

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

DESENV. DE UM MANIPULADOR
MULTI-ARTICULADO

Guaratinguetá
1995



1110000278



***"Desenvolvimento de um
Manipulador Multi-Articulado"***

MÁRCIO AUGUSTO MARTIN

42

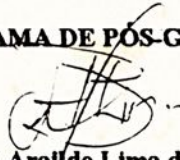
"DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR MULTI-ARTICULADO"

MÁRCIO AUGUSTO MARTIN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

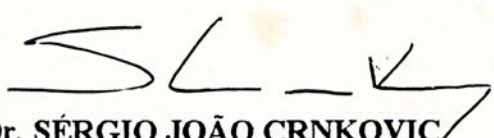
ESPECIALIDADE: MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

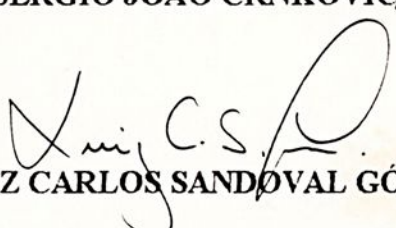
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Araldo Lima da Silva
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TAMOTSU HIRATA
Orientador


Prof. Dr. SÉRGIO JOÃO CRNKOVIC


Prof. Dr. LUIZ CARLOS SANDOVAL GÓES

Junho de 1995

AGRADECIMENTOS

MARCIO AUGUSTO MARTIN

"DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR MULTI-ARTICULADO"

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação da
Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá e
aprovada pela banca examinadora, para a obtenção do título
de "MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"
Área de Concentração em Projetos e Materiais.

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

278

278

UNESP - Campus de Guaratinguetá

Junho de 1995

T907.52(043)
M382d

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Tamotsu Hirata, pela orientação e incentivo.

Aos Professores, técnicos e secretárias do departamento de mecânica pelo apoio e cooperação.

A Isabel, pela compreensão e colaboração.



Resumo

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo de manipulador Multi-articulado, de simples construção, que atende a grande mobilidade exigida. Foi desenvolvido um modelamento cinemático do manipulador proposto para analisar a trajetória na extremidade livre do mesmo, juntamente com a análise de forças nos cabos de comando, de acordo com as diferentes posturas do manipulador.

O modelo experimental é constituído de 9 discos e 9 esferas, movimentados por 4 cabos de aço, sendo que cada par de cabos é acionado por um motoredutor, controlado por um computador.

Os resultados experimentais mostraram que este manipulador possui uma boa precisão, aliada a uma alta mobilidade



Conteúdo

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

ABSTRACT

This work is concerned with a development of multi-degree-of-freedom flexible manipulator. The manipulator project is of single construction attending the necessity great of the mobility. The trajectory of the manipulator studied was analyzed using the method of homogenous transformation.

The experimental analysis was performed using a prototype model, constructed with 9 spherical joints and 9 rigid discs moved by steel cables, commanded by motoreductors. The best results showed to be good where is necessary high flexibility, although the position precision are conditioned to the tension adjust at the command cables.

CAPÍTULO II - MODELIAMENTO MATEMÁTICO

II.1 - Análise Cinemática

II.1.1 - Movimento de uma junta de rotação

II.1.2 - Movimento de juntas vizinhas

II.1.3 - Simulação numérica de posicionamento

II.2 - Análise de Forças Elásticas

II.2.1 - Análise das forças elásticas presentes no manipulador

II.2.2 - Simulação numérica de forças elásticas

Conteúdo

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
I.1 - Considerações Iniciais	01
I.2 - Objetivo	07
I.3 - Desenvolvimento do Trabalho.....	07
CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DO MANIPULADOR MULTI-ARTICULADO	09
II.1 - Construção do Manipulador.....	10
II.2 - Mobilidade do Manipulador.....	15
II.3 - Problemas de atrito.....	18
II.4 - Cargas no Manipulador.....	19
II.5 - Controle do Manipulador.....	20
CAPÍTULO III - MODELAMENTO MATEMÁTICO.....	21
III.1 - Análise Cinemática.....	21
III.1.1 - Movimento de uma junta de rotação.....	21
III.1.2 - Movimento de juntas vizinhas.....	25
III.1.3 - Simulação numérica de posicionamento.....	28
III.2 - Análise de Forças Estáticas.....	31
III.2.1 - Análise das forças estáticas atuantes no manipulador.....	32
III.2.2 - Simulação numérica de forças estáticas.....	36

CAPÍTULO IV - TESTES EXPERIMENTAIS	38
IV.1 - Bancada Experimental.....	39
IV.1.1 - Medidas de deslocamento.....	41
IV.1.2 - Procedimento medidas de deslocamento.....	43
IV.1.3 - Medidas de força no cabo.....	44
IV.1.4 - Procedimento medidas de forças.....	45
IV.2 - Resultados Experimentais.....	45
IV.2.1 - Resultados experimentais de deslocamento.....	45
IV.2.2 - Resultados experimentais de forças no cabo.....	51
IV.3 - Análise Comparativa dos Resultados Experimentais/Teóricos.....	52
IV.3.1 - Análise comparativa dos resultados experimentais/teóricos de deslocamento.....	52
IV.3.2 - Análise comparativa dos resultados experimentais/teóricos de força no cabo.....	54
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
SÍMBOLOS.....	59

Lista de Figuras

Figura I.1 - Manipulador SPINE [1].....	03
Figura I.2 - Representação esquemática da estrutura metálica desenvolvida por SEGUCHI [6].....	04
Figura I.3 - Representação esquemática do manipulador desenvolvido por FRISOLI [3].....	04
Figura I.4 - Representação esquemática do aparelho de endoscopia desenvolvido por STURGES [4].....	05
Figura I.5 - Representação esquemática do manipulador desenvolvido por WILSON [8].....	06
Figura I.6 - Manipulador multi-articulado desenvolvido por MA [5].....	07
Figura II.1 - Manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho.....	09
Figura II.2 - Representação esquemática do manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho.....	10
Figura II.3 - Representação esquemática de um segmento do manipulador.....	11
Figura II.4 - Desenho do disco e da bucha.....	13
Figura II.5 - Elementos do manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho.....	13
Figura II.5 - Elementos do manipulador multi-articulado desenvolvido	
Figura II.6 - Esquema do conjunto do manipulador e sistema de acionamento.....	15
Figura II.7 - Posições de montagem do manipulador.....	16
Figura II.8 - Representação da mobilidade do manipulador (volume de trabalho)....	17
Figura III.1 - Representação dos eixos de coordenadas.....	22
Figura III.2 - Ilustração de rotação do plano X2 X3.....	23
Figura III.3 - Análise de rotações entre duas posições vizinhas.....	26
Figura III.4 - Pontos representativos da trajetória do manipulador	29

Figura III.5 - Trajetória da extremidade do manipulador ponto a ponto com variação do ângulo de rotação θ para $L=20$ mm.....	30
Figura III.6 - Trajetória da extremidade do manipulador ponto a ponto com variação da distância entre as juntas L com $\theta=15^\circ$	30
Figura III.7 - Representação das forças atuantes em um segmento do manipulador.....	32
Figura III.8 - Representação das forças estáticas atuantes no manipulador.....	33
Figura III.9 - Posições assumidas pelo manipulador, partindo da posição 10 até a posição 1.....	35
Figura III.10 - Variação da força F_{cd} para diferentes valores de carregamento externo (P_c).....	37
Figura IV.1 - Esquema de montagem do manipulador.....	39
Figura IV.2 - Esquema de controle do manipulador.....	41
Figura IV.3 -Representação esquemática da bancada experimental para medição do deslocamento no plano X_2 X_3 e da força no cabo.....	42
Figura IV.4 - Bancada experimental para medição de deslocamento no plano X_2 e X_3 e da força no cabo.....	43
Figura IV.5 - Célula de carga utilizada para a medição da força no cabo.....	45
Figura IV.6 - Comportamento do deslocamento X_2 posição (IDA e VOLTA).....	47
Figura IV.7 - Comportamento do deslocamento X_3 posição (IDA e VOLTA).....	47
Figura IV.8 - Gráfico X_2 x posição invertida na volta.....	49
Figura IV.9 - Gráfico X_3 x posição invertida na volta.....	49
Figura IV.10 - Gráfico X_3 x X_2 na posição normal.....	50
Figura IV.11 - Gráfico X_3 x X_2 na posição invertida na volta.....	50
Figura IV.12 - Variação da força de tração no cabo.....	52
Figura IV.13 -Gráfico X_2 x X_3 .(teórico - experimental).....	53
Figura IV.14 - Forças de tração experimental e teórica em função da posição do manipulador.....	54



Lista de tabelas

Tabela II.1 - Dados sobre os componentes do manipulador.....	14
Tabela IV.1 - Medição de posicionamento na IDA do manipulador.....	46
Tabela IV.2 - Medição de posicionamento na VOLTA do manipulador.....	46
Tabela IV.3 - Forças de tração no cabo e respectivo desvio padrão para as posições de 1 a 10.....	51

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Iniciais

Os braços de robô sempre buscam imitar a morfologia dos braços humanos, ao longo industrial, os manipuladores robóticos, que têm hoje larga utilização devido a suas características de alta precisão, rapidez e alta produção, e com preços decrescentes no mercado mundial.

No mundo de hoje, os manipuladores são flexíveis, com grande capacidade de adaptação, devido à necessidade de se aumentar a produtividade, e consequentemente a velocidade de produção, os manipuladores são projetados para serem capazes de realizar tarefas diversas. Dentro das tarefas, os manipuladores são projetados para serem capazes de realizar tarefas diversas, flexíveis, com grande capacidade de adaptação, devido à necessidade de se aumentar a produtividade, e consequentemente a velocidade de produção.

Manipuladores são projetados para serem capazes de realizar tarefas diversas, flexíveis, com grande capacidade de adaptação, devido à necessidade de se aumentar a produtividade, e consequentemente a velocidade de produção. Manipuladores são projetados para serem capazes de realizar tarefas diversas, flexíveis, com grande capacidade de adaptação, devido à necessidade de se aumentar a produtividade, e consequentemente a velocidade de produção.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - Considerações Iniciais

Os braços de robôs sempre tentaram imitar a morfologia dos braços humanos, no campo industrial, os manipuladores convencionais têm hoje larga utilização devido a suas características de alta precisão aliadas à alta produção, e com preços decrescentes no mercado mundial.

No mundo de hoje, manipuladores flexíveis vêm sendo estudados com bastante ênfase devido à necessidade de se aumentar a produtividade, e conseqüentemente a velocidade de operação, aliada a exigências cada vez maiores em qualidade de produtos produzidos. Dentro das tarefas desempenhadas por manipuladores convencionais, os manipuladores flexíveis vêm ganhando espaço, podendo futuramente substituí-los com vantagens.

Manipuladores flexíveis são constituídos por estruturas que possuem uma baixa rigidez devido à necessidade da diminuição de peso, com objetivo de se utilizarem acionadores cada vez menos potentes e mais econômicos, conseguindo-se assim um custo/benefício maior.



Nos manipuladores multi-articulados a flexibilidade é conseguida através da união de vários segmentos que dão ao manipulador muitos graus de liberdade.

Os manipuladores multi-articulados são constituídos pela união de corpos, que possuem movimentos relativos entre si. Estes sistemas têm sido estudados com bastante ênfase no estudo de manipuladores, e são utilizados em mecanismos e sistemas estruturais que possuem componentes interconectados, e que podem ser modelados como um sistema multicorpos, tais como : estruturas espaciais, aviões, estruturas flexíveis, aparelhos de endoscopia e braços de robôs.

Os manipuladores multi-articulados são utilizados principalmente em operações onde a flexibilidade é altamente necessária, como no caso de robôs de inspeção de tubulações, onde a movimentação tem que vencer ângulos de 90° . Na área médica, endoscopias mais modernas são feitas utilizando este tipo de manipulador, que consegue vencer curvaturas de pequeno raio, e ângulos maiores que 90° . As operações de pintura, que muitas vezes são insalubres, podem também se beneficiar de manipuladores multi-articulados, uma vez que a operação de pintura não requer um posicionamento preciso.

Devido às configurações especiais dos manipuladores multi-articulados, as características estáticas e dinâmicas dos mesmos influem na precisão de posicionamento, e o estudo destas características é de importância fundamental para o controle do manipulador flexível.

Do ponto de vista de projeto do manipulador e das características estáticas e dinâmicas, podemos citar alguns trabalhos desenvolvidos na área de manipuladores flexíveis:

O manipulador SPINE [1] é um típico exemplo de uma coluna espinhal humana, mostrado na figura (I.1). Este manipulador foi desenvolvido para executar tarefas que necessitam de uma grande flexibilidade. Ele é composto de discos convexos, colocados uns sobre os outros, e interligados por 4 cabos, que são acionados por cilindros hidráulicos. Deste modo o conjunto se movimenta segundo 2 planos, conseguindo-se um volume de trabalho aproximadamente esférico, juntamente com a rotação da base.

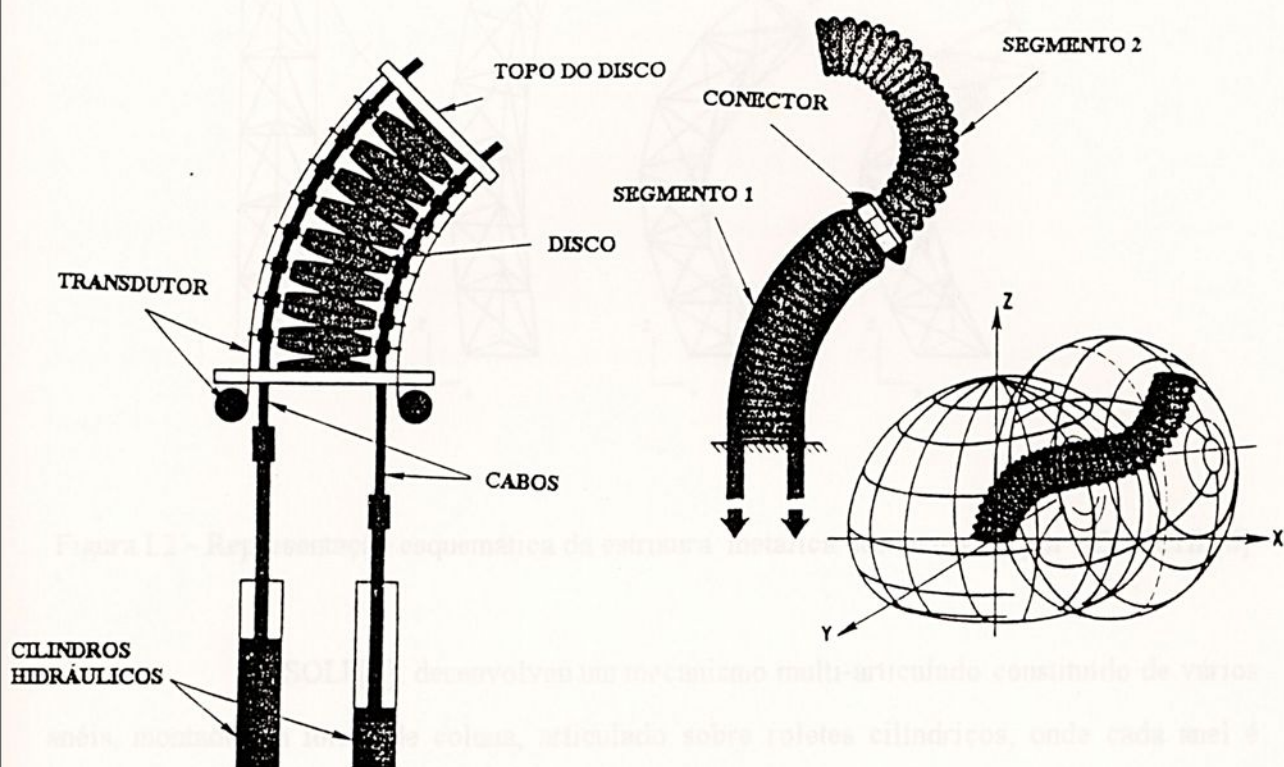


Figura I.1 - Manipulador SPINE [1]

No trabalho de SEGUCHI, Y et AL [6], foi desenvolvida uma estrutura metálica que pode trabalhar como um braço flexível, sendo que esta estrutura é composta de vários elementos estruturais flexíveis que sofrem deformações em seu comprimento. Estes elementos estruturais podem ser interpretados como articulações nos manipuladores multi-articulados. Como se pode observar na figura I.2, estes elementos flexíveis são interligados através de juntas soldadas, sustentando as forças solicitadas nos elementos adjacentes. Os autores utilizaram um sistema de coordenadas cartesianas para a formulação de um modelo cinemático, juntamente com o método matricial de análise de estruturas, baseado no fato de que os graus de liberdade (GL) da junta é idêntica a da deformação estrutural. Esta estrutura pode trabalhar como um manipulador que possua grandes graus de liberdade.

(a) Vista lateral do manipulador (b) Vista frontal do manipulador

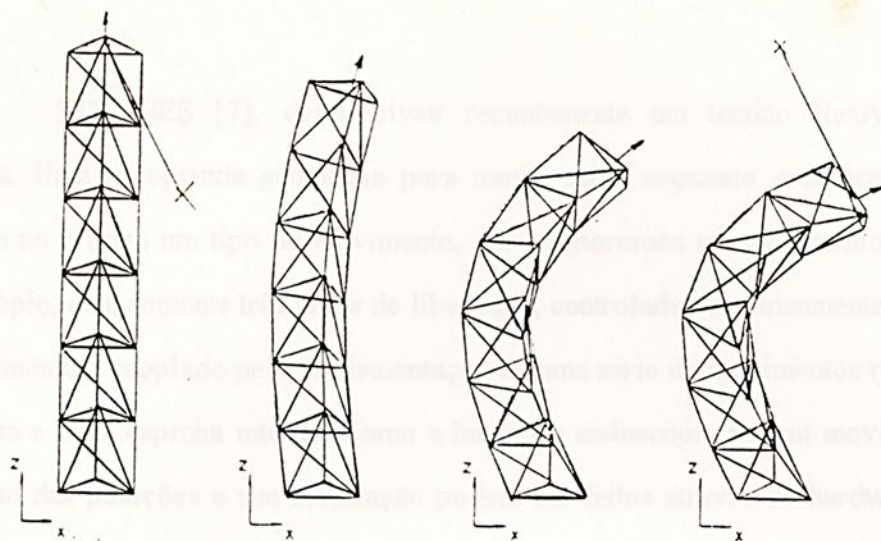


Figura I.2 - Representação esquemática da estrutura metálica desenvolvida por SEGUCHI [6]

FRISOLI [3], desenvolveu um mecanismo multi-articulado constituído de vários anéis, montado em forma de coluna, articulado sobre roletes cilíndricos, onde cada anel é acionado por dois cabos de aço. No interior do manipulador cria-se um duto livre por onde pode-se passar cabos de acionamento. O manipulador foi modelado como uma viga engastada submetida à ação de forças na sua extremidade. Este mecanismo mostrou-se bastante flexível, e tem como vantagem o fato de alojar em seu interior cabos de acionamento e elementos necessários para sensoreamento ou controle.

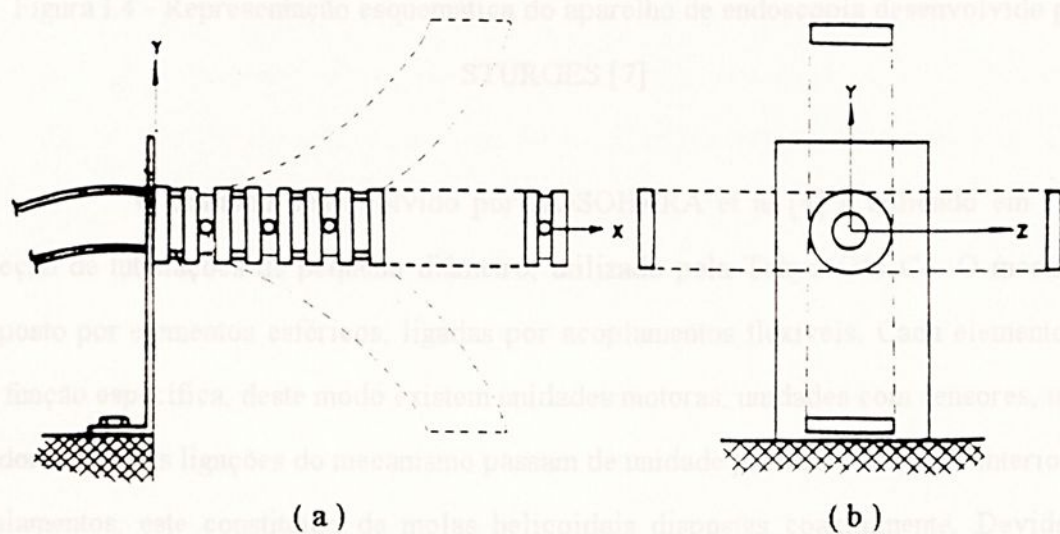


Figura I.3 - Representação esquemática do manipulador desenvolvido por FRISOLI [3]

(a) Vista lateral do manipulador

(b) Vista frontal do manipulador

STURGES [7], desenvolveu recentemente um tendão flexível usado para endoscopia. Uma apropriada geometria para mover cada segmento está presente nele. Foi introduzido no projeto um tipo de movimento, que proporciona um movimento plano na haste do endoscópio, com somente três graus de liberdade, controlados continuamente pelo operador. Cada movimento é acoplado pela implementação de uma série de movimentos relativos entre o tubo externo e o da espinha interna. Como a haste do endoscópio possui movimento plano, o mapeamento das posições e sua orientação podem ser feitos através de hardware e software simples.

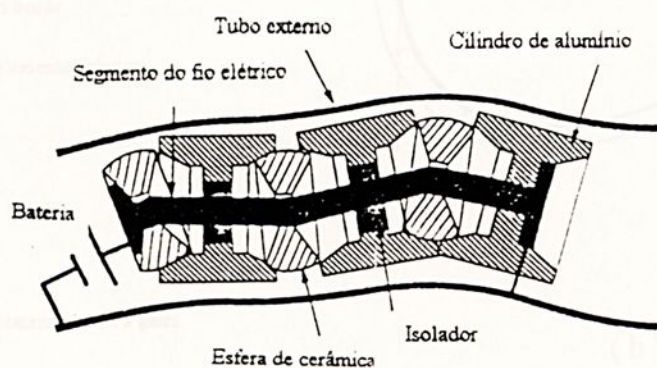


Figura I.4 - Representação esquemática do aparelho de endoscopia desenvolvido por STURGES [7]

O trabalho desenvolvido por HOSOHARA et al [4] é aplicado em robôs de inspeção de tubulações de pequeno diâmetro, utilizado pela Tokyo Gás Co. O mecanismo é composto por elementos esféricos, ligadas por acoplamentos flexíveis. Cada elemento possui uma função específica, deste modo existem unidades motoras, unidades com sensores, unidades guiadoras, etc. As ligações do mecanismo passam de unidade para unidade, pelo interior destes acoplamentos, este constituído de molas helicoidais dispostas coaxialmente. Devido a sua grande flexibilidade, este mecanismo pode movimentar-se em tubulações complicadas, como cotovelos de 90°, uniões em T, assim como conexões normais utilizadas em tubulações.

WILSON et al [8], desenvolveu um membro robótico flexível de baixo peso. Este membro é composto por uma série de tubos de polímero. O membro é fixo em uma extremidade e a outra extremidade é utilizada para carregar um objeto. A movimentação é feita pela variação da pressão interna de cada elemento. O autor desenvolveu um modelo que relaciona a posição do membro e o seu carregamento, considerando a propriedades elásticas não lineares do elemento oriunda de grandes deflexões. Um programa computacional foi desenvolvido para o posicionamento correto de cada membro, com sucessivas manipulações.

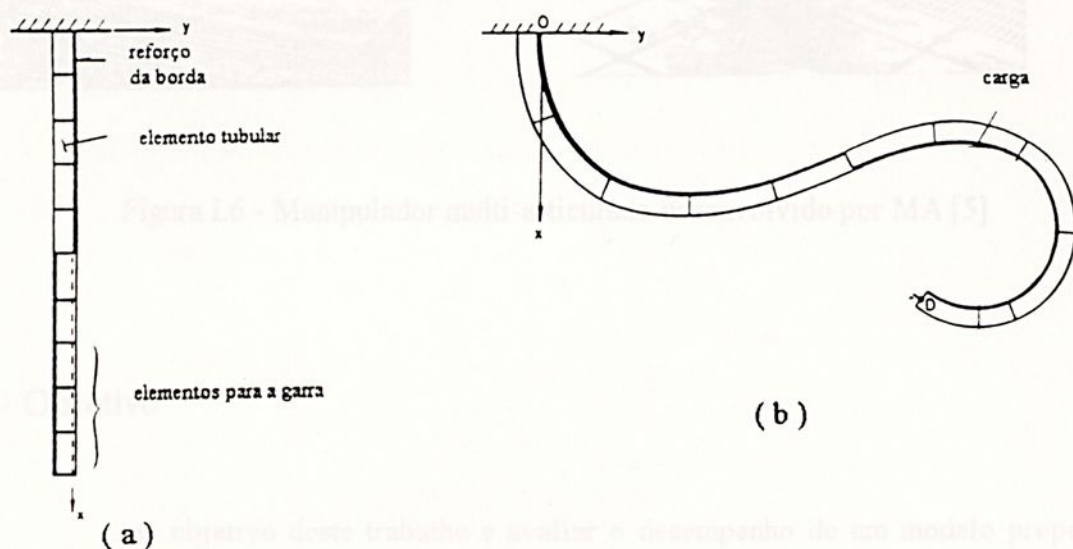


Figura 1.5 -Representação esquemática do manipulador desenvolvido por WILSON [8]

(a) Membro robótico sem carregamento (b) Membro robótico com carregamento

MA et al [5] analisaram o desempenho de um manipulador multi-articulado, acionado por tendões, com números iguais de articulações. Este manipulador pode movimentar-se com grande flexibilidade, devido aos movimentos independentes de suas 7 articulações, juntamente com a rotação da base do manipulador. O traçado dos segmentos utilizados foi otimizado para diminuir a potência necessária dos motores de acionamento de cada articulação. A figura 1.6 apresenta o protótipo deste manipulador multi-articulado.

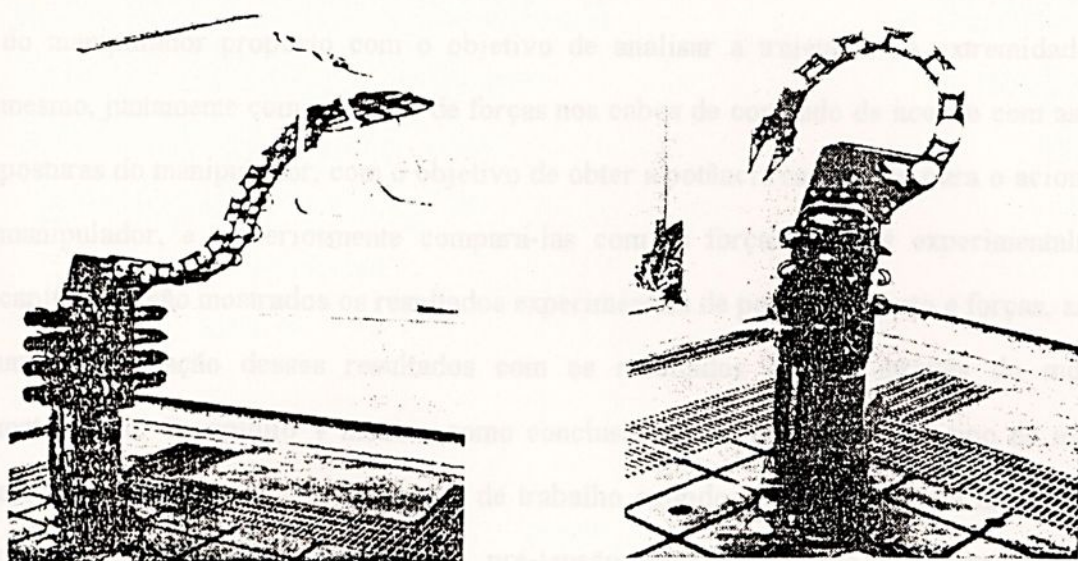


Figura I.6 - Manipulador multi-articulado desenvolvido por MA [5]

I.2 - Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um modelo proposto de manipulador multi-articulado, que tem por finalidade atender à manipulação de baixa carga, baixa velocidade de operação e precisão não severa, possuindo alta mobilidade e utilizando somente 2 motoredutores de c.c., que diminuem o custo final do produto. Paralelamente ao desenvolvimento do modelo é feita uma análise de posicionamento e de força de acionamento dos cabos de aço, afim de obter a potência dos motoredutores.

I.3 - Desenvolvimento do Trabalho

Para atingir o objetivo proposto foi projetado e construído um modelo de manipulador multi-articulado de construção simples, que atende à grande mobilidade. No capítulo II encontra-se a descrição do mecanismo do manipulador e o procedimentos de

cálculo dos componentes que o compõe. No capítulo III, foi desenvolvido o modelo cinemático do manipulador proposto com o objetivo de analisar a trajetória na extremidade livre do mesmo, juntamente com a análise de forças nos cabos de comando de acordo com as diferentes posturas do manipulador, com o objetivo de obter a potência necessária para o acionamento do manipulador, e posteriormente compará-las com as forças obtidas experimentalmente. No capítulo IV são mostrados os resultados experimentais de posicionamento e forças, assim como uma comparação desses resultados com os resultados obtidos através do modelamento matemático. O capítulo V mostra, como conclusão do trabalho, que este tipo de manipulador apresenta precisão adequada ao tipo de trabalho exigido, assim como uma alta mobilidade, e que um estudo mais adequado da pré-tensão nos cabos pode melhorar a precisão de posicionamento e permitir um estudo da rigidez do manipulador.



Figura II.1 - Manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DO MANIPULADOR MULTI-ARTICULADO

De acordo com o objetivo proposto no capítulo I o manipulador multi-articulado foi desenvolvido, utilizando um mecanismo de multi-discos interligados com juntas esféricas. A figura II.1 mostra o manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho.

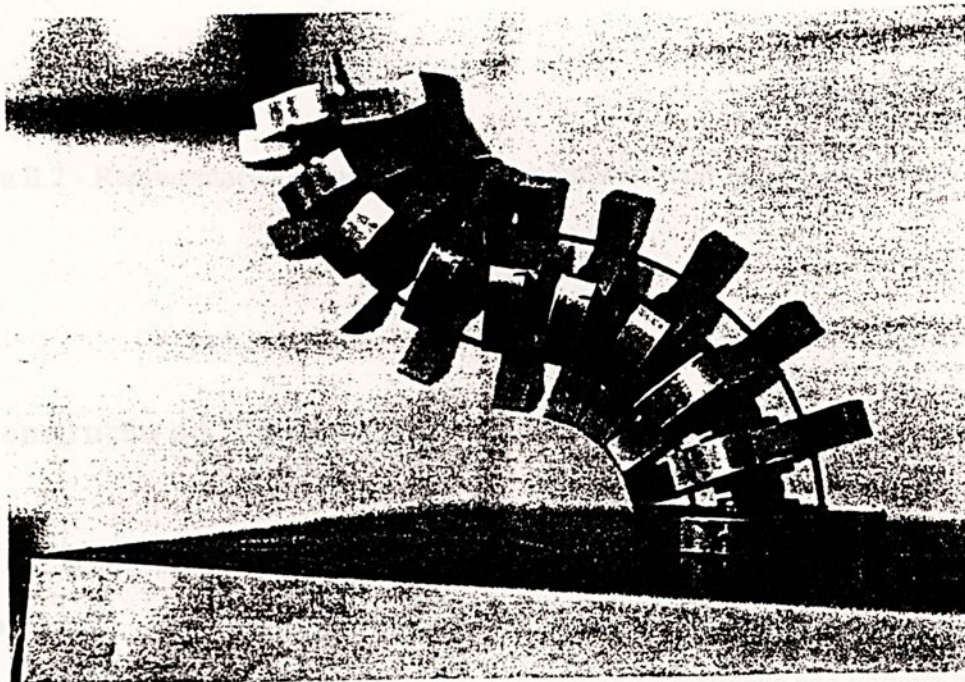


Figura II.1 - Manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho

Na figura II.2 representa esquematicamente o manipulador multi-articulado. Os detalhes de construção encontra-se no item II.1, a seguir.

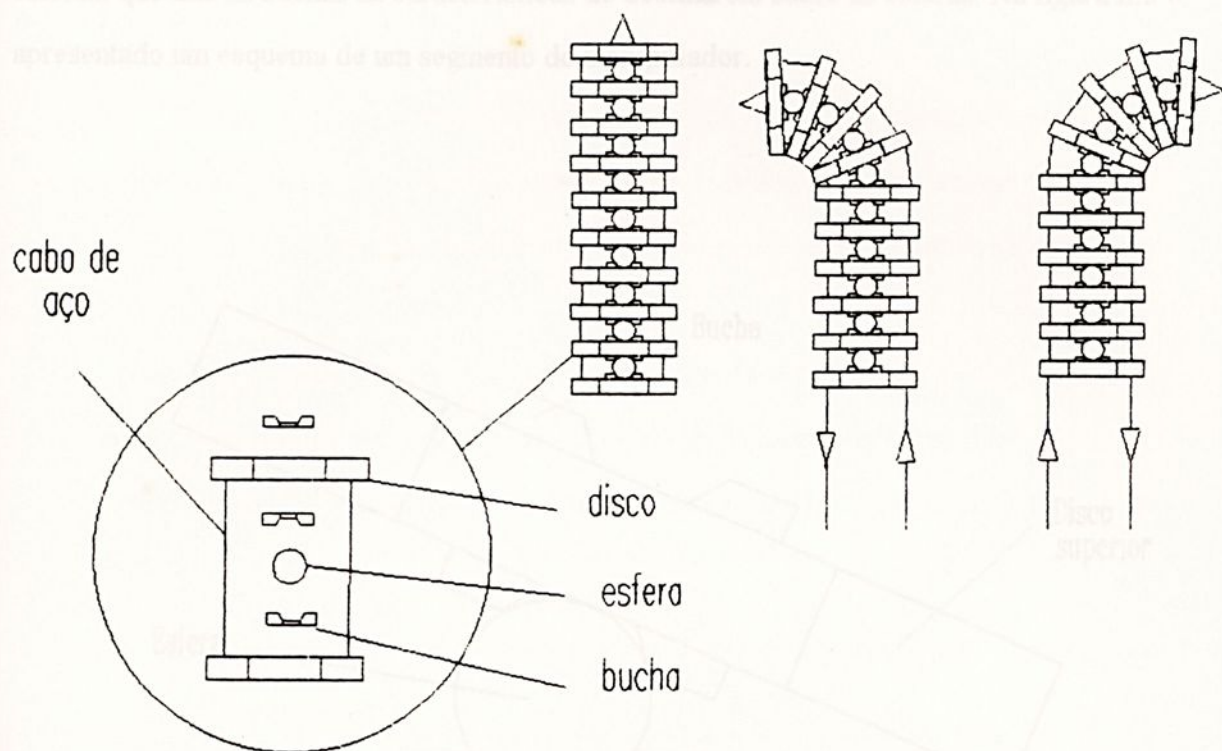


Figura II.2 - Representação esquemática do manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho

II.1 Construção do Manipulador

Inicialmente foi previsto que o manipulador deveria se mover a partir da posição vertical, e esta posição seria adotada como a posição zero. Na prática esta previsão não foi confirmada, pois o manipulador quando se inclinava não voltava à posição vertical. A posição vertical só foi então conseguida com a movimentação manual de cada disco. Foi observado que quando se inclinava totalmente o manipulador para qualquer um dos lados os discos se encostavam, e esta posição tinha repetibilidade, portanto foi adotada esta posição como sendo a posição zero.

O manipulador foi construído utilizando-se 9 esferas e 9 discos, sendo que em cada disco foi acoplado duas buchas nas faces opostas, com a finalidade de alojar as esferas, que dão às buchas as características de deslizarem sobre as esferas. Na figura II.3 é apresentado um esquema de um segmento do manipulador.

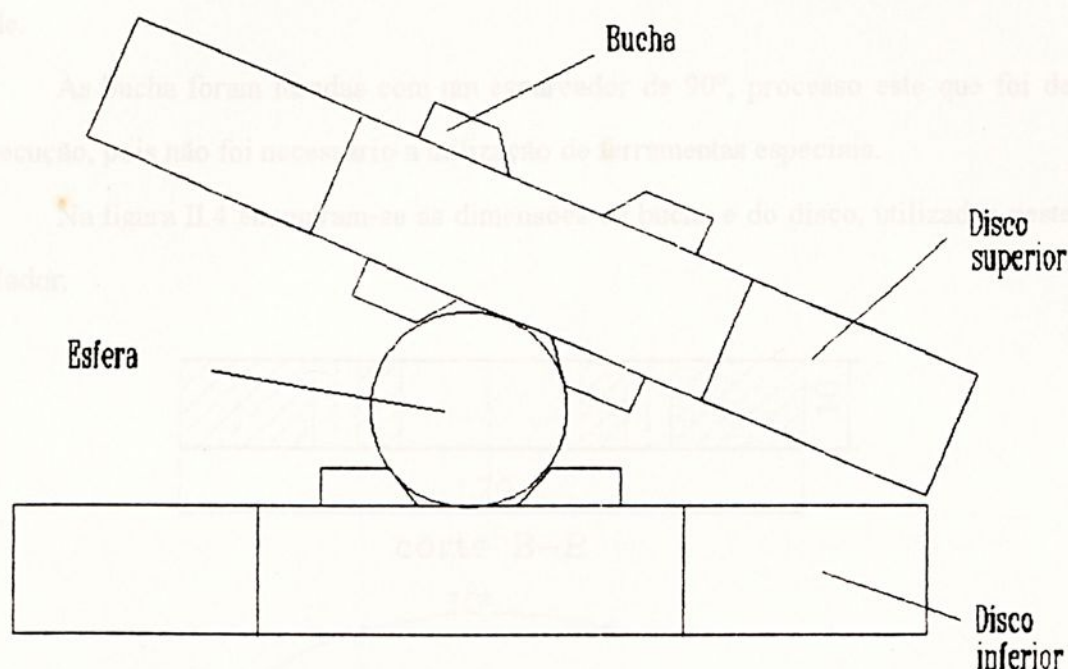


Figura II.3 - Representação esquemática de um segmento do manipulador

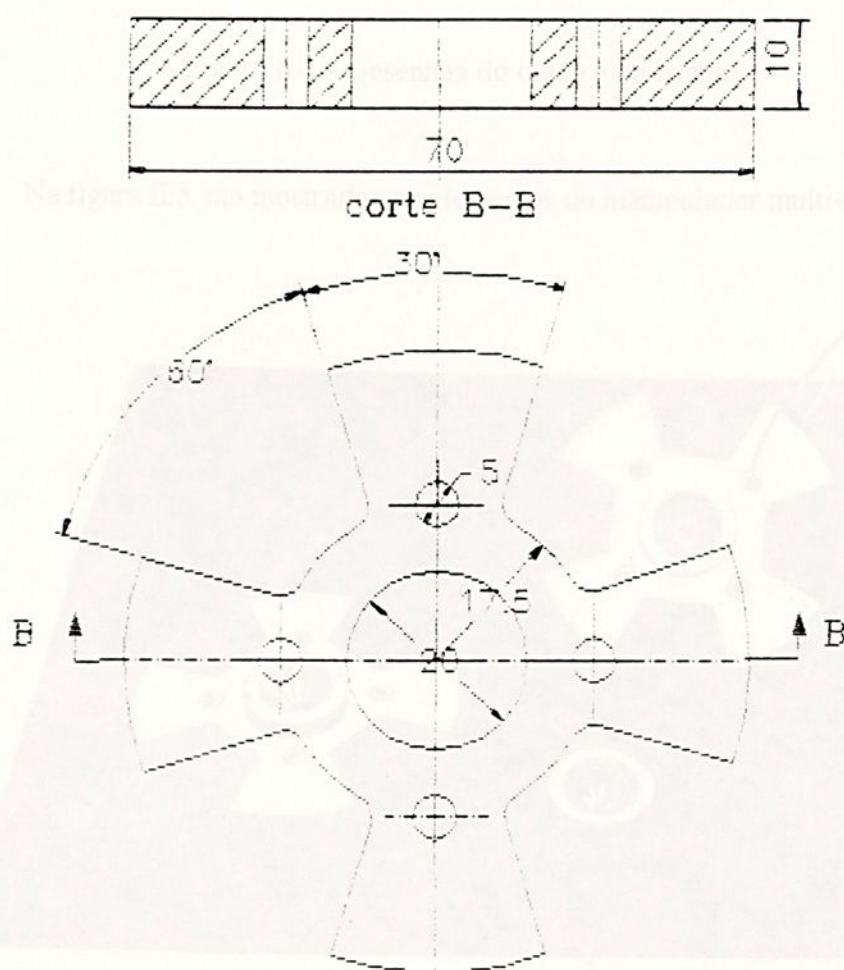
Como foi mencionado anteriormente, os movimentos do manipulador foram feitos por cabos, previamente lubrificados, que diminui a força exercida pelo motoredutor, mas em contrapartida, a lubrificação também influi na estabilidade do manipulador, diminuindo sua rigidez. Para corrigir este problema, foram colocados esticadores nos cabos do manipulador e a tensão do cabo foi ajustada experimentalmente de modo a dar ao manipulador uma rigidez adequada.

Os motoredutores são ligados a um controlador que por sua vez está conectado a um microcomputador, que controla através de um programa específico os deslocamentos angulares do motoredutor.

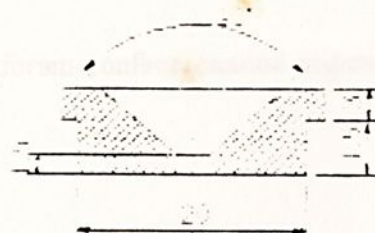
Devido à necessidade de diminuição de peso dos componentes foram utilizados discos de alumínio, e cada disco recebeu 4 entalhes ao longo de sua superfície, de modo a diminuir seu peso e possibilitar que cabos ou mangueiras possam se alojar nesta cavidade.

As buchas foram furadas com um escareador de 90° , processo este que foi de fácil execução, pois não foi necessário a utilização de ferramentas especiais.

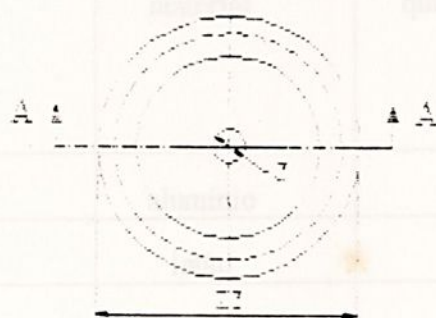
Na figura II.4 encontram-se as dimensões da bucha e do disco, utilizados neste manipulador.



Disco



corte A-A



Buchha

Figura II.4 - Desenhos do disco e da buchha

Na figura II.5 são mostrados os elementos do manipulador multi-articulado

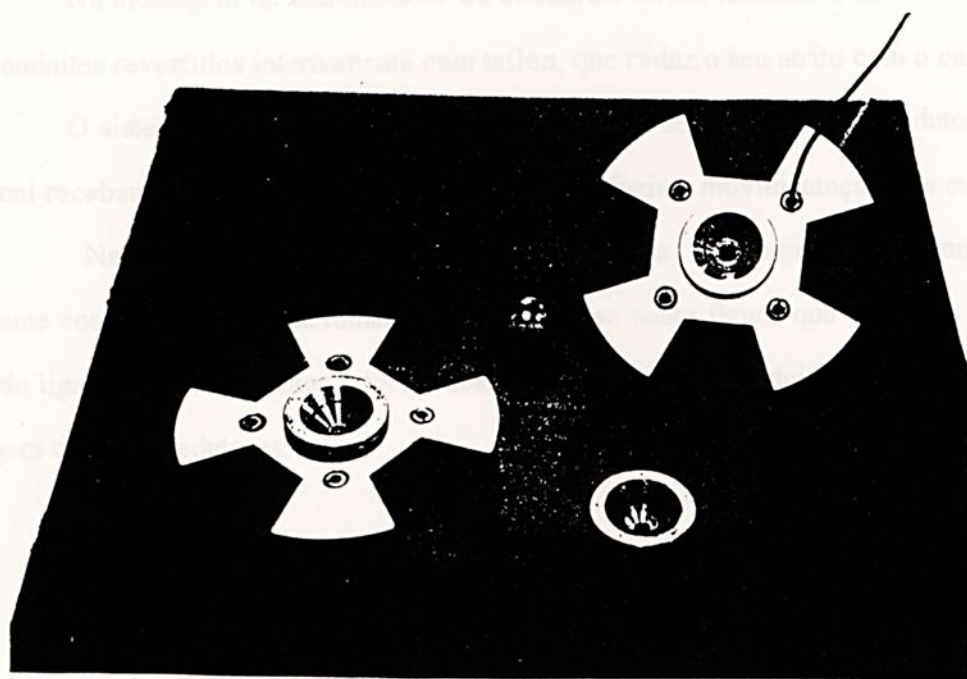


Figura II.5 - Elementos do manipulador multi-articulado desenvolvido neste trabalho

Os componentes foram confeccionados segundo as quantidades e os materiais especificados na tabela II.1

Tabela II.1 - Dados sobre os componentes do manipulador

componente	material	quantidade	dimensões para cada componente
disco	alumínio	9	3" x 12 mm
bucha	latão	18	1" x 10 mm
esfera de rolamento	aço	9	ϕ 15 mm
cabo	aço	4	1/8" x 500 mm
conduíte	aço com revestimento	36	ϕ 5 x 10 mm

Na montagem do manipulador os conduítes foram embutidos nos discos, sendo estes conduítes revestidos internamente com teflon, que reduz o seu atrito com o cabo.

O sistema de acionamento foi confeccionado utilizando 2 motoredutores, onde cada qual recebeu uma polia, de diâmetro 35 mm, que fazia a movimentação dos cabos.

Na figura II.6 é apresentado um esquema do conjunto do manipulador, juntamente com o sistema de acionamento. Observa-se nesta figura que dois dos cabos de comando ligados ao motoredutor 1 foram desviados através de conduítes para possibilitar a montagem dos motoredutores.

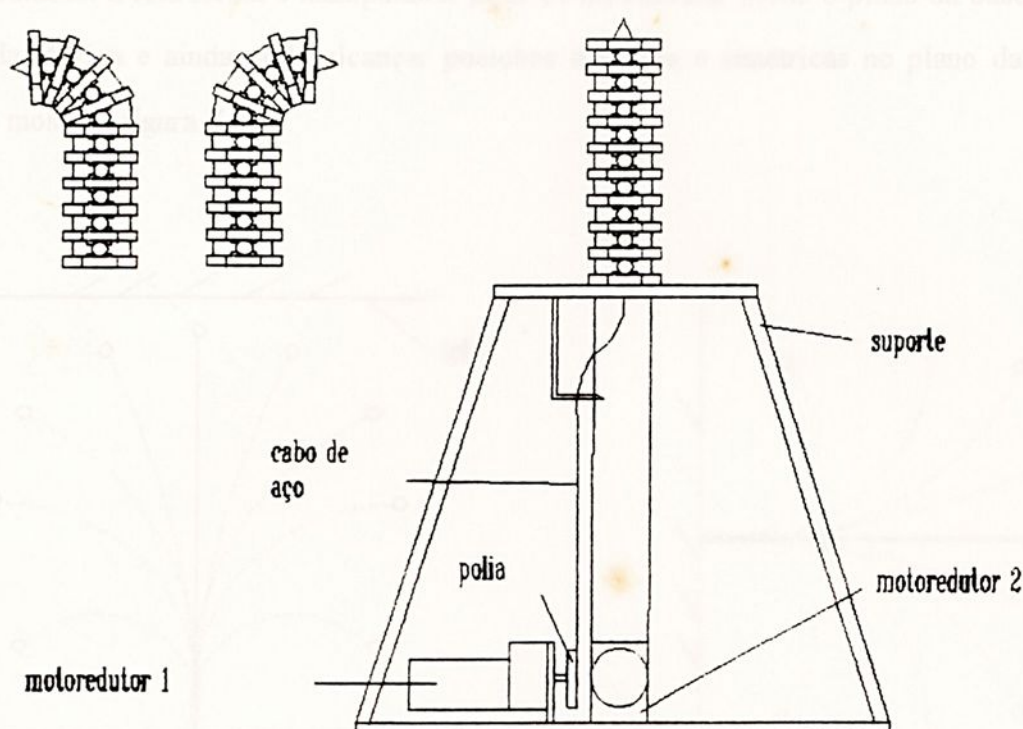


Figura II.6- Esquema do conjunto do manipulador e sistema de acionamento

II.2 - Mobilidade do Manipulador

Os manipuladores podem ser montados tanto na posição vertical quanto na posição horizontal. A montagem horizontal tem como vantagem a ação da força peso que age a favor do movimento, quando o manipulador movimenta-se para baixo, e como desvantagem a ação da força peso quando o manipulador movimenta-se para cima. A montagem vertical tem como vantagem a ação da força peso que age a favor do movimento, quando o manipulador movimenta-se para os lados, e como desvantagem a ação da força peso quando o manipulador retorna a posição vertical.

A posição de montagem do manipulador foi escolhida como sendo vertical, para atender à maior mobilidade de manipulação do objeto, colocado no nível da base do

manipulador. Desta forma o manipulador pode se movimentar desde o plano da base até o teto da fábrica e ainda pode alcançar posições distantes e simétricas no plano da base, como mostra a figura II.7.

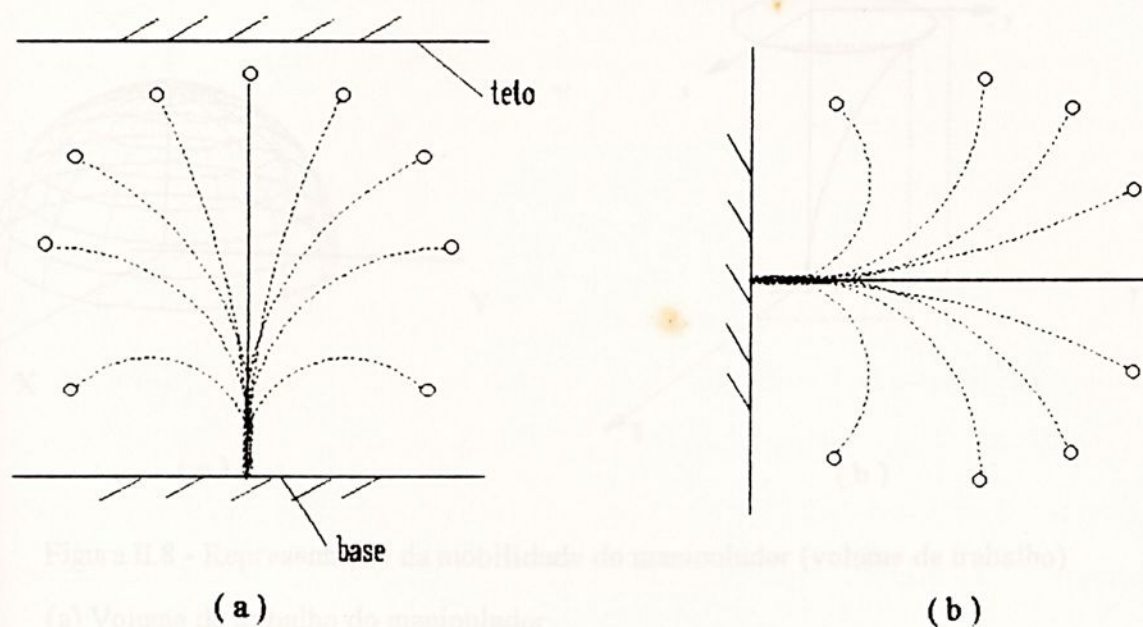


Figura II.7 - Posições de montagem do manipulador

(a) Plano vertical (b) Plano horizontal

O acionamento do manipulador é feito por 2 conjuntos de 2 cabos alocados em planos perpendiculares entre si. Deste modo com o movimento simultâneo dos 2 conjuntos de cabos é possível realizar um movimento tridimensional sobre uma superfície esférica como mostra a figura II.8.

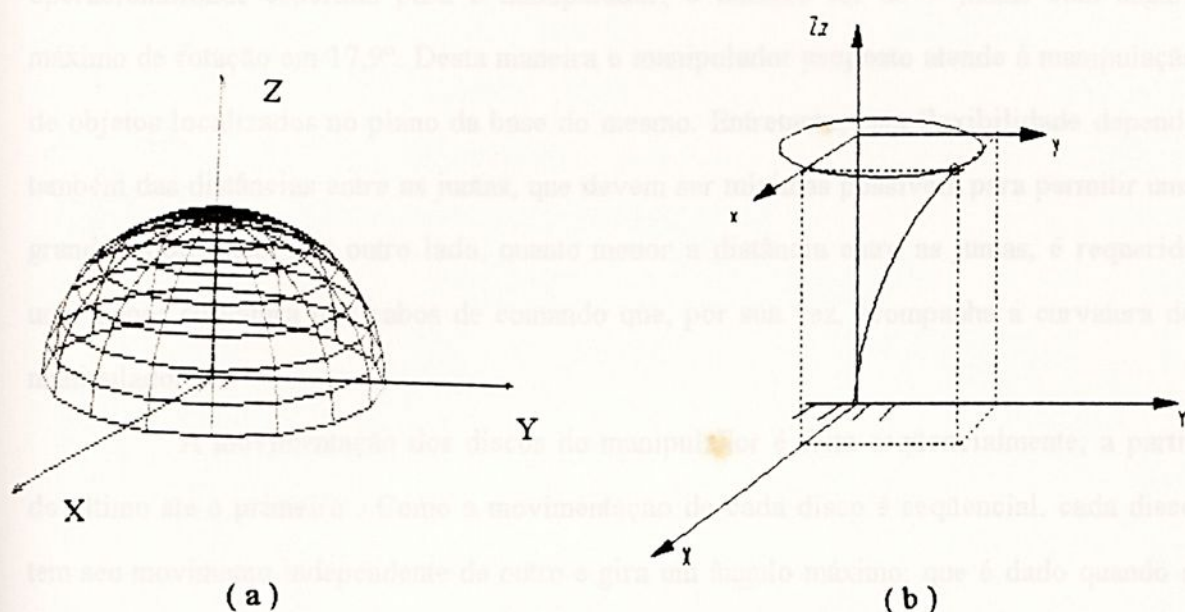


Figura 11.8 - Representação da mobilidade do manipulador (volume de trabalho)

(a) Volume de trabalho do manipulador

(b) Representação de uma determinada coordenada com relação ao eixos de coordenadas

O manipulador SPINE [1], descrito no capítulo I, utiliza discos convexos, com o objetivo de obter o movimento entre os discos. O modelo proposto consiste de esferas acopladas aos discos ao invés de discos convexos e o movimento do manipulador é feito por 2 conjuntos de 2 cabos de aço, onde cada conjunto é acionado por um motorreductor c.c., através da polia acoplada. A utilização de esferas acopladas a discos foi utilizada para dar uma maior simplicidade na confecção dos componentes, conseguidas pela utilização das esferas de rolamentos comerciais. De acordo com as restrições impostas pelas guias colocadas nos discos os cabos de aço foram alocados dois a dois em planos perpendiculares. Deste modo, as rotações das juntas seguem em 2 eixos perpendiculares entre si (eixos X e Y), como mostra a figura 11.8 (b). Nesta configuração o manipulador consegue se mover em planos perpendiculares.

Quanto ao grau de flexibilidade, este é determinado pela restrição do ângulo de rotação de cada junta, e pelo número de juntas utilizadas. Ao atender à maior operacionalidade esperada para o manipulador, o número foi de 9 juntas com ângulo máximo de rotação em $17,9^\circ$. Desta maneira o manipulador proposto atende à manipulação de objetos localizados no plano da base do mesmo. Entretanto, esta flexibilidade depende também das distâncias entre as juntas, que devem ser mínimas possíveis para permitir uma grande mobilidade. Por outro lado, quanto menor a distância entre as juntas, é requerida uma menor curvatura dos cabos de comando que, por sua vez, acompanha a curvatura do manipulador.

A movimentação dos discos do manipulador é feita sequencialmente, a partir do último até o primeiro. Como a movimentação de cada disco é sequencial, cada disco tem seu movimento independente de outro e gira um ângulo máximo, que é dado quando o disco encosta no outro imediatamente abaixo. Deste modo é feita a movimentação de todos os discos, observando que ele só se movimenta quando o disco imediatamente superior acabar de se movimentar. Com este tipo de movimentação, foi possível controlar o manipulador, utilizando somente os 2 motoredutores de c.c..

II.3 - Problemas de atrito

Este manipulador pode apresentar um atrito significativo nas juntas rotativas, como na maioria dos manipuladores multi-articulados apresentados no capítulo I. O atrito é provocado principalmente pelo grande número de peças em movimento, associado a uma lubrificação não muito eficiente.

Devido ao tipo de comando, o atrito entre os cabos de comando e suas respectivas guias causam uma força externa adicional para o acionamento do mecanismo. Esta força adicional tende a aumentar com a menor curvatura do cabos de comando devido ao aumento da força de contato entre os cabos e as guias.

Devido ao atrito referido anteriormente citado o manipulador apresenta histerese, e falta de precisão no posicionamento, limitando seu uso em operações de posicionamento preciso.

É importante revelar que de acordo com a observação feita no protótipo, o movimento entre as superfícies de contato entre a esfera e o disco é do tipo deslizante, e não de rolamento, o que acarreta um maior atrito para o movimento de rotação.

II.4 - Cargas no Manipulador

Este manipulador poderá futuramente receber no último disco uma carga externa, podendo a mesma ser a soma dos pesos de uma garra mais uma carga útil. No caso deste manipulador, a carga externa juntamente com os discos e as esferas provocam um momento que deve ser anulado pelos motoredutores.

Devido às características construtivas este manipulador não consegue sustentar cargas elevadas, pois sendo constituído de vários elementos, tem em cada elemento um momento associado que tende a desestabilizá-lo. A estabilidade é conseguida através do aumento da tensão no cabo, utilizando um esticador para cada cabo. Esta estabilidade também é condicionada pelos motoredutores, pois dependendo da carga o motor não terá potência para manter o manipulador na posição.

Quando o manipulador atinge uma grande inclinação, ocorre uma dificuldade de controle de posicionamento devido ao maior esforço exigido no motoredutor, pois, ele tem que sustentar tanto os componentes do manipulador quanto a carga externa.

A tensão nos cabos foi obtida de forma a manter uma pequena folga, necessária ao movimento do manipulador, pois uma tensão alta torna o manipulador muito rígido, restringindo seus movimentos.

Com o objetivo de se obter a força necessária para mover os cabos, foi feita uma análise de esforços atuantes nos mesmos. Esta análise levou em consideração o peso de cada componente, de acordo com a sua posição, determinada pelo ângulo de inclinação

do manipulador. Com esta análise, foi possível obter a força resultante, que atua de acordo com a inclinação do manipulador. Esta análise encontra-se no capítulo III.

II.5 - Controle do Manipulador

Para o controle da posição e da velocidade de acionamento do manipulador foi acoplado um "encoder" do tipo fotosensor para cada motoredutor, sendo que o sinal de comando de cada motoredutor foi controlado através de um programa "SCORBOT ERIII", juntamente com um controlador D/A e A/D.

III.1 - Análise Cinemática

Para o manipulador multi-articulado proposto no capítulo II, foi desenvolvido o modelamento cinemático, visando obter as características de posicionamento.

O manipulador proposto consiste de segmentos de juntas idênticas, e por este motivo, uma análise de uma das juntas pode servir de análise das outras.

III.1.1 - Movimento de uma junta de rotação

CAPÍTULO III

MODELAMENTO MATEMÁTICO

O modelamento matemático foi desenvolvido com o objetivo de comprovar os dados obtidos experimentalmente.

Para atingir este objetivo, foi desenvolvido um modelamento cinemático, com a finalidade de obter o posicionamento do manipulador em qualquer ponto de sua atuação, assim como a sua trajetória.

Foi desenvolvida também uma análise das forças estáticas atuantes no manipulador, com o objetivo de obter a força necessária para o acionamento do motoredutor.

III.1 - Análise Cinemática

Para o manipulador multi-articulado proposto no capítulo II, foi desenvolvido o modelamento cinemático, visando obter as características de posicionamento.

O manipulador proposto consiste de segmentos de juntas idênticos, e por este motivo, uma análise de uma das juntas pode servir às análises das outras.

III.1.1 - Movimento de uma junta de rotação



Isolando um segmento do manipulador, como mostra a figura III.1, podemos observar que este possui somente movimentos de rotação. Adotando o sistema de coordenadas cartesianas (X_1 , X_2 , X_3) com origem no centro da esfera, podemos observar melhor este movimento onde os eixos X_1 e X_2 sofrem as rotações devido às restrições impostas pelos cabos de comando.

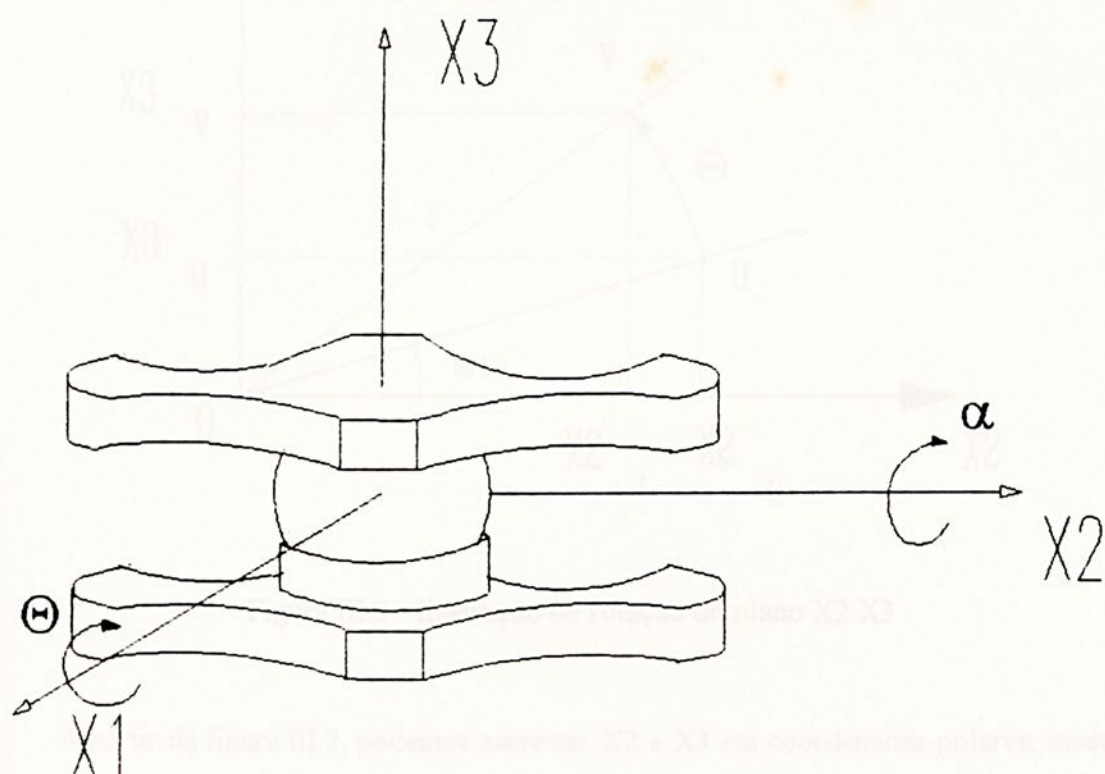


Figura III.1 - Representação dos eixos de coordenadas

Inicialmente consideremos o movimento de rotação no eixo X_1 , representado pelo plano X_2 e X_3 .

Considerando 2 pontos u e v no plano X_2 X_3 , conforme ilustrado na figura III.2, suas representações no plano são $u(X_{2u}, X_{3u})$ e $v(X_{2v}, X_{3v})$ respectivamente. Nesta figura a distância da origem ao ponto u e o ângulo entre o eixo X_2 e a linha $\overline{ou}$ são, respectivamente, r e θ_1 . O ponto u foi transformado no ponto v , através de uma rotação, em torno da origem, de um ângulo θ , no sentido anti-horário.

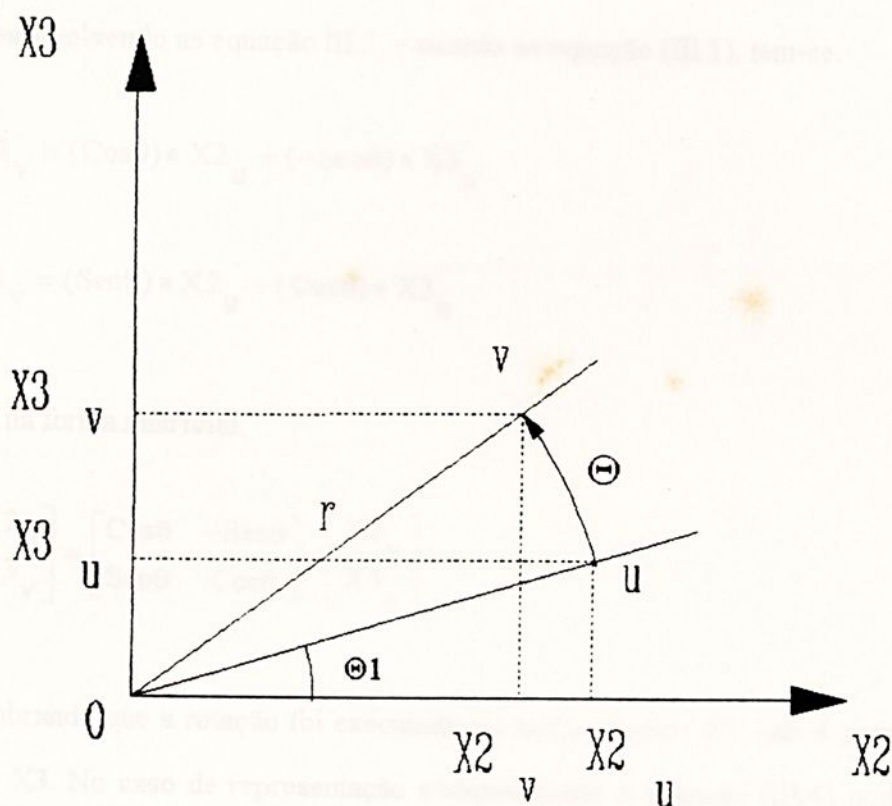


Figura III.2 - Ilustração de rotação do plano $X_2 X_3$

A partir da figura III.2, podemos escrever X_2 e X_3 em coordenadas polares, mostradas abaixo :

$$X_{2u} = r \cdot \cos \theta_1 \quad (III.1)$$

$$X_{3u} = r \cdot \sin \theta_1$$

$$X_{2v} = r \cdot \cos(\theta_1 + \theta) \quad (III.2)$$

$$X_{3v} = r \cdot \sin(\theta_1 + \theta)$$

Portanto r pode ser escrito como :

$$r = \sqrt{X2_u^2 + X3_u^2} = \sqrt{X2_v^2 + X3_v^2} \quad (\text{III.3})$$

Desenvolvendo as equação III.2, e usando as equação (III.1), tem-se:

$$X2_v = (\text{Cos}\theta) \cdot X2_u + (-\text{Sen}\theta) \cdot X3_u \quad (\text{III.4})$$

$$X3_v = (\text{Sen}\theta) \cdot X2_u + (\text{Cos}\theta) \cdot X3_u$$

Ou na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} X2_v \\ X3_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta & -\text{Sen}\theta \\ \text{Sen}\theta & \text{Cos}\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X2_u \\ X3_u \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Lembrando que a rotação foi executada em torno do eixo $X1$, que é perpendicular aos eixos $X2$ e $X3$. No caso de representação tridimensional a equação (III.4) pode ser rescrita como :

$$X1_v = (1) \cdot X1_u + (0) \cdot X2_u + (0) \cdot X3_u$$

$$X2_v = (0) \cdot X1_u + (\text{Cos}\theta) \cdot X2_u + (-\text{Sen}\theta) \cdot X3_u \quad (\text{III.6})$$

$$X3_v = (0) \cdot X1_u + (\text{Sen}\theta) \cdot X2_u + (\text{Cos}\theta) \cdot X3_u$$

ou, na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} X1_v \\ X2_v \\ X3_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Cos}\theta & -\text{Sen}\theta \\ 0 & \text{Sen}\theta & \text{Cos}\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X1_u \\ X2_u \\ X3_u \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

ou ainda,

$$X_v = R_{X1,\theta} \cdot X_u \quad (\text{III.8})$$

Onde, X_v : Vetor posição do ponto v

X_u : Vetor posição do ponto u

$R_{X1,\theta}$: Matriz de rotação com o ângulo de rotação de θ em torno do eixo X1

$$R_{X1,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

De maneira análoga podemos obter a matriz de rotação em torno do eixo X2, com o ângulo de rotação α ;

$$R_{X2,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

No caso de rotações sucessivas (α em seguida de θ) a matriz de rotação pode ser escrita como ;

$$R_{\theta,\alpha} = R_{X1,\theta} \cdot R_{X2,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ \sin\theta \cdot \sin\alpha & \cos\theta & -\sin\theta \cdot \cos\alpha \\ -\cos\theta \cdot \sin\alpha & \sin\theta & \cos\theta \cdot \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

III.1.2 - Movimento de juntas vizinhas

As relações entre as duas juntas vizinhas podem ser esquematizadas como mostra a figura III.3, onde uma das juntas pode ser considerada como referencial.

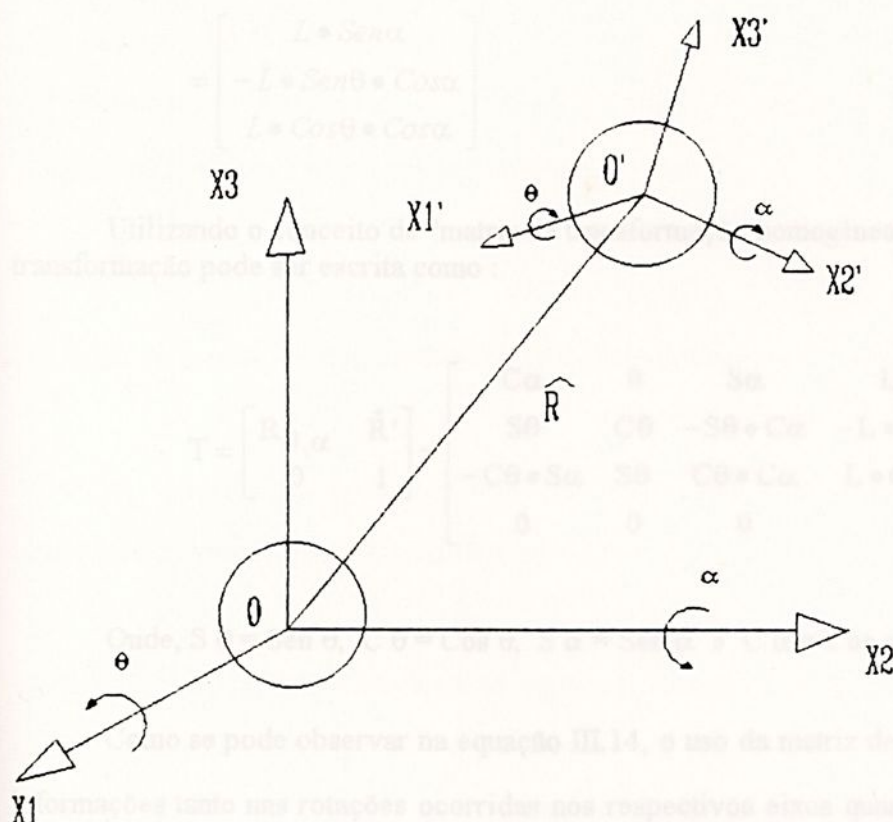


Figura III.3 - Análise de rotações entre duas juntas vizinhas

Tomando como posição inicial o vetor posição $\hat{R}$, coincidindo com o eixo X_3 , com $\theta=0$ e $\alpha=0$, $\hat{R}$ pode ser escrito,

$$\hat{R} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{X1} \\ R_{X2} \\ R_{X3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Onde, L é a Distância entre as duas juntas de rotação

Portanto, após as sucessivas rotações de θ e α a posição de O' no sistema referencial X_1, X_2 e X_3 pode ser escrita como :

$$\hat{R}' = R_{\theta, \alpha} \cdot \hat{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ \sin \theta \cdot \sin \alpha & \cos \theta & -\sin \theta \cdot \cos \alpha \\ -\cos \theta \cdot \sin \alpha & \sin \theta & \cos \alpha \cdot \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} L \cdot \text{Sen} \alpha \\ -L \cdot \text{Sen} \theta \cdot \text{Cos} \alpha \\ L \cdot \text{Cos} \theta \cdot \text{Cos} \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Utilizando o conceito de "matriz de transformação homogênea", [6] a matriz de transformação pode ser escrita como :

$$T = \begin{bmatrix} R_{\theta, \alpha} & \hat{R}' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\alpha & 0 & S\alpha & L \cdot S\alpha \\ S\theta & C\theta & -S\theta \cdot C\alpha & -L \cdot S\theta \cdot C\alpha \\ -C\theta \cdot S\alpha & S\theta & C\theta \cdot C\alpha & L \cdot C\theta \cdot C\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Onde, $S \theta = \text{Sen} \theta$, $C \theta = \text{Cos} \theta$, $S \alpha = \text{Sen} \alpha$ e $C \alpha = \text{Cos} \alpha$

Como se pode observar na equação III.14, o uso da matriz de transformação fornece as informações tanto nas rotações ocorridas nos respectivos eixos quanto no vetor posição após as rotações. O maior mérito do uso da matriz de transformação é a redução no tempo de processamento das operações matriciais.

No caso da matriz de transformação das juntas vizinhas i e $i+1$ pode ser escrita, considerando a distância entre as duas juntas como L_i , com ângulo de rotação θ^i e α^i nos eixos $X1$ e $X2$, respectivamente,

$$T_i^{i+1} = \begin{bmatrix} C\alpha^i & 0 & S\alpha^i & L \cdot S\alpha^i \\ S\theta^i \cdot S\alpha^i & C\theta^i & -S\theta^i \cdot C\alpha^i & -L \cdot S\theta^i \cdot C\alpha^i \\ -C\theta^i \cdot S\alpha^i & S\theta^i & C\theta^i \cdot C\alpha^i & L \cdot C\theta^i \cdot C\alpha^i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Então, considerando que temos 9 segmentos, podemos obter a matriz de transformação que descreve a posição do último segmento em relação à origem, adotada como sendo o centro da primeira esfera, próximo da base de apoio.

$$T_0^9 = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot T_2^3 \cdot T_3^4 \cdot T_4^5 \cdot T_5^6 \cdot T_6^7 \cdot T_7^8 \cdot T_8^9 \quad (\text{III.16})$$

Deste modo, podemos obter os vetores posições do último elemento da junta com relação à base referência coincidentemente escolhida.

III.1.3 - Simulação numérica de posicionamento

Na realização da simulação numérica foram consideradas as restrições impostas pelo modelo do manipulador proposto, tais como :

- a) Posição inicial do manipulador com ângulo de rotação máximo da junta, pois apresenta uma melhor repetibilidade nas posições de repouso.
- b) Os pontos da trajetória são representados na extremidade livre do manipulador.
- c) Os pontos da trajetória são aquelas posições em que os discos adjacentes em contato têm uma melhor repetibilidade na posição e na estabilidade de sustentação da carga a ser manipulada.
- d) Com base no item (c) os pontos representativos da trajetória são iguais ao número de juntas escolhido, que de acordo com o protótipo foram selecionadas 9 juntas.
- e) Devido à simetria do movimento de rotação nos eixos X1 e X2 da figura III.1 a simulação foi feita apenas na rotação do eixo X1, com ângulo θ no plano X2 e X3, pois, no plano X1 e X3, com ângulo α deve apresentar a mesma característica.

Com base nas restrições acima mencionadas, as posições representativas da trajetória na extremidade livre do manipulador são representadas pela figura III.4.

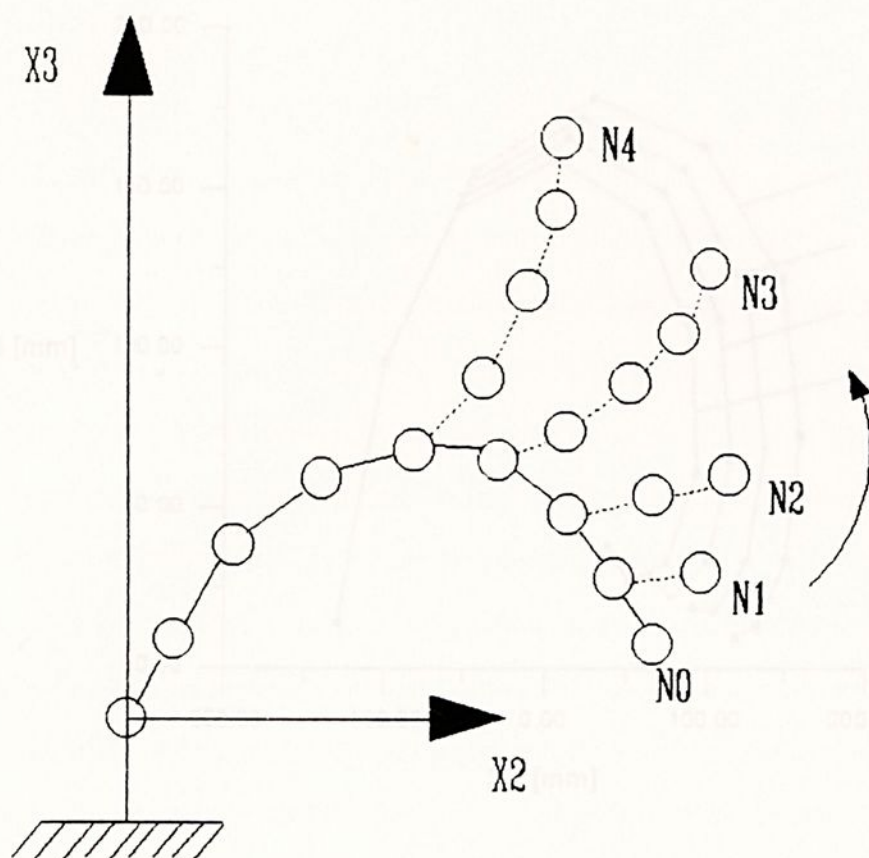


Figura III.3 - Trajetória da extremidade do manipulador ponto a ponto com variação do ângulo de rotação θ para $L = 20 \text{ mm}$

N_i : Posições de simulação

com $i = 0, 1, 2, \dots, 9$

onde N_0 = posição de repouso

Figura III.4 - Pontos representativos da trajetória do manipulador

A simulação foi feita utilizando o software matlab for windows, para determinar as posições ponto a ponto da trajetória e os resultados são apresentados na forma de gráficos no plano $X_2 X_3$. Os dados utilizados para a simulação foram ; $\alpha = 0$ com número de juntas igual a 9 ($N=9$). Nas figuras III.5 e III.6 encontram-se os resultados da simulação com diferentes valores do ângulo de rotação θ no eixo X_1 e da distância entre as juntas L , respectivamente.

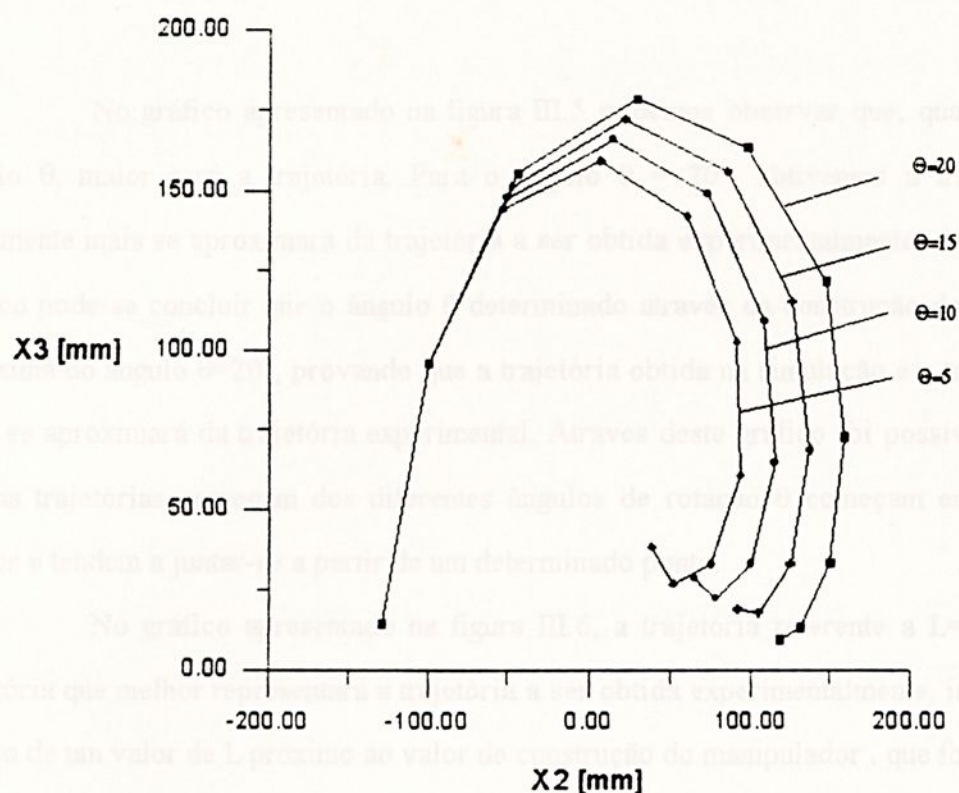


Figura III.5 - Trajetória da extremidade do manipulador ponto a ponto com variação do ângulo de rotação θ para $L = 20$ mm

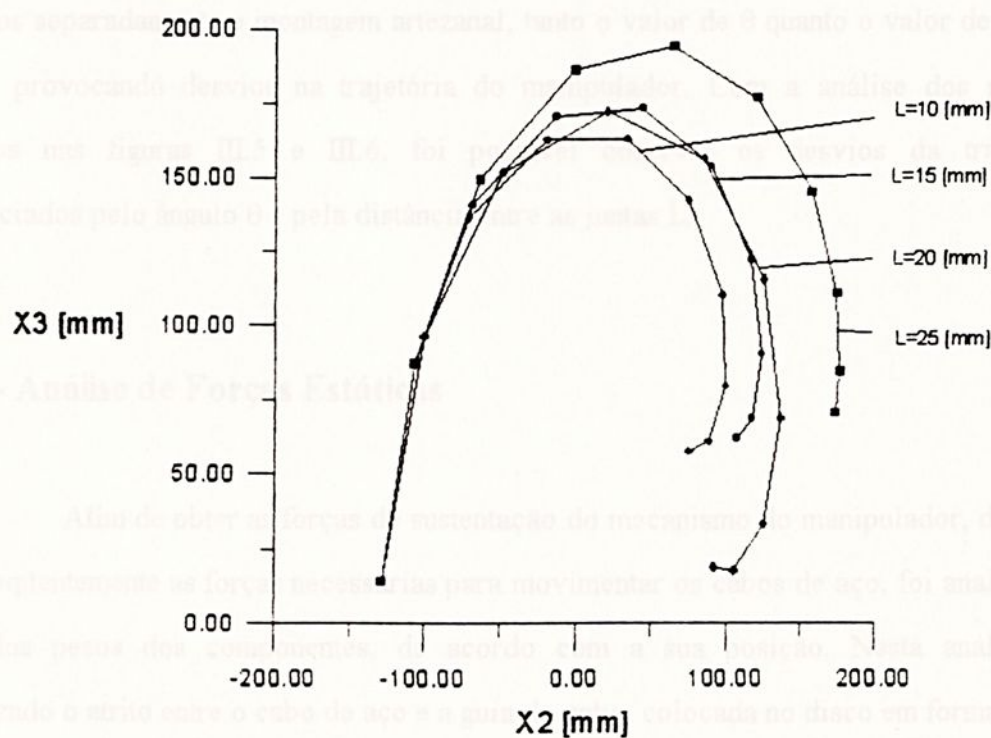


Figura III.6 - Trajetória do manipulador ponto a ponto com variação da distância entre as juntas L com $\theta = 15^\circ$

No gráfico apresentado na figura III.5 podemos observar que, quanto maior o ângulo θ , maior será a trajetória. Para o ângulo $\theta = 20^\circ$, obtivemos a trajetória que certamente mais se aproximará da trajetória a ser obtida experimentalmente. A partir deste gráfico pode-se concluir que o ângulo θ determinado através da construção do desenho se aproxima do ângulo $\theta=20^\circ$, provando que a trajetória obtida na simulação é a trajetória que mais se aproximará da trajetória experimental. Através deste gráfico foi possível observar que as trajetórias começam dos diferentes ângulos de rotação θ começam em diferentes pontos e tendem a juntar-se a partir de um determinado ponto.

No gráfico apresentado na figura III.6, a trajetória referente a $L=20$ mm é a trajetória que melhor representará a trajetória a ser obtida experimentalmente, isto é devido ao uso de um valor de L próximo ao valor de construção do manipulador, que foi de 21 mm, e do ângulo de inclinação $\theta=15^\circ$, próximo ao ângulo obtido através do desenho do manipulador.

Devido ao tipo de construção do manipulador, que teve seus componentes usinados separadamente e montagem artesanal, tanto o valor de θ quanto o valor de L pode variar, provocando desvios na trajetória do manipulador. Com a análise dos gráficos contidos nas figuras III.5 e III.6, foi possível observar os desvios da trajetória, influenciados pelo ângulo θ e pela distância entre as juntas L .

III.2 - Análise de Forças Estáticas

Afim de obter as forças de sustentação do mecanismo do manipulador, da carga e conseqüentemente as forças necessárias para movimentar os cabos de aço, foi analisada a ação dos pesos dos componentes, de acordo com a sua posição. Nesta análise foi desprezado o atrito entre o cabo de aço e a guia do cabo, colocada no disco em forma de

Figura III.7 - Representação das forças estáticas em um segmento do manipulador

conduite, e também a força de atrito que age entre a esfera e a bucha, que foi considerada tipo deslizante, de acordo com a observação do protótipo construído.

III.2.1 - Estudo das forças estáticas atuantes no manipulador

Analisando um segmento do manipulador composto de duas esferas e um disco, com bucha para o apoio das esferas, podemos observar a ação dos pesos dos componentes, assim como as forças atuantes.

Na figura III.7 é apresentado um esquema de um segmento do manipulador no plano formado por dois cabos, onde atuam as forças referente aos pesos dos componentes.

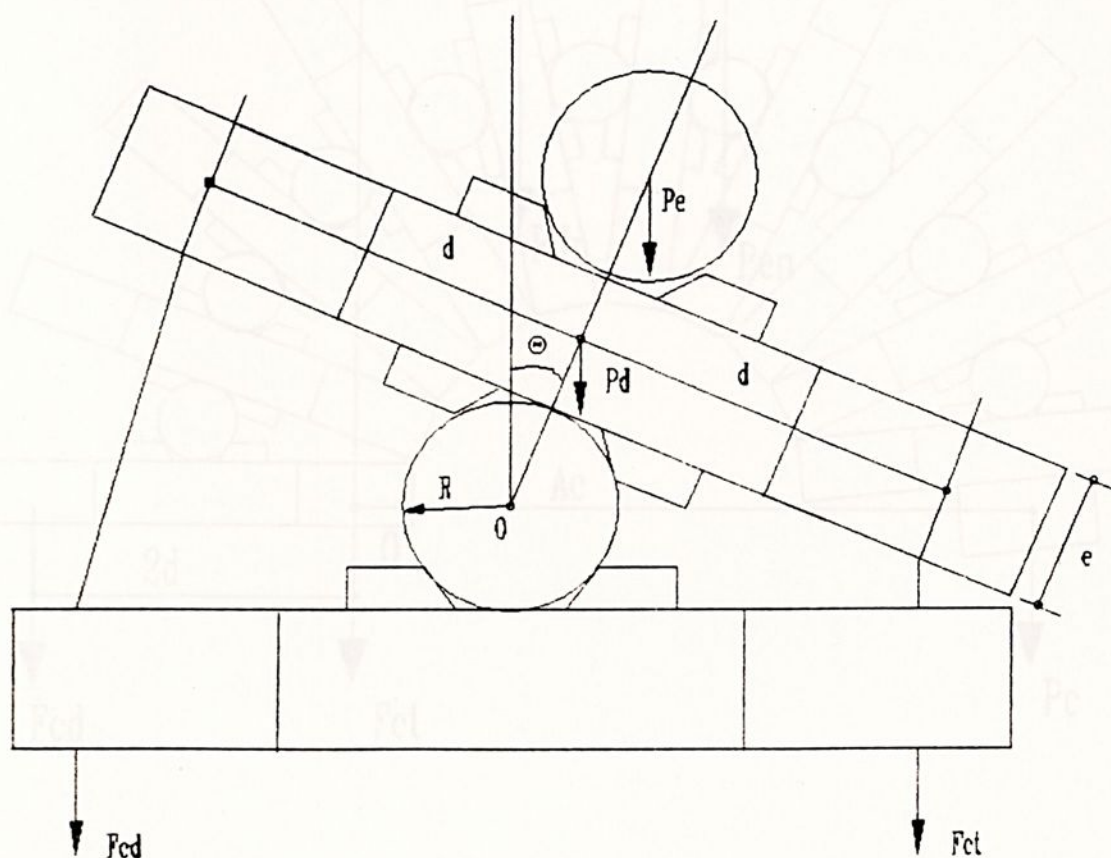


Figura III.7 - Representação das forças atuantes em um segmento do manipulador

O manipulador multi-articulado muda de forma de acordo com a sua posição, sendo necessário calcular a força no cabo para cada posição que ele assumir.

Adotando a posição nº 10, posição esta oposta à posição inicial e mostrada no capítulo IV, podemos mostrar na figura III.8, como o manipulador está posicionado, assim como a ação das forças peso, de acordo com a sua posição.

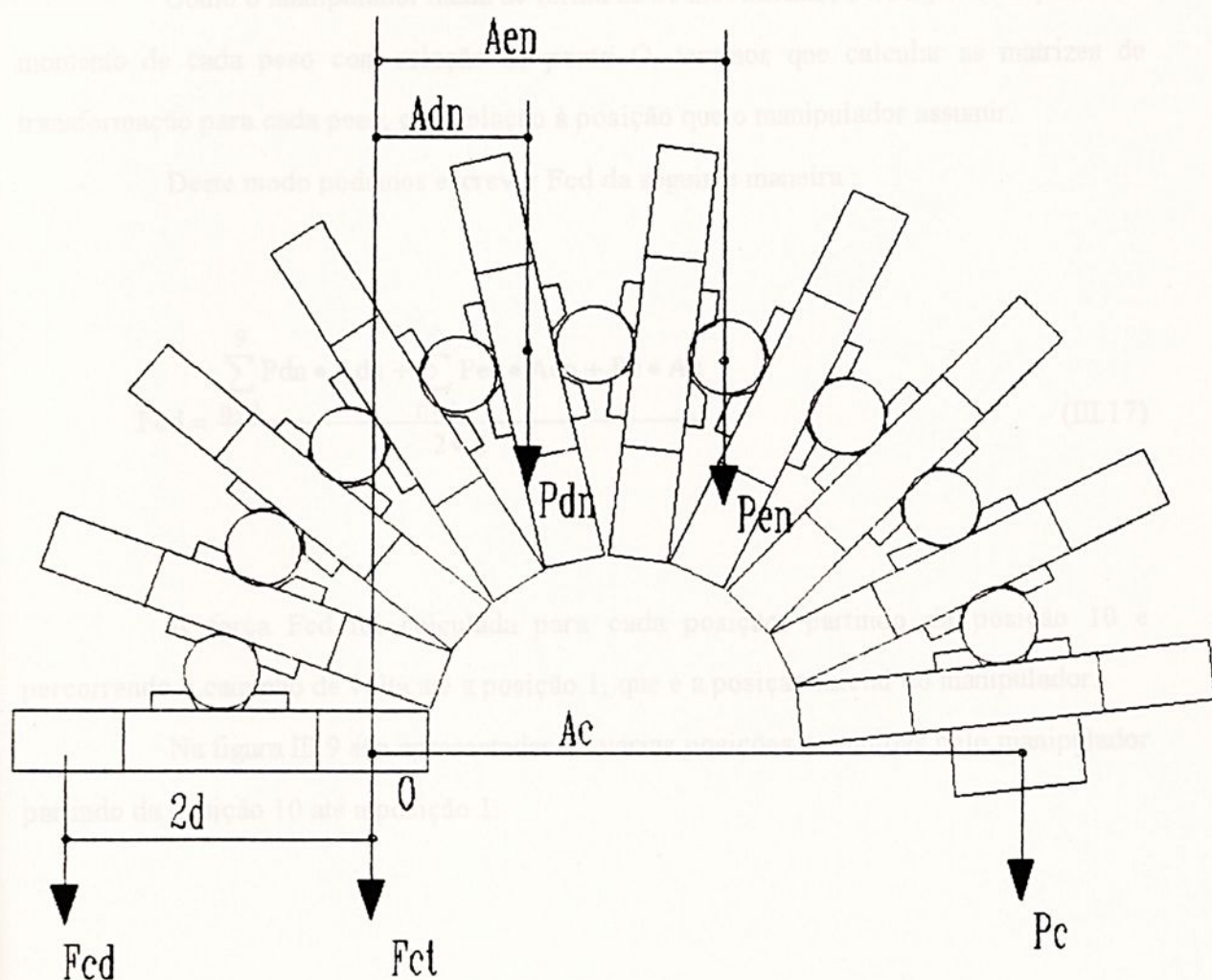


Figura III.8 - Representação das forças estáticas atuantes no manipulador

Fazendo a somatória de momentos em torno do ponto O, podemos eliminar a ação da força F_{ct} . Deste modo a única força de tração no cabo a ser calculada será F_{cd} , que dependerá da ação dos pesos dos componentes com relação à distância ao ponto O.

Para calcular a distância entre o centro de gravidade de cada componente ao ponto O, foi utilizado o conceito de matriz de transformação, no descrita no item III.2.1, que descreve a posição do centro de gravidade de cada elemento com relação a O, adotado onde está aplicada a força F_{ct} .

Como o manipulador muda de forma ao se movimentar, e a força F_{ct} depende do momento de cada peso com relação ao ponto O, teremos que calcular as matrizes de transformação para cada peso, com relação à posição que o manipulador assumir.

Deste modo podemos escrever F_{cd} da seguinte maneira :

$$F_{cd} = \frac{\sum_{n=1}^9 P_{dn} \cdot A_{dn} + \sum_{n=1}^9 P_{en} \cdot A_{en} + P_c \cdot A_c}{2 \cdot d} \quad (\text{III.17})$$

A força F_{cd} foi calculada para cada posição, partindo da posição 10 e percorrendo o caminho de volta até a posição 1, que é a posição inicial do manipulador.

Na figura III.9 são apresentadas as várias posições assumidas pelo manipulador partindo da posição 10 até a posição 1.

Figura III.9 - Posições assumidas pelo manipulador partindo da posição 10 até a posição 1.

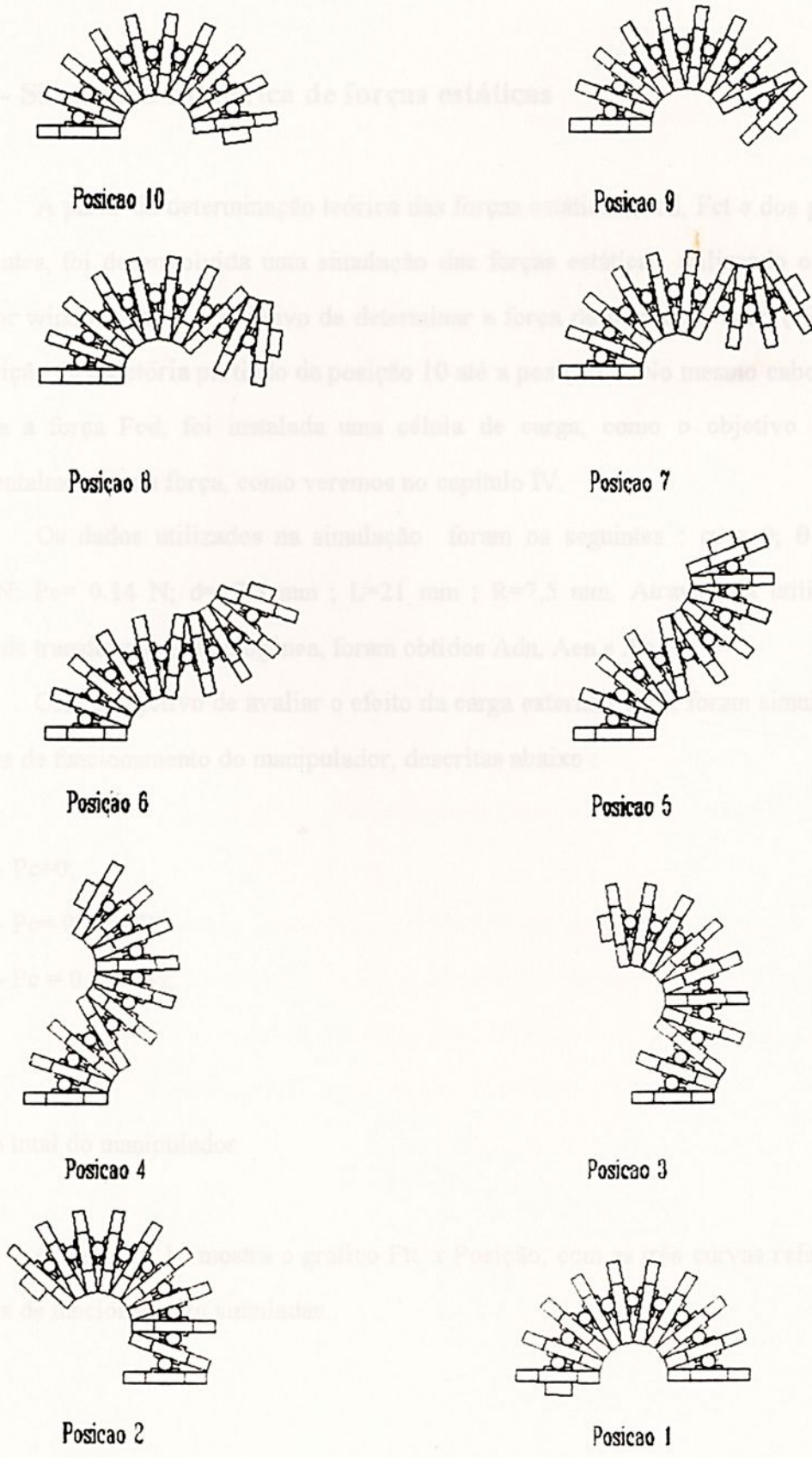


Figura III.9 - Posições assumidas pelo manipulador, partindo da posição 10 até a posição 1

III.2.2 - Simulação numérica de forças estáticas

A partir da determinação teórica das forças estáticas, F_{cd} , F_{ct} e dos pesos dos componentes, foi desenvolvida uma simulação das forças estáticas, utilizando o software matlab for windows, com o objetivo de determinar a força de tração no cabo (F_{cd}), para cada posição da trajetória partindo da posição 10 até a posição 1. No mesmo cabo onde foi calculada a força F_{cd} , foi instalada uma célula de carga, como o objetivo de medir experimentalmente esta força, como veremos no capítulo IV.

Os dados utilizados na simulação foram os seguintes : $\alpha = 0$; $\theta = 19,3^\circ$, $P_d = 0,9$ N; $P_e = 0,14$ N; $d = 17,5$ mm ; $L = 21$ mm ; $R = 7,5$ mm. Através da utilização de matrizes de transformação homogênea, foram obtidos A_{dn} , A_{en} e A_c .

Com o objetivo de avaliar o efeito da carga externa (P_c), foram simuladas três condições de funcionamento do manipulador, descritas abaixo :

1ª - $P_c = 0$;

2ª - $P_c = 0,10\% P_t$;

3ª - $P_c = 0,20\% P_t$;

onde :

P_t = peso total do manipulador

A figura III.10 mostra o gráfico F_{tc} x Posição, com as três curvas referentes às condições de funcionamento simuladas.

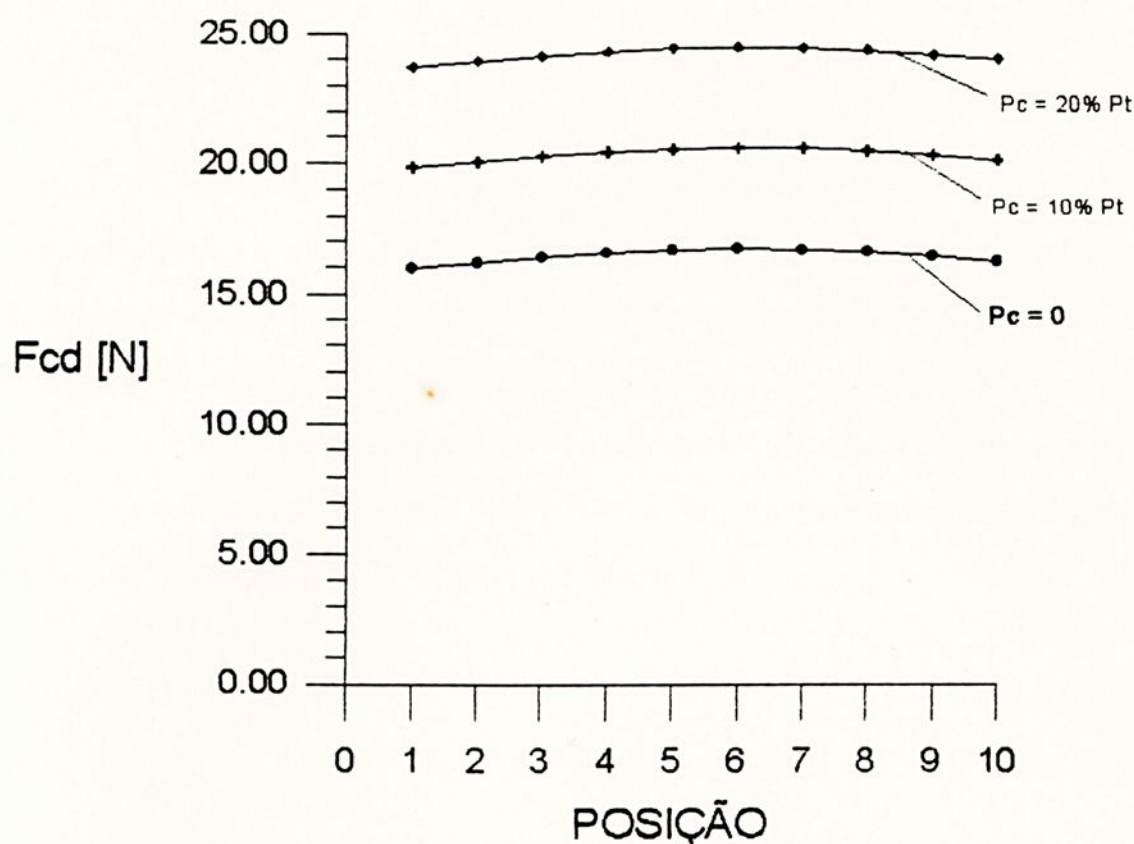


Figura III.10 - Variação da força F_{cd} para diferentes valores de carregamento externo (P_c)

CAPÍTULO IV

De acordo com a figura III.10, podemos observar que o aumento da carga externa aplicada, produz um aumento da força no cabo, que é representado no gráfico pelo deslocamento paralelo da curva F_{cd} x Posição. Este deslocamento é devido ao aumento da força F_{cd} , para compensar a carga P_c aplicada no último disco.

IV.1 - Bancada Experimental

Como foi descrito no capítulo II, o manipulador possui movimentos de rotação em torno dos eixos X_1 e X_2 . Os ensaios foram realizados apenas com movimento de rotação em torno do eixo X_1 , mantendo o eixo X_2 sem rotação ($\alpha=0$). Esta medida foi adotada devido à simetria da construção do manipulador.

O manipulador foi montado em um suporte principal que abriga os cabos de aço, a célula de carga e os motorreductores de c.c. Este suporte por sua vez foi colocado sobre uma bancada apropriada, como mostra a figura IV.1.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para verificar a consistência do modelo do manipulador proposto, foram realizados ensaios visando à determinação do posicionamento do manipulador, e a força exercida no cabo. Os ensaios foram realizados nas mesmas condições do modelo. Neste capítulo é descrito o procedimento de ensaio utilizado, bem como os resultados obtidos e a análise desses resultados.

IV.1 - Bancada Experimental

Como foi descrito no capítulo II, o manipulador possui movimentos de rotação em torno dos eixos X1 e X2. Os ensaios foram realizados apenas com movimento de rotação em torno do eixo X1, mantendo o eixo X2 sem rotação ($\alpha=0$). Esta medida foi adotada devido a simetria da construção do manipulador.

O manipulador foi montado em um suporte principal que abriga os cabos de aço, a célula de carga e os motoredutores de c.c.. Este suporte por sua vez foi colocado sobre uma bancada apropriada, como mostra a figura IV.1.

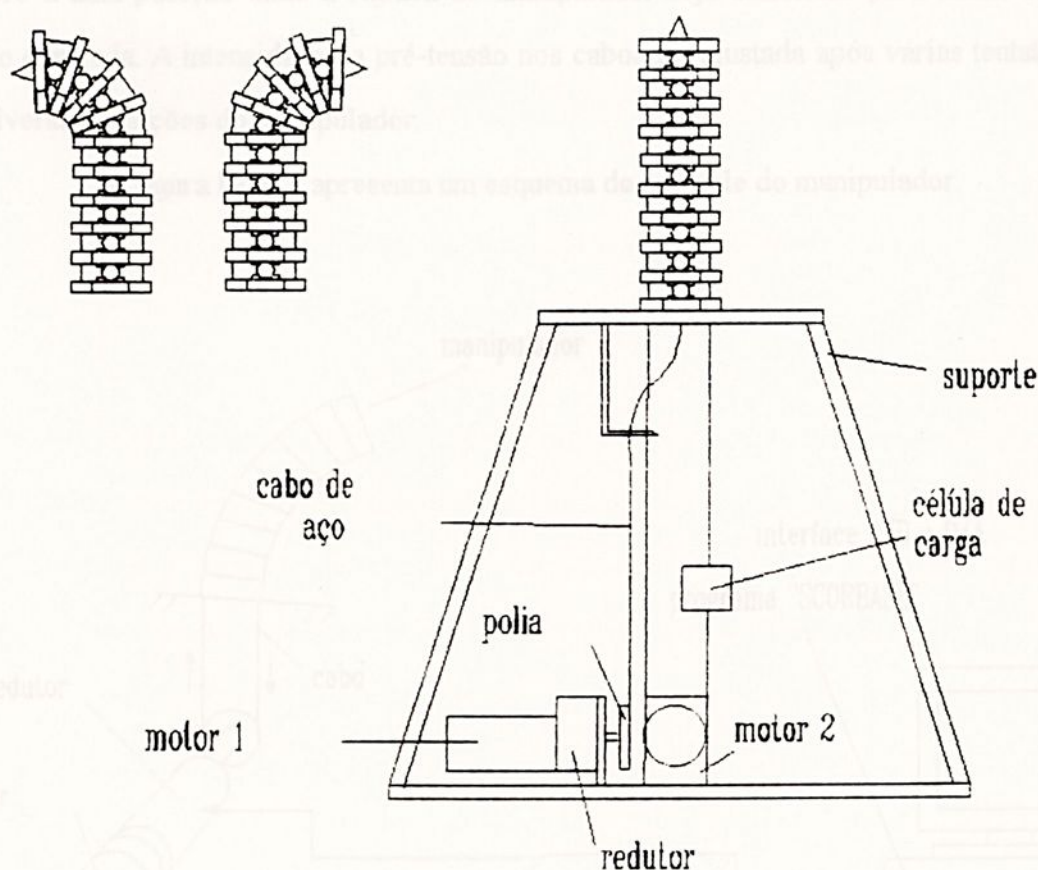


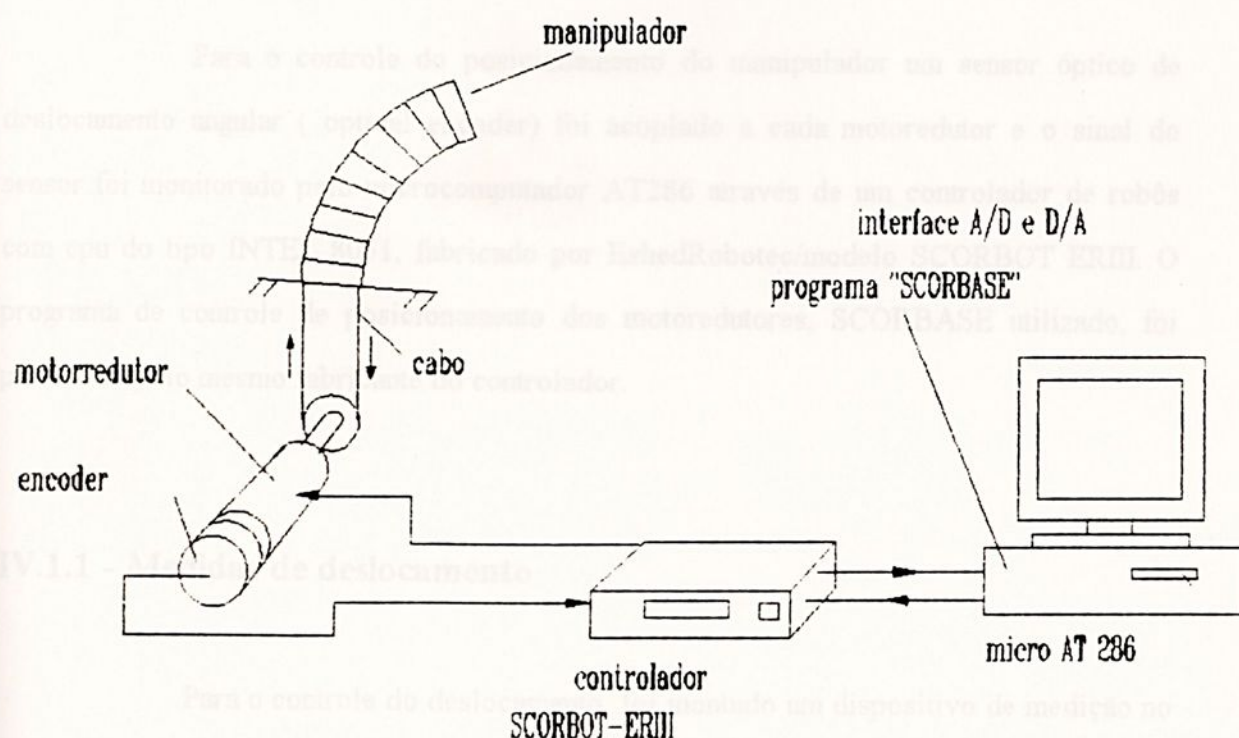
Figura IV.1 - Esquema de montagem do manipulador

Para realizar o ensaio, 2 cabos no mesmo plano foram responsáveis pela rotação da junta de esfera, de cada segmento do manipulador, sendo os cabos acoplados a um motorreductor de c.c. através de uma polia com diâmetro igual à distância que separa os dois cabos. Os outros 2 cabos que estão em um plano perpendicular aos cabos, mencionados anteriormente, foram conectados a um outro motorreductor, juntamente com uma polia de mesma dimensão geométrica. A fim de evitar o cruzamento dos cabos foi utilizado um desvio, fixo no suporte principal. Os dois motorredutores foram fixos na base inferior do suporte principal, em direções perpendiculares entre si.

Antes do início dos ensaios, os cabos foram pré-tensionados através de esticadores, de maneira a permitir a posição estável do manipulador. Esta posição estável se refere a uma posição onde a rigidez do manipulador seja suficiente para mantê-lo na posição desejada. A intensidade de pré-tensão nos cabos foi ajustada após várias tentativas para diversas posições do manipulador.

A figura IV.2, é apresentada um esquema do controle do manipulador.

Figura IV.2 - Esquema de controle do manipulador



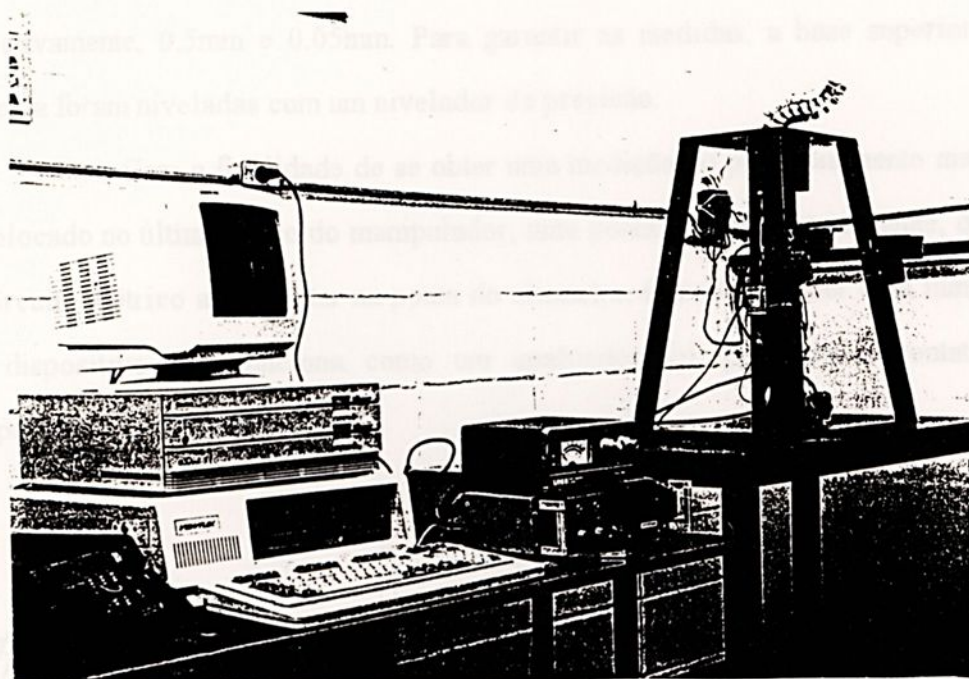


Figura IV.2 - Esquema de controle do manipulador

Para o controle do posicionamento do manipulador um sensor óptico de deslocamento angular (optical encoder) foi acoplado a cada motoredutor e o sinal do sensor foi monitorado pelo microcomputador AT286 através de um controlador de robôs com cpu do tipo INTEL 8051, fabricado por EshedRobotec/modelo SCORBOT ERIII. O programa de controle de posicionamento dos motoredutores, SCORBASE utilizado, foi produzido pelo mesmo fabricante do controlador.

IV.1.1 - Medidas de deslocamento

Para o controle do deslocamento, foi montado um dispositivo de medição no suporte principal como mostra a figura IV.3. O dispositivo de medição de deslocamento horizontal é composto de uma base graduada fixa no suporte principal, e o dispositivo de

medição de deslocamento vertical, é um altímetro montado em um suporte que desliza ao longo da base graduada. As precisões da base graduada e do altímetro são de, respectivamente, 0,5mm e 0,05mm. Para garantir as medidas, a base superior e a base graduada foram niveladas com um nivelador de precisão.

Com a finalidade de se obter uma medição do posicionamento mais precisa, foi colocado no último disco do manipulador, uma ponta isolada eletricamente, que fechava um circuito elétrico ao encostar na ponta do altímetro, fazendo acender uma lâmpada. Com este dispositivo que funciona como um apalpador foi garantido o contato entre o manipulador e o altímetro.

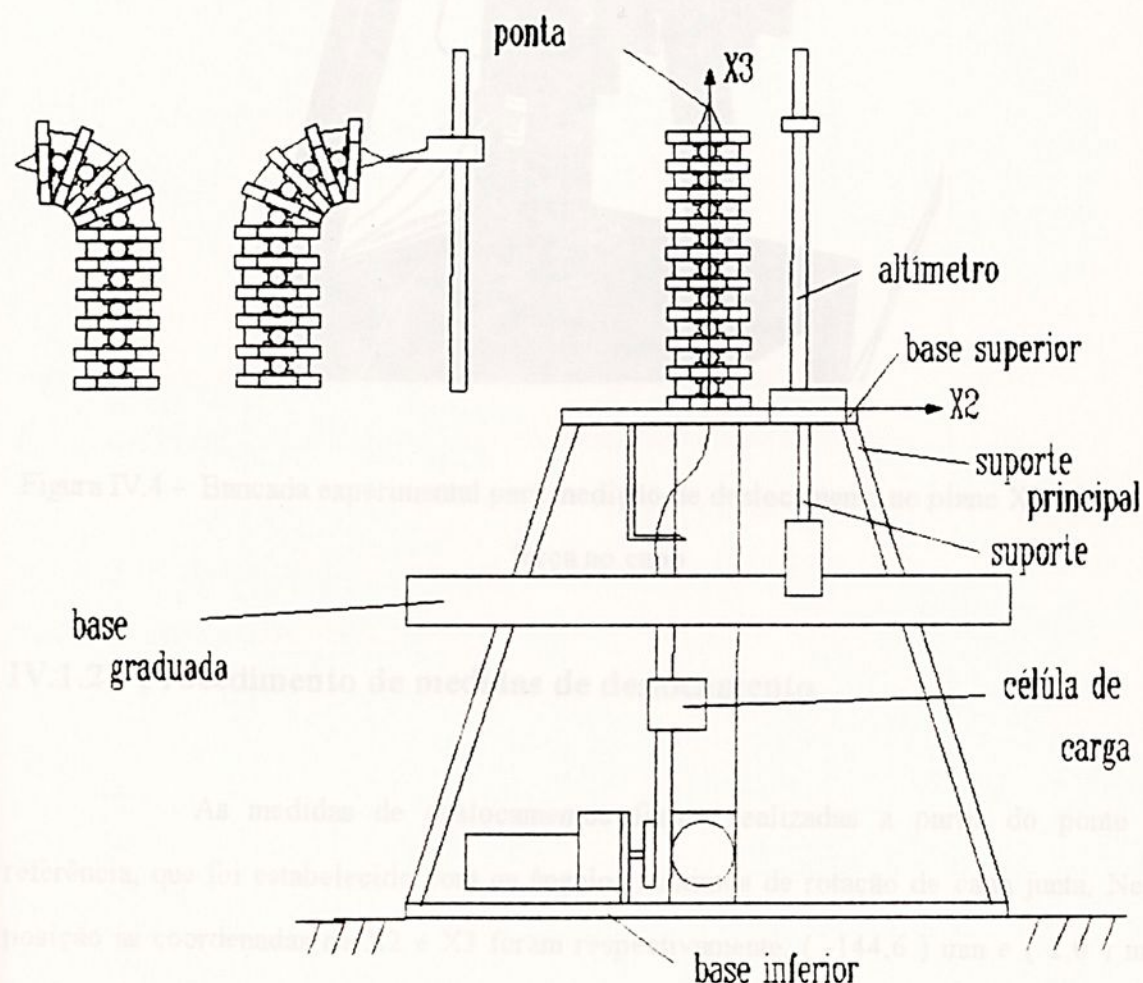


Figura IV.3 - Representação esquemática da bancada experimental para medição de deslocamento no plano X2 e X3 e da força no cabo

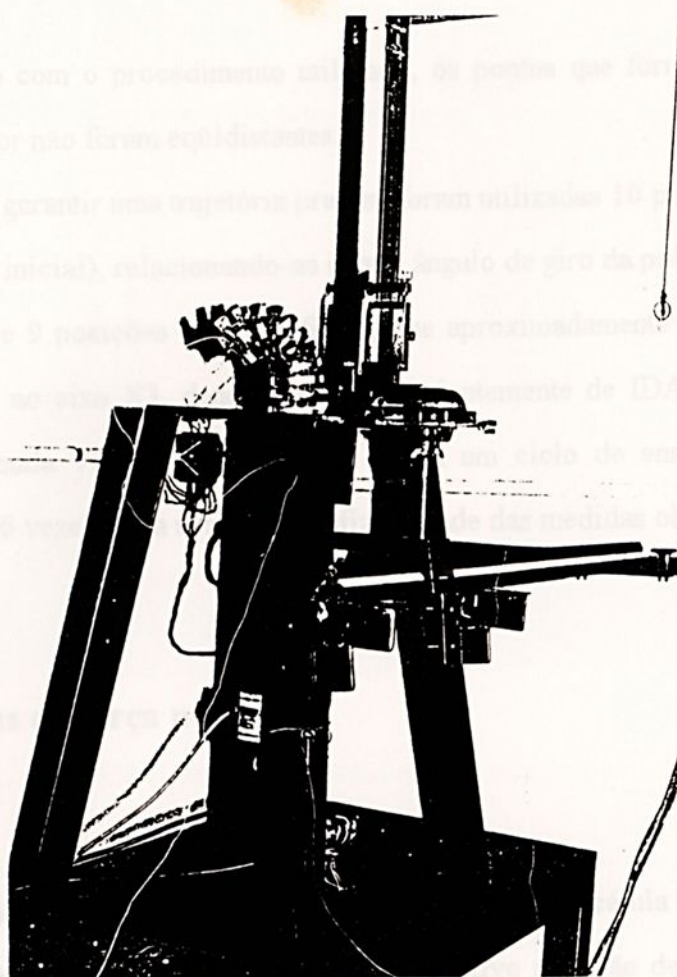


Figura IV.4 - Bancada experimental para medição de deslocamento no plano X2 e X3 e da força no cabo

IV.1.2 - Procedimento de medidas de deslocamento

As medidas de deslocamentos foram realizadas a partir do ponto de referência, que foi estabelecido com os ângulos máximos de rotação de cada junta. Nesta posição as coordenadas de X2 e X3 foram respectivamente, $(-144,6)$ mm e $(2,0)$ mm. Para os deslocamentos próximos foram utilizados os mesmos deslocamentos angulares no eixo do motoredutor para cada passo da trajetória da ponta do manipulador. O motivo do uso de mesmos deslocamentos angulares provém da dificuldade de garantir os ângulos máximos de rotação de cada disco, quando ocorrer um contato entre os dois discos

adjacentes. Portanto com o procedimento utilizado, os pontos que formam a trajetória da ponta do manipulador não foram eqüidistantes.

Para garantir uma trajetória precisa foram utilizadas 10 posições, incluindo a referência (posição inicial), relacionando-as com o ângulo de giro da polia. Após completar os deslocamentos de 9 posições (posição final), que aproximadamente é oposta à posição inicial, em relação ao eixo X3, denominada convenientemente de IDA, retornava para a referência, denominada VOLTA, completando assim um ciclo de ensaio. Este ciclo de ensaio foi repetido 6 vezes, para avaliar a confiabilidade das medidas obtidas.

IV.1.3 - Medidas de força no cabo

Figura IV.3 - Célula de carga utilizada para a medição da força no cabo

IV.1.4 - Para a medida de força no cabo, foi colocada uma célula de carga em um dos cabos, com precisão de medidas de 0,1 N. Por este motivo a tensão de montagem do cabo foi ajustada com o peso da célula de carga, juntamente com o esticador do cabo.

O cabo de aço, quando tracionado mais intensamente, apresenta uma tensão quase que uniforme, fazendo com que a célula de carga, obtenha medidas precisas somente quando o cabo está bem tracionado.

Nas figura IV.3 e IV.5 é mostrado a montagem da célula de carga no cabo de aço.

IV.2 - Resultados Experimentais

IV.2.1 - Resultados experimentais de deslocamento

Os resultados de medidas de deslocamentos nas direções X2 e X3 da figura IV.3 encontram-se na tabela IV.1 e IV.2, oriundos de rotações no eixo X1 perpendicular ao plano X2 e X3. Na tabela IV.1 foram indicados valores de medidas das medidas (F1, F2) e

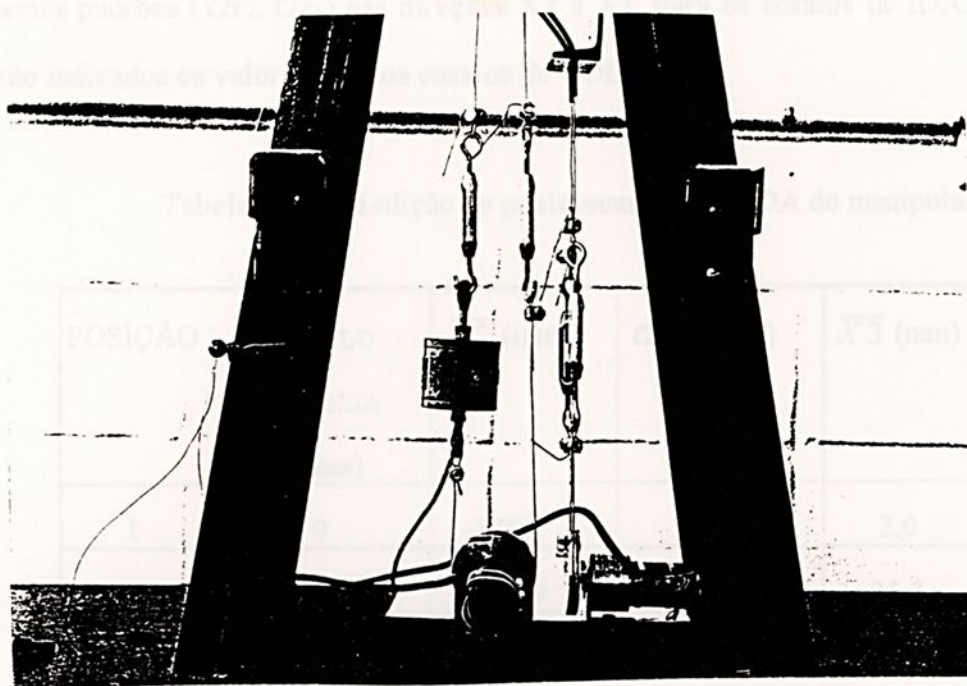


Figura IV.5 - Célula de carga utilizada para a medição da força no cabo

IV.1.4 - Procedimento de medidas de forças

Para a realização das medidas de força foram utilizadas as mesmas posições (1 a 10) das medidas de deslocamento, como foi referido no item IV.1.2 deste capítulo. As forças referentes a cada posição foram registradas nos caminhos de IDA e VOLTA do manipulador. Este ciclo de medidas foi repetido 6 vezes para se avaliar a confiabilidade das medidas obtidas.

IV.2 - Resultados Experimentais

IV.2.1 - Resultados experimentais de deslocamento

Os resultados de medidas de deslocamentos nas direções X2 e X3 da figura IV.3 encontram-se na tabela IV.1 e IV.2, oriundos de rotações no eixo X1 perpendicular ao plano X2 e X3. Na tabela IV.1 foram indicados valores de médios das medidas ($\bar{X}2$, $\bar{X}3$) e

os desvios padrões (σ_{x2} , σ_{x3}) nas direções X2 e X3, para os ensaios de IDA. Na tabela IV.2 são indicados os valores para os ensaios de VOLTA.

Tabela IV.1 - Medição de posicionamento na IDA do manipulador

POSIÇÃO	ÂNGULO DA POLIA (graus)	$\bar{X}2$ (mm)	σ_{X2} (mm)	$\bar{X}3$ (mm)	σ_{X3} (mm)
1	0	-149,1	1,7	2,0	0,4
2	18,7	-171,9	1,5	25,3	2,4
3	37,4	-183,1	2,4	67,8	4,1
4	56,1	-172,4	3,3	106,4	4,0
5	74,8	-145,6	4,9	141,6	3,4
6	93,5	-87,7	6,8	175,6	2,0
7	112,2	-10,9	7,2	179,5	1,3
8	130,9	67,9	6,4	140,6	4,9
9	149,6	130,5	9,3	11,4	2,0
10	168,3	123,2	2,1	3,6	0,1

Tabela IV.2 - Medição de posicionamento na VOLTA do manipulador

POSIÇÃO	ÂNGULO DA POLIA (graus)	$\bar{X}2$ (mm)	σ_{X2} (mm)	$\bar{X}3$ (mm)	σ_{X3} (mm)
1	168,3	-148,8	1,6	1,9	1,0
2	149,6	-162,4	8,8	21,2	1,9
3	130,9	-89,1	7,6	144,0	4,4

4	112,2	-3,9	7,5	180,7	1,2
5	93,5	72,7	7,7	174,9	1,9
6	74,8	129,0	4,3	138,6	3,2
7	56,1	154,5	3,1	90,3	3,3
8	37,4	155,7	2,5	45,3	4,4
9	18,7	140,5	2,3	14,5	5,6
10	0	123,2	2,1	3,6	0,1

Nas figuras IV.6 e IV.7 encontram-se as variações de coordenadas nas direções X2 e X3 referentes às posições 1 a 10, para a IDA e a VOLTA, respectivamente.

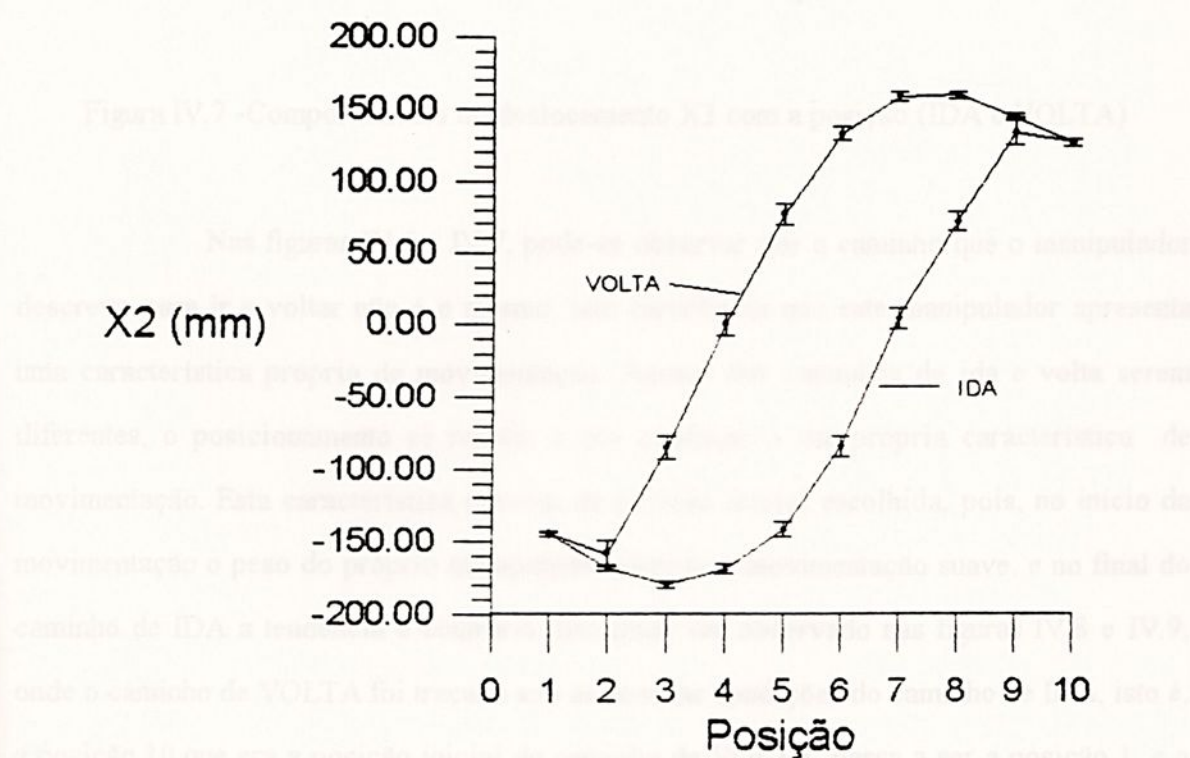


Figura IV.6 - Comportamento do deslocamento X2 com a posição (IDA e VOLTA)

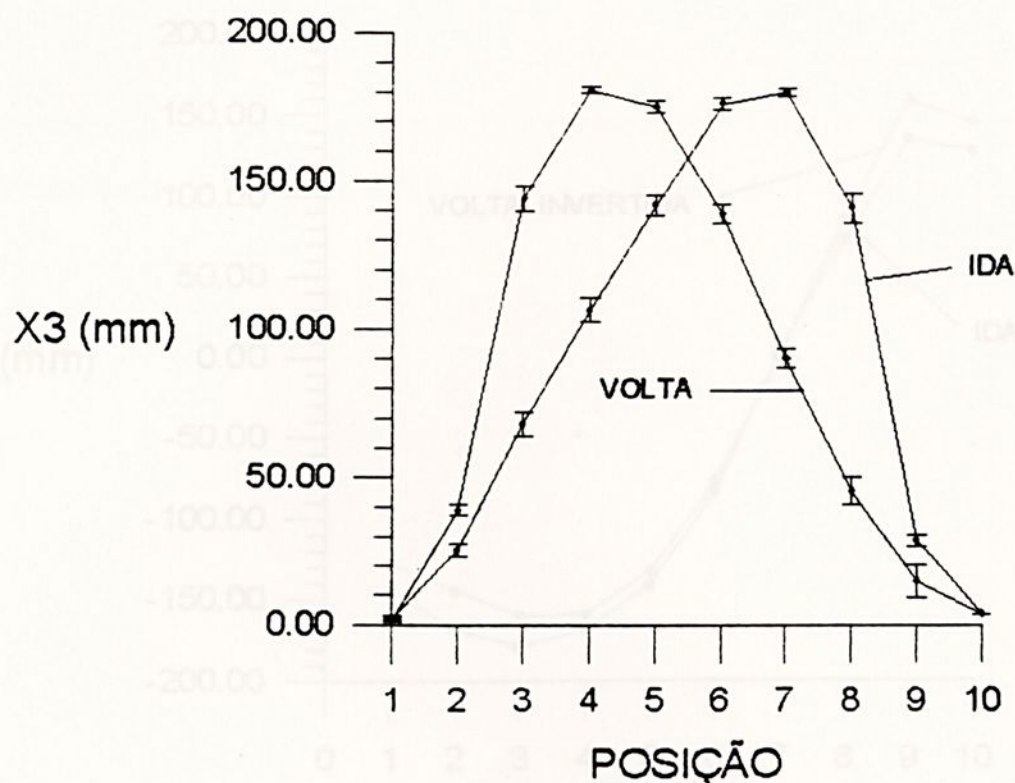


Figura IV.7 -Comportamento do deslocamento X3 com a posição (IDA e VOLTA)

Nas figuras IV.6 e IV.7, pode-se observar que o caminho que o manipulador descreve para ir e voltar não é o mesmo, isto caracteriza que este manipulador apresenta uma característica própria de movimentação. Apesar dos caminhos de ida e volta serem diferentes, o posicionamento se repete, o que confirma a sua própria característica de movimentação. Esta característica provém da posição inicial escolhida, pois, no início da movimentação o peso do próprio manipulador impede a movimentação suave, e no final do caminho de IDA a tendência é contrária. Isto pode ser observado nas figuras IV.8 e IV.9, onde o caminho de VOLTA foi traçado sob as mesmas condições do caminho de IDA, isto é, a posição 10 que era a posição inicial do caminho de VOLTA, passa a ser a posição 1, e a posição 9 passa a ser a posição 2 e assim por diante. portanto, através das figuras IV.8 e IV.9, realmente pode-se observar a repetibilidade de posicionamento e as características deste manipulador.

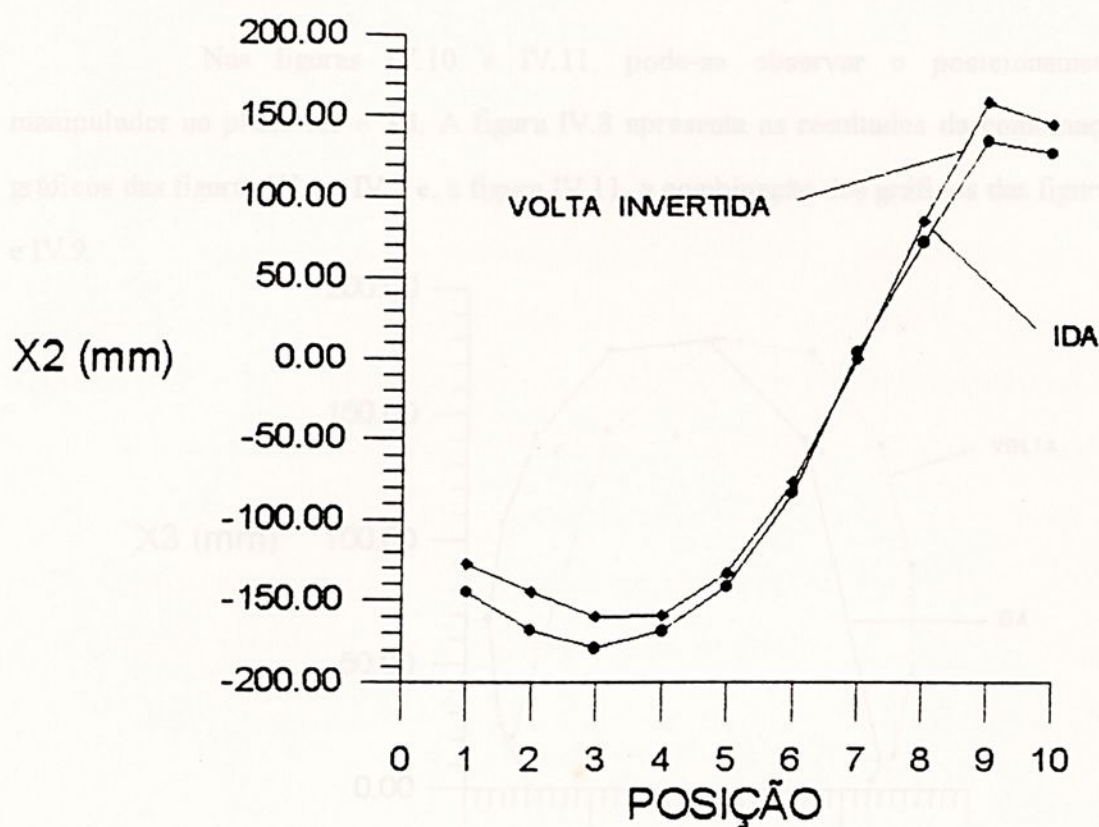


Figura IV.8 - Gráfico X2 x Posição invertida na volta

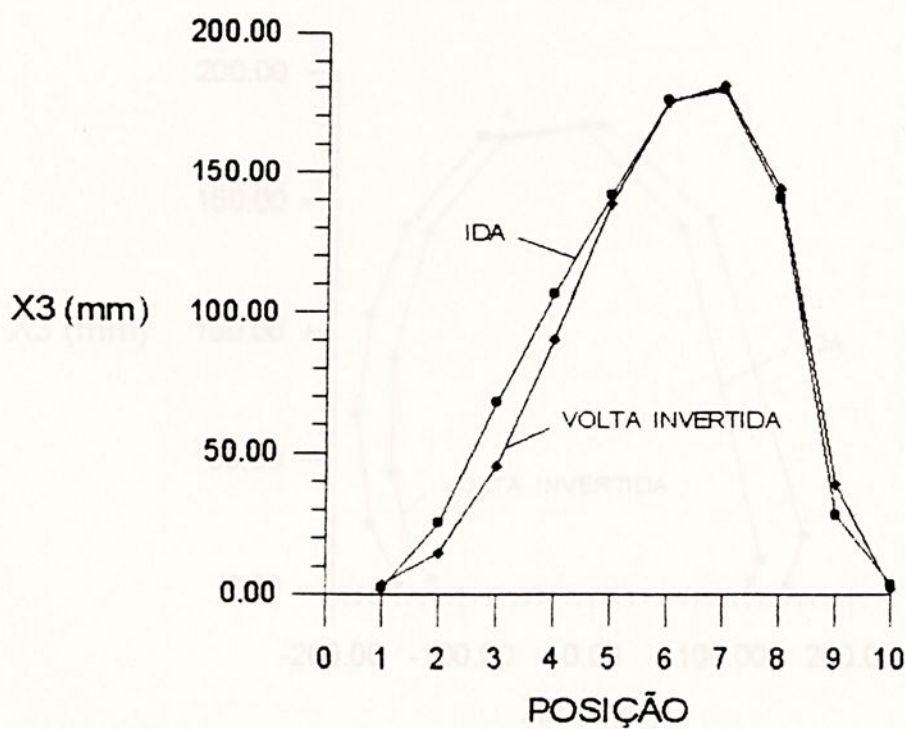


Figura IV.9 - Gráfico X3 x Posição invertida na volta

Nas figuras IV.10 e IV.11, pode-se observar o posicionamento do manipulador no plano X2 e X3. A figura IV.8 apresenta os resultados da combinação dos gráficos das figuras IV.4 e IV.7 e, a figura IV.11, a combinação dos gráficos das figuras IV.8 e IV.9.

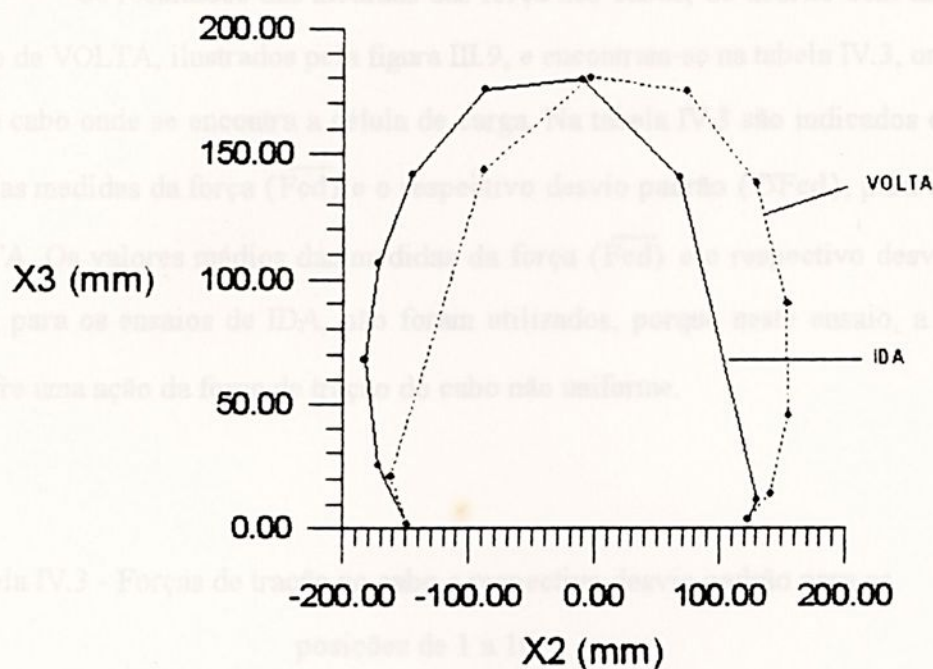


Figura IV.10 - Gráfico X3 x X2 na posição normal

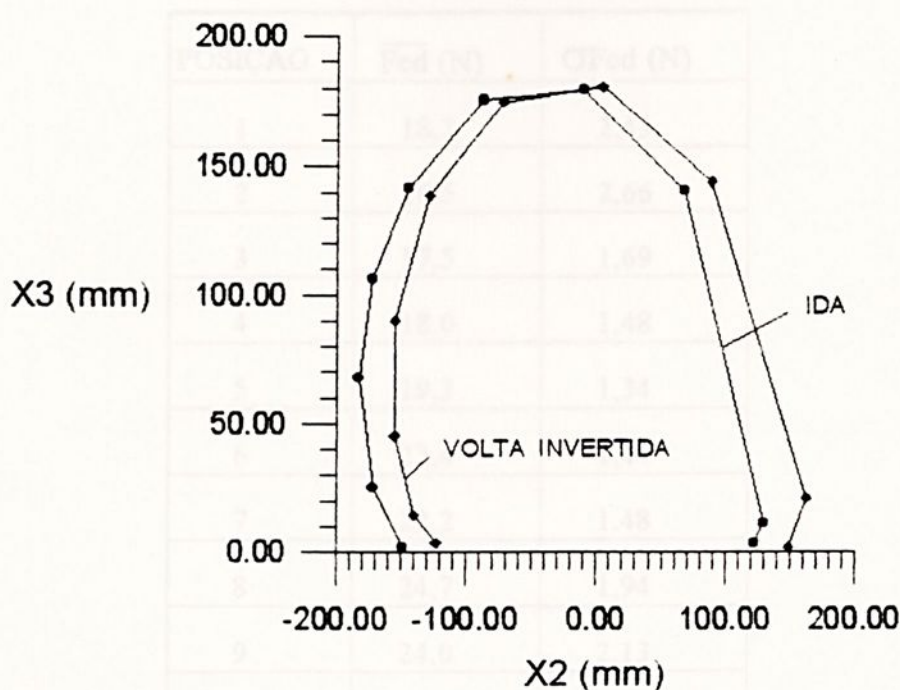


Figura IV.11 - Gráfico X3 x X2 na posição invertida na volta

IV.2.2 - Resultados experimentais das forças no cabo

Os resultados das medidas das força nos cabos, de acordo com as posições de ensaio de VOLTA, ilustrados pela figura III.9, e encontram-se na tabela IV.3, oriundos da tração no cabo onde se encontra a célula de carga. Na tabela IV.3 são indicados os valores médios das medidas da força ($\overline{F_{cd}}$) e o respectivo desvio padrão (σ_{Fcd}), para os ensaios de VOLTA. Os valores médios das medidas da força ($\overline{F_{cd}}$) e o respectivo desvio padrão (σ_{Fcd}), para os ensaios de IDA, não foram utilizados, porque neste ensaio, a célula de carga sofre uma ação da força de tração do cabo não uniforme.

Tabela IV.3 - Forças de tração no cabo e respectivo desvio padrão para as posições de 1 a 10

POSIÇÃO	$\overline{F_{cd}}$ (N)	σ_{Fcd} (N)
1	18,3	2,43
2	16,5	2,66
3	17,5	1,69
4	18,0	1,48
5	19,3	1,34
6	22,4	1,44
7	22,2	1,48
8	24,7	1,94
9	24,0	2,13
10	23,9	2,03

Na figura IV.12 são apresentadas as variações da força no cabo, referentes às posições de 1 a 10, para a Volta do manipulador.

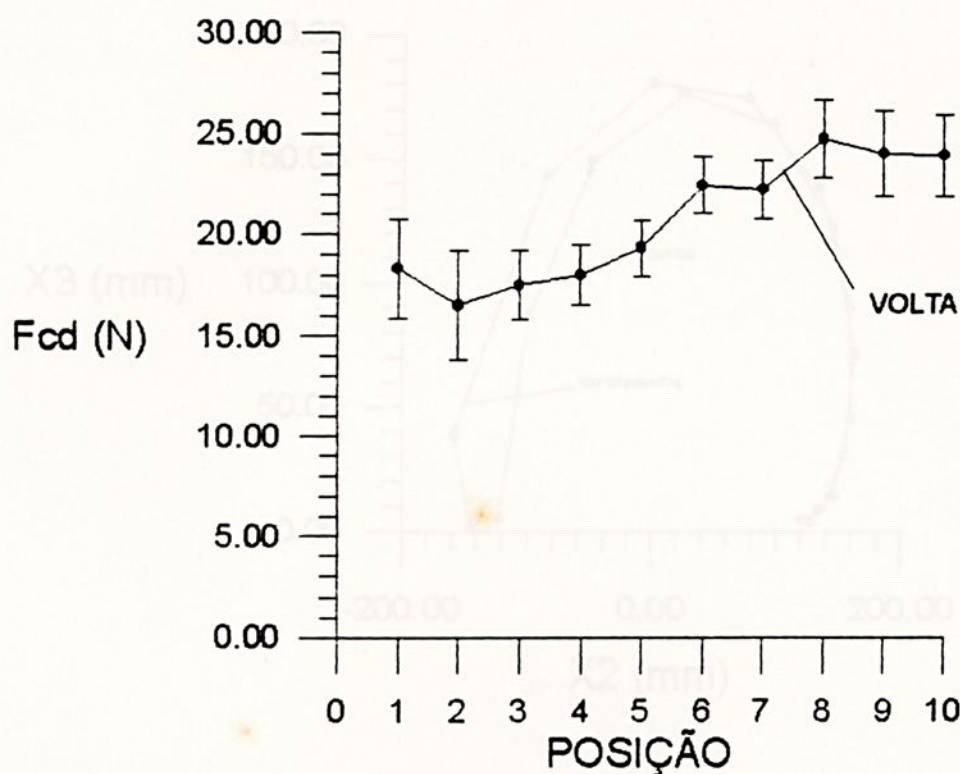


Figura IV.12 - Variação da força de tração no cabo

IV.3 - Análise Comparativa dos Resultados Experimentais / Teóricos

Após a análise dos resultados experimentais, foi realizada uma comparação destes resultados, com os obtidos através da simulação.

IV.3.1 - Análise comparativa dos resultados experimentais / teóricos de deslocamento.

Os resultados de posicionamento obtidos experimentalmente e os resultados teóricos obtidos a partir da simulação cinemática, descrito no capítulo anterior, são apresentados, conforme ilustra a figura IV.13

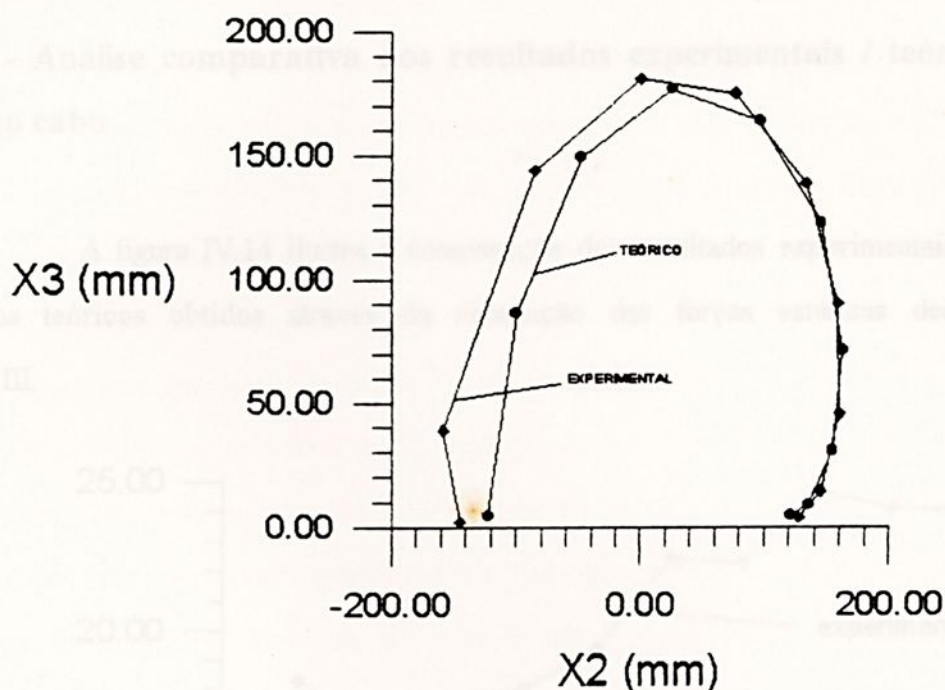


Figura IV 13 - Gráfico X3 x X2 (teórico - experimental)

Na figura IV.13, observamos que os deslocamentos teóricos e experimentais são diferentes para uma dada posição, isto é, devido à determinação do posicionamento feito experimentalmente, onde cada ponto era determinado a partir da coordenada estabelecida pelo software, enquanto que as posições teóricas foram obtidas quando um disco entrava em contato com o disco imediatamente superior. Portanto deve-se observar a diferença na trajetória e não nos pontos apresentados.

Analisando a figura IV.13, observa-se que a curva teórica aproxima-se da curva experimental, durante a saída da posição inicial, adotada como posição 10 e sentido de VOLTA do manipulador, até quando o manipulador começa a descer novamente. A partir do começo desta descida, as curvas tendem a se afastar por causa da baixa tensão no cabo, que não conseguiu uma rigidez necessária para manter o manipulador na posição ideal.

Como foi descrito no item IV.1 deste capítulo, a tensão no cabo foi ajustada por tentativa, causando uma pré-tensão insuficiente utilizada no cabo, que somente nos resultados comparativos, teórico / experimental, foi detectado.

IV.3.2 - Análise comparativa dos resultados experimentais / teóricos da força no cabo

A figura IV.14 ilustra a comparação dos resultados experimentais com os resultados teóricos obtidos através da simulação das forças estáticas descrita no capítulo III.

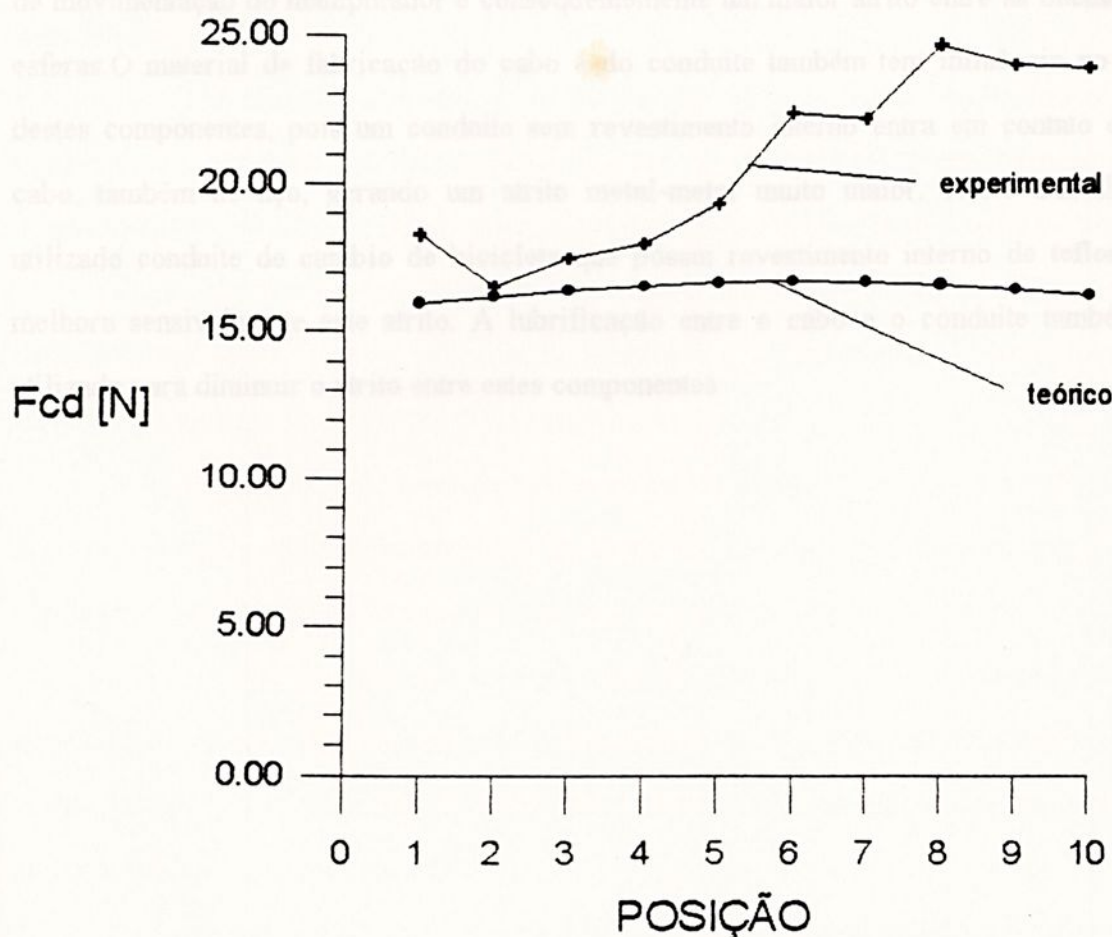


Figura IV.14 - Forças de tração experimental e teórica em função da posição do manipulador

A diferença entre as curvas experimentais e teóricas devem-se ao fato de que o atrito existentes entre o cabo e o conduíte causam um esforço adicional significativo. Esta força de atrito é alterada pela curvatura do cabo de acordo com a postura do manipulador. A relação entre a variação da força de atrito e a curvatura do cabo depende também do comprimento do conduíte, que causa variações de contatos com o cabo de aço. A folga existente entre o cabo e o conduíte também tem influência significativa na força de atrito, já que se a folga for muito pequena causará um atrito maior, e conseqüentemente dificultará a movimentação do manipulador. A pré-tensão no cabo influi tanto na rigidez do manipulador quanto no atrito entre o cabo e o conduíte, já que quanto maior a tensão, maior a dificuldade de movimentação do manipulador e conseqüentemente um maior atrito entre as buchas e as esferas. O material de fabricação do cabo e do conduíte também tem influência no atrito destes componentes, pois um conduíte sem revestimento interno entra em contato com o cabo, também de aço, gerando um atrito metal-metal muito maior. Neste trabalho foi utilizado conduíte de cambio de bicicleta que possui revestimento interno de teflon, que melhora sensivelmente este atrito. A lubrificação entre o cabo e o conduíte também foi utilizada para diminuir o atrito entre estes componentes.



CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

De acordo com os resultados experimentais, este manipulador multi-articulado apresentou um bom desempenho, conseguindo-se uma grande flexibilidade, o que já era esperado, bem como a repetibilidade no posicionamento para a trajetória pré-estabelecida na ponta do manipulador.

O modelo proposto é de fabricação simples e não apresenta uma histerese significativa como a que foi detectada no trabalho de FRISOLI [3], o qual utilizou um conduíte longo com maior número de cabo, causando um atrito significativo entre o cabo e o conduíte.

Na experimentação ficou demonstrado que o atrito entre a esfera e o disco que compõe o segmento do manipulador, não foi relevante, se comparado com o atrito entre o cabo e o conduíte, razão pela qual a histerese foi minimizada.

A simulação numérica mostrou-se eficaz, ao conseguir prever a trajetória e mostrar as possíveis falhas no posicionamento do manipulador, causadas pela falta de pré-tensão no cabo obtida através da comparação entre os resultados experimentais e a simulação.

A análise de forças no cabo mostrou que sua variação de forças é relativamente grande e não uniforme para o cabo mais tracionado e de menor comprimento, pois a partir dela foi possível projetar o acionamento dos cabos do manipulador, assim como compara-la com as forças no cabo obtidas experimentalmente.

Neste trabalho não foi analisada a rigidez do manipulador que depende da pré-tensão do cabo e da posição do manipulador. Após o ajuste da pré-tensão necessária no cabo, avaliar a variação da rigidez do manipulador para cada posição, é uma tarefa a seguir para o controle preciso deste tipo de manipulador.

O manipulador mostrou-se capaz de manipular cargas com grande facilidade, mas estas cargas a serem manipuladas terão suas massas dependentes da potência de acionamento dos motoredutores.

Este manipulador poderá, também, manipular cargas com grande velocidade, necessitando para isto uma análise dinâmica, pois a inércia de seus componentes tem grande influência no posicionamento e nas forças atuantes no cabo, e conseqüentemente no controle do acionamento do motoredutor.

- [2] FRISOLI, C. Projeto e Análise de um Mecanismo Multarticulado. Rio de Janeiro: UFEL, 1999. 80p. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica)-COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.
- [4] HOSOHARA, Y. et al. "Development of Inspection Robots for Small Pipes Lines". *Huachu Review*, vol 36, n° 2, pp. 39-40, April 1987.
- [5] MA, S. et al. Study of Coupled Tendon-Driven Multi-Joint Manipulator. *The IX conf. Japan Assoc. Robot.*, V1, pp433-456, nov. 1991.
- [6] MURAKAMI, Y. et al. Dynamic Analysis of a Tendon-Type Flexible Robot Arm. *JSM International Journal*, vol 33, n 2, p183-196, 1996.
- [7] STURGES JR, R.H., LAOWATTANA, S. A Flexible, Tendon-Controlled Device for Endoscopy. *The International Journal of Robotics Research*, v.12, n.2, p.121-131, april 1993.
- [8] WILSON, L.E., MAHAJAN, U. The Mechanics and Positioning of Highly Flexible Manipulator Limbs. *Transactions of the ASME*, v.111, p.211-217, june 1989.
- [9] "Robotic Training Program". *Scorbot Educational Robot Educ. Release limited*, Israel, 1982.

Referências Bibliográficas

- [1] "Compact Robot Moves in Seven Axes" - Machine Design, june 7, pp. 83, 1984
- [2] ALVES, J.B. Transformação Homogênea. In: ALVES. Controle de Robô; Campinas: São Paulo, 1986. cap.2, p.9-24.
- [3] FRISOLI, C.. Projeto e Análises de um Mecanismo Multiarticulado. Rio de Janeiro: UFRJ, 1990. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-COOPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.
- [4] HOSOHARA, Y. et al - "Development of Inspection Robots for Small Pipes Lines", Hitachi Review, vol 36, nº 2, pp. 79-80, April 1987.
- [5] MA, S et al. Study of Coupled Tendon-Driven Multijoint Manipulator. The IX cong. Japan Assoc. Robot., V2, p453-456, nov. 1991.
- [6] SEGUCHI, Y. et al. Dynamic Analysis of a Truss-Type Flexible Robot Arm. JSME International Journal, série III, v.33, n.2, p183-190, 1990.
- [7] STURGES JR.,R.H., LAOWATTANA, S. A Flexible, Tendon-Controlled Device for Endoscopy. The International Journal of Robotics Research, v.12, n.2, p.121-131, april 1993.
- [8] WILSON, J.F., MAHAJAN, U. The Mechanics and Positioning of Highly Flexible Manipulator Limbs. Transactions of the ASME, v.111, p.232-237, june 1989.
- [9] "Robotics Training Program". Scorbob Educational Robot Eshed Robotec limited, Israel, 1982

Símbolos

X_v - Vetor posição no ponto v

X_u - Vetor posição no ponto u

$R_{X1,\theta}$ - Matriz de rotação com o ângulo de rotação θ em torno do eixo $X1$

$R_{X2,\alpha}$ - Matriz de rotação com o ângulo de rotação α em torno do eixo $X2$

$\hat{R}$ - Vetor posição

L - Distância entre as juntas

F_{cd} : Força no cabo do lado distendido

F_{ct} : Força no cabo do lado tracionado

P_e : Peso da esfera

P_d : Peso do disco

d : Distância entre o centro do disco e o centro do cabo

e : Espessura do disco

θ : ângulo de giro de cada disco

R : Raio da esfera

P_{en} : Peso da n ésima esfera

P_{dn} : Peso do n ésimo disco

P_c : Peso da carga

A_{en} : Distância entre o centro de gravidade do n ésima esfera e o ponto O

A_{dn} : Distância entre o centro de gravidade do n ésimo disco e o ponto O

A_c : Distância entre o centro de gravidade da carga e o ponto O

P_t = peso total do manipulador

