E'} [\sigma'_{\theta} - \nu(\sigma'_a + \sigma'_r)] = \frac{p_e}{E'} \frac{L}{L_0} \frac{4rd_0}{\pi d^2} \quad (65)$$

e como

$$\varepsilon'_{\theta} = \ln \frac{r}{r_0} \quad (66)$$

logo

$$p_e = E' \frac{L_0}{L} \frac{\pi d^2}{4rd_0} \ln \frac{r}{r_0} \quad (67)$$

Igualando a eq. (67) à eq. (45), tem-se:

$$\left(E' \frac{L_0}{L} \frac{\pi d^2}{4rd_0} + E' \frac{t}{r} \right) \ln \frac{r}{r_0} = \frac{3}{4} p \quad (68)$$

A eq. (68) deve ser resolvida iterativamente até que ela convirja para um determinado valor.

Note que $\varepsilon'_r = \frac{1}{E'} [-\nu' \sigma'_{\theta}] = -\nu' \varepsilon'_{\theta}$, e $d = d_0 e^{\varepsilon'_r}$

Na hipótese de se considerar a tensão radial σ_r , igualando-se as eqs. (67) e (51), tem-se que:

$$p_e = E' \frac{L_0}{L} \frac{\pi d^2}{4rd_0} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{p \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \frac{r}{t} + \frac{\nu}{2} \right] - E \ln \frac{r}{r_0}}{\frac{r}{t} - \frac{\nu}{2}} \quad (69)$$

$$\left(E \frac{L_0}{L} \frac{\pi d^2}{4 r d_0} \ln \frac{r}{r_0} \right) \left(\frac{r}{t} - \frac{\nu}{2} \right) + E \ln \frac{r}{r_0} = p \left[\left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \frac{r}{t} + \frac{\nu}{2} \right] \quad (70)$$

A eq. (70) também deve ser resolvida iterativamente, pois não pode ser resolvida analiticamente.

Alguns experimentos realizados com mangueiras reforçadas com anéis são apresentados a seguir.

3.2.2. Experimento

Os diversos tipos de anéis utilizados nos experimentos são comentados a seguir. As características da mangueira de silicone ($E = 7,5\text{MPa}$, $\nu = 0,5$) utilizada nos experimentos são: $L_0 = 750\text{mm}$ (comprimento inicial), $r_0 = 7,25\text{mm}$ (raio médio inicial), $t_0 = 2,5\text{mm}$ (espessura da parede inicial), $S_u = 10\text{MPa}$ (resistência à ruptura do silicone), $d_e = 17\text{mm}$ (diâmetro externo) e $d_i = 12\text{mm}$ (diâmetro interno).

Anel Flexível

Anéis flexíveis foram os primeiros tipos utilizados como reforço radial para a mangueira de silicone (Fig. 39). Anéis com materiais flexíveis são utilizados principalmente para garantir a vedação de sistemas e equipamentos. São fabricados em diferentes tipos de materiais como fluorelastômeros, silicone, butadieno-acrilonitrila, EPDM, PTFE, NBR, etc. Foram utilizados anéis de butadieno-acrilonitrila ($E = 30\text{MPa}$, $\nu \cong 0.5$) de diversos diâmetros e espessuras para os experimentos com a mangueira. Por ser flexível, foi necessário utilizar anéis cujo diâmetro interno fosse menor do que o diâmetro externo da mangueira para que, durante a pressurização da mesma, o anel permitisse a expansão do diâmetro da mangueira até valores próximos ao seu diâmetro original. Dessa forma, o anel era montado comprimindo a mangueira radialmente, como mostra a Fig. 40.



Figura 39: Anéis flexíveis



Figura 40: Mangueira de silicone com os anéis flexíveis

Ao ser pressurizada, a mangueira aos poucos adquire o seu diâmetro original. De acordo com o diâmetro interno dos anéis utilizados, essa compressão inicial era variável. Na Tabela 1 são mostrados os resultados da deformação axial de duas mangueiras de silicone montadas cada uma com um tipo de anel. A Fig. 41 reproduz os mesmos resultados num gráfico. Foram testados dois tipos de anéis, o primeiro com diâmetro interno 12,36mm e espessura 2,62mm, e o segundo com diâmetro interno 15,54mm e mesma espessura. Note que os anéis disponíveis tinham diâmetros internos significativamente menores que o diâmetro externo da mangueira de silicone, inserindo pré-tensões que não foram incorporadas nos modelos apresentados anteriormente. A mangueira foi pressurizada até o seu limite antes do rompimento.

Tabela 1: Comprimento da mangueira de silicone em função da pressão interna inserida

Pressão (bar)	L (mm)	
	anel ($d_i = 12,36\text{mm}$)	anel ($d_i = 15,54\text{mm}$)
0	430	540
1	435	560
2	440	620
3	455	700
4	500	720
5	570	-
6	- *	-

* rompimento da mangueira

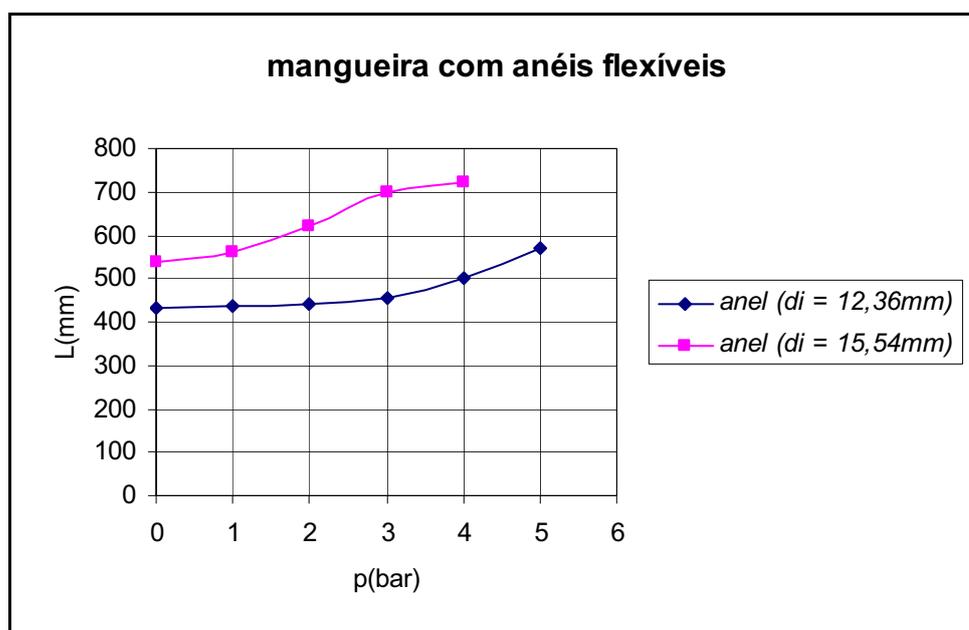


Figura 41: Comprimento da mangueira de silicone com anéis flexíveis em função da pressão interna inserida

A deformação obtida (até a pressão máxima suportada) em cada um dos casos foi bastante expressiva. A mangueira com anéis de maior diâmetro apresentou uma deformação de ruptura de 33,3% em relação ao seu comprimento inicial, enquanto que para o outro caso a deformação de ruptura foi de 32,5%. É notável que com o anel de diâmetro menor, a mangueira suportou maiores pressões. Isto se explica por dois motivos: primeiro, a pré-tensão fez com que o

diâmetro inicial da mangueira fosse menor do que com o outro anel, permitindo-a resistir a pressões maiores com menos deformação circunferencial. Além disso, o comportamento não linear do acrilonitrila-butadieno faz com que seu módulo de elasticidade aumente com a deformação, desse modo o anel com menor diâmetro interno resulta em uma maior rigidez devido à maior deformação inicial causada pela pré-tensão. Mesmo assim, a partir de um certo nível de pressão, os anéis deixavam de ser muito eficientes devido a alguns aspectos. Por serem de borracha, mesmo o anel com o menor diâmetro possível capaz de se ajustar à mangueira permitiu uma deformação além do diâmetro original da mesma. Isso fez com que a resistência à tensão radial melhorasse, mas não resolveu o problema do aumento de raio da mangueira durante a sua pressurização. Além disso, quando a mangueira era pressurizada, espaços começavam a surgir por entre os anéis devido à sua expansão, como mostra a Fig. 42. Como o diâmetro dos anéis também aumentava de acordo com o aumento do diâmetro da mangueira, durante a pressurização acontecia um escorregamento dos anéis em relação à mangueira, fazendo com que os espaços entre eles aumentassem, perdendo a resistência radial e levando à ruptura.

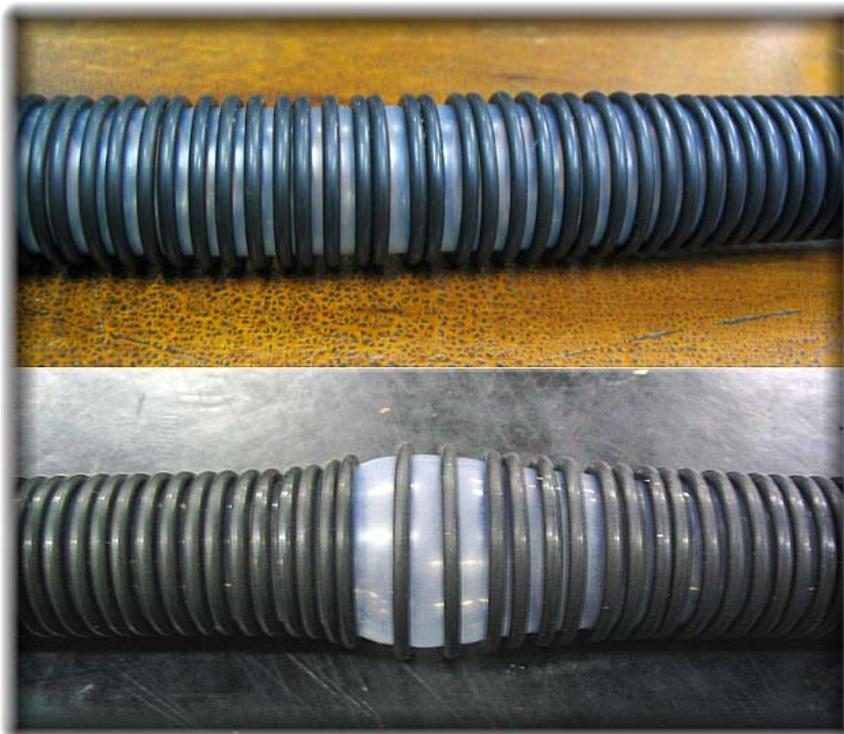


Figura 42: Escorregamento dos anéis durante a pressurização da mangueira

Anel Rígido (com perfil quadrado)

Visando solucionar o problema do escorregamento dos o anéis e impedir o aumento do diâmetro da mangueira, foram cortados anéis de uma mangueira mais resistente reforçada por fibras (Fig. 43), com diâmetro interno igual ao diâmetro externo da mangueira de silicone. Com isso, os anéis se comportariam como anéis rígidos.



Figura 43: Anéis cortados a partir de uma mangueira rígida reforçada com fibras

Apesar de estes anéis terem impedido o aumento do diâmetro da mangueira, o alongamento da mesma foi prejudicado pela grande área de contato entre os anéis e a mangueira. Durante a pressurização, o corpo da mangueira somente se alonga nas áreas que não estão em contato com os anéis. Portanto, quando maior for a área de contato dos anéis com a mangueira, menor será o seu alongamento. Por terem um perfil quadrado, a área de contato com a mangueira é maior, fazendo com que a área disponível para se expandir diminua. A Fig. 44 exemplifica este fato.

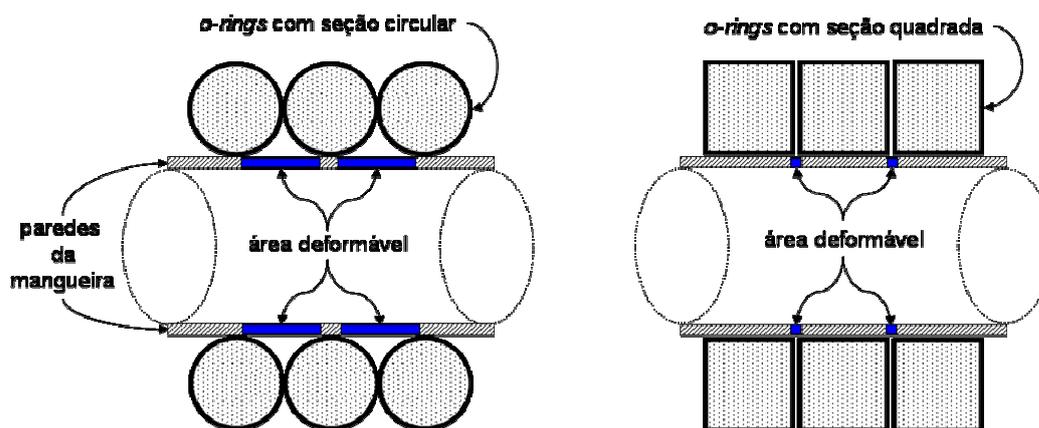


Figura 44: Desenho em corte longitudinal da área deformável (em azul) da mangueira em função do tipo de anel, circular ou quadrado

Anel Rígido (com perfil circular)

Em função do problema constatado com os anéis de perfil quadrado, anéis rígidos de perfis circulares com diâmetro interno igual ao diâmetro externo da mangueira foram introduzidos, vide Fig. 45.



Figura 45: Anéis rígidos

A Fig. 46 apresenta a mangueira de silicone montada com os anéis rígidos. Os anéis de alta rigidez relativa de polietileno não permitiram o aumento no diâmetro da mangueira e também não escorregaram durante a pressurização, como aconteceu com os anéis flexíveis de butadieno-acrilonitrila. Os anéis tinham um

diâmetro interno de 16,8mm e espessura média de 1,9mm. Na Tabela 2 são mostrados os resultados da deformação axial de uma mangueira de silicone montada com este tipo de anel.



Figura 46: Mangueira de silicone montada com anéis rígidos

Tabela 2: Comprimento da mangueira de silicone em função da pressão interna inserida

	L (mm)
Pressão (bar)	(anel rígido de polietileno)
0	213
1	225
2	250
3	275
4	295
5	310
6	318

Neste experimento não houve sinais de rompimento da mangueira até pressões em torno de 9 bar. Foi obtida uma deformação de 49,3% com relação ao seu comprimento inicial. No entanto, um problema associado à rigidez dos anéis foi constatado. Por serem rígidos, os anéis não conseguem se ajustar uns aos outros para compensar mudanças no formato da mangueira devido à flexão. Eles acabam por se sobrepor, como mostra a Fig. 47.

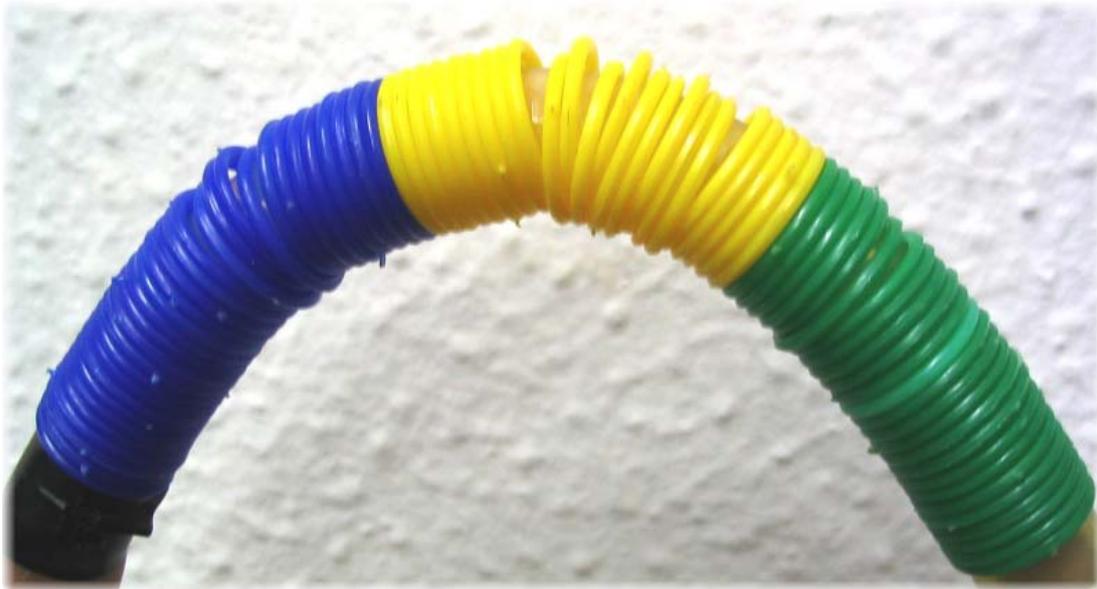


Figura 47: Anéis rígidos amontoados durante a curvatura da mangueira

Anéis Flexíveis e Rígidos

Montou-se uma mangueira de silicone com anéis rígidos e flexíveis intercalados, com respectivos 16,8 e 17mm de diâmetro, para corrigir o problema verificado durante a curvatura da mangueira, como mostra a Fig. 48. Os anéis rígidos impediam a deformação radial da mangueira e ao mesmo tempo melhoravam a questão do escorregamento. Os anéis flexíveis se ajustavam para permitir mudanças de forma da mangueira devido a flexão, como ilustra a Fig. 49.



Figura 48: Mangueira de silicone montada com anéis rígidos e flexíveis intercalados



Figura 49: Anéis rígidos e flexíveis durante a curvatura da mangueira

Especificamente nesta montagem, não foram feitos testes com as mangueiras individuais. Os testes foram realizados somente com as mangueiras montadas em conjunto. Um outro tipo de reforço radial para as mangueiras será apresentado a seguir.

3.3. Mangueiras Reforçadas por Fios

Uma outra maneira de melhorar a resistência radial das mangueiras de silicone foi conseguida enrolando-se um fio rígido (em comparação à rigidez da mangueira) ao longo do seu comprimento. O diâmetro pequeno do fio em relação ao diâmetro externo da mangueira fez com que a área de contato com a mangueira

fosse muito pequena, causando praticamente nenhuma resistência axial durante a deformação neste sentido.

A seguir é referenciado o modelo analítico deste caso.

3.3.1. Modelagem

A modelagem deste tipo de mangueira é aproximada a partir das equações obtidas para mangueiras com anéis. Esta aproximação é satisfatória desde que o passo da espiral formada pelo fio de reforço seja pequeno em relação ao diâmetro da mangueira. Neste caso, o fio praticamente não exerce força na direção axial da mangueira, se comportando como anéis independentes.

No entanto, para grandes deformações, fios que possuam grande rigidez em relação à mangueira, irão tender a manter seu comprimento constante. Esse efeito de segunda ordem causa uma torção na mangueira, como previsto em Tanaka (1993), vide Fig. 50.

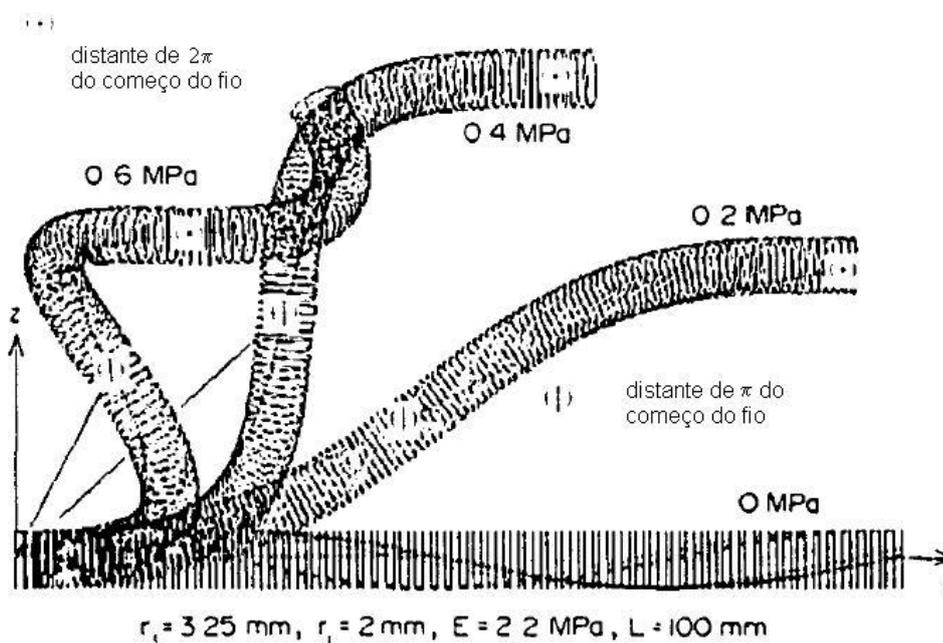


Figura 50: Ilustração da deformação de uma mangueira envolta por um fio

Experimentos realizados com uma mangueira reforçada por fio serão apresentados a seguir.

3.3.2. Experimento

Um fio rígido de polipropileno ($E_2 = 1350\text{MPa}$, $\nu_2 = 0,4$) com 1mm de diâmetro foi enrolado em uma mangueira de silicone ($E = 7,5\text{MPa}$, $\nu = 0,5$) e a pressurização da mangueira foi então iniciada. As características da mangueira utilizada nos testes são: $L_0 = 750\text{mm}$ (comprimento inicial), $r_0 = 7,25\text{mm}$ (raio médio inicial), $t_0 = 2,5\text{mm}$ (espessura da parede inicial), $S_u = 10\text{MPa}$ (resistência à ruptura do silicone), $d_e = 17\text{mm}$ (diâmetro externo) e $d_i = 12\text{mm}$ (diâmetro interno). A Fig. 51 ilustra a mangueira de silicone envolta pelo fio rígido de polipropileno.

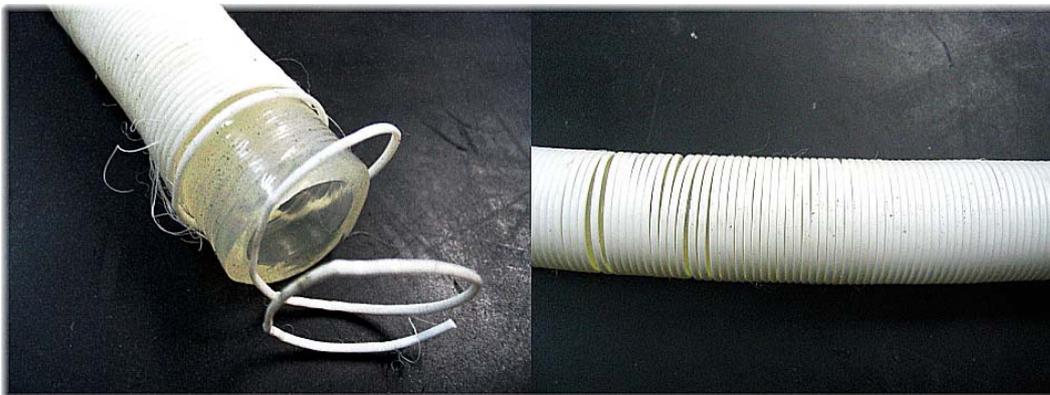


Figura 51: Mangueira de silicone envolta pelo fio rígido de polipropileno

O resultado obtido com o reforço do fio é caracterizado pela expressiva deformação axial conseguida durante o experimento de injeção de pressão, chegando a deformações aproximadamente lineares de até 100% do seu comprimento inicial. A Fig. 52 apresenta os valores obtidos medindo-se o comprimento da mangueira em função da pressão, e a previsão feita a partir das eqs. (41) a (59).

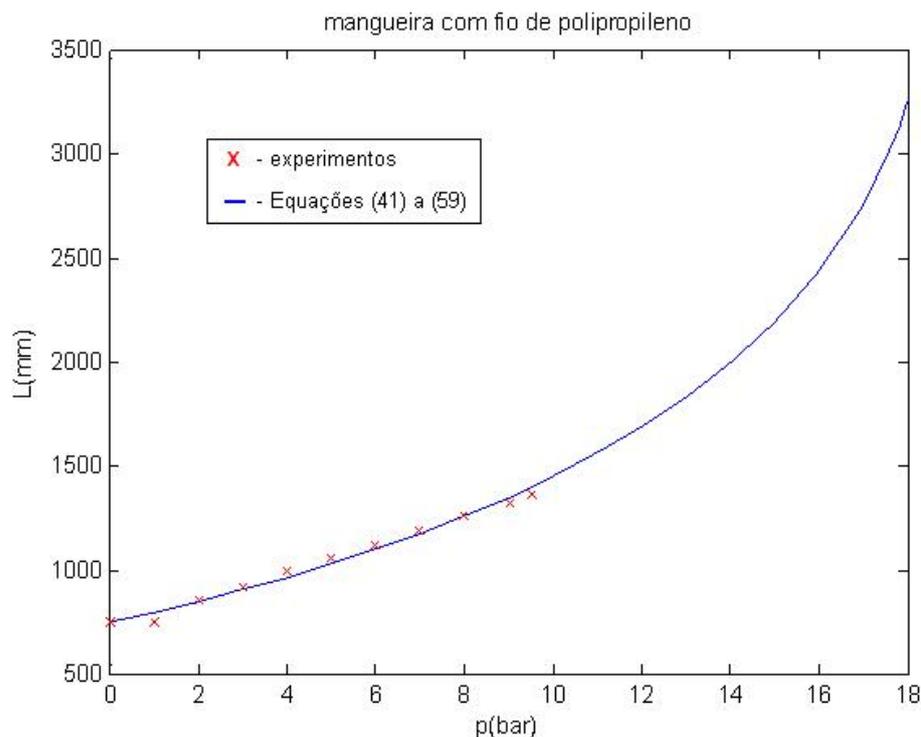


Figura 52: Deformação axial da mangueira reforçada com o fio de polipropileno

Apesar do excelente desempenho conseguido com o reforço do fio de polipropileno, durante a pressurização e despressurização da mangueira, o efeito de segunda ordem comentado anteriormente na modelagem se fez presente. Durante a expansão axial a mangueira apresentou um movimento de torção em torno do seu eixo axial proveniente da disposição espiral do fio. Esse efeito será melhor visualizado na seção 3.5.2 (3ª Geração), onde três mangueiras com esse reforço são unidas.

A vantagem dos anéis sobre o reforço com o fio enrolado é que eles são acoplados na mangueira de forma circular e não espiral, fazendo com que o efeito de torção não aconteça.

O item a seguir aprofunda o estudo de atuadores pneumáticos utilizando-se do músculo pneumático artificial desenvolvido pela FESTO em alguns experimentos.

3.4. Músculo MAS-10 da FESTO

O músculo pneumático MAS, ao contrário dos protótipos desenvolvidos acima, se contrai quando sob pressão. O músculo combina tubos flexíveis impermeáveis de cloropreno com um revestimento de fibras robustas de aramida em formato de losango, criando assim uma estrutura tridimensional. Por questões de patente, não foi possível obter maiores informações à respeito dos materiais utilizados na fabricação do músculo. Quando o ar é admitido, a forma dessa estrutura é alterada pela expansão radial e surge uma força de tração na direção axial. A estrutura de grade faz com que o músculo reduza seu comprimento à medida que a pressão interna aumenta. Isso corresponde a um curso máximo de aproximadamente 25% do comprimento inicial sem carga. A Fig. 53 apresenta o músculo pneumático MAS-20 da FESTO.



Figura 53: Músculo pneumático MAS-20 da FESTO, totalmente contraído na parte superior da figura e no seu comprimento inicial na parte inferior

O princípio de atuação do MAS-10 é inverso ao dos músculos que até então vinham sendo desenvolvidos durante esta dissertação, que se expandiam sob pressão. No entanto, o princípio da movimentação do manipulador através da diferença de pressão entre as câmaras também é válido para este tipo de atuador. A única mudança é que a curvatura do elo agora acontecerá para o lado oposto. A grande vantagem em se utilizar este atuador está na confiabilidade que ele apresenta por se tratar de um produto já comercializado. Algumas características do músculo:

- força de avanço até 10 vezes maior do que um cilindro convencional do mesmo diâmetro;
- alta frequência;
- movimento sem torsões;
- ajuste simples de posições intermediárias mediante a regulação de pressão;
- baixo peso;
- hermeticamente vedado.

A Fig. 54 ilustra a faixa de operação do músculo de 10mm (MAS-10) dependendo do seu diâmetro. Na esquerda do diagrama pode-se notar o limite determinado pelo estiramento prévio máximo. Na direita, parte superior, nota-se o limite determinado pela pressão de funcionamento máxima admissível. Acima é possível ver o limite determinado pela força máxima possível. E por fim, na direita, parte externa, é possível observar o limite determinado pela contração máxima admissível.

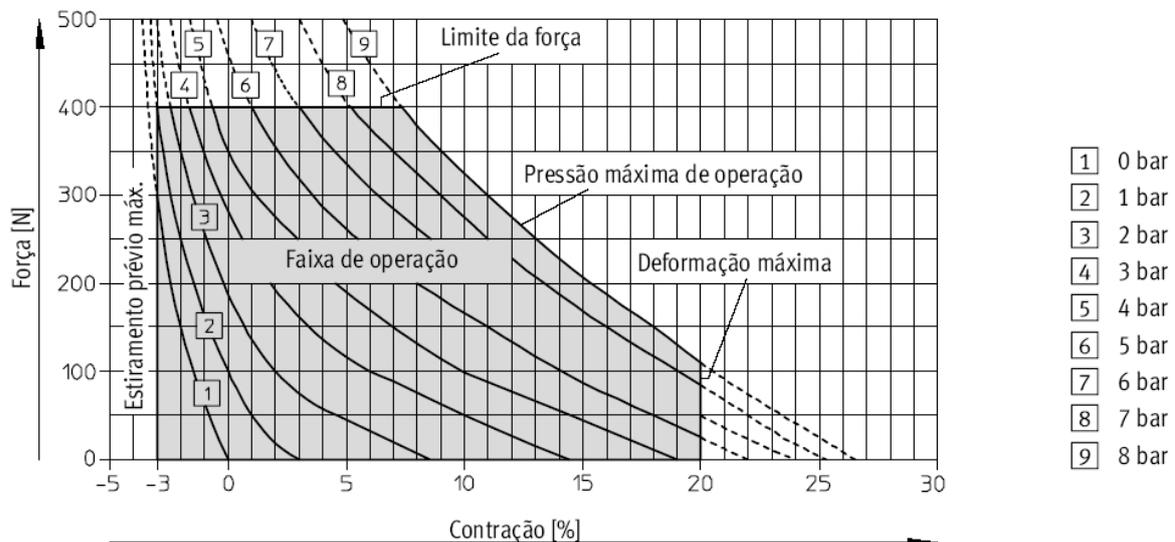


Figura 54: Diagrama da faixa de operação do MAS -10

O limite de peso das cargas “livremente suspensas” depende da extensão. Com o MAS-10 despressurizado, ao acoplar uma carga adicional de 30 kg livremente suspensa, uma extensão de 3% é resultada. Cargas maiores podem danificar a superfície interna do músculo. Entretanto, se uma carga estiver apoiada sobre uma base e deve ser elevada pelo músculo, essa carga pode ser maior

sempre considerando a limitação da força do músculo (no caso do MAS-10, essa carga é no máximo de 40 kg ou 400 N), pois neste caso a pressurização permite um maior limite de peso.

Alguns experimentos realizados com MAS-10 serão apresentados a seguir.

3.4.1. Experimentos

O experimento teve como objetivo fazer um levantamento da faixa de operação do músculo MAS-10 e comparar os valores medidos às curvas ilustradas na Fig. 55, fornecidas pelo fabricante. O músculo utilizado possui 10mm de diâmetro e 986mm de comprimento de membrana. Pesos foram sendo acrescentados à sua extremidade e o seu comprimento foi sendo medido para cada nível de pressão aplicado, com um intervalo de 30 segundos entre cada medição. Para cada relação de peso e pressão foram feitas duas medições do comprimento da membrana em duas réguas diferentes, visando realizar uma medição mais correta e cancelar efeitos de rotação da extremidade. Para cada caso foi calculada a média entre esses valores e as deformações compressivas respectivas estão na Tabela. 3. A Fig. 55 mostra o aparato necessário para a realização do experimento.

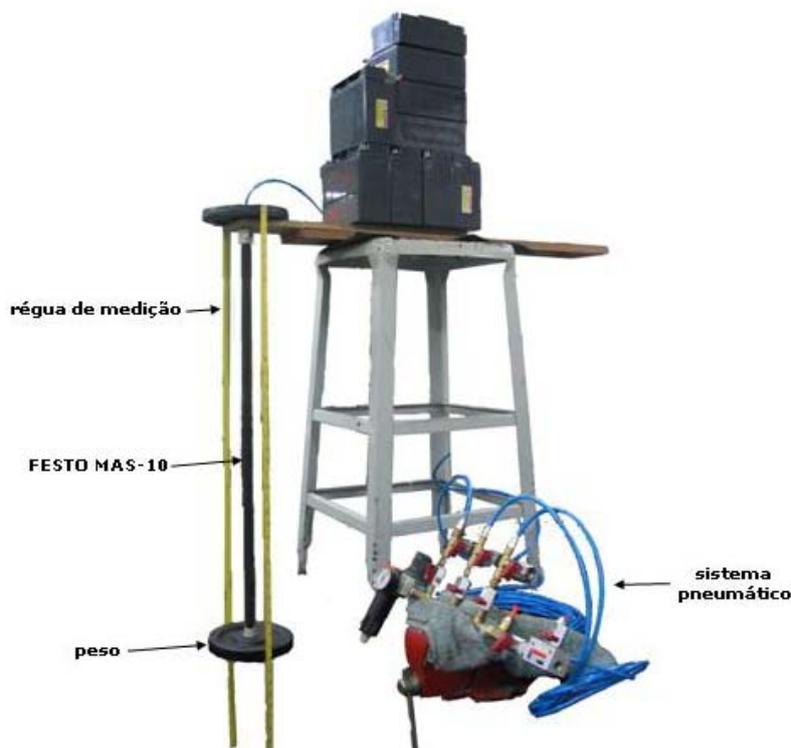


Figura 55: Montagem do experimento com o músculo

Tabela 3: Dados experimentais do MAS-10

		Força (N)										
		0,00	32,9	63,9	95,8	127	159	191	224	256	287	319
bar	Deformação (%)											
0	0,00	-0,70	-1,21	-1,77	-2,28	-2,58	-2,99	-3,45	-3,60	-3,85	-4,16	
1	1,97	1,26	0,30	-0,45	-1,21	-1,67	-2,03	-2,54	-2,79	-3,14	-3,55	
2	6,49	4,81	3,19	1,87	0,55	-0,20	-0,76	-1,57	-1,83	-2,28	-2,84	
3	12,1	9,22	7,55	5,32	3,34	1,98	0,81	-0,10	-0,56	-1,27	-2,13	
4	16,4	14,1	11,6	9,48	7,04	5,27	3,45	2,18	1,17	0,25	-0,61	
5	19,4	17,2	15,2	13,2	10,8	8,72	7,00	4,92	3,70	2,48	1,17	
6	21,5	19,7	17,9	15,5	13,9	12,0	10,0	8,16	6,49	5,12	3,65	

A Fig. 56 apresenta os gráficos da faixa de operação do MAS-10 obtidos experimentalmente, com os dados da Tabela 3.

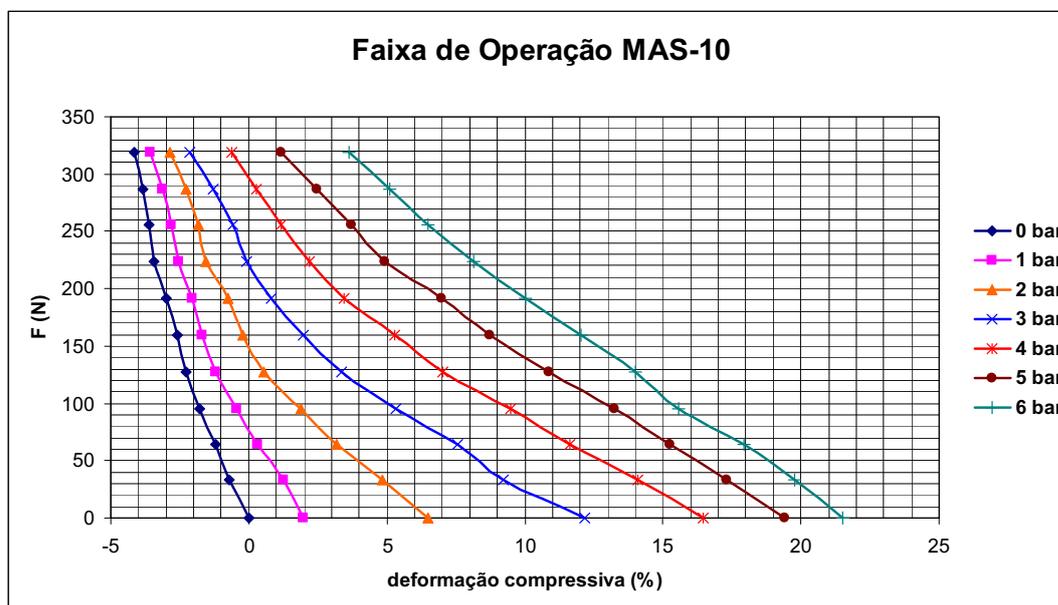


Figura 56: Gráfico da faixa de operação do MAS-10 a partir dos dados experimentais

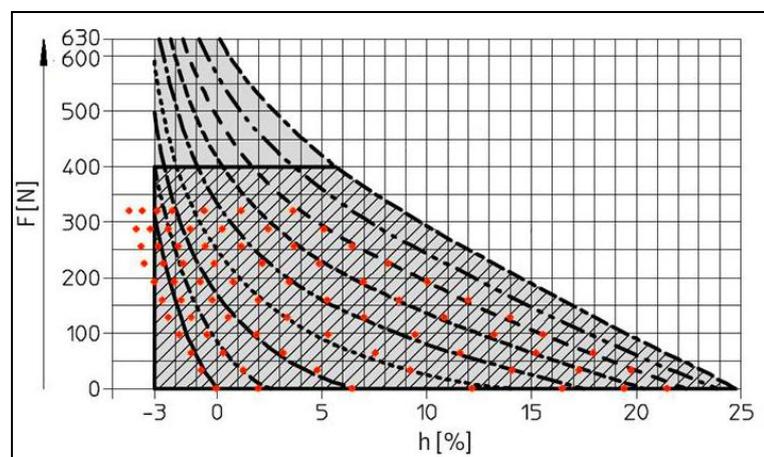


Figura 57: Gráfico comparativo entre as curvas fornecidas pelo fabricante e os dados experimentais

A Fig. 57 apresenta uma comparação dos valores obtidos experimentalmente (pontos em vermelho) com os dados fornecidos pelo fabricante. É possível notar que existe um erro entre os pontos do experimento e as linhas do gráfico para pressões menores sob forças altas. Uma possível fonte deste erro pode ser vinculada ao momento fletor parasita causado por um desalinhamento entre o centro de gravidade das anilhas utilizadas e o eixo de simetria do músculo. Estes momentos não puderam ser evitados com o aparato experimental utilizado. Para pressões maiores, a maior rigidez de flexão do músculo contribuiu para diminuir esse erro de alinhamento.

A próxima seção descreve o agrupamento dos músculos desenvolvidos na formação de um elo do manipulador. Modelos analíticos serão elaborados e experimentos serão descritos.

3.5. Montagem dos Elos

Cada elo do manipulador é composto por três câmaras, no caso, três músculos pneumáticos. Para possibilitar a união dos músculos a fim de formar um elo, diversos mecanismos foram testados e avaliados em paralelo ao desenvolvimento de cada músculo individual, comentado nos itens anteriores.

Nas seções seguintes, um modelo 3D da cinemática do elo será introduzido e diversas soluções mecânicas para a união dos músculos serão discutidas.

3.5.1. Modelo 3D

O modelo analítico para o caso 3D do manipulador é análogo ao modelo 2D, apresentado anteriormente. O manipulador consiste de n elos flexíveis conectados em série, atuados pneumaticamente. Cada elo possui três câmaras que podem ser independentemente pressurizadas com pressões P_1 , P_2 e P_3 , como mostra a Fig. 58. A diferença de pressão entre as câmaras faz com que o elo se curve em uma direção conhecida, ou então o elo continua reto se todas as pressões permanecerem iguais (Suzumori et al., 1991; Suzumori et al., 1992).

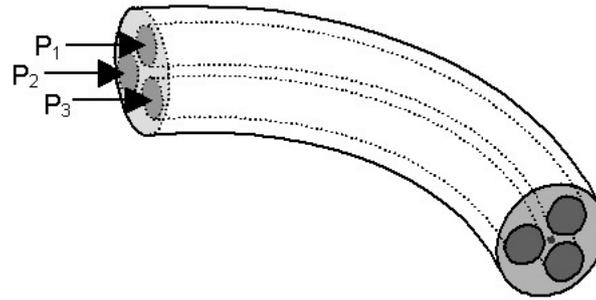


Figura 58: Esquema de um elo do manipulador com as suas três câmaras independentes

Cada elo possui três graus de liberdade, resultando em um sistema de $3n$ *DOFs*. As diferenças $(P_1 - P_2)$ e $(P_1 - P_3)$ são suficientes para definir a orientação e o raio de curvatura de cada elo. Além disso, a pressão média $(P_1 + P_2 + P_3)/3$ é responsável pela mudança de comprimento do elo como um todo na direção axial. Na maioria dos casos, esse alongamento ou encurtamento é relativamente pequeno se comparado ao efeito de curvatura do elo. Mesmo que esse efeito da pressão média precise ser computado no cálculo da cinemática direta, ele somente proverá à extremidade uma pequena mobilidade adicional. Então, somente $2n$ *DOFs* determinarão na maioria das vezes a mobilidade do sistema. Os n graus de liberdade restantes, que são associados com a pressão média em cada um dos n elos, são basicamente responsáveis por alterar o comprimento médio dos elos e a flexibilidade do sistema.

Um modelo simplificado foi desenvolvido para um elo composto de mangueiras reforçadas com anéis rígidos (em relação à rigidez da mangueira). Nesse caso, o diâmetro de cada mangueira permanece aproximadamente constante, enquanto que o seu comprimento aumenta à medida que é pressurizado. Assumindo cada elo com um comprimento inicial L_0 , o comprimento final L pode ser calculado através do deslocamento axial ΔL causado pela pressão média

$$L = L_0 + \Delta L = L_0 + \frac{L_0 A_p (P_1 + P_2 + P_3)}{3 A_0 E} \quad (71)$$

onde A_p é a área total interna do corte transversal referente às três câmaras, A_0 é a área da estrutura elástica reforçada com fibras (sem incluir a área das câmaras), e

E é o módulo de elasticidade do elastômero, vide Fig. 59. A equação citada anteriormente considera somente a deformação axial, sem levar em conta uma deformação radial significativa devido ao reforço feito na estrutura com fibras de alta rigidez.

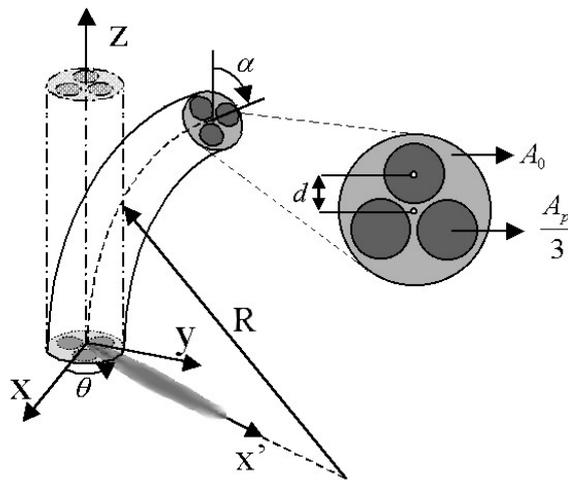


Figura 59: Modelo analítico de cada elo

O centro da câmara associada à pressão P_1 é definido no eixo y entre o terceiro e o quarto quadrantes do plano xy na Fig. 59. As câmaras com pressões P_2 e P_3 são definidas no segundo e no primeiro quadrantes respectivamente. Assumindo que existe uma diferença de pressão entre as câmaras, o elo deforma idealmente como um arco de círculo com ângulo α e raio R , calculados por

$$R = \frac{3EI}{A_p d \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 - P_1 P_2 - P_2 P_3 - P_1 P_3}} \quad (72)$$

$$\alpha = \frac{L}{R} \quad (73)$$

onde d é a excentricidade de cada câmara e I é o momento de inércia de flexão do elo. Note que α é o ângulo entre as extremidades dos elos. As equações acima foram obtidas equilibrando-se o momento fletor provocado pelas mangueiras.

O ângulo θ entre os eixos x e x' , onde x' é a direção da projeção do elo no plano xy na Fig. 59, também pode ser obtido através das pressões aplicadas, resultando em:

$$\theta = \arctan \frac{2P_1 - P_2 - P_3}{(P_2 - P_3)\sqrt{3}} \quad (74)$$

Através das eqs. (71-74) é possível obter os valores de L_i , R_i , α_i e θ_i de cada elo i do manipulador. Estes valores são utilizados para a obtenção da matriz de transformação homogênea A_i^{i-1} entre os sistemas de coordenadas de ambas as extremidades dos elos (Asada et al., 1986):

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \theta_i (1 - \cos \alpha_i) & \cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & \frac{L_i}{\alpha_i} \cos \theta_i (1 - \cos \alpha_i) \\ -\sin \theta_i \cdot \cos \theta_i (1 - \cos \alpha_i) & \cos^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & \frac{L_i}{\alpha_i} \sin \alpha_i (1 - \cos \alpha_i) \\ -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & -\sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & \frac{L_i}{\alpha_i} \sin \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (75)$$

Note que a matriz acima é função das pressões $P_{1,i}$, $P_{2,i}$ e $P_{3,i}$ aplicadas nas câmaras 1, 2 e 3 do elo i , respectivamente. Esta equação também pode ser aplicada para qualquer outro músculo utilizado, desde que sejam conhecidas as relações entre as pressões e as dimensões L_i , R_i , α_i e θ_i de cada elo, e que cada elo possa ser aproximado como um arco de círculo.

Para um manipulador de n elos, a matrix A_n^0 que correlaciona os eixos de coordenadas da base e da extremidade é obtida por (Craig, 1989):

$$A_n^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot \dots \cdot A_n^{n-1} \quad (76)$$

Uma vez introduzido o conceito do modelo analítico do manipulador flexível, o foco do estudo se voltou para o desenvolvimento de um músculo pneumático artificial que possuísse características que viabilizassem a construção do manipulador teórico. A partir daí, uma longa e importante etapa teve início

voltada para a realização de experimentos com diversos materiais e mecanismos que pudessem ser usados para a confecção de um *PAM*.

A seção seguinte apresenta os espaçadores desenvolvidos para a formação do elo em cada uma das gerações de protótipos.

3.5.2. Desenvolvimento de Espaçadores

Diversos mecanismos com a função de espaçadores foram adaptados e desenvolvidos para que os músculos fossem unidos na formação de um elo do manipulador. O desenvolvimento dos espaçadores será mostrado através de diversas gerações. Muita experiência foi adquirida em cada uma das gerações até se alcançar o protótipo que apresentasse as melhores características de deformação e rigidez à torção atreladas à confiabilidade mecânica do sistema. Quanto menor for o raio de curvatura exercido pelo elo do manipulador, maior será seu volume de trabalho. Dessa forma, o raio de curvatura dos protótipos de cada uma das gerações estará sendo analisado.

1ª Geração

O primeiro protótipo foi montado ainda com mangueiras siliconadas ($E = 7,5\text{MPa}$, $\nu = 0,5$), mesmo sendo depois substituídas por outras de silicone puro, vide Figs. 60 e 61. As mangueiras siliconadas são um pouco mais resistentes do que as de silicone, no entanto são menos flexíveis. Foi usada uma cola vedante industrial (Sintex Quilosa, MS-35, ver ANEXO) composta de poliuretano que, depois de seca, forma um emborrachado bastante flexível e com grande resistência. Essa cola foi utilizada para unir as três mangueiras siliconadas. Como reforço adicional, foram utilizadas fitas de polímeros sintéticos (abraçadeiras) para garantir que as mangueiras não se separariam durante a pressurização. A mangueira siliconada possui diâmetro interno de 12mm e externo de 17mm.

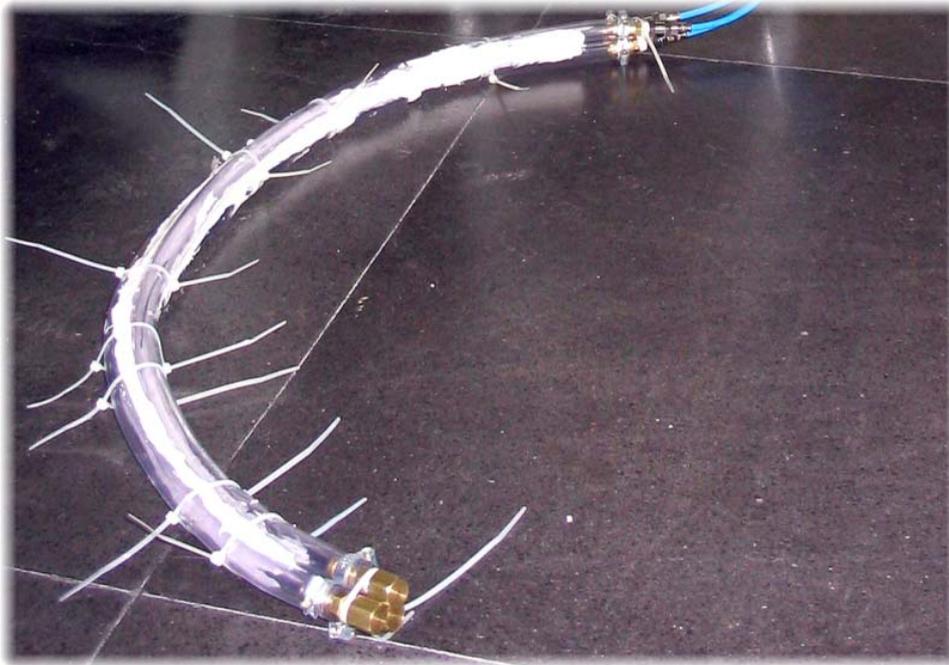


Figura 60: 1ª Geração, mangueiras siliconadas presas com cola de poliuretano reforçadas com abraçadeiras

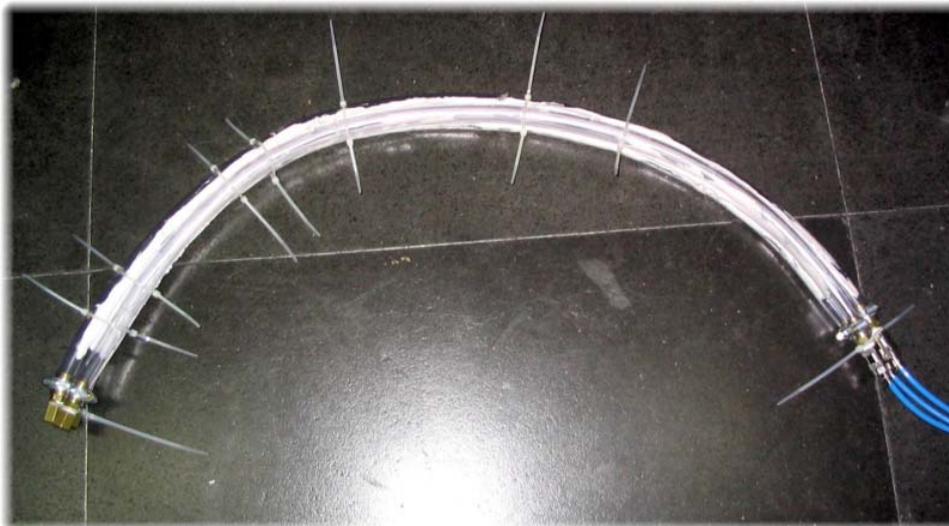


Figura 61: 1ª Geração, outra vista

Para baixas pressões (até 6 bar), a maior rigidez da mangueira siliconada (em relação à de silicone) somente possibilitou baixas deformações. O protótipo apresentou boas deformações para altas pressões (até 9 bar). Porém, tanto as abraçadeiras como as mangueiras se romperam nesse caso, não suportando por muito tempo as altas pressões. As mangueiras eram fechadas com um espigão com tampa, preso por uma abraçadeira (Fig. 62). As abraçadeiras tinham que ser presas ao espigão mais apertadas do que o normal para que não escapasse ar sob

pressões mais altas, de 6 à 9,5 bar. Esse aperto excessivo ocasionava desgastes na borda da mangueira que ficava em contato com a abraçadeira, levando à sua ruptura.



Figura 62: Extremidades das mangueiras, fechadas com espigões e presas através de abraçadeiras

A Fig. 63 ilustra um corte em perfil deste protótipo.

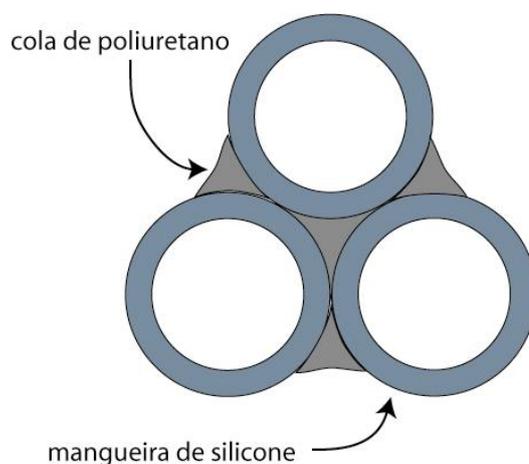


Figura 63: Desenho de um corte em perfil da 1ª geração

2ª Geração

Um novo protótipo foi montado com mangueiras de silicone visando diminuir a faixa de pressões e continuar obtendo deformações grandes, como mostra a Fig. 64. O protótipo foi pressurizado com pressões de até 8 bar. A cola de poliuretano foi colocada ao longo de todo o comprimento do elo para garantir um

reforço maior para as paredes da mangueira de silicone. As mangueiras de silicone utilizadas possuem diâmetro interno de 12mm e externo de 17mm.



Figura 64: 2ª Geração, mangueiras de silicone revestidas com cola de poliuretano

Com a mangueira de silicone, maiores deformações longitudinais foram obtidas a partir de menores pressões. No entanto, o revestimento com a cola de poliuretano ainda resultou numa baixa resistência às tensões radiais, ocasionando o rompimento da mangueira. Os problemas referentes ao mecanismo de vedação das extremidades da mangueira permaneceram.

A Fig. 65 ilustra um corte em perfil do protótipo desenvolvido na 2ª geração.

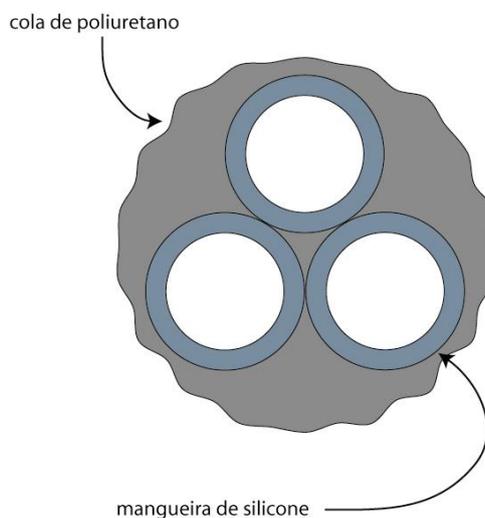


Figura 65: Desenho de um corte em perfil da 2ª geração

3ª Geração

Como as abraçadeiras e a cola de poliuretano não foram suficientes para reforçar as paredes da mangueira contra as pressões inseridas, cada mangueira de silicone foi reforçada individualmente por um fio de polipropileno enrolado ao longo do seu comprimento (ver seção 3.3). A cola de poliuretano foi utilizada desta vez somente como união das mangueiras, uma vez que o fio de polipropileno fazia o papel de reforço. O efeito de segunda ordem previsto anteriormente na modelagem do músculo deste elo fez-se notar com bastante clareza durante o experimento, como mostra a Fig. 66. Ao ser pressurizado, o elo se expandiu longitudinalmente torcendo-se em função do efeito do fio de reforço.



Figura 66: 3ª Geração, mangueiras de silicone reforçadas com fio de polipropileno, revestidas com cola de poliuretano

Além do efeito de rotação indesejado, a cola de poliuretano não suportou por muito tempo os ciclos de pressurização e despressurização do elo, como mostra a Fig. 67. É conveniente ressaltar que a construção dos protótipos foi feita de forma artesanal e que, por esse motivo, existiram imperfeições durante as

montagens, contribuindo para variações de comportamento dos protótipos e falhas durante os experimentos.



Figura 67: Rompimento da cola de poliuretano devido à força exercida pelos músculos

Apesar da excelente deformação axial conseguida através das mangueiras reforçadas com fio, o efeito de torção gerado inviabilizou a continuação dos estudos com base neste protótipo. A Fig. 68 ilustra um desenho em corte desse protótipo.

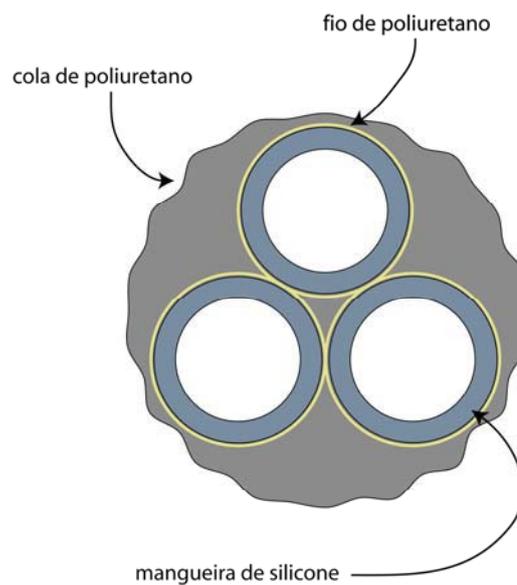


Figura 68: Desenho de um corte em perfil da 3ª geração

4ª Geração

Nesta etapa, as mangueiras de silicone reforçadas por anéis flexíveis foram agrupadas com abraçadeiras, como mostra a Fig. 69. Mesmo com o escorregamento dos anéis o elo conseguiu se curvar com eficiência. Fitas reforçadas com fibras foram coladas nas extremidades das mangueiras para impedir o desgaste provocado pelas abraçadeiras. A partir deste protótipo convencionou-se utilizar a faixa de pressões entre 0 e 6 bar durante os experimentos, principalmente porque 7 bar é o limiar máximo de pressão suportado pelos equipamentos e sistemas utilizados nos experimentos. É claro que essa faixa de pressão limitará o sistema a atuar em certas condições específicas, uma vez que a movimentação do manipulador é influenciada diretamente pelo seu comprimento e pela força despendida por cada elo, que por sua vez estão relacionadas à pressão.

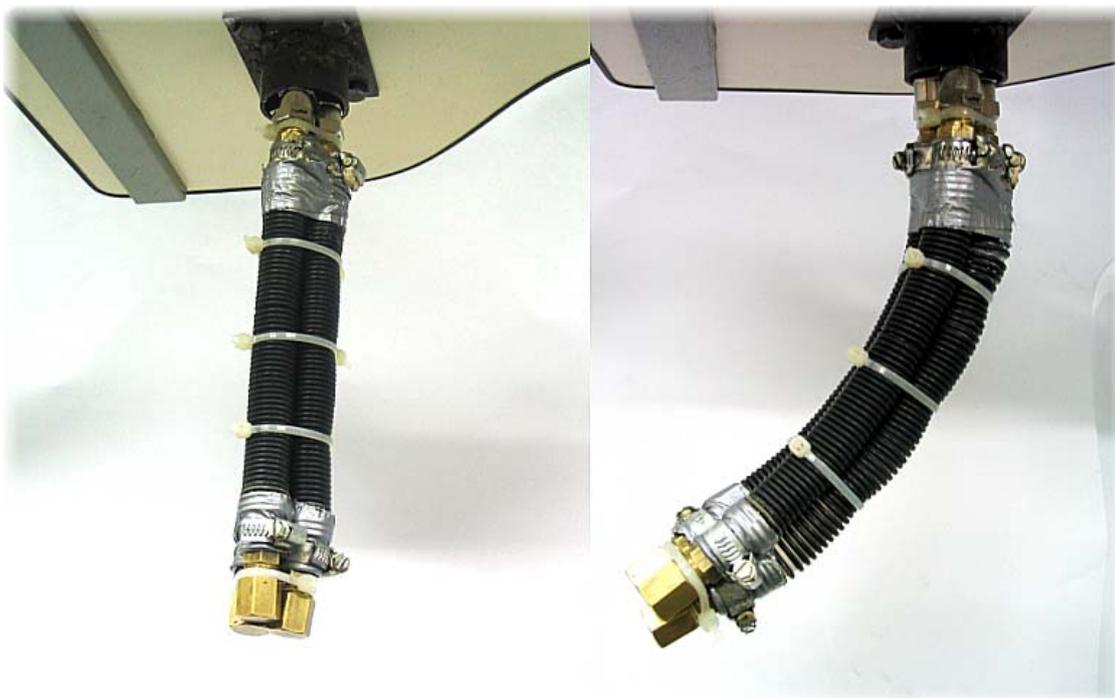


Figura 69: 4ª Geração, mangueiras de silicone reforçadas com anéis flexíveis de butadieno-acrilonitrila, agrupadas com abraçadeiras

A Fig. 70 ilustra um corte em perfil deste protótipo.

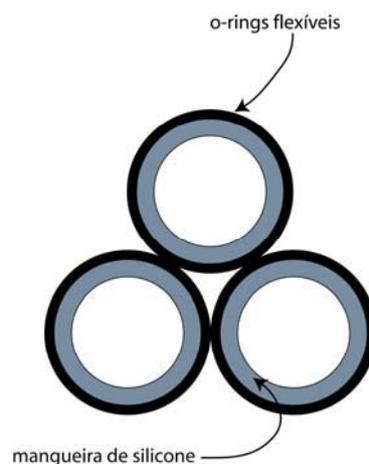


Figura 70: Desenho de um corte em perfil da 4ª geração

Um elo com mangueiras de silicone reforçadas por anéis rígidos também foi montado, utilizando-se a cola de poliuretano para unir as câmaras. Os movimentos de curvatura foram bem executados pelo elo, porém o mesmo apresentou uma baixa rigidez à torção, fazendo com que a sua extremidade tendesse a tombar para um dos lados.

Durante os experimentos com os músculos individuais, as mangueiras que demonstraram melhores resultados foram as reforçadas por anéis rígidos intercalados por anéis flexíveis (ver seção 3.2). Dessa forma, foi feita uma montagem mais elaborada de um elo com esses músculos através de espaçadores (ver Fig. 72). Esses espaçadores faziam com que as distâncias entre as mangueiras permanecessem sempre iguais e ainda funcionavam como anéis rígidos. Foram confeccionados em Fenolite por se tratar de um material rígido e de fácil usinagem, com espessura 3mm e diâmetro de 57mm, vide Fig. 71. Foram utilizados sempre anéis rígidos em contato com os espaçadores para maior resistência. A distância entre os espaçadores era de 19 anéis.



Figura 71: Espaçadores de Fenolite

Os espaçadores foram montados juntamente com os anéis nas mangueiras de silicone. Os primeiros testes, apesar do bom funcionamento do sistema, também revelaram uma baixa rigidez à torção por parte do elo. A solução encontrada para esse problema foi incorporar uma mangueira corrugada externa ao sistema como reforço para a sua rigidez de torção, a ser vista no item 3.5.3.



Figura 72: 4ª Geração, mangueiras de silicone reforçadas com anéis flexíveis e rígidos, agrupadas com espaçadores de Fenolite

A Fig. 73 ilustra um corte em perfil deste protótipo.

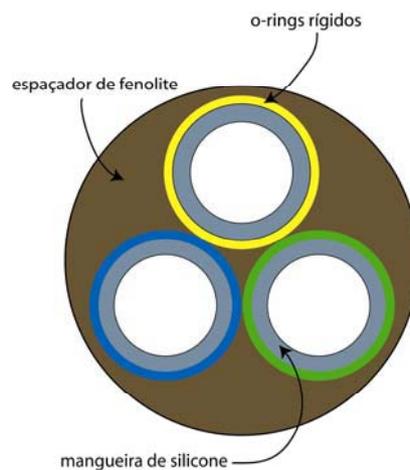


Figura 73: Desenho de um corte em perfil da 4ª geração com anéis rígidos (representados pelos círculos amarelo, verde e azul) e com o espaçador de Fenolite

A Tabela 4 mostra os resultados da deformação axial do elo em referência montado com os espaçadores de Fenolite, chegando a deformação de 25,4% com relação ao seu comprimento inicial para uma pressão máxima de 6 bar.

Tabela 4: Comprimento do elo em função da pressão interna inserida

Pressão (bar)	L (mm)
0	550
6	690

A partir do conhecimento do músculo artificial da FESTO, o desenvolvimento mecânico do sistema voltou-se para a busca de soluções empregando este dispositivo como o atuador principal. As gerações seguintes apresentam arranjos mecânicos empregados para formar um elo a partir de três músculos MAS.

5ª Geração

Em uma primeira etapa, os três músculos foram enrolados com uma fita flexível para que o seu comportamento fosse avaliado em função dos protótipos desenvolvidos anteriormente, como mostra a Fig. 74. A fita flexível foi utilizada para unir os músculos por ser ao mesmo tempo fina e elástica. A elasticidade é um parâmetro importante dos revestimentos utilizados com este tipo de músculo devido à sua atuação inversa, isto é, necessidade de expandir o seu diâmetro para contrair-se longitudinalmente. A Fig. 75 detalha os conectores dos músculos.

O próximo passo seria introduzir um espaçador que funcionasse segundo as características do músculo. Os músculos utilizados possuíam 10mm de diâmetro e 1 metro de comprimento de ponta a ponta, além de conectores em ambas as extremidades para o acoplamento de ferramentas ou suportes. Apesar do MAS-10 ter sido projetado para operar com pressões de até 8 bar, todos os experimentos envolvendo o músculo obedeceram a convenção de atuar com pressões de até 6 bar, como comentado anteriormente. Uma vantagem adicional

em se trabalhar com pressões abaixo do seu limiar máximo é aumentar a sua vida útil, causando menos tensão à membrana do músculo.



Figura 74: 5ª Geração, músculos MAS -10 da FESTO revestidos com fita flexível



Figura 75: Conexões dos MAS -10

A Fig. 76 ilustra um corte em perfil deste protótipo.

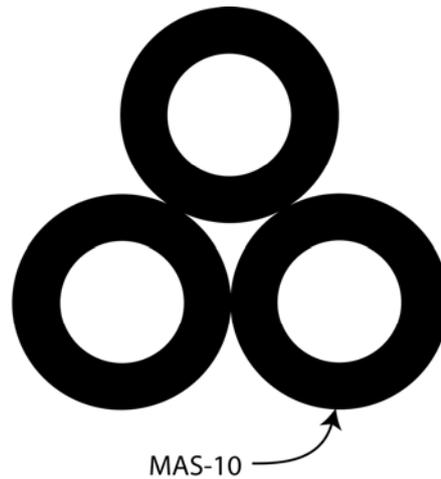


Figura 76: Desenho de um corte em perfil da 5ª geração

6ª Geração

Foi projetado um espaçador constituído de mangueiras siliconadas para preencher o espaço entre os músculos e para garantir sempre a mesma distância entre eles. As mangueiras siliconadas são um pouco mais rígidas do que as mangueiras de silicone e ao mesmo tempo flexíveis, ajudando a aumentar a rigidez de torção do elo e permitindo a movimentação sem muito esforço por parte dos músculos. A Fig. 77 ilustra uma amostra do espaçador.



Figura 77: Amostra do espaçador feito de mangueiras siliconadas

O espaçador é formado por três mangueiras fixadas a uma quarta mangueira (central), espaçadas igualmente, por um ângulo de 120°. Os músculos são inseridos exatamente nos espaços entre as mangueiras externas, como mostra a Fig. 78. O seu comprimento foi estipulado como sendo o mesmo comprimento do músculo pressurizado com a menor pressão de trabalho, 1,5 bar. Para pressões inferiores a 1,5 bar, o músculo apresentava uma rigidez longitudinal muito baixa, levando à flambagem de sua membrana (vide Fig. 81). Com esta pressão, o comprimento do músculo era de aproximadamente 980mm. As mangueiras do espaçador foram, numa primeira etapa, coladas com fita dupla face aderente e cola plástica. Tiras de fita flexível mantiveram os músculos sempre em contato com o espaçador. Por serem flexíveis, tanto a fita flexível quanto o espaçador de mangueiras siliconadas permitiram com eficiência as variações de diâmetro do músculo. As extremidades dos músculos foram presas com abraçadeiras e fita reforçada com fibra, vide Fig. 79.

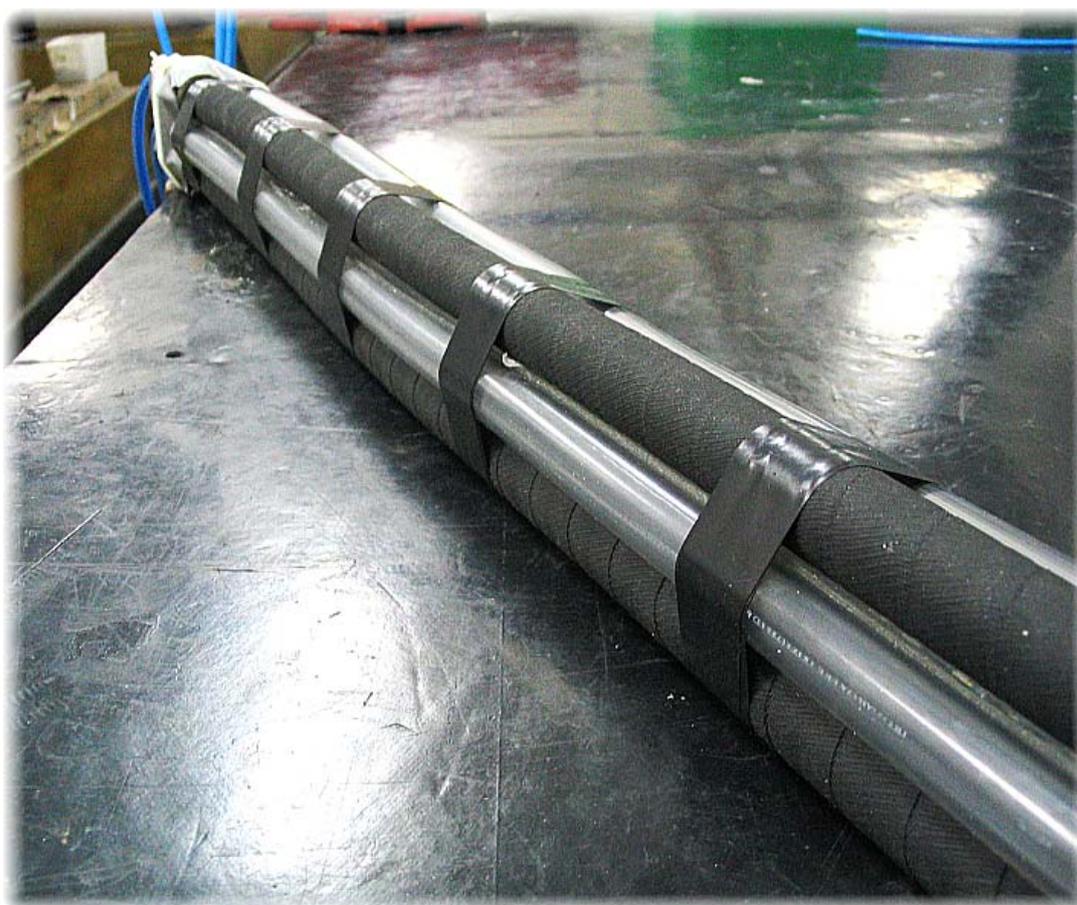


Figura 78: 6ª Geração, músculos MAS -10 com espaçador de mangueira siliconada, revestidos com fita flexível

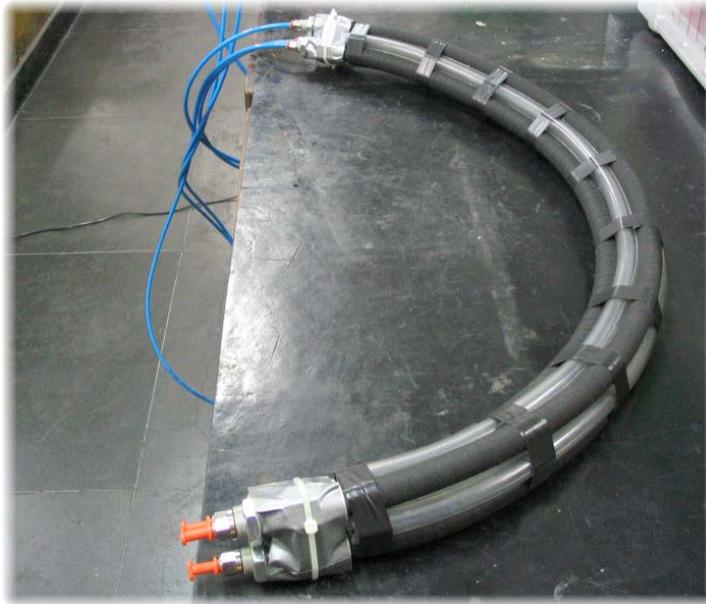


Figura 79: 6ª Geração, músculos MAS -10 com espaçador de mangueira siliconada, revestidos com fita flexível

A Fig. 80 ilustra um corte em perfil deste protótipo.

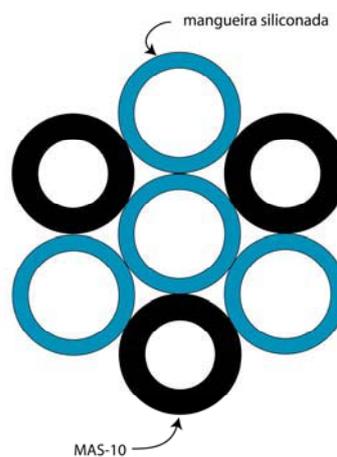


Figura 80: Desenho de um corte em perfil da 6ª geração



Figura 81: Flambagem de um dos músculos devido à pressão interna muito baixa

Através de uma foto tirada durante um experimento realizado, a Fig. 82 faz uma comparação entre a curvatura obtida com o elo e um círculo de raio R .

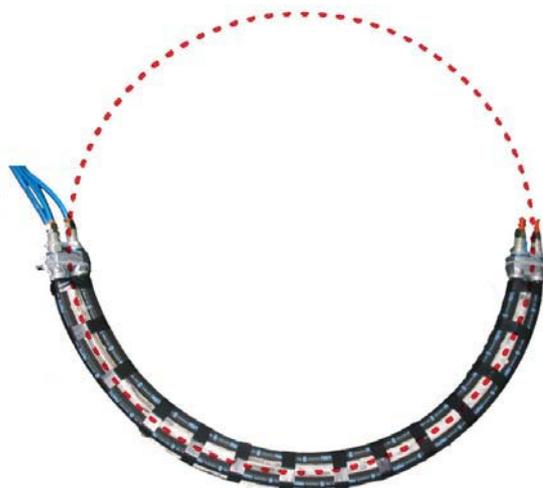


Figura 82: Comparação entre a curvatura do elo e um círculo de raio R

7ª Geração

Foram desenvolvidos espaçadores com o intuito de unir os benefícios trazidos pela fita flexível e pelo espaçador interno de mangueiras. Seguindo o exemplo dos anéis, foram confeccionados espaçadores rígidos e flexíveis, como mostra a Fig. 83. Os espaçadores rígidos fariam o papel da fita flexível, impedindo que os músculos se afastassem uns dos outros durante a execução dos movimentos e os espaçadores flexíveis fariam o papel de uma mola, se ajustando aos rígidos nos momentos em que o elo se curvasse. O espaçador rígido foi feito de polipropileno por ser um material anti-aderente e de mais baixo custo em comparação com materiais como teflon e polímeros sintéticos (para os desenhos técnicos dos espaçadores, consultar ANEXO). Optou-se por um material de dureza em torno de 30 *Shore A* para a confecção do espaçador flexível. O material encontrado no mercado que atendeu a esse requisito foi o silicone. Assim, o espaçador flexível foi confeccionado com silicone de dureza 25 *Shore A*, por ser a menor dureza conseguida para este material.



Figura 83: Espaçador rígido de polipropileno (branco) e espaçador flexível de silicone (preto)

O espaçador flexível possuía o dobro da espessura do rígido, para tornar o conjunto final do elo mais flexível. Ambos os espaçadores possuíam o mesmo protejo. Os furos externos possibilitam a passagem de tubos de pressão para o próximo elo, para o caso de um manipulador com mais elos. O perfil central foi desenhado para possibilitar a passagem do conector sextavado da extremidade do músculo durante a montagem do espaçador e dos músculos, como ilustra a Fig. 84. Os espaços por onde passariam os músculos tinham o mesmo diâmetro do músculo em sua maior contração, em torno de 21mm.

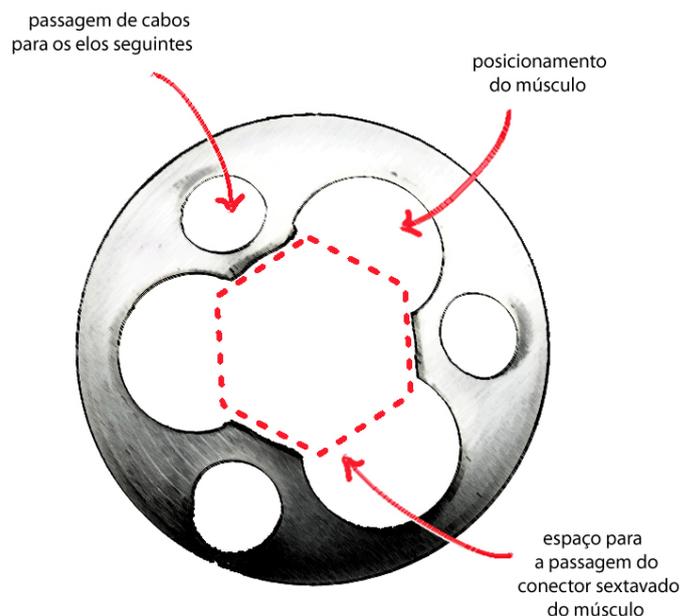


Figura 84: Desenho do espaçador com as suas funções

A Fig. 85 apresenta o elo depois de montado.



Figura 85: 7ª Geração, músculos MAS-10 com espaçadores de polipropileno e de silicone intercalados

Foram detectados alguns problemas durante os experimentos com esse protótipo. A dureza do espaçador flexível não foi baixa o suficiente, causando certa resistência durante os movimentos. O principal problema verificado foi com relação ao espaço interno dos espaçadores, que fez com que os músculos ficassem soltos e não necessariamente alinhados, prejudicando muito a movimentação do elo. A disposição dos músculos no interior dos espaçadores fazia com que o elo assumisse formas aleatórias ao ser pressurizado, como mostra a Fig. 86. Através deste experimento verificou-se que é extremamente importante que os músculos não consigam executar nenhum movimento relativo entre eles, estando sempre fixos uns aos outros. Qualquer movimentação relativa que aconteça, mesmo que de segunda ordem, influencia diretamente na movimentação do manipulador, conseqüentemente, no seu raio de curvatura final.



Figura 86: Movimentação desordenada dos músculos no interior dos espaçadores gerando formas aleatórias.

A Fig. 87 ilustra um corte em perfil deste protótipo.

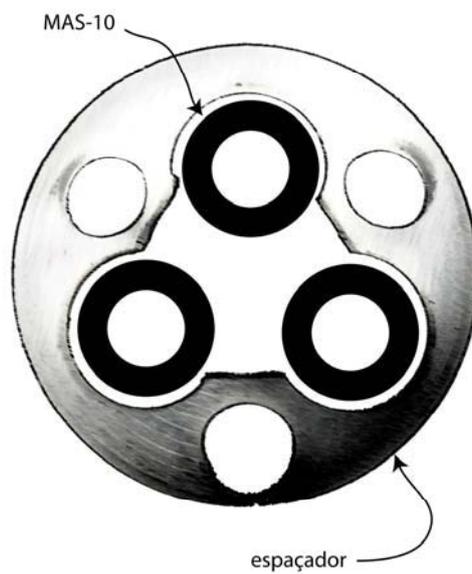


Figura 87: Desenho de um corte em perfil da 7ª geração

A questão do espaço vazio no centro dos espaçadores fez com que a rigidez axial do elo fosse muito baixa, não conseguindo sustentar o próprio peso, como revela a Fig. 88.

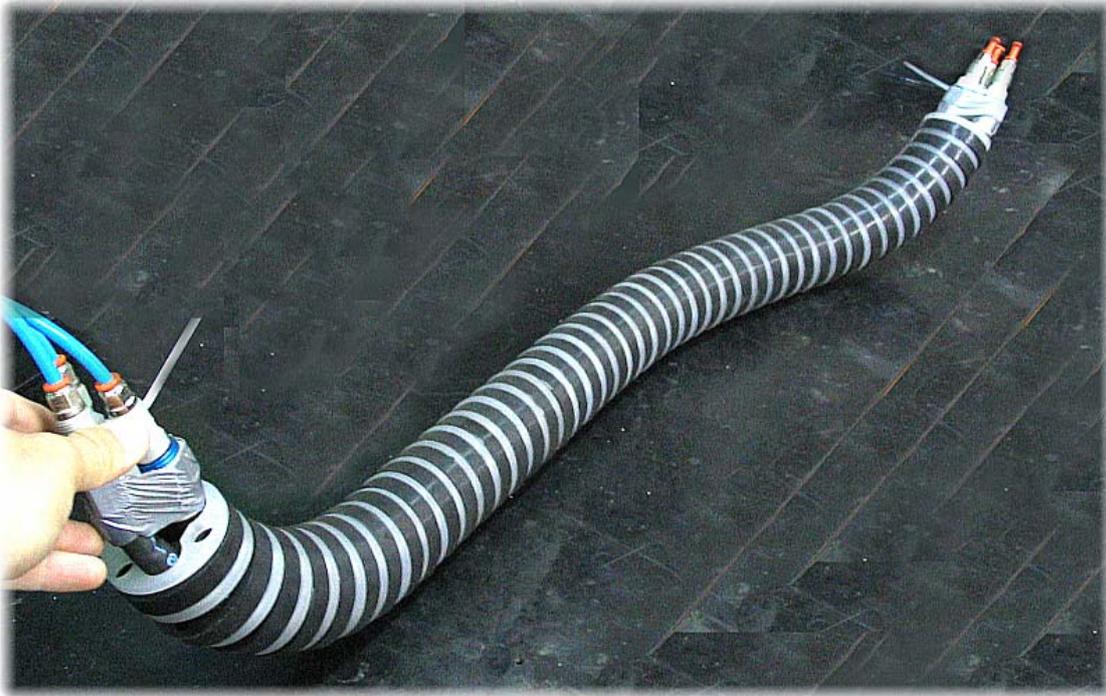


Figura 88: Demonstração da baixa rigidez axial do elo

8ª Geração

Devido aos problemas apresentados pela geração anterior, os experimentos com a 6ª geração foram retomados devido ao desempenho satisfatório obtido com este protótipo. Foram feitas implementações de novos materiais com o intuito de aprimorar as técnicas de construção deste elo. A fita flexível foi substituída por um tubo termo-retrátil (Fig. 89), com as seguintes características:

- alta flexibilidade;
- parede fina;
- taxa de encolhimento na razão de 2:1;
- fabricado em poliolefina;
- retardante a chama;
- possui boa resistência mecânica;
- excelente resistência ao calor;



Figura 89: Dimensões do termo retrátil

Tabela 5: Especificações técnicas do termo retrátil

Medida Comercial		Antes da Contração		Depois da Contração	
Milímetros (mm)	Polegadas (")	D Diâmetro Interno(mm)	F Espessura da Parede (mm)	d Diâmetro Interno (mm)	f Espessura da Parede (mm)
76,2	3	81,0 ± 1,0	0,55	38,10	1,20

A Fig. 90 mostra a aplicação do termo retrátil no elo.

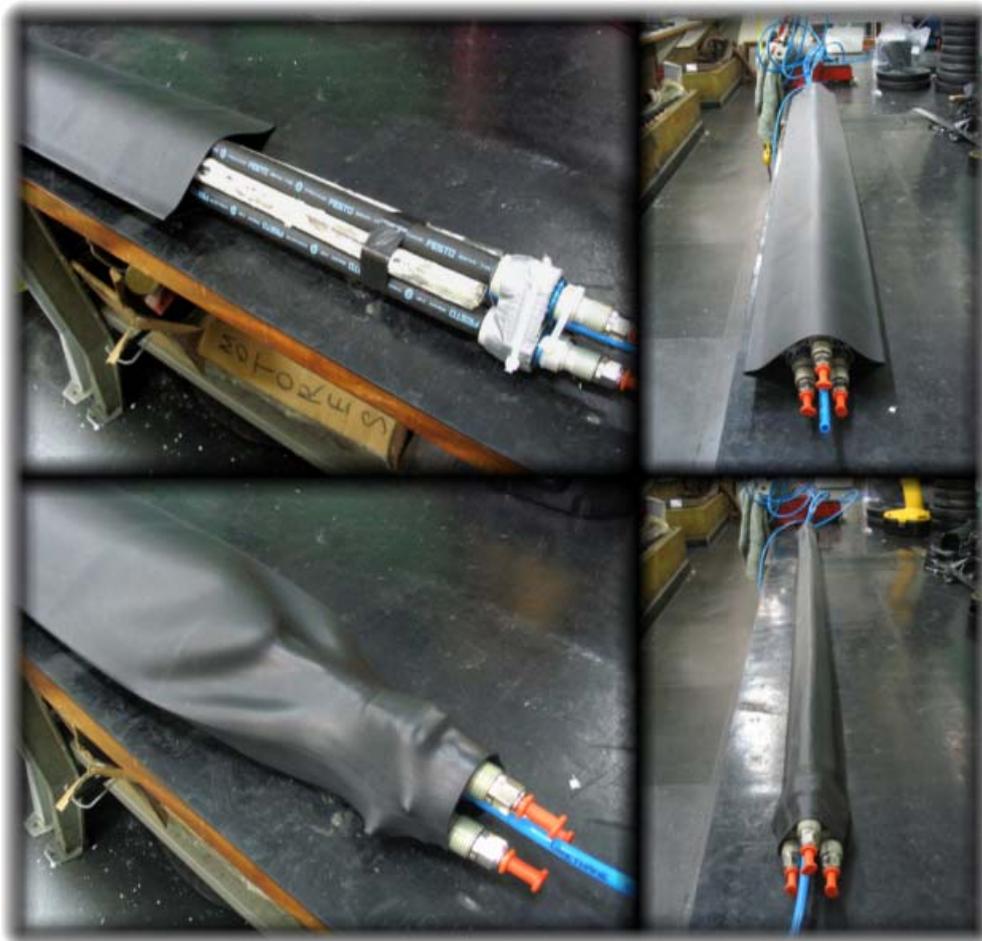


Figura 90: Montagem do termo retrátil no elo

Apesar de continuar flexível mesmo após a contração, o termo-retrátil restringiu um pouco a movimentação do elo, como mostra a Fig. 91.

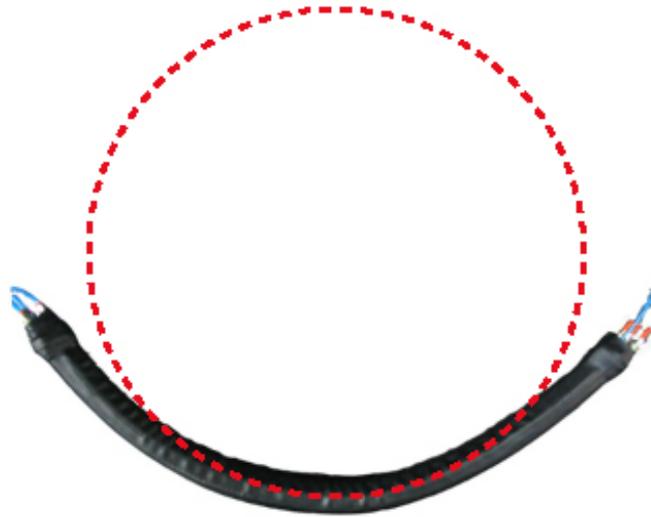


Figura 91: Comparação entre a curvatura do elo e um círculo representando a curvatura de gerações anteriores sob mesma diferença de pressão

O tubo termo retrátil foi substituído por uma atadura elástica (Nexcare 3M, ver ANEXO), composta de fibras de poliéster não-tecido combinadas com fibras elásticas, recobertas por adesivo seco à base de látex natural. A atadura possui as seguintes características:

- auto-aderente;
- amoldável;
- porosa.

A atadura foi enrolada ao longo do comprimento do elo, como mostra a Fig. 92.

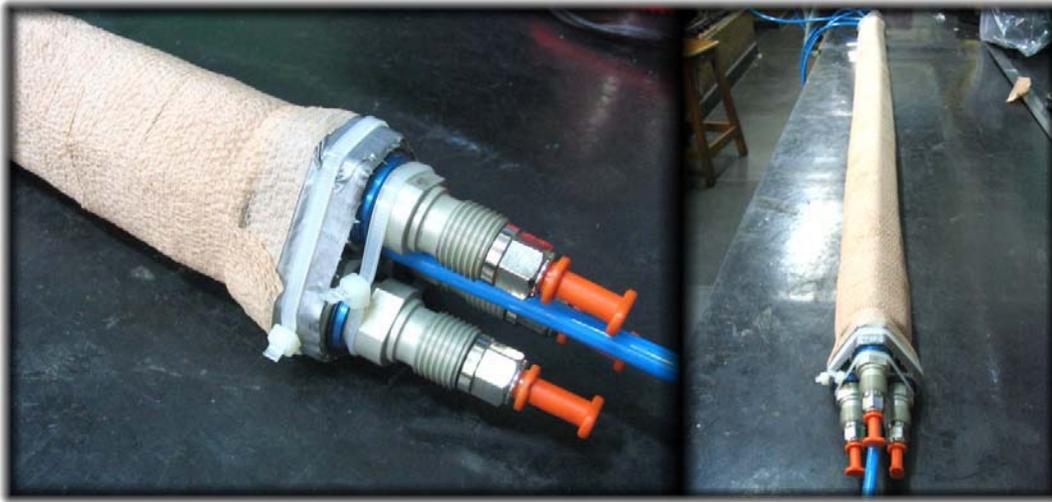


Figura 92: Montagem da atadura elástica no elo, com espaçadores internos siliconados

O tubo termo-retrátil foi usado como acabamento para as extremidades do elo, fixando as pontas da atadura elástica e reforçando a união dos conectores dos músculos, como mostra a Fig. 93.

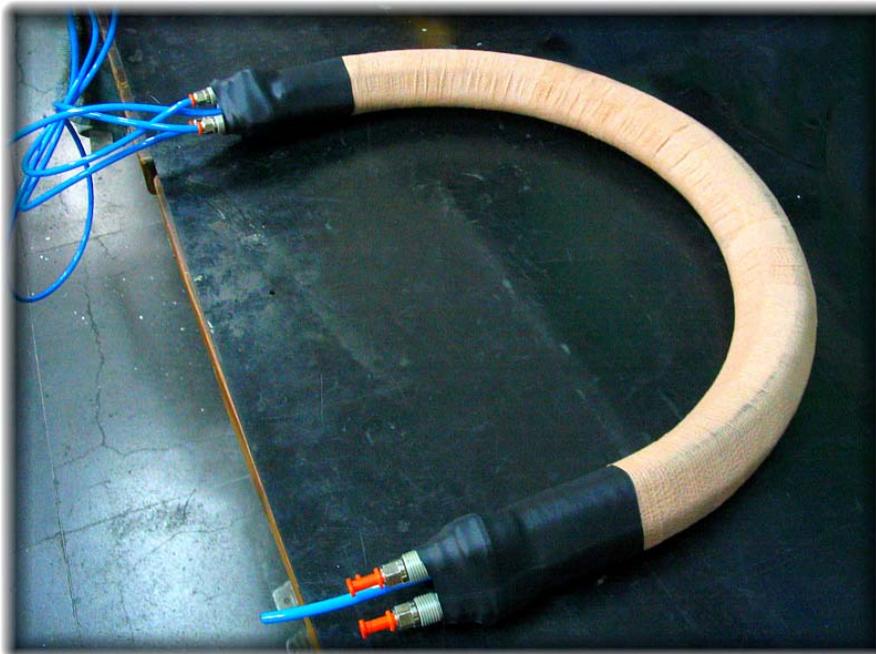


Figura 93: Elo revestido com atadura elástica com acabamento de tubo termo-retrátil

A Fig. 94 faz uma comparação da curvatura de três protótipos (gerações 6 e 8). Os protótipos possuem o mesmo princípio de construção, porém com revestimentos diferentes.

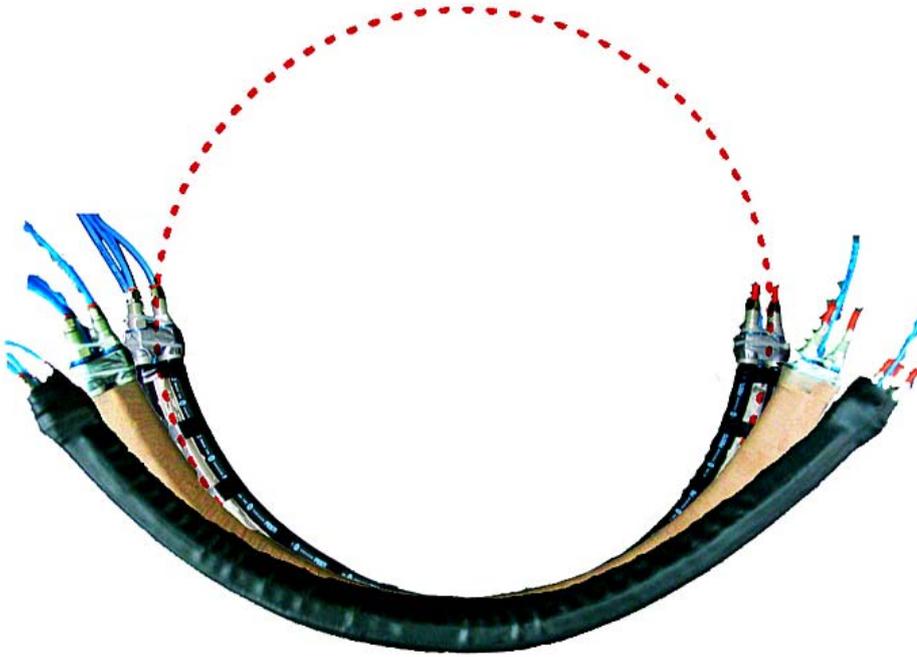


Figura 94: Comparação entre a curvatura de protótipos iguais com revestimentos diferentes (do menor ao maior raio: elo sem revestimento, revestido com atadura elástica e revestido com tubo termo-retrátil)

A próxima seção aborda a inserção de um tubo corrugado externo ao elo como forma de aumentar a sua rigidez à torção.

3.5.3. Elo com Corrugado

Durante os experimentos, alguns protótipos apresentaram uma baixa rigidez com relação à torção, fazendo com que a sua extremidade tombasse para um dos lados. Uma forma de reforçar essa rigidez foi encontrada acoplando à estrutura do elo um tubo (ou mangueira) flexível externo, como se fosse uma capa. Esse tubo deve ser bastante flexível para não restringir os movimentos do elo e reforçado por fibras ou fios ao longo do seu comprimento, de forma espiral ou circular, para apresentar uma boa rigidez à torção. Este tubo também teria a função de proteger os músculos do meio exterior.

Uma vasta pesquisa foi realizada. Os tubos corrugados foram os que mais se adequaram às características buscadas. Alguns tipos de tubos corrugados são apresentados a seguir.

Mangueira de Poliuretano Reforçada

Essa mangueira é fabricada em poliuretano e reforçada com aço cobreado folheado espiral (Kanaflex, modelo KPUC, ver ANEXO), como mostra a Fig. 95.

Possui a superfície interior lisa. É muito leve e possui uma ótima flexibilidade. Permite uma alta resistência à abrasão e à flexão devido às características do poliuretano, que são 5 vezes superiores em relação ao PVC. Boa resistência aos agentes atmosféricos e a uma vasta gama de produtos químicos.



Figura 95: Mangueira de poliuretano revestida com fio de aço cobreado

Tabela 6: Especificações da mangueira de poliuretano

Diâmetro Nominal		Peso	Espessura Mínima	Espessura Máxima	Raio de Curvatura
mm	pol.	g/m	mm	mm	mm
76	3	510	0.5	2.3	65

Tubo Corrugado de PTFE

Os tubos corrugados *Tex-Flex* são capazes de atingir curvaturas com raios muito pequenos sem que o raio interno do tubo se modifique (*TexLoc*, modelo *Tex-Flex*, ver ANEXO), como ilustra a Fig. 96. Por serem transparentes eles permitem a monitoração de materiais que estão no interior do tubo. São excelentes isolantes elétricos e muito resistentes a líquidos corrosivos (como ácidos) por serem fabricados em PTFE. Seu corrugado é em forma de anéis circulares. O tubo possui abas lisas nas extremidades, facilitando o acoplamento com outras estruturas. As especificações deste tubo são referenciadas da Tabela 7.

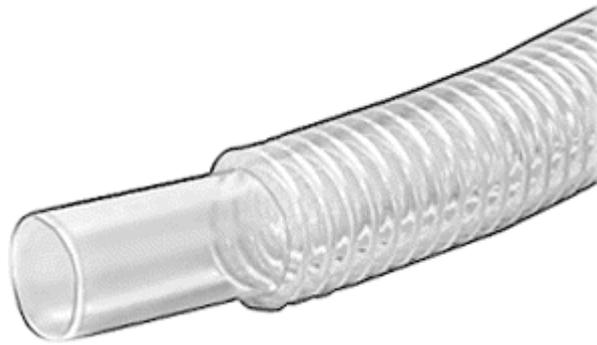


Figura 96: Tubo corrugado de PTFE

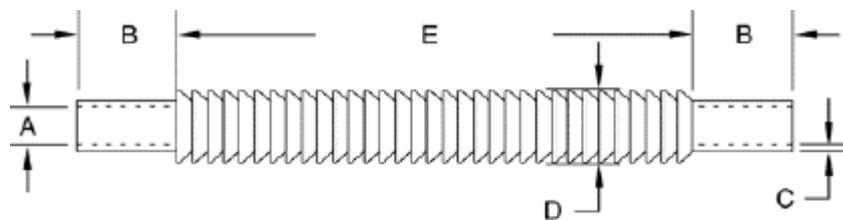


Figura 97: Tubo corrugado de PTFE com suas dimensões características

Tabela 7: Especificações do tubo de PTFE

A		B	C	D	Raio de Curvatura
Diâmetro interno máximo		Comprimento da aba	Espessura da parede	Diâmetro externo	
mm	pol.	mm	mm	mm	mm
63,5	2,5	63,5	1,78	85,3	31,75

Mangueiras de PVC

Mangueiras de PVC (Kanaflex S/A, ver ANEXO) possuem reforço espiralado helicoidal, são flexíveis, com superfície interna lisa e boa resistência a ações químicas e mecânicas (impacto e abrasão). São compostas pela combinação de dois tipos de PVC:

- PVC rígido que compõe a espiral (alma) da mangueira, sendo este responsável por dar forma ao produto, provendo este de resistência ao fechamento (vácuo) e influenciando, em parte, em sua resistência à pressão;

- PVC flexível que envolve externamente a espiral rígida formando a mangueira. É também o responsável pela resistência à pressão e a abrasão da mangueira e influencia em grande parte na sua flexibilidade.

O modelo KV, em especial, é destacado, vide Fig. 98.

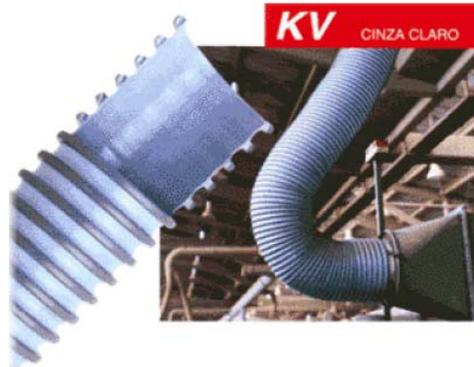


Figura 98: Mangueira de PVC modelo KV

Tabela 8: Especificações da mangueira de PVC Kanaflex KV

Diâmetro Nominal		Diâmetro interno	Diâmetro Externo	Raio de Curvatura
Mm	pol.	mm	mm	mm
65	2,5	62,5	75,0	65

Verificou-se que as mangueiras de PVC possuíam resistência à flexão muito alta, restringindo os movimentos do elo. Os tubos de PTFE, por outro lado, são uma excelente opção de revestimento, porém não foram feitos testes com o mesmo devido à dificuldade de aquisição do material. Desse modo, foi utilizada nos testes somente a mangueira de poliuretano reforçada com um fio de aço cobreado como reforço externo por se tratar de um material de fácil aquisição no mercado e bastante flexível. A mangueira de poliuretano contribuiu muito para o aumento da rigidez à torção do elo. O sistema não apresentou perdas de movimentação pelo fato de este tipo de mangueira ser extremamente flexível. Este corrugado pode ser visto na Fig. 99 e em detalhe na Fig. 100, aplicado ao elo construído com mangueiras de silicone reforçadas com anéis rígidos e flexíveis, espaçadas por espaçadores de Fenolite (ver item 3.5.2, 4ª geração).



Figura 99: Elo reforçado com mangueira de poliuretano externa



Figura 100: Detalhe da mangueira de poliuretano externa

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos a partir de experimentos feitos com o melhor protótipo desenvolvido, ou seja, o protótipo que apresentou o menor raio de curvatura para pressões de 6 bar, levando-se em consideração o aprimoramento das técnicas de montagem utilizadas. As suas principais características são descritas a seguir.

4 Resultados Experimentais com o Manipulador

Os experimentos realizados com os protótipos anteriores, construídos com diversos tipos de materiais e técnicas, permitiram evoluir para um protótipo final. Esse protótipo atendeu aos objetivos almejados através das seguintes características:

- apresentou uma alta rigidez à torção;
- a movimentação foi satisfatória, realizando curvaturas próximas a 180°;
- os materiais utilizados e as técnicas de montagem viabilizaram uma padronização na fabricação dos elos.

A próxima seção descreve os equipamentos utilizados para realização dos experimentos com o protótipo final em conjunto com as servo-válvulas proporcionais controladas por computador.

4.1. Montagem do sistema

O protótipo final, concebido através das várias gerações de protótipos do Capítulo 3, foi submetido a alguns testes com o objetivo de verificar as suas qualidades mecânicas e estudar o comportamento do sistema a partir de um controle feito por computador. Foram utilizadas servo-válvulas como atuadores, sendo responsáveis pelo controle das pressões fornecidas a cada um dos músculo do manipulador. O programa de controle foi desenvolvido utilizando a plataforma *LabView* (National Instruments, 2000). A comunicação entre o programa e as servo-válvulas foi feita através de uma placa D/A.

Foi incorporado ao protótipo da 8ª geração (reforçado com atadura elástica, ver seção 3.5.2) uma mangueira reforçada de poliuretano (ver seção 3.5.3) para aumentar a rigidez à torção do elo. O manipulador foi montado em um

perfil de alumínio, como mostra a Fig 101. A Fig. 102 destaca a extremidade do manipulador.



Figura 101: Protótipo final utilizado nos experimentos com as servo-válvulas

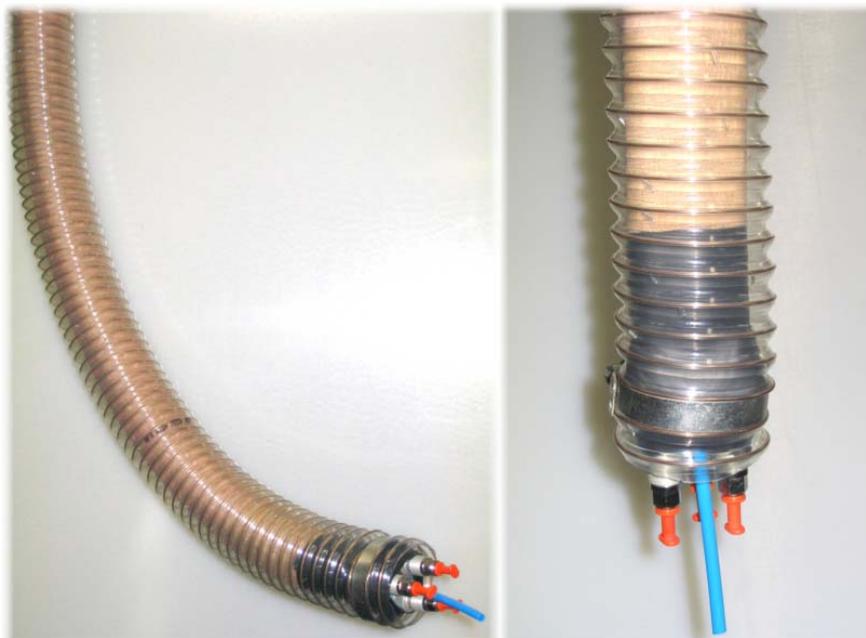


Figura 102: Protótipo final; detalhe da montagem com a mangueira de poliuretano reforçada

Foi utilizado um tubo de poliuretano azul de 6mm de diâmetro externo para simular a resistência dos tubos que futuramente irão fornecer as pressões para os elos seguintes.

Servo-válvulas

Válvulas pneumáticas proporcionais (servo-válvulas) controladas por tensão foram implementadas ao sistema, vide Fig. 103. A servo-válvula possibilita a regulagem contínua de uma pressão pneumática. A variação da pressão é efetuada através de uma membrana, cuja posição é influenciada por uma força variável, gerada pelo solenóide proporcional. A magnitude da pressão de saída é proporcional à força magnética ou também à corrente do solenóide. Se a pressão de saída supera o valor ajustado, há a exaustão através de uma saída secundária. A combinação da válvula proporcional com um amplificador eletrônico (intrínseco à válvula) permite modificar a pressão de saída por intermédio de um sinal de referência. Como geradores de sinais de referência podem ser utilizados: potenciômetros, reguladores, computadores e controladores de processos.

As principais características da servo-válvula utilizada são comentadas na Tabela 9 (as especificações completas encontram-se no ANEXO):

Tabela 9: Principais características da válvula proporcional

Fabricante	BOSCH-REXROTH
Vazão Nominal	1000 l/min
Voltagem de alimentação	24V DC \pm 20 %
Consumo de Corrente (máx)	1,3A
Pressão de Alimentação	7 bar
Pressão de Saída (mín/máx)	0/6 bar
Sinal de Entrada Nominal	0-10V
Sinal de Saída Real	0-10V



Figura 103: Válvula proporcional controlada por tensão (Bosch-Rexroth)

Compressor

As principais características do compressor utilizado (Fig. 104) são apresentadas na Tabela 10 (as especificações completas encontram-se no ANEXO).

Tabela 10: Principais características do compressor

Marca/Modelo	Schulz/ CSI 7,4/50
Larg x Alt x Comp	380 x 680 x 730 mm
Peso Líquido	39kg
Deslocamento teórico	153 l/min
Pressão de Operação	Mínima – 6,9 bar Máxima – 9,7 bar
Potência	1,5 hp
Volume do Reservatório	46 l



Figura 104: Compressor CSI 7,4/50 (SCHULZ)

Placa D/A

Utilizou-se uma placa *ISA Bus Servo I/O Card* compatível com computadores PC convencionais, ilustrada na Fig. 105. As principais características da placa são (para as informações completas, consultar ANEXO):

- **Saídas Analógicas**
 - até 8 saídas analógicas
 - amplitude do sinal variando de + 10 V até - 10 V
 - 13 *bits* de resolução
- **Entradas analógicas**
 - 8 canais de entradas analógicas
 - 13 bits de resolução
 - configurável em faixas de +/-10V ou +/-5V
- **Saídas e entradas digitais**
 - 32 *bits*, configuráveis em várias combinações de entradas e saídas
 - compatível com Opto-22



Figura 105: Placa *ISA Bus Servo I/O Card* utilizada nos experimentos

Programa em LabView

Foi desenvolvido um programa utilizando a plataforma *LabView* (National Instruments, 2000) para fazer o controle das servo-válvulas. A Fig. 106 mostra a interface do programa.

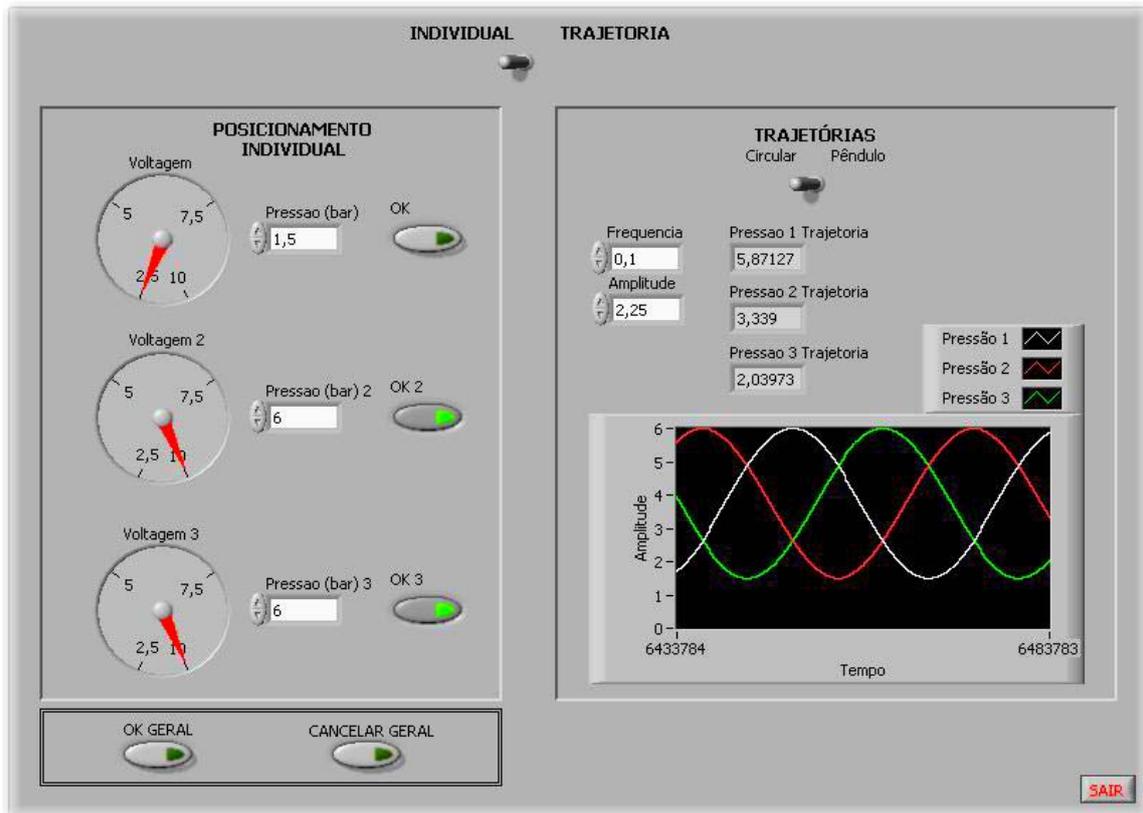


Figura 106: Interface do programa de controle desenvolvido em LabView

O painel à esquerda (Fig. 106) permite atuar em cada uma das três câmaras do elo independentemente fornecendo pressões desejadas. Como comentado anteriormente (ver seção 3.5.2, 6ª geração), a pressão mínima estipulada para cada um dos músculos foi de 1,5 bar. Desta forma, o músculo poderia receber pressões pneumáticas entre 1,5 e 6 bar através de sinais de referência analógicos fornecidos pela placa D/A. As pressões eram transformadas em tensões elétricas de 2,5 a 10V e fornecidas às servo-válvulas. No painel à direita (Fig. 106), foram implementadas duas rotinas diferentes de programação que atuavam simultaneamente nos três músculos do elo. O sinal de referência da primeira rotina era composto por senóides defasadas de 120° (como um sistema trifásico), fazendo com que a extremidade do elo seguisse uma trajetória circular.

A segunda rotina implementa uma movimentação tipo pêndulo, com dois músculos recebendo o mesmo sinal senoidal de referência e o terceiro músculo com o sinal senoidal defasado de 180° . Nas duas situações é possível ajustar a frequência e a amplitude do movimento realizado pelo manipulador. A Fig. 107 mostra a bancada onde foram feitos os experimentos. Na Fig. 108, alguns dos equipamentos utilizados são apresentados.



Figura 107: Bancada de experimento



Figura 108: Equipamentos utilizados nos experimentos (da esquerda para a direita – servoválvulas, fonte de alimentação e o sistema manual de válvulas)

O sistema manual de válvulas (à direita da Fig. 108) foi utilizado durante os experimentos feitos com os protótipos iniciais.

A modelagem matemática a ser apresentada a seguir é referente ao elo do manipulador projetado no plano vertical que faz um ângulo θ em relação ao eixo

x. Como o desenvolvimento dos modelos depende muito das características de cada protótipo, esta modelagem só pode ser elaborada depois de concluído o desenvolvimento mecânico do manipulador.

4.2. Modelagem

Como descrito anteriormente no Capítulo 3, o raio de curvatura do elo do manipulador é aproximado por um arco de círculo de raio R e ângulo α , como mostra a Fig. 109. Os tubos termo-retráteis acoplados às extremidades do elo possuem comprimento t . A corda associada d é dada pela eq. (2). O elo faz um ângulo $\alpha/2$ em relação ao eixo x . O comprimento L' deformável do elo é dado por

$$L' = L - 2t \quad (77)$$

uma vez que os tubos termo-retráteis impedem a deformação das partes em contato com ele. A área total da seção reta das quatro mangueiras siliconadas (espaçador) é

$$A_0 = \pi \left(D_{ext}^2 - D_{int}^2 \right) \quad (78)$$

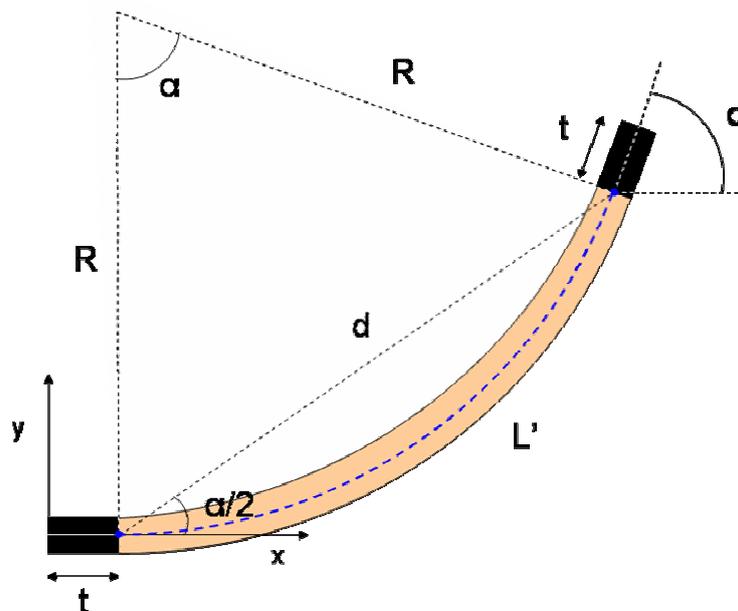


Figura 109: Aproximação da curvatura do elo por um arco de círculo

A Fig. 110 ilustra um corte em perfil do elo. Cada mangueira siliconada possui área $\frac{A_0}{4}$, representada em azul. O momento de inércia de flexão I associado ao espaçador é dado por

$$I = 4I_0 + \frac{A_0}{4} D_e^2 + 2 \frac{A_0}{4} \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \quad (79)$$

$$I = 4I_0 + \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} D_e^2 + 2 \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2)}{4} \left(\frac{D_e}{2} \right)^2 \quad (80)$$

onde D_e e D_i são os diâmetros externo e interno das mangueiras e I_0 é o momento de inércia de flexão de cada mangueira, igual a

$$I_0 = \frac{\pi(D_e^4 - D_i^4)}{64} \quad (81)$$

A distância d_v (Fig. 110) entre o centro de cada músculo (MAS-10) e o centro do espaçador varia de acordo com o diâmetro externo de cada músculo, que por sua vez é influenciado diretamente pela pressão interna. Dessa forma, foi feita uma interpolação linear com a deformação ε_i ($i = 1,2,3$) de um músculo m_i para se obter o valor da distância d_{v_i} em milímetros, dada por

$$d_{v_i} = \frac{D_e}{2} + \frac{(14 + 30\varepsilon_i)}{2} \quad (82)$$

A Fig. 110 apresenta um corte em perfil do elo com algumas medidas descritas.

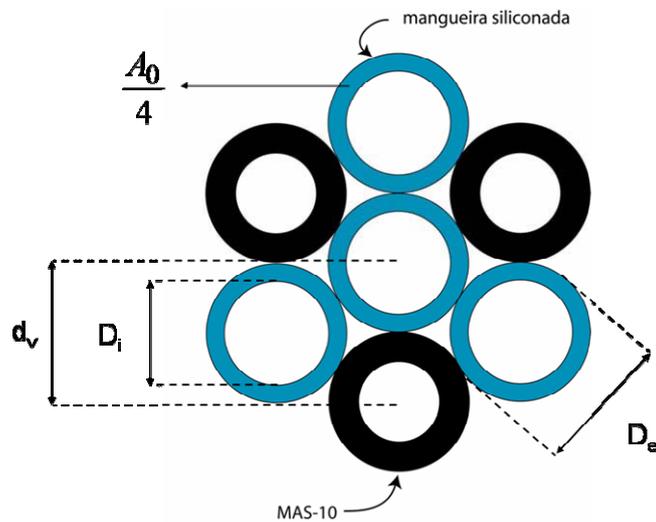


Figura 110: Corte transversal do elo, com os músculos pneumáticos em preto e o espaçador em azul

As forças F_i , produzidas por cada músculo a partir de uma pressão interna P_i e de uma deformação ε_i , foram obtidas através de uma interpolação linear realizada a partir de uma aproximação polinomial das curvas da Fig. 56 (ver seção 3.4.2), geradas experimentalmente. Os polinômios são

$$y_0 = -1,7375x^3 - 0,6068x^2 - 49,831x - 0,6516 \quad (83)$$

$$y_1 = -0,9974x^3 + 4,5916x^2 - 41,634x + 75,253 \quad (84)$$

$$y_2 = -0,4272x^3 + 5,4858x^2 - 41,207x + 152,94 \quad (85)$$

$$y_3 = -0,1228x^3 + 3,1252x^2 - 38,565x + 226,05 \quad (86)$$

$$y_4 = -0,0636x^3 + 2,1311x^2 - 35,869x + 295,33 \quad (87)$$

$$y_5 = -0,0333x^3 + 1,3151x^2 - 31,318x + 354,87 \quad (88)$$

$$y_6 = -0,0204x^3 + 0,9165x^2 - 29,607x + 416,33 \quad (89)$$

onde y_i representa a força (em Newtons) associada a uma deformação compressiva de $x\%$ sob uma pressão de i bar ($0 \leq i \leq 6$). A força F_i gerada por cada músculo será dada por uma interpolação linear das eqs. (83) a (89):

$$F_i = (y_j \cdot (j+1 - P_i) + y_{j+1} \cdot (P_i - j)) \quad (90)$$

para $i = 1,2,3$ e j é um intervalo tal que $j \leq P_i \leq j+1$ bar. Foram consideradas deformações entre -5 e 23% . A partir dessas forças, é possível calcular o momento de inércia M_i associado a cada músculo:

$$M_i = F_i d_{v_i} \quad (91)$$

Assim, como as mangueiras estão dispostas em um arranjo de 120° , tem-se que o momento fletor total dos músculos é

$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2 + M_3^2 - M_1M_2 - M_1M_3 - M_2M_3} \quad (92)$$

O ângulo θ entre o eixo projetado x' e o eixo x (ver Fig. 3, seção 3.5.1) pode ser obtido através das eqs. (93) e (94):

$$\sin \theta = \frac{-M_1 + \frac{(M_2 + M_3)}{2}}{M} \quad (93)$$

$$\cos \theta = \frac{(-M_2 + M_3) \frac{\sqrt{3}}{2}}{M} \quad (94)$$

A deformação ε_s do material siliconado do espaçador é dada por

$$\varepsilon_s = \frac{(F_1 + F_2 + F_3)}{A_0 E} \quad (95)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material siliconado.

Como o espaçador possui um comprimento menor do que o comprimento dos músculos (quando pressurizados com a mínima pressão de trabalho), foi definido uma constante *offset* que faz com que a contração do silicone somente aconteça depois que a deformação do elo ε_{elo} ultrapassar o valor deste parâmetro. A deformação do elo será então

$$\varepsilon_{elo} = \varepsilon_s - offset \quad (96)$$

Sendo L_0 o comprimento inicial do elo, o seu comprimento L final será dado por

$$L = L_0 - \varepsilon_{elo} L_0 \quad (97)$$

O ângulo α da extremidade do elo, considerando as extremidades do elo fixas através dos termo-retráteis, será

$$\alpha = \frac{(L - 2t)}{R} \quad (98)$$

Para valores de R muito maiores que o diâmetro do elo, as deformações dos músculos poderiam ser consideradas aproximadamente iguais (modelo simplificado). No entanto, como os raios obtidos nos experimentos podem ser comparáveis ao diâmetro do elo, as diferenças entre as deformações de cada músculo durante as curvaturas precisam ser consideradas. Tem-se então:

$$\varepsilon_1 = \frac{L_0 - 2t - \alpha(R + d_{v1} \sin \theta)}{L_0} \quad (99)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{L_0 - 2t - \alpha \left(R + d_{v2} \cos \theta \frac{\sqrt{3}}{2} - d_{v2} \frac{\sin \theta}{2} \right)}{L_0} \quad (100)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{L_0 - 2t - \alpha \left(R + d_{v3} \cos \theta \frac{\sqrt{3}}{2} - d_{v3} \frac{\sin \theta}{2} \right)}{L_0} \quad (101)$$

O cálculo das deformações é então feito de forma iterativa. O item a seguir apresenta a modelagem do protótipo final e os resultados obtidos a partir de experimentos realizados.

4.3. Resultados Experimentais

O objetivo do experimento realizado com o manipulador foi a obtenção da posição xy da sua extremidade em função de certas combinações de valores de pressão. O manipulador foi colocado sobre uma bancada e preso pela sua base, como mostra a Fig. 111. Como o manipulador encontra-se totalmente apoiado

sobre a mesa, o efeito da gravidade pode ser desprezado. Dessa forma, será possível comparar os resultados obtidos experimentalmente com as previsões do modelo analítico (ver seção 4.2).

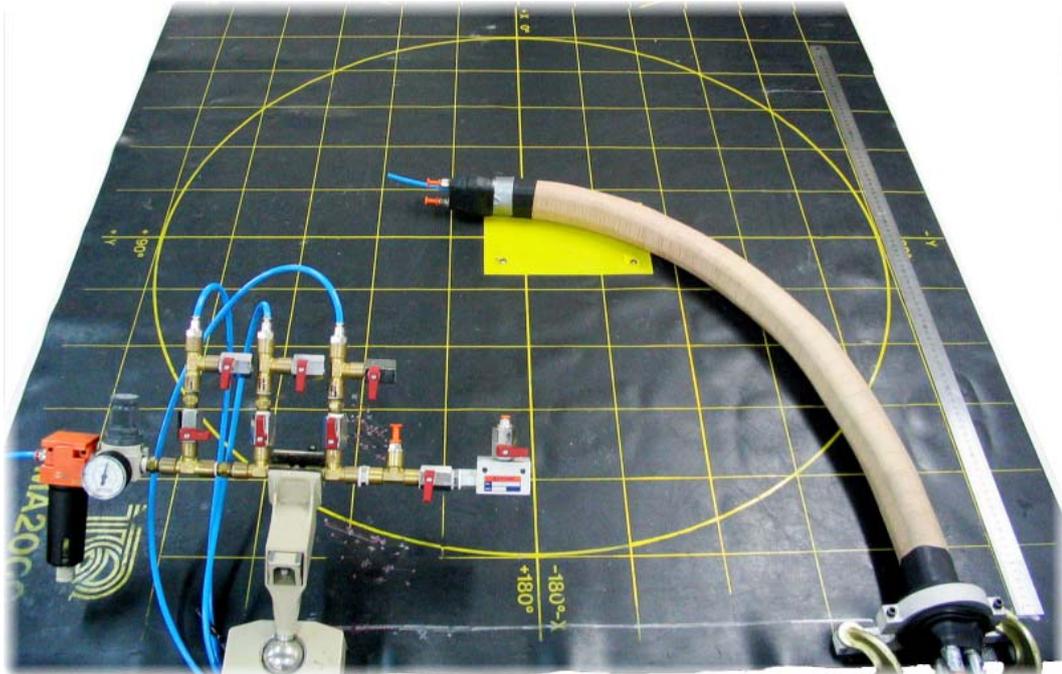


Figura 111: Obtenção de medidas da extremidade do manipulador

Cada tubo termo-retrátil acoplado às extremidades do elo possui 20mm de comprimento. O material siliconado do espaçador possui $E = 6,5$ MPa, medido experimentalmente. As mangueiras do espaçador possuíam diâmetro interno de 9,5mm e diâmetro externo de 15,9mm. Foi medido um *offset* de 8,55% do comprimento do elo até que o espaçador começasse a se contrair. O critério de convergência utilizado para o cálculo das deformações analíticas foi de 10^{-7} . A Tabela 11 mostra a média de três posições xy medidas para cada conjunto de pressões P_1 , P_2 e P_3 , e as respectivas previsões obtidas através do modelo analítico. Os valores apresentam uma margem de erro de cerca de 4% devido às dificuldades encontradas na realização das medidas. Como o experimento foi realizado apoiando o elo em cima de uma manta de borracha, o manipulador não conseguia se mover livremente devido ao atrito presente. Dessa forma, após a sua pressurização, ele era levantado e movido a favor das forças exercidas pelos músculos até a sua acomodação. Durante os movimentos curvatórios (músculos pressurizados com diferentes pressões), quanto maior era a diferença de pressão,

maior era a precisão alcançada até a sua acomodação. Por esse motivo, foram escolhidos somente pontos que permitissem a medição da posição da sua extremidade dentro de uma margem de erro aceitável. Para pressões iguais dos músculos (movimento retilíneo), não houve grandes dificuldades na realização da medição.

Tabela 11: Posicionamento xy da extremidade do manipulador

Pressão (bar)			Posição Média (mm)		Previsão (mm)		Erro Máximo da Previsão
P ₁	P ₂	P ₃	X	Y	X	Y	
1,5	1,5	1,5	900,7	0,0	915,0	0,0	1,5 %
3	3	3	872,3	0,0	887,8	0,0	1,6 %
6	6	6	831,0	0,0	829,6	0,0	0,1 %
1,5	6	6	-20,0	510,0	-44,7	454,0	5,7 %

Através dos dados da Tabela 11, nota-se que as previsões apresentaram um erro menor que 6% com relação às posições reais medidas. O modelo analítico desenvolvido não previu o efeito da atadura elástica aplicada ao redor do elo. Como a atadura exerce uma influência mais relevante durante os movimentos curvos do manipulador, as primeiras medições realizadas da extremidade do elo com diferenças de pressões entre os músculos apresentaram uma diferença significativa com relação às posições previstas pelo modelo. Dessa forma, foi feita uma medição (para o conjunto de pressões $(P_1, P_2, P_3) = (1,5; 6; 6)$) com o elo sem a atadura a fim de se avaliar realmente a sua influência na movimentação do sistema. Como a atadura elástica exerce uma função muito importante na integridade do músculo, garantindo o posicionamento dos músculos em relação ao espaçador, não foi possível obter mais pontos com uma precisão aceitável para serem comparados com a previsão do modelo.

Uma aplicação do manipulador desenvolvido é apresentada no próximo capítulo.

5 Aplicação em Inspeção de Tanques de Combustível

Como comentado anteriormente (seção 1.1), é recomendável a adoção de uma rotina de limpeza e inspeção de sistemas de armazenagem de combustível a fim de preservar as características do produto armazenado e evitar uma possível contaminação do meio ambiente pelas más condições físicas do reservatório. No entanto, diversos fatores relacionados à localização, ao acesso e ao tipo de tanque tornam as inspeções internas muito dispendiosas e trabalhosas quando são factíveis de serem realizadas. Surge assim uma necessidade de se otimizar a questão da limpeza destes reservatórios, de modo a realizar esse procedimento somente quando for estritamente necessário.

Serão analisados, nas próximas seções, alguns sistemas de inspeção existentes, fazendo-se levantamento das principais vantagens e desvantagens de cada um. Será feita uma descrição do manipulador desenvolvido neste trabalho aplicado para a realização de inspeções nestes reservatórios. Os tipos de tanques de armazenamento serão apresentados e a partir daí será possível especificar quais tanques abrangem a atuação do sistema.

5.1. Sistemas de Inspeção Existentes

Existem diversas propostas de sistemas que poderiam ser aplicados para inspeções visuais internas sem a necessidade de esvaziamento dos reservatórios. Uma possível solução seria o uso de veículos submarinos equipados com câmeras. No entanto, uma série de desvantagens são inerentes a esses sistemas. Os modelos existentes não são certificados para inspeção imersos em combustível, além de haver risco devido ao sistema elétrico imerso e a possíveis colisões com as paredes internas. Há a dificuldade ou impossibilidade de inspeção de paredes superiores caso o reservatório não esteja completamente cheio. Além disso, os propulsores invalidariam a inspeção da emulsão ao misturar as fases formadas, além de dificultar o controle e estabilização durante a captura de imagens. Devem

ser considerados também os altos custos iniciais e de manutenção, em especial para garantir a vedação do sistema.

Outra possível solução seria o uso de veículos com rodas magnéticas, os quais se locomoveriam presos às paredes internas do reservatório. Os principais problemas deste tipo de sistema são a dificuldade ou impossibilidade de visualizar a camada de emulsão (borra) longe das paredes, riscos devido a faíscas entre as rodas magnéticas e as paredes, em especial durante as mudanças de superfície, e riscos devido ao sistema elétrico imerso ou a vazamentos sob alta pressão no caso de sistemas hidráulicos. Além disso, persistem os altos custos iniciais e de manutenção, principalmente para garantir a vedação do sistema.

Uma solução promissora está no uso de manipuladores de longo alcance com câmeras em sua extremidade, cuja base seria instalada na entrada do reservatório. Este tipo de sistema possibilitaria a inspeção de todas as paredes e de todo o volume interno do reservatório. O sistema poderia ser rápida e facilmente retirado se necessário, as técnicas de controle são bem estabelecidas, e conferem boa estabilidade na captura de imagens. Esta é uma tecnologia de eficácia comprovada, cuja precisão absoluta pode ser aprimorada através de técnicas de calibragem de manipuladores flexíveis de longo alcance (Meggiolaro, 2005).

No entanto, manipuladores de longo alcance tradicionais (Mavroidis, 1995) possuem as desvantagens de alto custo e peso, além de permanecerem os riscos envolvidos na imersão de sistemas elétricos e hidráulicos em combustível.

A próxima seção apresenta um sistema baseado na tecnologia desenvolvida de manipuladores flexíveis de longo alcance que viabiliza inspeções seguras destes reservatórios.

5.2. Descrição do Sistema

O manipulador pneumático flexível seria adaptado para utilização em contato com combustíveis (diesel, gasolina e querosene) sem apresentar nenhum risco inerente. O corpo do manipulador seria composto de polímeros resistentes aos combustíveis, como PTFE, polipropileno, fluorelastômeros, etc. Metais como o alumínio também poderiam ser utilizados fazendo o papel de uniões, flanges e outros tipos de acessórios. A movimentação do manipulador é dada a partir da pressurização de cada câmara, controladas através de servo-válvulas pneumáticas.

Através de três elos conectados serialmente, o sistema adquiriria 6 graus de liberdade em sua extremidade e assim poderia se mover por praticamente todo o volume interno do reservatório. O manipulador poderia dispor de acessórios como uma câmera certificada para realizar a inspeção visual e de uma mangueira para a coleta de material a vácuo. A Fig. 112 ilustra o funcionamento do manipulador no interior de um reservatório de combustível

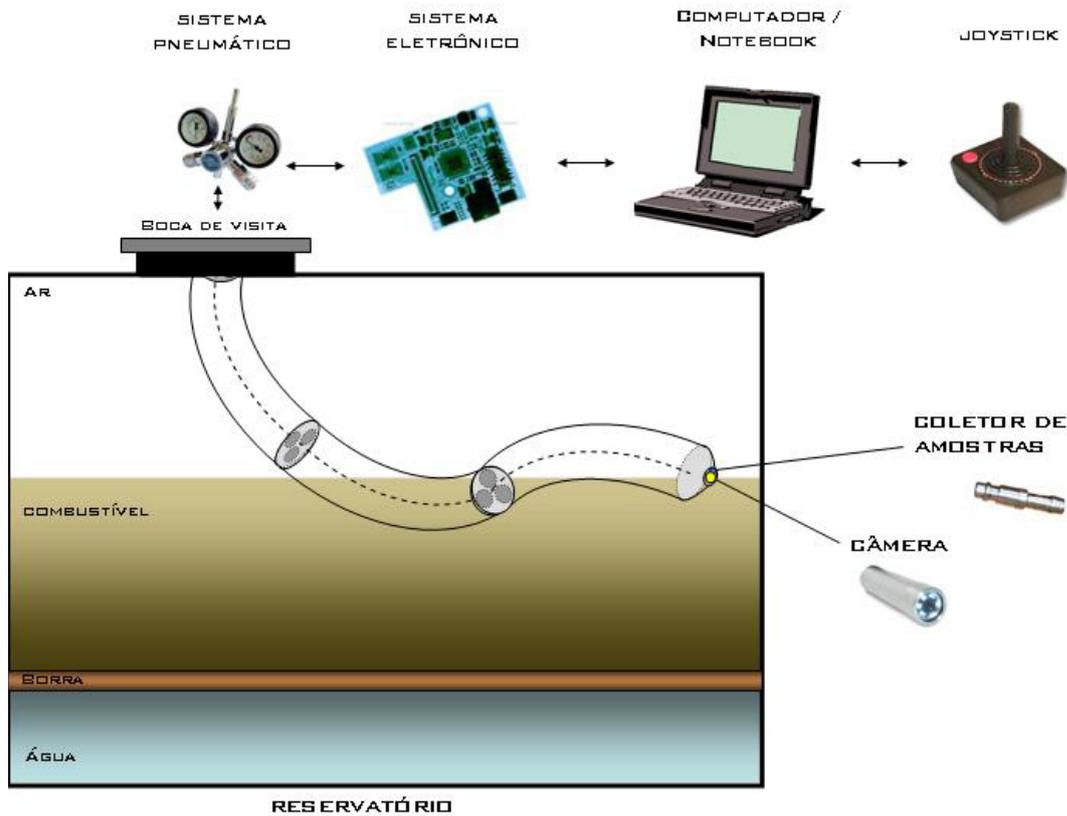


Figura 112: Esquema do manipulador em operação no interior de um reservatório de combustível

O controle da movimentação do manipulador seria exercido através de um operador que estaria interagindo com o sistema através de um computador. Com o auxílio de um componente de entrada como um *joystick*, o operador poderia fazer com que o manipulador se movimentasse para uma nova posição desejada e então dar prosseguimento à inspeção visual. O operador poderia visualizar o interior do tanque pelas imagens transmitidas pela câmera e interagir com o sistema em tempo real. Uma válvula de vácuo também estaria disponível para coletar amostras. O sistema disporia de uma plataforma de controle com a função de integrar os sistemas e servir ao mesmo tempo de interface com o operador,

disponibilizando todas as opções de configuração e ajustes necessários para o funcionamento do manipulador no ambiente desejado. Dentre as configurações, opções relacionadas ao tamanho do manipulador, diâmetro, características e dimensões do tanque a ser inspecionado poderiam ser implementadas.

A próxima seção faz um levantamento dos tipos de tanques existentes e dentre eles quais os que poderiam permitir a utilização de um sistema de inspeção do tipo proposto.

5.3. Tipos de Tanques

Os tanques de armazenamento são equipamentos de caldeiraria pesada, sujeitos à pressão aproximadamente atmosférica e destinados, principalmente, ao armazenamento de petróleo e seus derivados. A construção de um tanque de armazenamento normalmente é regulamentada pela norma americana API 650 “*Welded Steel Tanks for Oil Storage*” do *American Petroleum Institute (API)*. No Brasil utiliza-se, também, a norma NBR 7821 “Tanques Soldados para Armazenamento de Petróleo e Derivados”, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).



Figura 113: Tanques de armazenamento

Os tanques de armazenamento atmosféricos, tipicamente encontrados em refinarias, terminais, oleodutos, bases de distribuição, parques industriais, etc, são

construídos numa ampla faixa de capacidades, desde 100 barris (16m^3) até aproximadamente 550.000 barris (87.500m^3). Esses tanques são classificados conforme a natureza do teto, em:

- Tanques de Teto Fixo
- Tanques de Teto Móvel
- Tanques de Teto Fixo com Diafragma Flexível
- Tanques de Teto Flutuante

5.3.1. Tanques de Teto Fixo (Fixed Roof)

São tanques cujos tetos estão diretamente ligados à parte superior de seus costados (lateral do tanque). Podem ser autoportantes ou suportados (Fig. 114) por uma estrutura interna de perfis metálicos. Os tetos autoportantes são apoiados exclusivamente na periferia do costado.

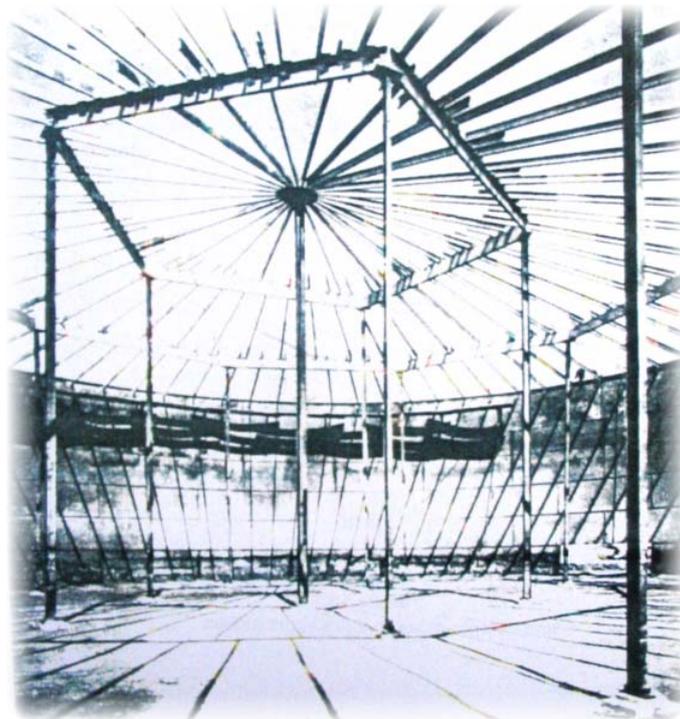


Figura 114: Teto cônico suportado. Componentes da estrutura de sustentação. Vigas radiais, vigas transversais e colunas

Dependendo da forma do teto fixo, pode-se distinguir as seguintes variações construtivas:

- a) **Teto Cônico (*Cone Roof*)**: apresenta a forma aproximada de um cone reto (Fig. 115).



Figura 115: Teto fixo cônico

- b) **Teto Curvo (*Dome Roof*)**: apresenta a forma aproximada de uma calota esférica. Normalmente é autoportante (Fig. 116).

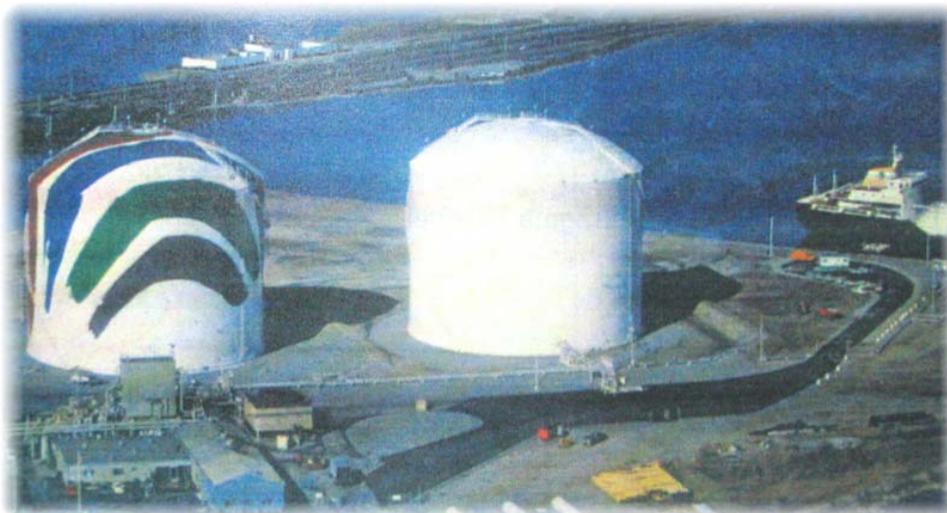


Figura 116: Teto fixo curvo

- c) **Teto em Gomos (*Umbrella Roof*):** é uma modificação do tipo anterior, no qual qualquer seção horizontal terá a forma de um polígono regular com número de lados igual ao número de chapas utilizadas nesta região do teto (Fig. 117).



Figura 117: Teto fixo em gomos

5.3.2. Tanques de Teto Móvel (*Lifting Roof*)

São tanques cujos tetos se movimentam externamente ao costado, em função da pressão de seu espaço vapor. O equipamento deverá conter dispositivos de segurança para evitar o excesso de pressão ou vácuo interno. As perdas por evaporação são evitadas por meio de um sistema de selagem entre o costado e o teto.

5.3.3. Tanques de Teto Fixo com Diafragma Flexível (*Diaphragm*)

São tanques em que os tetos são fixos ao costado mas apresentam a possibilidade de variar o volume do espaço vapor em consequência da modificação de pressão de armazenamento. A variação do espaço vapor é realizada pela deformação de um componente interno que funciona como uma membrana flexível. O diafragma flexível normalmente é fabricado de material

plástico (neoprene, polímeros sintéticos, etc) resistente ao produto armazenado sob a forma líquida ou vapor.

Tanques de teto móvel e tanques de teto com diafragma flexível normalmente são utilizados em sistemas fechados, objetivando a redução das perdas por evaporação.

5.3.4. Tanques de Teto Flutuante (Floating-Roof)

São tanques cujos tetos estão diretamente apoiados na superfície do líquido armazenado, no qual flutuam, acompanhando sua movimentação durante os períodos de esvaziamento e enchimento. São utilizados com o objetivo de minimizar as perdas por evaporação devido à movimentação de produto. Como o teto flutuante movimenta-se internamente ao costado, haverá necessidade de um sistema de selagem (Fig. 118).



Figura 118: Teto móvel

O teto flutuante apresenta os seguintes tipos construtivos:

- a. **Teto Flutuante Simples (*Single Deck or Pan-Type Floating Roof*)**: consiste essencialmente de um lençol de chapas. O teto é enrijecido por uma estrutura metálica, na sua parte superior, para lhe conferir a necessária estabilidade (Fig. 119). É o tipo

mais simples e de construção mais barata. A flutuabilidade é precária. Dos tipos de teto flutuante é o que apresenta maior perda por evaporação, pois o teto está em contato direto com o produto armazenado e transmite, mais facilmente, a energia solar incidente.

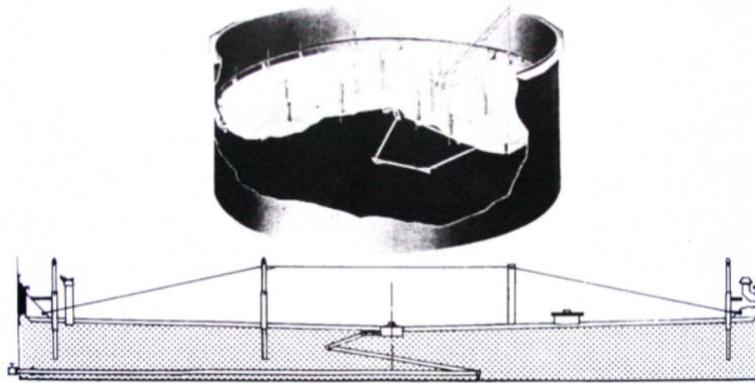


Figura 119: Teto flutuante simples

b. **Teto Flutuante com Flutuador (*Pontoon Floating Roof*):** possui, na construção convencional, um disco central e um flutuador na periferia do teto (Fig. 120). Apresenta maior flutuabilidade, menor perda por evaporação e maior custo do que o tipo anterior. Uma variação construtiva do teto flutuante “Pontoon” é o tipo “Buoyroof”, onde caixas metálicas são fixadas no teto flutuante para melhorar a sua flutuabilidade quando este se encontra inundado por água proveniente de chuva (Fig. 121). Os tetos flutuantes com flutuador apresentam, principalmente, os seguintes problemas:

- dificuldade de drenagem do teto;
- possibilidade de colapso do teto devido à excessiva pressão de vapor do produto armazenado.

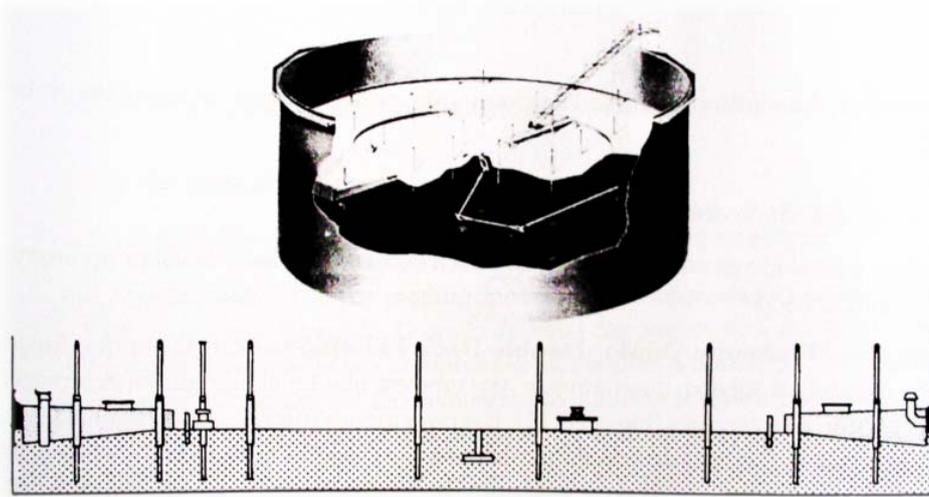


Figura 120: Teto flutuante com flutuador

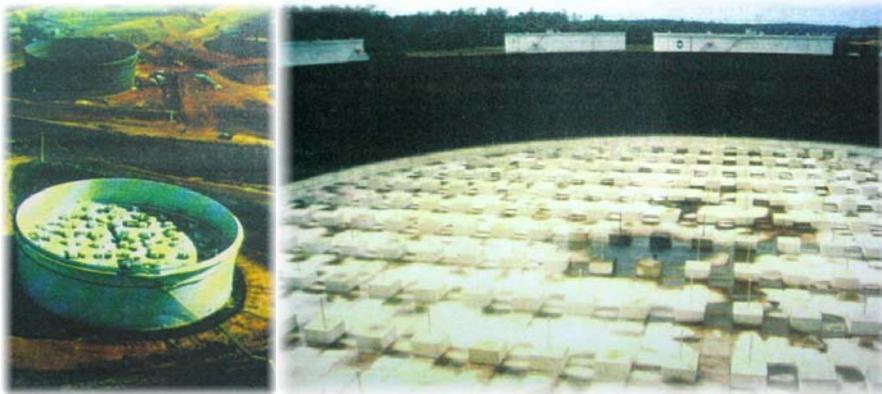


Figura 121: Teto flutuante *Buoyroof*

- c. **Teto Flutuante Duplo (*Double-Deck Floating Roof*)**: possui dois lençóis de chapas ligados, internamente, por uma estrutura metálica formando compartimentos estanques (Fig. 122). É uma estrutura robusta e de excelente flutuabilidade. É o tipo de teto mais caro, porém apresenta a menor perda por evaporação, pois os dois lençóis de chapas formam um colchão de ar que funciona como isolamento térmico entre a superfície do líquido armazenado e a superfície externa do teto. Os tetos flutuantes duplos apresentam, principalmente, os seguintes problemas:

- maior custo de fabricação e montagem,

- fundações mais caras devido à exigência de menores recalques;
- considerável volume de produto imobilizado por causa da necessidade de manter sempre o teto flutuando. O apoio desigual das pernas de sustentação do teto sobre o fundo pode provocar trincas por fadiga junto aos reforços das pernas de sustentação e nas junções das anteparas dos flutuadores com o lençol inferior do teto. Tais trincas podem provocar o alargamento do teto e até o seu afundamento;
- possibilidade de graves danos (trincas nas soldas das anteparas) em tanques com movimentação muito freqüente.

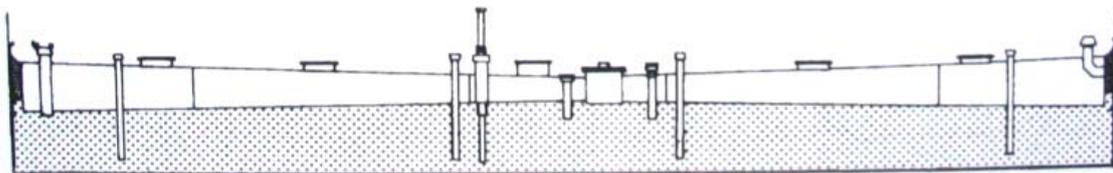
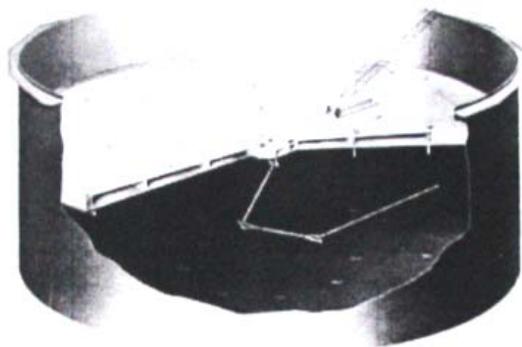


Figura 122: Teto flutuante duplo

A “Tabela 1” da Norma N-270 recomenda o tipo de tanque de armazenamento a ser adotado em função do produto armazenado.

Tabela 12: Tipo de tanque em função do produto armazenado

Produto Armazenado	Tipo de Tanque (selecionado conforme o projeto)
<ul style="list-style-type: none"> • Produtos leves da faixa de gasolina e nafta leve. • Petróleo cru. • Álcool. • Diesel leve. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque atmosférico de teto flutuante • Tanque atmosférico para pequena pressão interna segundo o API 650 Apêndice F. • Tanque para baixa pressão de teto cônico segundo a N-1964.
<ul style="list-style-type: none"> • Gasolina de aviação (GAV) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque atmosférico de teto cônico com teto flutuante interno. • Tanque atmosférico para pequena pressão interna segundo o API 650 Apêndice F. • Tanque para baixa pressão de teto cônico segundo a N-1964.
<ul style="list-style-type: none"> • Produtos pesados da faixa do querosene para cima: nafta pesada, querosene, querosene de aviação (QAV), óleo diesel, resíduo de vácuo, “cycle-oil”, óleo combustível, “slop”, óleo lubrificante, “flushing-oil” e asfalto. • Lastro de navio 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque atmosférico de teto cônico
<ul style="list-style-type: none"> • Água bruta 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque sem teto.
<p><i>Nota: Os tanques para armazenamento de produtos com pressão de vapor elevada (PVR acima de 43,5kPa ou 6,3psia) e com diâmetro inferior a 8,0 metros, devem ser do tipo cônico, com pressão interna, determinada conforme o Apêndice “F” da norma API 650.</i></p>	

5.3.5. Tanques de Postos de Serviço

São tanques cilíndricos de parede simples ou dupla, soldados, empregando chapa ou bobina de aço-carbono, operando à pressão atmosférica e armazenando produtos derivados do petróleo como diesel e gasolina, como ilustra a Fig. 123. No caso de parede dupla, a parede externa é de material não metálico (jaquetado). A construção de um tanque de posto de serviço normalmente é regulamentada pela norma NBR 13312 “Posto de Serviço – Construção de tanque atmosférico subterrâneo em aço-carbono”, no caso de tanque com parede simples, e pela norma NBR 13785 “Posto de Serviço – Construção de um tanque atmosférico de parede dupla, jaquetado”, para o caso de tanque com parede dupla, ambas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).



Figura 123 Tanques de posto de serviço

Tanques de posto de serviço tipicamente são encontrados em postos revendedores e postos de abastecimento. Os postos revendedores são instalações onde se exerce a atividade de revenda varejista de combustíveis líquidos derivados de petróleo, álcool combustível e outros combustíveis automotivos, dispendo de equipamentos e sistemas para armazenamento de combustíveis automotivos e equipamentos medidores. Já os postos de abastecimento são instalações que possuem equipamentos e sistemas para o armazenamento de combustível automotivo, com registrador de volume apropriado para o abastecimento de equipamentos móveis, veículos automotores terrestres, aeronaves, embarcações ou locomotivas e cujos produtos são destinados exclusivamente ao uso do detentor das instalações ou de grupos fechados de pessoas físicas ou jurídicas, previamente

identificadas e associados em forma de empresas, cooperativas, condomínios, clubes ou assemelhados. Os tanques são construídos atendendo capacidades nominais de 15.000L, 30.000L e 60.000L, podendo ser compartimentados ou não. A “Tabela 1” da Norma NBR 13312:2003 é mostrada a seguir, contendo as capacidades e dimensões de um tanque de posto de serviço.

Tabela 13: Capacidade e dimensões de tanque

Capacidade nominal (L)	Diâmetro nominal interno (mm)	Comprimento nominal do tanque (mm)	Espessura nominal do tampo e do costado (mm)	Massa teórica (kg)
15000	1910	5400	4,76	1 600
15000 ¹⁾	1910	5400	4,76	1900
30000	2549	6000	6,35	3200
30000 ²⁾	2549	6000	6,35	3600
30000 ³⁾	2549	6000	6,35	4000
60000	2549	12000	6,35	6400
60000 ⁴⁾	2549	12000	6,35	6800
60000 ⁵⁾	2549	12000	6,35	7200
60000 ⁶⁾	2549	12000	6,35	7600

¹⁾ Dois compartimentos de 7 500 L.
²⁾ Dois compartimentos de 15 000 L ou um de 10 000 L e um de 20 000 L.
³⁾ Três compartimentos de 10 000 L.
⁴⁾ Dois compartimentos de 30 000 L.
⁵⁾ Três compartimentos de 20 000 L.
⁶⁾ Quatro compartimentos de 15 000 L.

5.3.6. Bocais e Acessórios

Nos itens a seguir, são apresentados os principais bocais acessórios encontrados nos tanques de armazenamento e nos tanques de postos de serviço.

Tanques de Armazenamento

Os principais bocais e acessórios de um tanque de armazenamento serão descritos a seguir, em função de sua localização no equipamento. Assim, têm-se:

- **bocais e acessórios do fundo**
 - dreno de sifão;
 - dreno por baixo;

- **bocais e acessórios do costado**
 - bocas de visita;
 - portas de limpeza;
 - plataformas, passadiços e escadas;
 - câmaras e aplicadores de espuma contra incêndio;
 - indicadores de nível;
 - misturadores;
 - anel de contraventamento;

- **bocais e acessórios do teto**
 - bocais;
 - bocas de visita;
 - dispositivos de proteção contra a sobre ou subpressão interna
 - respiro aberto (teto fixo);
 - válvula de pressão e vácuo (teto fixo);
 - dispositivo de emergência (teto fixo);
 - quebra-vácuo automático (teto flutuante);
 - dispositivos de alívio de pressão (teto flutuante);
 - escotilha de medição;
 - guarda-corpo;
 - drenos do teto flutuante;
 - escada de acesso ao teto flutuante;
 - pernas de sustentação do teto flutuante;
 - selo do teto flutuante;
 - guia anti-rotacional do teto flutuante;

A Fig. 124 mostra um esquemático dos acessórios em um tanque de armazenamento convencional.

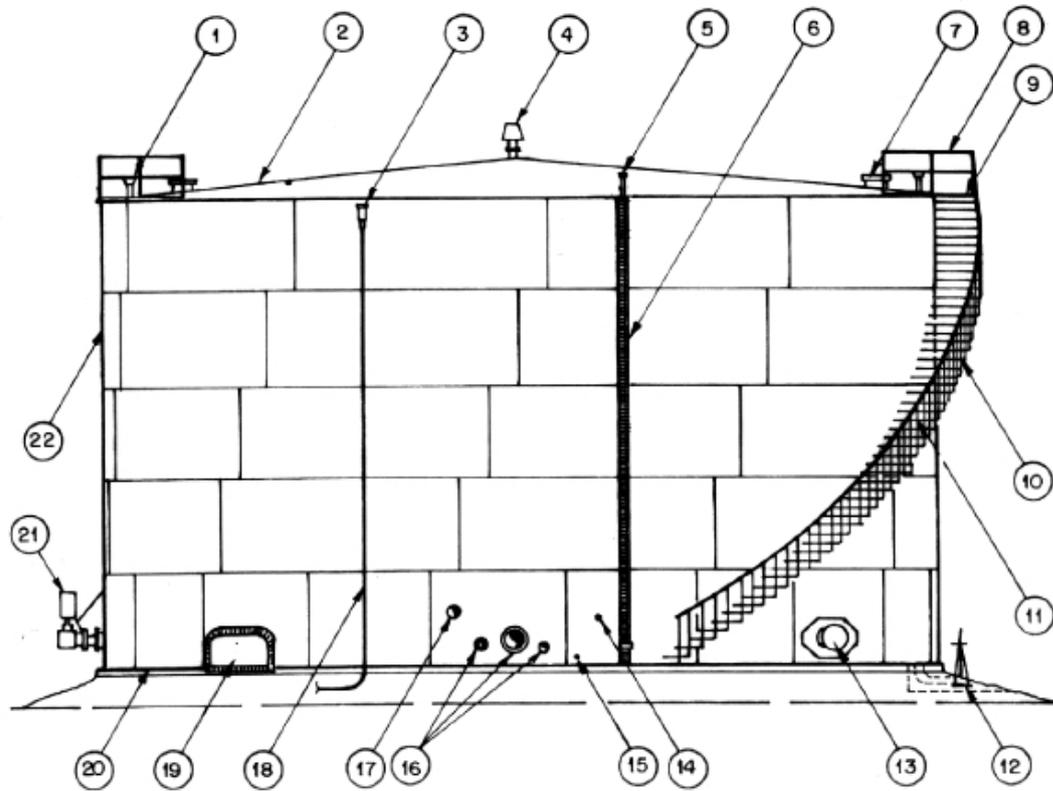


Figura 124: Tanque e acessórios - Terminologia

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1 - Escotilhas de medição | 12 - Dreno de fundo |
| 2 - Chapa do teto | 13 - Boca de visita no costado |
| 3 - Câmara de espuma | 14 - Termômetro |
| 4 - Respiro | 15 - Saída de condensado |
| 5 - Caixas de selagem de gases | 16 - Bocais de entrada e saída de produto |
| 6 - Régua externa do medidor de bóia | 17 - Entrada de vapor de aquecimento |
| 7 - Bocas de visita no teto | 18 - Tubulação de espuma |
| 8 - Corrimão do teto | 19 - Porta de limpeza |
| 9 - Plataforma da escada | 20 - Chapa do fundo |
| 10 - Escada helicoidal de costado | 21 - Misturador |
| 11 - Corrimão | 22 - Costado |

A seguir, é mostrada a “Tabela 7” da Norma N-270 (PETROBRAS), que orienta a quantidade e dimensões das bocas de visita, portas de limpeza e drenos de fundo de um tanque de armazenamento.

Tabela 14: Bocas de visita, portas de limpeza e drenos de fundo dos tanques

Diâmetro do Tanque	A - TANQUES DE PETRÓLEO			
	Boca de Visita (costado) (mm)	Boca de Visita (teto) (mm)	Portas de limpeza (mm x mm)	Drenos de fundo (mm)
até 7,5m	1 - 609,6	1 - 508,0	1 - 914,4 x 1219,2	2 - 152,4
7,5 a 18m	2 - 609,6	2 - 508,0	1 - 914,4 x 1219,2	3 - 152,4
18m a 27m	2 - 609,6	2 - 508,0	1- 1219,2 x 1219,2	3 - 152,4
27m a 43m	2 - 609,6 1 - 914,4	1 - 508,0 1 - 609,6	2- 1219,2 x 1219,2	3 - 203,2
43m a 55m	2 - 609,6 2 - 914,4	1 - 508,0 2 - 609,6	2- 1219,2 x 1219,2	3 - 203,2
55m a 86m	2 - 609,6 3 - 914,4	2 - 508,0 2 - 609,6	2- 1219,2 x 1219,2	4 - 203,2
Diâmetro do Tanque	B - TANQUES DE REFINADOS			
	Boca de Visita (costado) (mm)	Boca de Visita (teto) (mm)	Portas de limpeza (mm x mm)	Drenos de fundo (mm)
até 7,5m	1 - 609,6	1 - 609,6	1 - 914,4 x 1219,2	2 - 76,2
7,5 a 18m	2 - 609,6	2 - 609,6	1 - 914,4 x 1219,2	2 - 76,2
18m a 27m	2 - 609,6	2 - 609,6	1- 1219,2 x 1219,2	2 - 76,2
27m a 43m	3 - 609,6	2 - 609,6	1- 1219,2 x 1219,2	2 - 76,2
43m a 55m	4 - 609,6	3 - 609,6	2- 1219,2 x 1219,2	3 - 101,6
55m a 86m	2 - 609,6 2 - 914,4	2 - 762,0 2 - 609,6	3- 1219,2 x 1219,2	4 - 152,4

Notas:

- a. Os tanques cujos produtos possam causar considerável acumulação de água ou de borra no fundo, devem obedecer à TABELA para os tanques de petróleo.
- b. Produtos limpos e pouco viscosos, tais como água, dispõem a porta de limpeza, assim como tanques de diâmetro inferior a 5 metros. Nos tanques com diâmetro inferior a 5 metros pode ser usado um bocal tipo baixo (*flush type shell connection* - ver Figura no API 650), para facilitar a limpeza, a critério do projeto.
- c. As bocas de visita do teto referem-se somente aos tanques de teto cônico; para os de teto flutuante cada caso deve ser analisado individualmente.

Não existe um número padrão de bocais e acessórios em tanques de armazenamento. Esse número vai depender muito do tipo de tanque, de onde ele está localizado e da necessidade interna de cada refinaria ou terminal, por exemplo. A Tabela 14 é uma recomendação feita pela Petrobras através da Norma N-270.

O tamanho dos bocais (boca de visita e medição) é especificado pelo fabricante. A escotilha de medição (Fig. 125), acoplada ao teto dos tanques, possibilita ao operador um fácil e rápido acesso ao seu interior, permitindo medição de temperatura, saca amostra para análise, medição de volume e etc. O padrão Petrobras aceita bitolas de 4", 6", 8" e 10".



Figura 125: Escotilhas de medição

Postos de Serviço

Os principais bocais e acessórios de um tanque de posto de serviço serão descritos a seguir, em função de sua localização no equipamento. Assim, têm-se:

- **bocais e acessórios do costado**
 - boca de visita com tubo de sucção;
 - alça de içamento;
 - vacuômetro;
 - tubo de monitoramento;

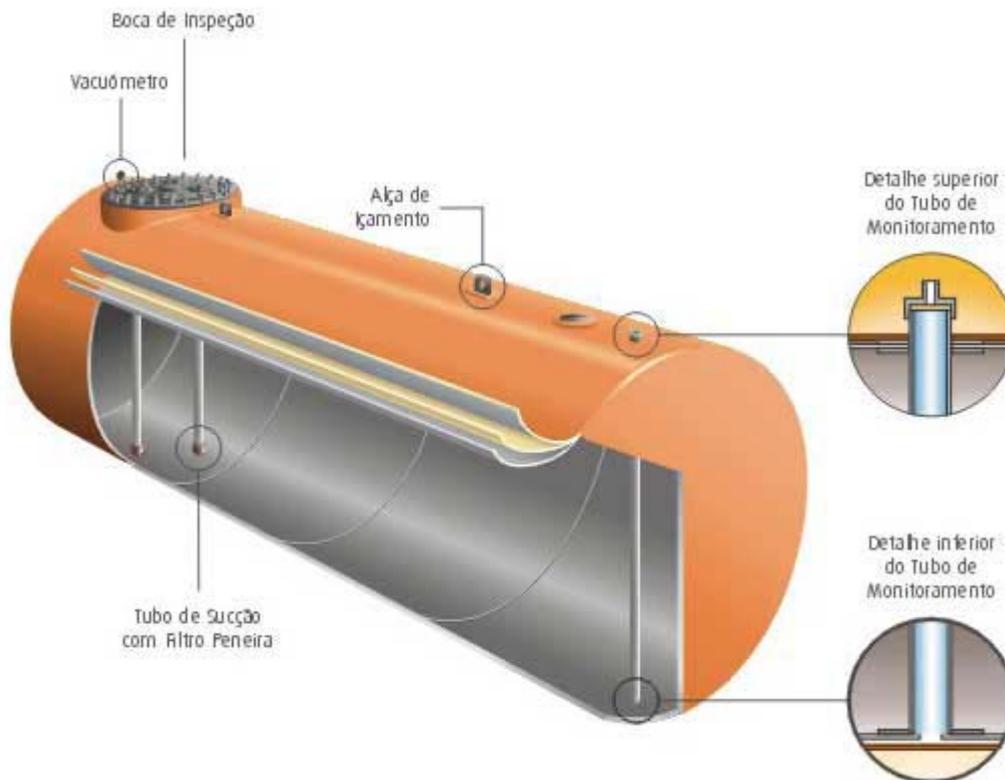


Figura 126: Desenho esquemático de um tanque jaquetado, pleno, com seus bocais e acessórios

Todos os tanques devem ter uma boca-de-visita por compartimento, instalada na geratriz superior do costado, como mostra a Fig. 126. O posicionamento da boca-de-visita em cada compartimento deve ser conforme descrito na norma NBR 13312.

A seguir comenta-se em que tipos de tanques o sistema proposto poderia ser aplicável.

5.4. Aplicação

O sistema proposto poderia ser aplicável em inspeções de reservatórios de combustível, sendo estes diesel, gasolina e querosene. O sistema permitiria uma inspeção visual do interior do tanque com produto através de uma câmera conectada a um computador, assim como a possibilidade de coleta de amostras de material para análise. O controle do manipulador seria realizado através de um operador com o auxílio de um *joystick*.

Devido às particularidades existentes em cada tipo de reservatório e sendo estas influenciadas pelo tipo de combustível que armazenam, tamanho e localização do tanque, a eficiência do sistema proposto será diferente para cada tipo de tanque. Além disso, os manipuladores teriam características específicas de acordo com o tanque a ser inspecionado. Os tanques de teto flutuante possuem peculiaridades que impossibilitariam a inspeção com o tipo de equipamento proposto por dois aspectos: o primeiro é relativo à presença de um radar ultrassônico que mede a quantidade de combustível no interior do tanque, posicionado exatamente na sua boca de visita, impedindo a colocação de qualquer outro tipo de equipamento no seu interior através desta boca; o segundo aspecto é o fato de a boca de visita possuir um comprimento muito grande por assumir também a função de anti-rotacional do teto. Desse modo, o espaço que resta entre o fundo do tanque e o término do tubo da boca de visita é muito pequeno, impossibilitando a passagem do manipulador. O sistema proposto poderia atuar nos seguintes tipos de tanques:

- tanques de armazenamento atmosféricos
 - tanques de teto fixo (teto suportado ou autoportante);
- tanques de postos de serviço

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Contribuições neste Trabalho

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um manipulador pneumático flexível de longo alcance que pode ser utilizado na realização de diversos tipos de tarefas, em ambientes de difícil acesso e que requeiram uma interação física mais suave com o meio de atuação, permitindo, inclusive, o acoplamento de ferramentas à sua extremidade.

Foram apresentados alguns tipos de sistemas robóticos flexíveis, examinando seus princípios de atuação. Estes princípios foram fonte de motivação para o desenvolvimento do manipulador proposto. Foi apresentado o conceito de Músculos Pneumáticos Flexíveis, sendo estes os principais mecanismos de atuação de robôs flexíveis. As características básicas destes músculos, assim como as classes existentes, através das quais eles se subdividem, foram comentadas. O tipo de músculo que mais se adequou aos princípios de funcionamento do manipulador flexível foi o músculo trançado (também conhecido como músculo de *McKibben*), devido à sua geometria, por ser um músculo compacto mesmo sob pressão e pela possibilidade de adquiri-lo comercialmente.

Foram desenvolvidos modelos da cinemática 2D e 3D do elo do manipulador para que a etapa seguinte de desenvolvimento dos atuadores pudesse ter início. Nesta fase, foram desenvolvidos e aprimorados, através de experimentos, músculos pneumáticos flexíveis que pudessem ser utilizados como atuadores do manipulador proposto, já que até então não se tinha conhecimento de algum produto comercial com características similares. A partir da detecção de problemas relacionados ao desgaste dos materiais do músculo durante o ciclo de pressurização e despressurização, novas soluções eram buscadas e implementadas no sistema. Novos testes então eram feitos a partir das melhorias e, dessa forma, o desenvolvimento mecânico foi sendo aperfeiçoado. Os modelos analíticos de cada atuador foram apresentados. A partir desses modelos, foi possível verificar os dados obtidos a partir dos experimentos realizados com cada geração de

músculos. Dos músculos desenvolvidos, o que apresentou melhor relação comprimento/pressão foi o músculo reforçado com um fio rígido de polipropileno, chegando a deformações aproximadamente lineares de até 100% do seu comprimento inicial. Porém, o efeito de segunda ordem verificado durante a sua deformação, proveniente da disposição espiral do fio utilizado para reforço, inviabilizou o uso do músculo para fins deste projeto. Com isso, o músculo que melhor se adequaria para a construção do protótipo seria o músculo reforçado com anéis rígidos e flexíveis, principalmente por não apresentar o efeito de segunda ordem verificado com o caso anterior e por apresentar melhorias mecânicas com relação aos seus precursores. Músculos com esta técnica de construção chegaram a ser acoplados na formação de um elo do manipulador para que novos experimentos fossem realizados com o sistema completo. Contudo, a partir do momento em que tomou-se conhecimento da existência de músculos similares vendidos comercialmente, por se tratar de um produto já confiabilizado, o projeto voltou-se para a elaboração de mecanismos que permitissem o acoplamento desses músculos na formação do elo do manipulador.

A partir desta etapa, deu-se início a construção dos protótipos. Cada elo é formado pela junção de três atuadores pneumáticos, resultando em um sistema com 3 graus de liberdade em sua extremidade, sendo apenas 2 deles com grande mobilidade. A evolução dos protótipos é descrita através de gerações. O desempenho das gerações era avaliado segundo alguns critérios estabelecidos. Foi avaliado o menor raio de curvatura conseguido com o protótipo através da inserção da maior pressão que estivesse dentro da faixa utilizada nos experimentos. O teste do menor raio era feito para a pior condição, com o protótipo suspenso, recebendo a ação da gravidade. Quanto menor fosse o raio de curvatura obtido, melhor seria a performance do protótipo. Um outro critério utilizado para qualificar um protótipo era com relação à sua integridade mecânica e técnicas de montagem. Protótipos que não apresentassem repetibilidade e robustez durante os experimentos eram modificados e aprimorados. Foram analisados diferentes mecanismos para acoplar os atuadores. O mecanismo (espaçador) que melhor se adequou aos músculos utilizados foi constituído a partir de mangueiras siliconadas intercaladas. Por ser flexível e ao mesmo tempo contínuo ao longo de todo o comprimento do manipulador, este tipo de espaçador permitia a expansão radial e a contração longitudinal dos músculos, fazendo com

que a posição relativa dos mesmos permanecesse inalterada. O sistema foi reforçado com uma mangueira externa flexível que contribuiu para o aumento da rigidez à torção do manipulador, servindo também como proteção da parte interna com relação ao meio externo. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se uma mangueira de PVC reforçada com um fio de aço cobreado. Das mangueiras testadas, esta foi a que menos restringiu a movimentação do sistema por conta de sua flexibilidade, contribuindo também positivamente para o aumento da rigidez do manipulador. Os principais problemas de cada geração foram comentados e aprimoramentos foram realizados nas gerações seguintes.

A partir do desenvolvimento de um protótipo final que apresentasse características de acordo com objetivos traçados, experimentos foram realizados com o objetivo de analisar aspectos da sua movimentação e de mensurar o posicionamento da sua extremidade. Foram incorporadas ao sistema servo-válvulas pneumáticas que garantiram o controle das pressões inseridas em cada atuador do elo. Um programa utilizando a plataforma *LabView* foi implementado para fornecer os sinais de controle para as servo-válvulas. Foi elaborado um modelo cinemático estático do protótipo final e os resultados obtidos foram comparados aos resultados experimentais, resultando em previsões com erros máximos de posicionamento de menos de 6%.

Finalmente, foi apresentada uma aplicação do sistema em inspeção de reservatórios de combustíveis. O sistema pode ser adaptado para a realização de inspeções visuais no interior de tanques de combustível cheios, em operação. Os tipos de tanques existentes foram apresentados para que se pudesse avaliar em quais tanques seria possível realizar uma inspeção com o manipulador em questão. Dentre os tipos de tanques existentes, o sistema poderia ser aplicado à tanques atmosféricos de teto fixo, sendo este suportado ou autoportante, e tanques de postos de serviço. Devido ao fato do sistema em questão ser extremamente versátil, com uma estrutura modular, podendo ser aplicado com diversos tipos de funcionalidades, outras possíveis soluções foram referenciadas e as vantagens do sistema proposto foram comentadas.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Alguns aspectos envolvendo a construção do manipulador robótico flexível, assim como aprimoramentos da modelagem do sistema, podem ser sugeridos visando um melhor desempenho do manipulador.

No desenvolvimento mecânico do protótipo, foram dadas soluções para a fixação das extremidades dos músculos. Esta fixação é um fator muito importante e que influencia diretamente na movimentação do elo. A incorporação de acessórios de apoio para serem acoplados na base e na extremidade do elo tornariam a montagem mais simples, modular e evitariam que houvesse uma movimentação relativa entre os músculos. Um aprimoramento da construção do espaçador do elo também faria com que os erros e vícios provocados por imperfeições resultantes do processo de montagem fossem diminuídos. É importante que o espaçador seja construído de forma simétrica para evitar tendências de movimentos do manipulador. No ANEXO encontram-se algumas sugestões com melhoramentos dessas estruturas.

A partir do desenvolvimento de acessórios para a base e para a extremidade do elo, será possível a inclusão de mais elos com o objetivo de se obter mais graus de liberdade em sua extremidade. Com a inclusão de mais elos, novos testes terão que ser realizados para comprovar a funcionalidade de um sistema com um comprimento maior.

O desenvolvimento do modelo analítico do músculo MAS da FESTO pode contribuir para um melhor entendimento e aperfeiçoamento do modelo do elo. A inclusão do efeito da atadura elástica no revestimento do elo também contribuiria significativamente para a diminuição do erro relacionado à previsão do posicionamento da extremidade do sistema. Outras contribuições que podem ser feitas no modelo analítico são a inclusão dos efeitos de gravidade e empuxo.

Referências bibliográficas

ASADA, H.; SLOTINE, J.J. **Robot Analysis and Control**, Wiley, 1986.

BAN, Y.; DOHTA, S.; MATSUSHITA, H. **Application of a Flexible Strain Sensor to a Pneumatic Rubber Hand**, *Proceedings of the Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, FLUCOME 2000, August 13-17, 2000, Sherbrooke, Canada.

BRIDGESTONE Acfas Robot System, Bridgestone "**rubbertuator**" manuals and documentation. Japanese, pub. Oct. 1989.

CALDWELL, D. G.; MEDRANO-CERDA, G. A.; Goodwin, M. J. **Braided pneumatic actuator control of a multi-jointed manipulator**, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 423–428, Le Touquet, 1993.

CHOU, C.; HANNAFORD, B. **Measurement and modeling of McKibben pneumatic artificial muscles**. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(1), 1996.

DAERDEN, F.; LEFEBER, D. **Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation** *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47(1):10–21, 2002.

DAVIES, J. B. C. **A flexible motion generator**, Ph.D. dissertation, Dept. Mech. and Chemical Eng., Heriot-Watt University, Edinburgh, U.K., 1996.

DOHTA, S.; KAMEDA, M.; MATSUSHITA, H. **Study on a Pneumatic Rubber Hand with Flexible Strain Sensors**, *Fifth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Hayama, Japan, Sept. 1-4, 1997, pp. 509-514.

IMMEGA, G. **Tension actuator load suspension system**, US Patent No. 4 826 206, 1989.

IMMEGA, G; KUKOLJ, M. **Axially contractible actuator**, US Patent No. 4 939 982, 1990.

IMMEGA, G.; ANTONELLI, K. **The KSI Tentacle Manipulator**, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3149 – 3154, 1995.

KAZEROONI, H. **The Extender Technology at the University of California**, Berkeley, *Journal of the SICE*, Vol.34, No.4, 1995, 291-298.

KERSCHER, T.; ALBIEZ, J.; BERNS, K. **Joint Control of the Six-Legged Robot AirBug Driven by Fluidic Muscles**. *Third International Workshop on Robotik Motion and Control*, Bukowy, 2002.

KUKOLJ, M. **Axially contractible actuator**, US Patent No. 4 733 603, 1988.

LANE, D. M.; DAVIES, J. B. C.; ROBINSON G.; O'BRIEN D. J.; SNEDDON, J.; SEATON, E.; ELFSTROM, A. **The AMADEUS dextrous subsea hand: protejo, modeling, and sensor processing**, *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 24 No. 1, pp. 96-111, 1999.

MARCINCIN, J.; PALKO, A. **Negative pressure artificial muscle—An unconventional drive of robotic and handling systems**, *Transactions of the University of Košice*, pp. 350–354, Rieckansky Science Publishing Co, Slovak Republic, 1993.

MAVROIDIS, C.; DUBOWSKY, S.; RAJU, V. **End-point control of long reach manipulator systems**, Anais do *Ninth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, Milão, Itália, 1995.

MCMAHON, TH A. **Muscles, reflexes, and locomotion**, Princeton University Press, 1984.

MEGGIOLARO, M.A.; DUBOWSKY, S.; MAVROIDIS, C. **Geometric and Elastic Error Calibration of a High Accuracy Patient Positioning System**, *Mechanism and Machine Theory* (ISSN 0094-114X), IFToMM, Vol. 40, n.4, pp.415-427, 2005.

MORIN, A. H. **Elastic diaphragm**, US Patent No. 2 642 091, 1953.

NAKAMURA, N.; SEKIGUCHI, M.; KAWASHIMA, K.; FUJITA, T.; KAGAWA, T. **Developing a robot arm using pneumatic artificial rubber muscles**, *Bath Workshop on Power Transmission & Motion Control*, 2002.

NATIONAL INSTRUMENTS **User Manual of LabVIEW**. USA, Texas. National Instruments Corporation, 2000.

PAYNTER, H. M. **Hyperboloid of revolution fluid-driven tension actuators and methods of making**, US Patent No. 4 721 030, 1988.

PAYNTER, H. M. **High pressure fluid-driven tension actuators and methods for constructing them**, US Patent No. 4 751 869, 1988.

PEEL, L.D.; JENSEN, D.W. **Fiber-Reinforced Elastomers - Flexible Composites in Japan**, Asian Technical Information Program ATIP 98-001, Disponível em: <www.atip.org/public/atip.reports.98/atip98.001r.html>, 1998. Acesso em: 16 mar. 2006.

SUZUMORI, K.; IKURA S.; TANAKA H. **Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms** in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Sacramento, CA, Apr. 1991, pp. 1622–1627.

SUZUMORI, K.; IKURA S.; TANAKA H. **Applying Flexible Microactuator to Robotic Mechanisms**, *IEEE Control Systems*, 1992, 21-27.

SUZUMORI, K. **Elastic Materials Producing Compliant Robots**, *Robots and Autonomous Systems*, 18, 135, (1996).

TANAKA, Y. **Study of Artificial Rubber Muscle**, *Mechatronics*, Vol.3, No. 1, 1993, pp. 59-75.

TANAKA, Y.; GOFUKU, A.; FUJINO, Y. **Development of a Tactile Sensing Flexible Actuator**, *Advanced Motion Control 96*, Mie University, Tsu-City, Japan, 1996, pp. 723-728.

TONDU, B.; LOPEZ, P. **Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators**, *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 15–38, 2000.

UFRS - Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **Fungos e bactérias podem prejudicar motores a diesel**. Agência Brasil (Abr), Porto Alegre, 2005. Seção Ciência, Tecnologia & Meio Ambiente. Disponível em: <www.radiobras.gov.br/ct/1997/materia_051297_4.htm> Acesso em: 16 mar. 2006.

WALKER, I. D. **Some Issues in Creating "Invertebrate" Robots**. *Proceedings of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, Montreal, Canada, August 2000.

WONGSIRI, S.; LAKSANACHAROEN, S. **Protejo of An Intelligent Prosthetic Arm**, *International Symposium on Biomedical Engineering 2004 (ISBME2004)*, Bangkok, Thailand, November 16-18, 2004.

YARLOTT, J. M. **Fluid actuator**, US Patent No. 3 645 173, 1972.

ANEXO

Materiais utilizados para a construção dos protótipos

- **Fio de polipropileno MONOFIL**
 - utilizado como reforço externo da mangueira de silicone da construção do protótipo da 3ª geração (Desenvolvimento de espaçadores - seção 3.5.2)
 - dimensões: diâmetro – 1mm ; comprimento – 50m



Figura 1: Rolo do fio de polipropileno MONOFIL

- **Cola de poliuretano SINTEX MS-35 (Fabricante Quilosa)**
 - utilizado como reforço, acabamento externo e espaçador de vários protótipos (Desenvolvimento de espaçadores - seção 3.5.2)



Figura 2: Tubo da cola de poliuretano SINTEX MS-35

- **Atadura elástica NEXCARE (Fabricante 3M)**
 - utilizada como acabamento externo do protótipo da 8ª geração (Desenvolvimento de espaçadores - seção 3.5.2)
 - dimensões: 75mm x 4,5m



Figura 3: Atadura elástica NEXCARE da 3M

- **O-rings rígidos de polietileno “Mini Toys”**
 - utilizado como reforço externo da mangueira de silicone do protótipo da 4ª geração (Desenvolvimento de espaçadores - seção 3.5.2)
 - dimensões: diâmetro interno – 16,8mm; espessura: 1,9mm ($\pm 5\%$)



Figura 4: O-rings de polietileno da MINI TOYS

➤ **O-rings flexíveis de BUNA-N**

- utilizado como reforço externo da mangueira de silicone do protótipo da 4ª geração (Desenvolvimento de espaçadores - seção 3.5.2)
- dimensões:
 - **REF: 2-112** - diâmetro interno – 12,37mm, espessura: 2,62mm;
 - **REF: 2-114** - diâmetro interno – 15,54mm, espessura: 2,62mm;



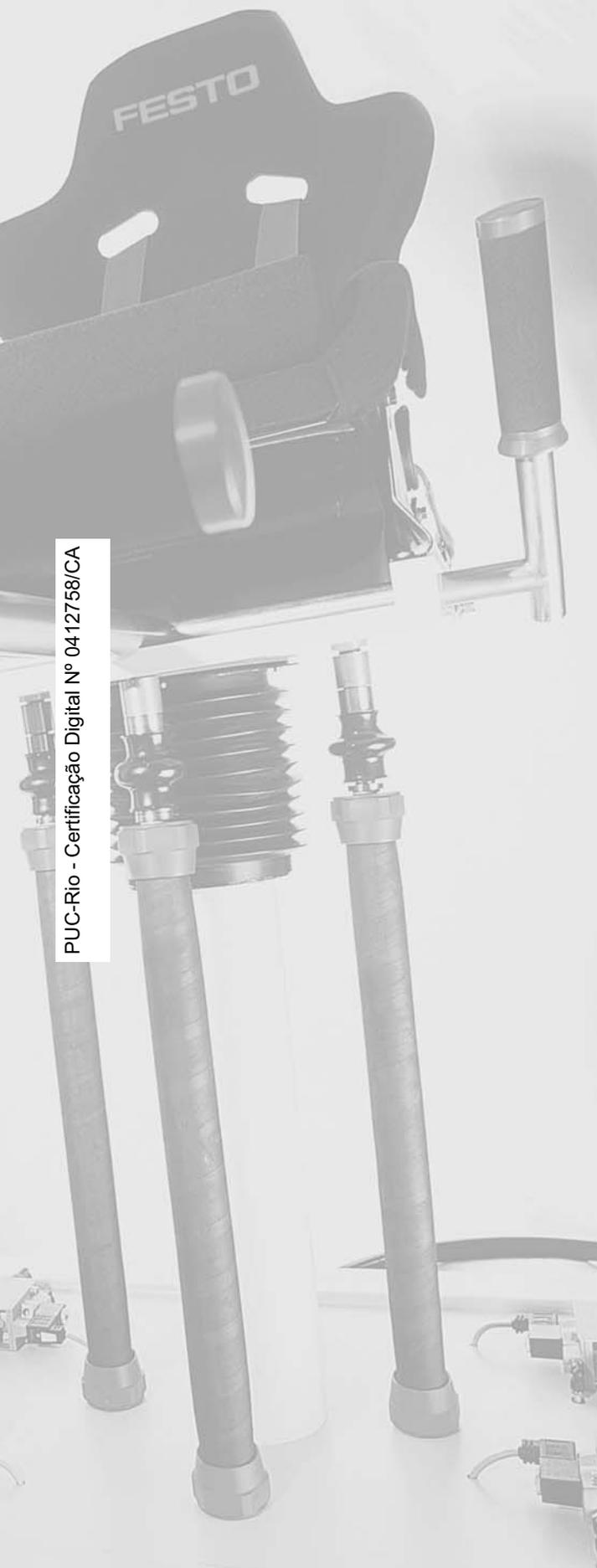
Figura 4: O-rings flexíveis de BUNA-N

Novo. Músculo Pneumático MAS

FESTO

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA





PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

A Festo orgulhosamente apresenta: músculo pneumático tipo MAS

Princípio inovador

O músculo pneumático é um sistema de contração de membrana, ou seja, o tubo contrai-se quando sob pressão. A idéia básica é combinar tubos flexíveis impermeáveis com um revestimento de fibras robustas em formato de losango, criando assim uma estrutura tridimensional. Quando o ar é admitido, a forma dessa estrutura é alterada pela expansão e surge uma força de tração na direção axial. A estrutura de grade faz com que o músculo reduza o eixo neutro à medida que a pressão interna aumenta. Isso corresponde a um curso de aproximadamente 25% do comprimento inicial sem carga.

Um vencedor, quando se comparam as forças

Quando distendido, o "músculo" desenvolve até dez vezes mais força do que um cilindro pneumático tradicional e consome apenas 40 % da energia para uma força idêntica. É possível obter uma força idêntica com apenas um terço da seção transversal, sendo que o curso é reduzido com um comprimento idêntico de instalação. Pode ser utilizado quando há várias aplicações, abrindo espaço para áreas completamente novas de aplicações pneumáticas.

Totalmente impermeável

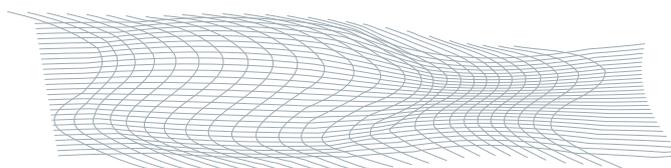
O sistema de contração da membrana é hermético – o ar comprimido só pode escapar pela entrada, tornando o músculo pneumático impermeável a impurezas, pó e areia. Mais possibilidades para o uso da tecnologia "clean" na pneumática: onde os atuadores elétricos podem causar problemas ou até mesmo se tornarem perigosos.

Presença mundial

Novos produtos desconhecem fronteiras. Não importa onde você está, a Festo está sempre por perto – e onde a Festo estiver representada, você poderá obter o músculo pneumático MAS.

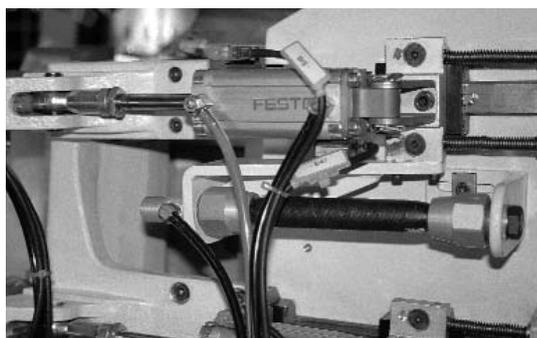
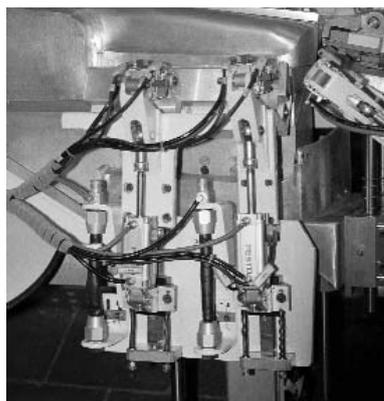
Músculo Pneumático MAS – um peso-pena super poderoso.

O princípio da contração.
Nova força para o que há de mais moderno em acionamento



É simplesmente fascinante a perfeição com a qual o músculo humano trabalha: é capaz de contrações poderosas ou de relaxar quando quiser. No entanto, a implementação técnica desse sistema natural de contração representa um desafio singular.

A Festo conseguiu desenvolver o princípio da força muscular para ser produzido em série usando um produto inédito no mundo inteiro, baseado na combinação de tubos flexíveis e fibras fortes em formato de losango. O músculo pneumático oferece ao usuário Festo flexibilidade máxima com até dez vezes mais força – e isso tudo com uma fração do peso de um cilindro pneumático. Não perca a oportunidade de experimentar esse novo aspecto da tecnologia pneumática.



A pneumática efetiva de várias maneiras

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

Efetivamente dinâmico

Graças à enorme força e aceleração iniciais, o músculo pneumático peso-pena é extremamente adequado para aplicações que requerem grandes acelerações sem qualquer efeito stick-slip, por exemplo:

- Tecnologia de simuladores
- Processos de corte de alta velocidade
- Tecnologia de trava e fixação

Efetivamente resistente

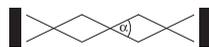
Até mesmo em ambientes empoeirados ou contaminados, que poderiam causar desgaste mecânico nas partes móveis, a performance do sistema hermético do músculo pneumático é efetiva.

- Trabalhos em madeira
- Oficinas de esmerilhação

Efetivamente limpo

Os benefícios da higiene do músculo pneumático ficam bem claros em qualquer aplicação que exige uma separação total entre o ar do atuador e o ambiente, por exemplo, na pesquisa biomédica.

O princípio funcional



Pré-tensionado



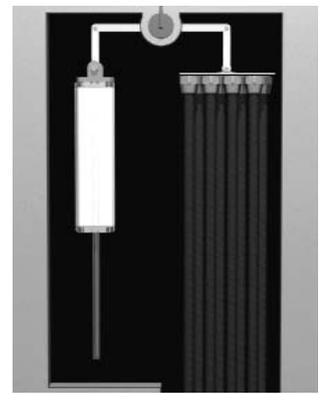
Contraído



Os diâmetros:
 $\varnothing 10$ mm, $\varnothing 20$ mm, $\varnothing 40$ mm



Máxima dinâmica, mesmo com grandes cargas.

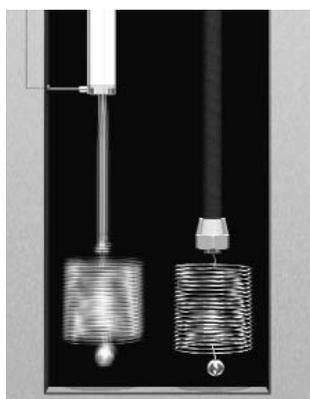


Extremamente leve, ideal para aplicações móveis.



Efetivamente simples – a tecnologia de conexão. A conexão com o meio de acionamento é feita através de dois conectores cônicos de metal leve anodizado. Várias roscas e encaixes asseguram flexibilidade de uso em uma ampla gama de aplicações. Se houver modificações na aplicação ou se o músculo tiver de ser substituído, os conectores podem ser reutilizados.

MAS: princípio inovador e montagem simples
 MAS: o único atuador cujo comprimento pode ser ajustado através de um cortador. Tanto faz se o músculo pneumático tem um diâmetro interno de 10, 20 ou 40 mm – a montagem ficou ainda mais fácil. O comprimento pode ser determinado com a ajuda de um software de dimensionamento apropriado. Comprimentos de até 9 m estão disponíveis diretamente. Depois de definido o comprimento, só falta decidir se você precisa de uma conexão de ar radial ou axial.



Totalmente livre de impactos ou solavancos, mesmo durante movimentos lentos.



Posicionamento de precisão usando tecnologia simples, sem sistemas de medição de curso.



Atualmente ele é produzido com 9 metros, mas pode ser ampliado conectando-se vários músculos.

Músculo Pneumático

Visão geral da linha

 **Novidade**



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

 - Diâmetros
10, 20 e 40 mm

 - Comprimento
40 ... 4500 mm

- Aberto em ambos os lados
- Aberto em um dos lados (força de compensação integrada no lado aberto)

O músculo pneumático é um atuador concebido mediante a estudos mióticos, ou seja, quando submetido a pressão, comporta-se exatamente como um músculo, retrai-se e produz força.

Sua construção estrutural é uma trama geométrica de fibras sintéticas e sua aparência é semelhante a um tubo que ao receber pressão em seu interior, reage contraindo as fibras.

Pode ser utilizado como:

- Atuador de tração de simples ação para elevar ou abaixar cargas
- Mola pneumática

Outras características do músculo:

- Força de avanço até 10 vezes maior do que um cilindro convencional do mesmo diâmetro
- Grande dinamismo
- Movimento sem torsões
- Ajuste simples de posições intermediárias mediante a regulagem de pressão
- Baixo peso
- Hermeticamente vedada

Chave de códigos página 7

Descrição funcional página 8

Informações de tamanho página 10

Exemplos de tamanhos página 12

Acessórios página 14

Visão geral da linha página 16

Dados técnicos página 17

Dimensões página 19

Informações para pedido página 21

Novidade

Músculo Pneumático

Chave de códigos

	187 617	MAS	20	N2000	AA	MCHK
Código						
Tipo	MAS	Músculo pneumático Atuador de simples ação				
Tamanho Ø [mm]						
Cursos [mm]*	N...	Cursos do músculo - Ø 10 mm: 40 ... 9000 mm - Ø 20 mm: 60 ... 9000 mm - Ø 40 mm: 90 ... 9000 mm				
Materiais	AA	Membrana - material estrutura da fibra				
Connection	MOFK	Músculo aberto em ambos os lados com força de compensação integrada e rosca interna M10x1.25				
	MOHK	Músculo aberto em ambos os lados com força de compensação integrada e rosca interna M16x1.5				
	MOKK	Músculo aberto em ambos os lados com força de compensação integrada e rosca interna M20x1.5				
	MCFK	Músculo aberto em um dos lados com força de compensação integrada e rosca interna M10x1.25				
	MCHK	Músculo aberto em um dos lados com força de compensação integrada e rosca interna M16x1.5				
	MCGK	Músculo aberto em um dos lados com força de compensação integrada e rosca interna M10x1.25				
	MCKK	Músculo aberto em um dos lados com força de compensação integrada e rosca interna M20x1.5				
	MCIK	Músculo aberto em um dos lados com força de compensação integrada e rosca interna M16x1.5				

Importante 
Especifique completa chave de código para efetuar o pedido

Importante 
Na versão com um dos lados aberto a força de compensação integrada localiza-se no lado aberto

**  - Importante
O comprimento não deve ser confundido com o curso

Músculo pneumático

Descrição funcional

 **Novidade**

Modo de operação

O músculo pneumático consiste em um atuador de tração. O sistema é formado por um tubo de borracha comprimido por pressão coberto por fibras que geram grande força. As fibras criam uma estrutura de grades tridimensionais. Quando a pressão interna é aplicada, o tubo aumenta a extensão de seu diâmetro, criando uma força de tensão e um movimento

de contração na direção longitudinal do músculo. A força de tensão útil atinge o ponto máximo no início da contração e depois vai decrescendo de maneira linearmente em função da força. O músculo pneumático trabalha com uma contração de aproximadamente 25% de seu comprimento. Essa contração representa o seu curso.

 **Importante**

O músculo pneumático deve ser utilizado apenas como um atuador. A expansão do diâmetro não pode ser utilizada para apertos, uma vez que a fricção externa pode causar danos ao músculo.

Dimensionando o músculo

1. Software de dimensionamento

Você pode escolher o tamanho adequado para o músculo utilizando o software de dimensionamento do músculo pneumático.

2. Dimensionamento gráfico

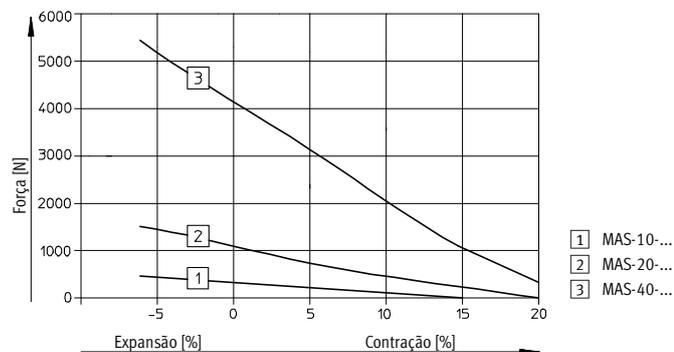
Além do tamanho do músculo utilizando o software, também é possível definir o comprimento do músculo com o auxílio do diagrama pressão/força.

O dimensionamento gráfico do músculo é explicado na página 12 com o auxílio de dois exemplos.

Curva de força e exemplos de carga

O comprimento de um músculo pneumático é definido no estado não pressurizado, sem carga. Corresponde ao comprimento visível entre as conexões.

O músculo estende seu comprimento quando uma carga é acoplada. Quando pressurizado, o músculo contrai e seu comprimento decresce.



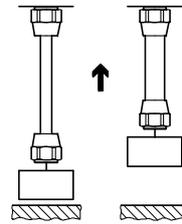
Novidade

Na aplicação mais simples, o músculo pneumático opera como um atuador de simples ação que atua contra uma carga constante. Assumindo que essa carga esteja permanentemente acoplada ao músculo, quando não estiver pressurizado, ele se encontrará no estado estendido. Quando pressurizado, o músculo proporciona o máximo da força com o

mínimo consumo de ar.

Nessa situação, a força útil é também a máxima possível. Se o músculo necessita deslocar uma carga acoplada livremente suspensa, uma grande força precisa primeiro ser efetuada para elevação, deixando a pequena força para o próprio movimento.

Resistência = Constante



Músculo Pneumático

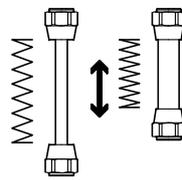
Descrição funcional

Atuador de tração de simples ação para elevar e abaixar

Ao mudar a força externa, o músculo pneumático comporta-se como uma mola: ele segue a direção da ação da força. Com o músculo pneumático, podem ser ajustadas tanto a força de estiramento quanto a rigidez da mola. Funcionando como uma mola, pode

aplicar-se a uma pressão constante ou a um volume constante. Isso produz diferentes características que proporcionam o efeito de mola podendo ser perfeitamente integrado a aplicação necessária.

Pressão/volume = Constante



Mola Pneumática

 Importante

Se o músculo é operado em um volume constante, a pressão no músculo pode aumentar significativamente quando a força externa é variável.



Exemplo

Músculo Pneumático

Informações de tamanho

 **Novidade**

Diagramas de pressão/força

Faixas de trabalhos

O limite de peso das cargas “livremente suspensas” depende da extensão. Com o MAS-10-..., ao acoplar uma carga adicional de 30 kg livremente suspensa, uma extensão de 3% é resultada. Cargas maiores podem danificar a superfície interna do músculo.

Entretanto, se uma carga estiver apoiada sobre uma base e deve ser elevada pelo músculo, essa carga pode ser maior sempre considerando a limitação da força do músculo (no caso do MAS-10-..., essa carga é no máximo de 40 kg ou 400 N.

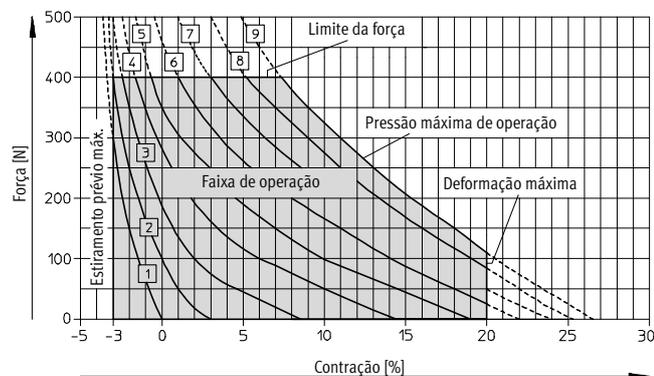
O limite especificado nos dados técnicos precisa ser considerado na utilização do músculo.

Utilização dos diagramas

Os diagramas abaixo ilustram a faixa de operação do músculo dependendo de seu diâmetro:

1. Na esquerda do diagrama:
Limite determinado pelo estiramento prévio máximo.
2. Acima:
Limite determinado pela força máxima possível.
3. Na direita, parte superior:
Limite determinado pela pressão de funcionamento máxima admissível.
4. Na direita, parte externa:
Limite determinado pela contração máxima admissível.

Faixa de operação do MAS-10-...

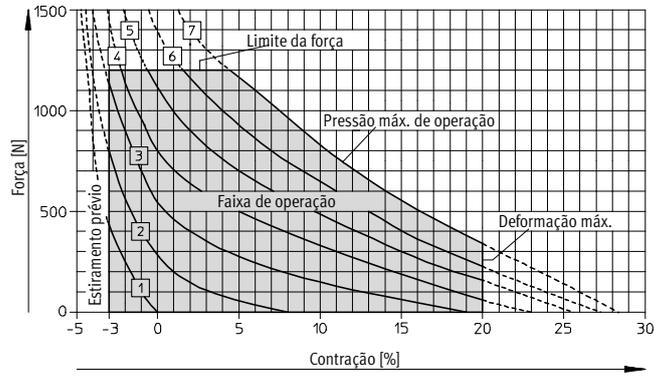


- | | |
|---|-------|
| 1 | 0 bar |
| 2 | 1 bar |
| 3 | 2 bar |
| 4 | 3 bar |
| 5 | 4 bar |
| 6 | 5 bar |
| 7 | 6 bar |
| 8 | 7 bar |
| 9 | 8 bar |

Novidade 

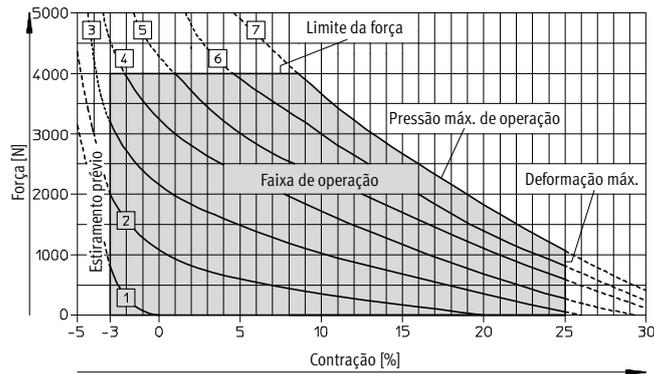
Músculo Pneumático
Informações de tamanho

Faixa de operação do MAS-20-...



- 1 0 bar
- 2 1 bar
- 3 2 bar
- 4 3 bar
- 5 4 bar
- 6 5 bar
- 7 6 bar

Faixa de operação do MAS-40-...



- 1 0 bar
- 2 1 bar
- 3 2 bar
- 4 3 bar
- 5 4 bar
- 6 5 bar
- 7 6 bar

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

 **Importante**
Dimensionar o músculo com o auxílio dos diagramas só possibilita valores aproximados. As variações ocorrem pois somente a parte cilíndrica do músculo pode ser representada de forma linear.

O software de dimensionamento do músculo pneumático fornece resultados mais confiáveis.

Músculo Pneumático

Exemplos de dimensionamento

 **Novidade**

Exemplos de dimensionamento para levantamento de carga constante

É necessário levantar uma carga constante de 80 kg acoplada a uma distância de 100 mm. A pressão de operação é de 6 bar.

O tamanho (diâmetro e comprimento) do músculo precisa ser encontrado. Os limites especificados nos dados técnicos precisam ser observados no uso do músculo.

Condições gerais	
Força necessária no estado normal	0 N
Deslocamento necessário	100 mm
Força necessária no estado contraído	aprox. 800 N
Pressão de operação	6 bar

Passo 1

Definir o diâmetro do músculo

Definir o diâmetro do músculo apropriado, baseado na força máxima permitida. A força máxima admissível é 800 N; portanto, um MAS-20-... deve ser selecionado.

Passo 2

Apontar ponto de carga 1

O ponto de carga 1 é apontado no diagrama pressão/força do MAS-20-....
Força $F = 0$ N
Pressão $p = 0$ bar

Passo 3

Apontar ponto de carga 2

O ponto de carga 2 é apontado no diagrama pressão/força.
Força $F = 800$ N
Pressão $p = 6$ bar

Passo 4

Ler a mudança de comprimento

A mudança de comprimento do músculo é representada pela contração do músculo (em %).
Resultado:
10,5% contração.

Passo 5

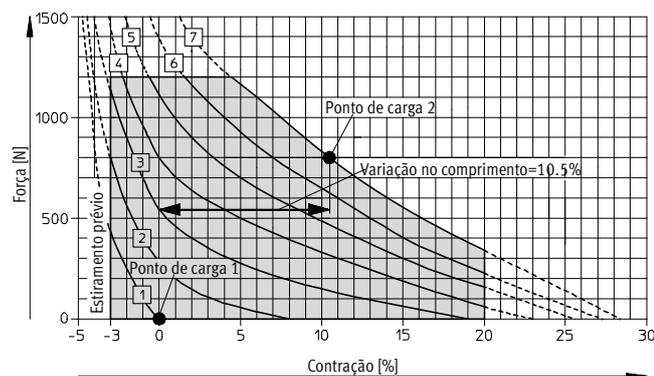
Calcular o comprimento

Se o curso é de 100 mm, o comprimento do músculo é calculado dividindo o curso pela porcentagem de contração.
Resultado:
 $100 \text{ mm} / 10,5\% = 953 \text{ mm}$.
O comprimento do músculo a ser pedido é de 953 mm.

Passo 6

Resultado

Para elevar 100 mm uma carga de 80 kg que se encontra antes da operação em repouso, um MAS-20-N953-AA-... é necessário.



- 1 0 bar
- 2 1 bar
- 3 2 bar
- 4 3 bar
- 5 4 bar
- 6 5 bar
- 7 6 bar

Novidade 

Nesse exemplo, o músculo deve ser utilizado como mola de tração. O diâmetro e o comprimento devem ser encontrados.

 **Importante**
Os limites especificados nos dados técnicos precisam ser observados na utilização do músculo.

Condições gerais	
Força necessária no estado normal	2000 N
Força necessária no estado contraído	1000 N
Curso	50 mm
Pressão de operação	2 bar

Passo 1
Definir o diâmetro do músculo
Definir o diâmetro do músculo apropriado, baseado na força máxima permitida. A força máxima admissível é 2000 N; portanto, um MAS-40-... deve ser selecionado.

Passo 2
Apontar ponto de carga 1
O ponto de carga 1 é apontado no diagrama pressão/força do MAS-40-....
Força F = 2000 N
Pressão p = 2 bar

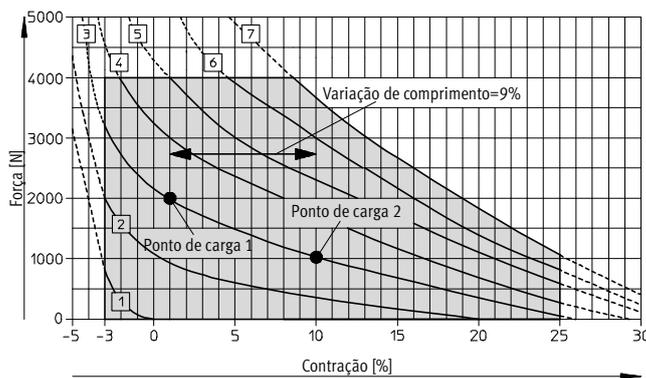
Passo 3
Apontar ponto de carga 2
O ponto de carga 2 é apontado no diagrama pressão/força.
Força F = 1000 N
Pressão p = 2 bar

Passo 4
Ler a mudança de comprimento
A mudança de comprimento do músculo é representada pela contração do músculo (em %).
Resultado:
9% contração.

Passo 5
Calcular o comprimento
Se o curso é de 50 mm, o comprimento do músculo é calculado dividindo o curso pela porcentagem de contração.
Resultado:
 $50 \text{ mm} / 9\% = 555 \text{ mm}$.
O comprimento do músculo a ser pedido é de 555 mm.

Passo 6
Resultado
Para a utilização como uma mola de tração com força de 2000 N e um curso de 50 mm, um MAS-40-N555-AA-... é necessário.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA



- 1 0 bar
- 2 1 bar
- 3 2 bar
- 4 3 bar
- 5 4 bar
- 6 5 bar
- 7 6 bar

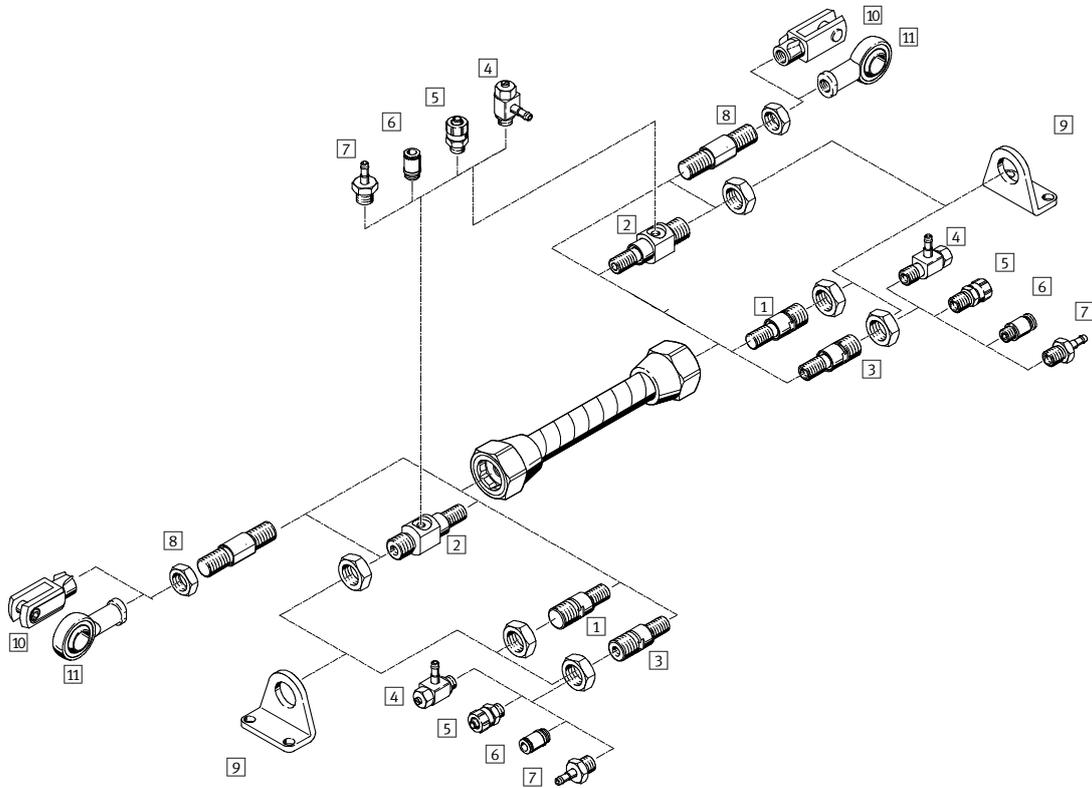
Músculo Pneumático

Exemplo de dimensionamento

Exemplos de dimensionamento para utilização do músculo como mola pneumática

Músculo Pneumático
Acessórios

 **Novidade**



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

Novidade

Músculo Pneumático

Acessórios

Adaptadores

- 1 Adaptador cego para conectar acessórios de cilindros e para vedar o músculo
página 18
- 2 Adaptador radial para conectar acessórios de cilindros e ponto de ar comprimido na direção radial.
página 18
- 3 Adaptador axial para conectar acessórios de cilindros e ponto de ar comprimido na direção axial.
página 18

Conexões para tubos

- 4 Válvula reguladora de fluxo GRLA
- 5 Conexão CK para tubos
- 6 Conexão rápida Quick Star para tubos
- 7 Espigão com rosca externa N para tubos

Acessórios de cilindros convencionais que podem ser utilizados no músculo

- 8 Barra roscada para conectar os acessórios de cilindros
página 18
- 9 Montagem por pés Tipo HBN
- 10 Garfo tipo SG e articulação esférica tipo SGS
- 11 Articulação esférica tipo SGS com suporte esférico

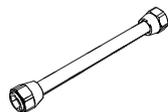
Componentes de montagem e adaptadores de conexão para o músculo

Músculo Pneumático

Visão geral da linha

 **Novidade**

Músculo completo



Comprimento [mm]	∅ - 10 mm	∅ - 20 mm	∅ - 40 mm
Aberto nos dois lados			
Aberto em um dos lados (força de compensação integrada no lado aberto)			
40 ... 4500 mm			
60 ... 4500 mm			
90 ... 4500 mm			
Dados técnicos página 17			

Conectores especiais do músculo



Tipo	Apropriado para músculos com conexão roscada		
	∅ - 10 mm	∅ - 20 mm	∅ - 40 mm
Adaptadores cegos			
MXAC-B10	M10x1.25	M10x1.25	
MXAC-B16		M16x1.5	M16x1.5
MXAC-B20			M20x1.5
Adaptadores axiais			
MXAC-A10	M10x1.25	M10x1.25	
MXAC-A16		M16x1.5	M16x1.5
MXAC-A20			M20x1.5
Adaptadores radiais			
MXAC-R10	M10x1.25		
MXAC-R16		M16x1.5	M16x1.5
MXAC-R20		M20x1.5	M20x1.5
Barras roscadas			
MXAD-T10	M10x1.25	M10x1.25	
MXAD-T16			M16x1.5
Dados técnicos MXA página 18			

Acessórios padrão

Espigão com rosca externa
Conexão
Conexão rápida Quick Star
Válvula reguladora de fluxo

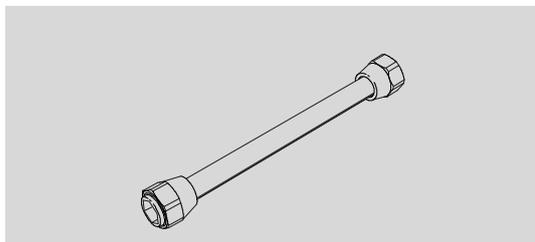
Montagem por pés
Articulação esférica
Garfo

Tipo	∅ - 10 mm	∅ - 20 mm	∅ - 40 mm
N			
CK			
QS			
GRLA			
HBN			
SGS			
SG			

Novidade

Músculo Pneumático

Dados técnicos



 Diâmetros
10, 20 e 40 mm

 Comprimento
40 ... 4500 mm
Cursos
0 ... 2250 mm

Dados técnicos	MAS-10-...	MAS-20-...	MAS-40-...	
Meio	Ar comprimido seco, com ou sem lubrificação (outro meio sob consulta)			
Execução	Membrana de contração, reforçada com fibra			
Pressão de operação max.	8 bar	6 bar		
Faixa de temperatura	+5 ... +60 °C			
Comprimento	min.	40 mm	60 mm	90 mm
	max.	4500 mm		
Força de elevação max.	400 N	1200 N	4000 N	
Carga útil, suspensa livremente max.	30 kg	60 kg	120 kg	
Contração (curso) max.	20% do comprimento		25% do comprimento	
Precisão de repetição	± 3% em relação ao comprimento			
Estiramento prévio máximo* max.	3% do comprimento			
Expansão do diâmetro**	Aproximadamente 25 mm a 8 bar	Aproximadamente 43 mm a 6 bar	Aproximadamente 79 mm a 6 bar	
	Histerese ± 5% em relação ao comprimento			
Desvios angulares max.	+/- 1°			
Desvios paralelos max.	2 mm por 100 mm de comprimento entre as conexões			
Peso no menor comprimento	0.086 kg	0.28 kg	0.87 kg	
Peso do músculo	0.09 kg/m	0.16 kg/m	0.36 kg/m	
Materiais	Flange: AL anodizado; St galvanizado; NBR.			
	Adesivo: Loctite 243. Sem silicone, sem CT.			

* O estiramento prévio máx. é obtido quando a carga útil suspensa livremente máxima é acoplada

** A expansão do diâmetro não pode ser utilizada para aperto.



Importante

Pressurizar os dois lados reduz significativamente a carga no componente, e aumenta o tempo de vida útil.

Vida útil

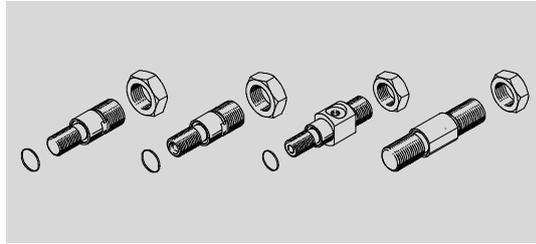
Músculo Pneumático

Dados técnicos

 **Novidade**

Adaptadores especiais para o músculo

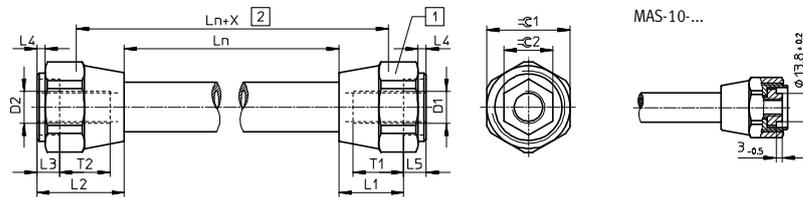
- Adaptadores cegos
- Adaptadores axiais
- Adaptadores radiais
- Barras roscadas



Tipo	Adequado para MAS... com conexão roscada	Conexão de ar comprimido	Peso [kg]	Materiais
Adaptadores cegos				Adaptador: alumínio; vedações: NBR
MXAC-B10	M10x1.25	-	0.017	
MXAC-B16	M16x1.5	-	0.042	
MXAC-B20	M20x1.5	-	0.231	
Adaptadores axiais				
MXAC-A10	M10x1.25	G $\frac{3}{8}$	0.013	
MXAC-A16	M16x1.5	G $\frac{1}{4}$	0.031	
MXAC-A20	M20x1.5	G $\frac{3}{8}$	0.206	
Adaptadores radiais				
MXAC-R10	M10x1.25	M5	0.025	
MXAC-R16	M16x1.5	G $\frac{3}{8}$	0.071	
MXAC-R20	M20x1.5	G $\frac{1}{4}$	0.381	
Barras roscadas				
MXAD-T10	M10x1.25	-	0.04	
MXAD-T16	M16x1.5	-	0.140	

Novidade 

Músculo Pneumático
Dimensões

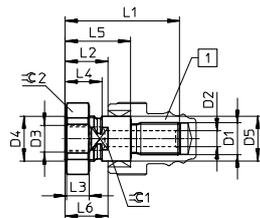


- 1 Limitação da força
- 2 Comprimento de um corte

Tipo	D1	D2	L1 ±1	L2 ±1	L3 ±0,3	L4	L5 ±0,4
MAS-10-N...-AA-MCFK	M10x1.25	M10x1.25	24.1	34.1	10	3.5 ±0.2	2.5
MAS-10-N...-AA-MOFK							
MAS-20-N...-AA-MCHK	M16x1.5	M16x1.25	31.5	42.5	11	3.5 ±0.2	5.5
MAS-20-N...-AA-MOHK							
MAS-20-N...-AA-MCGK		M10x1.25					
MAS-40-N...-AA-MCKK	M20x1.5	M20x1.5	42.5	55.5	13	3.5 ±0.3	6.5
MAS-40-N...-AA-MOKK							
MAS-40-N...-AA-MCIK		M16x1.5					

Tipo	Ln		T1 min.	T2 min.	X	ϕ1	ϕ2	
	min.	max.						
MAS-10-N...-AA-MCFK	40	4500*	15	15	40	27	17	
MAS-10-N...-AA-MOFK								
MAS-20-N...-AA-MCHK	60		24	24	50	41	24	
MAS-20-N...-AA-MOHK								
MAS-20-N...-AA-MCGK				15				
MAS-40-N...-AA-MCKK	120		30	30	70	60	41	
MAS-40-N...-AA-MOKK								
MAS-40-N...-AA-MCIK								24

* Tolerância acima de 100 mm: ±1, abaixo de 100 mm: 1%



- 1 Flange

Tipo	D1	D2	D3	D4	D5 h11	L1	L2*	L3	L4	L5	L6**	ϕ1	ϕ2
MXAC-A10	M10x1.25	5	G ¹ / ₈	M16x1.5	16	43.4	18.4	8	15.4	28.4	25.9	13	24
MXAC-A16	M16x1.5	8	G ¹ / ₄	M22x1.5	22	56	21	11	18	32	26.5	19	32
MXAC-A20	M20x1.5	10	G ³ / ₈	M45x1.5	45	82	39	10	35	52	45.5	41	∅60

* A dimensão L2 aplica-se a flange sem proteção de sobrecarga
** A dimensão L6 aplica-se a flange com proteção de sobrecarga

Adatador axial
MXAC-A...

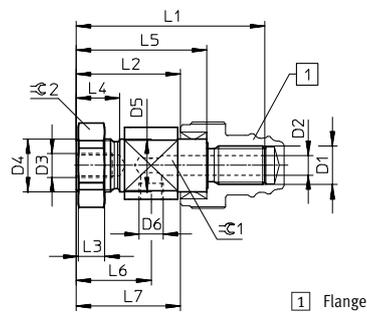
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

Músculo Pneumático

Dimensões

Novidade

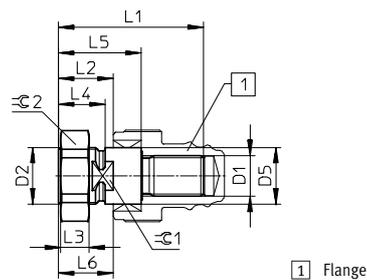
Adaptador radial MXAC-R...



1 Flange

Tipo	D1	D2	D3	D4	D5 h11	D6	L1	L2*	L3	L4	L5	L6**	L7	≈C1	≈C2
MXAC-R10	M10x1.25	3	M10x1.25	M16x1.25	16	M5	58	34	8	15.4	44	25.2	41.5	17	24
MXAC-R16	M16x1.5	8		M20x1.5	22	G ¹ / ₈	78	43	11	18	54	31	48.5	24	32
MXAC-R20	M20x1.5	10	M16x1.5	M45x1.5	45	G ¹ / ₄	112	69	10	35	82	53	75.5	50	∅60

Adaptador cego MXAC-B...



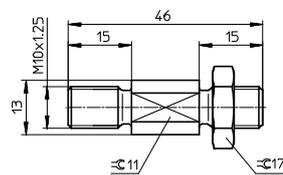
1 Flange

Tipo	D1	D2	D5 h11	L1	L2*	L3	L4	L5	L6**	≈C1	≈C2
MXAC-B10	M10x1.25	M16x1.25	16	43.4	18.4	8	15.4	28.4	25.9	13	24
MXAC-B16	M16x1.5	M20x1.5	22	56	21	11	18	32	26.5	19	32
MXAC-B20	M20x1.5	M45x1.5	45	82	39	10	35	52	45.5	41	∅60

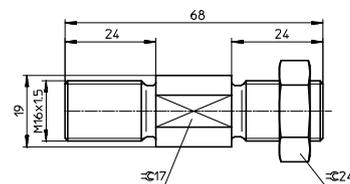
* A dimensão L2 aplica-se a flange sem proteção de sobrecarga
 ** A dimensão L6 aplica-se a flange com proteção de sobrecarga

Barra roscada

MXAD-T10



MXAD-T16



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

Novidade

Músculo Pneumático

Informações para pedido

Código	Tipo	Conexão roscada	Comprimento
Ø 10			
187 595	MAS-10-N...-AA-MOFK	M10x1.25	40 mm ≤ N ≤ 9000 mm
187 594	MAS-10-N...-AA-MCFK	M10x1.25	
Ø 20			
187 619	MAS-20-N...-AA-MOHK	M16x1.5	60 mm ≤ N ≤ 9000 mm
187 617	MAS-20-N...-AA-MCHK	M16x1.5	
187 618	MAS-20-N...-AA-MCGK	M10x1.25	
Ø 40			
187 607	MAS-40-N...-AA-MOKK	M20x1.5	90 mm ≤ N ≤ 9000 mm
187 605	MAS-40-N...-AA-MCKK	M20x1.5	
187 606	MAS-40-N...-AA-MCIK	M16x1.5	

Completo músculo pneumático



Código	Tipo	Adequado para MAS com conexão roscada
Adaptadores cegos		
187 591	MXAC-B10	M10x1.25
187 614	MXAC-B16	M16x1.5
187 602	MXAC-B20	M20x1.5
Adaptadores axiais		
187 592	MXAC-A10	M10x1.25
187 615	MXAC-A16	M16x1.5
187 603	MXAC-A20	M20x1.5
Adaptadores radiais		
187 593	MXAC-R10	M10x1.25
187 616	MXAC-R16	M16x1.5
187 604	MXAC-R20	M20x1.5

Acessórios



Código	Tipo	Adequado para MAS com conexão roscada
Barras roscadas		
187 597	MXAD-T10	M10x1.25
187 609	MXAD-T16	M16x1.5



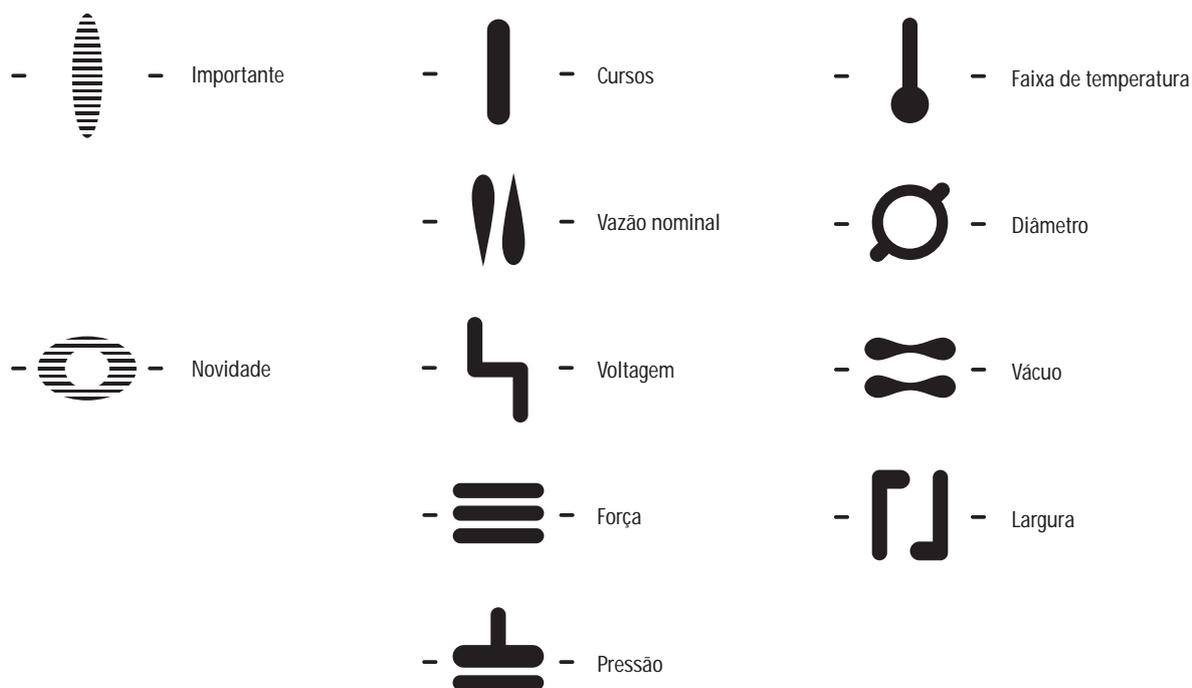
Alcançando muito mais – com seção transversal menor

Mais uma vez o futuro está a seu alcance. Portanto, estude detalhadamente os benefícios da tecnologia do músculo pneumático. Leve-os em consideração e use-os em proveito próprio, independente de qual departamento o produto pneumático será empregado.

O músculo pneumático trará uma pequena revolução no seu local de trabalho. Uma que você está ansioso para que aconteça.

	Benefícios para projetistas	Benefícios para compradores
1. Membrana de contração pré-montada ou por metro	<ul style="list-style-type: none"> – Três diâmetros diferentes e oito tipos de configuração – Dimensões adequadas e cursos X simples – Fácil substituição 	<ul style="list-style-type: none"> – Custos reduzidos graças ao projeto pronto de montagem
2. Excelente relação preço/performance	<ul style="list-style-type: none"> – Máxima flexibilidade graças ao comprimento variável e à ampla gama de acessórios – Volume reduzido – Sem características de slip-stick – Excelente para aplicações móveis, pois a membrana de contração pode ser transportada facilmente 	<ul style="list-style-type: none"> – Custos mínimos de estocagem graças ao volume reduzido da membrana enrolada de contração – Custos de follow-up mais baixos graças à excelente resistência ao envelhecimento – Praticamente sem desgaste mecânico
3. Confiabilidade de serviço e entrega	<ul style="list-style-type: none"> – Mais fácil de planejar graças ao software de dimensionamento – Consultoria técnica sobre aplicações – Fácil acesso através de e-mail 	<ul style="list-style-type: none"> – Otimização de custos através da disponibilidade rápida, global a partir da fábrica – Ampla gama de serviços prestados no local por consultores técnicos altamente capacitados

Alguns pictogramas pneumáticos



O que deve ser observado durante a utilização dos componentes Festo?

Uma condição básica para funcionarem corretamente é que o usuário garanta que os respectivos parâmetros para pressões, velocidades, massas, forças transversais, forças de acionamento, tensões, campos magnéticos e temperaturas sejam respeitados, além de observar as instruções de uso. No caso de componentes pneumáticos, deve ser observada a correta preparação do ar comprimido, para que este não contenha agentes agressivos.

Além disso, devem ser consideradas as condições ambientais do local de instalação. Na utilização de componentes Festo

em áreas sujeitas a restrições também devem ser respeitadas as respectivas normas de segurança das associações responsáveis pelo controle dessas áreas. As disposições da VDE (Associação Alemã dos Eletrotécnicos) e/ou as respectivas disposições do país sobre o uso de aparelhos elétricos devem ser cumpridas.

Todas as informações técnicas correspondem ao estágio tecnológico no momento da publicação. A organização de textos, tabelas, ilustrações e fotos deste catálogo de produtos são de criação da empresa Festo e, portanto, de sua propriedade

intelectual. Qualquer tipo de reprodução, revisão, tradução, microfilmagem, bem como armazenamento e processamento em sistemas eletrônicos só é permitido com autorização da Festo AG & Co.

Devido ao contínuo desenvolvimento tecnológico, reservamo-nos o direito de fazer qualquer alteração sem prévio aviso.

Versão: 10/2002

Código: 13021421

E/P Pressure control valves

E/P Pressure control valve, Series ED05
Proportional solenoid, analog link

180

Rexroth
Bosch Group



Technical Data

Type		Poppet valve
Supply pressure		see table
Output pressure		see table
Hysteresis		< 0.06 bar (<1 psi)
Nominal flow rate	Q_n	1000 l/min (1 Cv)
at supply pressure = 7 bar (102 psi), at output pressure = 6 bar (87 psi), and pressure drop $\Delta p = 0,2$ bar (3 psi)		
Ambient temperature range	min./max.	0 °C / +70 °C (+32 °F / +158 °F)
Medium		Condensate-free and non-lubricated compressed air, filtered 50 μ m
Weight		1,1 kg (2.425 lbs)
Materials	Body	Zn-diecasting, Al, POM, chromated steel (POM-Polyoxymethylene)
	Seals	NBR (Nitrile Butadiene Rubber)
Supply voltage		24 V DC \pm 20 %
Permissible ripple		5%
Current consumption	max.	1,3 A
Protection with plug		IP 55 to IEC 529 (DIN VDE 0470) IP 65 optional
Installation position		optional, if condensate-free and non lubricated compressed air is guaranteed, otherwise see drawing



Application area

Electro-pneumatic pressure control valves convert an electrical signal (current, voltage, resistance) proportionally into pneumatic pressure. They are used where electrical control required to act directly on a change of pressure or force.

Part no.

	Supply pressure* [bar] (psi)	Output pressure min./max. [bar] (psi)	Nominal input value	Actual output value	Part no.
	7 (102)	0 / 6 (0 / 87)	0 - 20 mA	0 - 20 mA	5610141300
	7 (102)	0 / 6 (0 / 87)	4 - 20 mA	4 - 20 mA	5610141310
	7 (102)	0 / 6 (0 / 87)	0 - 10 V or potentiometer	-	5610141320
	7 (102)	0 / 6 (0 / 87)	0 - 10 V	0 - 10 V	5610141330
	11 (160)	0 / 10 (0 / 145)	0 - 20 mA	0 - 20 mA	5610141500
	11 (160)	0 / 10 (0 / 145)	4 - 20 mA	4 - 20 mA	5610141510
	11 (160)	0 / 10 (0 / 145)	0 - 10 V or potentiometer	-	5610141520
	11 (160)	0 / 10 (0 / 145)	0 - 10 V	0 - 10 V	5610141530

min. supply pressure: 0,5 bar (7 psi)+ max. required output pressure

Accessories (to be ordered separately)

Accessory	Part no.	Type
Silencer G 1/4	5324011110	
Connector for plug 2	8946201602	with 5 m cable
Connector for plug 1	8946201612	with 5 m cable
Subbase single	5610141002	incl. screws and sealings
Subbase double	5610141012	incl. screws and sealings
Subbase triple	5610141022	incl. screws and sealings

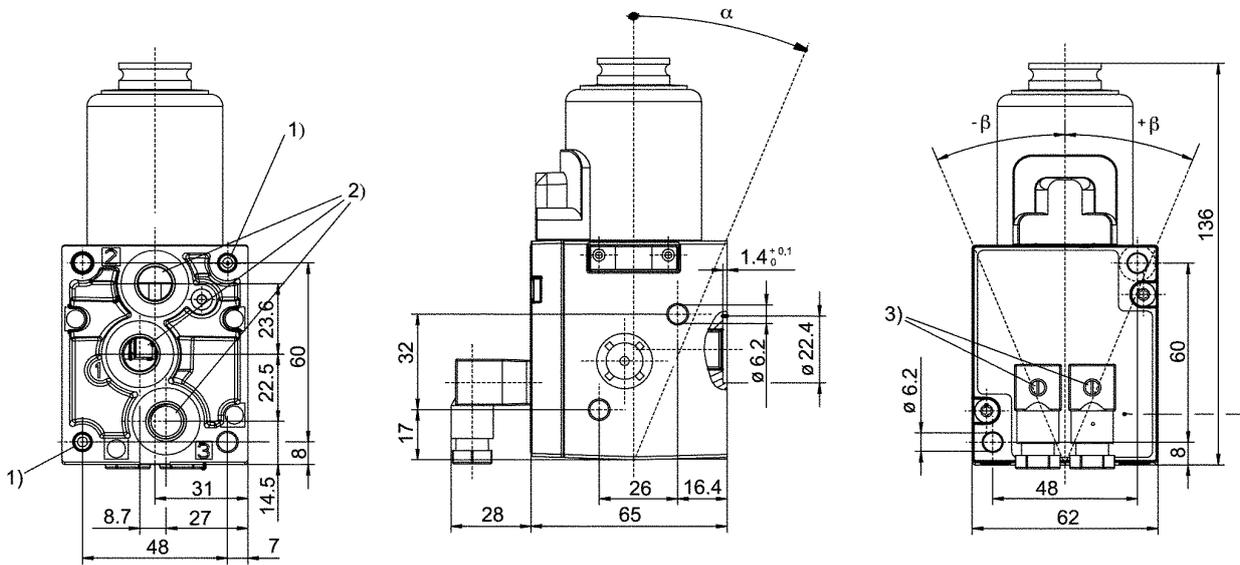
E/P Pressure control valves

E/P Pressure control valve, Series ED05
Proportional solenoid, analog link

181

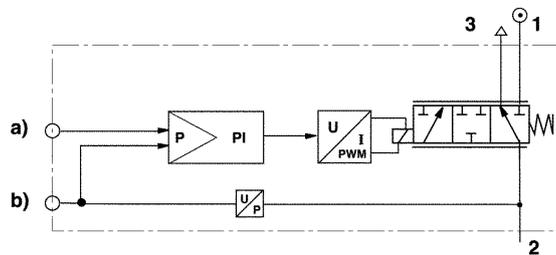
Rexroth
Bosch Group

Drawing



Core hole is deep for automatic ridge screws M6
Universal threaded connection, suitable for G1/4 to ISO 228/1 and 1/4-27 NPTF
El. connector can be fixed at 90° intervals
Setting position: Alpha = 0 ... 90°
± Beta = 0 ... 90°

Functional diagram



a) Nominal input value. b) Actual output value.

The E/P pressure control valve modulates the pressure corresponding to an analogue electrical nominal input value. The integrated electronics make a comparison between the nominal input value and the pressure in the output line (actual value), which is measured by a piezo-resistive pressure sensor. The controller generates a setting, which is controlled by a voltage/current converter and a proportional solenoid, in order to obtain the required pressure.

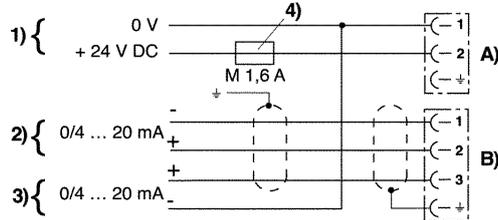
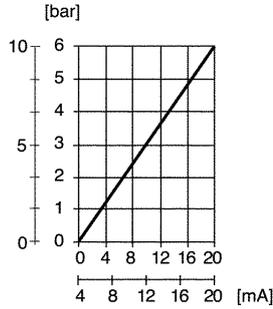
E/P Pressure control valves

E/P Pressure control valve, Series ED05
Proportional solenoid, analog link

182

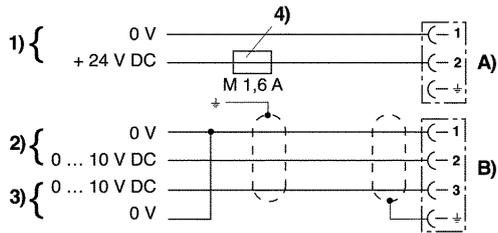
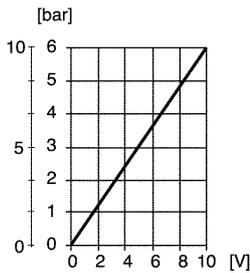
Rexroth
Bosch Group

Characteristic and pin assignment for current control with actual output value (5610141300, 5610141310, 5610141500 and 5610141510)



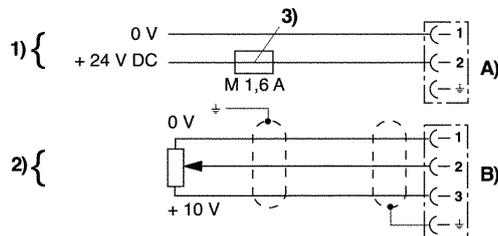
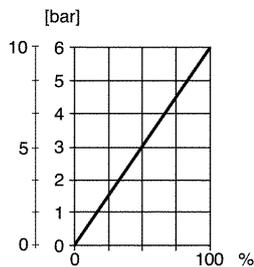
- 1) Supply voltage 2) Nominal input value current (Ohmic load 100 Ω max. 50 mA; max. 12 V; to plug 1; pin 1)
 3) Actual output value (Max. total resistance of downstream devices < 300 Ω)
 The actual value is measured between plug 2, pin 3 and plug 1, pin 1)
 4) The supply voltage must be protected by an external M 1,6 A fuse. Shielding must comply with local limiting conditions. In extreme cases the power supply must also be shielded.
 A) Plug 1 B) Plug 2

Characteristic and pin assignment for voltage control with actual output value (5610141330 and 5610141530)



- 1) Supply voltage. 2) Nominal Input value voltage. 3) Actual output value.
 The supply voltage must be protected by an external M 1,6 A fuse.
 Shielding must comply with local limiting conditions. In extreme cases the power supply must also be shielded. A) Plug 1 B) Plug 2

Characteristic and pin assignment for potentiometer control without actual output value (5610141320 and 5610141520)



- 1) Supply voltage 2) Potentiometer control (0 ... 2 kΩ min., 0 ... 10 kΩ max.) 3) The supply voltage must be protected by an external M 1,6 A fuse. 4) Shielding must comply with local limiting conditions. In extreme cases the power supply must also be shielded.
 A) Plug 1 B) Plug 2

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

SCHULZ

■ Requer - CSI 7,4/50



- Modelo: **CSI 7,4/50**
- Linha: **Professional Leve "Twister Bravo"**

SCHULZ

Compressores

MODELO		CSI 7,4/50
Deslocamento Teórico		5,4 pés ³ /min - 153 l/min
Larg x Alt x Comp		380 x 680 x 730 mm
Motor	Potência	1,5 hp - 1,12 kW
	Nº de Polos	2
Peso Líquido		39 kg
Pressão de Operação	Mínima	100 lbf/pol ² / 6,9 bar
	Máxima	140 lbf/pol ² / 9,7 bar
RPM		2275
Unidade Compressora	Nº de Estágios	1
	Nº de Pistões	1
Volume de Óleo		90 ml
Volume do Reservatório		46 l

Aplicação

Sítios, Chácaras e Casas de Campo
Prestadores de Serviços

Características

Lubrificado
Unidade compressora em ferro fundido
Pistão
Monofásico bivolt 110/220V - 60HZ e 220V/50HZ
Acionamento por correia

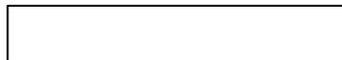
Equipado com

Relé térmico de proteção
Chave seletora bivolt (110/220V)
Reservatório fabricado de acordo com a norma NR13
Rodas e alça de transporte
Regulador de pressão de saída
Cabo elétrico e plug com aterramento

Manutenção

Vide manual que acompanha o produto

Servo To Go, Inc.



**ISA Bus Servo I/O Card
Model 2 Hardware Manual**



**Motion Control for 2, 4, 6, or 8 Servo Motors,
Plus 32 Bits of Digital I/O, 8 Channels of Analog Input
and Timer/Interrupt Generator**

Servo To Go, Inc.

Phone: 317-257-1655

Fax: 317-251-3958

E-mail: servotogo@msn.com

Internet world wide web URL: <http://www.servotogo.com>

8117 Groton Ln. Indianapolis, IN 46260-2821

Summary

The hardware described in this manual is a low cost, general purpose, motion control input/output board which can control up to eight motors simultaneously from an ISA-bus based computer such as an IBM compatible PC. The following is a summary of the hardware functionality:

- **Encoder Input**
 - Up to 8 channels of encoder input
 - A, B, and I (sometimes called 'marker') input
 - 24 bit counters
 - Single-ended or differential (RS422 compatible) input signals
- **Analog Output**
 - Up to 8 channels of analog output
 - + 10 V to - 10 V span.
 - 13 bit resolution
- **Digital Input and Output**
 - 32 bits, configurable in various input and output combinations
 - Opto-22 compatible
- **Analog Input**
 - 8 channels of analog input
 - 13 bit resolution
 - Configurable as +/-10V or +/-5V spans.
- **Interval Timers**
 - Capable of interrupting the PC
 - Timer interval is programmable to 10 minutes in 25 microsecond increments
- **Battery Backup Input**
 - Used to maintain encoder counting capability in event of a power failure.
- **Watchdog Timer**



Sample applications include:

- Robotics
- Machine tools
- Motion picture camera control
- Specialty machine control
- Controls design education
- Automated test equipment
- Medical instrumentation
- Virtual reality “rides”

Although the board is typically used to perform servo motor control, it can also be used for specialized I/O. For example, in encoder position monitoring or any other application where encoder input as well as analog and digital I/O are required.

The board is simply and efficiently accessed by the use of a set of registers located in the I/O space of the PC. Connection to the outside is accomplished through four 50-pin connectors.

Kanaflex®

KPUC **KPUZ**

Mangueiras KPU em Poliuretano Para Sucção de Abrasivos e Resíduos Industriais



Apresentamos as duas novidades mais resistentes e flexíveis do mercado: KPU-C e KPU-Z, as melhores soluções para sucção de resíduos de madeira, metal, vidro, tecido e outros materiais abrasivos.

KPUC

Mangueira em Poliuretano reforçada com aço cobreado folheado espiral. Superfície interior lisa. Com consideráveis características mecânicas, muito leve e ótima flexibilidade. Permite uma alta resistência à abrasão e à flexão devido às características do Poliuretano, que são 5 vezes superiores em relação ao PVC. Boa resistência aos agentes atmosféricos e a uma vasta gama de produtos químicos.

Aplicações: Sucção e condução de pós-abrasivos, fuligens, aparas, cavaco de madeira, vapores ou em qualquer outra aplicação em que haja elevada abrasão.



DIÂMETRO NOMINAL		PESO	ESPESSURA MIN.	ESPESSURA MAX.	RAIO DE CURVATURA	VÁCUO	LANCE	VOLUME
mm	pol.	g/m	mm	mm	mm	m H ₂ O	m	m ³
40		200	0.4	1.8	32	2.0	20	0.083
45		225	0.4	1.8	36	2.0	20	0.100
51	2"	250	0.4	1.8	40	2.0	20	0.115
60		300	0.4	1.8	50	1.7	20	0.150
63		310	0.4	1.8	55	1.7	20	0.160

70		475	0.5	2.3	60	1.7	20	0.187
76	3"	510	0.5	2.3	65	1.7	20	0.230
80		540	0.5	2.3	65	1.6	20	0.260
90	3 1/2"	610	0.5	2.3	75	1.6	20	0.350
102	4"	650	0.5	2.4	85	1.3	15	0.290
110		690	0.5	2.4	90	1.2	15	0.310
120		760	0.5	2.4	100	1.0	15	0.345
127	5"	850	0.5	2.6	105	1.0	15	0.370
130		880	0.5	2.6	105	0.8	15	0.430
140		960	0.6	2.7	115	0.8	15	0.480
152	6"	1040	0.6	2.7	125	0.8	15	0.550
160		1150	0.6	2.7	130	0.7	15	0.660
180		1450	0.6	2.9	150	0.5	15	0.745
203	8"	1650	0.6	2.9	165	0.4	15	0.950
228	9"	1900	0.6	2.9	185	0.4	15	0.950
254	10"	2150	0.6	3.2	210	0.4	15	1.170
279	11"	2400	0.6	3.2	230	0.4	10	1.400
305	12"	2650	0.6	3.2	250	0.3	10	1.600
356	14"	3050	0.6	3.2	300	0.3	*	-
406	16"	3500	0.6	3.2	350	0.3	*	-



Mangueira em Poliuretano reforçada com aço zincado folheado espiral. Superfície interior semi-lisa. Com consideráveis características mecânicas, muito leve e ótima flexibilidade. Permite uma alta resistência à abrasão e à flexão devido às características do Poliuretano, que são 5 vezes superiores em relação ao PVC. Boa resistência aos agentes atmosféricos e a uma vasta gama de produtos químicos.

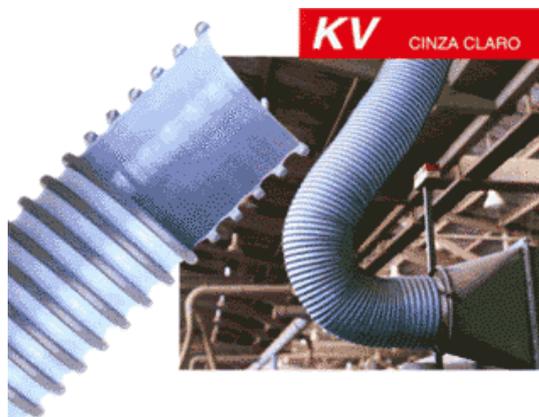
Aplicações: Sucção e condução de pós-abrasivos, fuligens, aparas, cavaco de madeira, vapores ou em qualquer outra aplicação em que haja elevada abrasão.



DIÂMETRO NOMINAL		PESO	ESPESSURA MIN.	ESPESSURA MAX.	RAIO DE CURVATURA	VÁCUO	LANCE	VOLUME
mm	pol.	g/m	mm	mm	mm	m H ₂ O	m	m ³
60		275	0,35	1,9	30	0,40	20	0,150
70		360	0,35	1,9	35	0,40	20	0,187
76	3"	390	0,35	1,9	38	0,40	20	0,230
80		410	0,35	1,9	40	0,40	20	0,260
90	3 1/2"	440	0,40	2,1	45	0,40	20	0,350
100		515	0,40	2,4	50	0,30	15	0,290
110		560	0,40	2,4	55	0,30	15	0,310
120		615	0,40	2,4	60	0,25	15	0,345
127	5"	645	0,40	2,4	64	0,25	15	0,370
130		665	0,40	2,4	65	0,20	15	0,430
140		710	0,40	2,4	70	0,20	15	0,480
150		765	0,40	2,4	75	0,20	15	0,540
160		880	0,45	2,7	80	0,15	15	0,660
180		990	0,45	2,7	90	0,15	15	0,745
200		1100	0,45	2,7	100	0,10	15	0,930
250		1300	0,50	2,8	125	0,10	10	1,160
300		1550	0,50	2,8	150	0,08	10	1,580
350		1820	0,50	2,8	175	0,07	-	-
400		2070	0,50	2,8	200	0,06	-	-

5.9 KV - Vácuo Ar Leve

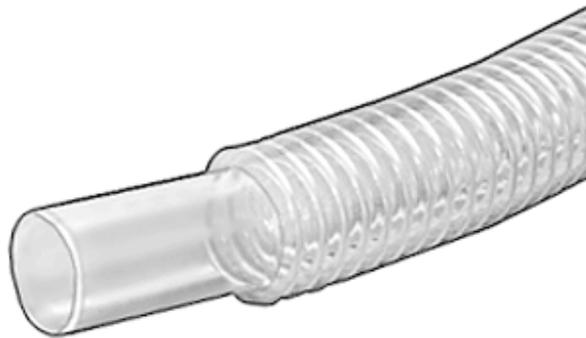
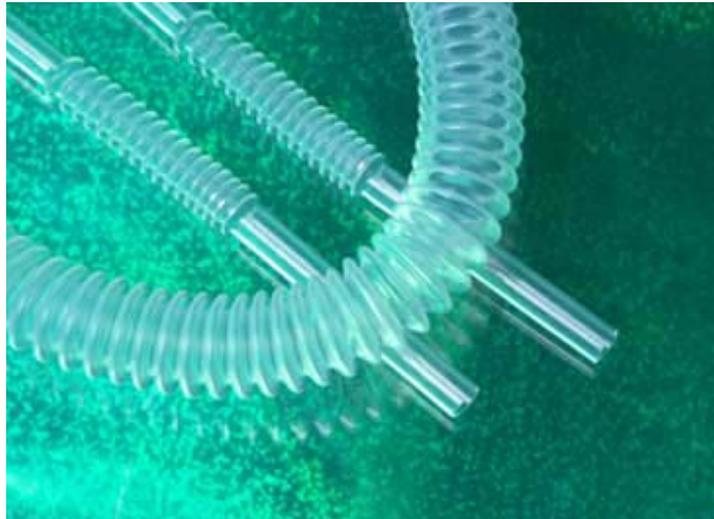
Indicada para ventilação industrial, exaustores industriais, coletores de pó, ar condicionado para escritórios, coifas de exaustão, etc.



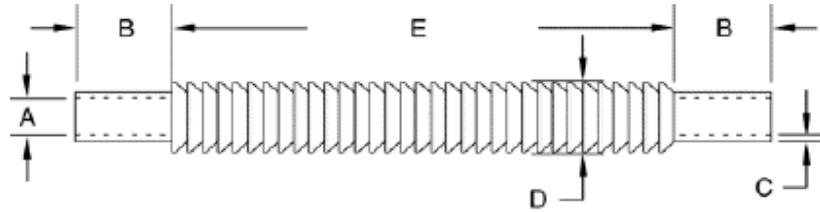
Bitola Diâmetro nominal		Diâmetro Externo	Diâmetro Interno	Pressão 25 °C	Vácuo 25 °C	Raio de Curvatura (mínimo)		Lance
pol	mm	mm	mm	Ruptura mínima kg/cm2 - lb/pol2	mm/Hg	Transporte 25°C - mm	Trabalho 25°C - mm	m
1	25	31.5	25.0	-	400	20	40	25/50
1.1/4	32	38.5	31.5	-	400	35	70	25/50
1.1/2	38	45.5	38.0	-	400	45	90	25/50
1.3/4	45	52.5	44.5	-	400	50	100	25/50
2	50	59.4	50.0	-	400	50	100	25/50
2.1/2	65	72.0	62.5	-	350	65	130	25/50
2.3/4	70	80.0	70.0	-	350	70	140	25/50
3	75	85.0	75.0	-	350	80	160	25/50
4	100	113.0	101.2	-	300	90	180	25/50
5	125	140.0	127.0	-	250	105	210	15/30
6	150	163.5	149.0	-	220	125	250	15/30
8	200	219.5	204.0	-	120	170	340	15/30
10	250	267.2	254.0	-	120	300	600	10
12	300	319.0	303.0	-	100	350	700	10



TEXfluor® Fluoroplastic FEP or PFA Corrugated Tubing



Tex-Flex" is manufactured
from virgin TEXfluor® FEP or PFA
and is non contaminating.



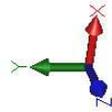
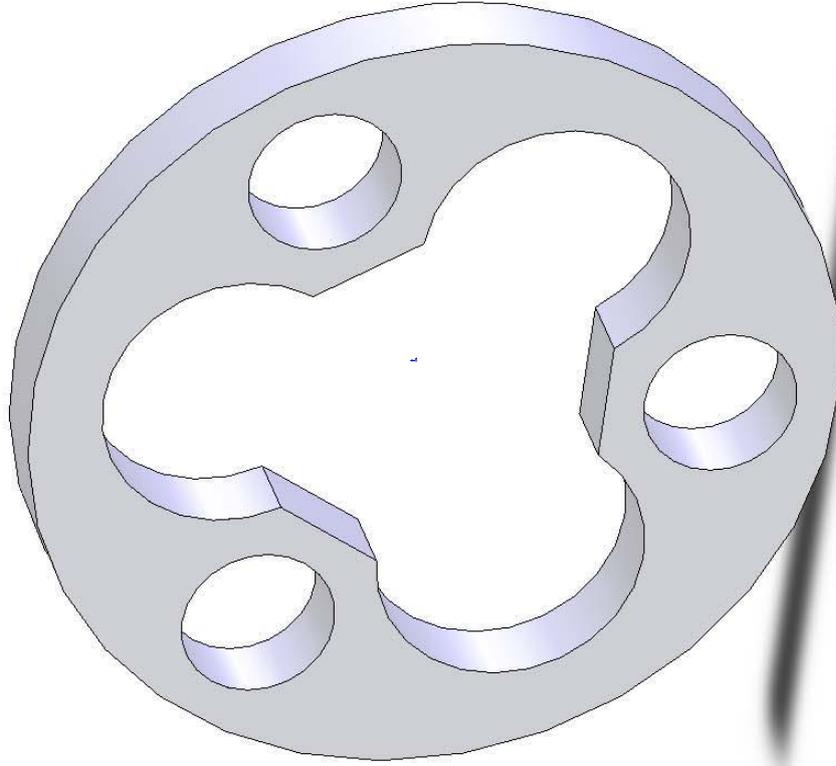
FEP NATURAL "TEX-FLEX" CORRUGATED TUBES

SIZE I.D.	A		*B		C		D		**E	MINIMUM BEND DIAMETER		UNBRAIDED BURST PRESSURE	
	MAX I.D.		CUFF LENGTH		WALL THICKNESS		O.D. DIAMETER (REFERENCE)			INCH	MM	PSI	BAR
INCH	INCH	MM	INCH	MM	INCH	MM	INCH	MM		INCH	MM	PSI	BAR
1/4	.250	6.35	3/4	19.1	.015	.381	.375	9.53		.125	3.18	250	17.23
3/8	.375	9.53	1	25.4	.020	.508	.562	14.3		.187	4.76	200	13.78
1/2	.500	12.7	1	25.4	.025	.635	.750	19.1		.250	6.35	170	11.71
5/8	.625	15.9	1	25.4	.025	.635	.937	23.8		.312	7.94	150	10.34
3/4	.750	19.1	1-1/2	38.1	.030	.762	1.063	27.0		.375	9.53	120	8.27
7/8	.875	22.2	1-1/2	38.1	.030	.762	1.250	31.8		.438	11.1	100	6.89
1	1.000	25.4	2	50.8	.035	.889	1.375	34.9		.500	12.7	80	5.51
1-1/4	1.250	31.8	2	50.8	.035	.889	1.625	41.3		.625	15.9	70	4.82
1-1/2	1.500	38.1	2	50.8	.035	.889	1.812	46.0		.750	19.1	60	4.13
2	2.000	50.8	2	50.8	.040	1.02	2.625	66.7		1	25.4	50	3.46
NEW....NEW....NEW....NEW....NEW....NEW													
2-1/2	2.500	63.5	2-1/2	63.5	.070	1.78	3.360	85.3		2.50	63.5	75	5.17

*Corrugated tubing is supplied with the detailed "B" cuff dimensions. Custom cuff lengths and bulk tubing are also available.

** To be specified at time of order.

Maximum length 12 feet / 3.5 meters



PUC-Rio

Espaçador

19/12/05

Felipe Scofano

(1/2")
12,70

polegadas

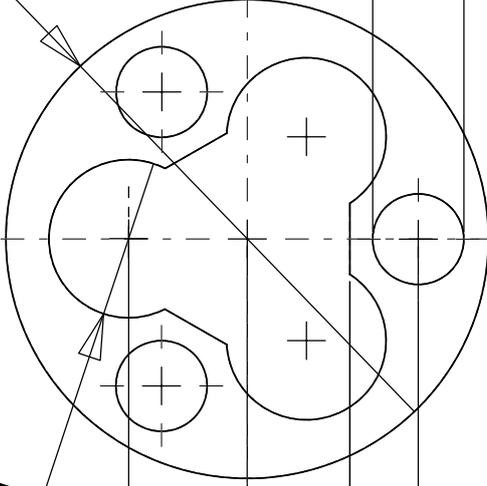
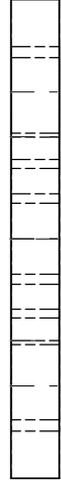
63,50 (2,5")
polegadas

Ø 21

13,50
15,62

9

Ø 12



ZONE	REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

Dimensões em mm

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

DIMENSIONS ARE IN INCHES		NAME	DATE
TOLERANCES:			
FRACTIONAL: ±		DRAWN	
ANGULAR: MACH ±	BEND ±	CHECKED	
TWO PLACE DECIMAL ±		ENG APPR.	
THREE PLACE DECIMAL ±		MFG APPR.	
MATERIAL	--	Q.A.	
FINISH	--	COMMENTS:	
NEXT ASSY	USED ON		
APPLICATION			
DO NOT SCALE DRAWING			

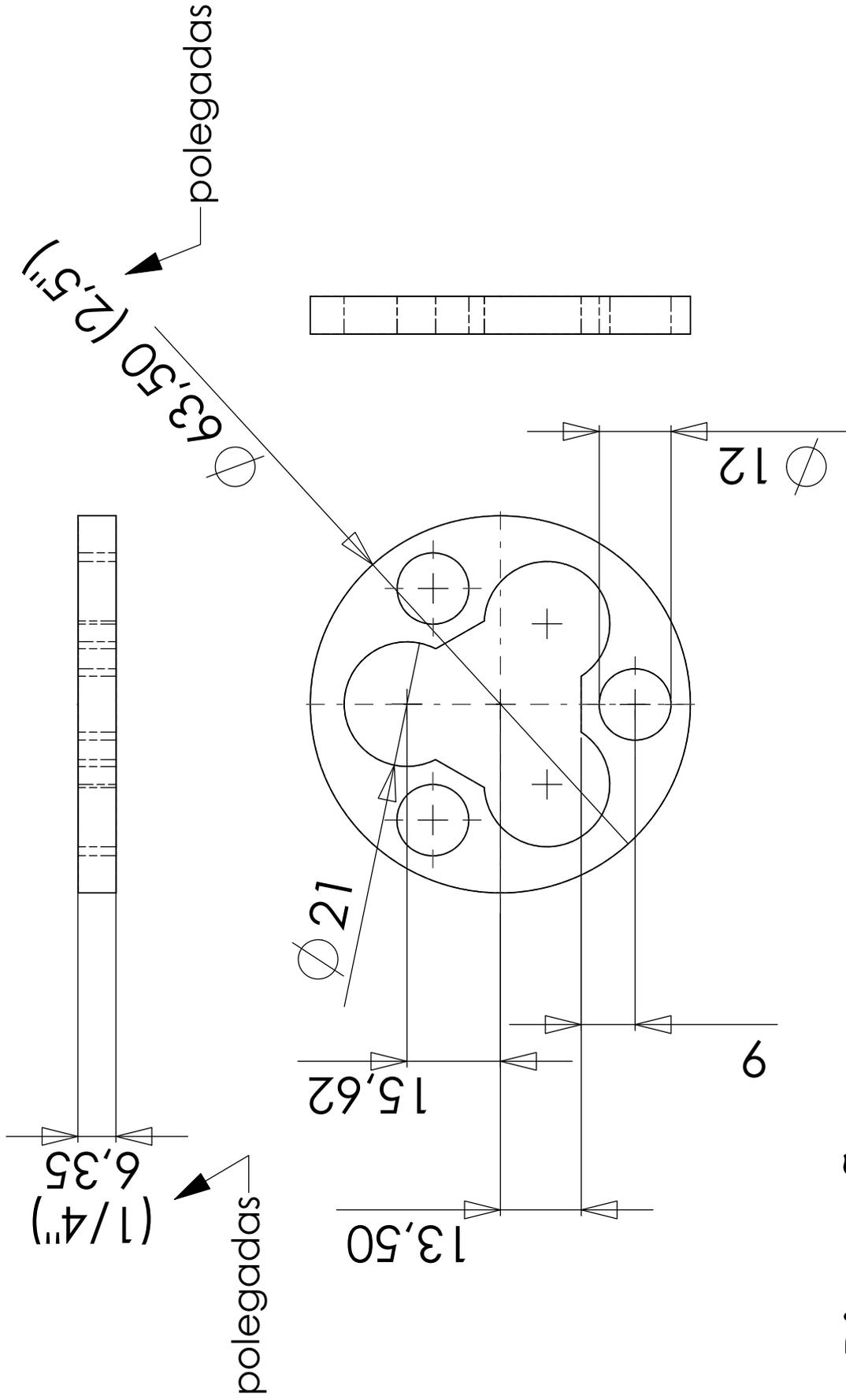
<COMPANY NAME>

PUC-Rio

espaçador flexível
19/12/05

SIZE DWG. NO. **A** Felipe Scofano
REV. SHEET 1 OF 1
WEIGHT:

ZONE	REV.	REVISIONS DESCRIPTION	DATE	APPROVED



Dimensões em mm

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

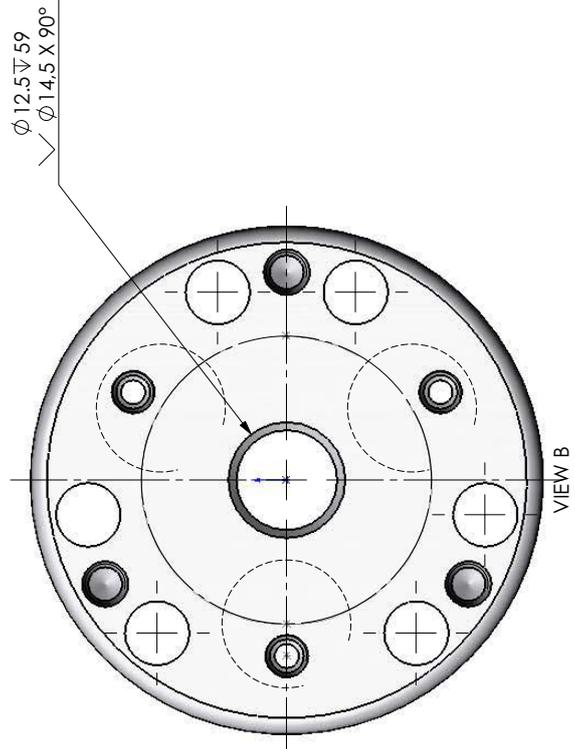
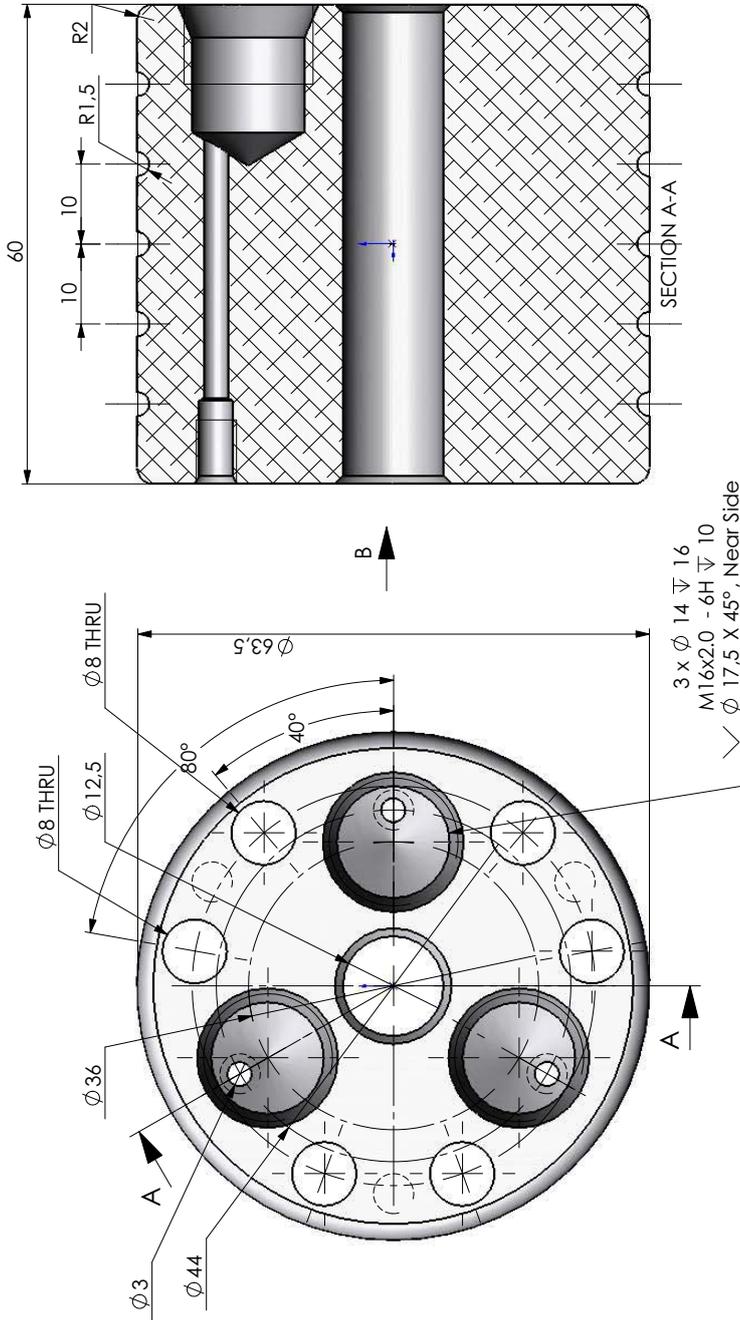
DIMENSIONS ARE IN INCHES		NAME	DATE
TOLERANCES:			
FRACTIONAL ±		DRAWN	
ANGULAR: MACH ±	BEND ±	CHECKED	
TWO PLACE DECIMAL ±		ENG APPR.	
THREE PLACE DECIMAL ±		MFG APPR.	
MATERIAL	--	Q.A.	
FINISH	--	COMMENTS:	
NEXT ASSY	USED ON		
APPLICATION			
DO NOT SCALE DRAWING			

<COMPANY NAME>

PUC-Rio

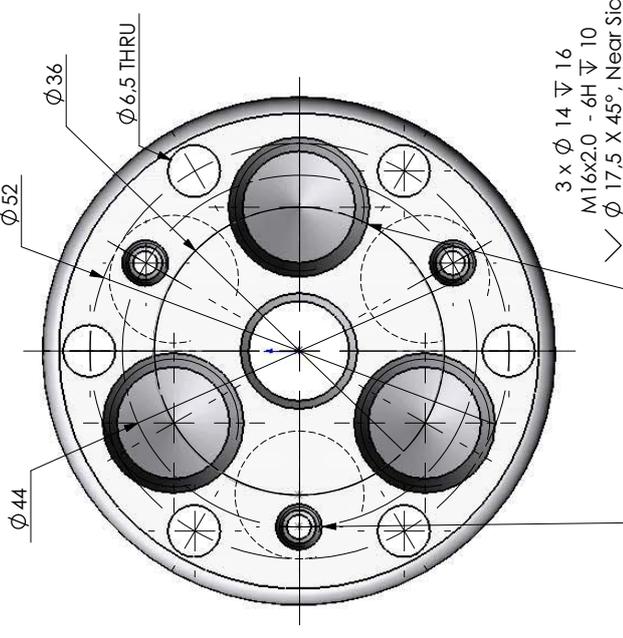
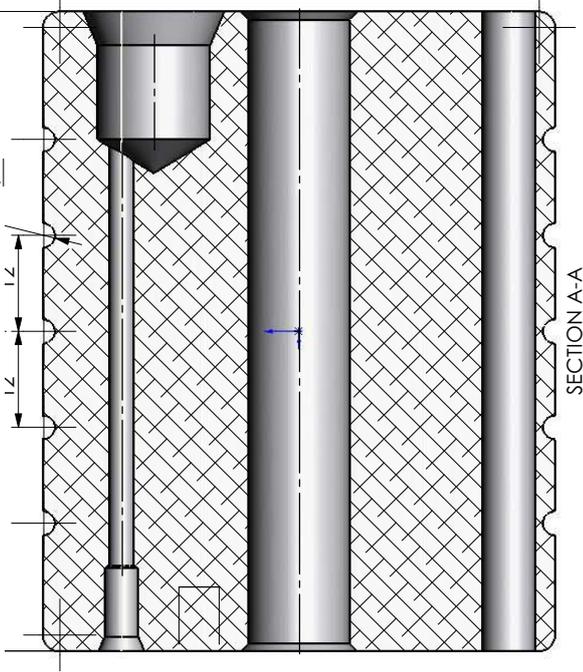
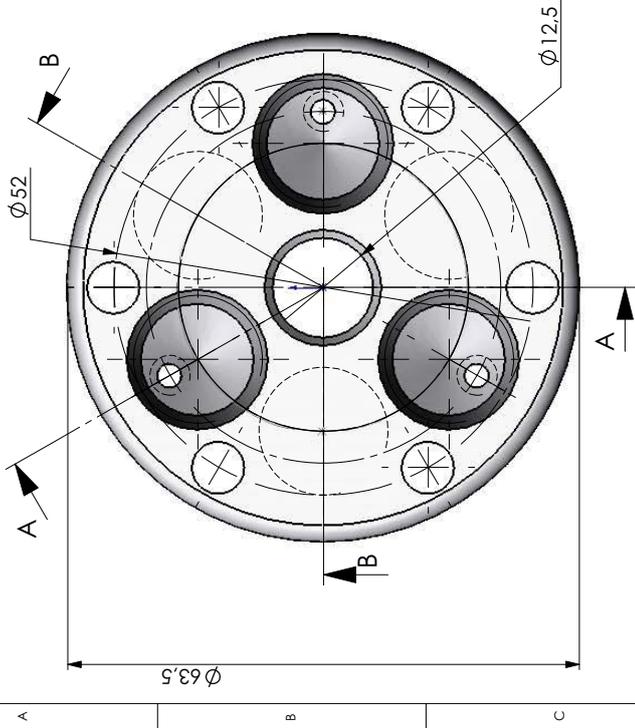
espaçador 19/12/05
 rígido

SIZE DWG. NO. **A** Felipe Scofano
 REV. SHEET 1 OF 1
 WEIGHT:



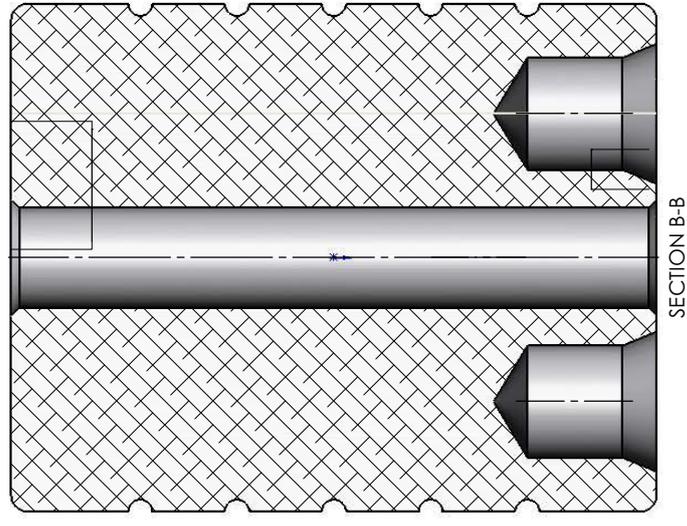
REV.	0	RODRIGO	RODRIGO	SCOFANO	406.50		
		EXEC.	VERIF.	APROV.	PESO.		
1		ASTM 6351-T6				ASTM 6351-T4	
QUANT.		DESCRIÇÃO		MATERIAL			
ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE PUC-RJ/MEC. E NÃO PODE SER REPRODUZIDO OU USADO PARA QUALQUER FINALIDADE DIFERENTE DAQUELA PARA QUAL ESTÁ SENDO FORNECIDO.							
Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: +/- 0,05mm Circulares: +/- 0,1mm Angulares: +/- 1° Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinos: 0,5mm x 45° Adoçar: r 0,5mm Rmax: 3,2µmm							
PUC-RJ/MEC							
CLIENTE OU USUÁRIO SOLICITANTE PUC-RJ/MEC							
PROGRAMA OU PROJETO DIMENSÕES DA PEÇA							
ÁREA OU UNIDADE SOLICITANTE PUC-RJ/MEC							
TÍTULO PROTOTIPO COBRA BASE CONECTORA PRIM_M5							
PROJ.	RODRIGO	DES.	RODRIGO	POS. 0			
APROV.	SCOFANO	FORM.	A 3	POS. 0			
DATA	7/3/2006	ESCALA	1:5:1	FOLHA	01 de 1		
Nº	BASE CONECTORA PRIM_M5					REV.	0

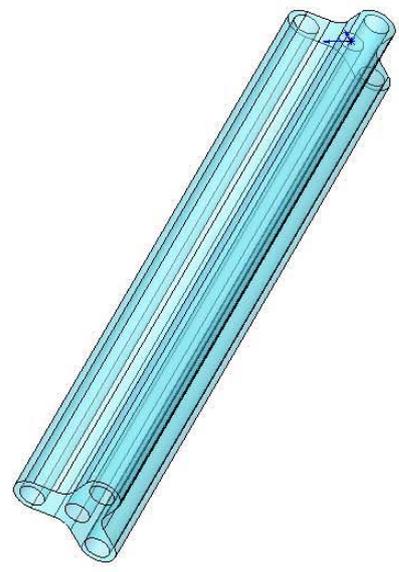
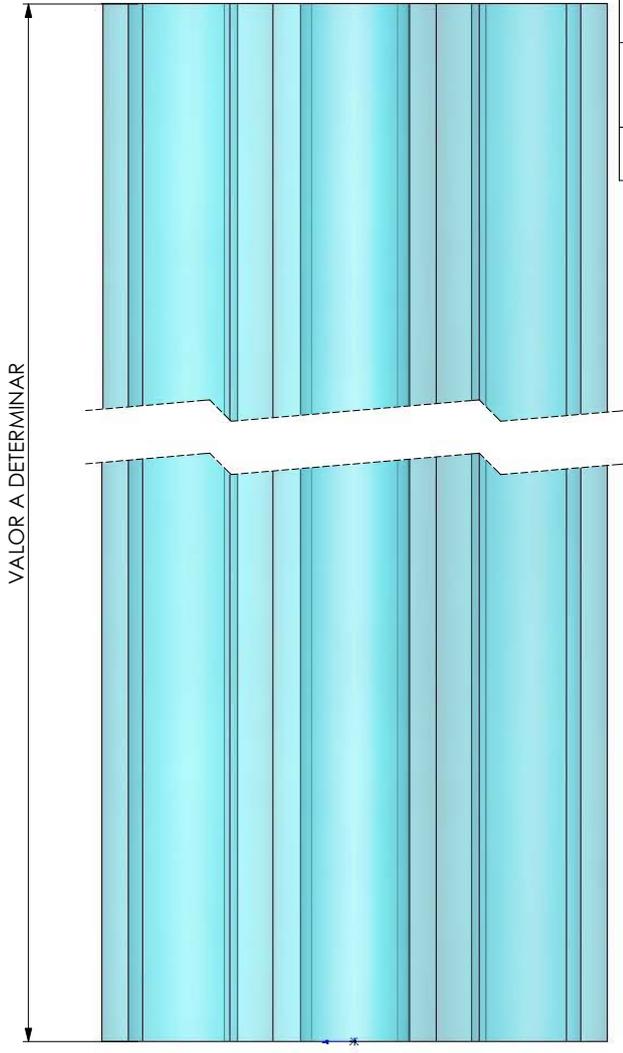
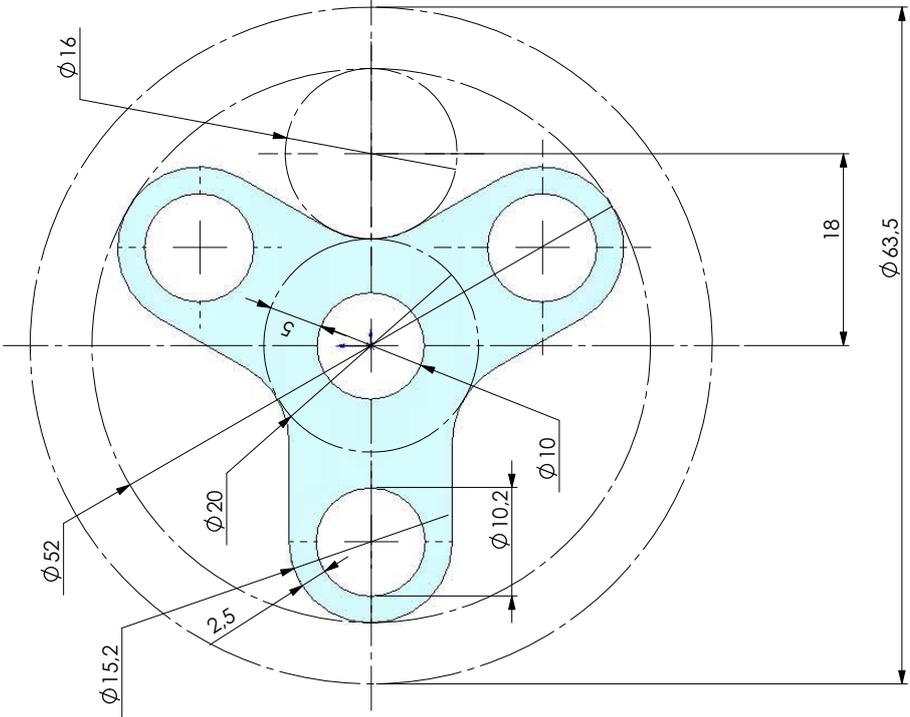
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA



$3 \times \phi 4,2 \sqrt{10,4}$
 $M5 \times 0,8 - 6H \sqrt{8}$
 $\phi 5,7 \times 45^\circ$, Near Side

REV.	0	RODRIGO	RODRIGO	SCOFANO	553.72
REV.	1	EXEC.	VERIF.	APROV.	PISO.
QUANT.	ASTM 6351-T6				
DESCRIÇÃO	ASTM 6351-T4				
MATERIAL					
ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE PUC-RJ/MEC. E NÃO PODE SER REPRODUZIDO OU USADO PARA QUALQUER FINALIDADE DIFERENTE DAQUELA PARA QUAL ESTÁ SENDO FORNECIDO.					
Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: $\pm 0,05$ mm Circulares: $\pm 0,1$ mm Angulares: $\pm 1^\circ$ Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinos: $0,5$ mm x 45° A doçar: $\pm 0,5$ mm Rmax: $3,2$ um					
CLIENTE OU USUÁRIO	PUC-RJ/MEC				
PROGRAMA OU PROJETO	SOLICITANTE PUC-RJ/MEC				
ÁREA OU UNIDADE	DIMENSÕES DA PEÇA				
TÍTULO	SOLICITANTE PUC-RJ/MEC				
PROTOTIPO COBRA					
BASE CONECTORA_SEC_M5					
PROJ.	RODRIGO	DES.	RODRIGO	POS.	0
APROV.	SCOFANO	FORM.	A 3	ESCALA	1:5:1
DATA	7/3/2006	FOLHA	01	REV.	de 1
Nº	BASE CONECTORA_SEC_M5				

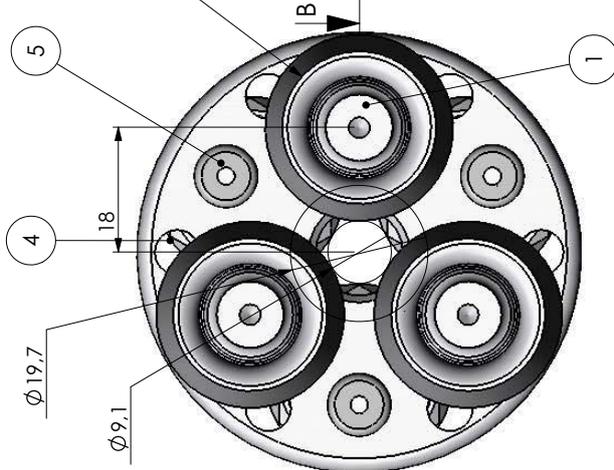
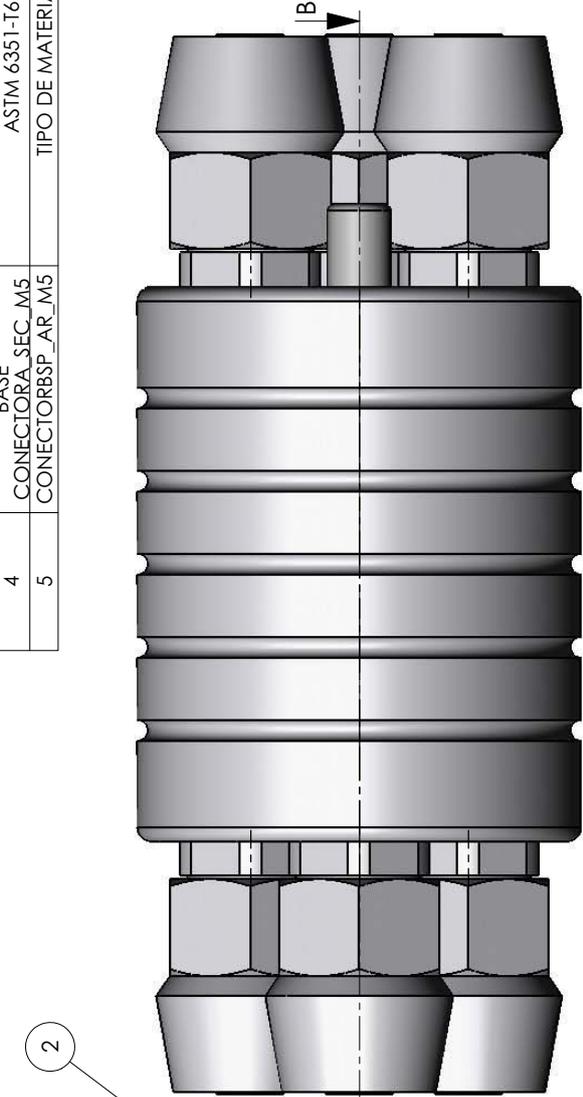
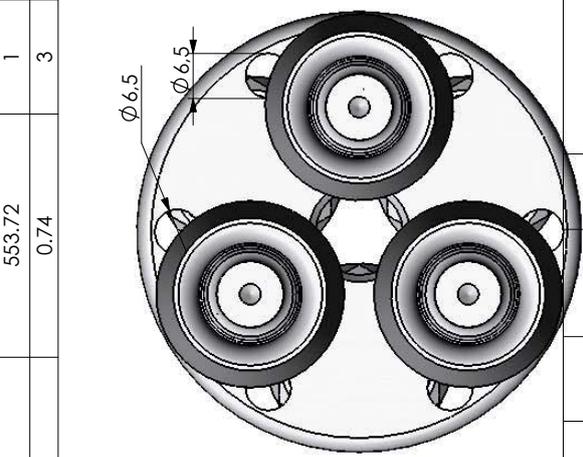




REV.	0	RODRIGO	RODRIGO	SCOFANO	404.64
REV.	1	EXEC.	VERIF.	APROV.	PESO.
QUANT.	SILICONE-20SHORE-A-2.5 mm DE ESP				
DESCR. DO DOCUMENTO	ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE PUC/RJ/MEC. E NÃO PODE SER REPRODUZIDO OU USADO PARA QUALQUER FINALIDADE DIFERENTE DAQUELA PARA QUAL ESTÁ SENDO FORNECIDO.				
DESCR. DO MATERIAL	MATERIAL				
Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: +/- 0.05mm Circulares: +/- 0.1mm Angulares: +/- 1° Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinos: 0.5mm x 45° Adoçar: r 0.5mm Rmax: 3.2µmm					
PUC-RJ/MEC					
CLIENTE OU USUÁRIO					
SOLICITANTE					
PROGRAMA OU PROJETO					
DIMENSÕES DA PEÇA					
ÁREA OU UNIDADE					
SOLICITANTE					
TÍTULO					
COBRA					
ESPAÇADOR DE SILICONE					
PROJ.	RODRIGO	DES.	RODRIGO	POS. 0	
APROV.	SCOFANO	FORM.	A 3	FOLHA 01 de 1	
DATA	7/3/2006	ESCALA	2:1	REV. 0	
Nº	ESPAÇADOR DE SILICONE				

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA

QTY.	WEIGHT	DESCRIPTION	JUMBER
6	27.49	ASTM 6351-T6	BR_LISO_VER3
6	18.48	TIPO DE MATERIAL	1 CONECTOR ENTRADOR
1	553.72	SILICONE-20SHORE-A-2.5 mm DE ESP	3 ESPACADOR DE SILICONE
1	0.74	ASTM 6351-T6	4 BASE CONECTORA_SEC_M5
3		TIPO DE MATERIAL	5 CONECTORBSP_AR_M5



REV.	RODRIGO	SCOFANO	ERROR:Weight
0			
1			

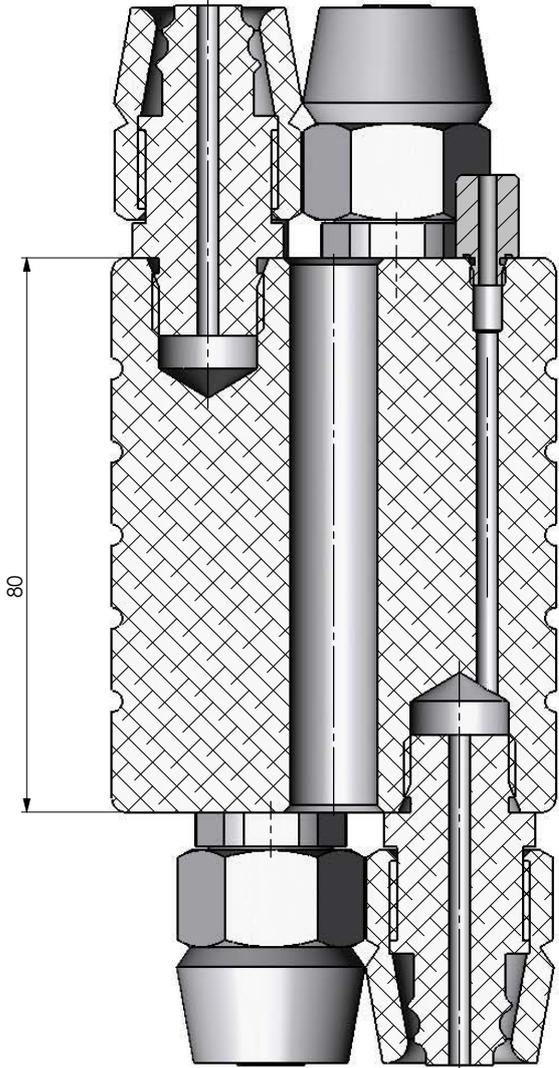
REV.	EXEC.	VERIF.	APROV.	PESO.	ERROR:Material
1					

QUANT.	DESCRIÇÃO	MATERIAL
1	DESCRIPÇÃO	MATERIAL

ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE PUC/RJ/MEC. E NÃO PODE SER REPRODUZIDO OU USADO PARA QUALQUER FINALIDADE DIFERENTE DAQUELA PARA QUAL ESTÁ SENDO FORNECIDO.

Tolerâncias: Quando não indicado, adotar:
 Lineares: +/- 0.05mm Circulares: +/- 0.1mm Angulares: +/- 1°
 Acabamento: Quando não indicado, adotar:
 Aparar quinos: 0.5mm x 45° Açoçar: 0.5mm Rmax: 3.2µmm

CLIENTE OU USUÁRIO	PUC-RJ/MEC
PROGRAMA OU PROJETO	SOLICITANTE
ÁREA OU UNIDADE	DIMENSÕES DA PEÇA
TÍTULO	SOLICITANTE
	COBRA
	MONTAGEM_SEG_ESTAGIO_VER3

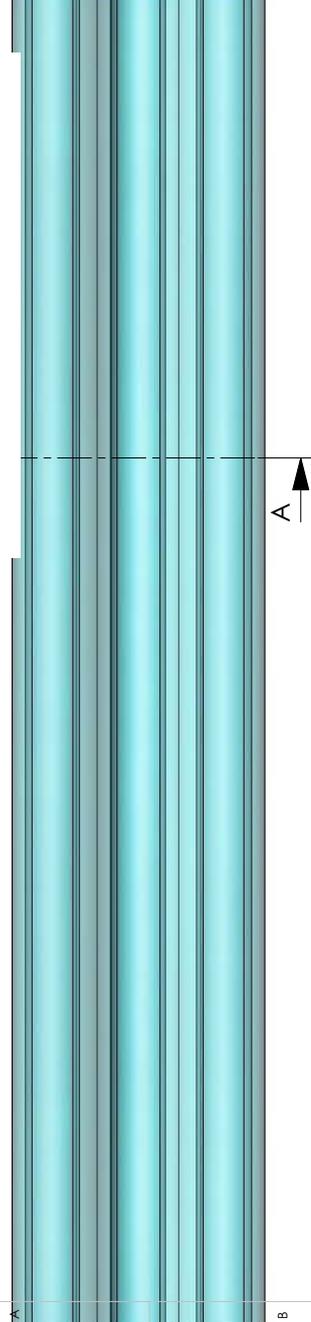
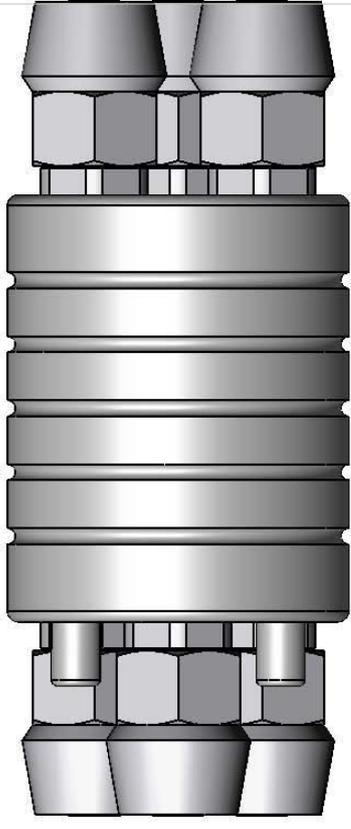


SECTION B-B

PROJ.	RODRIGO	DES.	RODRIGO	POS.
APROV.	SCOFANO	FORM.	A 3	0
DATA	7/3/2006	ESCALA	1:3:1	FOLHA 01 de 1
Nº				REV. 0

MONTAGEM_SEG_ESTAGIO_VER3

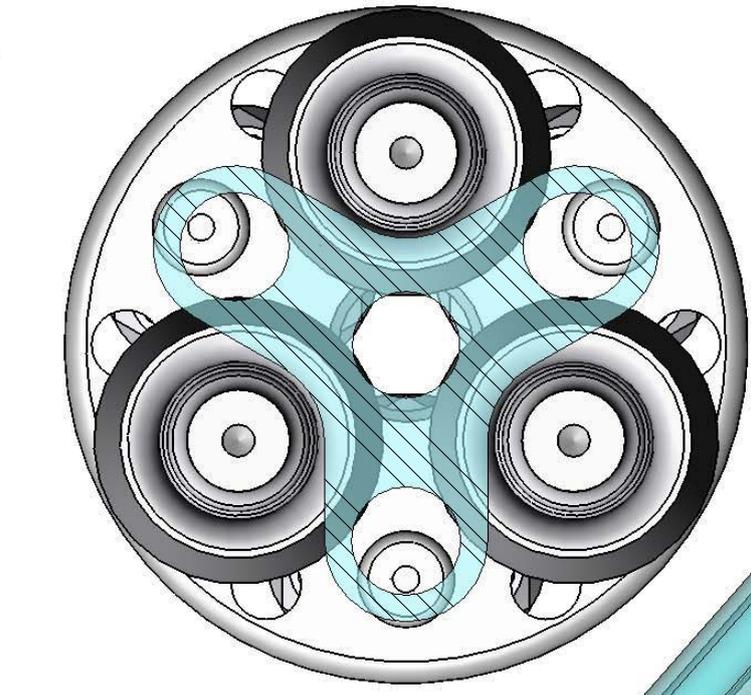
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0412758/CA



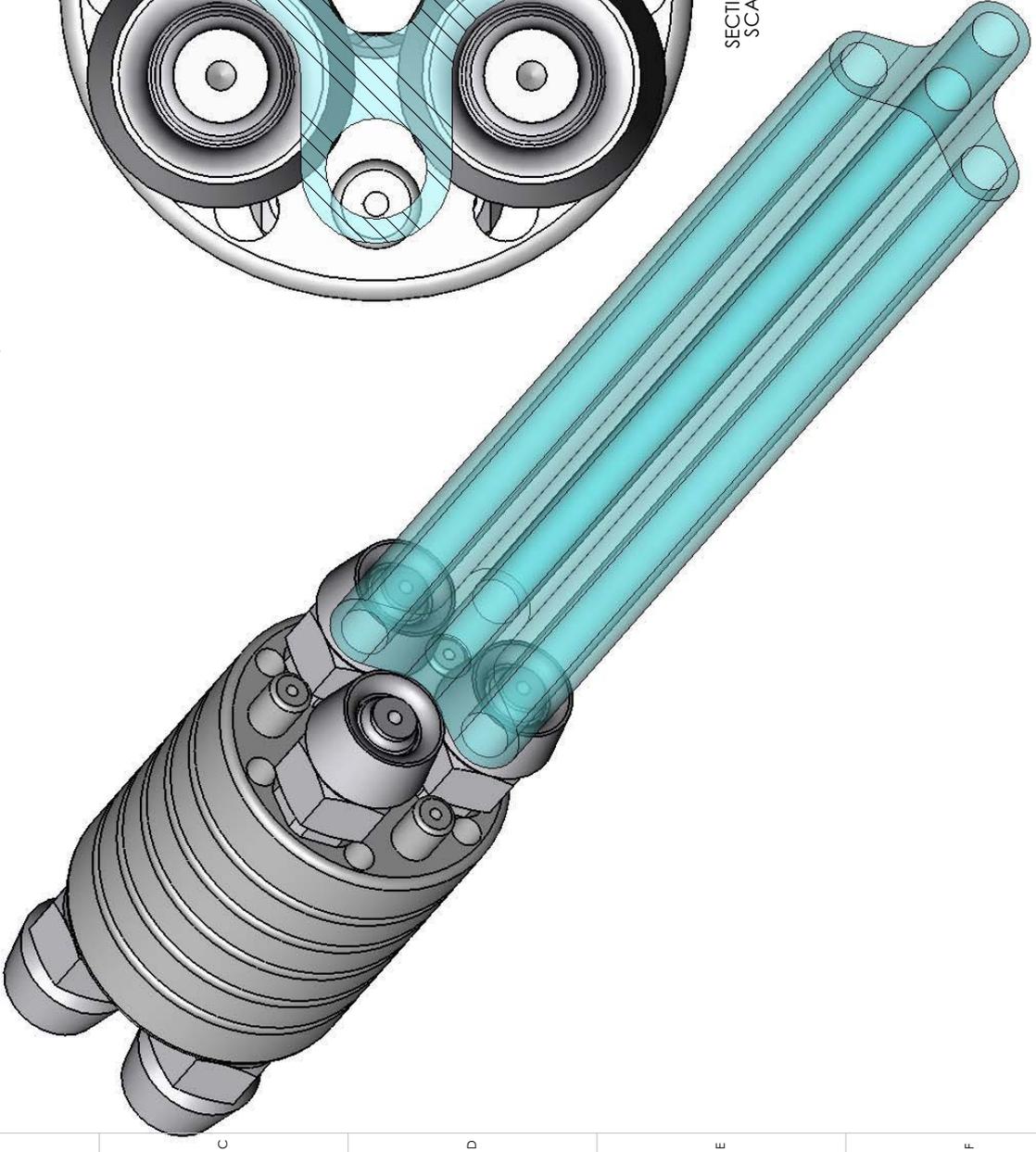
A

A

B



SECTION A-A
SCALE 2 : 1



C

D

E

F

0	RODRIGO	RODRIGO	SCOFANO	ERROR: Weight
REV.	EXEC.	VERIF.	APROV.	PESO.
1	ERROR:Description			ERROR:Material
QUANT:	DESCRICAO			MATERIAL
ESTE DOCUMENTO É DE PROPRIEDADE PUC/RJ/MEC. E NÃO PODE SER REPRODUZIDO OU USADO PARA QUALQUER FINALIDADE DIFERENTE DAQUELA PARA QUAL ESTÁ SENDO FORNECIDO.				
Tolerâncias: Quando não indicado, adotar: Lineares: +/- 0,05mm Circulares: +/- 0,1mm Angulares: +/- 1° Acabamento: Quando não indicado, adotar: Aparar quinos: 0,5mm x 45° Açoçar: ± 0,5mm Rmax: 3,2µmm				
PUC-RJ/MEC				
CLIENTE OU USUÁRIO				
SOLICITANTE				
PROGRAMA OU PROJETO				
DIMENSÕES DA PEÇA				
ÁREA OU UNIDADE				
SOLICITANTE				
TÍTULO				
COBRA				
MONTAGEM SEG_ESTAGIO VER3_ESP				
PROJ.	RODRIGO	DES.	RODRIGO	
APROV.	SCOFANO	FORM.	A 3	POS. 0
DATA	8/3/2006	ESCALA	1:1	FOLHA 01 de 1
Nº	MONTAGEM SEG_ESTAGIO VER3_ESP			REV. 0