

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Nota final
8,8 (oitos e oit)

hsm

Projeto Mecânico e Construção de módulos para Robôs Binários Hiper-Redundantes

Renato Vergueiro Otake

São Paulo
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

**Projeto Mecânico e Construção de módulos para Robôs Binários Hiper-
Redundantes**

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia

Renato Vergueiro Otake

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Lobo Lustosa Cabral

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

São Paulo
2005

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011847

494528

FICHA CATALOGRÁFICA

Otake, Renato Vergueiro
Projeto mecânico de módulos para robôs binários hiper-re-
dundantes / R.V. Otake. – São Paulo, 2005.
78 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1.Robôs 2.Projeto mecânico I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e
de Sistemas Mecânicos III.t.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Eduardo Lobo Lustosa Cabral que orientou este trabalho.

Aos colegas do laboratório pelas discussões e sugestões que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do laboratório de máquinas operatrizes que auxiliaram na usinagem das peças de alumínio para a construção do protótipo.

Aos meus pais Eliany Maria Vergueiro e Carlos Otake que sempre apoiaram os meus estudos.

Resumo

Recentemente esforços significativos têm sido feitos na área de robótica para desenvolver componentes robóticos simples, robustos, leves, “baratos”, de fácil controle e que realize trabalhos complexos. Sistemas binários hiper-redundantes têm sido estudados para satisfazer essas necessidades. Nesses sistemas os atuadores se comportam de forma binária, ou seja, assumem somente dois estados (ativo ou não ativo), assim, são capazes de movimentos discretos e precisos sem a necessidade de realimentação. Esses tipos de robôs devido sua alta redundância são bem adaptados a ambientes confinados ou com muitos obstáculos. Esse trabalho apresenta as estruturas que os robôs hiper-redundantes podem assumir, um estudo da cinemática e das forças no sistema. O módulo estudado é para um robô de pequeno porte de aproximadamente 1,5m com capacidade de carga de aproximadamente 5 Kg.

Abstract

Recently efforts have been made to build robots that are simple, robust, lightweight, inexpensive, easy control to perform complex works. Binary hyper-redundant system attends these requirements. Due to their high redundancy these systems are well suited for operation in highly constrained environments. This work presents a cinematic and static analysis for a binary hyper-redundant robot with 10 modules.

Índice

Lista de Figuras.....	6
Lista de Tabelas.....	8
1-Introdução.....	9
2-Objetivo.....	11
3-Fundamentação Teórica.....	11
4-Materiais e Métodos.....	17
5-Atuadores.....	17
5.1-Atuadores Elétricos.....	18
5.1.1-Shape Memory Alloy (SMA).....	18
5.1.2-Motor Elétrico.....	20
5.2-Atuadores Pneumáticos e Hidráulicos.....	25
5.2.1-Músculo Pneumático.....	27
6-Estudo da Cinemática.....	27
6.1-Notação de Denavit-Hartenberg.....	29
6.2-Módulo do Robô Hiper-redundante.....	31
7-Estudo das forças.....	33
8-Resultados.....	34
8.1-Resultado da análise cinemática.....	35
8.2-Resultado da análise de forças.....	38
9-Discussão dos Resultados.....	40
10- Projeto Mecânico.....	42
10.1-Equilíbrio de Forças.....	44
10.2-Dimensionamento da base.....	47
10.3- Outros dimensionamentos.....	50
11- Fabricação.....	51
Anexos I - Algoritmo para se obter as posições do módulo terminal (cinemática.m).....	52
Anexo II - Funções que são implementadas pelo algoritmo cinemática.m.....	54
II.1- Transvariavel.m.....	54
II.2- Thomogenea.m.....	54
II.3- Contador.m.....	55

Anexo III - Algoritmo para o calculo do momento na base do robô	
(CalculoMomento.m)	56
Anexo IV - Simulação no visual Nastran 4D 2003.	59
IV.1- Construção do Modelo	59
IV.2- Simulação da deformação.....	61
Anexo V - Catálogo da junta universal.....	63
Anexo IV – Desenhos de fabricação.....	64

Lista de Figuras

Figura 1- (a) Robô contínuo e (b) Diagrama desse robô projetado por Cieslak Morecki [7].....	12
Figura 2- (a) Robô serpente desenvolvido por Paljug et al [8]; (b) Robô “tromba de elefante” desenvolvido por Walker e Hannan [3]; (c) Robô tipo cobra apresentado por Chirikjian e Burdick [4].	13
Figura 3- Vértices com dois graus de liberdade unidas por uma junta universal.	14
Figura 4- Plataforma de Stewart [10].....	15
Figura 5-Mudança na estrutura cristalina dos SMAs [11].	19
Figura 6-Gráfico de histerese dos materiais SMAs [11].	20
Figura 7-Curva Característica do Motor de Corrente Contínua.	21
Figura 8-Esquema de funcionamento de um motor Brushless.....	22
Figura 9-Esquema básico de operação do motor de passo.	22
Figura 10-Curva de torque x velocidade em motores de passo.	23
Figura 11-Curva característica do motor síncrono [14].	24
Figura 12-Variação da potência ativa e conjugado com ângulo de potência [14].....	24
Figura 13 – Curva Característica do Motor de Indução 	25
Figura 14-Músculo Pneumático série MAS (Festo)[16].	27
Figura 15-Notação de Denavit-Hartenberg.....	30
Figura 16 - Sistemas de coordenadas de acordo com D-H para os módulos do robô.	31
Figura 17-Diagrama das forças no robô hiper-redundante em projeto.....	34
Figura 18-Nuvem de pontos para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 20°.....	35
Figura 19-Nuvem de pontos para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 30°.....	36
Figura 20-Nuvem de pontos para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 45°.....	36
Figura 21-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 20°.....	37

Figura 22-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 30°.....	37
Figura 23-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 45°.....	38
Figura 24- a) Montagem dos módulos com uma base entre juntas b)Montagem dos módulos com duas bases entre juntas.	40
Figura 25-União do módulo i-1 com o módulo i.....	40
Figura 26 – (a) Módulo com rotação de 30° na junta. (b) Módulo com rotação de 45° na junta.	43
Figura 27 – Módulo com rotação de 30° na junta com a distância entendida entre base inferior e junta de 15 mm.....	43
Figura 28-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 30° (nova configuração).....	44
Figura 29 – Esquema de forçar na base superior do módulo.	44
Figura 30 – Decomposição do vetor P no sistema de coordenadas da base (xyz).....	45
Figura 31 - Modelo da base criado no programa Visual Nastran 4D 2005.....	47
Figura 32 – Peça discretizada e tensão distribuída para o tamanho da malha de 0,06m.	48
Figura 33 – Peça discretizada e tensão distribuída para o tamanho da malha de 0,02m.	49
Figura 34 – Peça discretizada e tensão distribuída para o tamanho da malha de 0,03m.	49
Figura 35 – Esquema da fixação por solda entre a base e haste.....	50
Figura 36 – Desenho dimensional da junta que será utilizada no projeto.	50
Figura 37 – Módulo do robô hiper-redundante construído.....	51
Figura 38 – Detalhe do módulo construído.	51
Figura 39- Construção do modelo da base no Visual Nastran.....	59
Figura 40 – Passos para se colocar a restrição na base.....	60
Figura 41 – Passos para se colocar o carregamento na base.	61
Figura 42 – Passos para a análise das tensões de Von Misses na base.	62

Lista de Tabelas

Tabela 1- Parâmetros obtidos pela notação D-H para construção da matriz homogênea dos módulos.	32
Tabela 2- Momentos obtidos com a simulação para o caso de somente uma base entre juntas [Kgf.m].	39
Tabela 3- Momentos obtidos com a simulação para o caso de duas bases entre juntas [Kgf.m].	39
Tabela 4 - Resultados obtidos na simulação de momento para rotação de 45° nas juntas e considerando uma base de espessura t entre juntas.	42

1-Introdução

Recentemente significativos esforços têm sido feitos na área de robótica para se desenvolver componentes robóticos simples, robustos, leves, “baratos”, de fácil controle e que realize trabalhos complexos [1,2].

Sistemas Binários Hiper-Redundantes têm sido estudados para satisfazer essas necessidades. Nesses sistemas os atuadores se comportam de forma binária, ou seja, assumem somente dois estados (ativo ou não ativo), assim, são capazes de movimentos discretos precisos sem a necessidade de realimentação [1,2].

Robôs industriais convencionais são baseados no modelo do braço humano, apresentando um pequeno número de ligamentos rígidos conectados através de articulações. No último ligamento, é conectada uma ferramenta (efetuador) que interage com o ambiente. Como apenas o efetuador interage com o meio, os outros componentes possuem somente a função de posicionar o efetuador num ponto do espaço. Esse tipo de configuração funciona muito bem em ambientes abertos e bem estruturados [3], mas possui dificuldade de movimentação em ambientes apertados ou cheios de obstáculos.

Os robôs industriais atuais normalmente apresentam cerca de 5 a 8 graus de liberdade com articulações motorizadas. O grau de liberdade é a capacidade de movimentação de um corpo sólido em relação a um referencial. Por exemplo, para localizar um corpo num ponto do espaço são necessários 6 graus de liberdade, três para posição e três para orientação. Um sistema que possua mais que seis graus de liberdade é considerado redundante, pois possui mais graus de liberdade do que é necessário para posicionar e orientar um corpo em qualquer ponto do espaço.

Uma estrutura é considerada hiper-redundante, na literatura, quando apresenta inúmeros graus de liberdade redundantes. Esse tipo de estrutura pode ser comparado com a morfologia de cobras, tentáculos e trombas de elefantes. Como se trata de estruturas altamente articuladas, são bem adaptadas a ambientes confinados ou com muitos obstáculos [4], assim, robôs com esse tipo de estrutura tem um grande potencial para um aumento de eficiência sobre os robôs tradicionais em termos de evitar obstáculos e capacidade de manipulação. Além disso, o conceito hiper-redundante pode ser generalizado para novas formas de locomoção robótica semelhante à locomoção de minhocas e cobras [4,5].

Um exemplo típico para o desenvolvimento de robôs hiper-redundantes está na área automotiva em uma linha de soldagem de carrocerias de automóveis. Atualmente, essa operação é realizada em diversas etapas, e em cada uma delas são necessários muitos robôs. Os robôs industriais atuais, com ligamentos rígidos e poucos graus de liberdade, apresentam uma grande limitação de movimento e limitada capacidade de evitar obstáculos. A presença de obstáculos, que no caso consiste na própria carroceria sendo soldada, limita a movimentação dos robôs, exigindo assim, uma quantidade maior de robôs, cada um posicionado em um local diferente, de modo que todos os pontos de solda possam ser alcançados. A utilização de robôs hiper-redundantes para realizar essa operação exigirá um número muito menor de robôs, pois estes têm a capacidade de manobra e de evitar obstáculos muito maior, ou seja, um robô hiper-redundante alcança um número muito maior de pontos de solda. Assim, ao exigir um número menor de robôs, a mesma operação de soldagem sendo realizada por robôs hiper redundantes, teria um custo muito menor de investimento.

Outra aplicação para robôs hiper-redundantes seria na área médica para o posicionamento de ferramentas cirúrgicas, já que esses dispositivos são capazes de realizar tarefas mais complexas devido sua maior mobilidade em comparação com os robôs atuais. Até mesmo em missões espaciais, onde os robôs devem realizar tarefas como mineração, realização de experimentos ou mesmo construção de instalações para exploradores humanos o emprego das estruturas hiper-redundantes esta sendo estudado [1].

Diversos robôs hiper-redundantes estão sendo projetados e construídos com muitos tipos de formas diferentes, o mais popular é o uso de uma estrutura semelhante a uma espinha dorsal. Devido a essas novas possibilidades de projetos Davies e Robinson desenvolveram três classificações para os robôs [6].

A primeira classe, conhecida como robôs discretos, pertence aos robôs convencionais que possuem um pequeno número de ligamentos rígidos conectados através de articulações e possuem poucos graus de liberdade. Com o aumento do número de manipuladores e junções discretas ocorrem o aumento da redundância, assim, entrando na segunda classificação, a dos robôs serpentinos. Os sistemas hiper-redundantes começam a fazer parte dessa classe e os robôs se assemelham a morfologia de cobras. Esses robôs têm a característica de somente operarem no plano, permitindo

principalmente de criar movimentação em qualquer tipo de terreno, além de não possuir praticamente nenhuma capacidade de carga. A última classificação é conhecida como robôs contínuos, nessa classe os robôs não possuem junções discretas nem ligações rígidas como nas classificações anteriores, o manipulador dobra-se continuamente ao longo de seu comprimento, sendo similar a tentáculos de polvos ou trombas de elefantes.

2-Objetivo

O objetivo deste trabalho é projetar e construir módulos de um robô hiper-redundante com uma capacidade de carga e repetibilidade de um robô industrial de pequeno porte, ou seja, com capacidade de carga de aproximadamente 5 Kg e repetibilidade de 1 mm. Além disso, esse robô deverá ser mais leve e não necessitará de sistemas de realimentação. Ele deverá ter a capacidade de operar no mesmo ambiente dos robôs industriais tradicionais de forma a substituir vários robôs tradicionais em razão de seu alto grau de manobrabilidade e capacidade de evitar obstáculos.

Esse robô terá uma estrutura do tipo de coluna vertebral com pequenas vértebras. O número de graus de liberdade estipulada para cada vértebra são dois graus de liberdade. Com isso, um robô industrial de pequeno porte possuiria cerca de dez vértebras, dando assim, vinte graus de liberdade. Contudo, um estudo mais detalhado da mobilidade deste robô será realizado de forma a definir o número necessário de graus de liberdade para cada vértebra.

3-Fundamentação Teórica

Ao se tentar imitar o movimento de animais tais como tromba de elefante, tentáculos de polvo, cobras, etc., surgem diversos problemas de engenharia. Entre esses problemas os mais relevantes são: (1) tipo de estrutura do robô; (2) método de atuação para gerar os movimentos desejados; (3) rigidez da estrutura; (4) cinemática do sistema, ou seja, como relacionar o movimento dos atuadores com o movimento de todas as partes do robô, de forma a permitir um planejamento do movimento e seu controle; (5) planejamento dos movimentos de forma a coordenar os inúmeros graus de liberdade e obter os movimentos desejados; (6) controle do robô de forma que o movimento planejado seja realizado; (7) sistema de sensoramento.

Neste projeto somente os quatro primeiros problemas serão estudados. Os problemas relacionados com controle e sensoramento terão uma solução simplificada, de modo a permitir a comprovação dos princípios básicos desenvolvidos para a estrutura, atuação e cinemática. Um estudo mais detalhado sobre formas eficientes de planejamento, controle e sensoramento do robô a ser desenvolvido poderá ser realizado em trabalhos futuros.

Como visto, existem basicamente dois tipos de estruturas que possibilitam construir um robô hiper-redundante que imita movimentos de cobras, trombas de elefantes ou tentáculos de polvo. Um deles é a construção de uma estrutura contínua flexível (robôs contínuos), a outra é constituída por módulos (robôs serpentinos).

No caso de robôs com estrutura contínua flexível, o movimento de curvatura do robô pode ocorrer em qualquer ponto ao longo da estrutura. Exemplo desse tipo de robô pode ser encontrado no trabalho de Cieslak e Morecki [7], Figura 1.

Teoricamente, neste tipo de robô, o espaço de articulações é infinito, contudo, considerações práticas exigem que estes mecanismos sejam movimentados por um número finito de atuadores. Em geral, os robôs com estruturas contínuas são constituídos por um tubo elástico e por seções independentes na forma de discos, onde estão fixados os tendões que acionam os robôs.

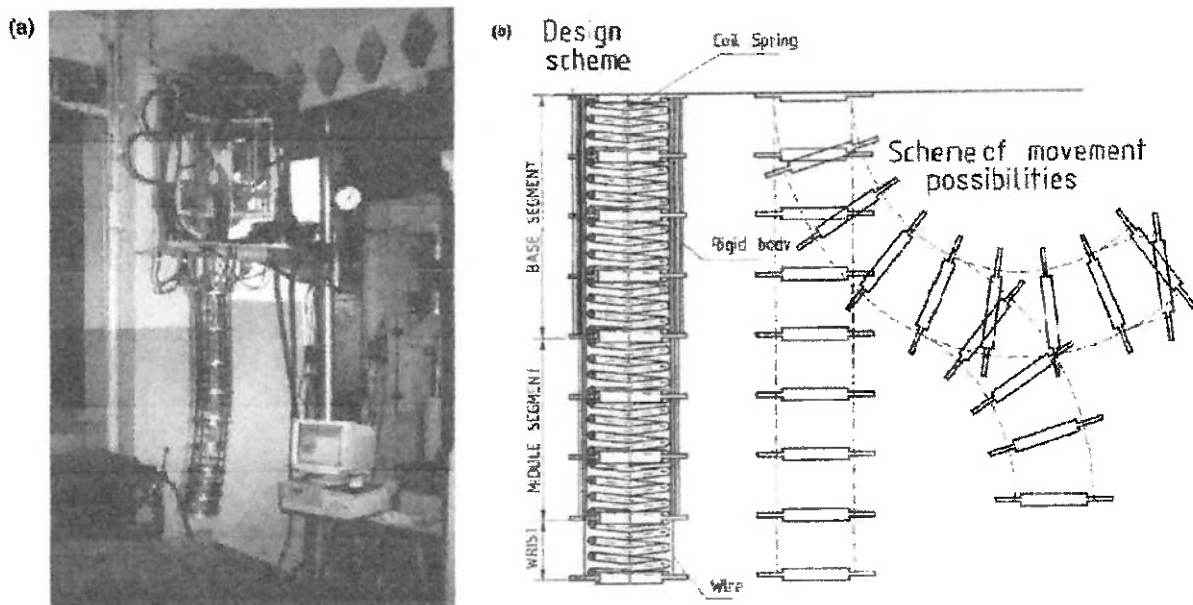


Figura 1- (a) Robô contínuo e (b) Diagrama desse robô projetado por Cieslak Morecki [7].

No caso de robôs com estrutura modular, a curvatura da estrutura ocorre em pontos distintos do mecanismo, com o efeito de “flexibilidade” sendo fornecido por um grande numero de articulações unidas por ligamentos rígidos de pequeno comprimento. Exemplos deste tipo de robô incluem o robô serpente desenvolvido por Paljug et al [8] (Figura 2a), o robô “tromba de elefante” desenvolvido por Walker e Hannan [3] (Figura 2b) e diversos robôs tipo cobra apresentados por Chirikjian e Burdick [4,5] e Mikadis e Kryiakopoulos [9] (Figura 2c). Esse tipo de estrutura tem a vantagem de ser (conceitualmente) uma simples extensão dos projetos tradicionais, assim, passível de ser analisado pelas ferramentas tradicionais. Contudo, o grande número de articulações e de pequenos ligamentos cria dificuldades de peso, atuação e complexidade de análise.

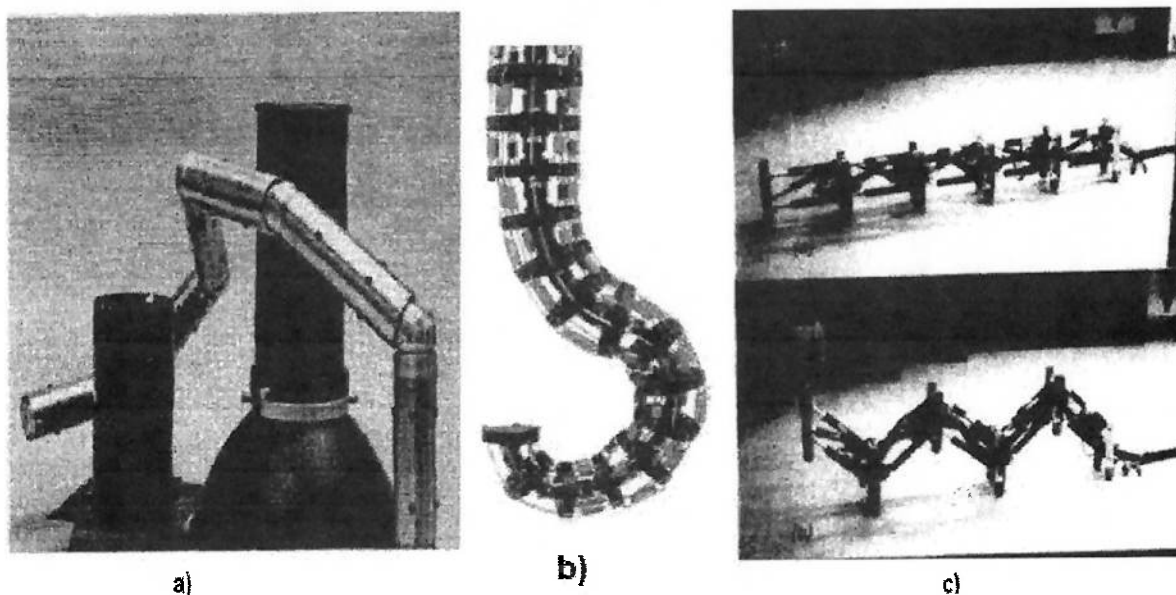


Figura 2- (a) Robô serpente desenvolvido por Paljug et al [8]; (b) Robô “tromba de elefante” desenvolvido por Walker e Hannan [3]; (c) Robô tipo cobra apresentado por Chirikjian e Burdick [4].

Nas estruturas modulares, cada módulo ou vértebra pode ser composto por um ou mais graus de liberdade compondo mecanismos capazes de executar os mais variados movimentos. Em geral os módulos mais simples consistem de uma base fixa e as outras móveis, conectadas por juntas universais ou esféricas, conforme o desenho da Figura 3.

Este módulo apresenta dois graus de liberdade de rotação. Módulos mais complexos podem ser construídos a partir de mecanismos do tipo Plataforma de Stewart [10].

A Plataforma de Stewart é um mecanismo de cadeia cinemática paralela composto de uma base inferior fixa e uma superior móvel, que apresenta até seis graus de liberdade, como mostra a figura 4. Uma grande vantagem de se utilizar a Plataforma de Stewart é a sua capacidade de alongamento, ou um grau de liberdade de translação, criando, assim, um movimento de alongamento da estrutura, que atualmente não está presente em nenhum robô hiper-redundante. Contudo, a Plataforma de Stewart tem desvantagens de não poder ser atuada por tendões ou cabos, exigindo a presença de atuadores lineares, como pistões pneumáticos ou hidráulicos.

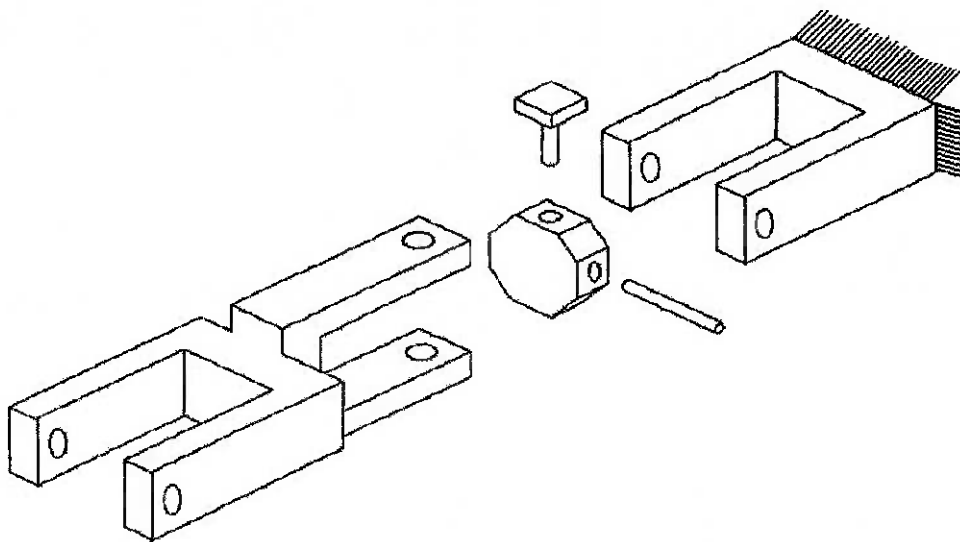


Figura 3- Vértébras com dois graus de liberdade unidas por uma junta universal.

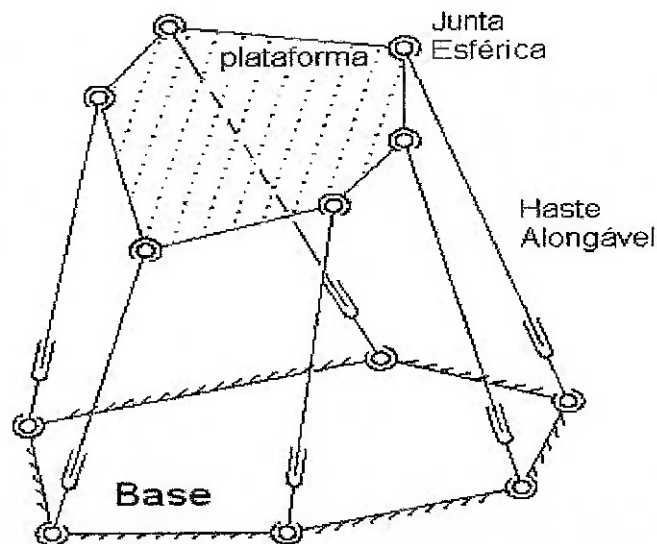


Figura 4- Plataforma de Stewart [10]

Trombas e tentáculos biológicos são feitos quase que inteiramente de músculos e não possuem nenhuma estrutura rígida que forneça suporte. Nesses casos, os músculos fornecem as forças para os movimentos, além disso, eles têm a propriedade de suprir as forças necessárias para o suporte estrutural.

A maior dificuldade em se construir um sistema mecânico equivalente a estes sistemas biológicos é a necessidade de elementos que exerçam o papel dos músculos. Atualmente não existe atuador que se compare tanto em tamanho, força e desempenho com os músculos biológicos. Assim, a tecnologia atual de atuadores é um fator limitante para se tentar reproduzir as características dos músculos e esta é uma questão fundamental no projeto deste tipo de mecanismo.

Duas estratégias de atuação vêm sendo utilizadas: atuação local em cada grau de liberdade ou atuação remota. A atuação local vem sendo utilizada em trabalhos como o de Chirikjian e Burdick [4,5] e de Migadis e Kryiakopoulos [9]. Apesar de ser conceitualmente simples esse tipo de atuação apresenta graves problemas. Motores elétricos são grandes e pesados e, assim, ter que posicionar e mover um grande número destes motores distribuídos ao longo da estrutura que não é nada atrativo. O uso de tipos alternativos de atuadores, tais como, os chamados músculos artificiais, descritos por Vasina [11], para atuação local (como é encontrado nos sistemas biológicos) é uma possibilidade atraente. Uma outra alternativa seria o uso de atuadores lineares (pistões)

hidráulicos, mas estes tipos de atuadores são muito grandes, exigindo assim, primeiramente o desenvolvimento de atuadores hidráulicos e válvulas em miniatura para viabilizar a fabricação do robô, o que desviaria o foco deste projeto.

Na atuação remota, cabos fornecem uma forma extremamente simples de transmitir força para a estrutura, permitindo ainda que o mecanismo seja relativamente leve, na medida em que os atuadores não estão localizados na estrutura “flexível”. Os cabos são utilizados para a atuação dos mecanismos desenvolvidos por Walker e Hannan [3] e motores elétricos são usados como atuadores. Um aspecto importante a ser considerado em sistemas atuados remotamente por cabos é o roteamento dos mesmos ao longo da estrutura.

Um aspecto de grande relevância para projeto de robôs hiper-redundantes é como fornecer rigidez estrutural. No caso do robô desenvolvido por Walker e Hannan, que consiste em uma estrutura continua similar a uma de tromba de elefante, a rigidez é dada por molas posicionadas ao longo da estrutura conectando um módulo ao seguinte.

Um outro modo de fornecer rigidez para o caso de estruturas modulares é equipar todos os graus de liberdade de cada módulo com um atuador. Dessa forma, a rigidez final da estrutura será definida pela rigidez dos atuadores (motores, transmissão e cabos) e pelo sistema de controle do sistema. Além disso, um sistema desse tipo tem condições de ter uma capacidade de carga e precisão de posicionamento comparável às dos robôs industriais convencionais. Contudo o nível de complexidade do sistema aumenta na mesma proporção que o número de graus de liberdade, o que tem limitado até o momento este tipo de solução.

Para cada solução adotada, o robô resultante nos trabalhos desenvolvidos é relativamente leve, altamente manobrável e bastante flexível. Contudo, todos apresentam limitada capacidade de carga e baixa precisão de posicionamento (repetibilidade).

Para utilizar um robô hiper-redundante eficientemente, os seus movimentos devem ser analisados, planejados e coordenados. A análise dos movimentos é realizada através da cinemática, obtendo-se relações algébricas entre posição e velocidade dos eixos dos atuadores com posição e velocidade em todos os graus de liberdade do mecanismo em questão e sendo esta formulação matemática muito conhecida, pode-se encontra-la em muitos livros textos.

4-Materiais e Métodos

O robô hiper-redundante que se pretende construir é do tipo estrutura modular (com vértebras) da classe de robôs serpentinos. Os módulos serão projetados para um robô com comprimento total de aproximadamente 0,75 metros, com cerca de 10 módulos de aproximadamente 7,5 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro cada um. Cada módulo terá 2 graus de liberdade, com isso, a estrutura completa possuirá 20 graus de liberdade.

Nesse projeto todos os graus de liberdade serão atuados. O tipo de atuador utilizado dependerá da análise de forças da estrutura. Para o caso da rigidez estrutural do sistema serão utilizados os próprios atuadores para defini-la.

A precisão de posicionamento desejada para esta estrutura é de 1 mm no último módulo. Nota-se que em mecanismos seriais o erro de posicionamento total pode ser aproximado pela soma dos erros de posicionamento de cada grau de liberdade. No caso tem-se 20 graus de liberdade geometricamente iguais. Assim, o erro total de posicionamento no último módulo é aproximadamente igual a 20 vezes o erro de posicionamento de cada grau de liberdade. Para o erro de 1 mm, o erro máximo de cada grau de liberdade será igual a 0,05 mm. Esta precisão de posicionamento classifica o mecanismo como sendo de alta precisão. São comuns sistemas mecânicos com precisão desta ordem, contudo são caros. Portanto, será estudada a possibilidade de relaxar o objetivo de precisão no protótipo da vértebra com o objetivo de reduzir o custo. Mesmo que relaxando a precisão, o protótipo servirá para analisar os conceitos desenvolvidos e a viabilidade do projeto.

Para operar o mecanismo e verificar o desempenho desse sistema e se os requisitos foram satisfeitos será necessário desenvolver um sistema de sensoriamento e controle. Esse sistema de controle tem o objetivo de somente demonstrar a viabilidade de operação do mecanismo e não de realizar movimentos complexos e planejados, assim, será extremamente simples.

5-Atuadores

Os atuadores são fundamentais para um robô, pois são os dispositivos que convertem diferentes tipos de energia (pneumática, hidráulica, elétrica) em energia mecânica, propiciando o acionamento do movimento das juntas, posicionando as partes móveis do robô no espaço.

É muito importante em um projeto desse tipo se conhecer quais são os atuadores que podem ser utilizados e suas vantagens e desvantagens, já que são esses dispositivos são responsáveis pela movimentação e precisão de posicionamento do robô.

As características desejáveis que o atuador deve possuir na robótica são:

- *Alto torque e força*
- *Alta rigidez estática e dinâmica*
- *Baixa inércia e peso*
- *Movimento de alta qualidade*
 - *Exatidão do movimento*
 - *Repetibilidade*
 - *Resolução*
- *Atendimento a restrição do ambiente de trabalho*

Para esse projeto serão estudados alguns atuadores elétricos, pneumáticos e hidráulicos.

5.1-Atuadores Elétricos

5.1.1-Shape Memory Alloy (SMA)

Em 1932 enquanto o físico sueco Arne Olander trabalhava com um material composto de ouro e cádmio, ele notou que o material se deformava plasticamente quando resfriado e retornava a forma original quando aquecido. Esse fenômeno ficou conhecido como efeito de memória de forma (Shape Memory Effect - SME), e há poucas décadas atrás, pesquisadores vêm descobrindo esse efeito em outras ligas metálicas, polímeros e cerâmicas [11,12].

Shape memory alloy ou material de memória de forma é uma nova classe de material que possui interessantes propriedades mecânicas como efeito de memória de forma, superelasticidade e resistência a ácidos [11].

O efeito de memória de forma nos SMAs é causado por mudanças na estrutura cristalina. A estrutura cristalina pode ser afetada por muitos fatores, na robótica, os fatores relevantes que causam a transformação da estrutura são temperatura e tensão. Durante a transformação a estrutura do material é mudada de acordo com a Figura 5.

Existem basicamente dois tipos de estruturas cristalinas para os SMAs, uma estrutura simétrica conhecida por austenita (análoga ao aço) e uma estrutura com uma organização menos simétrica (ortorrômbica ou tetragonal) chamada de martensita. Muitos tipos de estruturas martensíticas podem surgir de uma estrutura austenítica durante a transformação, mas apenas um tipo de estrutura austenítica pode ser formado da martensita na transformação reversa [11].

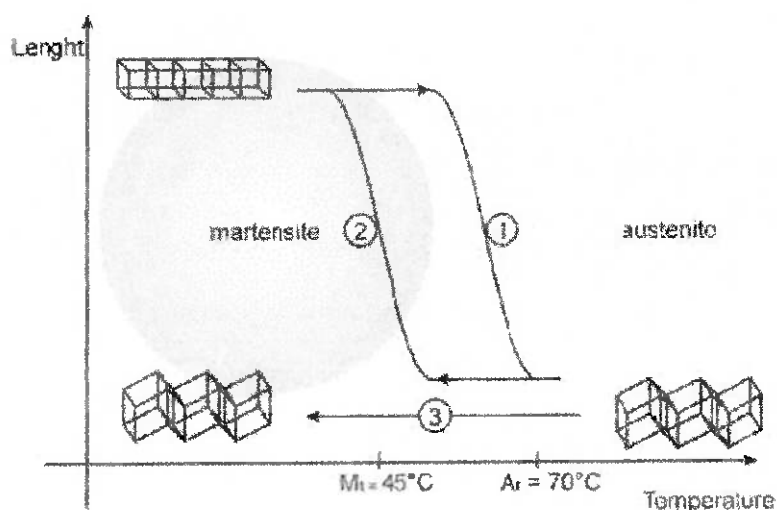


Figura 5-Mudança na estrutura cristalina dos SMAs [11].

A estrutura cristalina se encontra no estado deformado (martensita) quando sua temperatura é inferior a M_t . Nesse estado o comprimento do SMA pode ser alterado em até 10% de seu valor se for aplicado uma tensão. Se o material é aquecido a uma temperatura A_t (linha 1, Figura 5), a estrutura cristalina passa para o estado de não deformado (austenita). Caso a temperatura permaneça próxima a A_t o material permanece em seu estado contraído, se a temperatura estiver abaixo de M_t o material pode ser deformado novamente se aplicado uma tensão (linha 2, Figura 5) ou permanecer no estado contraído se a tensão não for aplicada (linha 3, Figura 5). Quando a temperatura se torna superior a A_t o material perde seu efeito de memória de forma [11].

O processo de transformação da estrutura não é termodinamicamente reversível, existe dissipação de energia por atrito interno e geração de defeitos estruturais. O resultado desse processo é um gráfico de histerese de temperatura ilustrado na Figura 6. O parâmetro de histerese é dado pela composição do SMA e do processo de produção [11].

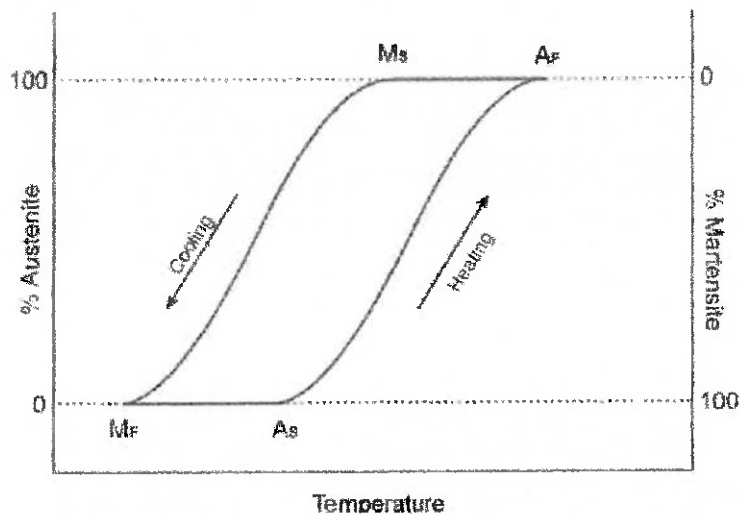


Figura 6-Gráfico de histerese dos materiais SMAs [11].

5.1.2-Motor Elétrico

Os motores elétricos são amplamente usados na robótica devido à disponibilidade de energia elétrica em instalações industriais e seu controle ser fácil, possibilitando movimentos contínuos com alta exatidão e repetibilidade.

Apesar da facilidade de controle, esses atuadores possuem baixa razão torque/massa quando comparada com atuadores hidráulicos. Outra desvantagem é a significativa perda de rendimento por superaquecimento.

Os motores elétricos podem ser classificados quanto ao tipo de alimentação utilizada, como mostra abaixo:

- *Motores de corrente contínua:* Esses tipos de motores são alimentados por uma fonte de energia em corrente contínua. Esse fato limita a aplicação desses tipos de motores, já que a rede elétrica pública opera em corrente alternada. Porém as facilidades de se controlar a velocidade e os altos níveis de torque a baixas rotações garantem o uso desses motores em aplicações industriais como laminadores e acionamentos para posicionamento de cargas mecânicas.

Os motores que fazem parte dessa classe são motores com escova, motores sem escova e motores de passo.

- *Com escova:* Nesses motores o sistema de campo localiza-se no estator e a armadura no rotor. A corrente é transmitida para a armadura através de escovas em contato com o rotor. As escovas utilizadas para transmitir a corrente, devido o

atrito, sofrem desgaste com o tempo, assim sendo uma desvantagem desse tipo de motor. Outro problema, que se torna sério em altas rotações, é o faiscamento entre o rotor e a escova, principalmente em ambientes com atmosferas explosivas.

Esses motores são de fácil controle devido à característica linear de sua curva torque-rotação, assim sendo facilmente controláveis. A Figura 7 ilustra uma curva característica de um motor de corrente contínua. Pode-se observar que o torque decai linearmente com o aumento da velocidade.

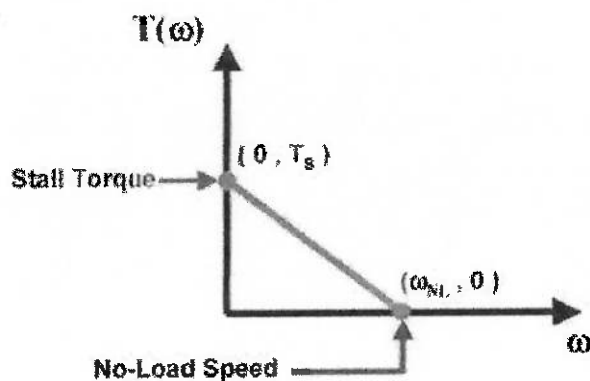


Figura 7-Curva Característica do Motor de Corrente Contínua.

- *Sem escova (Brushless)*: Nesses motores o rotor é constituído de um ímã permanente assim não é preciso usar escovas nem comutadores. Os enrolamentos localizados no estator produzem uma variação temporal no campo magnético de modo que este gire ao longo do estator, fazendo com que o rotor, que acompanha o campo, se movimente. Para criar o campo girante é preciso que inversores controlem o chaveamento das bobinas por meio de sinais enviados por sensores de posição situados no rotor (encoders ópticos ou magnéticos) [13].

A Figura 8 ilustra o funcionamento de um rotor brushless com três bobinas. Cada bobina está defasada em 120° e o campo magnético resultante das bobinas e o campo magnético do ímã estão representados na Figura 8 respectivamente como sendo B_{estator} e B_{rotor} .

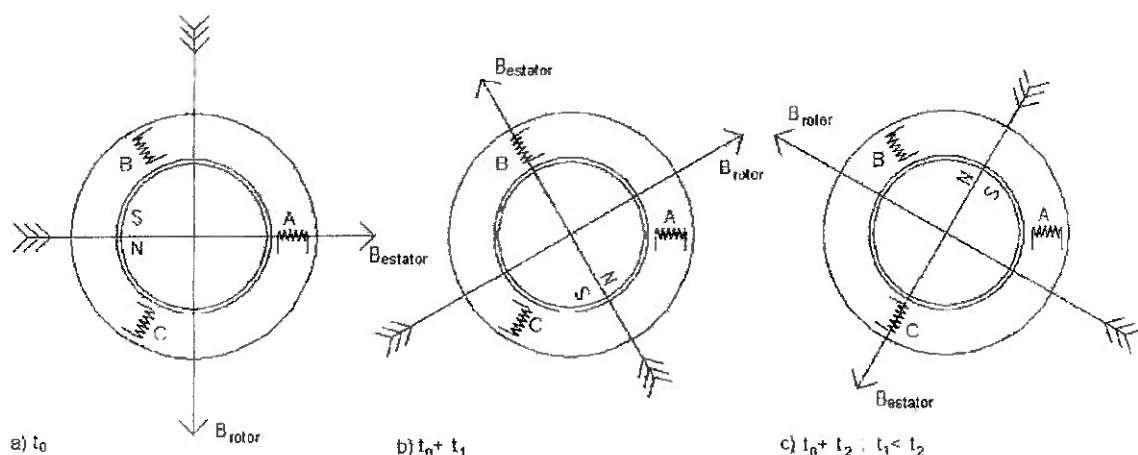


Figura 8-Esquema de funcionamento de um motor Brushless.

- *Passo*: Esses motores são bastante conhecidos por poderem ser controlados diretamente por computadores, microprocessadores ou controladores programáveis. A movimentação do eixo é dada por passos, onde cada passo ocorre quando um pulso de comando é recebido (Figura 9). Devido seu funcionamento é possível se conhecer a posição do eixo dado o numero de pulsos de controle, sem a necessidade de fechar a malha. A Figura 10 mostra a curva de torque pela velocidade nos motores de passo.

Apesar de o motor funcionar em malha aberta, em algumas aplicações é necessário se fechar à malha, pois para certos valores de velocidade (velocidades muito altas) o movimento do rotor pode se tornar oscilatório e instável. Além disso, esse tipo de motor não suporta picos de torque, pois perde o sincronismo.

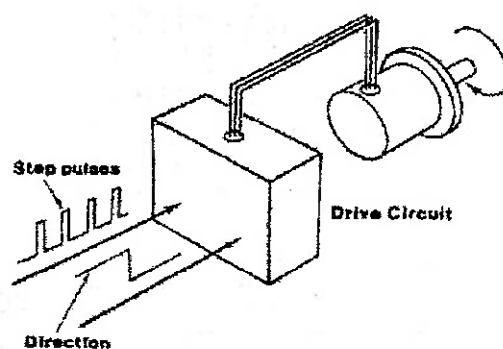


Figura 9-Esquema básico de operação do motor de passo.

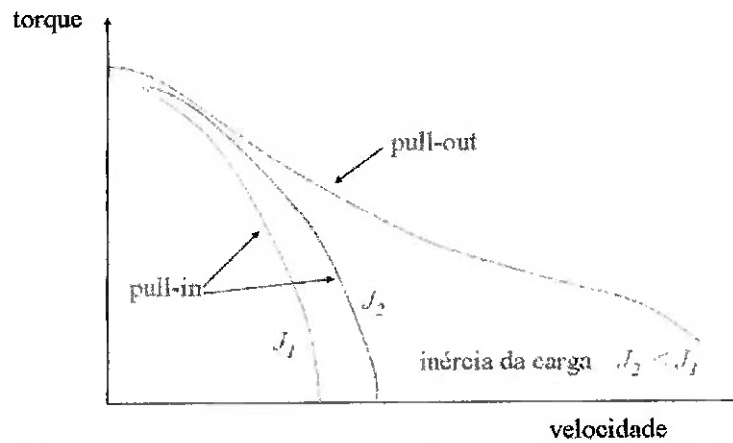


Figura 10-Curva de torque x velocidade em motores de passo.

- Motores de corrente alternada: Essa modalidade de motores é a mais comum devido à disponibilidade da fonte de alimentação (corrente alternada) e pela própria simplicidade de operação e construção, possibilitando um amplo campo de aplicação e confiabilidade a baixo custo.

Basicamente o torque nesse tipo de motor é gerado por um campo magnético girante, geralmente com frequência da rede de alimentação, produzido por bobinas situadas ao longo do estator energizadas por fontes de corrente alternada defasadas uniformemente.

Os motores que fazem parte dessa classe são motores síncronos e de indução.

- Síncrono: Nesses motores os pólos do rotor seguem o campo girante imposto ao estator pela rede de alimentação, assim a velocidade do motor é a do campo girante.

A curva característica para os motores síncronos pode ser visto na Figura 11. O maior valor do conjugado que o motor pode fornecer está ligado à máxima potência que pode ser cedida antes da perda de sincronismo (Figura 12) [14].

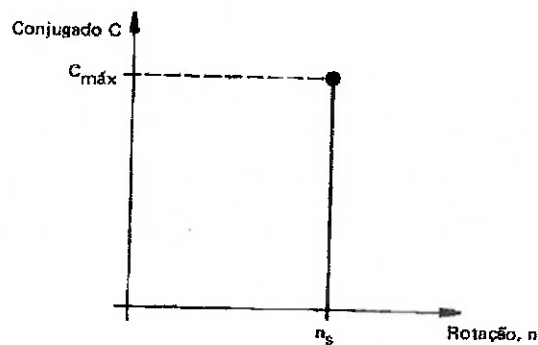


Figura 11-Curva característica do motor síncrono [14].

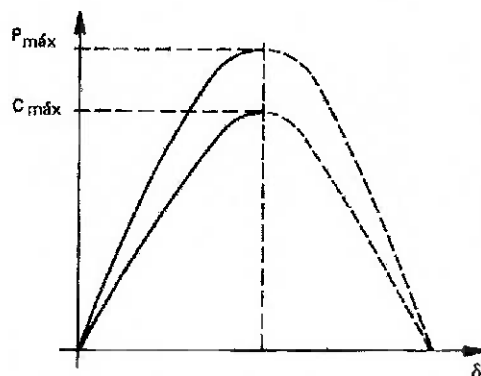


Figura 12-Variação da potência ativa e conjugado com ângulo de potência [14].

Quando o motor está funcionando em vazio, nenhum conjugado é solicitado a ele, ao se aplicar um pequeno conjugado resistente externo ao motor, este, para manter a velocidade síncrona, reagirá com um conjugado igual e contrario ao aplicado. Isso só é possível com o ângulo de potência δ for diferente de zero (δ - Medida do atraso da distribuição de fluxo dos pólos em relação à distribuição do fluxo imposta pelas correntes da armadura). Conforme aumenta a solicitação do conjugado no eixo do motor, maior será o ângulo δ . Quando δ atingir 90° elétricos, atingirá o limite da estabilidade estática do motor, e este para de funcionar devido à perda de sincronismo [14].

Utilizando um inversor de frequência variável é possível controlar a velocidade do motor síncrono com precisão em malha aberta. Caso aja perda de sincronia, devida torques excessivos devido à carga, o controle deve ser feito em malha fechada por meio de sensores de posição do rotor. Assim quando o rotor diminui de velocidade devido ao aumento da carga, a frequência fornecida ao

estator reduz de forma a manter o motor em sincronia com o campo girante (Motor auto-sincronizado ou servo-ac).

- Indução: Neste motor o campo girante roda a velocidade síncrona. Para o motor girando em vazio e sem perdas o rotor teria a mesma velocidade do campo. Quando se aplica uma carga no eixo o rotor diminuirá a velocidade, a diferença de rotação entre o campo girante e o rotor, conhecida como escorregamento, produz uma força eletromotriz induzida proporcional a essa diferença, assim, se a velocidade é igual a do campo girante a força induzida é nula e se o rotor está estacionário a força atinge seu valor máximo [14].

A curva característica do motor de indução (rotor em gaiola) pode ser visto na figura 13. O torque para baixo escorregamento pode ser dado por $T = kBi$ e para alto escorregamento por $T = kBi \cos(\phi)$, onde k é uma constante que leva em conta a geometria e o numero de condutores e ϕ diferença de fase entre corrente e força eletromotriz induzida no rotor.

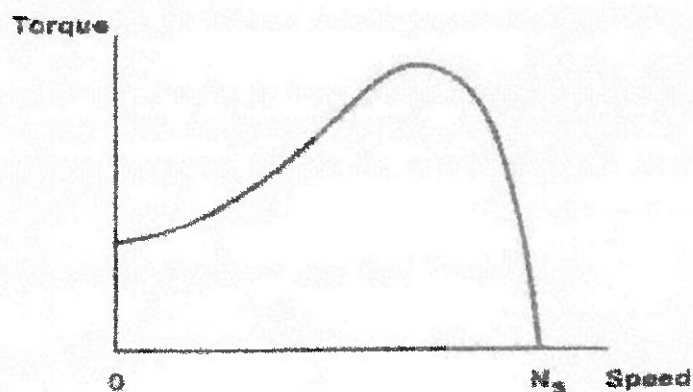


Figura 13 – Curva Característica do Motor de Indução

5.2-Atuadores Pneumáticos e Hidráulicos

Motores elétricos podem ser utilizados em inúmeras aplicações, mas existem situações em que a energia pneumática ou hidráulica se mostra mais eficiente a um custo mais baixo, como é o caso de ambientes onde o uso de equipamentos em que ocorre faíscamento é proibido (plantas industriais no ramo petroquímico, minas de carvão ou células de pintura de automóvel) [13].

Atuadores hidráulicos geralmente são utilizados quando cargas na ordem de até centenas de toneladas estão envolvidas, como por exemplo, em tratores ou guindastes, ou quando se deseja uma alta precisão de posicionamento, como em máquinas de usinagem de precisão, micromanipuladores, etc... Esse tipo de atuador possui uma alta razão de torque-peso e potência-peso, pois o suprimento de alimentação (bomba, motor, reservatório de óleo e filtros) não se localiza no robô, geralmente, é instalado próximo a ele, assim não sendo necessário incluir o peso desses equipamentos no peso do atuador.

A vantagem desses atuadores é que podem operar em ambientes sujos e molhados, possuem resposta rápida aos comandos de controle e inversão de movimento, suportam sobrecargas devido ao uso de válvulas limitadoras de pressão, componentes lubrificados com o próprio fluido de trabalho, possuem a capacidade de armazenar energia por meio de acumuladores e são controlados por servo válvulas atuadas eletricamente com correntes e tensões muito abaixo das requeridas por motores elétricos [13, 15].

Apesar das vantagens, os atuadores hidráulicos possuem muitas desvantagens, pois a implantação e manutenção de um sistema de atuador hidráulico é muito mais cara que um sistema pneumático ou elétrico, apresenta baixo rendimento devido à perda de energia por atrito viscoso nas canalizações, possui perda de eficiência e precisão por vazamentos internos e externos devido folgas no atuador e devido à compressibilidade do fluido (pequena), a presença de bolhas no sistema pode comprometer o seu funcionamento e alterações na temperatura do fluido mudam sua viscosidade e com isso as condições operacionais do sistema [15].

Atuadores pneumáticos são usados com cargas de até uma tonelada em que se desejam movimentos em duas posições limitados a batentes mecânicos, como em máquinas de fixação ou transporte de peças ou quando se deseja altas rotações (milhares de r.p.m.) como no caso de fresadoras pneumáticas ou brocas de dentistas.

Os atuadores pneumáticos, como os hidráulicos, podem operar em ambientes sujos e molhados e também são controlados por servo válvulas atuadas eletricamente com correntes e tensões muito abaixo das requeridas por motores elétricos [13]. Esse tipo de atuador oferece um bom sistema para movimentos lineares a baixo custo, possui fácil armazenamento de fluido e esse fluido não contamina o ambiente, não é preciso linhas de

retorno como em sistemas hidráulicos e elétricos e o acionamento pode sofrer sobrecarga até a parada.

Devido à alta compressibilidade do ar, os atuadores pneumáticos não são muito rígidos e possuem resposta lenta aos comandos. Além disso, o ar apresenta vapor d'água que pode se condensar ao longo da linha e causar corrosão caso não haja um sistema de dreno para retirar a água.

Outro ponto importante é a baixa viscosidade que o ar apresenta, fazendo com que este escoe por pequenos orifícios, assim a chance de ocorrer vazamento é muito grande.

5.2.1-Músculo Pneumático

Músculo Pneumático (Figura 14) é uma classe de atuador pneumático constituído de um sistema de contração de membrana, onde realiza um trabalho semelhante ao músculo humano [16].

Quando submetido a uma pressão, o tubo aumenta a extensão de seu diâmetro, criando uma força de tensão e um movimento de contração na direção longitudinal de até 25% do seu comprimento inicial sem carga. Quando distendido, o músculo desenvolve até dez vezes mais força comparado com um cilindro pneumático convencional de mesmo diâmetro e consome 40% da energia para uma força idêntica.

O músculo pneumático é totalmente impermeável podendo ser utilizado em ambientes agressivos e carregado de pó, serragem ou ate mesmo mergulhado em água [16].



Figura 14-Músculo Pneumático série MAS (Festo)[16].

6-Estudo da Cinemática

Um manipulador robótico é formado por elos e juntas (prismáticas ou rotacionais). Em robôs convencionais, cada par elo-junta forma um grau de liberdade, assim, um robô com n graus de liberdade possui n pares elo-junta [17]. A primeira junta

do robô é a sua base, onde é fixado o sistema de coordenadas inerciais e a última junta esta localizada a ferramenta. Com conhecimento de todas as variáveis articulares (ϕ_i) e todas as variáveis prismáticas (d_i) do sistema é possível determinar a posição da ferramenta no espaço.

Nas aplicações industriais um robô pode ser controlado a partir do sistema de coordenadas da ferramenta. É mais fácil se considerar o deslocamento absoluto da ferramenta ao invés da variação de suas coordenadas articuláveis. Com isso é necessário realizar transformações geométricas para vincular as variáveis articuláveis e as coordenadas absolutas do elemento terminal. A operação que relaciona esses dois espaços é conhecida como transformação de coordenadas.

Para expressar a posição e orientação do elemento terminal em relação ao sistema de coordenadas fixo na base do robô em função das coordenadas generalizadas utiliza-se a expressão:

$$X = f(\theta, d_i) \quad (1)$$

onde: $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ e $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ vetores das posições das juntas; e

$X = (X, Y, Z, \psi, \theta, \phi)$, vetor posição do elemento terminal.

Um sistema articular pode ser representado por n corpos móveis C_i , onde $i=1,2,3,\dots,n$ e um corpo fixo C_0 ligados por n articulações, formando uma estrutura em cadeia.

Para representar a posição e orientação dos vários corpos da cadeia é fixado um referencial o para cada elemento C_i . Pode-se relacionar um determinado referencial $o_{i+1}x_{i+1}y_{i+1}z_{i+1}$ com o seu anterior $o_ix_iz_i$ através da matriz de transformação homogênea $A_i(f(\theta_i, d_i))$, onde O_i^{i-1} é o vetor de coordenadas do referencial o_i no referencial o_{i-1} e R_i^{i-1} é matriz de rotação.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & O_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para a descrição cinemática da cadeia completa fazemos o produto matricial entre as diversas matrizes de transformação. Utilizando a equação (3) que relaciona um ponto i

na coordenada fixa i do elo i com a coordenada $i-1$ do elo $i-1$ podemos extrapolar e obter a equação (4) que relacione esse mesmo ponto a coordenada de referencia fixa a base.

$$X_{i-1} = {}^{i-1}A_i X_i \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X_{i-2} &= A_{i-2} X_{i-1} = A_{i-2} A_i X_i \\ X_{i-3} &= A_{i-2} A_{i-1} A_i X_i \\ X_0 &= A_1 A_2 A_3 \dots A_i X_i \end{aligned} \quad (4)$$

Para um robô com n graus de liberdade, a transformação de coordenadas que relaciona o sistema de referência do elemento terminal com a base é dado pelo produto de todas as matrizes de transformação homogênea.

$$T_j^i = A_{i+1} K A_j = \begin{bmatrix} R_j^i & O_j^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ onde:} \quad (5)$$

$$O_j^i = O_{i+1}^i + \sum_{u=2}^j R_{i+u-1}^i O_{i+u}^{i+u-1} \quad (6)$$

$$R_j^i = R_{i+1}^i \wedge R_j^{j-1}, \quad (7)$$

$$R_{i+1}^i = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$n = [n_x, n_y, n_z]$; $s = [s_x, s_y, s_z]$ e $a = [a_x, a_y, a_z]$ são vetores ortonormais que descrevem a orientação.

6.1-Notação de Denavit-Hartenberg

Para montar a matriz de transformação vai ser utilizada a notação de Denavit-Hartenberg [17], após a obtenção de quatro parâmetros descritos a seguir $(\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i)$.

A notação de Denavit-Hartenberg (D-H) é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com n graus de liberdade. Na Figura 15 podemos visualizar os sistemas de coordenadas que segue a notação D-H.

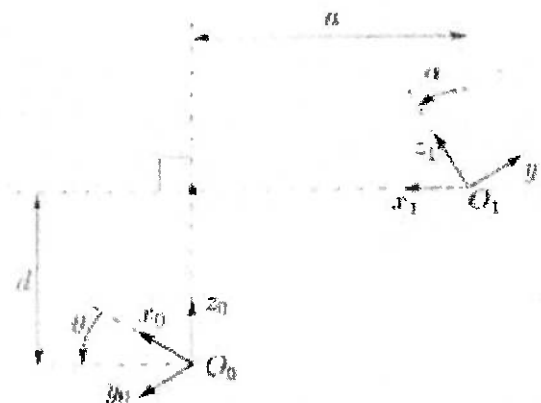


Figura 15-Notação de Denavit-Hartenberg.

A distância entre o referencial O_0 e a intersecção do eixo Z_0 e X_1 dada por d_i , essa distância é diferente de zero somente para juntas prismáticas. O ângulo de junta θ é medido entre o eixo X_0 e X_1 , esse ângulo existe somente em juntas de revolução. Esses parâmetros determinam a estrutura do elo e os parâmetros da junta.

A distancia entre o referencial O_1 e a intersecção do eixo Z_0 e X_1 dada por a . O ângulo entre os dois eixos de rotação Z_0 e Z_1 é o ângulo α . Esses dois parâmetros determinam a posição relativa de elos vizinhos.

A representação D-H resulta numa matriz de transformação homogênea 4x4, representando cada sistema de coordenadas do elo na junta, em relação ao sistema de coordenada do elo anterior. Os sistemas de coordenadas, nesse caso, são estabelecidos obedecendo três regras: (1) O eixo Z_{i-1} é colocado ao longo do eixo de movimento da junta i ; (2) O eixo X_i é normal ao eixo Z_{i-1} e Z_i ; (3) Como o sistema de coordenadas utilizado é destro o eixo Y_i está definido.

Após a definição do sistema de coordenadas D-H, a matriz de transformação homogênea pode ser desenvolvida relacionando os sistemas de referência sucessivos. Podemos expressar um ponto r_i situado no i -ésimo sistema de coordenada no sistema de coordenada $(i-1)$ -ésimo aplicando as seguintes transformações a seguir: (1) Rotacionar o eixo Z_{i-1} num ângulo θ_i para alinhar o eixo X_{i-1} com o eixo X_i . (2) Translação de uma distância d_i ao longo do eixo Z_{i-1} para trazer os eixos X_{i-1} e X_i coincidirem. (3) Translação do eixo X_i , a uma distancia a_i , para trazer as duas origens à coincidência. (4) Rotacionar o eixo X_i , num ângulo α_i , para trazer os dois sistemas de coordenadas à coincidência.

Cada uma dessas quatro operações resulta em matrizes homogêneas de rotação-translação, e fazendo o produto das quatro matrizes obtém-se a matriz homogênea composta ${}^{i-1}A_i$, conhecida por matriz de transformação D-H [17] para sistemas de coordenadas adjacentes.

$${}^{i-1}A_i = R_{z,\theta} Trans_{z,d} Trans_{x,a} R_{x,\alpha} \quad (7)$$

6.2-Módulo do Robô Hiper-redundante

A Figura 16 mostra a cadeia de módulos do robô hiper-redundante que está sendo projetada. Os módulos são conectados uns aos outros por meio de uma junta universal, assim, cada módulo possui dois graus de liberdade de rotação.

Os dois graus de liberdade obtidos nas juntas universais podem ser representados por duas juntas de graus de liberdade únicos com distância entre elas igual a zero, com isso, pode-se aplicar a notação de Denavit-Hartenberg.

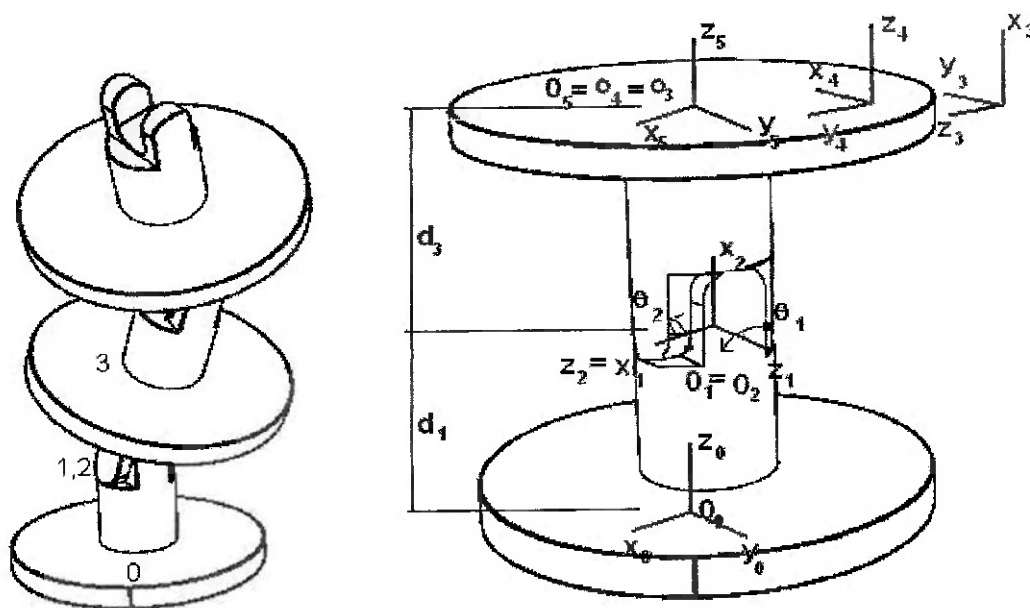


Figura 16 - Sistemas de coordenadas de acordo com D-H para os módulos do robô.

O esquema do sistema de coordenada na notação de D-H pode ser visualizado na Figura 16, e a partir disso retira-se os parâmetros $(\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i)$ para se montar a matriz de

transformação homogênea e conseqüentemente matriz de transformação entre dois módulos.

Referência	0→1	1→2	2→3	3→4	4→5
a_i	0	0	d_3	0	0
d_i	d_1	0	0	0	0
α_i	-90°	-90°	0	90°	0
θ_i	0	θ_1	θ_2	90°	90°

Tabela 1- Parâmetros obtidos pela notação D-H para construção da matriz homogênea dos módulos.

Como já foi visto a matriz de transformação homogênea D-H é dada pela equação (7), para o caso do sistema em questão essa matriz se torna:

$$\begin{aligned}
 {}^0A_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta\cos\alpha & \sin\theta\sin\alpha & a_0\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\alpha & -\cos\theta\sin\alpha & a_0\sin\theta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & d_3\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & d_3\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Com isso pode-se obter a matriz de transformação entre dois módulos consecutivos (13) e as coordenadas da base i em relação à base anterior $i-1$ (14):

$$T_7^0 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & d3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & -d3 \sin \theta_2 \\ -\cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 & d1 - d3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 & d3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & -d3 \sin \theta_2 \\ -\cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & -\sin \theta_1 \cos \theta_2 & d1 - d3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Considerando a posição no ponto i igual a $(0,0,0)$ temos que a sua posição na coordenado $i-1$ é:

$$x_{i-1} = d3 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \quad (15)$$

$$y_{i-1} = -d3 \sin \theta_2 \quad (16)$$

$$z_{i-1} = d1 - d3 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \quad (17)$$

7-Estudo das forças

Para se dimensionar o atuador corretamente é necessário fazer um estudo das forças que atuam na estrutura. Para o caso do robô que está sendo projetado, a análise das

forças será feita para o módulo que solicitará a maior potência do atuador, ou seja, o módulo que corresponde à base do robô.

A Figura 17 ilustra o modelo das forças que será adotado para a análise. As componentes P_{b1} a P_{bn} correspondem ao peso das bases do robô, as componentes P_{j2} a P_{jn} ao peso das juntas, P_{a2} a P_{an} ao peso dos atuadores e a componente P a carga presa à base terminal.

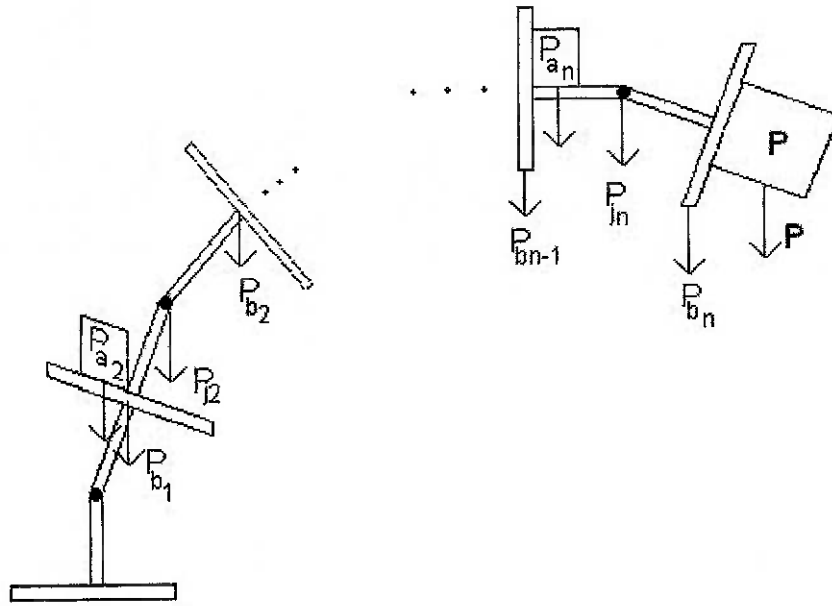


Figura 17-Diagrama das forças no robô hiper-redundante em projeto.

Através do diagrama mostrado na Figura 17 pode-se notar que as força relevante para o dimensionamento dos atuadores é o momento causado pelos pesos das bases, das juntas, dos atuadores e da carga, assim sendo tem-se:

$$M = \sum d.P = \sum_{i=1}^n d_{bi}.P_{bi} + \sum_{i=2}^n d_{ji}.P_{ji} + \sum_{i=2}^n d_{ai}.P_{ai} + d.P, \quad (18)$$

onde: d_{bi} , d_{ji} , d_{ai} , d são as distâncias entre a base fixa e os pesos.

8-Resultados

8.1-Resultado da análise cinemática

Para a estrutura apresentada na análise cinemática e a partir da matriz homogênea entre duas bases desenvolvida na mesma análise foi feito um programa em MatLab (Anexo 1- cinemática.m) que fornece todas as posições que o módulo terminal pode ocupar no espaço. Devido à simetria do problema, o programa guarda apenas um quarto dos pontos em uma matriz de posição para posterior análise.

As simulações foram feitas levando em conta algumas considerações sobre o dimensionamento do projeto do módulo. Essas considerações são: Distância (d_1) entre a base e a junta igual a 5 cm; Distância (d_2) entre a junta e a base igual a 3 cm; Ângulos de rotação das juntas: 20° , 30° e 45° .

Por ser um robô binário a junta só pode possuir dois estados em cada análise $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$ e $\pm 45^\circ$. A Figura 18 é o resultado da simulação para 20° de rotação, a Figura 19 corresponde a 30° de rotação e a Figura 20 corresponde a 45° de rotação.

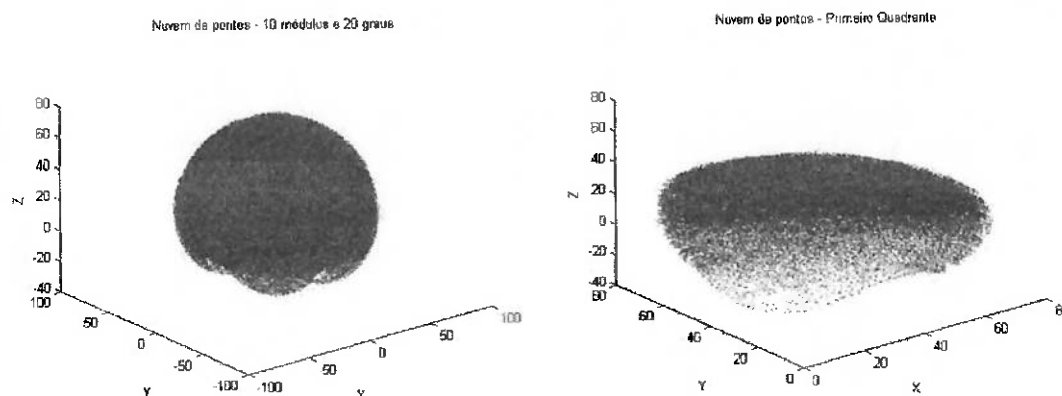


Figura 18-Nuvem de pontos para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 20° .

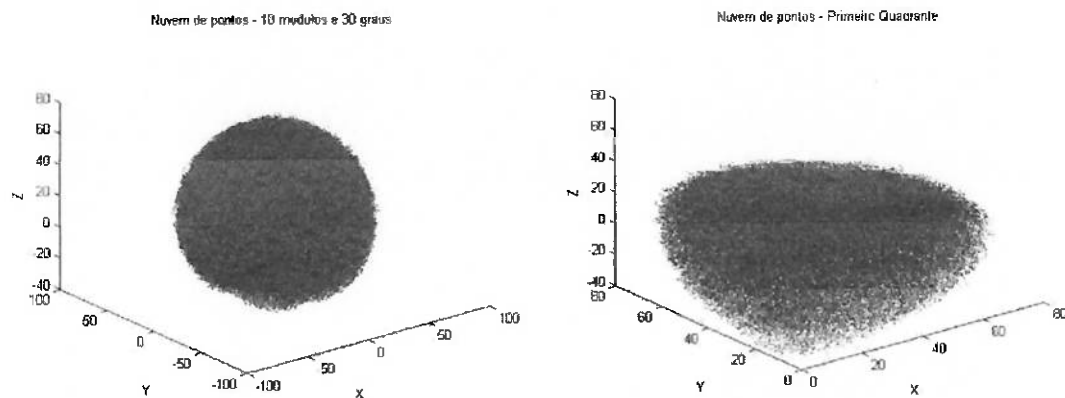


Figura 19-Nuvem de pontos para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 30° .

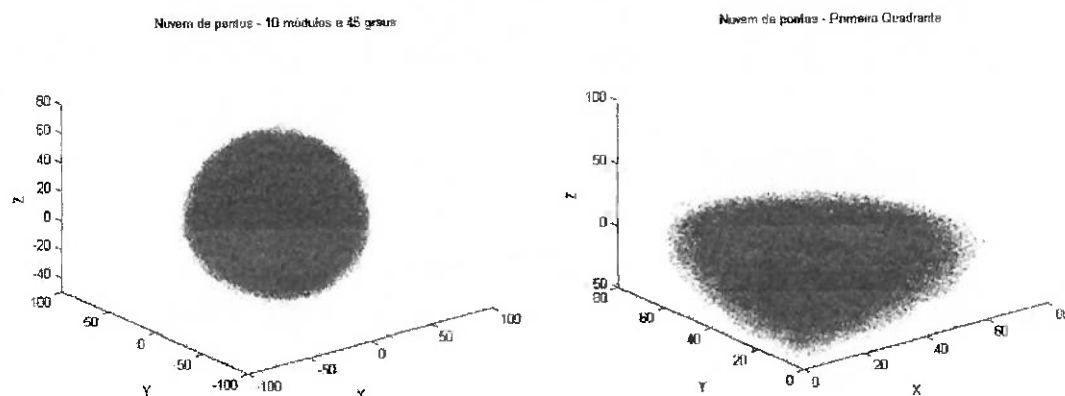


Figura 20-Nuvem de pontos para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 45° .

Com as figuras da nuvem de pontos só é possível observar a ‘casca’ que o módulo terminal forma, sendo necessário uma outra análise para descobrir se essa ‘casca’ é uma superfície ou um volume. Caso seja uma superfície, o projeto deve sofrer alterações, pois o principal objetivo de se construir um robô hiper-redundante é a realização de trabalhos mais complexos comparados com os robôs atuais, fazendo com que o módulo terminal atinja não somente uma superfície, mas sim um volume.

Para a próxima análise um corte será feito na nuvem de pontos no plano YZ de espessura de 1cm no eixo X. Devido à simetria do problema, já mencionada anteriormente, esse corte será feito para um dos quarto quadrantes de simetria. A Figura 21 é o resultado do corte para 20° de rotação, a Figura 22 corresponde a 30° de rotação e a Figura 23 corresponde a 45° de rotação.

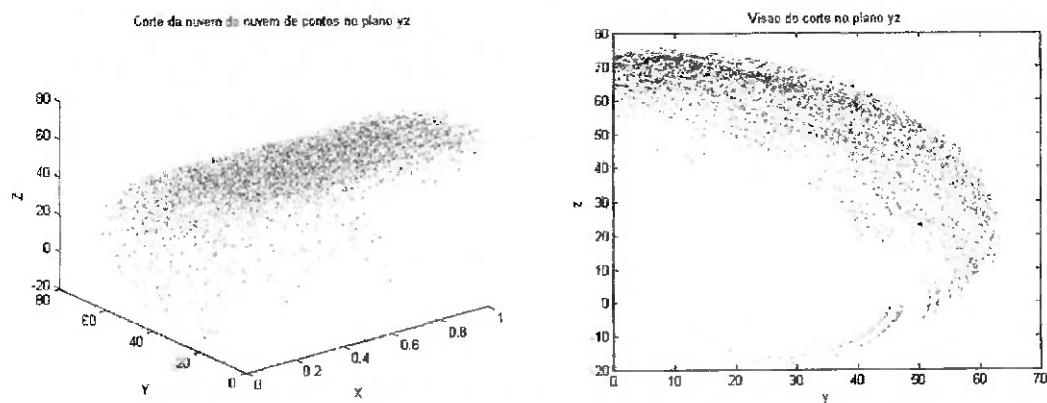


Figura 21-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 20° .

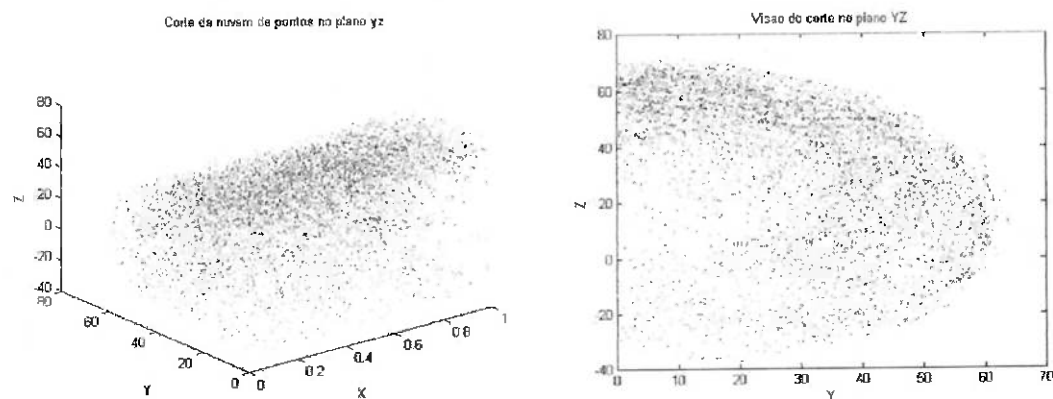


Figura 22-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 30° .

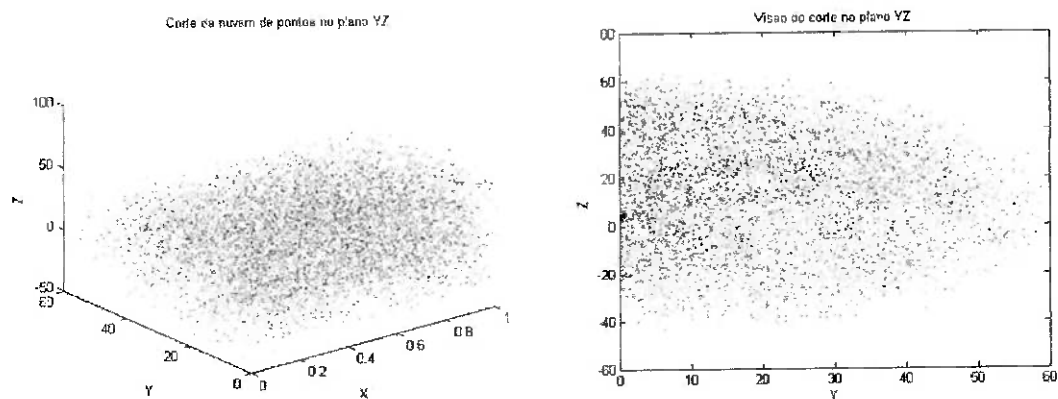


Figura 23-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 45°.

8.2-Resultado da análise de forças

Como foi visto anteriormente, as forças relevantes para o dimensionamento dos atuadores são os momentos causados pelos pesos das bases, das juntas, dos atuadores e da carga. Para o caso do robô que está sendo projetado, o maior momento na base, de acordo com a equação (18), ocorrerá quando o módulo terminal está mais distante dessa base no plano xy, pois os pesos dos componentes e a carga possuem valores constantes, assim, somente com o aumento das distâncias irá ocorrer o aumento do momento.

O algoritmo cinemática.m criado para gerar a nuvem de pontos das posições que o módulo terminal pode ocupar no espaço também retorna uma matriz com as posições angulares das juntas para o caso onde o módulo terminal está mais distante, assim com as distâncias e os pesos é possível calcular o momento.

..... Para os pesos e cargas utilizados no cálculo do momento é necessário atribuir os valores seguindo as considerações: (1) as juntas são compradas prontas, assim seu peso é conhecido; (2) as bases são de alumínio, assim é necessário saber seu volume e sua densidade; (3) a carga foi definida no projeto e equivale a 5Kg; (4) o peso do atuador dependerá se será utilizado flexinol (músculo eletrônico) ou motor. Com isso temos:

$$\begin{aligned} P_j &= 0,1Kg \\ P &= 5Kg \\ P_b &= \rho_{Al} \cdot V = \rho_{Al} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot t = 2,7 \cdot \pi \cdot 6^2 \cdot 1g = 0,31Kg \\ P_{flexinol} &= 0 \\ P_{motor} &= 0,2Kg \end{aligned} \tag{19}$$

A matriz contendo as posições angulares foi retirada das simulações para a rotação da junta de 20°, 30° e 45°. Essa matriz é analisada por um programa CalculoMomento.m (Anexo 3), desenvolvido em MatLab, que calcula o momento na base do robô a partir dos pesos e cargas e das posições de cada elemento no plano xy. O resultado dessa simulação pode ser vista na Tabela 2.

Atuador \ Ângulo		20°	30°	45°
Com carregamento	Flexinol	4,65	4,81	4,70
	Motor	5,96	6,20	6,08
Sem carregamento	Flexinol	1,31	1,39	1,39
	Motor	2,62	2,78	2,76

Tabela 2- Momentos obtidos com a simulação para o caso de somente uma base entre juntas [Kgf.m].

Os resultados da simulação acima levam em conta que entre duas juntas existe apenas uma base, como pode ser visto na Figura 24a. Considerando duas bases entre as juntas, conforme a Figura 24b, obtemos os resultados mostrados na Tabela 3.

Atuador \ Ângulo		20°	30°	45°
Com carregamento	Flexinol	5,67	5,89	5,77
	Motor	6,98	7,27	7,15
Sem carregamento	Flexinol	2,33	2,47	2,45
	Motor	3,64	3,85	3,83

Tabela 3- Momentos obtidos com a simulação para o caso de duas bases entre juntas [Kgf.m].

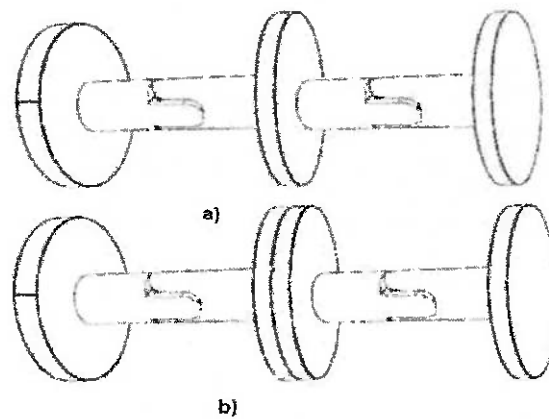


Figura 24- a) Montagem dos módulos com uma base entre juntas b) Montagem dos módulos com duas bases entre juntas.

9-Discussão dos Resultados

Para análise cinemática foi necessário colocar seis sistemas de coordenadas ao longo do módulo do robô que está sendo projetado, com isso, foi possível respeitar a notação de Denavit-Hartenberg e fazer com que o sistema de coordenadas das duas bases do módulo fiquem orientadas da mesma forma em relação a base em que esse sistema está.

Com o sistema de coordenadas respeitando a notação D-H é possível obter a matriz de transformação entre as duas bases do mesmo módulo e como sistema de coordenadas das duas bases do módulo são orientados da mesma forma é possível obter a relação entre os módulos mais facilmente já que não é necessário fazer transformações de coordenadas entre as bases de dois módulos consecutivos, como pode ser observado na Figura 25. Nessa figura podemos observar que o sistema de coordenadas O_2 do módulo $i-1$ está orientado da mesma maneira que o sistema O_1 do módulo i .

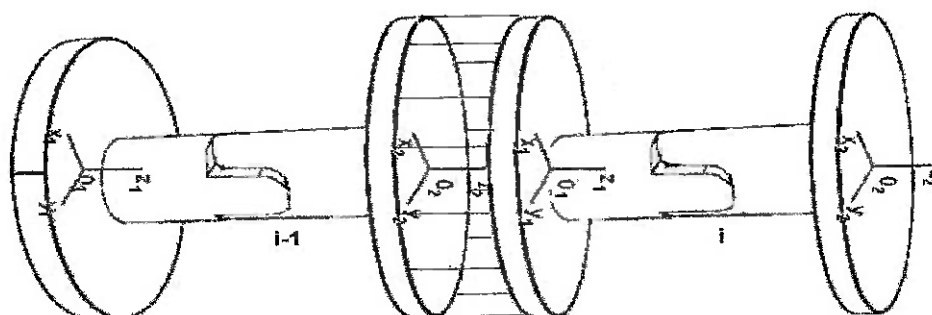


Figura 25-União do módulo $i-1$ com o módulo i .

Após a construção do modelo cinemático teórico e com o auxílio do Matlab foi possível fazer simulações com ângulos θ diferentes, com isso, pode-se criar gráficos (Figuras 18 a 23) com a nuvem de pontos da posição do módulo terminal do robô.

Observando esses gráficos podem-se descartar ângulos pequenos para θ , pois para essa configuração o espaço de trabalho do robô é bastante limitado, já que ele trabalharia sobre uma superfície e não sobre um volume. O melhor ângulo para se trabalhar com o robô, de acordo com a simulação, é próximo de 30° , pois é nessa configuração que os pontos estão mais dispersos, conseguindo atingir um espaço de trabalho maior. Para o ângulo de 45° o espaço de trabalho também representa um volume, porém esse volume é mais compacto se comparado com o volume obtido na simulação com o ângulo de 30° .

Na análise da força observa-se uma diferença muito grande de momento entre o caso de utilizar uma base ou duas bases entre juntas. Quanto maior o valor do momento, maior é a potência exigida do atuador, assim o melhor caso para o robô é projetá-lo com apenas uma base entre juntas. Essa alternativa, apesar de ser a melhor, descaracterizará o módulo já que as duas juntas, que são de módulos separados, serão unidas por uma única base. Uma solução é a utilização de duas bases entre juntas com a metade da espessura das bases das extremidades. Com isso os momentos obtidos na simulação com duas bases entre as juntas de espessura $0,5.t$ irão coincidir com os momentos obtidos com uma base de espessura t .

Nessa análise também foi constatado que o menor momento ocorre para 20° de rotação das juntas e o maior momento ocorre para 30° . Apesar do momento ser menor para 20° , essa configuração foi descartada na análise cinemática, devido a pouca mobilidade que o módulo terminal possui. Com isso a melhor configuração seria para a rotação de 45° .

Momento para rotação de 45° nas juntas			
Com Carregamento		Sem carregamento	
Flexinol	Motor	Flexinol	Motor
4,70	6,08	1,39	2,76

Tabela 4 - Resultados obtidos na simulação de momento para rotação de 45° nas juntas e considerando uma base de espessura t entre juntas.

10- Projeto Mecânico

Os materiais disponíveis para a construção do protótipo de um módulo do robô hiper-redundante são:

- Juntas universais DIN 808-G simples versão E do fabricante Imetex com as dimensões descritas no catalogo IMETEX que se encontra no anexo 6 [18].
- Motor elétrico com redução do fabricante Maia-Inmep.
- Cilindros de alumínio de 12 e 1,5 cm de diâmetro.

A partir dos materiais descritos acima e com os dados estimados nas simulações cinemática e estática (distância entre a base inferior e a junta igual a 5 cm, distância entre a junta e a base superior igual a 3 cm) fez-se uma pré análise para o módulo do robô hiper-redundante que irá ser construído. Essa análise se baseou na construção do módulo em CAD em escala real (1:1) e rotação da junta em 45° e 30°.

Podemos observar na Figura 26 que tanto para 45° quanto para 30° de rotação na junta a base superior bate no motor. Com isso a altura da distância entre a base inferior e a junta deve sofrer aumento. A Figura 27 apresenta o módulo com um aumento de 1,5cm, pode-se observar que a base já não bate no motor.

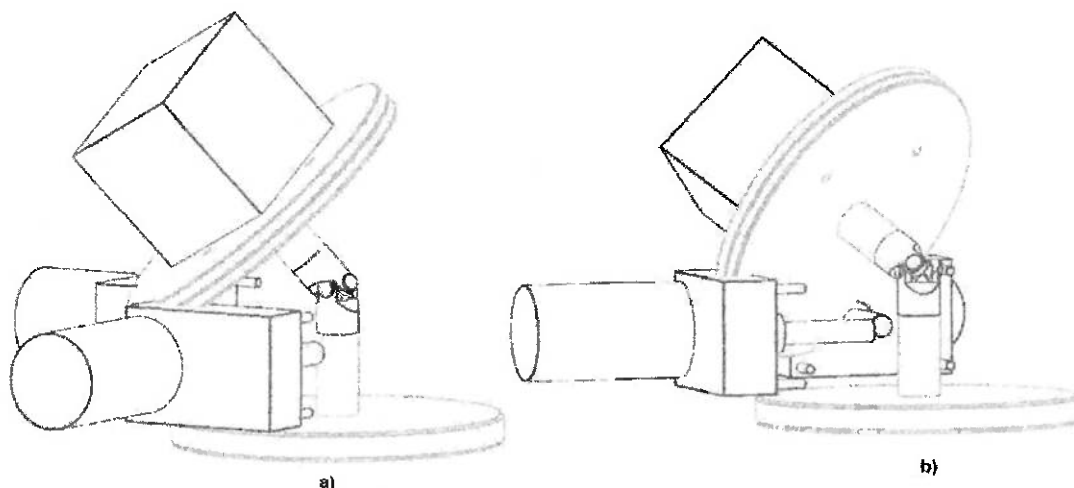


Figura 26 – (a) Módulo com rotação de 30° na junta. (b) Módulo com rotação de 45° na junta.

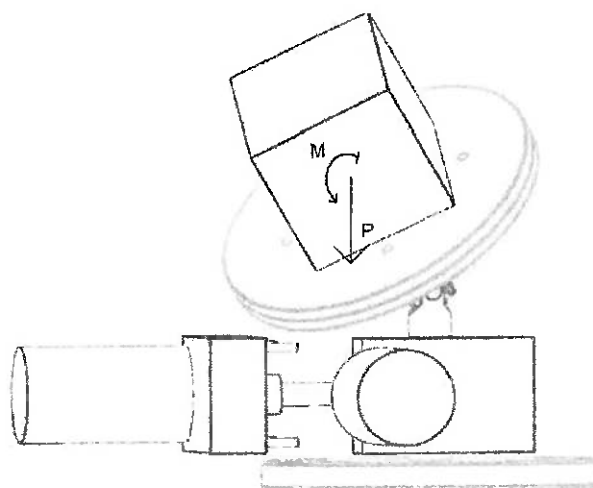


Figura 27 – Módulo com rotação de 30° na junta com a distância entendida entre base inferior e junta de 15 mm.

Refazendo a análise cinemática e estática para a nova configuração ($d1 = 6,5$ - distancia da base inferior à junta, $d2 = 3,5$ - distancia da junta a base superior e $\theta = 30^\circ$ - ângulos da junta no eixo X e Y) obtemos a nova nuvem de pontos mostrada na Figura 28.

O momento para essa nova configuração, considerando motor como atuador, uma base entre juntas e carga de 5 kg é de $M = 7,27 \text{ Kg} \cdot \text{m}$.

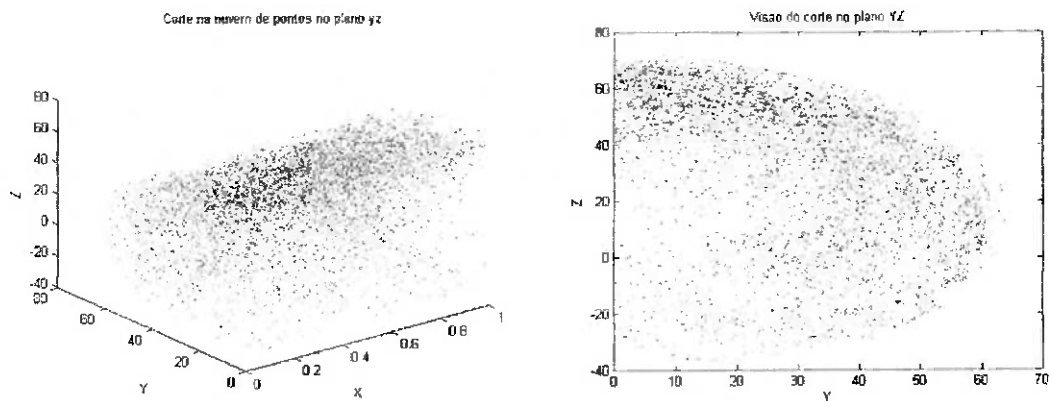


Figura 28-Corte da nuvem de pontos no plano YZ com 1 de espessura para um robô de 10 módulos com rotação das juntas de 30° (nova configuração).

A nuvem de pontos para a nova configuração (Figura 28) é muito semelhante com a nuvem da configuração antiga obtida na análise cinemática (Figura 22) e o momento é maior comparado com a configuração antiga ($M_{atual} = 7,27$ e $M_{antigo} = 6,20$).

10.1-Equilíbrio de Forças

É necessário conhecer as forças que atuam na estrutura para saber se esta bem dimensionada e irá suportar tensões mecânicas. Observando a estrutura apresentada na Figura 27 podemos construir um modelo simplificado (Figura 29) para estudar as forças pertinentes para a estrutura.

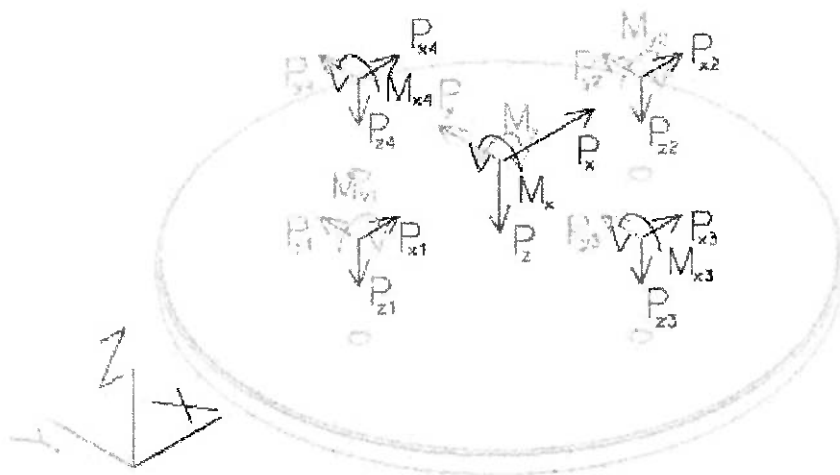


Figura 29 – Esquema de forças na base superior do módulo.

Primeiro precisa-se decompor o vetor peso para o sistema de coordenadas da base de acordo com a figura 30.

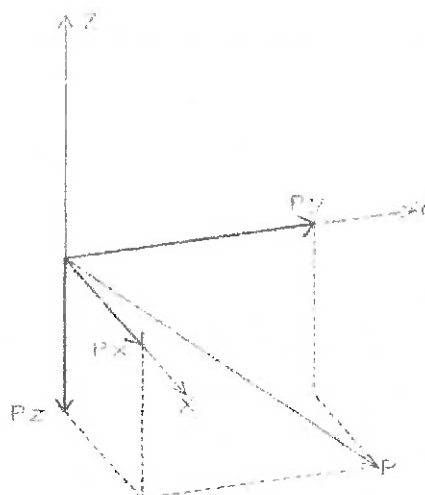


Figura 30 – Decomposição do vetor P no sistema de coordenadas da base (xyz).

Para decompor a força peso no sistema de coordenadas da base faz-se:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -P \end{bmatrix} \quad R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\phi & -S\phi \\ 0 & S\phi & C\phi \end{bmatrix} \quad R_y = \begin{bmatrix} C\phi & 0 & S\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\phi & 0 & C\phi \end{bmatrix}$$

$$P' = R_x R_y P \quad (20)$$

De acordo com o modelo e a Figura 30, a rotação da junta é $\phi=30^\circ$ no eixo X e -30° no eixo Y, assim P' é:

$$P' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C30 & -S30 \\ 0 & S30 & C30 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C30 & 0 & -S30 \\ 0 & 1 & 0 \\ S30 & 0 & C30 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C30 & 0 & -S30 \\ -S^230 & C30 & -S30C30 \\ S30C30 & S30 & C^230 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -P \end{bmatrix}$$

$$P' = \begin{bmatrix} S30 \\ S30C30 \\ -C^230 \end{bmatrix} P \quad (21)$$

O próximo passo é construir as equações de equilíbrio de forças e momentos.

$$\begin{aligned}
\sum F_z = 0 &\rightarrow P_{z1} + P_{z2} + P_{z3} + P_{z4} = P_z \\
\sum F_x = 0 &\rightarrow P_{x1} + P_{x2} + P_{x3} + P_{x4} = -P_x \\
\sum F_y = 0 &\rightarrow P_{y1} + P_{y2} + P_{y3} + P_{y4} = -P_y
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
\sum M_z = 0 &\xrightarrow{1} P_{y2} \cdot 2d + P_{y3} \cdot d + P_{y4} \cdot d + P_y \cdot d + P_{x3} \cdot d - P_{x4} \cdot d = 0 \\
\sum M_x = 0 &\xrightarrow{1} P_{z3} \cdot d - P_{z4} \cdot d - M_x - M_{x3} - M_{x4} = 0 \\
\sum M_y = 0 &\xrightarrow{1} P_{z2} \cdot 2d + P_{z3} \cdot d + P_{z4} \cdot d + P_z \cdot d + M_{y1} + M_{y2} + M_y = 0 \\
\sum M_z = 0 &\xrightarrow{2} P_{x3} \cdot d - P_{y1} \cdot 2d - P_{y3} \cdot d - P_{x4} \cdot d - P_{y4} \cdot d - P_y \cdot d = 0 \\
\sum M_x = 0 &\xrightarrow{2} P_{z3} \cdot d - P_{z4} \cdot d - M_x - M_{x3} - M_{x4} = 0 \\
\sum M_y = 0 &\xrightarrow{2} -P_{z1} \cdot 2d - P_{z3} \cdot d - P_{z4} \cdot d - P_z \cdot d + M_{y1} + M_{y2} + M_y = 0 \\
\sum M_z = 0 &\xrightarrow{3} P_{y2} \cdot d - P_{y1} \cdot d - P_{x1} \cdot d - P_{x2} \cdot d - P_{x4} \cdot 2d - P_x \cdot d = 0 \\
\sum M_x = 0 &\xrightarrow{3} -P_{z1} \cdot d - P_{z2} \cdot d - P_{z4} \cdot 2d - P_z \cdot d - M_{x4} - M_{x3} - M_x = 0 \\
\sum M_y = 0 &\xrightarrow{3} P_{z2} \cdot d - P_{z1} \cdot d + M_{y1} + M_{y2} + M_y = 0 \\
\sum M_z = 0 &\xrightarrow{4} P_{x1} \cdot d + P_{x2} \cdot d + P_{x3} \cdot 2d + P_x \cdot d + P_{y2} \cdot d - P_{y1} \cdot d = 0 \\
\sum M_x = 0 &\xrightarrow{4} P_{z1} \cdot d + P_{z2} \cdot d + P_{z3} \cdot 2d + P_z \cdot d - M_{x3} - M_{x4} - M_x = 0 \\
\sum M_y = 0 &\xrightarrow{4} P_{z2} \cdot d - P_{z1} \cdot d + M_{y1} + M_{y2} + M_y = 0
\end{aligned} \tag{23}$$

Para facilitar a visualização podemos expressar as equações da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & d & -d & 0 & 2d & d & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d & -d & 0 & 0 & -1 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2d & d & d & 1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & d & -d & -2d & 0 & -d & -d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d & -d & 0 & 0 & -1 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2d & 0 & -d & -d & 1 & 1 & 0 & 0 \\
-d & -d & 0 & -2d & -d & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d & -d & 0 & -2d & 0 & 0 & -1 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d & d & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
d & d & 2d & 0 & -d & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d & d & 2d & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d & d & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
P_{x1} \\
P_{x2} \\
P_{x3} \\
P_{x4} \\
P_{y1} \\
P_{y2} \\
P_{y3} \\
P_{y4} \\
P_{z1} \\
P_{z2} \\
P_{z3} \\
P_{z4} \\
M_{y1} \\
M_{y2} \\
M_{x3} \\
M_{x4}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
P_z \\
-P_x \\
-P_y \\
-P_y \cdot d \\
M_x \\
-P_z \cdot d - M_y \\
P_y \cdot d \\
M_x \\
P_x \cdot d - M_y \\
P_x \cdot d \\
P_z \cdot d + M_x \\
-M_y \\
-P_x \cdot d \\
-P_z \cdot d + M_x \\
-M_y
\end{bmatrix}$$

Com isso, tem-se um sistema com 15 equações e 16 incógnitas, assim o modelo é considerado hiperestático, ou seja, existem mais incógnitas que equações.

10.2-Dimensionamento da base

Para conferir se o dimensionamento da base com 5mm de espessura está adequado foi necessário saber se ela irá resistir às deformações plásticas. Com isso foi criado um modelo (Figura 31) no programa Visual Nastran 4D 2003 versão 7.1 e foi rodada a simulação para obter as tensões de Von Mises. O anexo 4 mostra os passos seguidos para a construção do modelo e simulação.

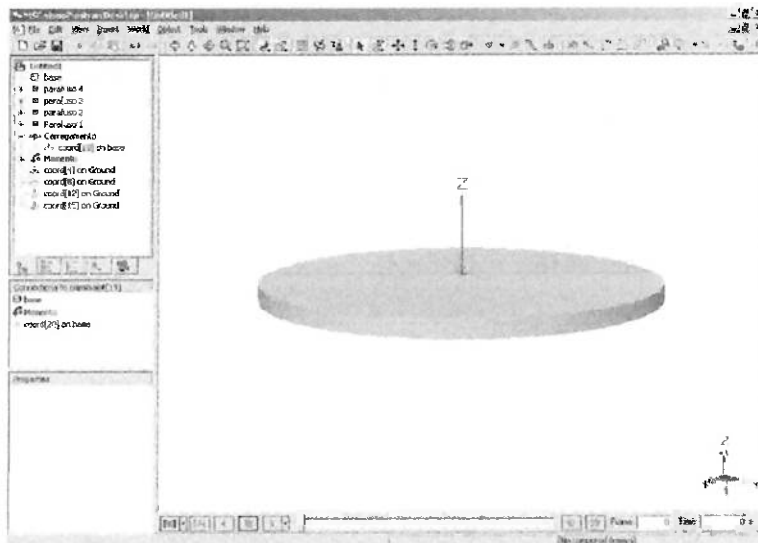


Figura 31 - Modelo da base criado no programa Visual Nastran 4D 2005.

Para simulação do modelo foi preciso conhecer o peso do robô e o momento que os módulos e a carga criam na base. No caso do momento irá se considerar $M_{atual} = 7,27 \text{ kgf/m}$ e no caso do peso irá se fazer a seguinte consideração:

$$P = P_{\text{módulo}} \cdot n + P_{\text{carga}} = (P_{\text{base}} + P_{\text{junta}} + P_{\text{atuador}}) \cdot n + P_{\text{carga}}$$

$$P = (0,31 + 0,1 + 0,2) \cdot 9 + 5 = 10,49 \text{ kg} \quad (24)$$

Assim,

$$P' = \begin{bmatrix} S30 \\ S30C30 \\ -C^230 \end{bmatrix} P = \begin{bmatrix} 5,25 \\ 4,55 \\ -7,87 \end{bmatrix} \text{ kgf} \quad (25)$$

Na simulação foi necessário configurar o tamanho das malhas de discretização. Para a primeira simulação, o tamanho da malha foi deixado em 0,06m. A malha e o resultado obtido na simulação foram grosseiros (Figura 32), sendo necessário refinar mais a malha. Foram feitas simulações diminuindo a malha em 0,01m a cada simulação até que se atingiu a malha de tamanho 0,02m, onde os resultados apresentados se tornaram inconsistentes (Figura 33), pois o acúmulo de tensões deve se dar próximo aos parafusos (restrições).

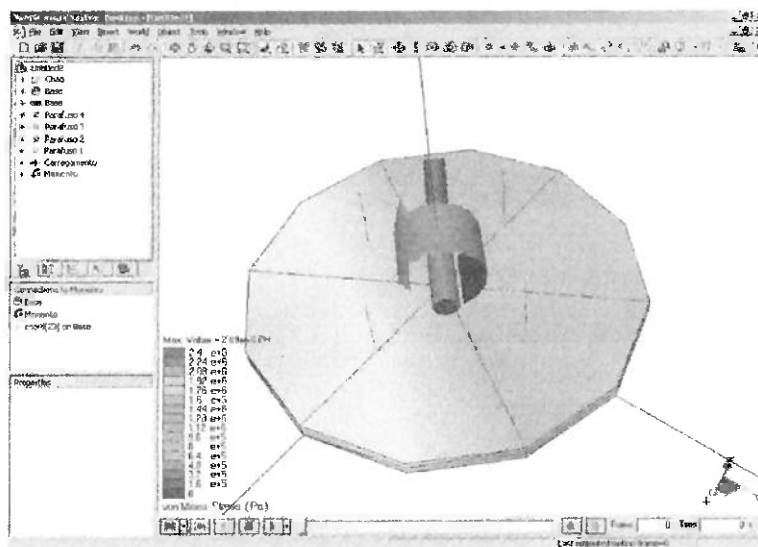


Figura 32 – Peça discretizada e tensão distribuída para o tamanho da malha de 0,06m.

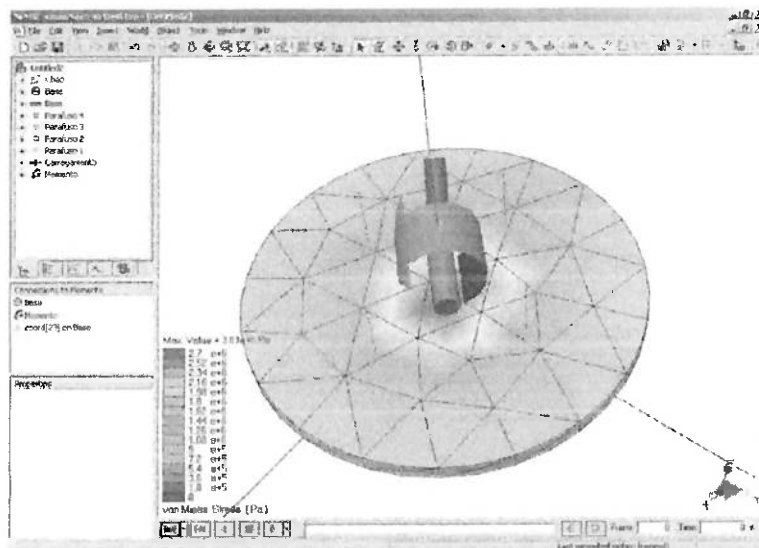


Figura 33 – Peça discretizada e tensão distribuída para o tamanho da malha de 0,02m.

O melhor resultado obtido foi para a discretização de 0,03m, pode-se observar na figura 34 que os maiores valores de tensão estão localizados no sentido do vetor momento “entrando” na peça, entre os parafusos 1 e 4.

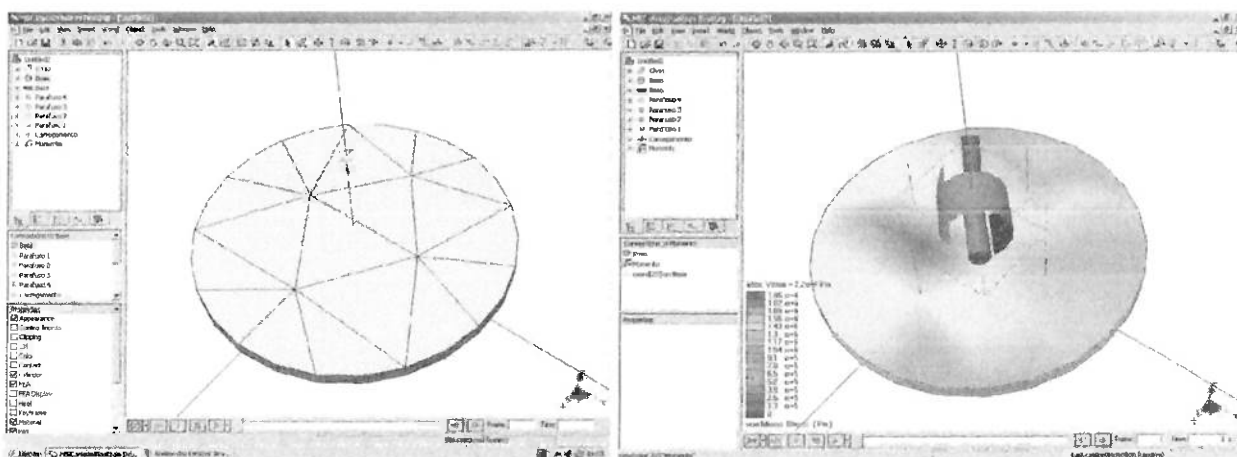


Figura 34 — Peça discretizada e tensão distribuída para o tamanho da malha de 0,03m.

Como resultado dessa simulação tem-se que a maior tensão de Von Mises na base é equivalente a 2,2 Mpa. A tensão de escoamento do alumínio é equivalente a 131Mpa (alumínio liga 6061), assim a tensão resultante dos carregamentos é aproximadamente 60 vezes menor que a tensão de escoamento.

Com essa simulação pode-se concluir que a base não sofrerá deformações elásticas devido o peso e momento causado pela estrutura e carga.

10.3- Outros dimensionamentos

Outro ponto importante no projeto é decidir como serão feitas as fixações entre as bases e hastes e entre a junta e as hastes.

No projeto a fixação entre as bases e as hastes se dará por um cordão de solda, de acordo com a Figura 35. Essa solda será de canto em meio V, assim seu pescoço é dado por $h = H \cos(a/2)$, onde a é o ângulo de inclinação do furo, e o comprimento do cordão é dado por $L = 2\pi.r$.

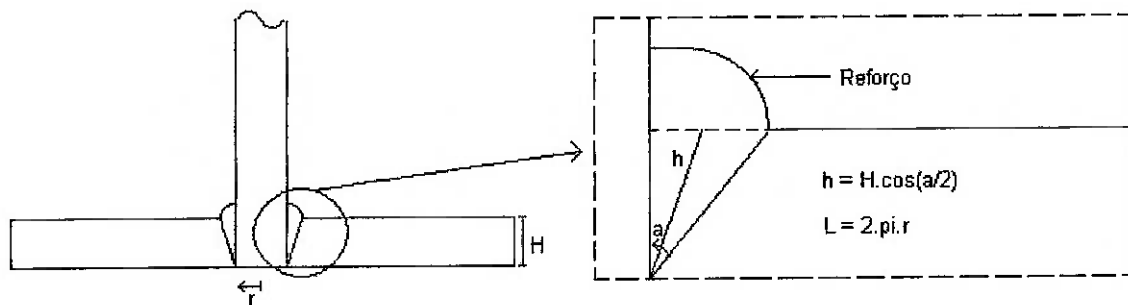
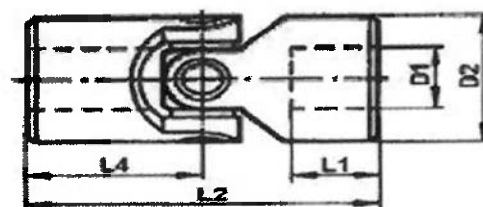


Figura 35 – Esquema da fixação por solda entre a base e haste.

Já a fixação da haste com a junta universal não irá ser feita por solda, pois o material da junta é aço carbono e o material da haste é de alumínio, a soldagem desses dois materiais não é um processo trivial.

A fixação entre haste e junta irá ser feita por rosca. Observando o desenho dimensional da junta que será utilizada (Figura 36) e o catalogo no anexo 6 [18] vemos que o diâmetro do furo é de 5mm e a espessura da parede da junta $((D2 - D1)/2)$ é de 5 mm, possibilitando, assim, para se criar uma rosca M8.



Simplex (até 45°)
Versão "E"
Furo liso
forma "B"

Figura 36 – Desenho dimensional da junta que será utilizada no projeto.

11- Fabricação

Foi fabricado o módulo do robô hiper-redundante que foi projetado ao longo do trabalho. Os desenhos de conjunto com a lista de peças, desenhos de fabricação e o desenho de montagem da base e haste podem ser visualizados no anexo IV.

Na hora da fabricação do protótipo algumas peças foram modificadas para se adequar com as ferramentas disponíveis, assim os desenhos de projeto, com revisão A, também sofreram modificações de acordo com a fabricação. Os novos desenhos das peças fabricadas podem ser vistos em revisão B no mesmo anexo.

A principal diferença entre o modelo projetado e fabricado é a fixação das bases com as hastes, que era para ser feita por solda e acabou se fixando as duas peças por interferência (50 μ m).

O protótipo construído pode ser visualizado nas Figuras 37 e 38.

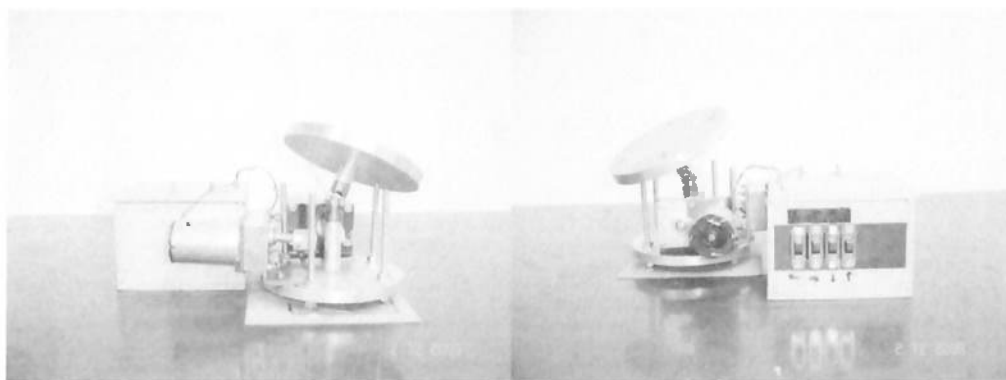


Figura 37 – Módulo do robô hiper-redundante construído.

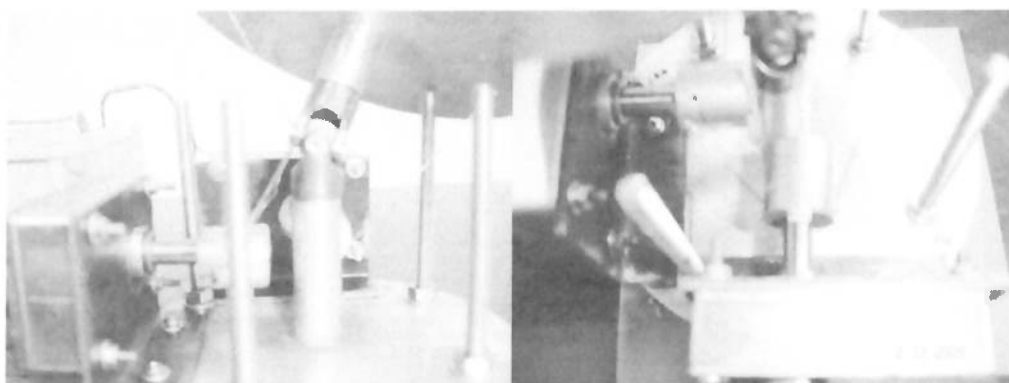


Figura 38 – Detalhe do módulo construído.

Anexos I - Algoritmo para se obter as posições do módulo terminal (cinemática.m)

```
%-----cinemática.m-----%
% Esse programa retorna a matriz de pontos da posição do modulo terminal %
% do robô hiper-redundante que esta sendo projetado. %
%-----%

% Dados de entrada %
n=10; %numero de módulos do robô
d1=5; %distancia da base a junta
d3=3; %distancia da junta a base
xp=[0; 0; 0; 1]; %coordenadas no ponto p da ultima base
%Formação da matriz teta inicial%
% Como se trata de um robô binário, o angulo teta so pode possuir dois estados em %
% cada grau de liberdade (+/-teta); uma junta universal possui dois graus de liberdade %
% por modulo, assim, temos quatro estados em cada modulo. O programa começa a %
% varredura das posições quando todos os ângulos tetas de todos os módulos são %
% positivos. %
for a=1:n;
    P(a)=1;
end
w=1; % contador
%-----Inicio da busca das posições do modulo terminal-----%
e=4^n; %numero de estados do robô(junta universal)
for a=1:e;
    teta=transvariavel(P); %função que cria a matriz dos ângulos teta em função dos estados
%Montagem da matriz de transformação global%
    for b=1:n;
        t1=teta(1,b); %vetor dos ângulos teta 1 de todos os módulos
        t2=teta(2,b); %vetor dos ângulos teta 2 de todos os módulos
        if b==1; %caso seja o primeiro calculo a matriz de transformação global
            T=thomogenea(t1,t2,d1,d3);
        else
            T=T*thomogenea(t1,t2,d1,d3);
        end
    end
end
%Montagem da matriz de pontos das posições do modulo terminal
x=T*xp; %coordenadas da base terminal na base zero
if x(1)>=0 && x(2)>=0 %se o ponto pertencer no primeiro quadrante:
    Q1(w,1)=x(1); %monta a matriz Q de posição do módulo terminal.
```

```

Q1(w,2)=x(2);
Q1(w,3)=x(3);
if w==1;                                %Dados coletados para analise de momento no pior
    L1=sqrt(Q1(1,1)^2+Q1(1,2)^2); % caso, ou seja, quando a base terminal do robô estiver
    L=L1;                                % no ponto mais distante no plano xy.
    V=teta;
else
    L1=sqrt(Q1(w,1)^2+Q1(w,2)^2);
    if L<L1;
        L=L1
        V=teta;
    end
end
end
w=w+1;
end
P=contador(P);                          %muda para o próximo estado
end
% -----fim do programa -----%
```

Anexo II - Funções que são implementadas pelo algoritmo cinemática.m

II.1- Transvariavel.m

```
%-----transvariavel.m-----%
% Essa função transforma as variáveis de estado do modulo (1,2,3,4) em %
% seus ângulos correspondentes (teta 1, teta 2)de acordo com: %
% 1=(teta1,teta2); 2=(-teta1,teta2); 3=(teta1,-teta2); 4=(-teta1,-teta2). %
%-----%
function [V]= transvariavel(A)
n=length(A); % tamanho do vetor A
for a=1:n; %transforma as variáveis 1,2,3,4 do vetor A em ângulos
    if(A(a)==1) % Nesse caso teta1 é igual a teta2 que vale pi/6.
        V(1,a)=-pi/2+pi/6;
        V(2,a)=pi/6;
    end
    if(A(a)==2)
        V(1,a)=-pi/2-pi/6;
        V(2,a)=pi/6;
    end
    if(A(a)==3)
        V(1,a)=-pi/2+pi/6;
        V(2,a)=-pi/6;
    end
    if(A(a)==4)
        V(1,a)=-pi/2-pi/6;
        V(2,a)=-pi/6;
    end
end
return;
% -----fim do programa -----%
```

II.2- Thomogenea.m

```
%-----thomogenea.m-----%
% Essa função cria a matriz de transformação homogênea a partir dos tetas %
%-----%
function[V]=thomogenea(t1,t2,d1,d3)
a=t1;
b=t2;
V=[-sin(a) cos(a)*sin(b) cos(a)*cos(b) d3*cos(a)*cos(b) ;
```

```

0      cos(b)      -sin(b)      -d3*sin(b)      ;
-cos(a)  -sin(a)*sin(b)  -sin(a)*cos(b)  d1-d3*sin(a)*cos(b) ;
0      0      0      1      ];
return;
% -----fim do programa -----%
```

II.3- Contador.m

```

%-----contador.m-----%
% Esse programa recebe um vetor de tamanho n onde  $0 < v_i < 5$  e  $i=1,2,3,\dots,n$  e soma %
% um ao ultimo termo caso este seja diferente de quatro, se o termo é quatro ele torna%
% esse termo igual a um e soma um ao termo anterior funcionando como um contador%
% de um a quatro para o vetor de entrada %
%-----%
function [V]= contador(A)
n = length(A);          %tamanho do vetor
V=A;
for a=1:n;
    if V(n-a+1)==4;      % caso o termo analisado seja 4,
        V(n-a+1)=1;      %ele se torna 1.
    else
        % caso o termo analisado seja diferente de 4,
        V(n-a+1)=V(n-a+1)+1; % soma 1 a esse termo e
        break;           % encerra a função.
    end
end
return
% -----fim do programa -----%
```

Anexo III - Algoritmo para o calculo do momento na base do robô

(CalculoMomento.m)

```
%-----CalculoMomento.m-----%
% Esse programa possui como variáveis de entrada uma matriz de posição angular%
% das juntas, os pesos dos elementos (junta, base e atuador) e a carga de projeto. %
% O programa calcula as posições de cada elemento e o momento na base do %
% robô %
%-----%
function [M]=CalculoMomento(V);
d1=5; %Distancia entre a base e a junta
d3=3; %Distancia entra a junta e a base
Pb=0.46; %Peso da base
Pa=0; %Peso do atuador
Pj=0.1; %Peso da junta
P=5; %Carga
teta1=V(1,:); %Vetor dos ângulos teta 1
teta2=V(2,:); %Vetor dos ângulos teta 2
n=length(teta1); %Tamanho dos vetores teta
% Cria os vetores de posição dos elementos no espaço, as posições antes dos %
% cálculos são todas zeradas. Os vetores possuem 2n+1 elementos, pois conta %
% com a base fixa, mais n bases e mais n juntas. %
for a=1:2*n+1;
    x(a)=0;
    y(a)=0;
    z(a)=0;
end
% Rearranja o vetor teta 1 e teta 2, pois esses vetores têm tamanho inicial n e %
% devem possuir tamanho de 2n+1, pois se deve conhecer os ângulos de cada%
% elemento para determinar sua posição no espaço %
b=2; %Contador
t1(1)=-pi/2; %Angulo teta 1 da base
t2(1)=0; %Angulo teta 2 da base
for a=1:n;
    t1(b)=t1(b-1)+teta1(a)+pi/2;
    t2(b)=t2(b-1)+teta2(a);
    t1(b+1)=t1(b-1)+teta1(a)+pi/2;
```

```

    t2(b+1)=t2(b-1)+teta2(a);

    b=b+2;

end

% Calculo das posições das bases e das juntas
for a=1:2*n+1;

    if a==1;                                     %Posição da base 0

        x(1)=0;

        y(1)=0;

        z(1)=0;

    end

    if rem(a,2)==1;                               %Calculo da posição das juntas

        for b=a+1:2*n+1;

            x(b)=x(b-1)+d1*cos(t1(a))*cos(t2(a));

            y(b)=y(b-1)-d1*sin(t2(a));

            z(b)=z(b-1)-d1*sin(t1(a))*cos(t2(a));

        end

    end

    if rem(a,2)==0;                               %Calculo da posição das bases

        for b=a+1:2*n+1;

            x(b)=x(b-1)+d3*cos(t1(a))*cos(t2(a));

            y(b)=y(b-1)-d3*sin(t2(a));

            z(b)=z(b-1)-d3*sin(t1(a))*cos(t2(a));

        end

    end

end

% Calculo do momento na base
for a=1:2*n+1;

    L=sqrt(x(a)^2+y(a)^2);

    if a==1;

        M(a)=Pb*L;                               %Momento causado pela primeira base

        M(a)=M(a)+2*Pa*L;                         %Momento causado pelos primeiros atuadores

    end

end

```

```

end
if rem(a,2)==0 && a>1;
    M(a)=M(a-1)+Pj*L;          %Momento causado pelas juntas
end
if rem(a,2)==1 && a>1;
    M(a)=M(a-1)+Pb*L;          %Momento causado pelas bases
    M(a)=M(a)+2*Pa*L;          %Momento causado pelos atuadores
end
if a==2*n+1;
    M(a)=M(a)+P*L;             %Momento causado pela carga
end
M=M(2*n+1);                    %Momento final na base
% -----fim do programa -----%
```

Anexo IV - Simulação no visual Nastran 4D 2003.

IV.1- Construção do Modelo

Para a construção do modelo da base é necessário criar o disco, inserir as restrições e colocar os carregamentos. Primeiro cria-se o disco da seguinte forma *Insert – Body – Cylinder* (o cilindro irá ser criado com qualquer medida). Para ajustar a medida seleciona-se o item body[1] na janela Object Browser e abre a janela propriedades. Nessa janela seleciona a opção cylinder e colocam-se os valores de raio e espessura ($r = 0.06\text{m}$ e $h = 0.005\text{m}$). Nessa mesma janela seleciona-se o material como sendo alumínio, posiciona o objeto no centro sistema de coordenadas e muda o nome do objeto para base. Esses passos podem ser vistos na figura abaixo.

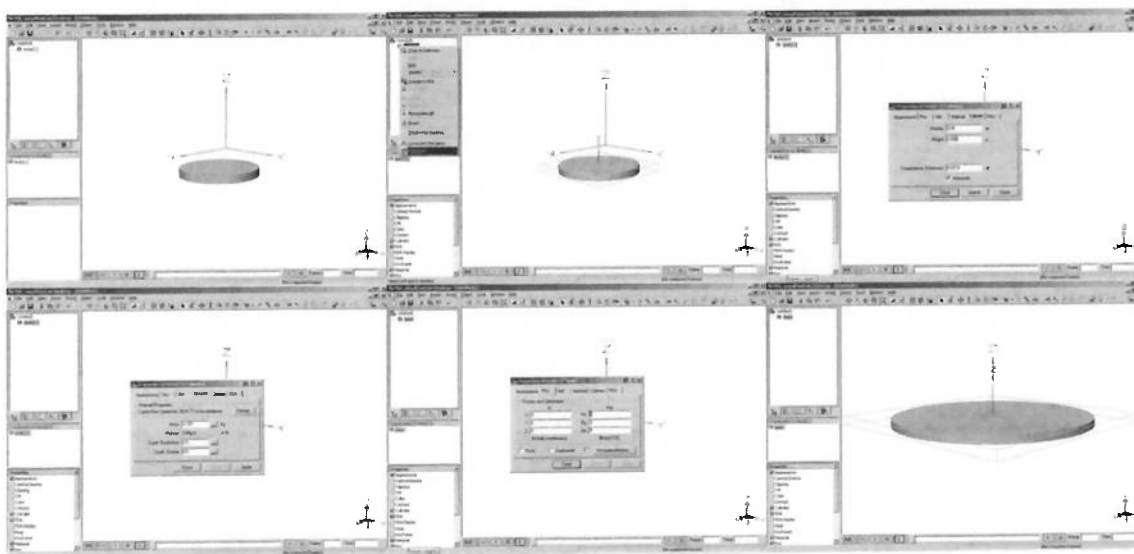


Figura 39- Construção do modelo da base no Visual Nastran.

O próximo passo é inserir as restrições. Para isso seleciona-se o ícone create constraint e em seguida qualquer região da face superior do disco. Ao fazer isso, irá aparecer uma tela de opção. Seleciona-se a opção split constraint (restrição rígida). É necessário posicionar a restrição na posição do parafuso, para isso é preciso abrir o properties de uma das coordenadas do objeto constraint que acabou de ser criado. No caso do parafuso 1 inserir a coordenada (0.03, 0, 0). O mesmo procedimento é feito para a segunda coordenada da constraint. Para mudar o nome do objeto de constraint[1] para

parafuso 1 segue o mesmo passo feito para mudar o nome da base. Esses passos devem ser seguidos para os 4 parafusos e podem ser vistos na figura abaixo.

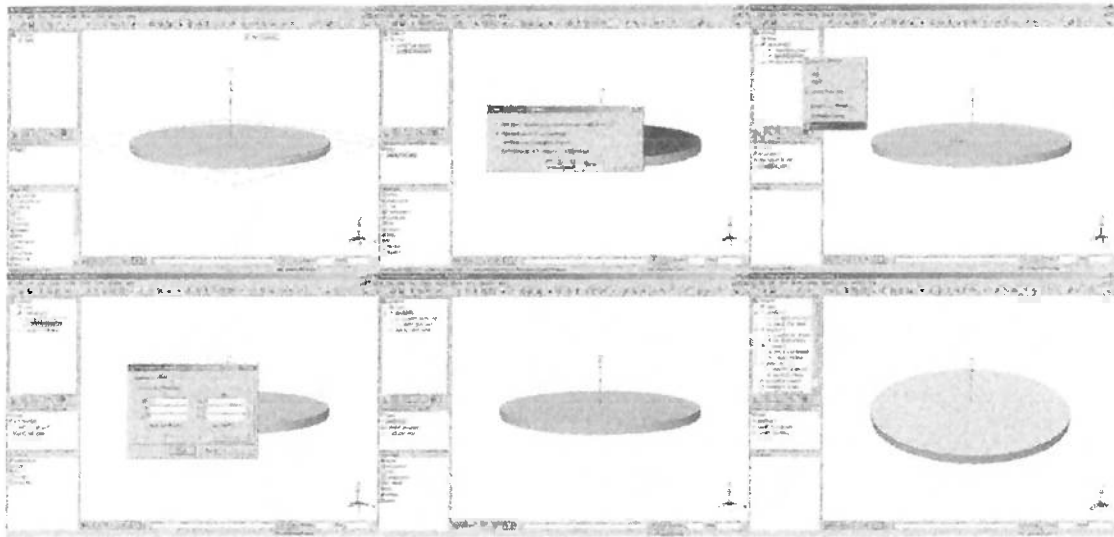


Figura 40 – Passos para se colocar a restrição na base.

Finalmente é necessário colocar os carregamentos. Para isso seleciona-se *Insert – Force* em seguida qualquer região da face superior do disco. Para posicionar o carregamento no centro da base é preciso abrir o *properties* da coordenada do objeto *constraint* que acabou de ser criado e inserir a coordenada do centro da base. Para inserir o carregamento é necessário abrir as propriedades do objeto *constraint* e selecionar a opção *structural load*, o carregamento deve ser colocado na unidade *Newton*, assim, (52.5, 45.5, -78.7). Para inserir o momento deve selecionar *Insert – Torque*, a partir daí, os passos são iguais ao adotado pela força e podem ser vistos na figura abaixo.

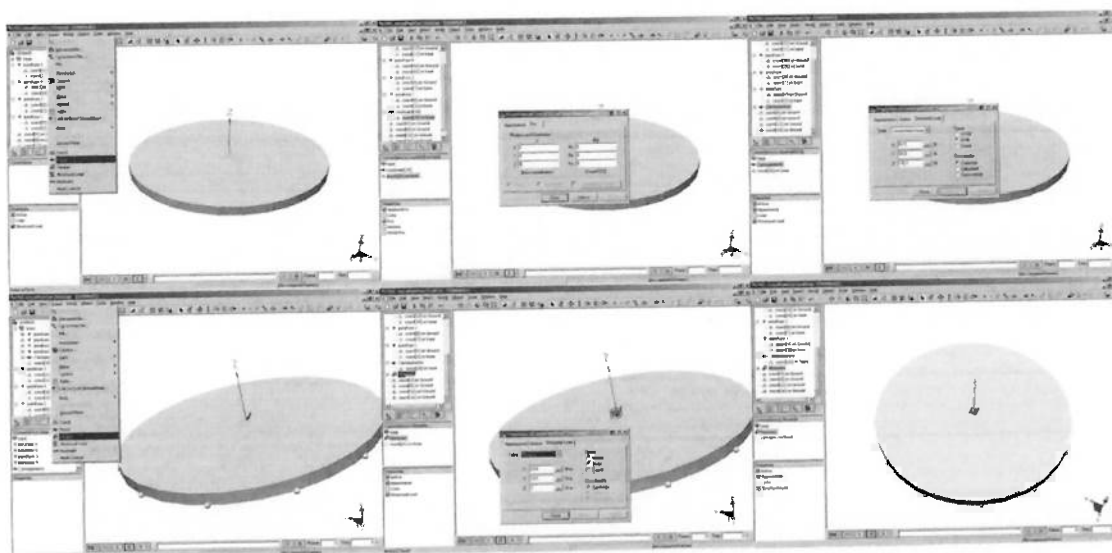


Figura 41 – Passos para se colocar o carregamento na base.

IV.2- Simulação da deformação

Para realizar a simulação das deformações de Von Mises na base irá ser utilizado o modelo criado no item anterior sobre uma placa fixa que deve ser criada para essa simulação. As coordenadas que relacionavam a junta com o chão devem ser substituídas por outras que relacionem a junta com a placa. Após essa mudança pode ser iniciada as configurações para a simulação.

Primeiramente é necessário configurar a malha de discretização da base. Para ajustar o tamanho da discretização seleciona-se a base na janela Object Browser e abre-se a janela propriedades. Nessa janela seleciona a opção FEA e coloca-se o tamanho da discretização na opção Default Mesh Size e seleciona-se o botão mesh. Após isso, todos os objetos devem ser selecionados e a opção *Include in FEA* deve ser escolhida. Por fim, as restrições (parafusos) devem ser configuradas. Para isso, as restrições devem ser selecionadas e na janela *properties – FEA* a opção *distribute load over chosen faces* deve ser escolhida.

Feita as devidas configurações é só selecionar *solve FEA* que o programa irá realizar a simulação. Esses passos podem ser vistos na figura abaixo.

Anexo V - Catálogo da junta universal

IMETEX

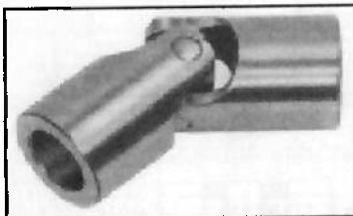
IMETEX - Comércio e Participações Ltda.
R. Alexandre Dumas, 1213 - CEP 04717-902 - São Paulo - SP - Brasil
Tel.: (011) 5180-1777 - Fax: (011) 5181-1777
Site: <http://www.imetex.com.br> - E-mail: imetex@imetex.com.br

Junta Universal DIN 808 - G

As Juntas Universais são fabricadas em aço de alta qualidade e a montagem é praticamente sem folga.

SIMPLES (Até 45°)

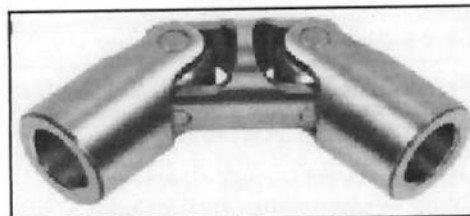
Versão "E"



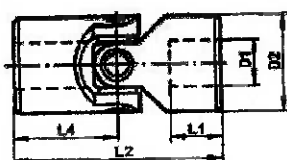
Tamanho		Comprimento			Chaveta DIN6885/1		Quadr.
D1	D2	L1	L2	L4	B	T	S
6	16	8	34	17	2	7	6
8	16	11	40	20	2	9	8
10	16	14	52	26	3	11,4	10
10	22	12	48	24	3	11,4	10
12	22	18	62	31	4	13,8	12
12	25	13	56	28	4	13,8	12
16	25	21	74	37	5	18,3	16
14	28	13	60	30	5	16,3	14
16	32	16	68	34	5	18,3	16
20	32	24	86	43	6	22,8	20
18	36	17	74	37	6	20,8	18
20	42	18	82	41	6	22,8	20
25	42	31	108	54	8	28,3	25
22	45	22	95	47,5	6	24,8	22
25	50	26	108	54	8	28,3	25
30	50	38	132	66	8	33,3	30
30	58	29	122	61	8	33,3	30
32	58	33	130	65	10	35,3	32
35	70	35	140	70	10	38,3	35
40	70	47	168	83	12	43,3	40
40	80	39	160	80	12	43,3	40
50	95	48	190	95	14	53,8	50

DUPLA (Até 90°)

Versão "D"



Tamanho		Comprimento			Chaveta DIN6885/1		Quadr.
D1	D2	L1	L3	L4	B	T	S
6	16	8	56	17	2	7	6
8	16	11	62	20	2	9	8
10	16	14	74	26	3	11,4	10
10	22	12	74	24	3	11,4	10
12	22	18	88	31	4	13,8	12
12	25	13	86	28	4	13,8	12
16	25	21	104	37	5	18,3	16
14	28	13	96	30	5	16,3	14
16	32	16	104	34	5	18,3	16
20	32	24	124	43	6	22,8	20
18	36	17	114	37	6	20,8	18
20	42	18	128	41	6	22,8	20
25	42	31	156	54	8	28,3	25
22	45	22	145	47,5	6	24,8	22
25	50	26	163	54	8	28,3	25
30	50	38	188	66	8	33,3	30
30	58	29	190	61	8	33,3	30
32	58	33	198	65	10	35,3	32
35	70	35	212	70	10	38,3	35
40	70	47	238	83	12	43,3	40
40	80	39	245	80	12	43,3	40
50	95	48	290	95	14	53,8	50

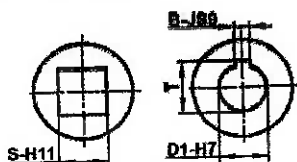


Simple (até 45°)

Versão "E"

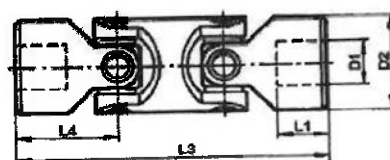
Furo liso

forma "B"



Quadrado
forma "V"

Chavetado
forma "N"



Dupla (até 90°)

Versão "D"

Furo liso

forma "B"

Exemplo de pedido:

JUNTA UNIVERSAL DIN 808 - G - 42 - N25 - B25 - 108 - E

Descrição e Norma

Articulação:

G = pino de precisão

Diâmetro externo da Junta

Forma e diâmetro do furo esquerdo:

B = furo redondo liso - tolerância H7

N = rasgo para chaveta - DIN 6885/JS9

V = furo quadrado - tolerância H11

Versão

Comprimento:

L2 = simples

L3 = dupla

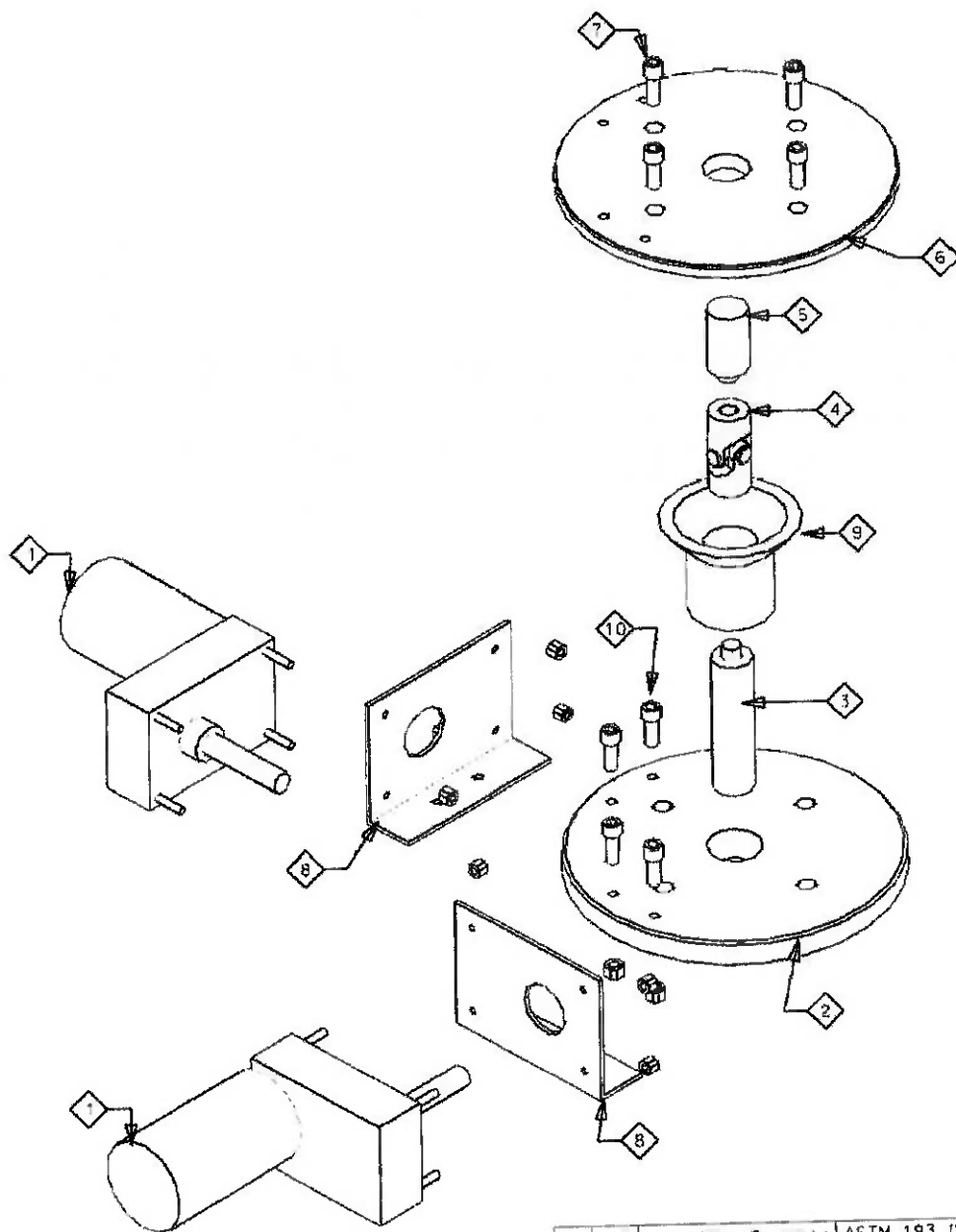
Forma e diâmetro do furo direito:

B = furo redondo liso - tolerância H7

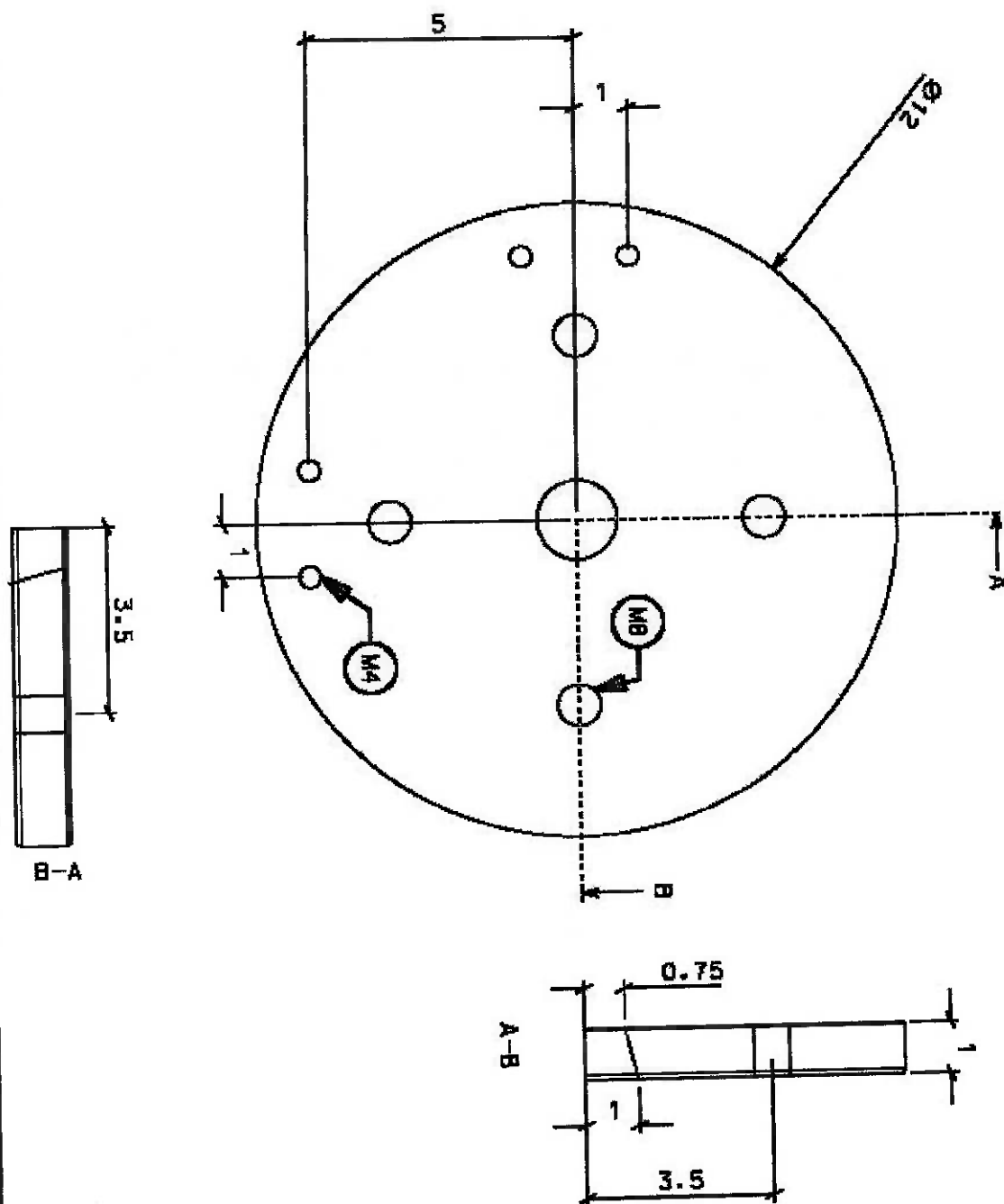
N = rasgo para chaveta - DIN 6885/JS9

V = furo quadrado - tolerância H11

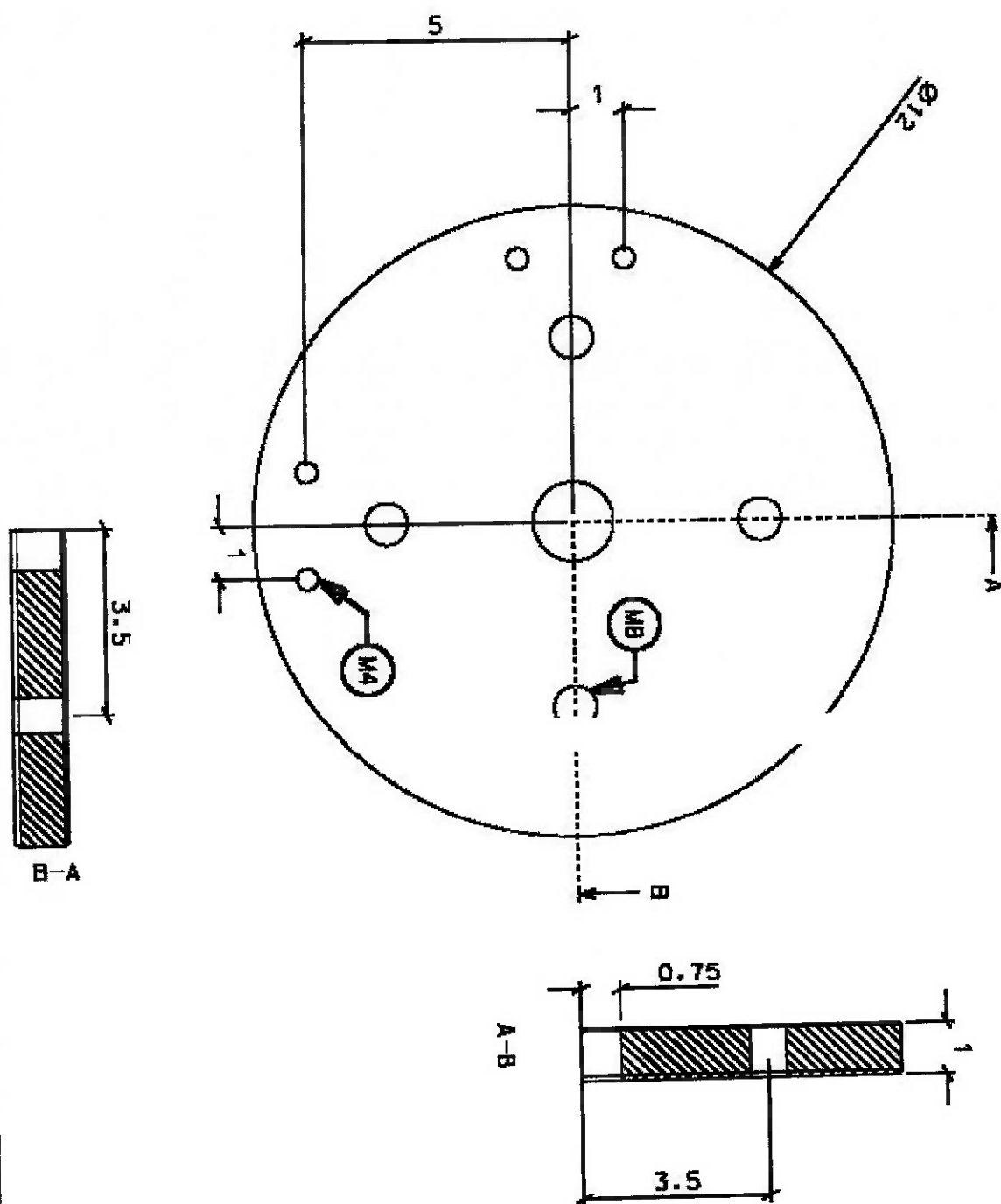
Anexo IV – Desenhos de fabricação



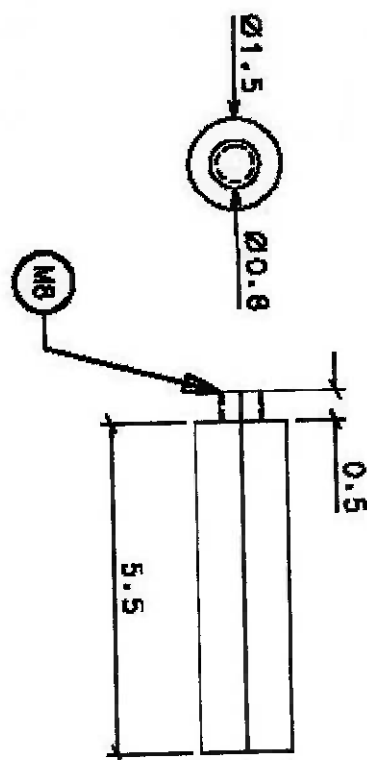
10	4	Parafuso Suporte	ASTM 193 Gr. B7	
9	1	Batente	Aluminio	
8	2	Suporte	Aço Carbono	
7	4	Parafuso Base	ASTM 193 Gr. B7	
6	1	Base Superior	Aluminio	
5	1	Haste (J-B)	Aluminio	
4	1	Junta Universal	Aço Carbono	
3	1	Haste (B-J)	Aluminio	
2	1	Base Inferior	Aluminio	
1	2	Motor	N/A	
A	N	Qty	Peca	Material



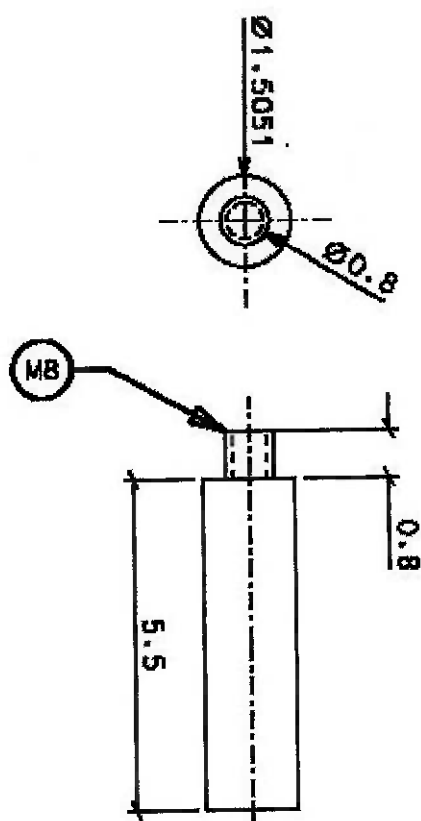
Renato Vergueiro Otake		Revisão A
Desenho Base Inferior	N-2	Escala CM



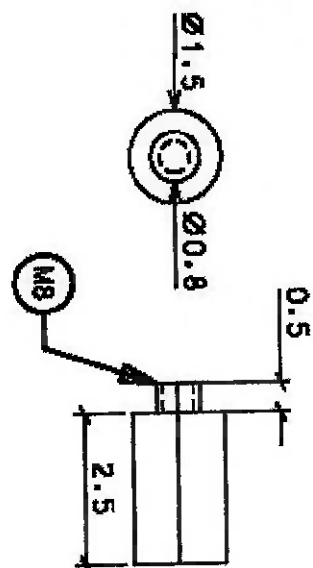
Renato Vergueira Otake		Revisão B
Desenho Base Inferior	N-2	Escala CM



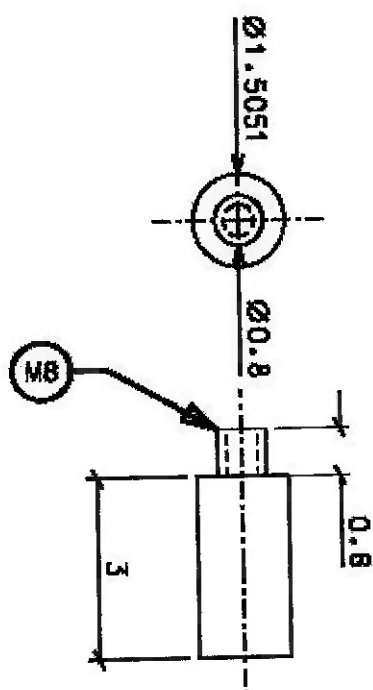
Renato Vergueira Otake		Revisão A
Desenho da haste BI-J	N-3	Escala CM



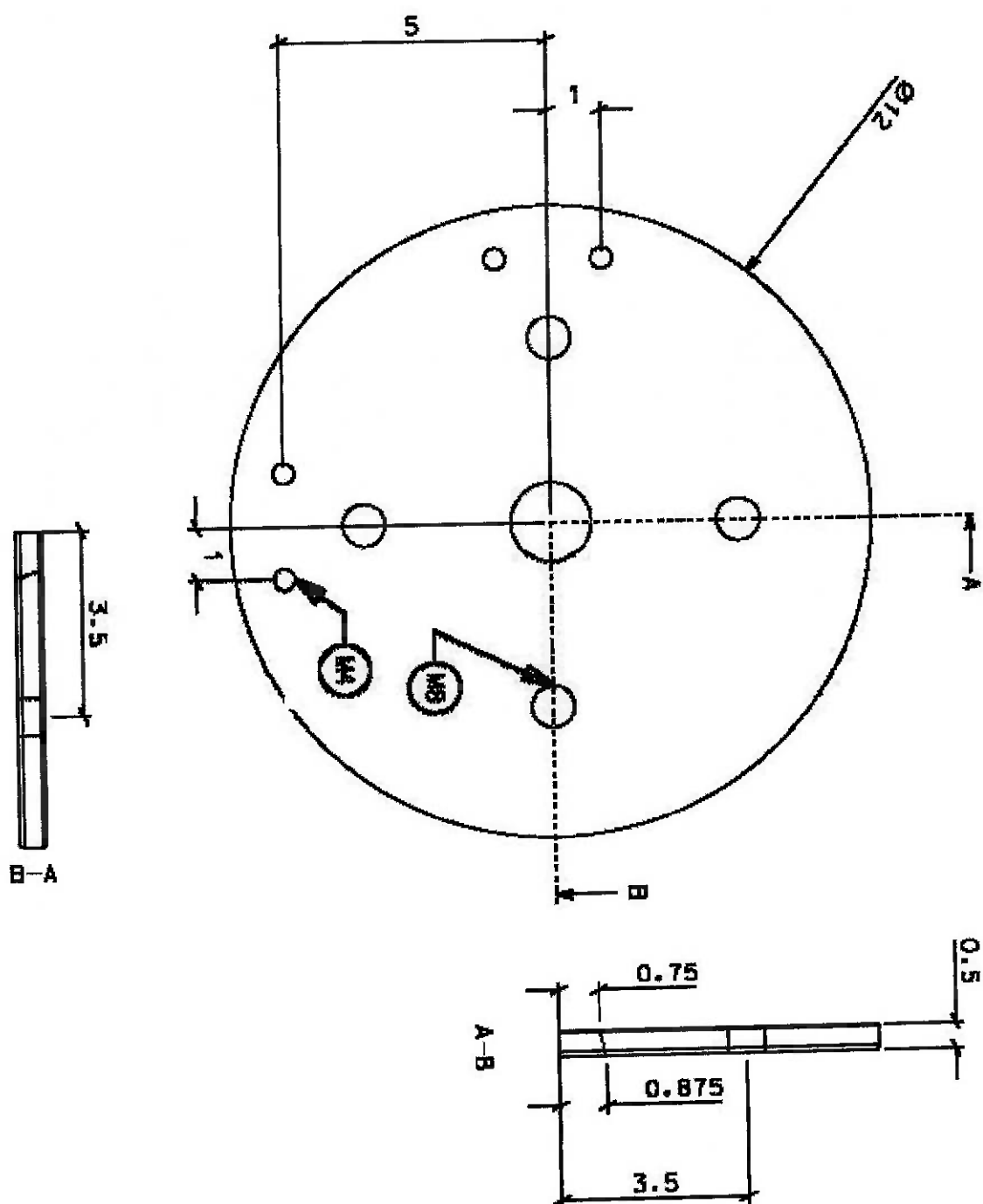
Renato Vergueiro Otake		Revisão B
Desenho da haste BI-J	N-3	Escala CM



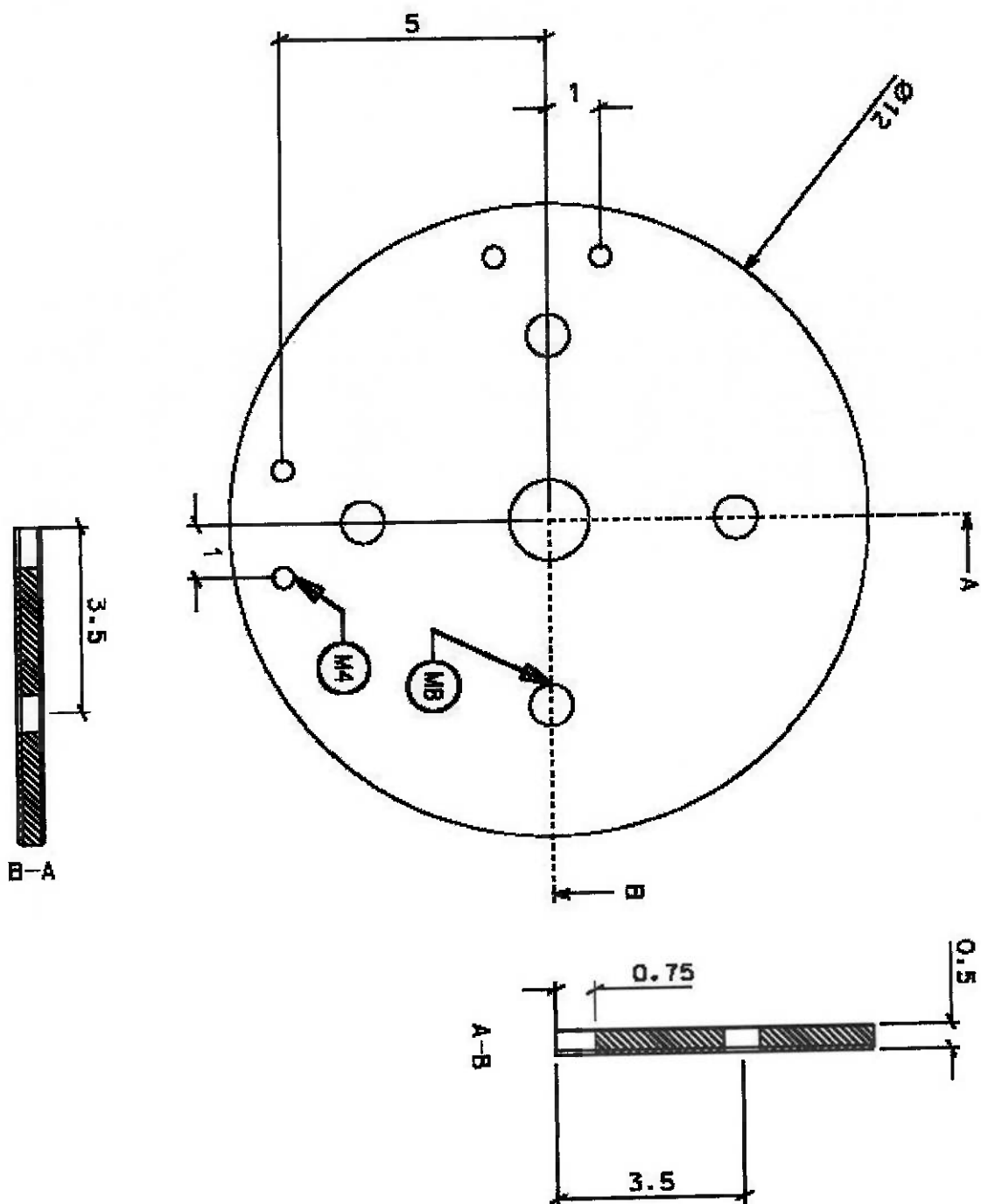
Renato Vergueiro Otake		Revisão A
Desenho da Haste J-BS	N-5	Escala CM



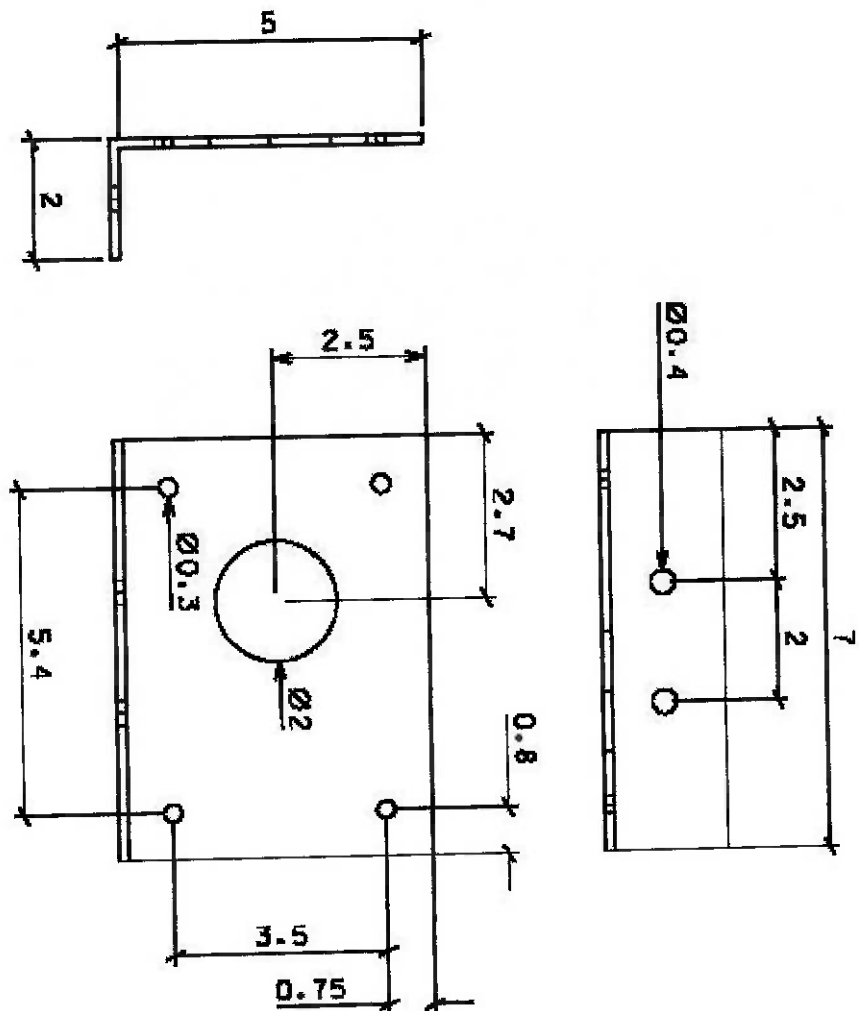
Renato Vergueira Otake		Revisão B
Desenho da Haste J-BS	N-5	Escala CM



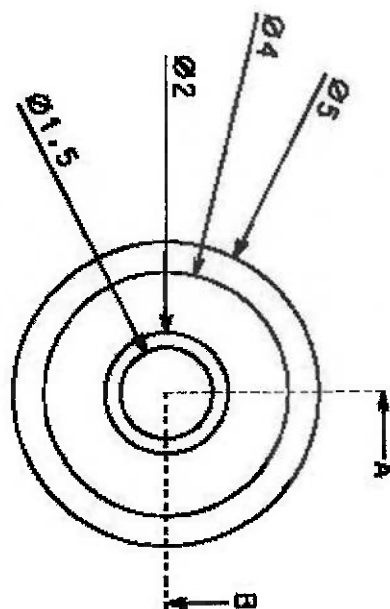
Renato Vergueira Otake		Revisao A
Desenho Base Superior	N-5	Escala CM



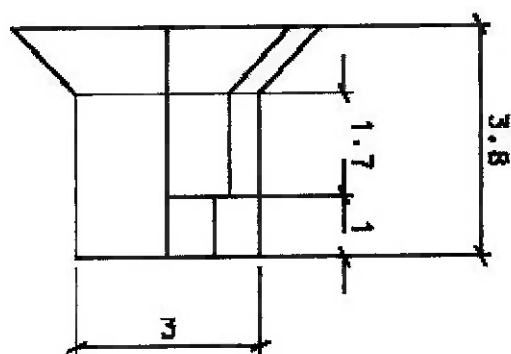
Renato Vergueira Otake		Revisao B
Desenho Base Superior	N-6	Escala CM



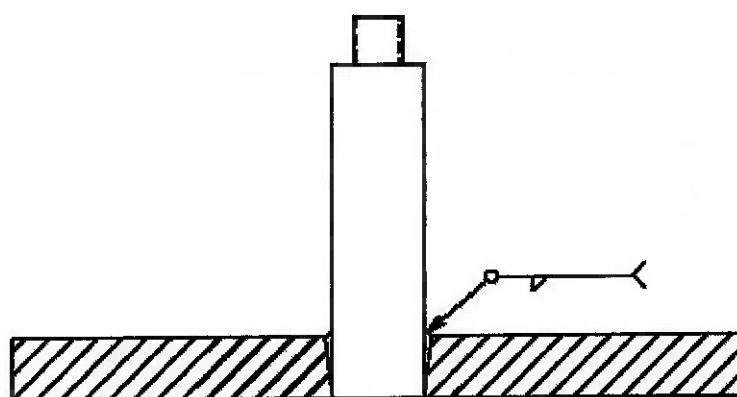
Renato Vergueira Otake		Revisão A
Desenho Apoio do Motor	N-8	ESCALA CM



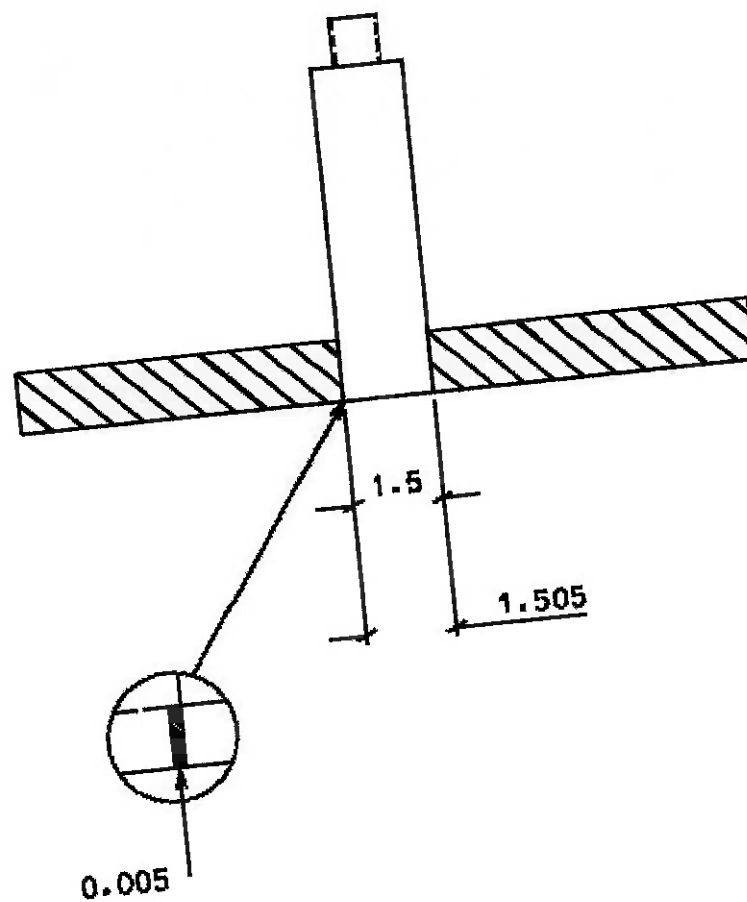
Corte A-B



Renato Vergueira Otake		Revisão A
Desenho Batente Mecânico	N-9	Escala CM



Renato Vergueira Otake		Revisão A
Desenho de Montagem (Base - Haste)	N-5	Escala CM



Renato Vergueiro Otake		Revisão B
Desenho de Montagem (Base - Haste)	N-5	Escala CM

Bibliografia

- [1] Sujan V. A., Dubowsky S.; *Design of a Lightweight Hyper-Redundant Deployable Binary Manipulator*; Journal of Mechanical Design vol.126 January 2004.
- [2] Wingert A., Lichter M., Dubowsky S., Hafez M.; *Hyper-Redundant Robot Manipulators Actuated by Optimized Binary Dielectric Polymers*; Proceedings of SPIE vol.4695 2002.
- [3] Hannan M. W., Walker I. D.; *Kinematics and the Implementation of an Elephant's Trunk Manipulator and other Continuum Style Robots*; Journal of Robotic Systems vol.20, n°.2 pp.45-63 February 2003.
- [4] Chirikjian G. S., Burdick J. W.; *A Hyper-Redundant Manipulator*; IEEE Transactions on Robotics and Automation vol.10, pp. 343-354, 1994.
- [5] Chirikjian G. S., Burdick J. W.; *The Kinematics of Hyper-Redundant Robot Locomotion*; IEEE Transactions on Robotics and Automation vol.11, NO 6, 1995.
- [6] G. Robinson, J.B.C. Davies; *Continuum Robots - A State of the Art*; IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp. 2849-2854, 1999.
- [7] R. Cieslak, A. Morecki; *Elephant trunk type elastic manipulator - a tool for bulk and liquid materials transportation*; Robotica vol.17, pp.11-16, 1999.
- [8] E. Paljug, T. Ohm, S. Hayati; *The JPL Serpentine Robot: a 12 DOF System for Inspection*; Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, pp.3143-3148, 1995.
- [9] G. Migadis, K. J. Kryiakopoulos; *Design and Forward Kinematics Analysis of a Robotic Snake*; Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, pp.3493-3498, 1997.
- [10] B. Dasgupta, T. S. Mruthyunjaya; *The Stewart Platform Manipulator: a review*; Mechanism and machine Theory 35, pp. 15-40, 2000.
- [11] M. Vasina; *Uncommon Actuators For Robotics- Shape Memory Alloy*; XXVIII. ASR '2003 Seminar, Instruments and Control, 2003.
- [12] A. J. Zaz, M. P. Cartmell, W. M. Ostachowicz, M. Wiercigroch; *One-dimensional shape memory alloy models for use with reinforced composite structures*; Institute of Physics Publishing Smart Materials and Structures PII: S0964-1726(03)61106-7.
- [13] Gerald B. Andeen; *Robot Design Handbook*; Editora SRI International; 1988
- [14] O. S. Lobosco, J. L. P. C. Dias; *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos*; Editora McGraw-Hill: Siemens S.A.; 1ª edição; 1988;

[15] Irlan Von Linsingen; *Fundamentos de Sistemas Hidráulicos*; Editora UFSC; 2ª edição; 2003.

[16] Site da Festo Brasil: <http://www.festo.com/INetDomino.br.pt/fcb6087273f93781c1256e860036a712.htm>

[17] Vitor Ferreira Romano; *Robótica industrial*; Editora Edgard Blücher LTDA; 1ª edição; 2002.

[18] Imetex Indústria Metalúrgica e Têxtil Ltda: <http://www.imetex.com.br/>