

2. Concepção do Manipulador

2.1. Conceitos Básicos

Neste capítulo será descrito o critério de escolha da estrutura mecânica e disposição dos atuadores do manipulador. A escolha das características do *design*, em particular, depende diretamente das necessidades funcionais e operacionais das possíveis aplicações do manipulador. Desta forma, este trabalho apresentará um manipulador de modo generalizado, sem caracterizar uma aplicação em específico e com flexibilidade para inserção de componentes em sua estrutura.

Um manipulador, que apresente 6 DoF, 3 para realização do posicionamento e outros 3 para a orientação de um objeto em sua extremidade, pode realizar qualquer tarefa de posicionamento dentro de seu ambiente de trabalho (desde que dentro do seu volume de trabalho e na ausência de obstáculos). Com um número inferior a seis, ele fica limitado, não alcançando todas as posições no ambiente. Um robô que apresente mais de 6 DoF é considerado redundante. O termo redundante é comumente utilizado em Robótica para indicar que o número de DoF excede ao mínimo para execução de uma tarefa.

Atualmente, os robôs industriais convencionais são inspirados nos braços humanos. Eles trabalham com estrutura serial e com um número relativamente pequeno de elos rígidos conectados por articulações. Logo, assim como o braço humano, sua estrutura é limitada, funcionando de forma adequada em ambientes abertos, conhecidos e/ou preparados. Por outro lado, a resposta a essa limitação pode ser encontrada na própria natureza. Ao se analisar alguns seres invertebrados, tais como, polvos e seus tentáculos, minhocas e lesmas podem ser notados inúmeros DoF redundantes. Não somente os seres invertebrados, mas alguns seres vertebrados também apresentam características

similares, como por exemplo, as cobras e os elefantes, em particular, sua tromba. Apesar de o elefante ser o maior vertebrado terrestre, sua tromba é formada somente por carne e músculos e encurva-se com facilidade. Manipuladores com diversos DoF redundantes são conhecidos como hiper-redundantes. Esta característica acaba com a limitação de manipuladores tradicionais em ambientes confinados e com obstáculos. Por causa de sua estrutura altamente articulável, estes manipuladores são adequados para operação em ambientes altamente restritos e podem ser projetados para ter uma maior robustez em relação à falha mecânica do que manipuladores com baixo grau de redundância. Estruturas hiper-redundantes já foram apresentadas em trabalhos com outros nomes, tais como “*highly articulated*”, “*tentacle*”, “*snake-like*”, “*tensor-arm*”, “*elephant trunk*” “*swan’s neck*” e “*spine*” (Chirikjian, 1992). Pelas vantagens apresentadas, a opção do desenvolvimento de um manipulador hiper-redundante foi definida.

As estruturas de robôs hiper-redundantes podem ser classificadas em dois tipos: contínua flexível ou vertebrada (Walker, 2000).

Para o primeiro tipo, sua curvatura pode ocorrer em qualquer ponto ao longo da estrutura (Wilson et al., 1993). Na teoria, o espaço de articulações destes manipuladores é infinito, mas de ordem prática, o número de atuadores é finito, o que inviabiliza o conceito teórico de articulações infinitas. Hoje em dia, alguns trabalhos que apresentam estes manipuladores trabalham com tubos elásticos ou músculos pneumáticos compostos por seções independentes (Nakamura et al., 2002; Scofano, 2006). Este tipo de robô é comumente chamado de robô contínuo (Robinson e Davies, 1999).

Já para o segundo tipo, a curvatura ocorre em pontos específicos da estrutura. A “*invertebrabilidade*” do manipulador se deve a um grande número de juntas, unidas por pequenos ligamentos rígidos. Este pode ser considerado um caso particular de robôs hiper-redundantes onde o número de juntas tende ao infinito e o comprimento dos elos tende a zero. Este modelo apresenta uma vantagem ao se analisar conceitualmente, que é ser basicamente o projeto tradicional de manipuladores, replicado diversas vezes. Desta forma, é possível utilizar ferramentas de modelagem tradicional. Entretanto, o número elevado de

articulações e pequenos ligamentos podem gerar grandes complexidades durante a análise.

Ao se observar trombas, tentáculos, cobras e alguns seres invertebrados, nota-se que sua estrutura é basicamente composta por músculos. Estes músculos precisam suportar toda a estrutura bem como serem capazes de suportar toda a locomoção do sistema. Um dos desafios para a construção de um robô com estas características é exatamente a necessidade de replicar a atuação dos músculos. Por este motivo, a estrutura dos robôs com estas características deve apresentar uma rigidez estrutural compatível com a tarefa a ser realizada. Tal rigidez pode ser adquirida de forma simples, pela substituição de tubos por músculos, por exemplo, o que pode resultar na inserção de componentes com maior rigidez. Outra maneira de elevar a rigidez do sistema é inserir em cada vértebra um atuador, contudo a complexidade do sistema é proporcional ao número de DoF, o que pode tornar o sistema altamente complexo.

De forma geral, este tipo de manipulador apresenta características de ser altamente manobrável, flexível e leve.

Outro ponto importante no conceito de robôs hiper-redundantes é a forma de atuação. Ela pode apresentar dois modos: local e remoto.

O sistema de atuação local, como notado em alguns trabalhos (Chirikjian, 1992; Paljug et al., 1995), embora sejam conceitualmente simples, apresentam diversas desvantagens. A atuação local é considerada simples pelo fato de os atuadores estarem fixados em cada DoF, simplificando, assim, o entendimento do funcionamento do sistema. Mas, os motores elétricos tradicionais são consideravelmente volumosos e pesados. Com os atuadores distribuídos em cada elo, o sistema todo se torna altamente volumoso, o que pode ser um grande problema para atuações em espaços confinados. O uso de sistemas alternativos aos motores, tais como músculos artificiais (Assis, 2007), pode significar uma solução, porém somente para sistemas que não trabalhem com cargas elevadas, pois a relação força-volume próprio dos músculos artificiais não é elevada.

No sistema de atuação remoto, fica mais simples de se desenvolver um robô com volume reduzido. Podem ser utilizados tendões (cabos), por exemplo, para realizar a transferência do acionamento e potência entre os motores e os elos. Os motores podem ser fixados em locais distantes do manipulador em si, viabilizando assim a realização de tarefas em locais insalubres e com restrições, tais como tanques de armazenamento de combustível. Com a utilização de tendões e com os motores fixados remotamente, a estrutura do manipulador pode se tornar bastante leve. Entretanto, quanto maior o número de tendões impostos ao sistema, maior a complexidade deste. Alguns trabalhos publicados com estas características podem ser observados (Immega e Antonelli, 1995; Sakai et al., 2006).

Pelas razões já citadas acima, foi escolhido o desenvolvimento de um manipulador serial hiper-redundante, vertebrado e com atuação remota.

Outro aspecto também será levado em conta. Como o manipulador tem a intenção de poder atuar em diversos ambientes, será prevista a utilização de materiais que não possibilitem a geração de faíscas. Deste modo, ele poderá trabalhar em locais que apresentem presença de gás inflamável, combustíveis e outros. A escolha da utilização dos materiais será baseada em equipamentos que possam ser utilizados em tanques de armazenamento de combustíveis em geral, e em funcionamento. Assim, o manipulador deve poder trabalhar afogado, ou seja, submerso dentro de líquidos, e também não poderá produzir faíscas, pois o local de atuação pode conter gases.

Diversos trabalhos utilizam outros materiais, com flexibilidade já bastante estudada, tais como, molas (Hannan et al., 2003) e sistemas pneumáticos (Liljebäck et al. 2008), Figuras 5 e 6, respectivamente, como parte flexível do manipulador. Uma característica singular deste trabalho é a utilização de discos de aço como elementos flexíveis.



Figura 5 – Estrutura Baseada em Molas.



Figura 6 – Estrutura Baseada em Juntas Pneumáticas

O disco de aço concebido, também chamado de “membrana”, será de aço inox 304, com espessura de 0,01” e diâmetro de 1,5”, vide Figura 7. O aço inox é uma material que não recebe tempera, porém com uma espessura tão pequena ele

pode ser temperado até uma dureza de 45 Rockwell C. O projeto desta membrana foi baseado para atuar em um manipulador com 3 elos, por isso os 4 grupos de 3 furos, com 0,08'', simétricos. Esta furação tem a finalidade de passagem dos tendões ou de sua fixação ao final de cada elo. Além destes furos, a membrana apresenta mais 8 furos de fixação de 0,12'' e um furo central de 0,39'' para futura passagem de cabeamento para equipamentos diversos, tais como, sensores, câmeras, garras, entre outros. Este material possui Módulo de Elasticidade de 198GPa e o disco possui massa de 1,06 gramas. A Figura 7 ilustra o desenho da membrana e sua furação. O desenho técnico encontra-se no Anexo I.

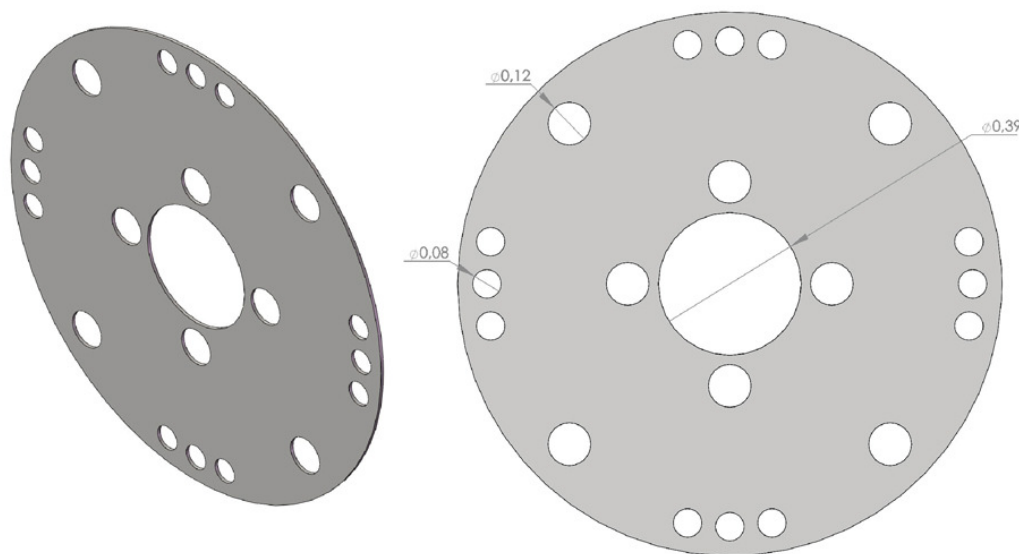


Figura 7 - Membrana

Como a idéia é desenvolver um manipulador com diversas vértebras, foi pensado em inserir uma “coluna” separando as membranas. Este componente foi desenvolvido com *nylon 6*. Foram usinados tubos com diâmetro externo de 3/4'' e interno de 3/8'' com comprimento de 1'' e massa de 7,26 gramas. Estas colunas pertencem à parte rígida do manipulador, trabalhando como parte da fixação das membranas. As colunas apresentam 4 furos de 0,098'' que servem para colocação de parafusos roscados de 3 mm. O furo central serve como possível passagem de cabeamento para algum sensor a ser fixado na extremidade do sistema, conforme ilustra a Figura 8.

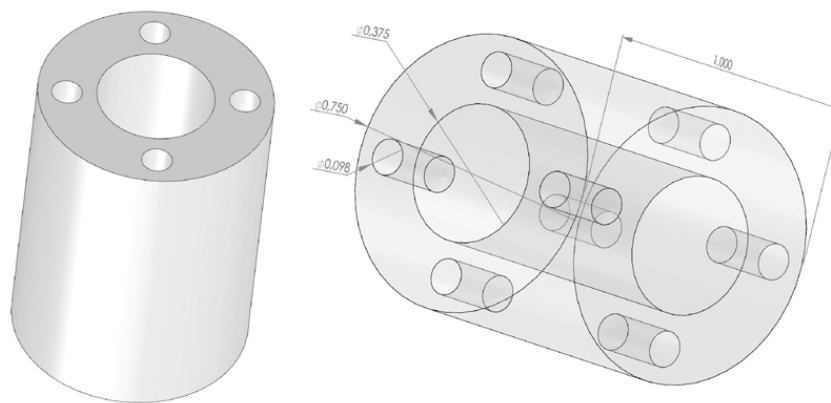


Figura 8 - Coluna

Foi necessário utilizar um espaçador entre as membranas por questões físicas, de forma que fosse possível fixar as membranas nas colunas e nos espaçadores, sem que as deformações ocorridas nas membranas afetassem o sistema rígido. Estes espaçadores ou anéis foram produzidos a partir de *AcetalDelrin AF* com PTFE. Os anéis possuem diâmetro externo de 1,5'', interno de 1'' e comprimento de 1/2''. Os anéis também possuem uma furação específica, sendo 4 furos com diâmetro de 0,1'' para fixação e 12 furos de 0,06'' para passagem dos tendões. A massa do anel é estimada em 1,97 gramas. O furo central, como nos outros componentes, também existe para uma futura passagem de cabeamento. A Figura 9 ilustra a peça.

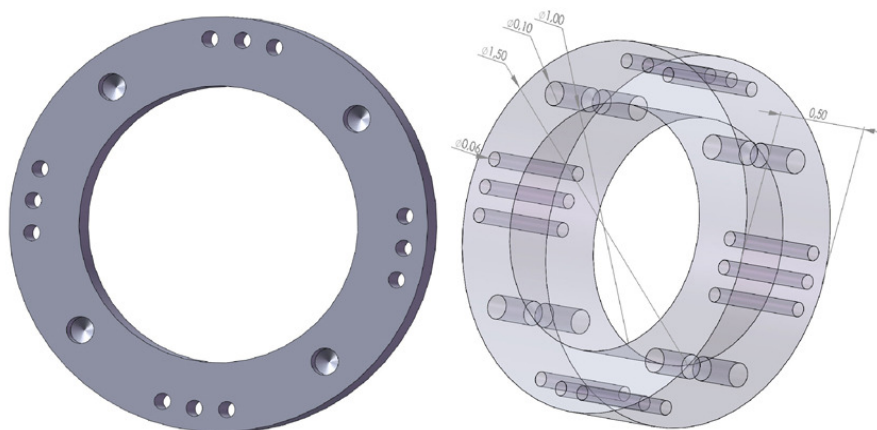


Figura 9 - Anel

Por fim, os tendões escolhidos para a realização da transmissão da força dos motores para o manipulador foram de aço inox 304 com revestimento do polímero FEP. O cabo de aço possui diâmetro de 0,032'' e com o revestimento o diâmetro chega a 0,04''. Apresenta construção 7x19 (7 grupos de 19 fios cada), conforme Figura 10, e resistência de aproximadamente 54,5Kg.

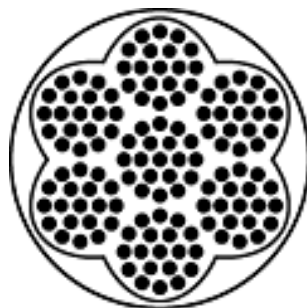


Figura 10 – Corte Transversal do Tendão

A partir dos componentes acima, foi iniciado o trabalho de desenho do manipulador. Inicialmente foi definida a criação da chamada “vértebra”, que é composta de uma membrana seguida de uma coluna que se liga a outra membrana e por fim um anel, conforme Figura 11.

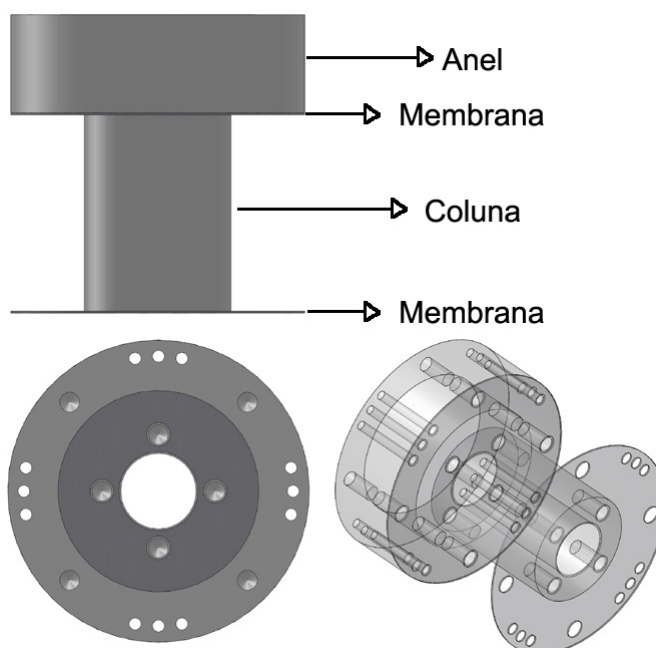


Figura 11 – Vértebra

Este é o padrão de montagem para cada elo do manipulador. Para que o manipulador possua uma característica de longo alcance, foi definido que, a princípio, o manipulador teria 3 elos, como já previsto anteriormente. Cada elo é composto por 4 conjuntos de vértebras (membrana + coluna + membrana + anel). A única variação deste conjunto é na extremidade, onde é inserida uma última membrana. O desenho de 1 elo é apresentado na Figura 12.

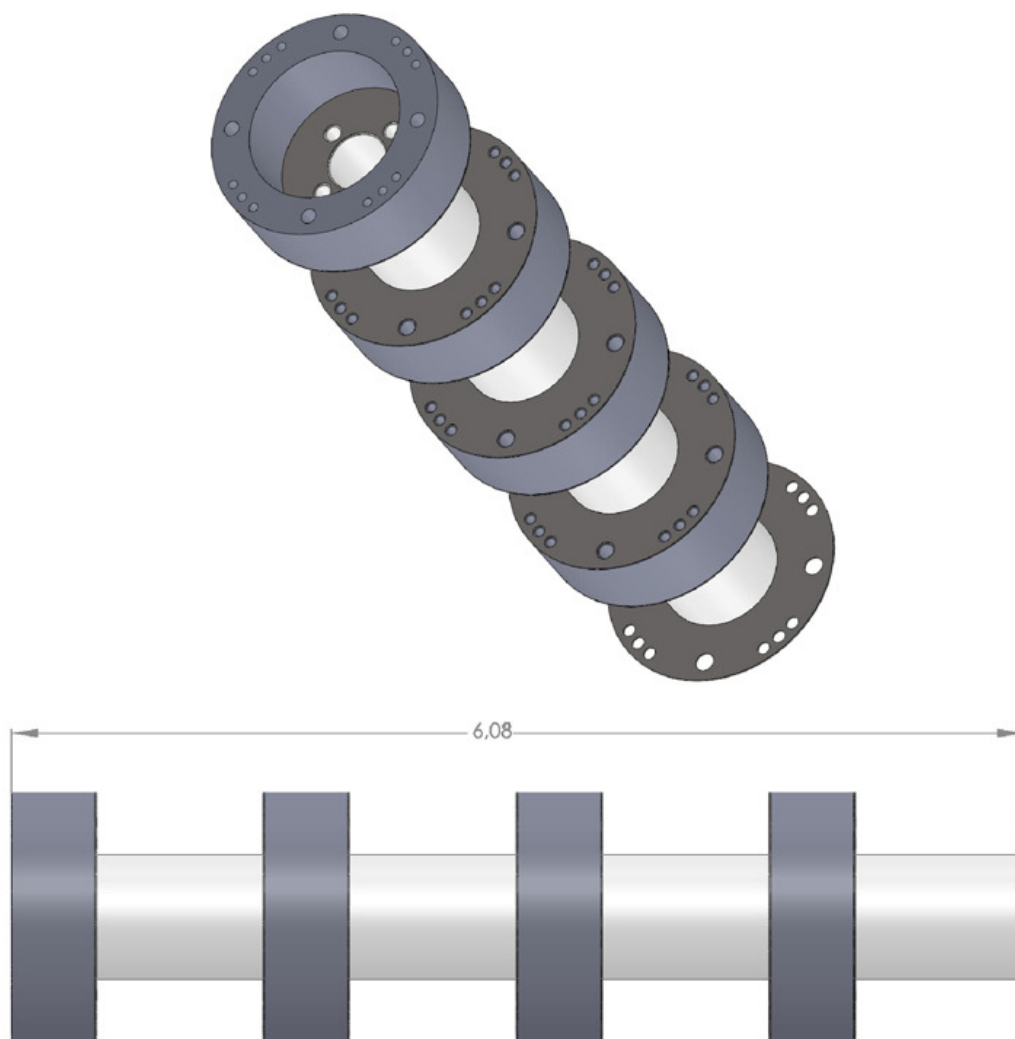


Figura 12 – Elo

A fixação dos componentes é feita através de parafusos auto-atarraxantes de diâmetro 3 mm por 6,5 mm de comprimento (maiores detalhes no Anexo II). O desejado é que os parafusos sejam de alumínio para evitar a possível geração de faíscas com o atrito entre o parafuso e a membrana. A Figura 13 ilustra o elo com os parafusos em suas respectivas posições.

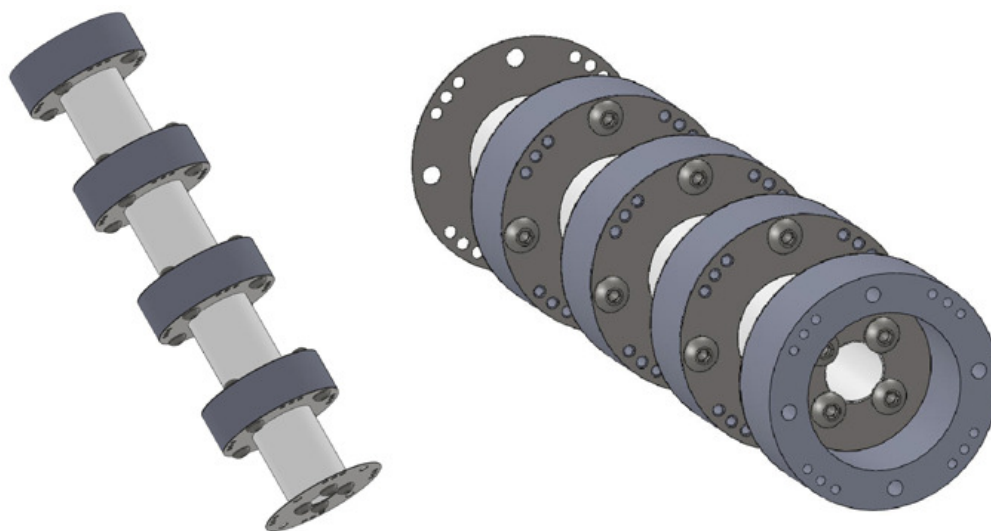


Figura 13 – Elo com Parafusos de Fixação

O desenho final dos elos do manipulador mostra a junção de três elos, além da inserção de uma membrana na extremidade do manipulador. A Figura 14 ilustra os elos, cada um em uma tonalidade distinta. O mais escuro é o elo base ou elo 1, o segundo mais escuro é o elo 2 ou intermediário e, finalmente, o elo mais claro é o elo extremidade ou elo 3. Pode-se perceber que o tamanho do elo 3 é 0,01” maior, o que resulta da inserção da membrana na extremidade.

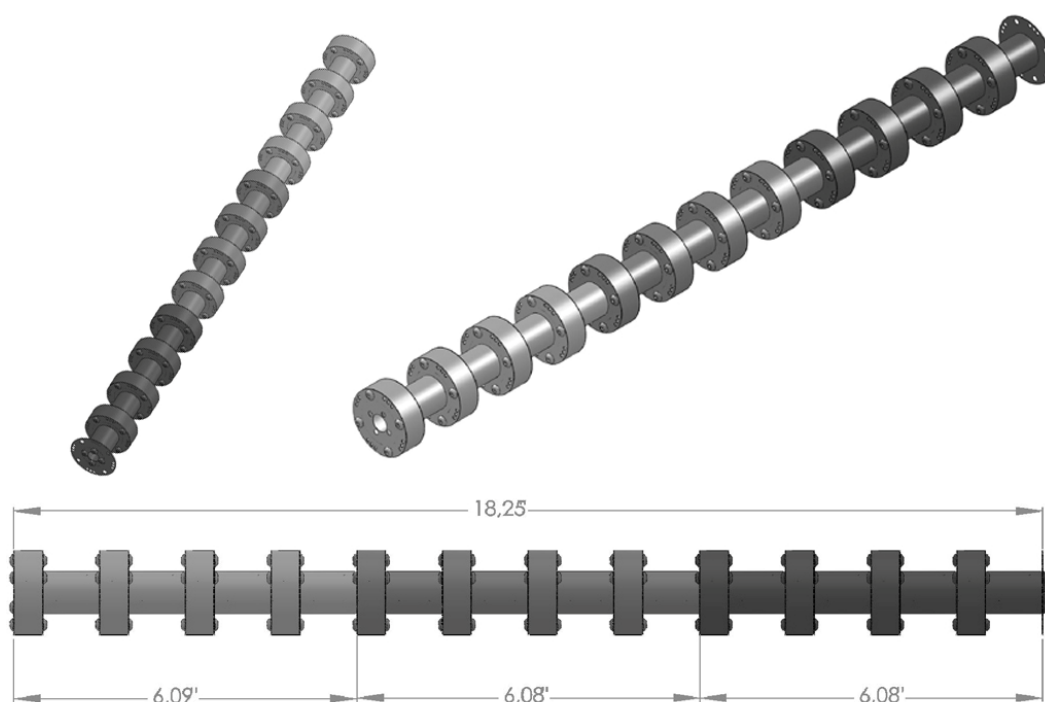


Figura 14 – 3 Elos com Parafusos

Como o intuito é desenvolver um protótipo de baixo custo, a escolha dos motores foi dimensionada para tal. Ao invés da utilização de motores elétricos para acionamento dos tendões, foi escolhida a opção de servomotores. Algumas características importantes precisavam ser observadas tais como alto torque (para que se consiga realizar a atuação de todo os elos), existência de um sensor de posição digital do tipo *encoder* (para facilitar a leitura, controle e a programação), velocidade controlável (para um melhor controle) e opção por giro livre (caso necessário dar mais de uma volta para o enrolamento dos tendões). Após algumas pesquisas, chegou-se ao servomotor AX-12+ da Dynamixel. Este modelo de servo possui algumas características interessantes. Ele trabalha na faixa de 7 a 10 volts, com uma corrente máxima de 900mA e velocidade final de 114RPM. Com uma redução de 1:254, produz um torque máximo de 1,617Nm a 10V e 1,176Nm a 7V. Ele possui sensores internos, podendo gerar um *feedback* de temperatura, velocidade, posição, carga aplicada e tensão elétrica (voltagem) recebida, o que só é encontrado em servomotores de alto desempenho. Ele possui duas formas de funcionamento, modo contínuo (giro livre com velocidade constante) ou modo de única volta (trabalha com o eixo girando entre $\pm 150^\circ$). Ao trabalhar em modo

contínuo, não se tem o controle de posição, de forma que o único controle possível é o de velocidade, enquanto que, ao se utilizar em modo única volta pode-se controlar a posição dentro de 300° com uma resolução de 0,31°. Com estas características e com a aquisição de uma placa de conversão denominada USB2Dynamixel, onde se pode realizar a programação dos servomotores através de linguagens tradicionais de programação, estes foram usados como atuadores. Com o intuito de desenvolver um posicionamento adequado dos motores no manipulador, eles foram desenhados em CAD, conforme ilustra a Figura 15.



Figura 15 – Servomotor AX-12+

Foi observada uma incoerência no cálculo da resolução do servo junto ao manual. No manual, é dito que o número de posições possíveis dentro do ângulo de atuação de 300° é de 1024. Ele também cita que a resolução do servo é de 0,35°, o que gerou a incoerência. Ao se calcular a resolução do servo com os dados de 300° e 1024, chega-se a outro resultado.

$$\text{Resolução} = \frac{300^\circ}{1024 - 1} = 0,29^\circ \quad (2.1)$$

O valor citado no manual é referente a uma rotação completa de 360°, porém como as 1024 posições são configuráveis dentro dos 300°, o valor real é de 0,29°. Assim, para cálculos futuros, será utilizado o valor de 0,29° como resolução do servomotor.

Com o intuito de verificar a veracidade dos dados e a rigidez da redução e, também, o tipo de *encoder* utilizado, o servomotor foi aberto, conforme ilustra a Figura 16, sendo verificado que a relação de engrenagens acontece conforme a Tabela 1, resultando na seguinte relação $\frac{48}{11} \times \frac{38}{15} \times \frac{31}{10} \times \frac{23}{9} \times \frac{29}{10} = 253,972$, o que corresponde ao fator de redução previsto. O *encoder* que é utilizado no servo é o modelo muRata SV01 (*Datasheet* no Anexo III).

Tabela 2-1 – Relação de Engrenagens

Engrenagem	Coroa Maior	Coroa Menor
1	Motor	11
2	48	15
3	38	10
4	31	9
5	23	10
6	29	Eixo

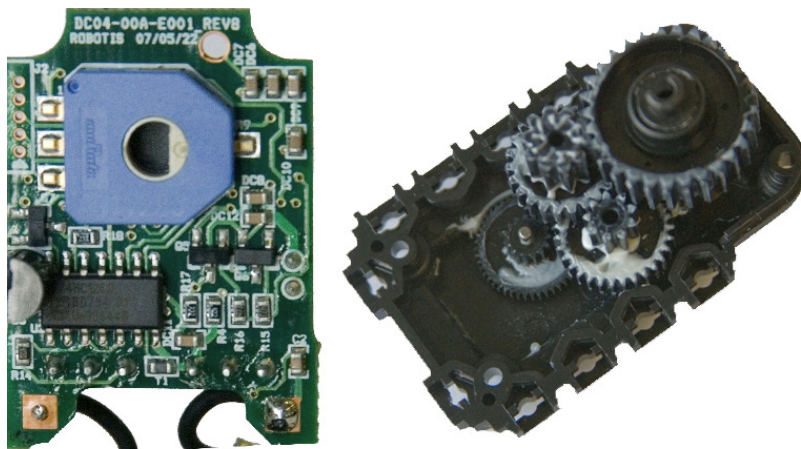


Figura 16 – Encoder e Relação de Engrenagens

Na tentativa de otimização do torque do servomotor, foi criada uma nova peça para servir como uma polia acoplada ao eixo do servomotor. Esta polia foi usinada em alumínio e possui as características mostradas na Figura 17. Os tendões ficam presos junto ao eixo central da polia. E furo para fixação dos tendões pode ser visualizado na Figura 17. A polia possui uma furação específica e fixa-se, assim, ao eixo do motor. Ela possui um segmento para enrolamento dos tendões com diâmetro de 10mm. Dessa forma, todo o torque gerado pelo motor, que é de 1,617Nm ou 16,49Kg.cm a 10V, é transferido sem perdas diretas para os tendões. Em outras palavras, cada servomotor consegue gerar nos tendões atuados por ele 16,49Kg, ou seja, 161,77Kgf. Esta força, apropriada para gerar as deflexões nas vértebras construídas, foi usada no projeto da polia na escolha de seu diâmetro.



Figura 17 - Polia

O posicionamento dos motores é outro ponto que foi analisado de forma a facilitar a montagem e o entendimento do funcionamento do manipulador, além de se evitar a geração de atrito desnecessário, bem como evitar a criação de uma base volumosa para o manipulador. Dessa forma, a disposição dos servomotores foi realizada em formato circular em uma placa de alumínio, com espessura de 2mm. A fixação dos servomotores foi realizada utilizando peças de fixação

utilizados no kit do robô *Bioid*¹. A Figura 18 ilustra esta peça e o servomotor com sua base e a polia já inserida. Já o posicionamento dos servomotores na placa base é apresentado na Figura 19.

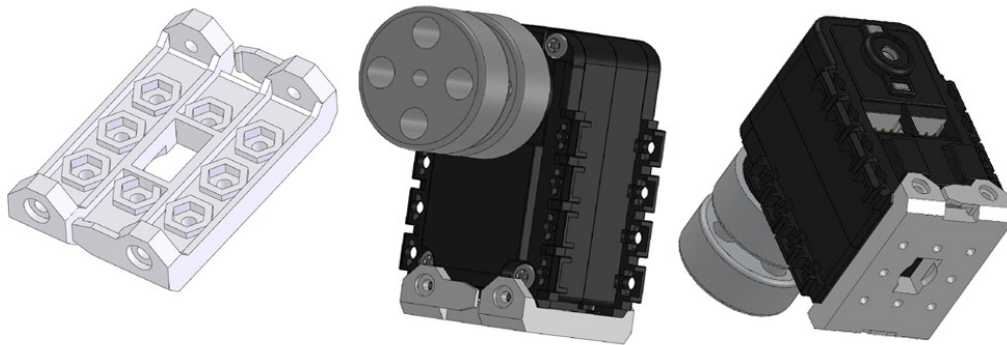


Figura 18 – Base, Servomotor e Polia

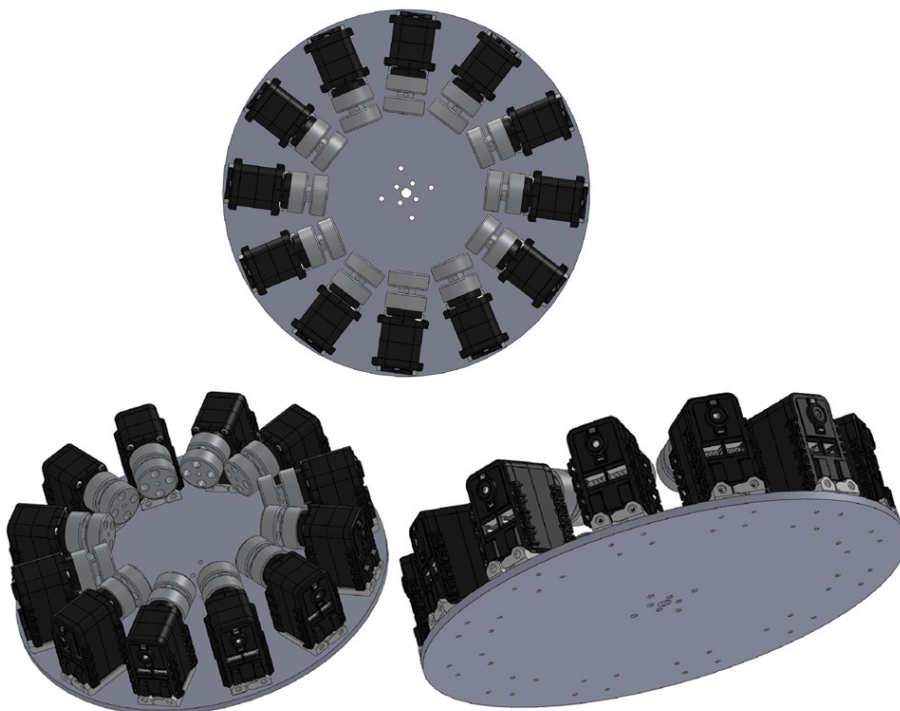


Figura 19 – Posicionamento dos Servos

¹ Fabricante Robotis - <http://www.robotis.com/zbxe/intro> (visitado em 10/12/2009)

Além dessa montagem, também foi usinada uma base fixa para o manipulador com o intuito de deixá-lo em um plano mais elevado em relação às polias, diminuindo o ângulo de entrada dos tendões no manipulador, e reduzindo assim o atrito gerado pelos tendões nos elos. Esta base possui diâmetro e furações similares à membrana em seu topo, descontando o furo central. Em sua base, as furações são para sua fixação na placa de alumínio. A base fixa possui comprimento de 6,10'' (Figura 20) e permite que os tendões saiam das polias, realizando uma curva suave até a entrada na base.

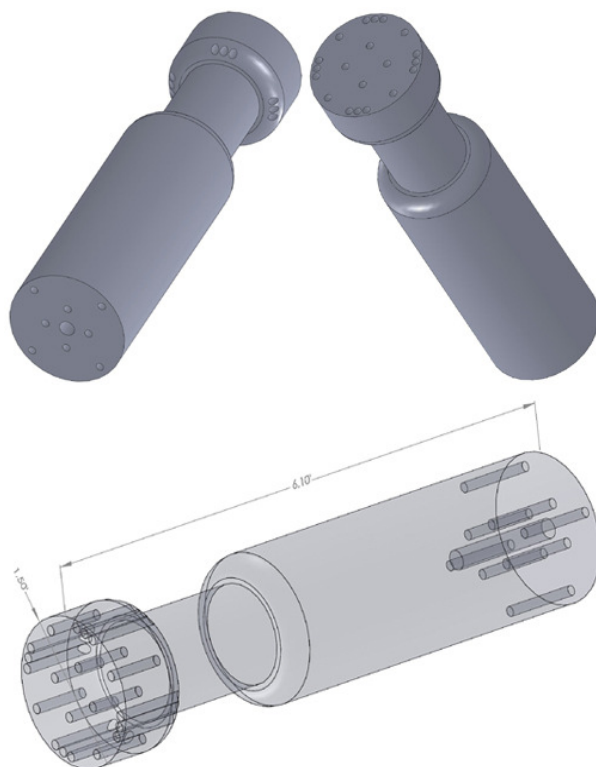


Figura 20 - Base

A Figura 21 apresenta a montagem completa do manipulador e ilustra a passagem de cabos que saem das polias e entram na base, e se findam em seus respectivos elos.

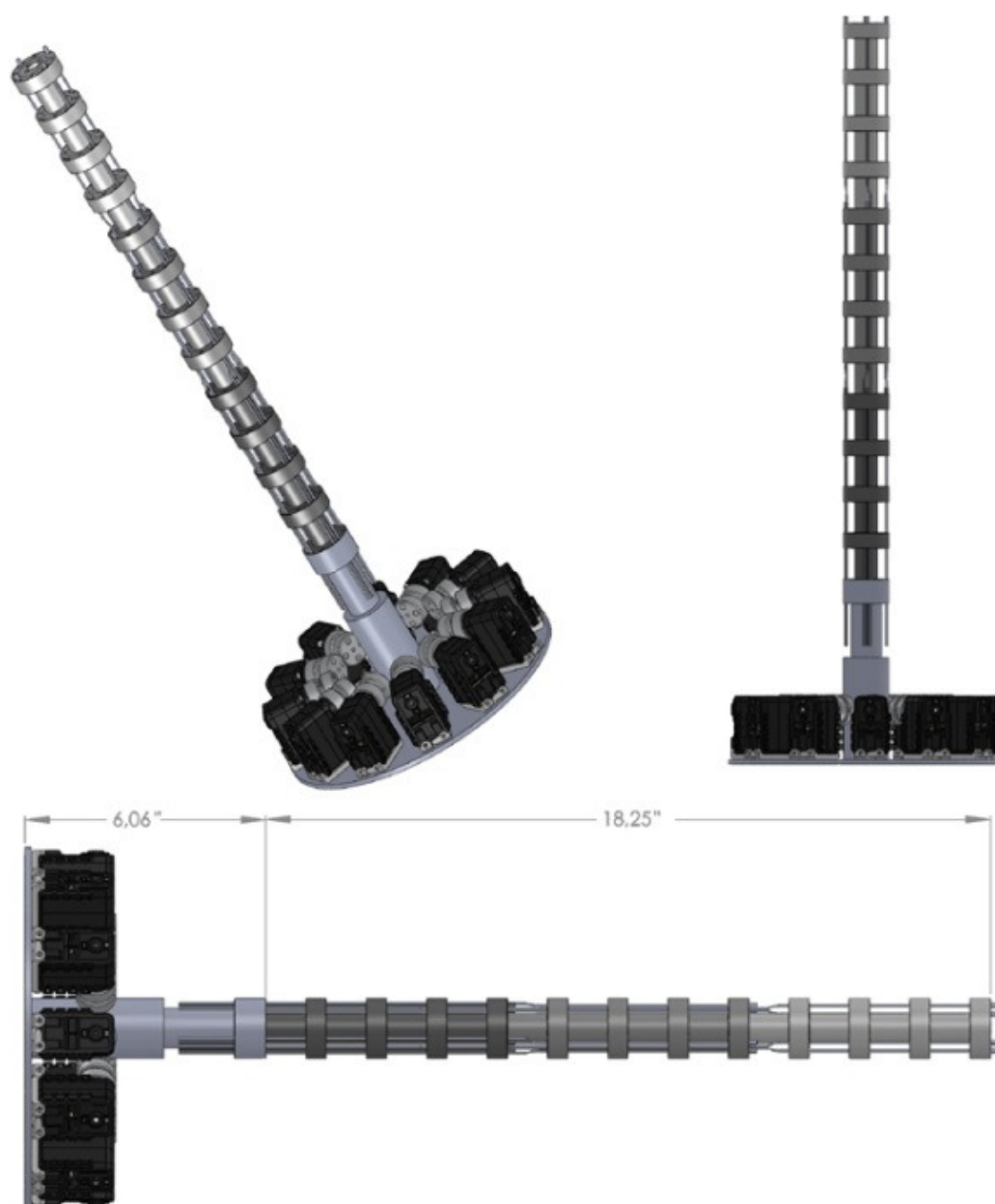


Figura 21 – Manipulador Completo

Os detalhes das trocas de posições nos canais de passagem dos tendões são apresentados na Figura 22. A primeira imagem mostra a passagem dos tendões no final do primeiro elo. Um conjunto de tendões está fixo no final do elo base através dos batentes; outro conjunto está trocando de canal de passagem, saindo do canal mais a esquerda e entrando no canal central, sendo referente ao tendão que atua no elo intermediário; e o que se mantém no canal de passagem, que é o que apresenta sua fixação no elo extremidade. A segunda imagem ilustra o final

do elo intermediário, onde existe um tendão final e outro trocando de canal de passagem do canal mais à direita para o canal central, alcançando o elo extremidade em sua posição de fixação final. Podem ser notados os *stop sleeves* (batentes) utilizados no final de cada elo para fixação dos tendões. Estes mesmos batentes são utilizados nas polias conectadas aos motores, com o mesmo intuito de fixação. Após a inserção do cabo no batente, este é pressionado com um alicate até ocorrer deformação, de modo que o cabo de aço fique fixo nele.

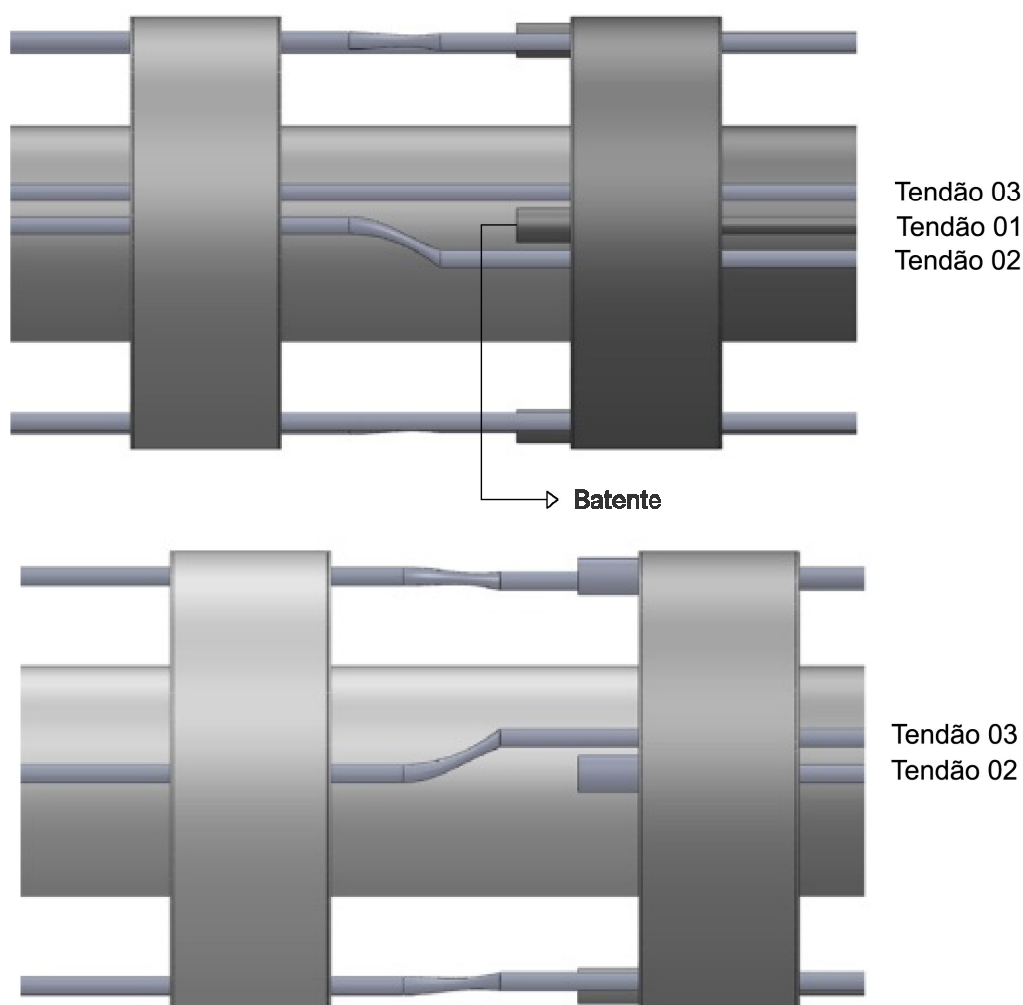


Figura 22 – Passagem de Tendões

Em resumo, o manipulador completo é composto por:

- Base de montagem dos servomotores;
- Suporte do manipulador;
- 12 servomotores;
- 12 suportes de fixação dos motores;
- 12 polias;
- 24 membranas;
- 12 colunas;
- 12 anéis;
- 96 parafusos 3 mm x 6,5 mm;
- 96 parafusos M2 x 6mm;
- 96 porcas para parafusos M2;
- Aproximadamente 4,3 metros de cabo de aço;
- 24 batentes.

2.2. Cálculos de Rigidez por Elementos Finitos

Com todo o sistema projetado e desenhado e com o auxílio da ferramenta *Simulation* do software *SolidWorks*², utilizada para a realização de análises com Elementos Finitos, que é uma técnica numérica para resolução de sistemas por aproximação através equações diferenciais parciais, foram realizados algumas simulações para visualizar a configuração descrita. Os cálculos das rigidezes foram realizados através da aplicação de forças e verificação dos deslocamentos gerados na análise. Inicialmente, foi simulada uma força atuando na membrana fixada em um anel. Em seguida foi realizada a simulação com a vértebra completa. A simulação com o manipulador completo não foi possível devido à necessidade de maiores recursos computacionais. Com os computadores testados,

² Desenvolvedor – <http://www.3ds.com/> (visitado em 10/05/2010)

conseguiu-se realizar os testes para até três vértebras. Ao inserir uma quarta vértebra, ou seja, um elo completo os cálculos se iniciavam, porém após algum tempo decorrido, o computador retornava o erro indicando falta de memória para execução dos cálculos. Assim, os cálculos se limitaram a análise de uma membrana e uma vértebra.

2.2.1. Análise da Membrana

Para o cálculo inicial, foi criada uma malha com as características contidas na Tabela 2. As escolhas desses valores foram relativas ao padrão do programa utilizado, *SolidWorks*, sendo a malha formada pelo sistema apresentada na Figura 23.

Tabela 2-2 – Configuração da Malha dos Testes

Configuração da Malha			
Tipo	Tamanho Global (mm)	Tolerância	Pontos Jacobianos
Padrão	1,98351	0,0991754	16

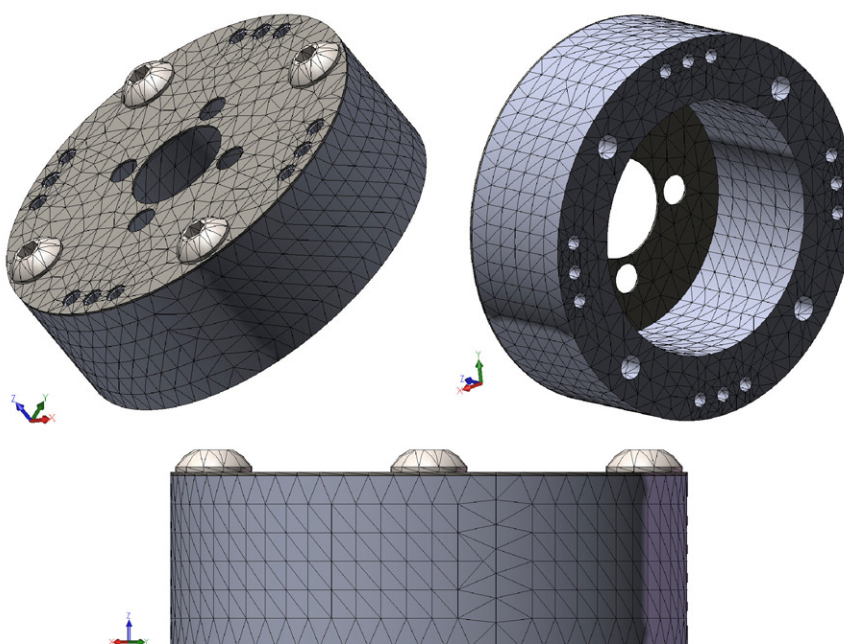


Figura 23 – Malha Gerada para o Cálculo da Membrana

A força aplicada na membrana foi de 100N com direção no eixo z e sentido em -z. Os furos de fixação da membrana, bem como toda a estrutura do anel foram definidos como fixos, conforme ilustra a Figura 24, uma vez que a rigidez do anel é muito maior que a da membrana.

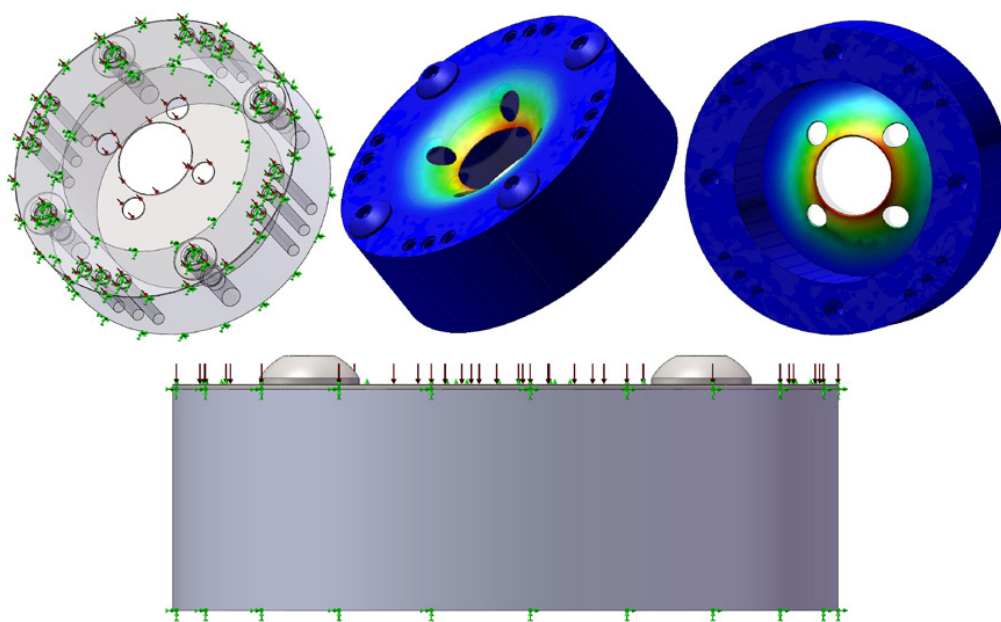


Figura 24 – Forças e Deformação o Cálculo da Membrana

Este estudo apresentou o resultado relacionado à aplicação de uma força distribuída de 100N ao longo da membrana fixada em um anel, a qual realiza um deslocamento máximo aproximado de 0,2506mm na direção de aplicação da força. Como existem 24 membranas, suas deformações são acumuladas e geram deslocamentos significativos.

2.2.2. Cálculo de Rigidez para Vértebra

Para o cálculo com a vértebra, foi criada uma malha com as características contidas na Tabela 2. A malha formada pelo sistema é apresentada na Figura 25. Pode ser percebida a inclusão de 4 pinos na extremidade da vértebra. Estes batentes são as representações dos *stop sleeves* para terminações dos tendões.

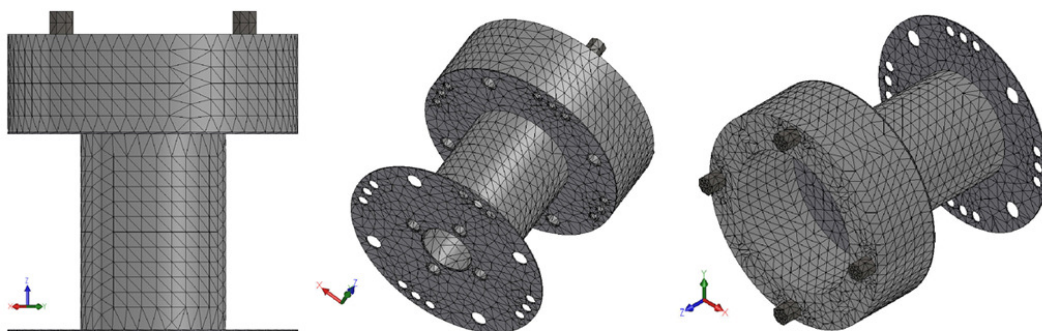


Figura 25 – Malha Gerada para o Cálculo da Vértebra

Como as forças aplicadas nas vértebras são provenientes dos tendões, as análises das forças seguiram este preceito na modelagem. Os resultados são descritos a seguir.

2.2.2.1. Deslocamento no eixo Z

Igualmente ao teste anterior, foi aplicada uma força de 100N distribuída nos 4 batentes na direção do eixo $-z$. As laterais da membrana inferior e seus pontos de fixação foram definidos como fixos para análise. Os resultados referentes ao deslocamento podem ser encontrados na Figura 26. Os parâmetros da malha seguiram os valores da Tabela 2.

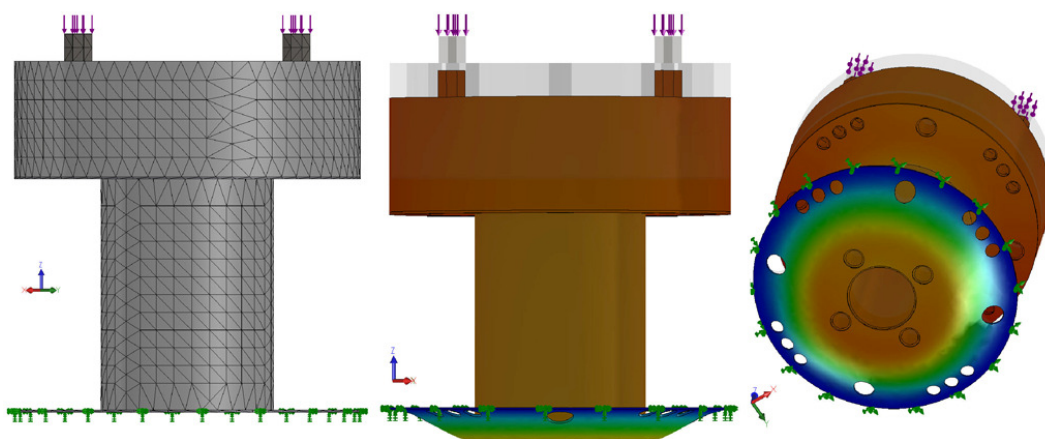


Figura 26 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.1

O deslocamento para este caso foi de 0,3483 mm. A rigidez encontrada para este cálculo foi de $2,39.10^6$ N/m. A rigidez é elevada, mas condiz com o esperado onde o deslocamento na direção de z é pequeno. Entretanto, por ser uma análise linear, quanto maior a força aplicada, maior o deslocamento e consequentemente, ao se analisar o elo completo ou mesmo o manipulador completo os deslocamentos se somam, gerando um deslocamento total satisfatório.

2.2.2.2. Deslocamento Rotacional

Como o sistema é axi-simétrico, para este cálculo, as análises feitas para o eixo x foram assumidas idênticas para o eixo y. Igualmente ao teste anterior, foi aplicada uma força de 100N, porém agora aplicada em um batente na direção perpendicular ao eixo x. Os pontos de fixação foram os mesmos do sub-item anterior. Os resultados do deslocamento são apresentados na Figura 27. Os parâmetros da malha foram os valores da Tabela 2.

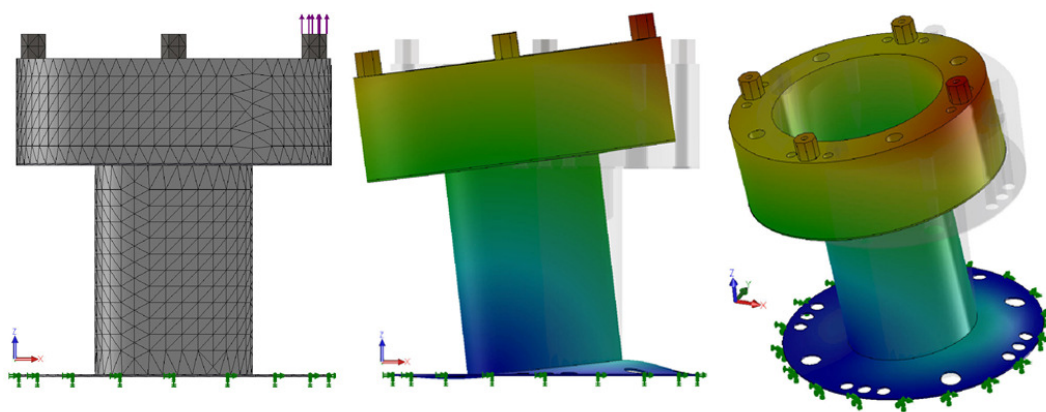


Figura 27 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.2

O deslocamento resultante para este caso foi de 0,1449 mm, com componente x de 0,1175 mm, erro residual em y de $2,467 \times 10^{-4}$ mm e com componente z de 0,0808 mm. A rigidez encontrada para este cálculo foi de

$1,38 \cdot 10^4$ N/(m.rad). A rigidez é mais baixa (comparando com a do sub-item 2.2.2.1), o que já era esperado e desejado, uma vez que os maiores deslocamentos serão realizados nas direção x e y. Com esta deformação e com as forças e as restrições aplicadas, pode-se encontrar um ângulo aproximado de $34,51^\circ$ para a curvatura da vértebra, sob 100N em apenas um dos tendões.

No capítulo seguinte o manipulador proposto é modelado cinematicamente, e os parâmetros de rigidez obtidos por Elementos Finitos são usados no cálculo de seu equilíbrio estático.