

## 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.

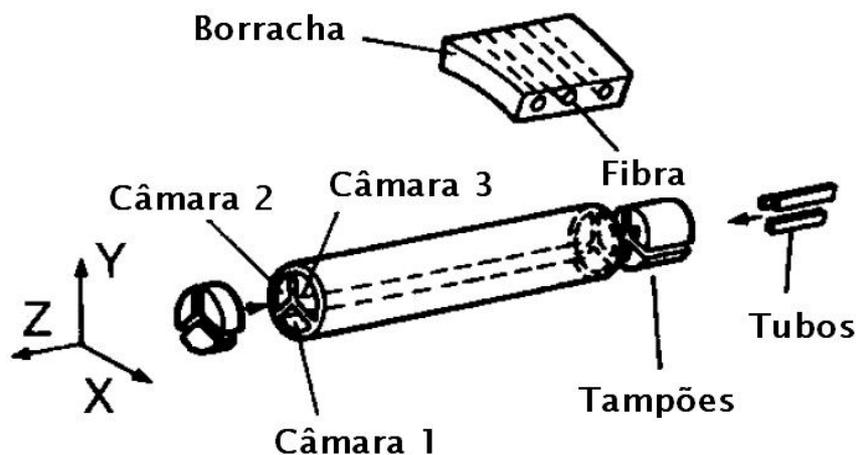


Figura 1: Esquema ilustrando a construção dos dedos de borracha

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).

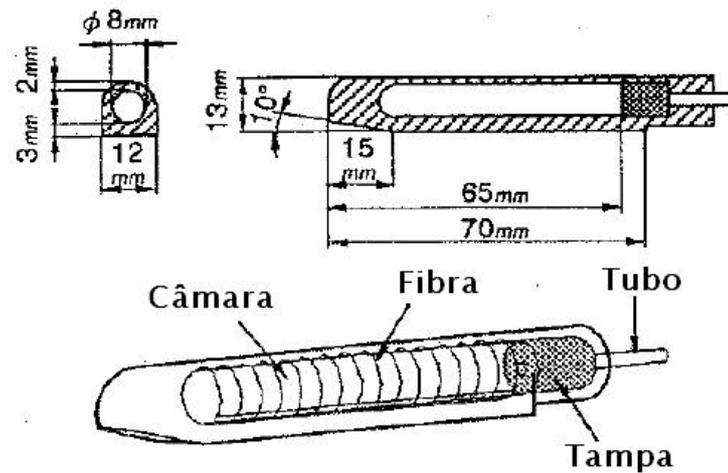


Figura 2: Esquema do prendedor macio

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.

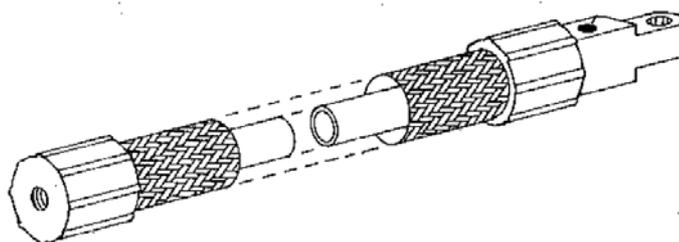


Figura 3: Esquema do *rubbertuator* fabricado pela *Bridgestone*

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).

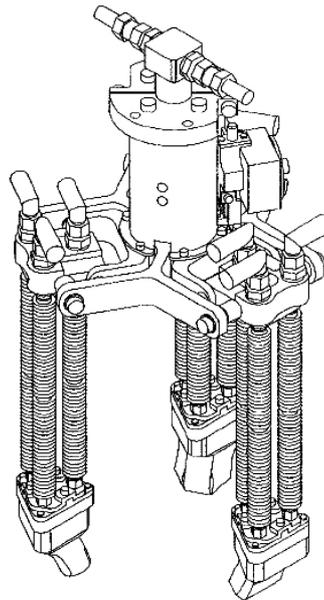


Figura 6: Garra hidráulica do manipulador AMADEUS

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.

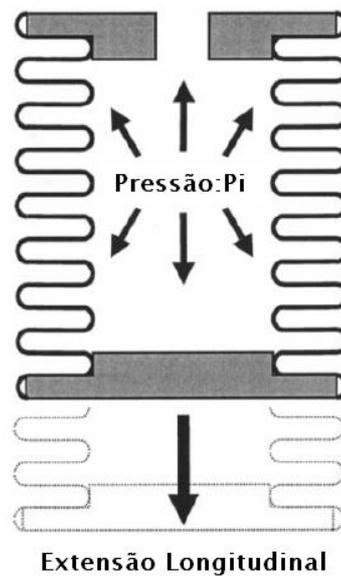


Figura 7: Fole cilíndrico de metal corrugado; pressão interna causando expansão longitudinal

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.

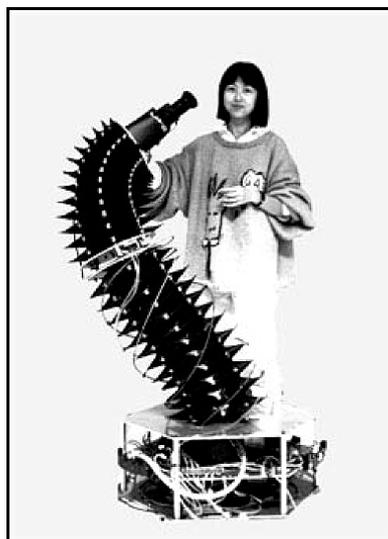


Figura 8: Tentáculo KSI

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).

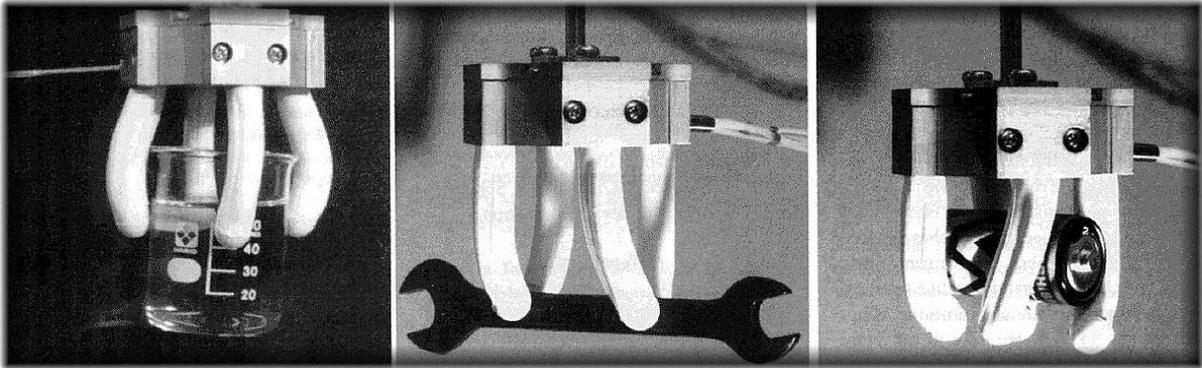


Figura 9: Dedos de borracha atuados pneumaticamente segurando e apertando objetos

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.

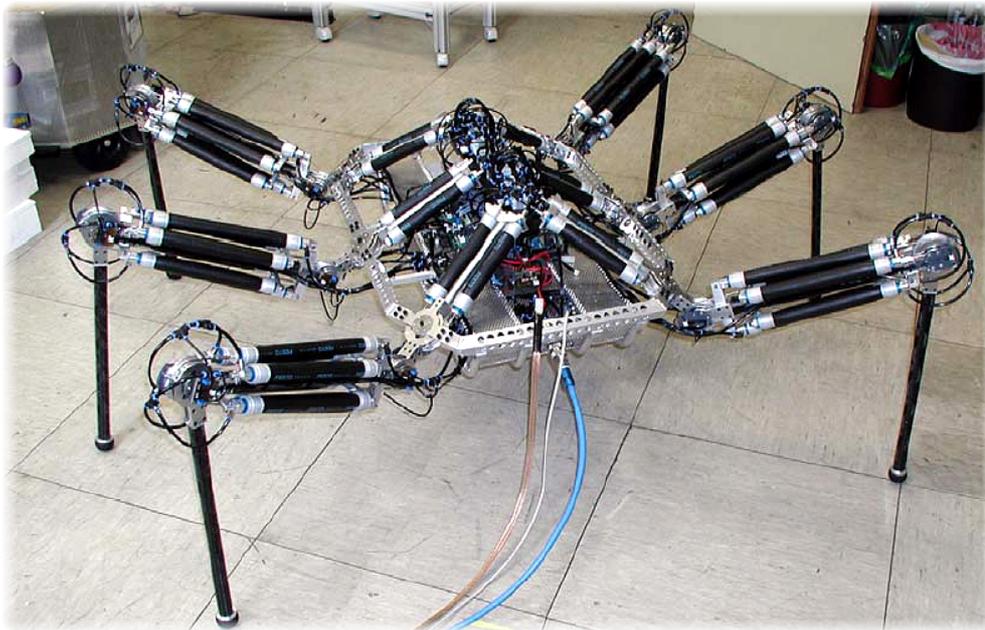


Figura 10: Robô *AirBug* com atuadores MAS-20 da FESTO

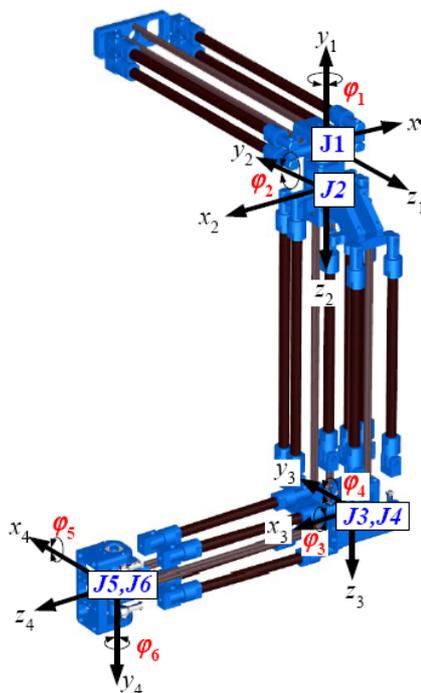


Figura 11: Braço pneumático com atuadores MAS-10 da FESTO

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).

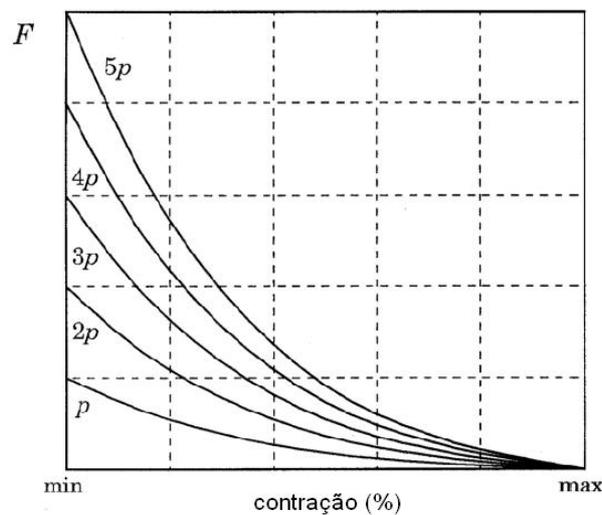


Figura 13: Diagrama isobárico de força-contração do Músculo Artificial Pneumático

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

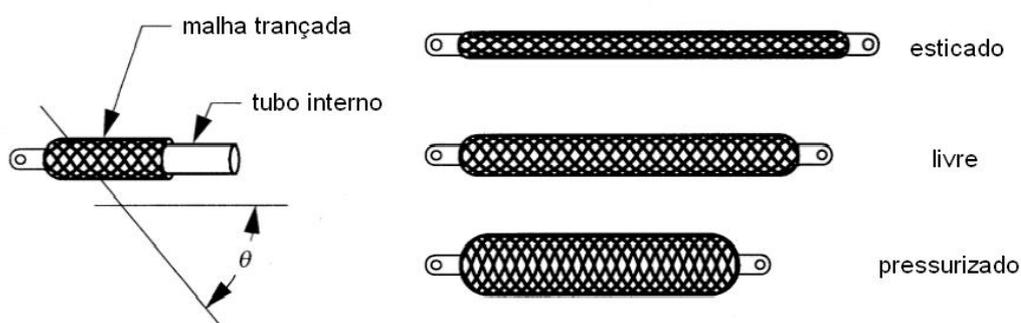


Figura 15: Músculo Trançado (Músculo de *McKibben*)

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.

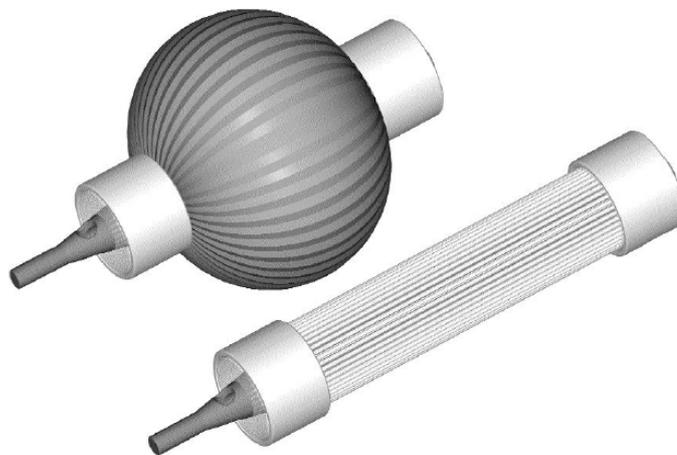


Figura 16: Músculo com Pregas; totalmente esticado e inflado

### **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.

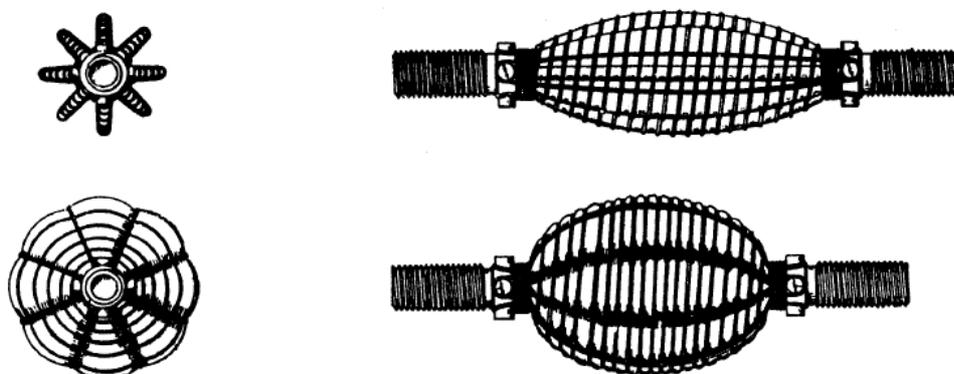


Figura 17: Músculo de Yarlott

## 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.

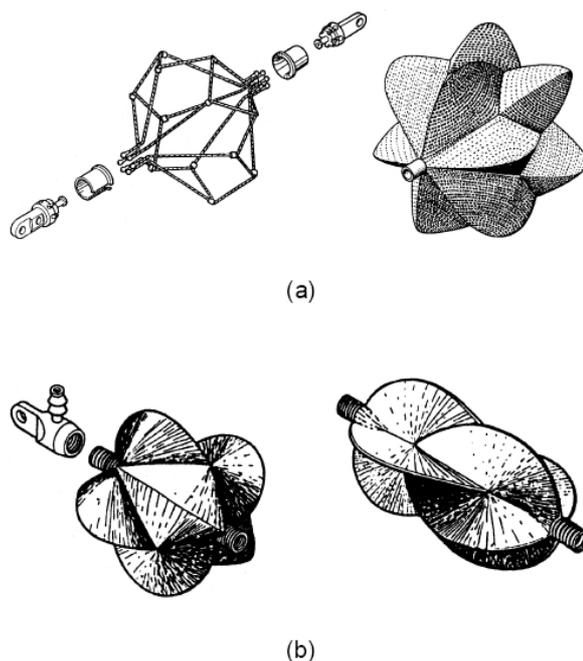


Figura 18: ROMAC, versão padrão (a) e versão em miniatura (b)

## 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.

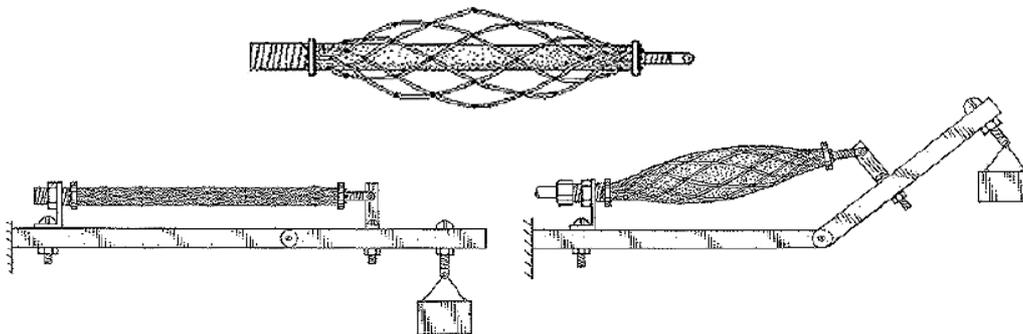


Figura 19: *Músculo de Kukolj*

## 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.

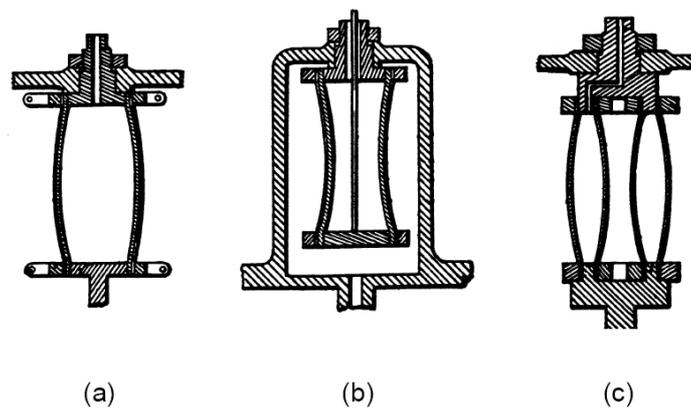


Figura 20: Diferentes *protejos* do Músculo de *Morin* de acordo com a pressão utilizada; (a) *protejo* para sobrepressão (vista do corte transversal longitudinal), (b) *protejo* para subpressão e (c) com membranas concêntricas

- **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.

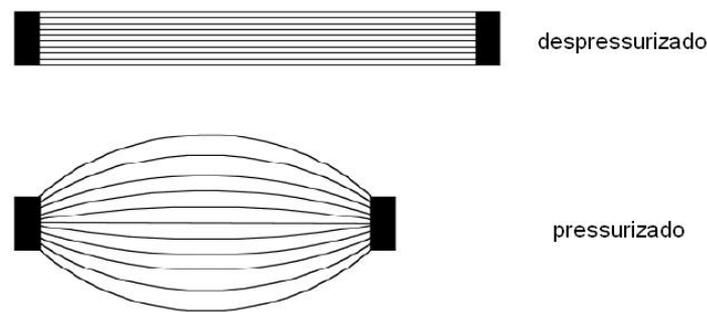


Figura 21: Músculo do tipo Baldwin

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).

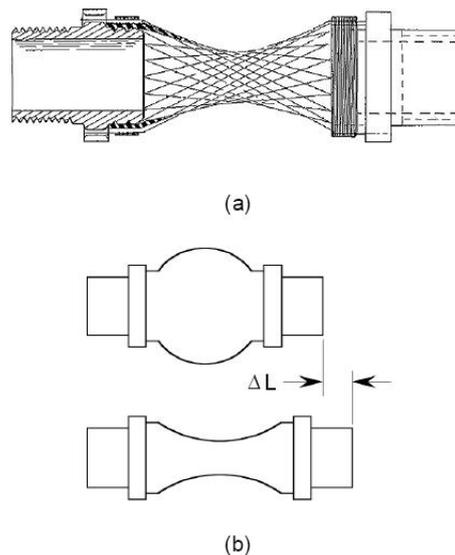


Figura 22: Músculo Paynter Hiperbólico

- **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  $\varphi$ , como indicado na figura. A rotação e o torque são conseguidos assim.

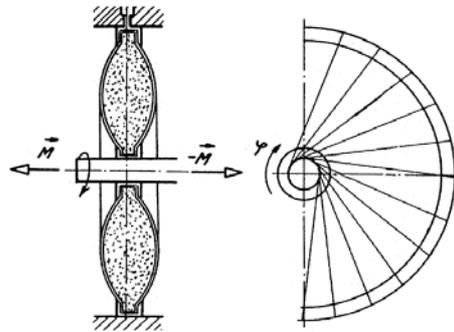


Figura 23: Torção de Kleinwachter

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.