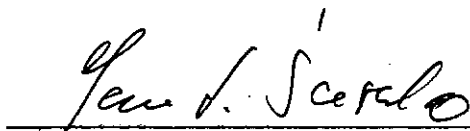


ESTUDO ANALÍTICO-EXPERIMENTAL DE PRECISÃO
DE POSICIONAMENTO DE UM MANIPULADOR


Tamotsu Hirata

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

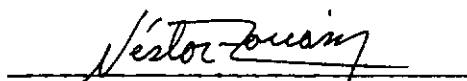
Aprovado por:



Dr. J. L. Scieszko
(Presidente)



Dr. W. M. Mansour



Dr. Nestor A. Z. Pereira

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 1983

HIRATA, TAMOTSU

Estudo Analítico-Experimental de Precisão de Posicionamento de um Manipulador (Rio de Janeiro) 1983.

X , 122 p. 29,7 cm (COPPE-UFRJ, M. Sc., Engenharia Mecânica, 1983)

Tese - Univ. Fed. Rio de Janeiro, Fac. de Engenharia

1. Manipulador mecânico. I. COPPE/UFRJ. II. Título (Série)

AGRADECIMENTOS

Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, em especial, ao professor J. L. Scieszko pelo dinamismo e entusiasmo de sua orientação.

Aos colegas do Laboratório de Dinâmica das Máquinas, em especial, ao técnico José Stockler Canabrava Filho e ao Eng^o. Wilson R. A. de Oliveira.

À amiga Eng^a. Nilse Maria Sousa pela discussão e sua colaboração.

Aos colegas do Laboratório de Instrumentação Nuclear e Laboratório de Metalurgia.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica e ao Núcleo de Computação Eletrônica da UFRJ.

À Daisy Pierucci por seus serviços datilográficos.

Ao CNPq pelo financiamento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho consiste em um estado básico analítico-experimental para precisão de posicionamento de um manipulador mecânico.

Ao analisar a precisão, considerou-se as deflexões causadas pelo peso aplicado na garra do manipulador e também uma influência da tolerância geométrica na construção do mesmo.

Para tal análise, o protótipo de um manipulador com cinco graus de liberdade foi desenvolvido.

As medidas de deflexão e a influência da tolerância foram feitas estaticamente em cada posição do manipulador.

Os resultados experimentais foram comparados com os teóricos a fim de consistência dos mesmos.

ABSTRACT

This work consists of a basic analytical and experimental study for the precision of the positioning of a mechanical manipulator.

On analyzing the precision, the deflection caused by the weight applied to the grip was considered, as well as an influence of the geometric tolerance in the construction of the manipulator.

For such analysis, the prototype of a manipulator with five degrees of freedom was developed.

The deflection measurement and the influence of the tolerance were made statically at each position of the manipulator.

The experimental results were compared with the theoretical in order to verify their consistency.

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....</u>	1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 - Objetivos.....	2
1.3 - Revisão Bibliográfica.....	3
 <u>CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DO MANIPULADOR.....</u>	6
2.1 - Atuador.....	6
2.2 - Meio de Transmissão de Potência.....	8
2.2.1 - Transmissão para Mão Mecânica.....	8
2.2.2 - Transmissão para Antebraço.....	13
2.3 - Estrutura.....	13
2.3.1 - Corpo do Manipulador.....	14
2.3.2 - Braço e Antebraço.....	14
2.3.3 - Mão Mecânica.....	17
2.4 - Posicionamento.....	19
2.4.1 - Erro por Cinemática.....	20
2.4.2 - Erro por Deslocamento.....	20
2.4.3 - Erro por Dinâmica e Controle.....	21
 <u>CAPÍTULO III - ROTAÇÕES NAS PLACAS DE LIGAÇÕES.....</u>	22
3.1 - Objetivos.....	22

	<u>Pág.</u>
3.2 - Simbologia.....	22
3.3 - Estratégia para Análise de Rotações nas Placas.....	22
3.4 - Rotação da Placa A.....	24
3.5 - Rotação da Placa B.....	28
3.5.1 - Rotação Devido ao Ângulo ϕ_{01}	28
3.5.2 - Rotação Devido ao Ângulo ϕ_{02}	30
3.5.2.1 - Determinação de $\Delta\phi_4$	30
5.3.2.2 - Determinação de $\Delta\phi_3$	31
 <u>CAPÍTULO IV - ANÁLISE DE FORÇAS</u>	 34
4.1 - Objetivos.....	34
4.2 - Reações nas Articulações.....	34
4.2.1 - Forças Resultantes da Mão Mecânica.....	34
4.2.2 - Forças nas Articulações.....	38
4.2.2.1 - Simbologia para Forças nas Articulações.....	38
4.2.2.2 - Fórmula para Forças nas Articulações.....	40
4.2.3 - Forças nos Membros.....	42
4.2.3.1 - Simbologia para Forças nos Membros.....	42
4.2.3.2 - Fórmula para Forças nos Membros.....	42
 <u>CAPÍTULO V - DESLOCAMENTOS NAS ARTICULAÇÕES</u>	 45
5.1 - Objetivos.....	45
5.2 - Estratégia para Análise de Deslocamentos.....	45
5.3 - Deformação Elástica nos Membros.....	47

	<u>Pág.</u>
5.4 - Transformação de Coordenadas.....	48
5.5 - Deslocamento Influenciado pelas Relações Geométricas.....	51
5.6 - Deslocamentos Totais das Articulações na Direção (x, y).....	53
5.6.1 - Deslocamento Total na Articulação 10.....	55
5.6.2 - Deslocamento Total nas Articulações 2 e 7.....	56
5.6.3 - Deslocamento Total na Articulação 3.....	57
5.6.4 - Deslocamento Total nas Articulações 1 e 6.....	60
<u>CAPÍTULO VI - MEDIDAS DE DESLOCAMENTO</u>	63
6.1 - Objetivos.....	63
6.2 - Equipamentos e Dispositivos.....	64
6.2.1 - Conjunto de Relógio Comparador.....	64
6.2.2 - Sensor de Contato.....	64
6.2.3 - Mesa de Posicionamento.....	66
6.3 - Montagem da Experiência.....	66
6.4 - Medidas de Rotação das Placas de Ligações.....	68
6.5 - Medidas de Deslocamento para a Mão Mecânica isolada	69
6.5.1 - Medidas de Deslocamento com a Variação de Peso...	70
6.5.2 - Medidas de Deslocamento com a Variação de ângulo do Pulso.....	72
6.5.3 - Medidas de Deslocamento com Folga.....	73
6.6 - Medidas de Deslocamento nas Articulações do Antebraço.....	75
6.7 - Medidas de Deslocamento da Referência.....	75

	<u>Pág.</u>
<u>CAPÍTULO VII - RESULTADOS</u>	77
7.1 - Resultados Teóricos.....	77
7.1.1 - Rotação das Placas de Ligações.....	77
7.1.2 - Análise das Forças.....	82
7.1.3 - Deslocamento nas Articulações.....	82
7.2 - Resultados Experimentais.....	86
7.2.1 - Rotação das Placas de Ligações.....	86
7.2.2 - Deslocamento da Mão Mecânica Isolada.....	88
7.2.2.1 - Deslocamento em (x, y) com a Variação do Peso..	88
7.2.2.2 - Deslocamento Vertical com a Variação de ângulo do Pulso.....	88
7.2.2.3 - Deslocamento Vertical com Folga.....	91
7.2.3 - Deslocamento em (x, y) nas Articulações do Braço e do Antebraço.....	91
7.2.4 - Deslocamento da Referência.....	95
<u>CAPÍTULO VIII - COMPARAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL</u>	99
8.1 - Rotação das Placas de Ligações.....	99
8.2 - Deslocamento nas Articulações do Braço e do Ante- braço.....	99
<u>CAPÍTULO IX - CONCLUSÕES</u>	104
9.1 - Construção.....	104

	<u>Pág.</u>
9.2 - Modelo Analítico.....	105
9.3 - Sugestões para Trabalhos Futuros.....	106
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	107
<u>APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DE $\partial F_4 / \partial \phi_4$</u>	109
<u>APÊNDICE B - FLUXOGRAMA</u>	111
<u>APÊNDICE C - TABELAS</u>	114

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - GENERALIDADES

Recentemente uma rápida evolução na área de informática possibilitou uma maior flexibilidade no comando de operações em máquinas automáticas, inclusive para comando numérico de manipuladores cujo controle necessita-se de um maior número de informações. Por outro lado, a crescente necessidade de proteção humana em operações perigosas, tais como, manipulação de produtos químico venenoso, lixo atômico, etc., tem levado cada vez mais ao uso de manipuladores.

Este aumento no número de manipuladores, tem feito com que muitas pesquisas estejam voltadas para o mecanismo e controle dos mesmos. Um exemplo importante que pode ser citado é a precisão de posicionamento a qual depende do tipo de mecanismo utilizado e a precisão da construção quando não for considerado a parte de controle eletrônico, assim como a atuação de freios e atuadores.

Entre estes mecanismos, o das barras apresenta grande vantagem quando há necessidade de diminuir o peso do mecanismo, transmitindo uma determinada potência. Esta diminuição do peso torna-se de grande importância a medida que aumenta a velocidade do manipulador devido ao momento de inércia e consequentemente a força centrífuga.

Um protótipo de manipulador acionado por cinco servomotores independentes, ou seja, com cinco graus de liberdade, utilizando os mecanismos de quatro barras consecutivos ligados por corpo rígido, foi construído para a análise de precisão do posicionamento do mesmo.

Dois tipos de modelos analíticos foram desenvolvidos para a compreensão dos resultados. Um modelo, para a análise de transmissão de ângulo, levando em conta as tolerâncias geométricas dos elementos constituintes do mecanismo. Outro modelo, para a análise de deslocamento de cada articulação do mecanismo com carga estática aplicada na extremidade do mesmo, considerando a deformação axial e a deflexão das barras.

Estes modelos servem tanto para o dimensionamento de manipulador semelhante ao protótipo desenvolvido neste trabalho através da análise de forças, como para a análise de precisão de posicionamento do mesmo quando o peso dos elementos constituintes for desprezível em relação as forças atuantes nos elementos.

1.2 - OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um estudo básico teórico e experimental necessário para a realização do projeto e a construção de um manipulador, visando assim maior flexibilidade de aplicação do mesmo.

1.3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas de manipuladores foram iniciadas, visando aplicações em ambientes perigosos tais como, tratamento de lixo atômico em energia nuclear e manipulação aeroespacial ou no fundo do mar¹.

Atualmente os manipuladores estão sendo aplicados amplamente nas indústrias automobilísticas e eletrodomésticas, utilizando diversos mecanismos para cada necessidade nas operações. Estes manipuladores comercializados encontram-se facilmente nos catálogos² que se referem aos tipos de mecanismos utilizados e suas aplicações. Entretanto, o mecanismo mais utilizado recentemente para manipuladores é o tipo articulado devido a facilidade de sua construção e a variedade de uso.

Sobre características básicas e tipos de manipuladores para aplicação na energia nuclear tem-se as referências 3 e 4 as quais ajudarão na escolha do mecanismo e compreensão do mesmo.

Quando se trata de determinação do posicionamento do manipulador, K. J. Waldron e A. Kumer⁵ desenvolveram a teoria de erro para manipuladores, considerando a folga nas articulações, porém este refere-se apenas aos erros cinemáticos.

A análise para a influência da tolerância geométrica dos elementos constituintes do mecanismo de quatro barras

em ângulos de transmissão encontra-se na referência 6, no entanto este trata apenas de um único mecanismo de quatro barras. Por esta razão foi desenvolvido neste trabalho a aplicação de um mecanismo de quatro barras consecutivo ligado por corpo rígido.

Para o cálculo computacional de deslocamento nas estruturas, C.A. Brebbia e A.J. Ferrante⁷ desenvolveram um programa para análise estática e dinâmica de uma estrutura em um determinado plano, baseados na Teoria de Gere e Weaver⁸ a qual trata de problemas mais complexos, pois nesta se encontra a análise não apenas de estrutura em um plano, mas também para estrutura no espaço. Entretanto, ambos (7, 8) consideram as posições da estrutura a ser analisada como fixas num determinado plano ou espaço e além disso o programa em questão traz as informações desnecessárias como no caso de dinâmica da estrutura. Por esta razão, foi necessário desenvolver um programa para este trabalho, possibilitando a variação de posições da estrutura num determinado plano.

Ao desenvolver um programa para cálculo de deslocamento da estrutura consultou-se, além das duas obras citadas, as referências 9 e 10 para a compreensão do vetor deformação num plano, sua transformação de coordenada e para a programação geral.

Quanto as fórmulas de deslocamento R.J. Roark e W. C. Young¹¹ apresentam uma série delas, mostrando várias situações de forças aplicadas em vigas, inclusive os deslocamen

tos de uma viga que sofre a força axial junto com a de flexão, porém, estas fórmulas podem ser aplicadas apenas para uma força axial relativamente grande em relação a da flexão. E para a compreensão do significado das fórmulas consultou-se a referência 12.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DO MANIPULADOR

Este Capítulo trata dos elementos constituintes do protótipo desenvolvido neste trabalho. De acordo com seus funcionamentos, os elementos podem se dividir em atuador, meio de transmissão de potência e estrutura. Onde a estrutura consiste em mão mecânica (1), antebraço (2), braço (3) e o corpo (4) conforme a Figura 2.1.

No final deste Capítulo encontra-se a importância de posicionamento do manipulador. A seguir mostra-se os detalhes de cada elemento.

2.1 - ATUADOR

Como atuador foram utilizados cinco servomotores de corrente contínua para acionar os elementos da estrutura referida. Estes motores podem funcionar separadamente ou simultaneamente de acordo com a necessidade. O manipulador tem cinco graus de liberdade como se vê por n_1 , n_2 , ..., n_5 indicados na Figura 2.1. O motor responsável para a rotação do corpo do manipulador tem a velocidade de saída no redutor, acoplado neste motor, de 10 rpm.

Os outros quatro motores têm a potência de 50 Watts com a velocidade de 15.000 rpm, tendo, também acoplados

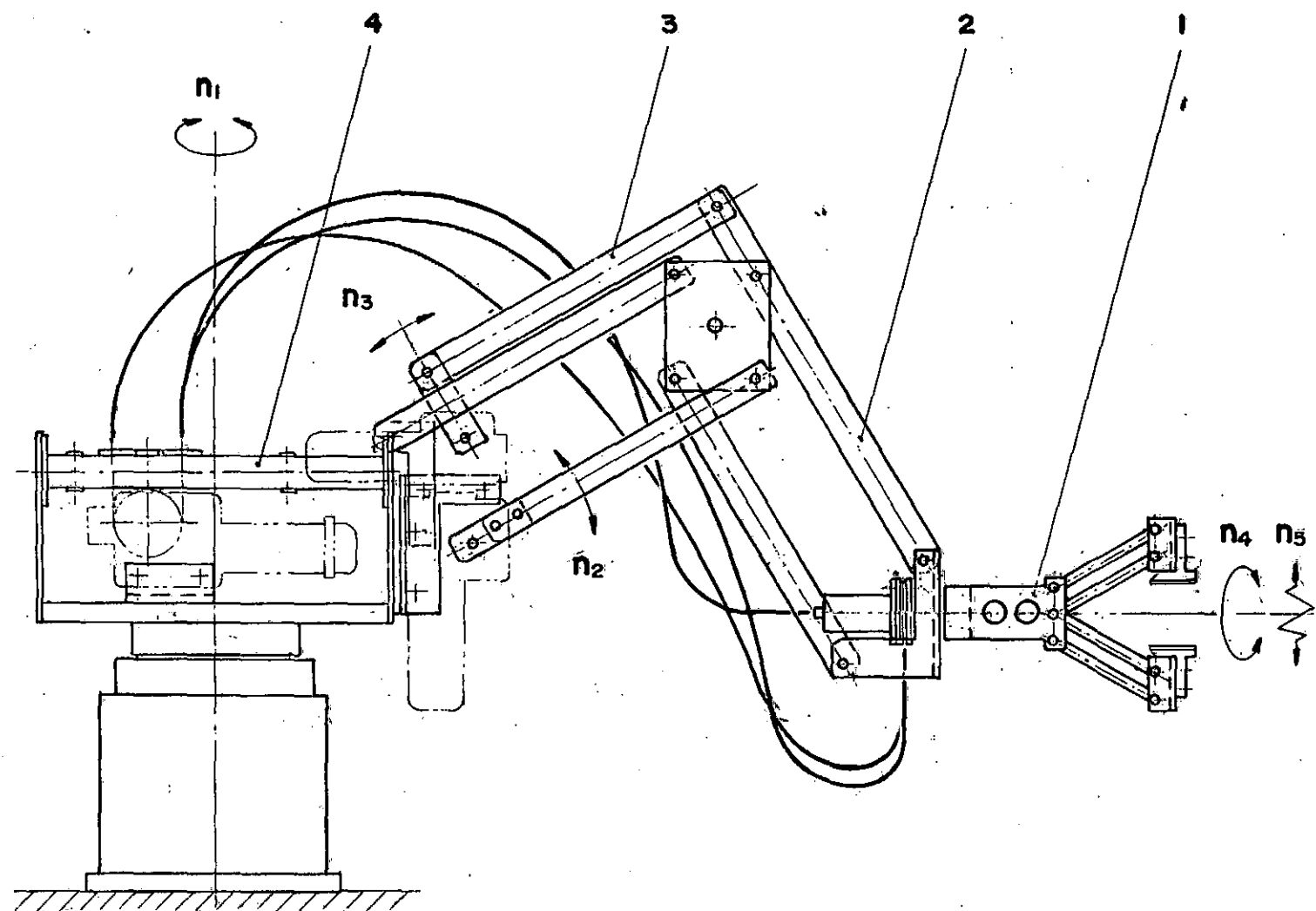


Fig. 2.1 - Conjunto de manipulador

os redutores de velocidade por engrenagem, cuja velocidade de saída é de 3,3 rpm e freios magnéticos.

As ligações dos motores do corpo (M_1) e do braço (M_2) foram feitas diretamente ao eixo dos motores, enquanto que para movimentar a garra (M_5), o pulso (M_4) e o antebraço (M_3) utilizou-se as ligações indiretas, evitando-se assim um aumento de peso nas articulações e consequentemente a necessidade de reforço da estrutura. Sobre as ligações indiretas encontra-se mais detalhes na Seção 2.2.

Finalmente, as fixações dos motores foram feitas através de parafusos, concentrando-se estes motores no corpo do manipulador para facilitar a manutenção dos mesmos.

2.2 - MEIO DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA

Para a transmissão de potência do motor para os membros distantes (mão mecânica, antebraço) do corpo do manipulador foram utilizados cabos de aço com revestimento, o qual serve como guia do cabo e um sistema de quatro barras para movimentar o antebraço. A seguir mostra-se os detalhes de cada transmissão.

2.2.1 - Transmissão para a Mão Mecânica

Como se vê na Figura 2.1, a mão mecânica têm dois movimentos, rotação do pulso " n_4 " e abertura e fechamento da

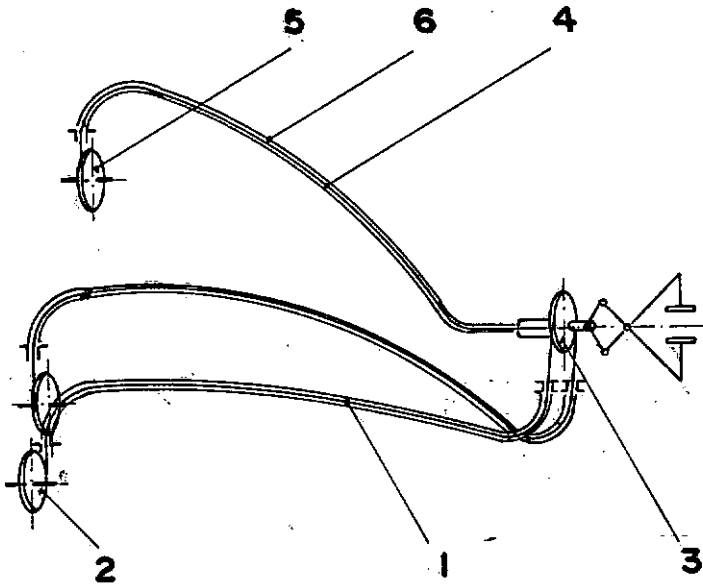


Fig. 2.2 - Transmissão de potência para mão mecânica

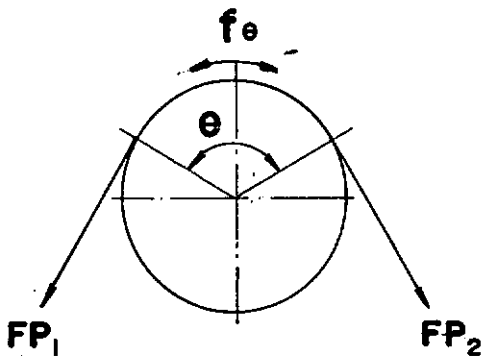


Fig. 2.3 - Simboligia para a força de atrito entre o cabo e a polia

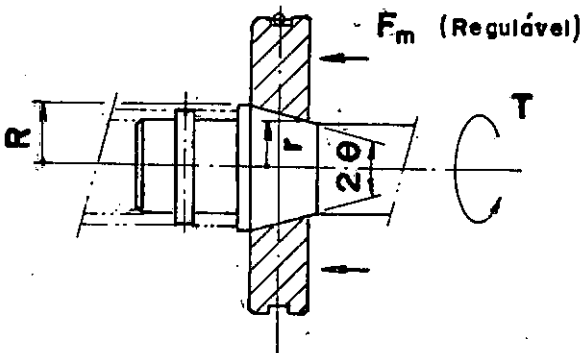


Fig. 2.4 - Simbologia para o limitador de torque

garra "n₅". Portanto, a transmissão de potência deve ser separada para cada movimento. A seguir mostra-se os meios de transmissão para cada movimento referido.

Um cabo de aço com 1.800 mm de comprimento (1) foi utilizado para a rotação do pulso. Cada extremidade do cabo foi fixada, enrolando-o nas polias (2) em sentido oposto, ou seja, enquanto uma gira num sentido e outra gira no sentido oposto conforme a Figura 2.2. Na polia do pulso (3) da Figura 2.2, foi enrolado este cabo para converter o movimento de translação do cabo para movimento de rotação do pulso.

O abraçamento do cabo na polia do pulso foi feita em 2.5 voltas a fim de aumentar a força de atrito entre o cabo e a polia, evitando deste modo o deslizamento. A força de atrito pode ser determinada de acordo com a simbologia da Figura 2.3.

Pela fórmula (13)

$$\begin{aligned} f_{\theta} &= FP_1 - FP_2 \\ &= FP_1 \cdot (e^{\mu\theta} - 1) \end{aligned} \quad (2.1)$$

onde, f_{θ} - força de atrito entre o cabo e a polia

FP_1 - tensão no cabo

FP_2 - tensão no cabo, sendo que $FP_1 > FP_2$

- θ - ângulo de abraçamento do cabo na superfície da curva. Para o caso de mais do que uma volta, considere-se como $(\theta + 2\pi n)$, onde n é o número de voltas
- μ - coeficiente de atrito entre o cabo e a polia

Um cabo de aço com 1.000 mm de comprimento (4) foi utilizado para o movimento da garra. Uma das extremidades do cabo foi fixada na polia do limitador de torque (5) montado na saída do redutor a fim de proteger o motor da garra, conforme a Figura 2.2. A extremidade deste cabo é ligada ao eixo deslizante da garra. Portanto, um dos sentidos de rotação do motor fecha a garra, transmitindo a potência do motor através do limitador de torque até o limite estabelecido cuja regulagem é feita por pressão da mola. Quando se chega a este limite, a polia do limitador de torque desliza em cima da superfície cônica do eixo do limitador.

O torque atuante no limitador de torque é dado pela fórmula (14) de acordo com a simbologia da Figura 2.4.

$$T = \frac{\mu}{2} \cdot \frac{F_m(r + R)}{\sin \theta} \quad (2.2)$$

onde, T - torque no limitador de torque

μ - coeficiente de atrito

F_m - força da mola

R - raio de contato maior

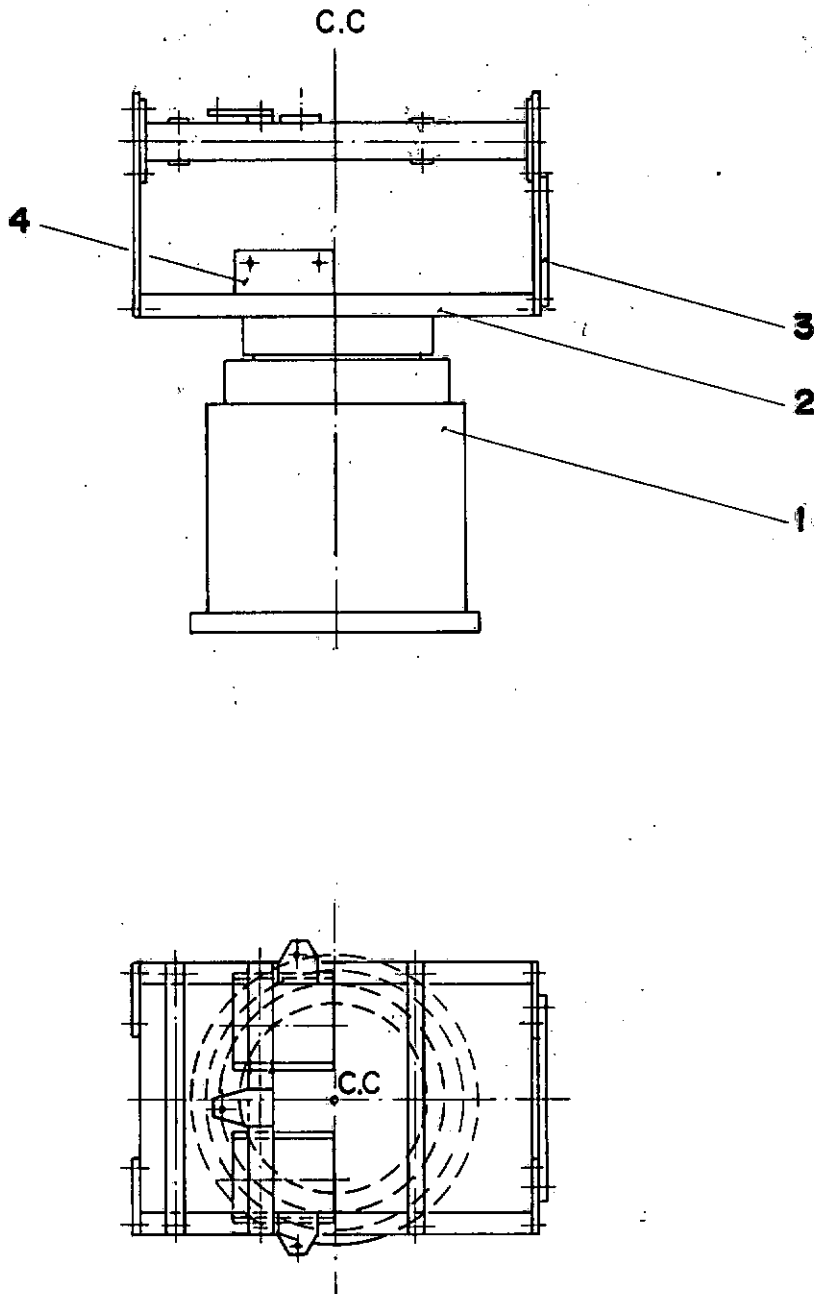


Fig. 2.5 - Corpo do manipulador

r - raio de contato menor

θ - ângulo de contato

As extremidades de revestimento dos cabos (6) foram fixadas no corpo e na mão mecânica através de suportes montados nos mesmos conforme a Figura 2.2.

2.2.2 - Transmissão para o Antebraço

O sistema de quatro barras foi escolhido de modo que a velocidade angular do eixo de redutor seja equivalente a do antebraço, ou seja, em termos geométricos as quatro barras formam um paralelogramo. Os detalhes das ligações do antebraço encontra-se na Seção 2.3.

2.3 - ESTRUTURA

A estrutura consiste basicamente de um conjunto de barras de alumínio exceto os elementos de fixação tais como parafusos, pinos e buchas das articulações e a base dos motores da mão mecânica na qual foi utilizado material de aço 1020 com o objetivo de colocar o centro de gravidade do manipulador próximo da mesa de fixação.

A seguir descreve-se detalhes dos elementos constituintes da estrutura, referidos no início deste Capítulo.

2.3.1 - Corpo do Manipulador

O corpo do manipulador consiste em,

1. base fixa
2. base móvel
3. suporte do braço
4. suporte dos motores da garra e do pulso

conforme a numeração da Figura 2.5. Através do servomotor montado na base fixa, a base móvel gira-se em 2π radianos em torno do centro de corpo (C.C.). O suporte do braço e dos motores da garra e de pulso foram fixados na base móvel através de parafusos para facilitar a manutenção dos mesmos.

Os revestimentos dos cabos referidos na Seção 2.2 foram fixados também na base móvel através dos suportes montados na mesma.

2.3.2 - Braço e Antebraço

Os membros que constituem o braço e o antebraço são basicamente as barras (1) e as placas (2a, 2b) conforme a Figura 2.6. Onde quatro barras paralelas entre si formam o conjunto do braço e do antebraço para não haver rotações nas placas de ligações durante o movimento do braço e do antebraço, consequentemente não há rotação do objeto agarrado pela mão mecânica.

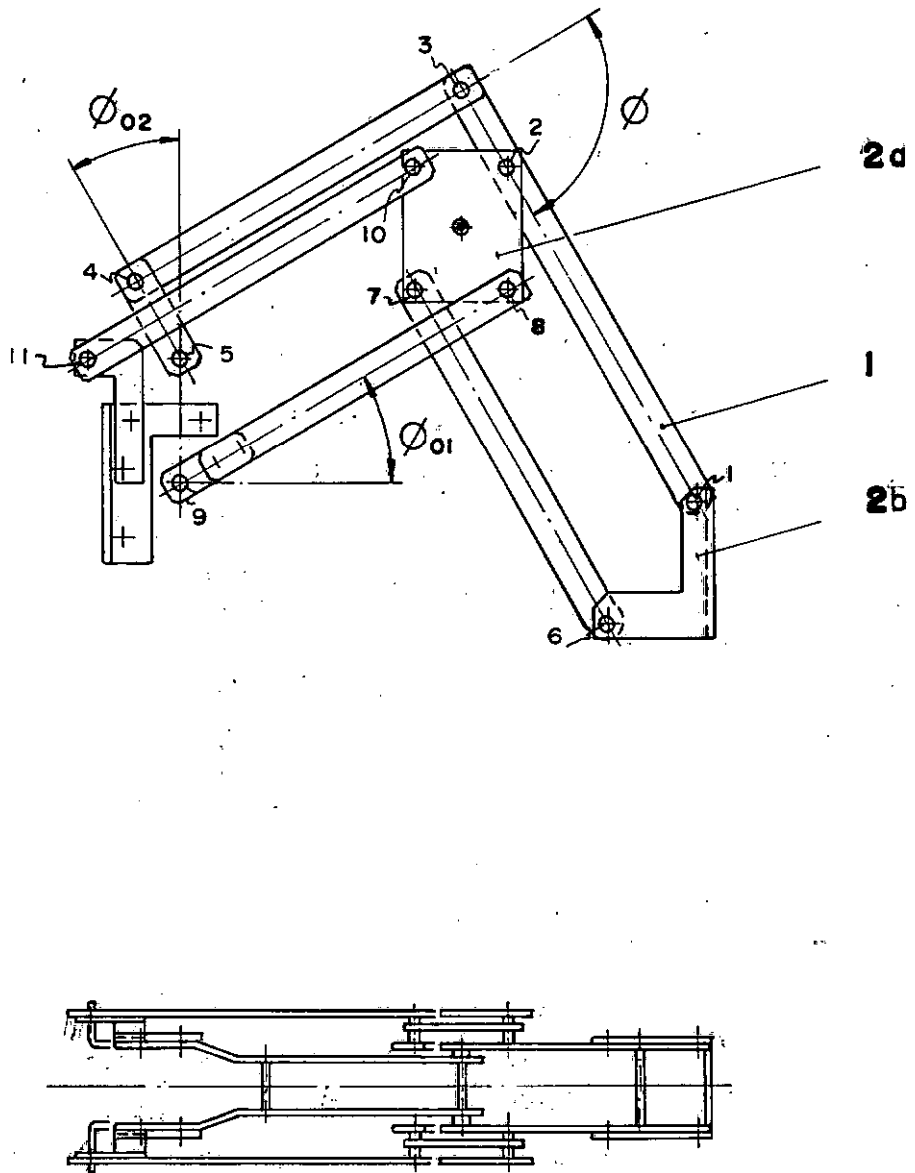


Fig. 2.6 - Braço e antebraço do manipulador

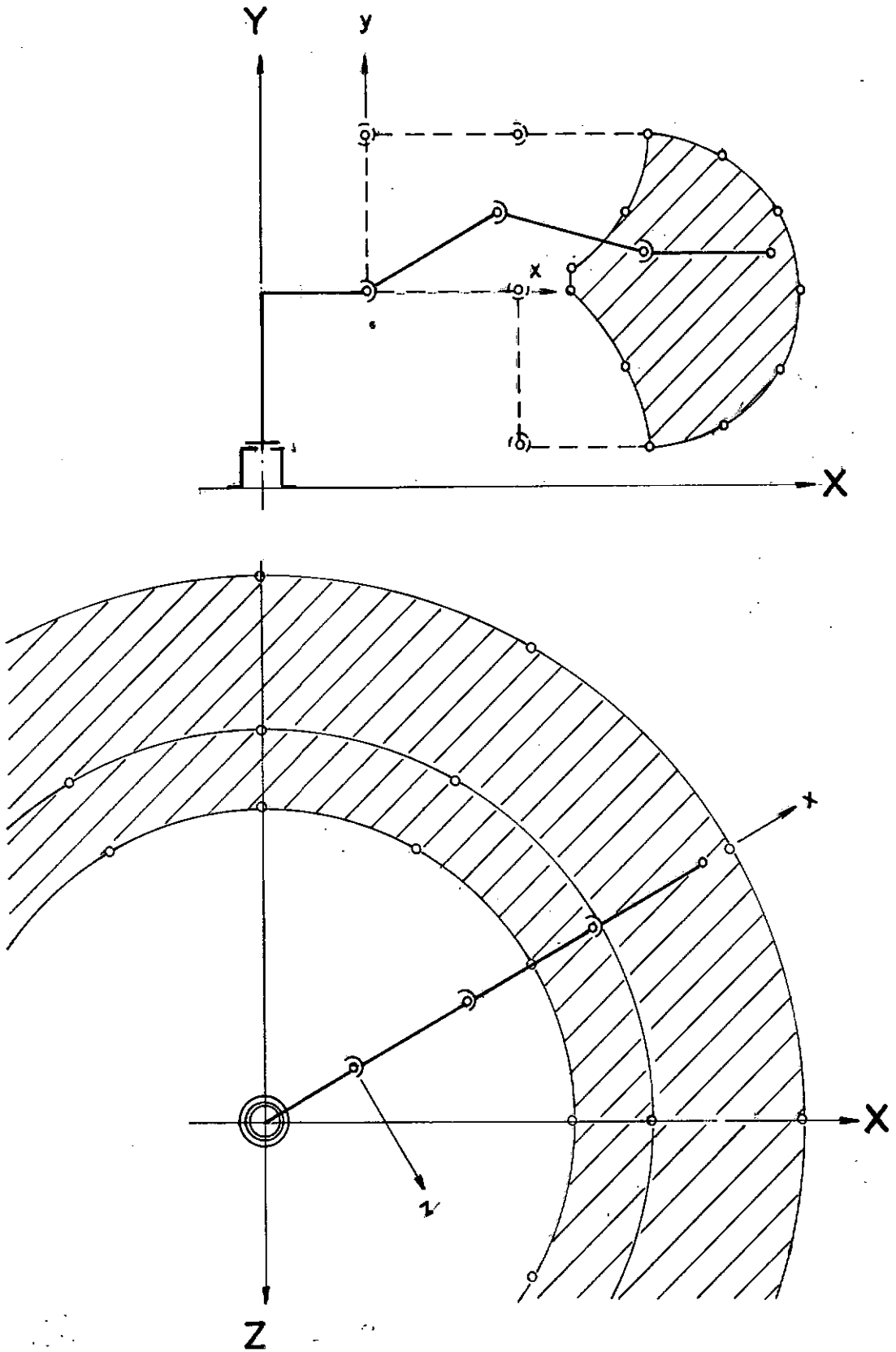


Fig. 2.7 - Espaço útil do manipulador

As ligações entre as barras e as placas foram feitas pelas articulações as quais consistem de um pino e de um anel elástico para possibilitar o movimento de um grau de liberdade.

Devido à geometria da fixação dos motores, os movimentos de rotação do braço e do antebraço foram limitados em $0 \leq \phi_{01}, \phi_{02} \leq \pi/2$, considerando a posição inicial como horizontal para o braço e vertical para o antebraço. E o ângulo ϕ entre o braço e o antebraço foi limitado para $0 \leq \pi/6$ para que as forças atuantes nas articulações não ultrapassem o limite estabelecido. Devido a estas restrições de movimento, o espaço útil (área rachurada) do manipulador foi reduzido conforme a Figura 2.7. Os pontos extremos deste espaço referem-se ao centro da garra. As coordenadas cartesianas indicadas nesta figura referem-se as coordenadas fixa (X, Y, Z) e móvel (x, y, z) com as origens localizadas na mesa de referência, passando por C.C. da Figura 2.5 e no ponto equidistante das articulações 9 e 11 da Figura 2.6 respectivamente.

2.3.3 - Mão Mecânica

A mão mecânica consiste no conjunto formado pela garra e polia conforme a Figura 2.8. A polia do pulso (1) foi montado no mancal de deslizamento (2) fixado na placa do pulso. A garra (3) como se vê na figura consiste em barras paralelas para que as pontas da garra (3a) permaneçam paralelas durante o movimento (fechar e abrir) da garra. O movimento da garra será comandado pelo cabo de aço (4) referido na seção 2.2 através do

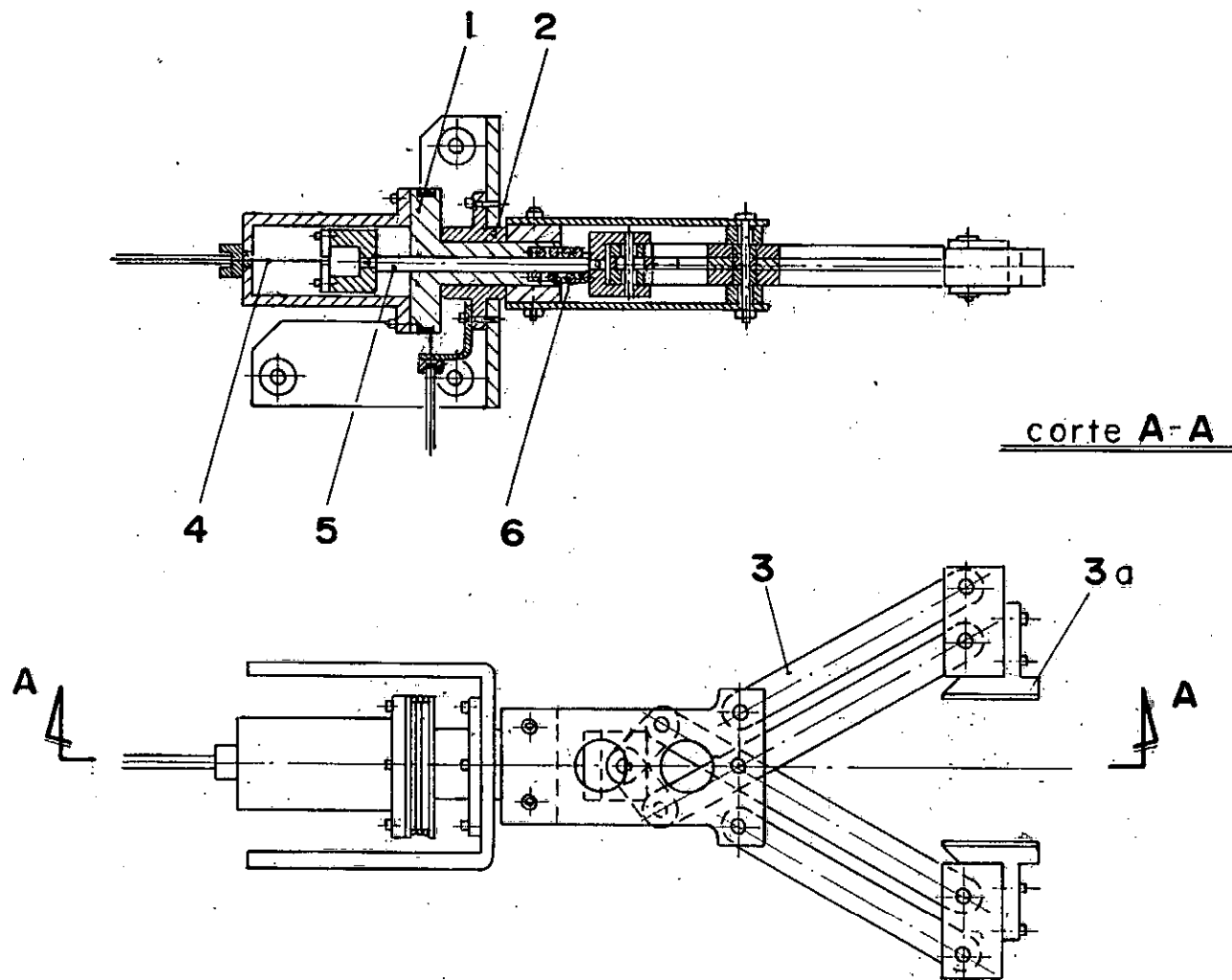


Fig. 2.8 - Mão mecânica do manipulador

eixo de deslizamento (5) o qual se movimenta dentro do furo da polia do pulso. Para fechar a garra basta puxar este cabo e para abri-la deve-se mudar o sentido de rotação do motor, eliminando deste modo a tensão no cabo. A mola de pressão (6), colocada entre a polia e o suporte móvel da garra atua para novamente tensionar o cabo, vencendo as forças de atrito existentes entre o cabo e o revestimento, nas articulações das barras e no mancal de deslizamento.

2.4 - POSICIONAMENTO DO MANIPULADOR

Quando se trata do posicionamento do manipulador refere-se a posição do centro da mão mecânica, ou seja, centro geométrico do objeto a segurar.

Para mudar a posição do objeto, basta ligar o motor (os motores, se for necessário) M_1 , M_2 e M_3 os quais são responsáveis pelos graus de liberdade n_1 , n_2 e n_3 indicados na Figura 2.1 respectivamente. Nota-se que os outros graus de liberdade n_4 e n_5 não influenciam o posicionamento.

Em termos de "precisão de posicionamento" é importante saber os "erros de posicionamento" causados por:

- a) cinemática
- b) deslocamento (elástico e folga)
- c) dinâmica e controle

A seguir mostra-se a importância de cada item para a precisão de posicionamento.

2.4.1 - Erro por Cinemática

Devido ao erro geométrico dos membros do braço e do antebraço as placas de ligações mostradas na Figura 2.1 sofrem uma rotação durante a operação do manipulador. Esta rotação nas placas causa uma mudança de posição do centro da garra em relação à posição desejada. Normalmente se os membros do braço e do antebraço forem compridos, o erro geométrico aumenta proporcionalmente e conseqüentemente a influência no erro de posicionamento cresce a medida que aumenta o comprimento dos membros em questão.

A influência deste erro será tratada nos Capítulos III, VI e VII.

2.4.2 - Erro por Deslocamentos (Elástico e Folga)

Quando a garra segura o objeto, o centro da garra desloca-se devido a deflexão dos membros da estrutura e as folgas existentes nas articulações causadas pelo peso do objeto. Esta deflexão dos membros causa um deslocamento elástico dos mesmos. Portanto, quando o objeto é retirado da garra esta deverá voltar à posição inicial, no entanto devido a influência da folga nas articulações esta posição muda dependendo do peso do objeto aplicado na garra. Obviamente quando o peso do objeto

for maior haverá deslocamento maior quando a rigidez da estrutura for a mesma. O aumento da rigidez da estrutura, isto é, o aumento do momento de inércia da seção transversal (I) e do módulo de elasticidade (E) dos membros da estrutura, terá maior influência nos deslocamentos do centro da garra, devido ao aumento da inércia dos mesmos.

A influência da folga nas articulações será tratada apenas na parte experimental da mão mecânica e a influência do deslocamento elástico será tratada nos Capítulos V, VI e VII.

2.4.3 - Erro por Dinâmica e Controle

Quando o manipulador está em movimento, para posicionar em um ponto do espaço desejado deve-se desligar o sinal de entrada do motor (ou motores), porém devido à inércia do motor e do manipulador o ponto atingido não coincide com o ponto desejado. Esta tendência aumenta à medida que o centro de gravidade do braço, antebraço e mão mecânica se afasta do centro do corpo do manipulador (C.C.).

Por outro lado, há um erro de comando liga e desliga do motor (ou motores) na iminência da chegada em um ponto desejado.

A análise deste erro não será tratada neste trabalho, pois para esta análise necessita-se da parte de controle do manipulador.

CAPÍTULO III

ROTAÇÕES NAS PLACAS DE LIGAÇÕES

3.1 - OBJETIVOS

Neste Capítulo, é feita uma análise para a influência dos erros geométricos nos membros do braço e do antebraço mecânico.

Este estudo permite obter as rotações em um plano (x, y) da Figura 2.7 nas placas de ligações (2a, 2b) da Figura 2.6 o qual é importante para análise do posicionamento do manipulador.

3.2 - SIMBOLOGIA

Ao longo deste trabalho foi estabelecido um conjunto de símbolos para o desenvolvimento do mesmo. Estes aparecem na Figura 3.1. Onde os números 1, 2, ..., 11 indicam as articulações e q_i , $i = 1, 2, \dots, 12$ indicam os membros do braço e do antebraço. As placas de ligações 2a e 2b da Figura são as placas a serem estudadas nesta análise.

3.3 - ESTRATÉGIA PARA A ANÁLISE DAS ROTAÇÕES NAS PLACAS

O mecanismo da Figura 3.1 pode ser considerado como um conjunto de quatro barras conforme a Figura 3.2. Portanto, a

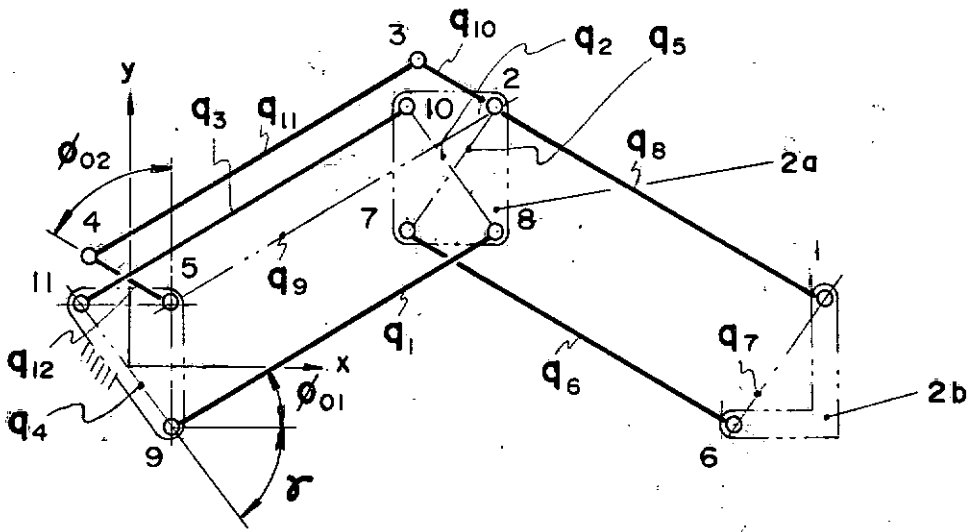


Fig. 3.1 - Esquema do braço e do antebraço em um plano (x, y)

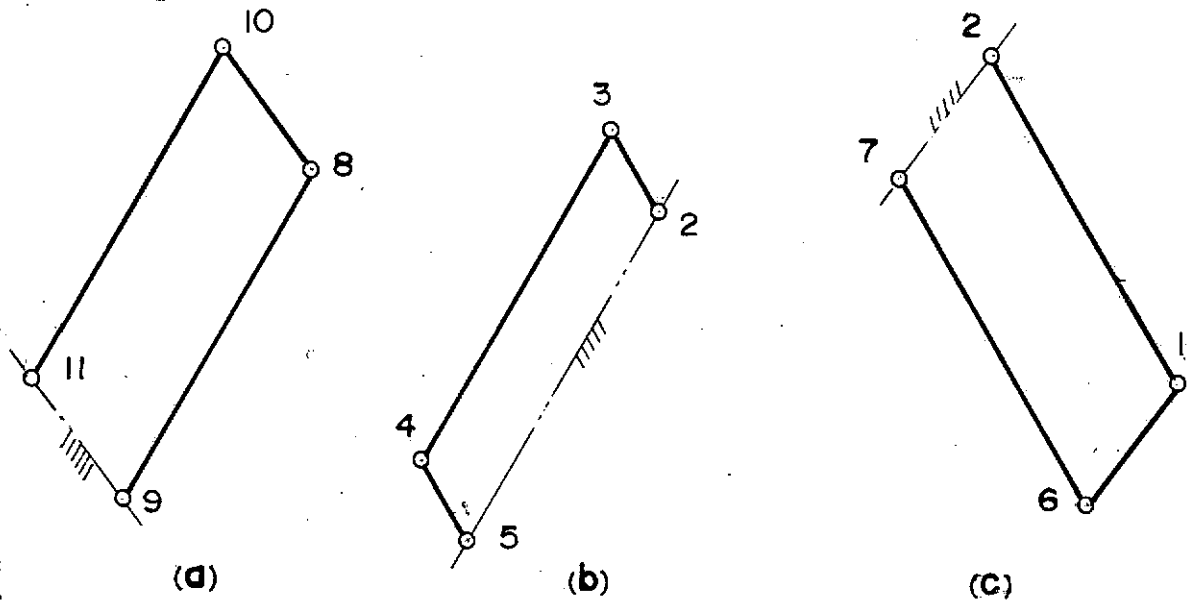


Fig. 3.2 - Mecanismos de quatro barras

análise das rotações nas placas de ligações será estudada para cada um destes mecanismos de quatro barras.

A placa 2a é influenciada apenas pelo mecanismo (a) da Figura 3.2 e a placa 2b, além de ter uma influência do mecanismo (a), tem também pelos mecanismos (b) e (c) devido às ligações feitas entre cada mecanismo. O movimento do membro q_1 causa uma rotação do membro q_2 e q_5 , que pertencem a placa 2a, quando há um erro geométrico nos membros e conseqüentemente do membro q_7 da placa 2b. Por outro lado, o movimento do membro q_{12} causa uma rotação do membro q_{10} que pertence a mesma barra do membro q_8 surgindo uma rotação do membro q_7 da placa B.

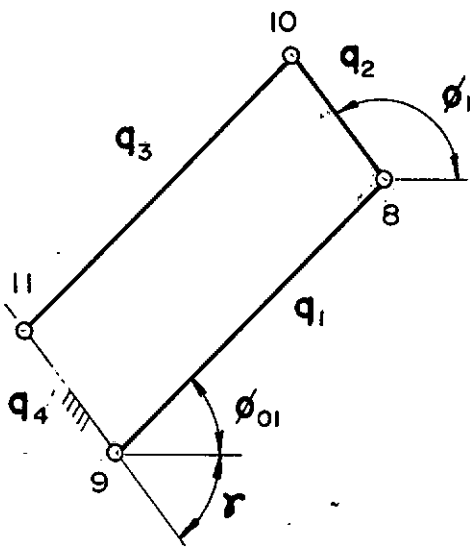
A seguir mostra-se a análise para cada caso separadamente.

3.4 - ROTAÇÃO DA PLACA 2a

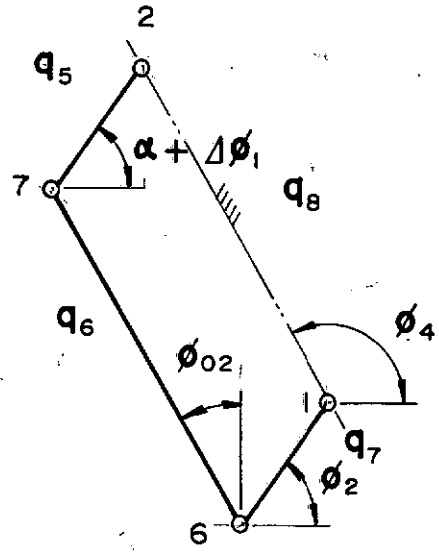
A rotação do membro q_2 que pertence a placa 2A ocorre devido ao ângulo de entrada ϕ_{01} no membro q_1 conforme a Figura 3.3a. Portanto, nesta seção será analisado o erro de ângulo de rotação do membro q_2 .

Considere que os erros geométricos nos membros são dados por $\Delta q_1, \dots, \Delta q_4$ e a equação de deslocamento do mecanismo em questão pode ser escrita da seguinte forma (6),

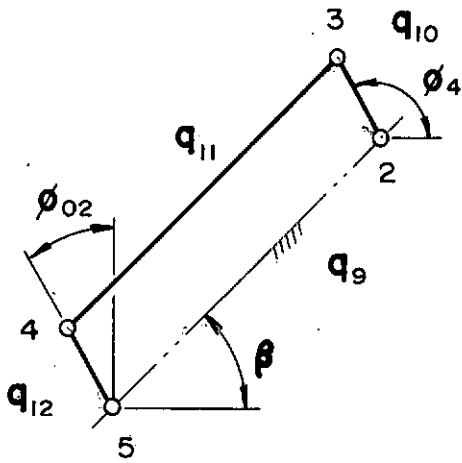
$$F_1(q_1, \dots, q_4, \gamma, \phi_{01}, \phi_1) = 0 \quad (3.1)$$



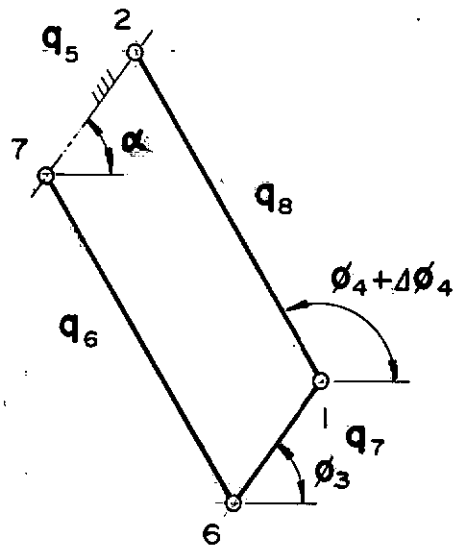
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.3 - Mecanismo para estudo de rotações nas placas de ligações

E por simples geometria tem-se,

$$q_3^2 = [q_4 \cdot \cos \gamma + q_1 \cdot \cos \phi_{01} - q_2 \cdot \cos(\pi - \phi_1)]^2 + [q_1 \cdot \sin \phi_{01} + q_2 \cdot \sin(\pi - \phi_1) - q_4 \cdot \sin \alpha]^2 \quad (3.2)$$

A equação (3.2) pode ser simplificada, considerando limites de variação para ϕ_{01} em $0 < \phi_{01} < \pi/2$.

$$A_1 \cdot \sin \phi_1 + B_1 \cdot \cos \phi_1 + C_1 = 0 \quad (3.3)$$

onde,

$$A_1 = 2q_2 \cdot (q_1 \cdot \sin \phi_{01} - q_4 \cdot \sin \gamma)$$

$$B_1 = 2q_2 \cdot (q_1 \cdot \cos \phi_{01} + q_4 \cdot \cos \gamma)$$

$$C_1 = q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 - q_4^2 + 2q_1 \cdot q_4 \cdot \cos(\phi_{01} + \gamma) \quad (3.4)$$

Portanto, a equação de deslocamento fica,

$$F_1 = A_1 \cdot \sin \phi_1 + B_1 \cdot \cos \phi_1 + C_1 = 0 \quad (3.5)$$

Por outro lado, para um dado ângulo de entrada ϕ_{01} no membro q_1 , o valor do ângulo de saída do membro q_2 ou seja da placa 2a será $\phi_1 + \Delta\phi_1$ e a equação (3.1) pode ser escrita como,

$$F_1(q_1 + \Delta q_1, \dots, q_4 + \Delta q_4, \phi_{01}, \phi_1 + \Delta\phi_1) = 0 \quad (3.6)$$

onde o $\Delta\phi_1$ é um erro de ângulo de saída da placa 2a. Para pequenos valores de erros $\Delta q_1, \dots, \Delta q_4$ e $\Delta\phi_1$ a derivada da função F_1 pode ser escrita em termos de derivada parcial como,

$$\frac{\partial F_1}{\partial q_1} \Delta q_1 + \dots + \frac{\partial F_1}{\partial q_4} \Delta q_4 + \frac{\partial F_1}{\partial \phi_1} \Delta \phi_1 = 0 \quad (3.7)$$

ou ainda,

$$\Delta \phi_1 = \frac{-\frac{\partial F_1}{\partial q_1} \Delta q_1 - \dots - \frac{\partial F_1}{\partial q_4} \Delta q_4}{\frac{\partial F_1}{\partial \phi_1}} \quad (3.8)$$

onde,

$$\frac{\partial F_1}{\partial q_1} = 2q_2 \cdot \cos(\phi_1 - \phi_{01}) + 2q_1 + 2q_4 \cdot \cos(\phi_{01} + \gamma)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial q_2} = 2q_1 \cdot \cos(\phi_1 - \phi_{01}) + 2q_4 \cdot \cos(\phi_1 + \gamma) + 2q_2$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial q_3} = -2q_3$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial q_4} = 2q_2 \cdot \cos(\phi_1 - \gamma) + 2q_1 \cdot \cos(\phi_{01} + \gamma) + 2q_4 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \phi_1} = A_1 \cdot \cos \phi_1 - B_1 \cdot \sin \phi_1$$

3.5 - ROTAÇÃO DA PLACA B

Esta rotação ocorre devido tanto ao ângulo ϕ_{01} quanto ao ângulo ϕ_{02} da Figura 3.1. Por esta razão, analisou-se este caso separadamente, considerando fixo em um dos ângulos.

3.5.1 - Rotação Devido ao Ângulo ϕ_{01} (Fixo em ϕ_{02})

Pela Seção 3.4, a placa 2a tem uma rotação devido à rotação do membro q_1 (ϕ_{01}) e conseqüentemente uma rotação na placa 2b. Admitindo-se o ângulo ϕ_{02} fixo, o membro q_8 da Figura 3.3b pode ser tomado como referência. Portanto, neste caso deve-se considerar o ângulo de entrada: $\alpha + \Delta\phi_1$, o ângulo de saída: ϕ_2 e o erro de ângulo da placa 2b: $\Delta\phi_2$.

Analogamente, à seção 3.4 a equação de deslocamento fica,

$$\begin{aligned} F_2(q_5, \dots, q_8, \alpha + \Delta\phi_1, \phi_{02}, \phi_2, \Delta\phi_2) \\ = A_2 \cdot \sin \phi_2 + B_2 \cdot \cos \phi_2 + C_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

onde,

$$A_2 = 2q_7 \cdot [q_5 \cdot \sin(\alpha + \Delta\phi_1) + q_6 \cdot \sin \phi_{02}]$$

$$B_2 = 2q_7 \cdot [q_7 \cdot \cos(\alpha + \Delta\phi_1) + q_6 \cdot \cos \phi_{02}]$$

$$C_2 = -q_5^2 - q_6^2 - q_7^2 + q_8^2 - 2q_5 \cdot q_6 \cdot \cos[\phi_{02} - (\alpha + \Delta\phi_1)] \quad (3.11)$$

O erro de ângulo da placa 2b, $\Delta\phi_2$, considerando os erros geométricos dos membros, como $\Delta q_5, \dots, \Delta q_8$, é dado por

$$\Delta\phi_2 = - \frac{\frac{\partial F_2}{\partial q_5} \Delta q_5 + \dots + \frac{\partial F_2}{\partial q_8} \Delta q_8 + \frac{\partial F_2}{\partial \alpha} \Delta\phi_1}{\frac{\partial F_2}{\partial \phi_2}} \quad (3.12)$$

onde,

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_2}{\partial q_5} &= 2q_7 \cdot \cos[\phi_2 - (\alpha + \Delta\phi_1)] - 2q_6 \cdot \cos[\phi_{02} - (\alpha + \Delta\phi_1)] - 2q_5 \\ \frac{\partial F_2}{\partial q_6} &= 2q_7 \cdot \cos(\phi_2 - \phi_{02}) - 2q_6 - 2q_5 \cdot \cos[\phi_{02} - (\alpha + \Delta\phi_1)] \\ \frac{\partial F_2}{\partial q_7} &= -2q_7 + 2q_6 \cdot \cos(\phi_2 - \phi_{02}) + 2q_5 \cdot \cos[\phi_2 - (\alpha + \Delta\phi_1)] \\ &\quad (3.13) \\ \frac{\partial F_2}{\partial q_8} &= 2q_8 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \alpha} = 2q_5 q_7 \sin[\phi_2 - (\alpha + \Delta\phi_1)] - 2q_5 q_6 \sin[\phi_{02} - (\alpha + \Delta\phi_1)]$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \phi_2} = A_2 \cos \phi_2 - B_2 \sin \phi_2$$

3.5.2 - Rotação Devido ao ângulo ϕ_{02} (Fixo em ϕ_{01})

Considere o mecanismo da Figura 3.3a para determinar o erro do ângulo de saída ϕ_4 do membro q_{10} e o mecanismo da Figura 3.3d para ϕ_3 do membro q_7 que pertence a placa 2b.

3.5.2.1 - Determinação de $\Delta\phi_4$

A equação de deslocamento do mecanismo da Figura 3.3c é dado por,

$$F_3(q_9, \dots, q_{12}, \phi_{02}, \phi_4) = A_3 \sin \phi_4 - B_3 \cos \phi_4 - C_4 = 0 \quad (3.18)$$

onde,

$$\begin{aligned} A_3 &= 2q_{10} (q_9 \sin \beta - q_{12} \sin \phi_{02}) \\ B_3 &= 2q_{10} (q_9 \cos \beta - q_{12} \cos \phi_{02}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$C_3 = q_9^2 + q_{10}^2 - q_{11}^2 + q_{12}^2 - 2q_9 q_{12} \cos(\phi_{02} - \beta)$$

$$\beta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{q_1 \sin \phi_{01} + q_5 \sin \alpha}{q_1 \cos \phi_{01}} \right)$$

E o erro do ângulo de saída ϕ_4 do membro q_{10} é dado por,

$$\Delta \phi_4 = - \frac{\frac{\partial F_3}{\partial q_9} \Delta q_9 + \dots + \frac{\partial F_3}{\partial q_{12}} \Delta q_{12}}{\frac{\partial F_3}{\partial \phi_4}} \quad (3.20)$$

onde,

$$\frac{\partial F_3}{\partial q_9} = 2q_{10}(\sin \beta + \cos \beta) + 2q_9 - 2q_{12} \cos(\phi_{02} - \beta)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial q_{10}} = 2q_9(\sin \beta - \cos \beta) - 2q_{12}(\sin \phi_{02} + \cos \phi_{02}) + 2q_{10}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial q_{11}} = - 2q_{11} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial q_{12}} = - 2q_{10}(\sin \phi_{02} - \cos \phi_{02}) - 2q_9 \cos(\phi_{02} - \beta) + 2q_{12}$$

$$\frac{\partial F_3}{\partial \phi_4} = A_3 \cos \phi_4 - B_3 \sin \phi_4$$

3.5.2.2 - Determinação de $\Delta \phi_3$

A equação de deslocamento do mecanismo da Figura 3.3d é dado por,

$$F_4(q_5, \dots, q_8, \alpha, \phi_4, \Delta \phi_4, \phi_3) = A_4 \sin \phi_3 + B_4 \cos \phi_3 + C_4 = 0 \quad (3.22)$$

onde,

$$\begin{aligned}
 A_4 &= 2q_7 [q_8 \sin(\phi_4 + \Delta\phi_4) - q_5 \sin \alpha] \\
 B_4 &= 2q_7 [q_8 \cos(\phi_4 + \Delta\phi_4) - q_5 \cos \alpha] \\
 C_4 &= q_5^2 - q_6^2 + q_7^2 + q_8^2 - 2q_5 q_8 \cos[(\phi_4 + \Delta\phi_4) - \alpha]
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

E o erro de ângulo da placa 2b, $\Delta\phi_3$, considerando os erros geométricos dos membros como q_5, \dots, q_8 é dado por,

$$\Delta\phi_3 = - \frac{\frac{\partial F_4}{\partial q_5} \Delta q_5 + \dots + \frac{\partial F_8}{\partial q_8} \Delta q_8 + \frac{\partial F_4}{\partial \phi_4} \Delta\phi_4}{\frac{\partial F_4}{\partial \phi_3}} \tag{3.24}$$

onde,

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F_4}{\partial q_5} &= - 2q_7 (\sin \alpha + \cos \alpha) + 2q_5 - 2q_8 \cos [(\phi_4 + \Delta\phi_4) - \alpha] \\
 \frac{\partial F_4}{\partial q_6} &= - 2q_6 \\
 \frac{\partial F_4}{\partial q_7} &= 2q_8 [\sin(\phi_4 + \Delta\phi_4) + \cos(\phi_4 - \Delta\phi_4)] - 2q_5 (\sin \alpha + \cos \alpha) + 2q_7
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial F_4}{\partial q_8} &= 2q_7 [\sin(\phi_4 + \Delta\phi_4) + \cos(\phi_4 + \Delta\phi_4)] + 2q_8 + \\
 &\quad - 2q_5 \cos[(\phi_4 + \Delta\phi_4) - \alpha]
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial \alpha} = 2q_5 q_7 (\sin \alpha - \cos \alpha) - 2q_5 q_8 \sin[(\phi_4 - \Delta\phi_4) - \alpha]$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial \phi_4} = \frac{\partial}{\partial \phi_4} \{ \rho_1 \sin(\phi_4 + \Delta\phi_4) + \rho_2 \cos(\phi_4 + \Delta\phi_4) \\ + \rho_3 \cos[(\phi_4 + \Delta\phi_4) - \alpha] \}$$

$$\frac{\partial \widetilde{F}_4}{\partial \phi_3} = A_4 \cos \phi_3 - B_4 \sin \phi_3$$

O significado da expressão $\partial F_4 / \partial \phi_4$ encontra-se no Apêndice A e o resultado desta análise no Capítulo VII.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DE FORÇAS

4.1 - OBJETIVO

Este Capítulo trata de uma análise das forças atuantes em cada articulação do braço e do antebraço, consequentemente as forças nos membros.

Através desta análise, pode-se determinar os deslocamentos de cada articulação referida no Capítulo V.

4.2 - REAÇÕES NAS ARTICULAÇÕES

A análise das reações é feita, considerando o braço mecânico engastado na estrutura do corpo e isolando a mão mecânica do braço. Pelo isolamento da mão mecânica, deve-se considerar as forças externas atuantes na extremidade do braço como sendo as forças resultantes causadas pela mão mecânica.

4.2.1 - Forças Resultantes da Mão Mecânica

Estas forças variam de acordo com o peso do objeto a segurar, abertura da mão mecânica, causando uma variação de local e força do centro de gravidade (C.G.) da mesma.

De acordo com a Figura 2.6, as ligações entre a mão mecânica e antebraço foram feitas pelas articulações 1 e 6. Portanto, as forças resultantes da mão mecânica devem ser consideradas nestas articulações conforme a Figura 4.1. Sabendo que a força resultante da articulação 6 situa-se na direção ϕ_{02} da Figura, pelo equilíbrio estático tem-se,

$$FV_6 = - \frac{FCG \cdot LCG}{l_2 + l_3 \cdot \operatorname{tg} \phi_{02}}$$

$$FH_6 = - FV_6 \cdot \operatorname{tg} \phi_{02}$$

$$FH_1 = - FH_6 \quad (4.1)$$

$$FV_1 = - (FV_6 - FCG)$$

onde,

LCG - distância entre o centro de gravidade (C.G.) da mão mecânica até o centro da articulação 1 na direção X.

FCG - força exercida no C.G.

l_2 - distância entre as articulações 1 e 6 na direção X

l_3 - distância entre as articulações 1 e 6 na direção Y

ϕ_{02} - ângulo de posição do antebraço em relação a direção Y (estado inicial)

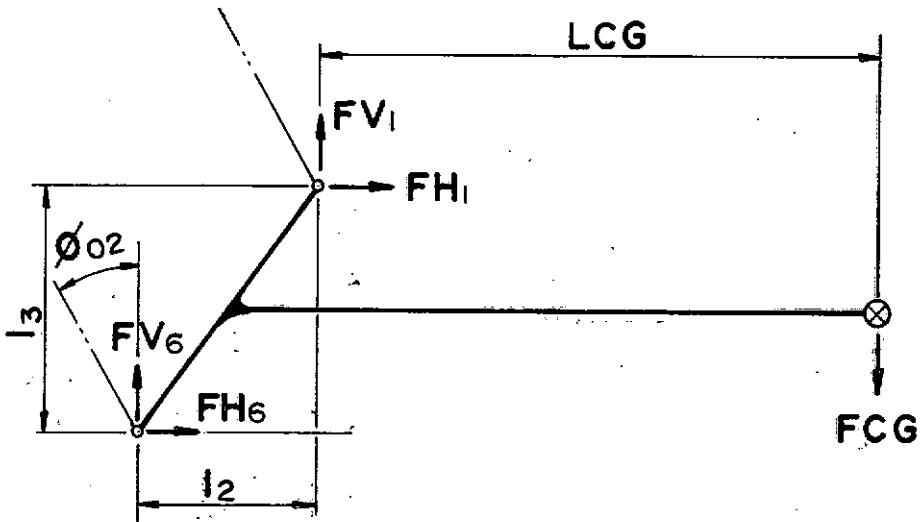


Fig. 4.1 - Forças atuantes na mão mecânica

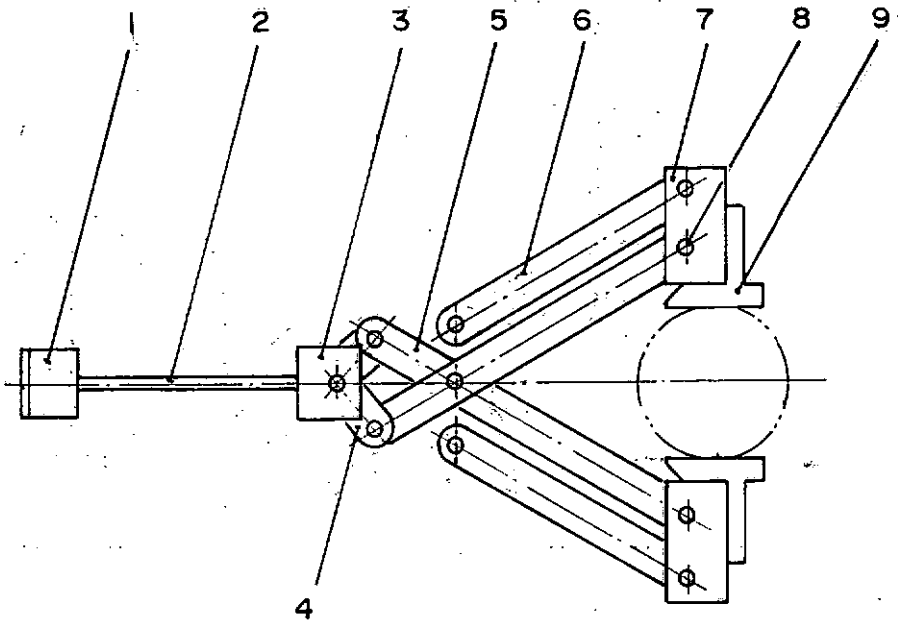


Fig. 4.2 - Peças móveis da mão mecânica

FV_i - força na direção Y para articulação i , $i = 1$ e 6

FH_i - força na direção X para articulação i , $i = 1$ e 6

Na determinação de LCG e FCG da mão mecânica pode-se considerar que a mesma possui partes móveis e fixas. Portanto, as forças atuantes no C.G. ficam:

$$FCG = \Sigma P_{f,i} + \Sigma P_{m,i} \quad (4.2)$$

onde,

$\Sigma P_{f,i}$ - somatório dos pesos das peças fixas

$\Sigma P_{m,i}$ - somatório dos pesos das peças móveis e do objeto a segurar

E o LCG é,

$$LCG = \frac{\Sigma (P_f \cdot l_f)_i + \Sigma (P_m \cdot l_m)_j}{FCG} \quad (4.3)$$

onde,

$l_{f,i}$ - distância de C.G. de cada uma das peças fixas (i) ao centro da articulação 1 na direção X

$l_{m,j}$ - distância do C.G. de cada uma das peças móveis (j) ao centro da articulação 1 na direção X

A Figura 4.2 mostra as peças móveis da mão mecânica que consiste basicamente de nove peças.

Sendo determinadas as forças nas articulações 1 e 6 pode-se determinar as forças nas outras articulações, o que será mostrado na seção seguinte.

4.2.2 - Forças nas Articulações

A determinação das forças é feita, desmembrando cada elemento do braço e do antebraço como corpo livre conforme a Figura 4.3 e nele atuando as forças externas referidas na seção 4.2.1.

As forças nas articulações são utilizadas na seção seguinte para a determinação das forças nos membros.

4.2.2.1 - Simbologia para Forças nas Articulações

A simbologia utilizada para a numeração das articulações e dos membros do braço e do antebraço é a mesma do Capítulo II, acrescida apenas pelas forças atuantes nas articulações.

FX_i - força na articulação i na direção X

FY_i - força na articulação i na direção Y

4.2.2.2 - Fórmula para Forças nas Articulações

Ao determinar as forças, aplica-se as seguintes relações para cada membro do braço e do antebraço, considerando a placa 2a da Figura 2.6 como corpo rígido e os membros q_3 , q_6 e q_{11} sofrendo apenas as forças na direção dos membros.

$$\Sigma \text{ forças na direção } X = 0$$

$$\Sigma \text{ forças na direção } Y = 0$$

$$\Sigma \text{ momentos nas articulações} = 0$$

Por outro lado, as forças determinadas nas articulações 1 e 6 na seção 4.2.1 devem ser consideradas com a metade do seu valor, pois cada membro da Figura 4.3 consiste em duas barras paralelas conforme a Figura 2.6.

A seguir mostra-se as fórmulas das forças relacionadas com cada articulação da Figura 4.3, considerando o comprimento de cada membro, $q_1 = q_3 = q_6 = q_8 = q_{11} = l_1$ e $q_{10} = q_{12} = l_2$.

$$\begin{aligned} \text{- Articulação 1: } FX_1 &= - FH_1/2 \\ FY_1 &= - FV_1/2 \end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned} \text{- Articulação 2: } FX_2 &= - (FX_1 + FX_3) \\ FY_2 &= - (FY_1 + FY_3) \end{aligned} \tag{4.5}$$

- Articulação 3:

$$FX_3 = \frac{(FX_1 \cdot \cos \phi_{02} - FY_1 \cdot \sin \phi_{02}) \cdot l_1}{(\operatorname{tg} \phi_{01} \cdot \sin \phi_{02} - \cos \phi_{02}) \cdot l_2} \quad (4.6)$$

$$FY_3 = FX_3 \cdot \operatorname{tg} \phi_{01}$$

- Articulação 4: $FX_4 = FX_3$ (4.7)

$$FY_4 = FY_3$$

- Articulação 6: $FX_6 = - FH_6/2$ (4.8)

$$FY_6 = - FV_6/2$$

- Articulação 7: $FX_7 = - FX_6$ (4.9)

$$FY_7 = - FY_6$$

- Articulação 8: $FX_8 = FX_2 + FX_7 - FX_{10}$ (4.10)

$$FY_8 = FY_2 + FY_7 - FY_{10}$$

- Articulação 10:

$$FX_{10} = \frac{FY_7 \cdot l_2 - FX_2 \cdot l_3}{l_3 - \operatorname{tg} \phi_{01} \cdot l_2} \quad (4.11)$$

$$FY_{10} = FX_{10} \cdot \operatorname{tg} \phi_{01}$$

4.2.3 - Forças nos Membros

As forças nos membros são resultantes das forças nas articulações adjacentes referidas na seção 4.2.2. Pela conveniência da utilização das fórmulas de deslocamento do Capítulo V, as forças nos membros se dividem em direção do membro (força axial) e perpendicular a ele (força de flexão).

4.2.3.1 - Simbologia para Forças nos Membros

Na Figura 4.4 mostra-se os símbolos de cada força nos membros onde,

$F_{a,ij}$ - força axial do membro que está situado entre as articulações i e j .

$F_{f,ij}$ - força de deflexão do membro que está situado entre as articulações i e j .

Considere os valores das forças como positivos para o sentido indicado na figura.

4.2.3.2 - Fórmula para as Forças nos Membros

As forças nos membros determinam-se simplesmente transformando as coordenadas X , Y das forças nas articulações para as direções do membro e perpendicular a ele como indicado na figura 4.4. Portanto, as fórmulas são,

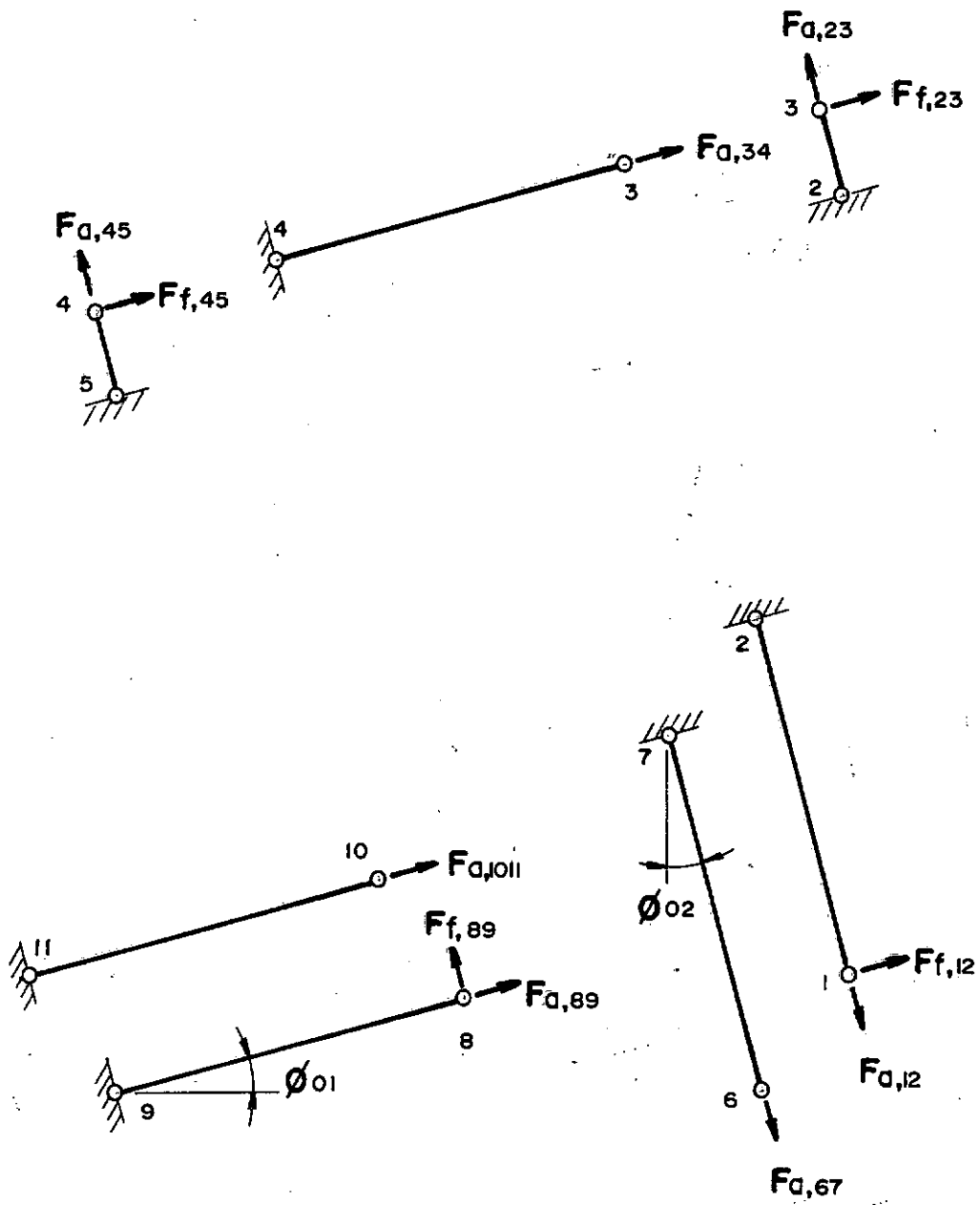


Fig. 4.4 - Corpo livre dos membros do braço e do antebraço para análise das forças nos membros

$$\text{- membro } q_8: \begin{pmatrix} F_{a,12} \\ F_{f,12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \phi_{02} & \sin \phi_{02} \\ \sin \phi_{02} & \cos \phi_{02} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} FY_1 \\ FX_1 \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$$\text{- membro } q_{10}: \begin{pmatrix} F_{a,23} \\ F_{f,23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_{02} & -\sin \phi_{02} \\ \sin \phi_{02} & \cos \phi_{02} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} FY_3 \\ FX_3 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$\text{- membro } q_{11}: F_{a,34} = - (FX_3 \cdot \cos \phi_{01} - FY_3 \cdot \sin \phi_{01}) \quad (4.14)$$

$$\text{- membro } q_{12}: \begin{pmatrix} F_{a,45} \\ F_{f,45} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \phi_{02} & \sin \phi_{02} \\ -\sin \phi_{02} & -\cos \phi_{02} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} FY_3 \\ FX_3 \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

$$\text{- membro } q_6: F_{a,67} = FX_6 \cdot \sin \phi_{02} - FY_6 \cdot \cos \phi_{02} \quad (4.16)$$

$$\text{- membro } q_1: \begin{pmatrix} F_{a,89} \\ F_{f,89} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \phi_{01} & -\sin \phi_{01} \\ \sin \phi_{01} & -\cos \phi_{01} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} FX_8 \\ FY_8 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

$$\text{- membro } q_3: F_{a,1011} = - FX_{10} \cdot \cos \phi_{01} - FY_{10} \cdot \sin \phi_{01} \quad (4.18)$$

Os resultados da análise das forças encontram-se no Capítulo VII.

CAPÍTULO V

DESLOCAMENTOS NAS ARTICULAÇÕES5.1 - OBJETIVOS

Este Capítulo trata de uma análise dos deslocamentos elásticos nas articulações do braço e do antebraço causados pelo peso do objeto. Esta análise permite obter os deslocamentos de cada articulação em um plano (x,y) quando a garra segura o objeto. O modelo analítico desenvolvido neste capítulo considerou-se a deformação de flexão apenas ou axial separadamente para simplificar o problema em questão.

5.2 - ESTRATÉGIA PARA ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

Os deslocamentos nas articulações baseiam-se em,

1. deformação elástica nos membros
2. deslocamentos das articulações precedentes
3. deslocamentos influenciados pela relação geométrica

Chamando-se os vetores deslocamentos de cada item como e_I , e_{II} e e_{III} , os deslocamentos totais e_T de cada articulação pode ser escrito como,

$$(e_T)_i = (e_I + e_{II} + e_{III})_i \quad (5.1)$$

onde i é o índice de cada articulação. Mantendo as condições de que os deslocamentos sofridos em cada articulação são relativa-

mente pequenos em relação as dimensões geométricas dos membros, o material dos membros trabalha dentro do limite proporcional e admitindo que o efeito da força axial para a flexão nos membros é desprezível pode-se aplicar o princípio de superposição(12) como na equação 5.1.

O item 1. ocorre devido as forças existentes nos membros do braço e do antebraço. Portanto, os deslocamentos serão determinados primeiramente na direção da coordenada cartesiana (x', y') localizada em articulações pertencentes aos membros conforme a Figura 5.1. Posteriormente, estes deslocamentos serão transformados na direção das coordenadas (x, y) que são equivalentes as (x, y) da Figura 2.6.

O item 2. deve ser aplicado para as articulações 1, 2, 3, 6 e 7 devido aos deslocamentos sofridos nas articulações 4 e 8 pelo item 1., Figura 2.6.

Finalmente, o item 3. ocorre pela existência de placas de ligações as quais consideram-se como sendo corpos rígidos, isto é, devem manter as distâncias entre os centros das articulações pertencentes nestas placas. É importante notar que este tipo de deslocamento é uma consequência dos itens anteriores.

Os deslocamentos analisados neste Capítulo referem-se às coordenadas (x, y) da Figura 2.6 que são consideradas como coordenadas fixas, porém a experiência mostrou que há um

deslocamento desta referência. Os detalhes deste fato encontram-se no Capítulo VI e para comparar com os resultados experimentais acrescentou-se a influência dos deslocamentos da referência para os valores teóricos achados neste Capítulo.

5.3 - DEFORMAÇÃO ELÁSTICA NOS MEMBROS

As deformações nos membros se determinam, utilizando as seguintes fórmulas (11),

Para força axial apenas:

$$(e_a)_i = (F_a \cdot q)_i / A \cdot E \quad (5.2)$$

Para força de flexão:

$$(e_f)_i = (F_f \cdot q^3) / 3E \cdot I \quad (5.3)$$

onde,

e_a - deformação na direção do membro

e_f - deformação na direção perpendicular ao membro

F_a - força axial

F_f - força de flexão

q - comprimento de cada membro

A - área da seção transversal

I - momento de inércia da seção transversal

E - módulo de elasticidade

i - índice do membro

As influências de outros esforços como força cortante no membro ou a força axial junto com a força de flexão foram desprezadas devido a pouca contribuição no resultado final (12).

5.4 - TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

Considere um sistema de coordenadas cartesianas $(0', x', y')$ com origem localizada em uma determinada articulação e outro sistema cartesiano fixo $(0, x, y)$ equivalente ao da Figura 2.6 cuja direção forma um ângulo ϕ em relação ao anterior conforme a Figura 5.1.

O vetor deslocamento da articulação em questão pode ser escrito em $(e_a, e_f)^T$ para o sistema $(0', x', y')$ ou $(e_x, e_y)^T$ para o sistema $(0, x, y)$ e entre os dois vetores existe uma relação como,

$$\begin{pmatrix} e_a \\ e_f \end{pmatrix} = [M] \cdot \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

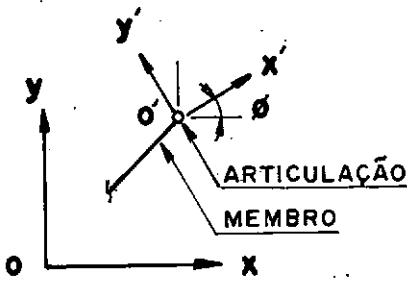


Fig. 5.1 - Princípio de rotação da coordenada

onde (M) é a matriz de rotação de duas dimensões e é definida por⁹,

$$(M) = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

É importante notar que a matriz (M) é a matriz ortogonal, ou seja $(M) = (M)^{-1}$, portanto,

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = (M) \cdot \begin{pmatrix} e_a \\ e_f \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Basicamente, para o protótipo, a matriz de rotação difere em cada posição do membro devido a mudança de ângulo de rotação ϕ , podendo se separar em três casos como na Figura 5.2.

E o vetor deslocamento devido à deformação do membro pode ser escrito em,

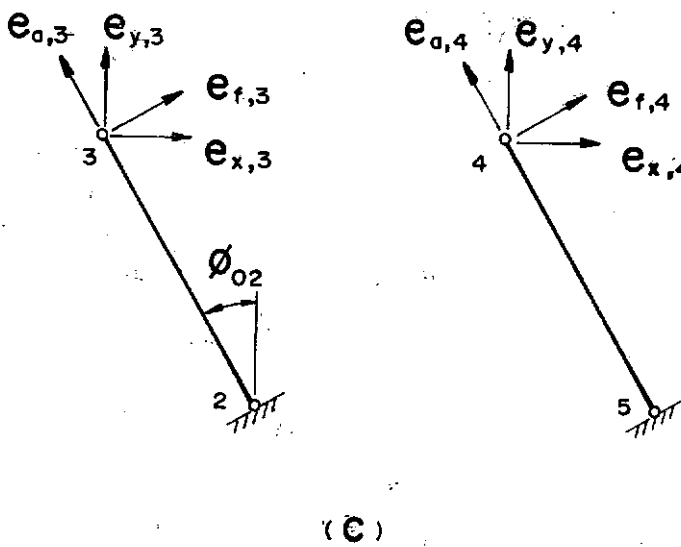
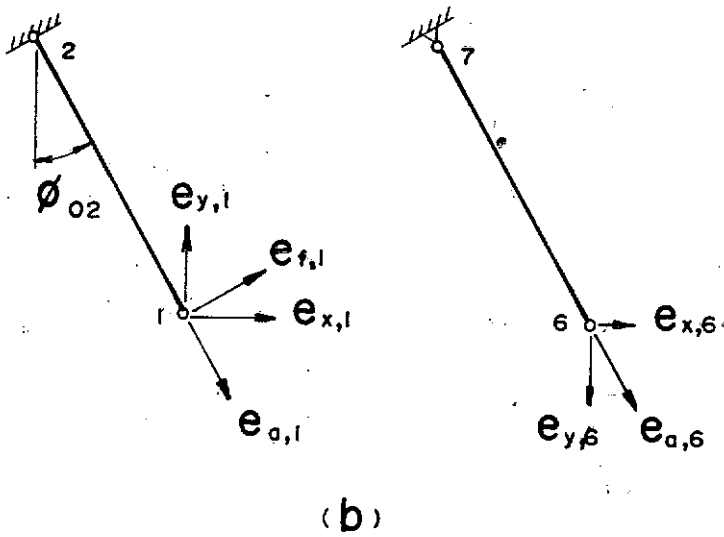
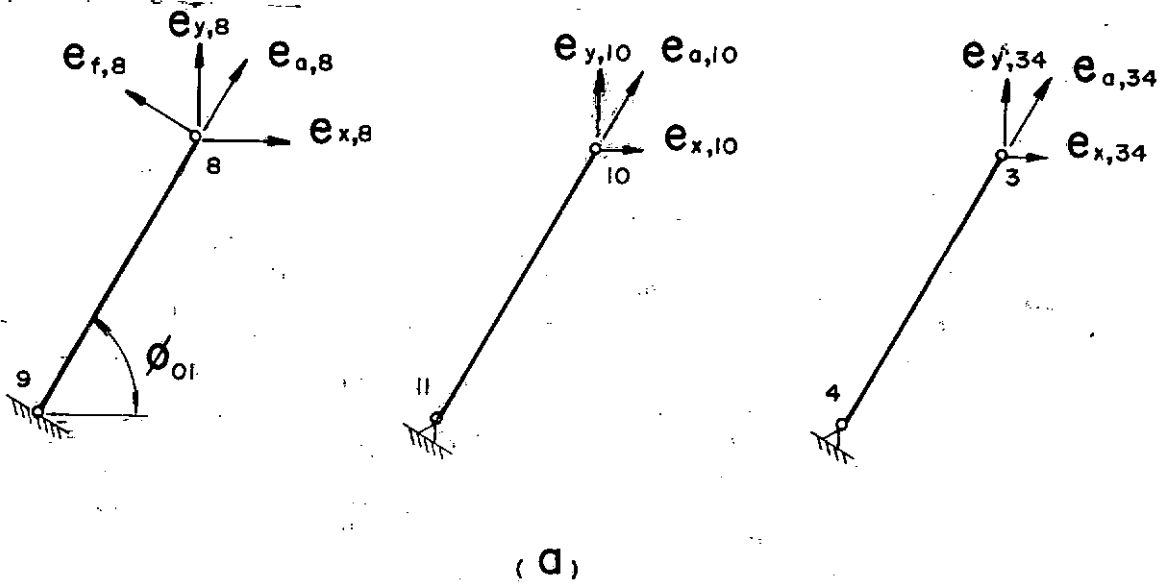


Fig. 5.2 - Rotação de coordenadas para vetor deformação

$$(e_I)_i = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}_i \quad (5.7)$$

onde i é o índice da articulação.

5.5 - DESLOCAMENTO INFLUENCIADO PELAS RELAÇÕES GEOMÉTRICAS

Devido aos deslocamentos por deformação elástica sofrida nas articulações 8 e 10, a placa de ligações 2a da Figura 3.1 sofre uma rotação, pois a deformação axial do membro q_3 em comparação com a deflexão no membro q_1 é pequena mesmo sendo transformado o vetor deslocamento em coordenadas (x, y) conforme a Figura 5.3a.

Definindo os vetores deslocamentos totais na direção x das articulações 8 e 10 como $(e_{T,x})_8$ e $(e_{T,x})_{10}$ respectivamente, o ângulo de rotação $\Delta\gamma_a$ em torno da articulação 10 pode ser escrito de acordo com a equação (5.8):

$$\Delta\gamma_a = \gamma' + \gamma - \pi/2 \quad (5.8)$$

onde,

$$\gamma' = \sin^{-1} \left(\frac{l_2 + (e_{T,x})_8 - (e_{T,x})_{10}}{l_4} \right) \quad (5.9)$$

Esta rotação da placa influi para os deslocamentos nas articulações 2 e 7 que pertence a esta placa, consequente

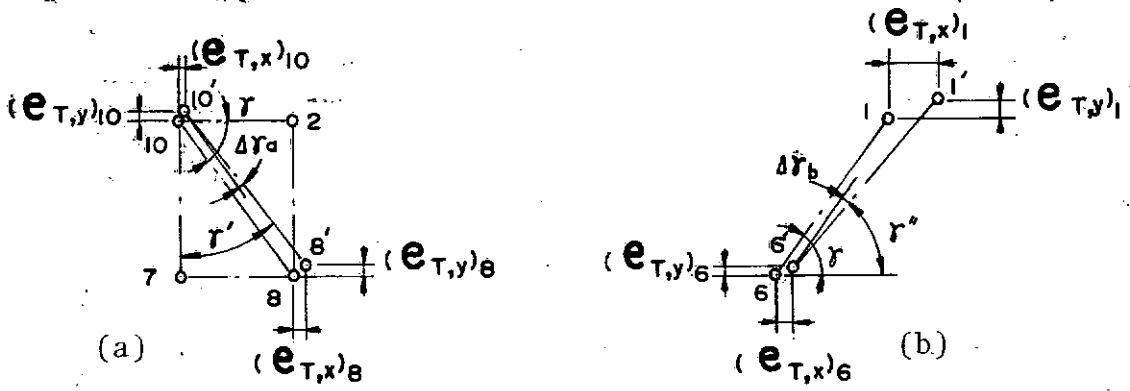


Fig. 5.3 - Rotação das placas devido aos deslocamentos nas articulações

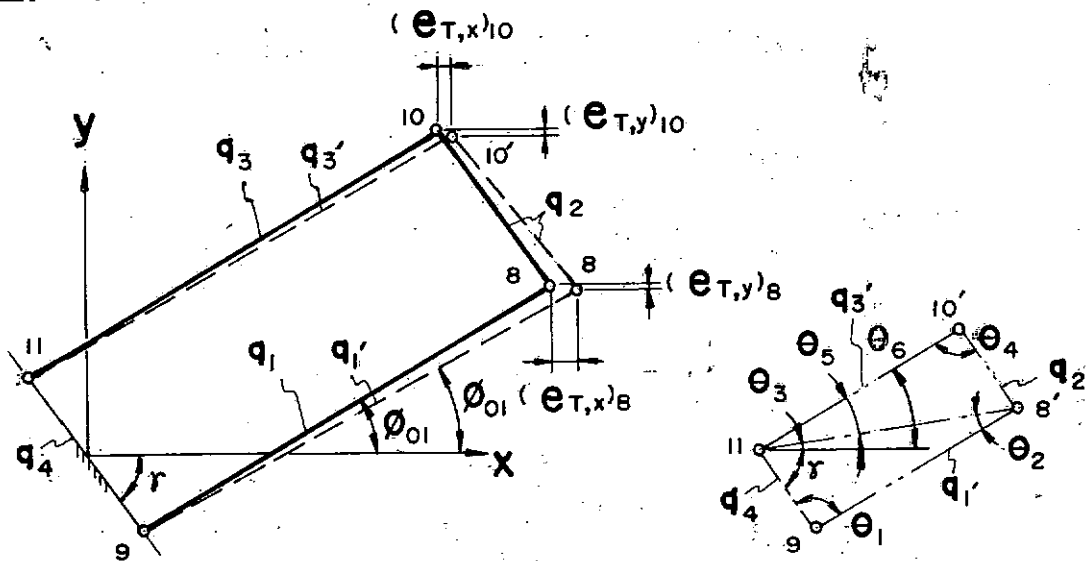


Fig. 5.4 - Deslocamento nas articulações 8 e 10

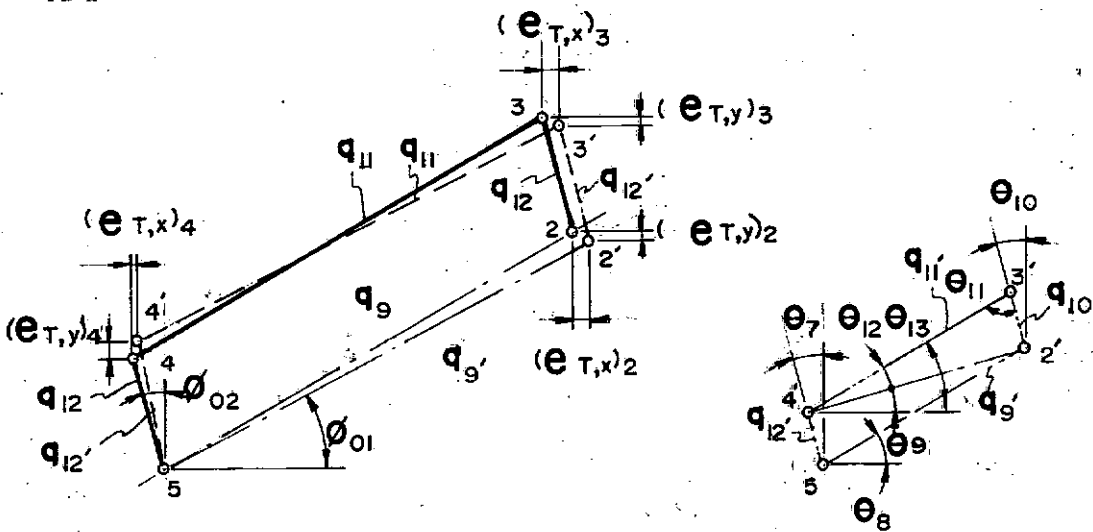


Fig. 5.5 - Deslocamento na articulação 3

temente para os deslocamentos 1, 3 e 6 os quais pertencem aos mesmos membros respectivamente.

Analogamente a placa de ligações 2b sofre uma rotação⁴ devido ao deslocamento das articulações 1 e 6 conforme a Figura 5.3b. Neste caso, o ângulo de rotação $\Delta\gamma_b$ da placa pode ser escrito pela equação 5.10, novamente considerando os valores deslocamentos totais na direção y das articulações 1 e 6 como $(e_{T,y})_1$ e $(e_{T,y})_6$ respectivamente,

$$\Delta\gamma_b = \gamma - \gamma'' \quad (5.10)$$

onde,

$$\gamma'' = \text{sen}^{-1} \left(\frac{l_3 + (e_{T,y})_1 - (e_{T,y})_6}{l_2} \right) \quad (5.11)$$

Esta rotação da placa provoca junto com os deslocamentos nas articulações 1 e 6, a imprecisão do manipulador pelo fato de que a mão mecânica é fixada nesta placa.

5.6 - DESLOCAMENTOS TOTAIS DAS ARTICULAÇÕES NAS DIREÇÕES (x, y)

Os deslocamentos totais para cada articulação determinam-se somando cada efeito individual descrito na seção 5.2.

A análise desta seção inicia-se partindo das articulações de referência (5, 9 e 11), as quais considera-se como imóveis nas coordenadas (x, y), razão pela qual os deslocamentos das articulações distantes das de referência devem considerar o efeito dos deslocamentos precedentes. Os vetores deslocamentos podem ser considerados apenas pela deformação elástica assim como,

$$\begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_5 = \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_9 = \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_{11} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

$$\begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_8 = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}_8$$

$$\begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_4 = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}_4 \quad (5.13)$$

onde,

$(e_{T,x})_i$ - vetor deslocamento total na direção x da articulação i

$(e_{T,y})_i$ - vetor deslocamento total na direção y da articulação i

$(e_x)_i$ - vetor deslocamento pela deformação elástica na direção x da articulação i

$(e_y)_i$ - vetor deslocamento pela deformação elástica na direção y da articulação i

Os deslocamentos totais para as outras articulações serão mostrados nas seções seguintes.

5.6.1 - Deslocamento Total na Articulação 10

O deslocamento total desta articulação é influenciado pelo deslocamento da articulação 8 (e_{III}) além do deslocamento pela deformação (e_I) devido ao membro q_2 da placa que é considerada como corpo rígido conforme a Figura 5.4. Portanto o vetor deslocamento total da articulação 10 pode ser escrito como:

$$\begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_{10} = \begin{pmatrix} e_{I,x} \\ e_{I,y} \end{pmatrix}_{10} + \begin{pmatrix} e_{III,x} \\ e_{III,y} \end{pmatrix}_{10}$$

$$= \begin{pmatrix} q'_3 \cos \theta_6 - q_3 \cdot \cos \phi_{01} \\ q'_3 \sin \theta_6 - q_3 \cdot \sin \phi_{01} \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

onde,

$$q'_3 = q_3 + e_{a,10}$$

$$\phi'_{01} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{q_1 \cdot \text{sen } \phi_{01} + (e_y)_8}{q_1 \cdot \text{cos } \phi_{01} + (e_x)_8} \right)$$

$$q'_1 = \frac{q_1 \cdot \text{sen } \phi_{01} + (e_y)_8}{\text{sen } \phi'_{01}}$$

$$\theta_1 = \pi - (\gamma + \phi'_{01})$$

$$a = (q_1'^2 + q_4^2 - 2q_1' \cdot q_4 \cdot \text{cos } \theta_1)^{1/2} \quad (5.15)$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(q_4 \cdot \text{sen } \phi_1/a)$$

$$\theta_3 = \phi'_{01} - \theta_2$$

$$\theta_4 = \text{cos}^{-1} \left(\frac{-a^2 + q_2^2 + q_3'^2}{2q_2 \cdot q_3'} \right)$$

$$\theta_5 = \text{sen}^{-1}(q_2 \cdot \text{sen } \theta_4/a)$$

$$\theta_6 = \theta_3 + \theta_5$$

5.6.2 - Deslocamento Total nas Articulações 2 e 7

Como estas articulações pertencem a placa 2a deve-se considerar os efeitos dos deslocamentos das articulações precedentes (8 e 10) e pela relação geométrica, ou seja, a rotação da placa 2a conforme a Figura 5.3a. Portanto os vetores

deslocamentos totais das articulações 2 e 7 ficam,

$$\begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} e_{II,x} \\ e_{II,y} \end{pmatrix}_8 + \begin{pmatrix} e_{III,x} \\ e_{III,y} \end{pmatrix}_2$$

$$= \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}_8 + \begin{pmatrix} -l_3 \cdot \sin \Delta\gamma \\ l_3 \cdot (\cos \Delta\gamma - 1) \end{pmatrix} \quad (5.16)$$

$$\begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_7 = \begin{pmatrix} e_{II,x} \\ e_{II,y} \end{pmatrix}_{10} + \begin{pmatrix} e_{III,x} \\ e_{III,y} \end{pmatrix}_7$$

$$= \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}_{10} + \begin{pmatrix} l_3 \cdot \sin \Delta\gamma \\ l_3 \cdot (1 - \cos \Delta\gamma) \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

5.6.3 - Deslocamento Total na Articulação 3

A articulação 3 sofre além do deslocamento pela deformação (e_I), um deslocamento precedente (e_{II}) causado pelo deslocamento da articulação 2, que pertence ao mesmo membro e ainda mais um deslocamento (e_{III}) causado pela relação geométrica devido à necessidade de manter uma posição geométrica da articulação 4 através do membro q_{11} conforme a Figura 5.5.

Portanto, o vetor deslocamento da articulação 3 fica,

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_3 &= \begin{pmatrix} e_{I,x} \\ e_{I,y} \end{pmatrix}_3 + \begin{pmatrix} e_{II,x} \\ e_{II,y} \end{pmatrix}_2 + \begin{pmatrix} e_{III,x} \\ e_{III,y} \end{pmatrix}_3 \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & - \sin \theta_7 \\ \sin \theta_{13} & \cos \theta_7 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q'_{11} \\ q'_{12} \end{pmatrix} \\
 &\quad - \begin{pmatrix} \cos \phi_{01} & - \sin \phi_{02} \\ \sin \phi_{01} & \cos \phi_{02} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q_{11} \\ q_{12} \end{pmatrix} \tag{5.18}
 \end{aligned}$$

onde,

$$\theta_7 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{q_{12} \cdot \operatorname{sen} \phi_{02} - (e_{T,x})_4}{q_{12} \cdot \cos \phi_{02} + (e_{T,y})_4} \right)$$

$$q'_{12} = [q_{12} \cdot \operatorname{sen} \phi_{02} - (e_{T,x})_4] / \operatorname{sen} \theta_7$$

$$q'_{11} = q_{11} + e_{a,34}$$

$$\theta_8 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{q_9 \cdot \operatorname{sen} \phi_{01} + (e_{T,y})_2}{q_9 \cdot \cos \phi_{01} + (e_{T,x})_2} \right)$$

$$q'_9 = [q_9 \cdot \operatorname{sen} \phi_{01} + (e_{T,y})_2] / \operatorname{sen} \theta_8$$

$$\theta_9 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{q'_9 \cdot \operatorname{sen} \theta_8 - q'_{12} \cdot \cos \theta_7}{q'_9 \cdot \cos \theta_8 + q'_{12} \cdot \operatorname{sen} \theta_7} \right) \quad (5.19)$$

$$d = (q'_9 \cdot \operatorname{sen} \theta_8 - q'_{12} \cdot \cos \theta_7) / \operatorname{sen} \theta_9$$

$$\theta_{10} = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{q_{10} \cdot \operatorname{sen} \phi_{02} - (e_{T,x})_3}{q_{10} \cdot \cos \phi_{02} + (e_{T,y})_3} \right)$$

$$\theta_{11} = \cos^{-1} [(-d^2 + q_{10}^2 + q_{11}^2) / 2q'_{10} \cdot q'_{11}]$$

$$\theta_{12} = \operatorname{sen}^{-1} (q'_{10} \cdot \operatorname{sen} \theta_{11} / d)$$

$$\theta_{13} = \theta_9 + \theta_{12}$$

5.6.4 - Deslocamento Total nas Articulações 1 e 6

Analogamente como no caso da articulação 3, estas articulações sofrem os três efeitos, isto é, deve-se considerar a influência dos deslocamentos das articulações 2 e 7 (e_{II}) para as articulações 1 e 6 respectivamente e a influência da rotação da placa 2a (e_{III}) conforme a Figura 5.6.

Os vetores destas articulações ficam,

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_1 &= \begin{pmatrix} e_{I,x} \\ e_{I,y} \end{pmatrix}_1 + \begin{pmatrix} e_{II,x} \\ e_{II,y} \end{pmatrix}_2 + \begin{pmatrix} e_{III,x} \\ e_{III,y} \end{pmatrix}_1 \\
 &= \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix}_1 + \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_2 + q_8 \cdot \begin{pmatrix} \sin(\phi_{02} + \Delta\gamma) - \sin \phi_{02} \\ \cos \phi_{02} - \cos(\phi_{02} + \Delta\gamma) \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_6 &= \begin{pmatrix} e_{I,x} \\ e_{I,y} \end{pmatrix}_6 + \begin{pmatrix} e_{II,x} \\ e_{II,y} \end{pmatrix}_7 + \begin{pmatrix} e_{III,x} \\ e_{III,y} \end{pmatrix}_1 \\
 &= \begin{pmatrix} e_{T,x} \\ e_{T,y} \end{pmatrix}_7 + \begin{pmatrix} \cos(\theta_{15} + \theta_{17}) - \sin \phi_{02} \\ \sin(\theta_{15} + \theta_{17}) \quad \cos \phi_{02} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} q'_6 \\ q'_6 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

(5.20)

onde,

$$\theta_{14} = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{q_8 \cdot \operatorname{sen}(\phi_{02} + \Delta\gamma) + (e_x)_1}{q_8 \cdot \cos(\phi_{02} + \Delta\gamma) - (e_y)_1} \right]$$

$$q'_8 = \{ [q_8 \cdot \operatorname{sen}(\phi_{02} + \Delta\gamma) + (e_x)_1]^2 + [q_8 \cdot \cos(\phi_{02} + \Delta\gamma) - (e_y)_1]^2 \}^{1/2}$$

$$g = q'_8 \cdot \operatorname{sen} \theta_{14} + \{ l_2 + [(e_{T,x})_2 - (e_{T,x})_7] \}$$

$$h = q'_8 \cdot \cos \theta_{14} - \{ l_3 + [(e_{T,y})_2 - (e_{T,y})_7] \}$$

$$k = (g^2 + h^2)^{1/2}$$

$$\theta_{15} = \operatorname{tg}^{-1}(h/g)$$

$$q'_6 = q_6 + e_{a,6}$$

$$\theta_{16} = \cos^{-1} [(-k^2 + q'^2_6 + q^2_7)/2q'_6 \cdot q_7]$$

$$\theta_{17} = \operatorname{sen}^{-1}(q_7 \cdot \operatorname{sen} \theta_{15}/k) \quad (5.21)$$

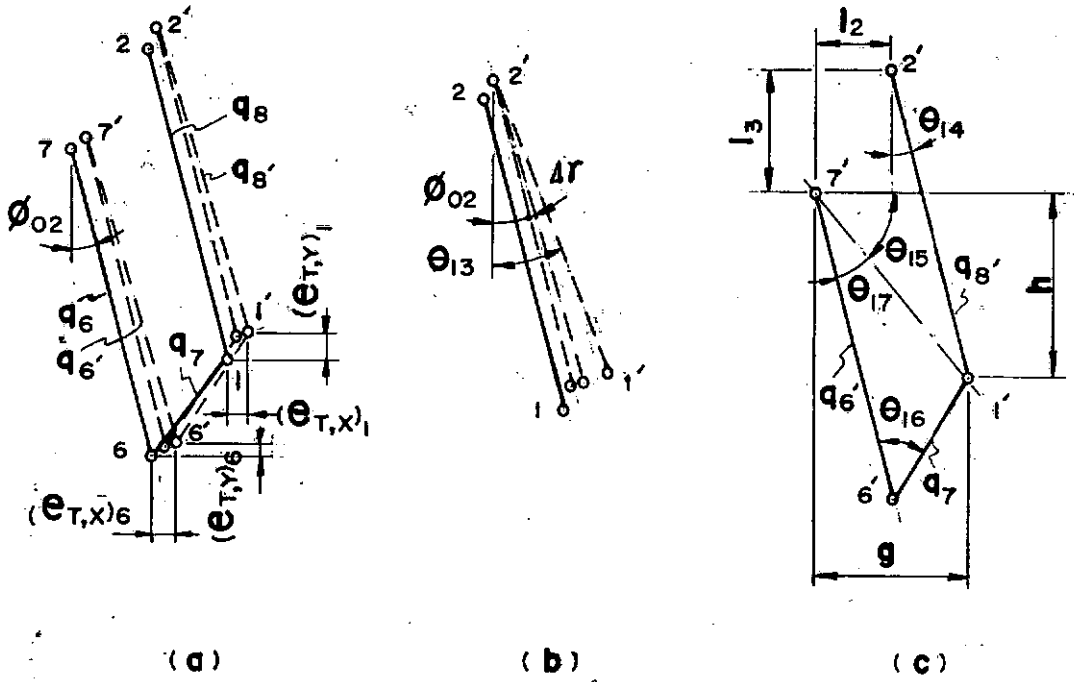


Fig. 5.6 - Deslocamento nas articulações 1 e 6

O resultado da análise deste Capítulo encontra-se na forma de gráfico no Capítulo VII, considerando como já referido no início deste Capítulo a influência dos deslocamentos das articulações de referência.

CAPÍTULO VI

MEDIDAS DE DESLOCAMENTO

6.1 - OBJETIVOS

Este Capítulo trata dos equipamentos e dispositivos utilizados para as medidas de deslocamento do protótipo e as descrições das medidas, mostrando também as condições tomadas durante as medidas.

As medidas consistem basicamente de quatro etapas. A primeira etapa é a medida de rotação das placas de ligações (2a e 2b da Figura 2.6). A segunda é a medida de deslocamento no centro da garra da mão mecânica (isolando do braço mecânico), apesar de não ter feito uma análise teórica do deslocamento da mesma sua característica para a influência no deslocamento é importante. A terceira é a medida de deslocamento no centro das articulações 1 e 2 do antebraço. A última etapa é a medida do deslocamento das articulações de referência (5, 9 e 11).

As séries de medidas foram realizadas no Laboratório de Dinâmica das Máquinas da COPPE.

6.2 - EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS

6.2.1 - Conjunto de Relógio Comparador

Dois relógios comparadores foram utilizados. Um com a variação de 0,01 - 10mm para as medidas verticais e outro de 0,001 - 1 mm para as medidas horizontais, pois os deslocamentos neste sentido são menores.

Cada relógio comparador foi montado num dispositivo de regulagem de posicionamento com o qual consegue-se mudar as posições do relógio sempre com a mesma força exercida na ponto do mesmo.

A fixação do relógio comparador para este conjunto foi feita por parafuso, mantendo o eixo do relógio paralelo em relação a base do conjunto. Este nivelamento foi feito utilizando o nivelador JENA com a precisão de $\pm 0,1$ mm/metro. Na Figura 6.1 mostra-se este conjunto que foi montado na mesa de posicionamento a qual encontra-se descrita na seção 6.2.3 .

6.2.2 - Sensor de Contato

Este sensor consiste de um LED vermelho, duas pilhas de 1,5 volts e a ponta de contato que foi fixada no conjunto de relógio comparador. A sua finalidade é obter medidas mais precisas ou seja aplicação da força de contato da ponta do relógio sempre constante. O funcionamento do sensor é simples, pois o LED vermelho acende ao contato da ponta com o ponto a ser medido conforme a figura 6.2 .

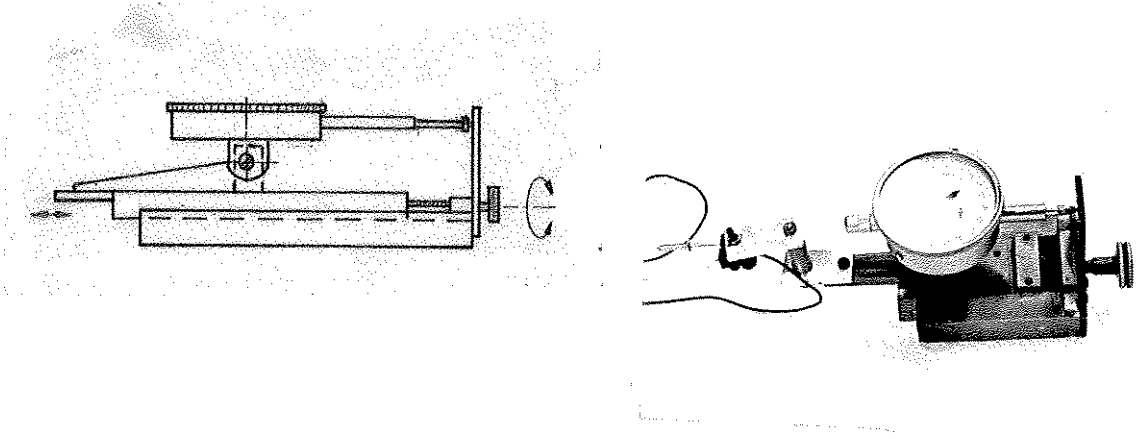


Fig. 6.1 - Conjunto de relógio comparador

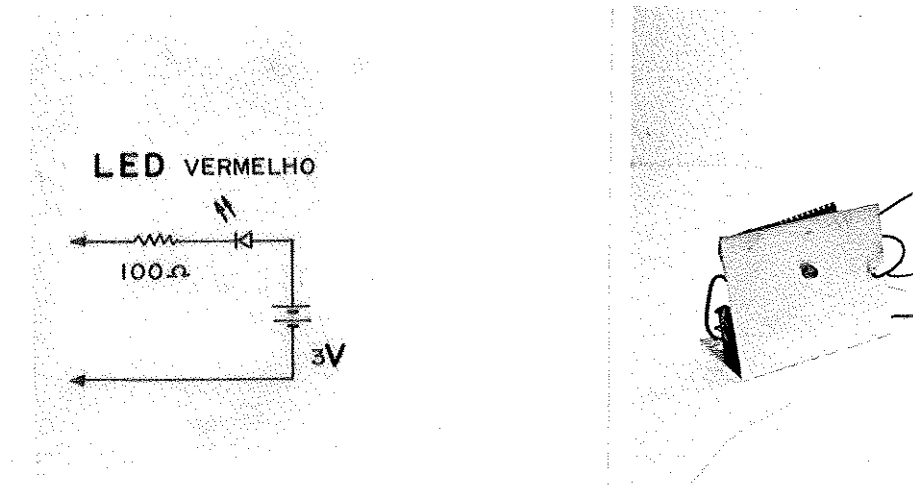


Fig. 6.2 - Sensor de contato

6.2.3 - Mesa de Posicionamento

Esta mesa possui cinco graus de liberdade conforme a Figura 6.3. O conjunto de relógio comparador foi fixado no suporte montado na coluna da mesa. A base da mesa foi nivelada horizontalmente e nesta posição ela foi fixada para garantir as mesmas condições de medidas.

6.3 - MONTAGEM DA EXPERIÊNCIA

Ao realizar a série de medidas o manipulador foi fixado na base da mesa de posicionamento conforme a Figura 6.4 e nesta figura mostra-se também a fixação do conjunto de relógio comparador na mesa..

Para as medidas de deslocamento da mão mecânica isolada precisou-se fixar a placa 2b da Figura 2.6 através dos espaçadores na base da mesa a fim de evitar a influência do deslocamento do braço mecânico.

Para minimizar os erros de medidas na direção horizontal o eixo do relógio comparador foi colocado paralelo ao eixo central (eixo x da Figura 2.7) do manipulador.

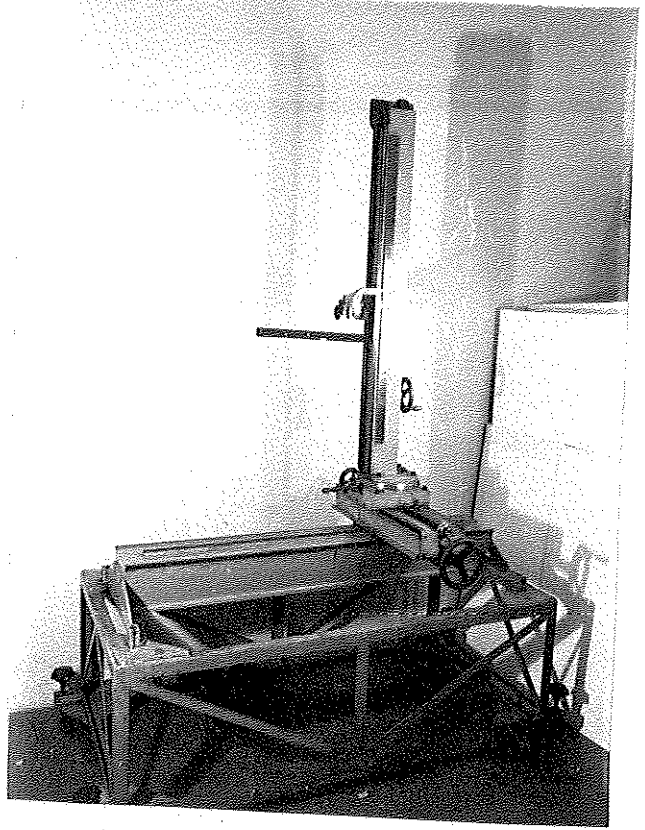
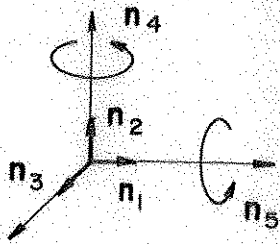


Fig. 6.3 - Mesa de posicionamento

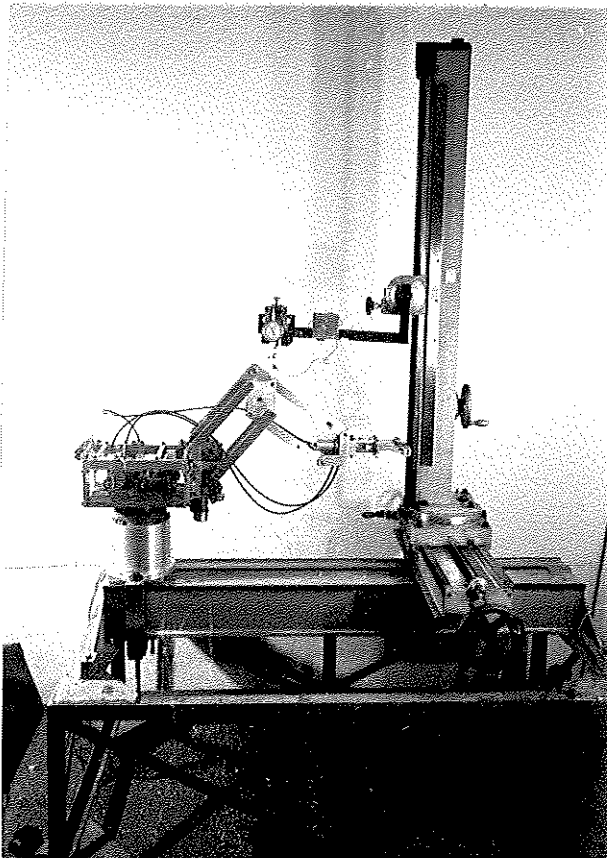


Fig. 6.4 - Montagem da experiência

6.4 - MEDIDAS DE ROTAÇÃO DAS PLACAS DE LIGAÇÕES

Os ângulos de rotação das placas foram calculados através das medidas de deslocamento horizontal dos pontos pertencentes às placas conforme a Figura 6.5, onde o ponto "a" é o ponto de referência e o ponto "b" é o ponto a ser medido.

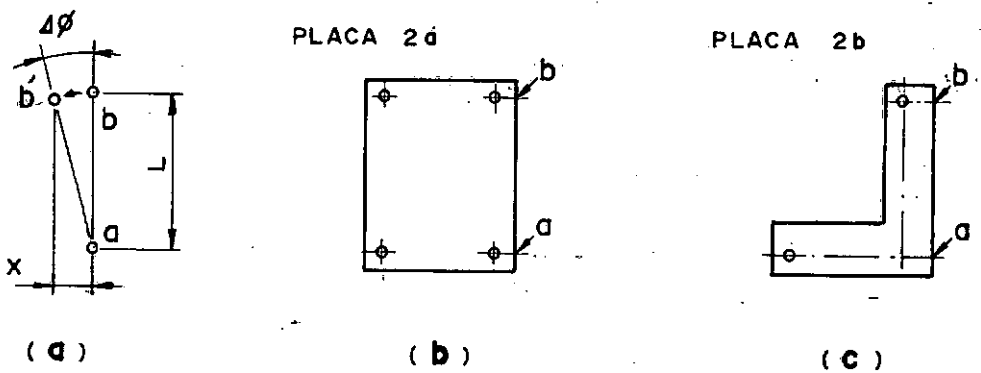


Fig. 6.5 - Medidas de rotação nas placas

A experiência foi realizada variando os ângulos de posição do braço ϕ_{01} e do antebraço ϕ_{02} para as placas 2a e 2b respectivamente com a faixa de variação de $0^\circ - 90^\circ$ e $20^\circ - 90^\circ$ (intervalo de 15° e 10°), pois na placa 2a houve influência apenas de ϕ_{01} e na placa 2b de ϕ_{01} e ϕ_{02} . Entretanto, fixou-se o ângulo ϕ_{01} em 60° durante as medidas do ângulo de rotação da placa 2b.

Como o objetivo da experiência é a medida de variação do ângulo $\Delta\phi$ das placas, na garra da mão mecânica não foi aplicado o peso durante a obtenção de medidas.

- Rotina da Experiência

- a) Para cada ângulo pré-determinado posicionou-se o braço, calibrando com o transferidor.
- b) Encostando a ponta do conjunto de relógio comparador no ponto de referência, deslocou-se esta ponta verticalmente até o ponto a ser medido.
- c) Deslocou-se a ponta na direção horizontal até novamente encostar na placa, verificando pelo sensor de contato, sendo registrado este deslocamento.
- d) Repetiu-se a rotina, variando os ângulos de posição.

Dentro de uma série de medidas com os ângulos de posição diferente (0° , 15° , ..., 75° , 90° para a placa 2a e 20° , 30° , ..., 80° , 90° para a placa 2b) foram repetidos 5 vezes para cada ângulo.

6.5 - MEDIDAS DE DESLOCAMENTO PARA A MÃO MECÂNICA ISOLADA

Na mão mecânica existem quatro fatores que poderão influenciar às medidas de deslocamento tais como:

- a) Peso aplicado no centro da garra
- b) Variação de ângulo do pulso

c) Folga (nas articulações e no mancal do pulso)

d) Variação de abertura da garra

Entretanto, para facilitar as medidas a abertura da garra foi fixada para o caso mais crítico, ou seja a abertura mínima cujo deslocamento correspondente seja máximo. Esta abertura (16 mm) foi mantida através de uma barra sextavada com extremidade cilíndrica mostrada na Figura 6.6 para todas as medidas posteriores.

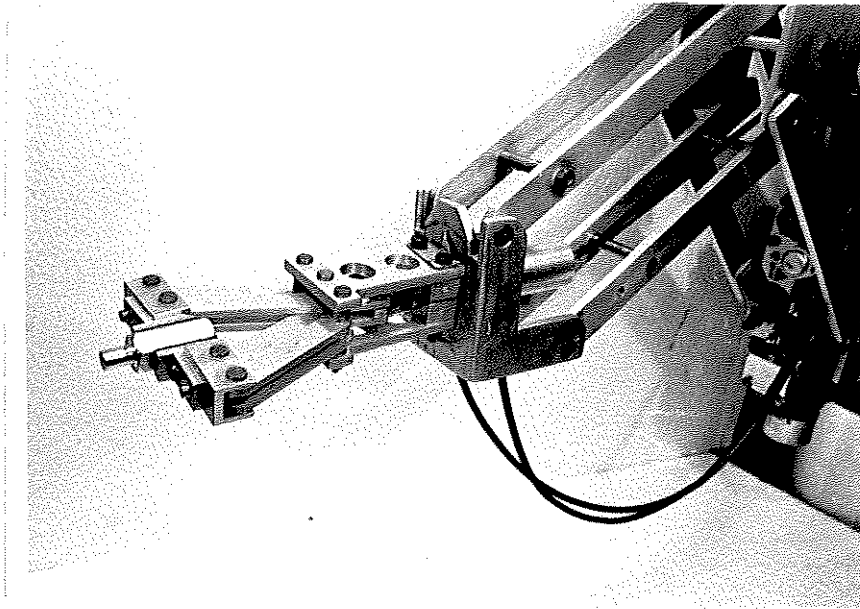


Fig. 6.6 - Barra sextavada na mão mecânica

6.5.1 - Medidas de Deslocamento com a Variação de Peso

O objetivo da experiência é conhecer apenas a influência do peso aplicado no deslocamento nas direções horizontal e vertical numa determinada posição da mão mecânica. Por esta razão, outros fatores que influirão nas medidas foram fixa-

das, como,

- O ângulo de pulso foi mantido em zero grau ou seja a garra permanece na posição horizontal.
- Antes de iniciar as medidas, foi colocado um peso compensador na garra para anular o efeito da folga.
- A abertura da garra, como foi descrito anteriormente foi mantida em 16 mm.

- Rotina da Experiência

- a) Antes de aplicar o peso na garra, verificou-se que a ponta do conjunto de relógio comparador estava encostada na barra sextavada. Feito isto, zerou-se o relógio comparador.
- b) Aplicou-se lentamente o peso pré-calibrado na parte cilíndrica da barra sextavada para garantir a condição estática.
- c) Deslocou-se a ponta na direção horizontal ou vertical dependendo do deslocamento a ser medido até novamente a ponta encontrar-se na barra, verificando pelo sensor de contato e registrando este deslocamento.
- d) Repetiu-se a rotina, variando o peso aplicado.

Dentro de uma série de medidas com 5 pesos diferentes (0,21; 0,38; 0,57; 0,74; 0,97 (kgf)) foram repetidas 5 vezes para cada peso.

6.5.2 - Medidas de Deslocamento com a Variação de Ângulo do Pulso

Devido a pequena variação do deslocamento detectada na direção horizontal, as medições foram realizadas apenas na direção vertical. As condições estabelecidas para as medições foram iguais as das seções 6.5.1.

Para o posicionamento da garra, um marcador de ângulo foi fixado na placa 2b da Figura 2.6 e um indicador no suporte da garra conforme a Figura 6.7. A variação de ângulo foi realizada, considerando a posição horizontal da garra como início da variação e a posição vertical como final da variação no sentido indicado na Figura 6.7.

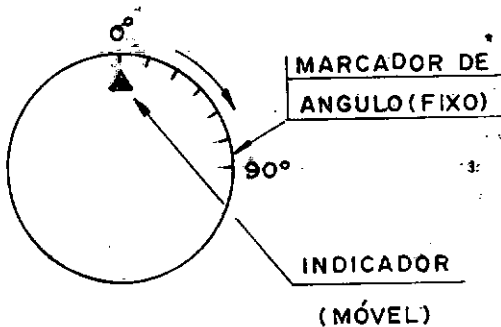


Fig. 6.7 - Marcador de ângulo e seu indicador

- Rotina da Experiência

A rotina é idêntica à da seção 6.5.1, variando apenas as posições da garra, de horizontal até vertical, com intervalos de 15 graus.

Dentro de uma série de medidas com 4 pesos diferentes (0,38; 0,57; 0,74; 0,97 (kgf)) foram repetidas 5 vezes para cada peso.

6.5.3 - Medidas de Deslocamento com Folga

As folgas nas articulações e no mancal do pulso influenciam as medidas de deslocamento. Para saber esta influência mudou-se o sentido de aplicação do peso em relação as experiências anteriores. Aproveitou-se esta experiência também para medir os deslocamentos no sentido oposto ao das medidas feitas na seção 6.5.1.

Ao aplicar a força na garra no sentido para cima, utilizou-se um conjunto de polia fixado na base da mesa de posicionamento como na Figura 6.8.

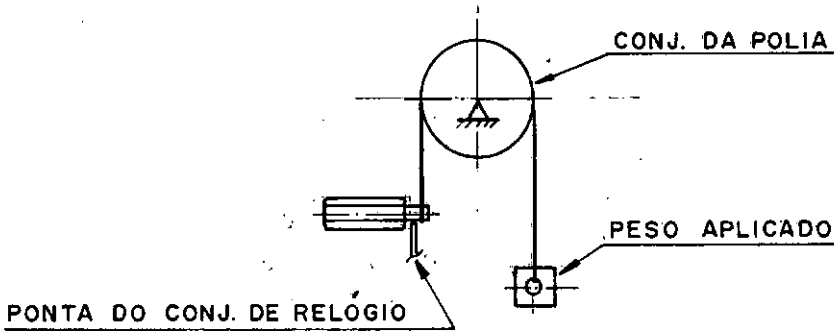


Fig. 6.8 - Esquema para aplicação de força na garra para medidas de deslocamento com folga

- Rotina da Experiência

A rotina é idêntica a da seção 6.5.1, porém para cada medida necessitou-se um peso compensador para retornar à posição inicial, pois após a retirada do peso a posição da garra voltou-se para baixo mas não para a posição inicial devido à folga existente já referida. Este deslocamento de volta foi registrado a fim de comparação com os resultados obtidos na seção 6.5.1.

É importante notar que a folga registrada nesta experiência pode existir tanto para cima quanto para baixo dependendo da última força aplicada na garra.

6.6 - MEDIDAS DE DESLOCAMENTO NAS ARTICULAÇÕES DO ANTEBRAÇO

A experiência foi realizada para obter as medidas de deslocamento no centro das articulações 1, 2, 4 e 10 com os ângulos de posições (ϕ_{01}, ϕ_{02}) em $(0^{\circ}, 60^{\circ})$ e $(45^{\circ}, 45^{\circ})$.

Durante a experiência foi mantida a posição da garra na horizontal e a abertura da garra como em todas as experiências anteriores.

- Rotina da Experiência

Antes de iniciar as medidas, os ângulos de posições ϕ_{01} e ϕ_{02} foram ajustados de acordo com a escolha feita anteriormente. As demais rotinas foram idênticas a experiência da seção 6.5.1, porém logicamente os pontos a serem medidos são os centros do pino de cada articulação (1, 2, 4 e 10).

Dentro de uma série de medidas com 6 pesos diferentes (0,11; 0,21; 0,38; 0,57; 0,74; 0,97 (kgf)) foram repetidas 5 vezes para cada peso.

6.7 - MEDIDAS DO DESLOCAMENTO DA REFERÊNCIA

Durante as experiências de medidas do deslocamentos das seções 6.5 e 6.6 detectou-se os deslocamentos dos pontos da referência considerados imóveis no cálculo teórico de deslocamento. Por esta razão, a experiência foi realizada para

o mesmo peso aplicado nas experiências referidas anteriormente. Portanto a rotina da experiência é idêntica a das seções 6.5 e 6.6.

CAPÍTULO VII

RESULTADOS

Este Capítulo contém os resultados teóricos desenvolvidos no Capítulo III, IV e V e dos experimentais descritos no Capítulo VI. Estes resultados encontram-se na forma de gráficos e tabelas. Todas as tabelas citadas neste Capítulo encontram-se no Apêndice C.

Os dados de dimensões geométricas utilizadas para cálculo teórico são equivalentes aos do protótipo desenvolvido neste trabalho.

Os cálculos foram feitos no computador Burroughs B6700 do NCE da UFRJ.

A análise dos resultados teóricos - experimentais encontra-se no Capítulo VIII a fim de verificar a consistência dos mesmos.

7.1 - RESULTADOS TEÓRICOS

7.1.1 - Rotação das Placas de Ligações

Os dados utilizados para os cálculos teóricos são:

- Para os comprimentos de cada membro do braço e do antebraço

$$q_1 = q_3 = q_6 = q_8 = q_9 = q_{11} = 250 \text{ (mm)}$$

$$q_2 = q_4 = q_5 = q_7 = 100 \text{ (mm)}$$

$$q_{10} = q_{12} = 60 \text{ (mm)}$$

- Para as tolerâncias dos comprimentos de cada membro

$$\Delta q_i = 1,0 \text{ (mm)}, i = 1, 2, \dots, 12$$

- Para os ângulos

$$\gamma = \alpha = \phi_2 = \phi_3 = 53.13(^{\circ})$$

$$\phi_1 = 126,87 (^{\circ})$$

$$0 < \phi_{01} < \pi/2$$

$$0 < \phi_{02} < \pi/2$$

A razão de adotar a mesma tolerância para cada membro é para conhecer a contribuição dela na rotação das placas, conseqüentemente quando uma delas for adotada as outras serão nulas.

A Figura 7.1 mostra o ângulo de rotação da placa 2a provocado pela variação do ângulo de posição ϕ_{01} devido às

Curva I: causado por Δq_1

Curva II: causado por Δq_2

Curva III: causado por Δq_4

Curva IV: causado por Δq_3

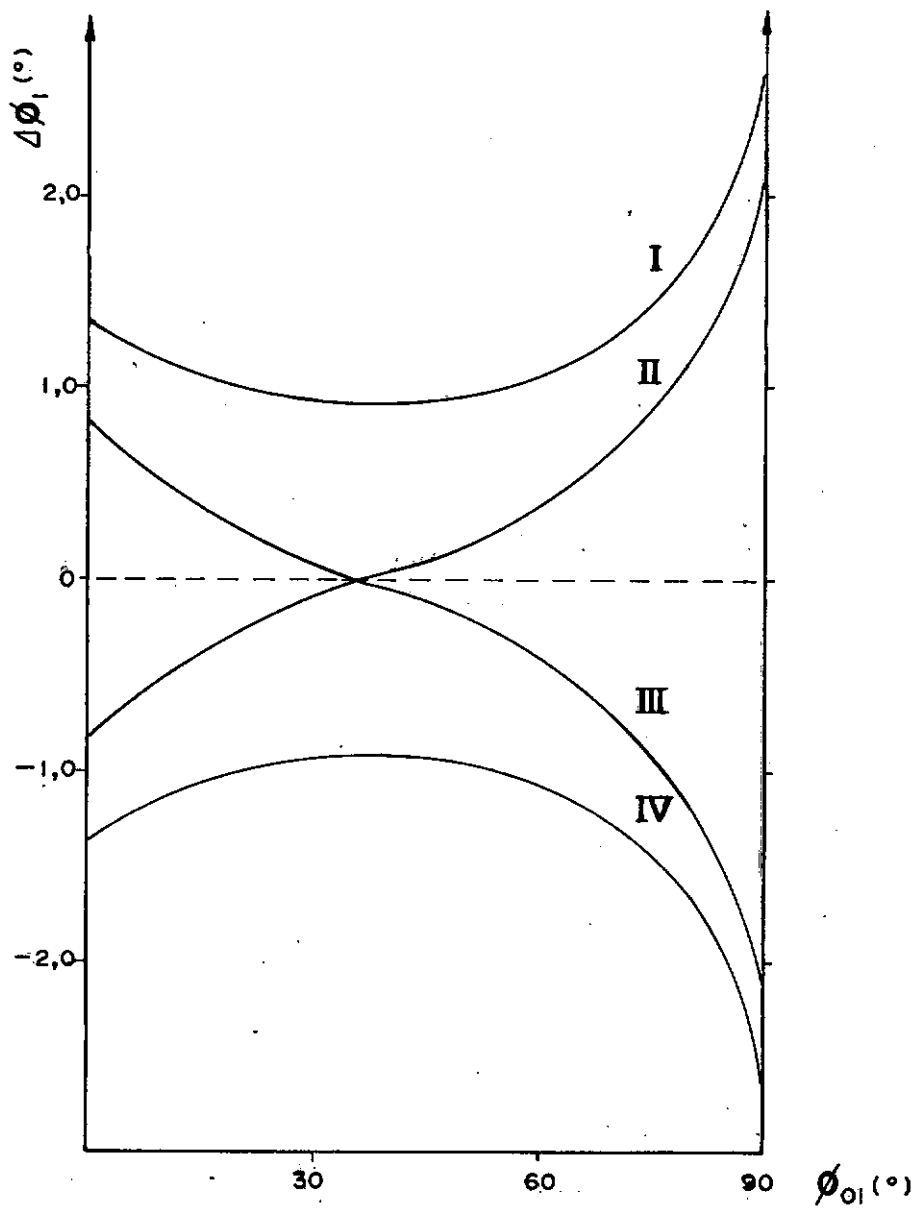


Fig. 7.1 - Rotação da placa 2a com a variação de ϕ_{01}

tolerâncias permitidas nos membros q_1 , q_2 , q_3 e q_4 . Como se vê na figura, a rotação da placa pode ser anulada pela simetria do ângulo de rotação causado por Δq_1 , Δq_2 , e Δq_3 , Δq_4 . Porém, se existisse apenas Δq_1 , Δq_2 ou Δq_3 , Δq_4 para $\phi_{01} = 90^\circ$ a rotação terá seu valor máximo. É importante frisar que próximo de $\phi_{01} = 36^\circ$ a rotação é mínima, isto é, uma operação próxima deste ângulo de posição terá precisão maior para posicionamento quando as tolerâncias do membro forem distribuídas num dos lados de Δq_1 , Δq_2 ou Δq_3 , Δq_4 .

A Figura 7.2 mostra o ângulo de rotação da placa 2b provocada pela variação do ângulo de posição ϕ_{01} (fixando o ângulo ϕ_{02} em 0°) devido às tolerâncias nos membros q_3 , q_4 , q_6 e q_7 . As curvas de Δq_1 , Δq_2 e Δq_5 , Δq_8 são simétricas às curvas de Δq_3 , Δq_4 e Δq_6 , Δq_7 respectivamente em relação a linha $\Delta \phi_2 = 0$, por esta razão não foram mostradas nesta figura para evitar a confusão das curvas. Da figura, pode-se notar que o ângulo ótimo para obter melhor precisão no posicionamento não é mais $\phi_{01} = 36^\circ$ como na Figura 7.1, mas na faixa de $36^\circ \leq \phi_{01} \leq 54^\circ$.

A Figura 7.3 mostra o ângulo de rotação da placa 2b provocada pela variação do ângulo de posição ϕ_{02} (fixando o ângulo ϕ_{01} em 60°) devido às tolerâncias nos membros q_5 , q_6 , q_7 e q_8 . Na figura não aparecem as curvas de rotação causadas por Δq_8 , ..., Δq_{12} devido a suas influências desprezíveis. Percebe-se na figura que o ângulo $\phi_{02} = 90^\circ$ não é crítico como as figuras anteriores mostraram para $\phi_{01} = 90^\circ$.

Curva I: causado por Δq_3 Curva V: causado por Δq_6
 Curva II: causado por Δq_4 curva VI: causado por Δq_7
 Curva III: causado por Δq_5 curva VII: causado por Δq_5
 Curva IV: causado por Δq_7 curva VIII: causado por Δq_8

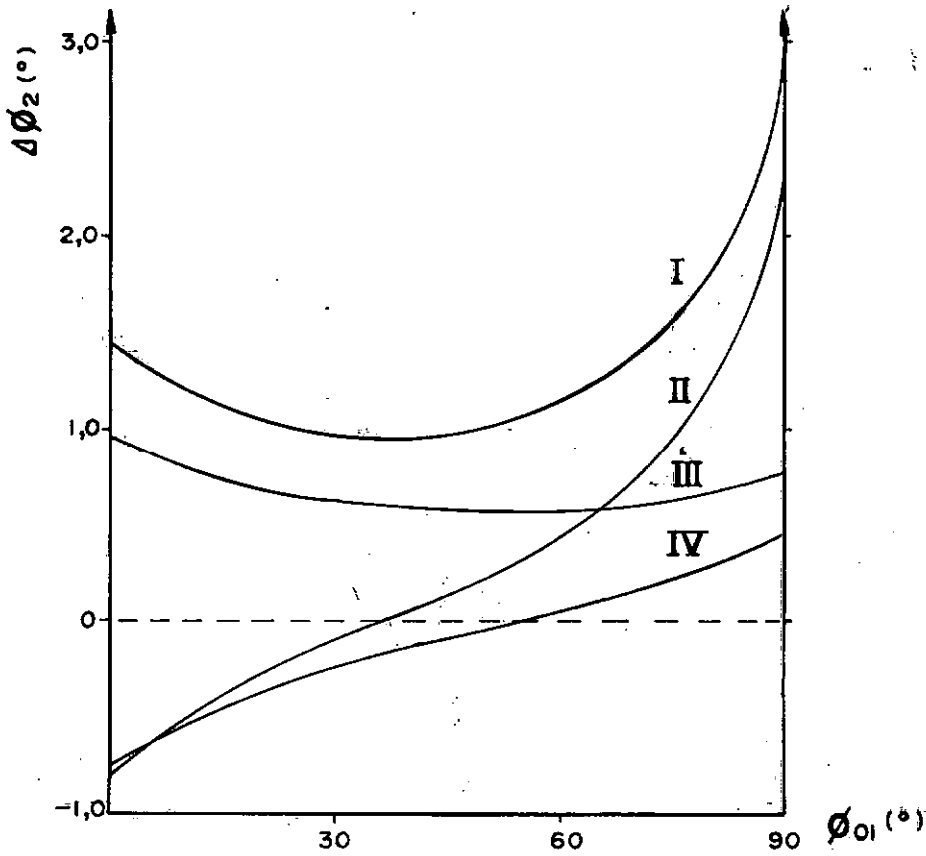


Fig. 7.2 - Rotação da placa 2b com a variação de ϕ_{01} (ϕ_{02} fixo em 0°)

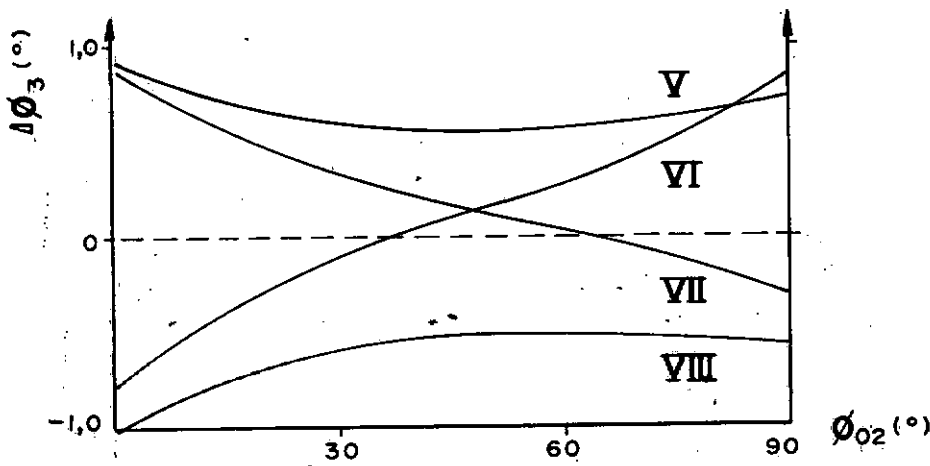


Fig. 7.3 - Rotação da placa 2b com a variação de ϕ_{02} (ϕ_{01} fixo em 60°)

7.1.2 - Análise das Forças

Considerou-se os dados de comprimento para cada membro iguais ao da seção 7.1 e a abertura da garra em 16 mm de acordo com a experiência.

Na Figura 7.4 mostra os resultados da força atuante na articulação 2, que por sua vez é a maior força atuante em relação as outras articulações, com a variação do ângulo de posição ϕ_{02} em $0 \leq \phi_{02} \leq \pi/2$ para ϕ_{01} em 5° , 45° , 85° e peso aplicado na garra 0,97 kgf. A curva I da figura mostra que para ϕ_{02} próximo de 90° a força atuante na articulação 2 torna-se infinita, pois o ângulo entre o braço e o antebraço (ângulo ϕ da Figura 2.6) torna-se nulo. Devido a este fato o ângulo entre o braço e o antebraço foi limitado em $\phi < \pi/6$ como descrito na seção 2.3.2 do Capítulo II.

7.1.3 - Deslocamento nas Articulações

Utilizou-se como dados os resultados da força atuante nas articulações da seção 7.1.2 para cálculo de deslocamento, considerando os demais dados como:

$$A = 162,56 \text{ mm}$$

$$I = 8.739,77 \text{ mm}^4$$

$$E = 7.000 \text{ kgf/mm}^2$$

Curva I: $\phi_{01} = 5^{\circ}$
 Curva II: $\phi_{01} = 45^{\circ}$
 Curva III: $\phi_{01} = 85^{\circ}$

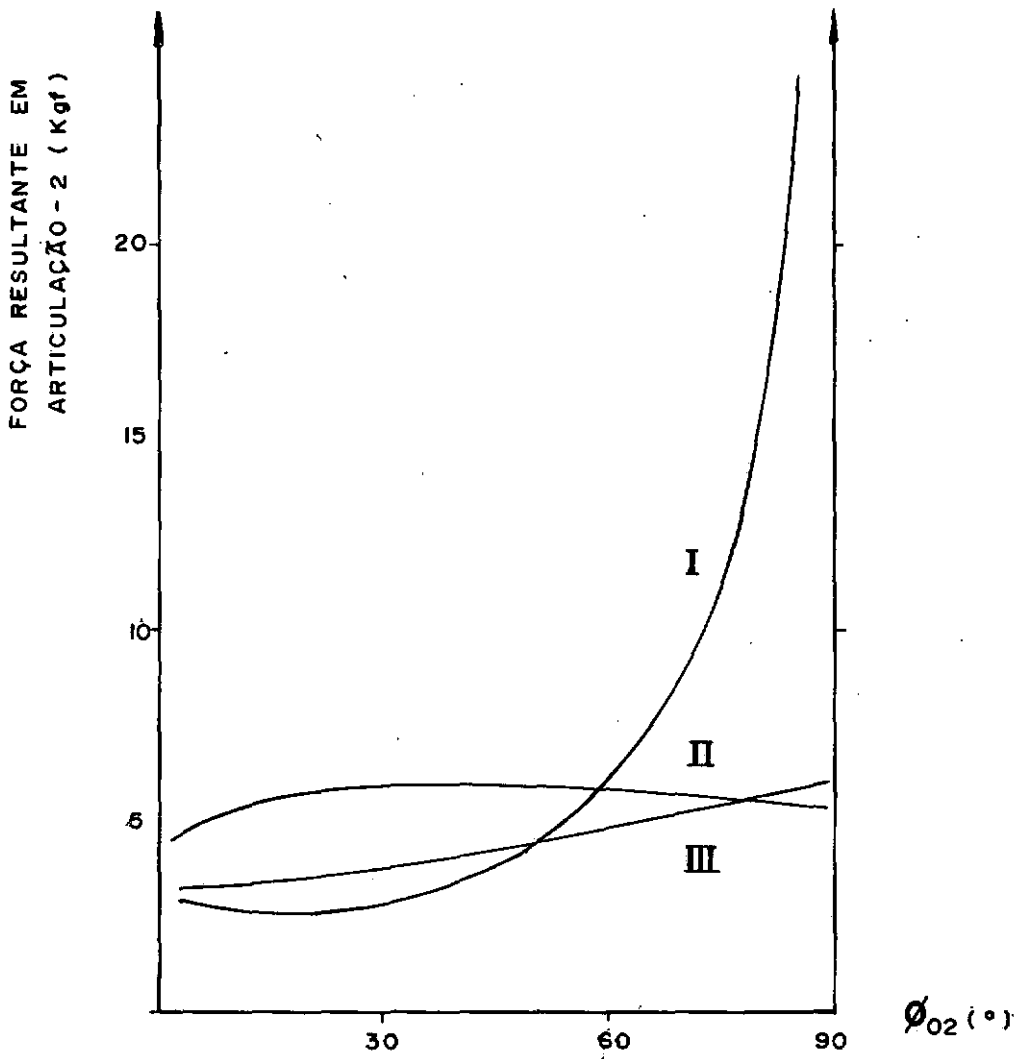


Fig. 7.4 - Força resultante na articulação 2a com a variação de ϕ_{02} para $\phi_{01} = 5^{\circ}, 45^{\circ}, 85^{\circ}$ e peso de 0,97 (kgf)

de acordo com a simbologia utilizada no Capítulo V.

Na Figura 7.5 mostra-se os resultados de deslocamento horizontal e vertical da articulação 1 para o ângulo de posição ϕ_{01} em 0° e 45° com os pesos aplicados na garra (0,21; 0,38; 0,57; 0,74; 0,97 (kgf)) conforme os pesos aplicados na experiência. Os valores positivos da figura indicam os deslocamentos no sentido da seta indicada dos eixos de coordenadas (x, y) da Figura 2.7. A escolha da articulação 1 para esta análise é por questão geométrica, ou seja, ela situa-se mais distante da referência, portanto sofre as consequências de deslocamentos de outras articulações precedentes.

Como se vê na figura, os deslocamentos horizontais convergem em um determinado ângulo ϕ_{02} , para $\phi_{01} = 0^\circ$ em aproximadamente 72° e para $\phi_{02} = 45^\circ$ em 28° , e este ângulo de posição ϕ_{02} tem seu deslocamento correspondente quase nulo. Portanto, se importasse somente o posicionamento na direção horizontal bastaria procurar este ângulo de posição para obter melhor precisão do mesmo. Entretanto, para o caso comum de posicionamento necessita-se de sua precisão tanto na direção vertical quanto na direção horizontal. Novamente da figura, os deslocamentos verticais aumentam à medida que o ângulo de posição ϕ_{02} cresce, portanto o deslocamento resultante $\sqrt{x^2 + y^2}$ não converge mais como no caso de deslocamentos horizontais.

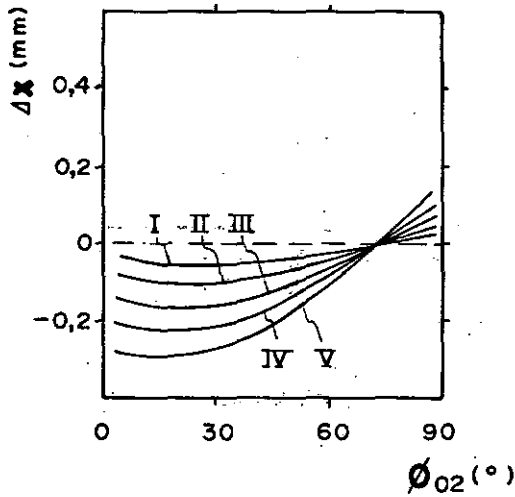
Curva I: peso = 0,21 (kgf)

Curva II: peso = 0,38 (kgf)

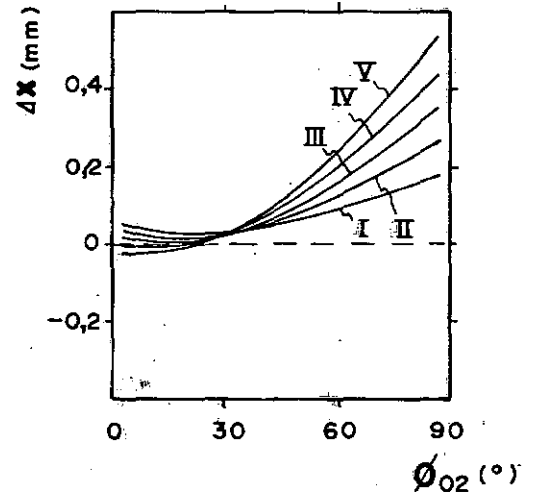
Curva III: peso = 0,57 (kgf)

Curva IV: peso = 0,74 (kgf)

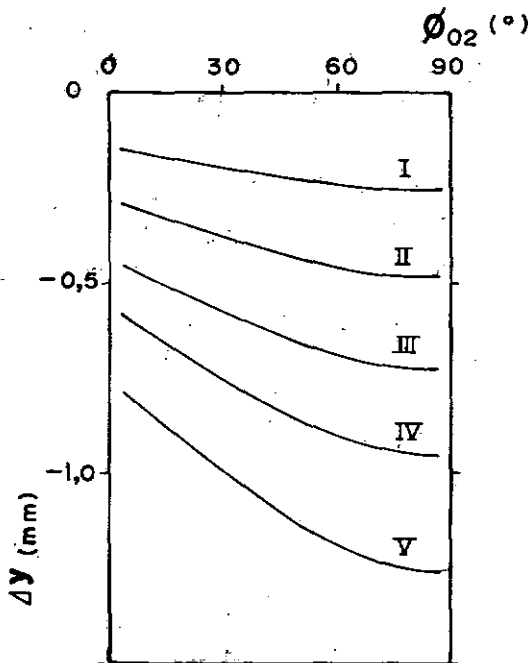
Curva V: peso = 0,97 (kgf)



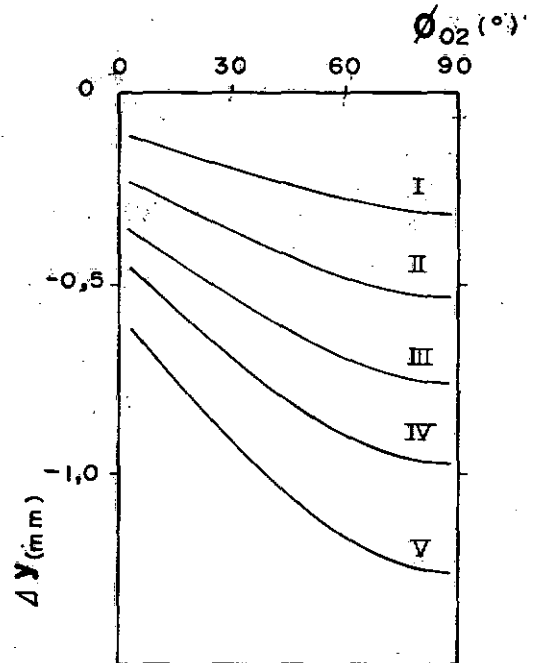
(a) PARA $\phi_{01} = 0^\circ$



(c) PARA $\phi_{01} = 45^\circ$



(b) PARA $\phi_{01} = 0^\circ$



(d) PARA $\phi_{01} = 45^\circ$

Fig. 7.5 - Deslocamento na articulação 1 nas direções x, y com a variação de ϕ_{02} para $\phi_{01} = 0^\circ, 45^\circ$ e pesos de (0,21; 0,38; 0,57; 0,74; 0,97 kgf)

7.2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

7.2.1 - Rotação das Placas de Ligações

Na Tabela C.1 mostra-se os resultados do deslocamento horizontal do ponto a ser medido pertencentes a placa 2a com a variação do ângulo de posição ϕ_{01} e como descrito na seção 6.4 o ângulo de rotação $\Delta\phi_{01}$ foi calculado por:

$$\Delta\phi_{01} = \Delta\bar{x}/l \quad (7.1)$$

Onde a distância vertical entre o ponto de referência e o ponto a ser medido (l) é tomado em 80 mm.

Na Tabela C.2 mostra-se os resultados dos deslocamentos horizontais do ponto a ser medido pertencente a placa 2b com a variação do ângulo de posição ϕ_{02} em 60° , fixando ϕ_{01} . Analogamente na Tabela C.1 o valor do ângulo de rotação foi calculado pela equação 7.1 .

Apresentando estas duas tabelas vê-se na Figura 7.6, os seus valores plotados conjuntamente. Da figura note-se que a placa 2a tem o ângulo de rotação sempre crescente a medida que aumenta ϕ_{01} enquanto a placa 2b apresenta o ângulo de rotação quase estático com a variação de ϕ_{02} . Porém, a rotação da placa 2a influencia diretamente para a rotação da placa 2b através dos membros ligados entre elas. Por esta razão pode-se dizer que a placa 2b tem seu ângulo de rotação sempre crescente

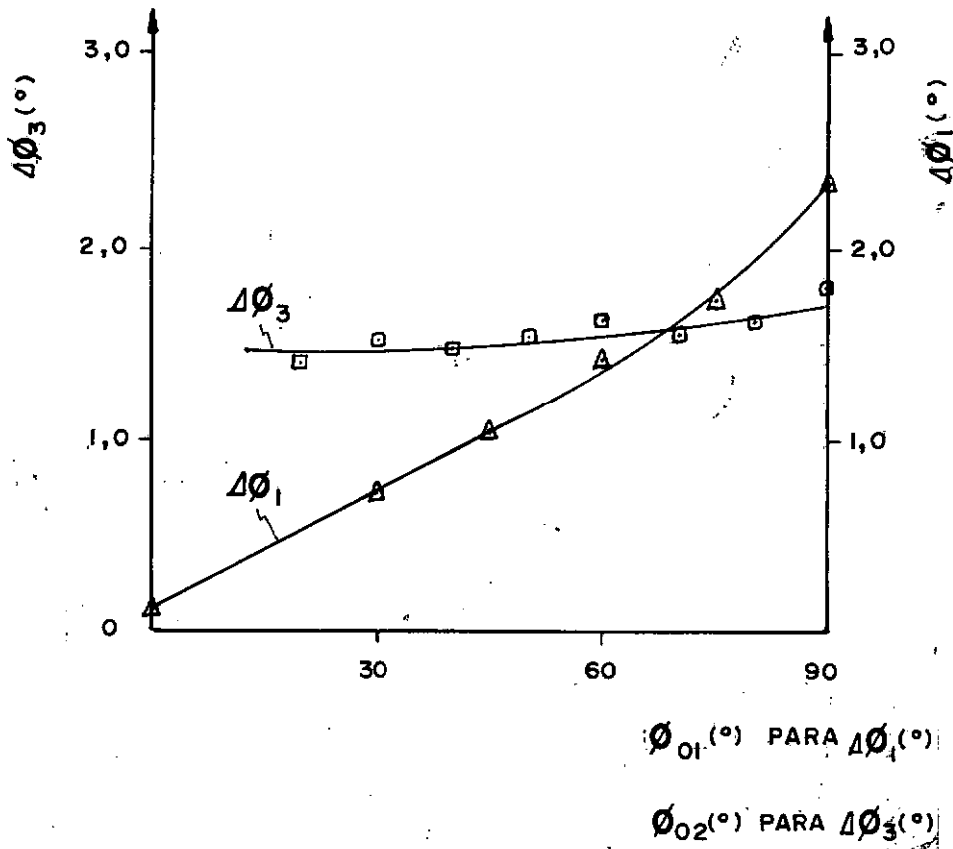


Fig. 7.6 - Resultados de rotação das placas (2a e 2b) com a variação de ϕ_{01} e ϕ_{02} respectivamente

com o aumento de ϕ_{01} , independente da variação ϕ_{02} .

7.2.2 - Deslocamento da Mão Mecânica Isolada

Os valores positivos dos resultados de deslocamento indicam que o deslocamento coincide com o sentido indicado na seta da Figura 2.7.

7.2.2.1 - Deslocamento em (x, y) com a Variação do Peso

Na Figura 7.7 (Tabela C.3) mostra-se os deslocamentos do centro da garra nas direções (x,y) quando é aplicado um determinado peso no mesmo. Na figura não se mostrou a influência da folga nas articulações o que em geral a estrutura articulada apresenta através de um cruzamento da curva com o eixo de ordenadas. Devido ao peso da mão mecânica esta folga fica eliminada.

7.2.2.2 - Deslocamento Vertical com a Variação do ângulo de Pulso

Na Figura 7.8 (Tabela C.4) mostra-se os deslocamentos do centro da garra na direção vertical com a variação do ângulo de pulso para os pesos aplicados de (0,38; 0,57; 0,74; 0,97 (kgf)). Da figura nota-se que há uma diminuição do deslocamento em aproximadamente 30% a 45% com o aumento do ângulo de pulso (de horizontal para vertical). Esta tendência vem devido à alteração do momento de inércia da seção transversal (I) dos

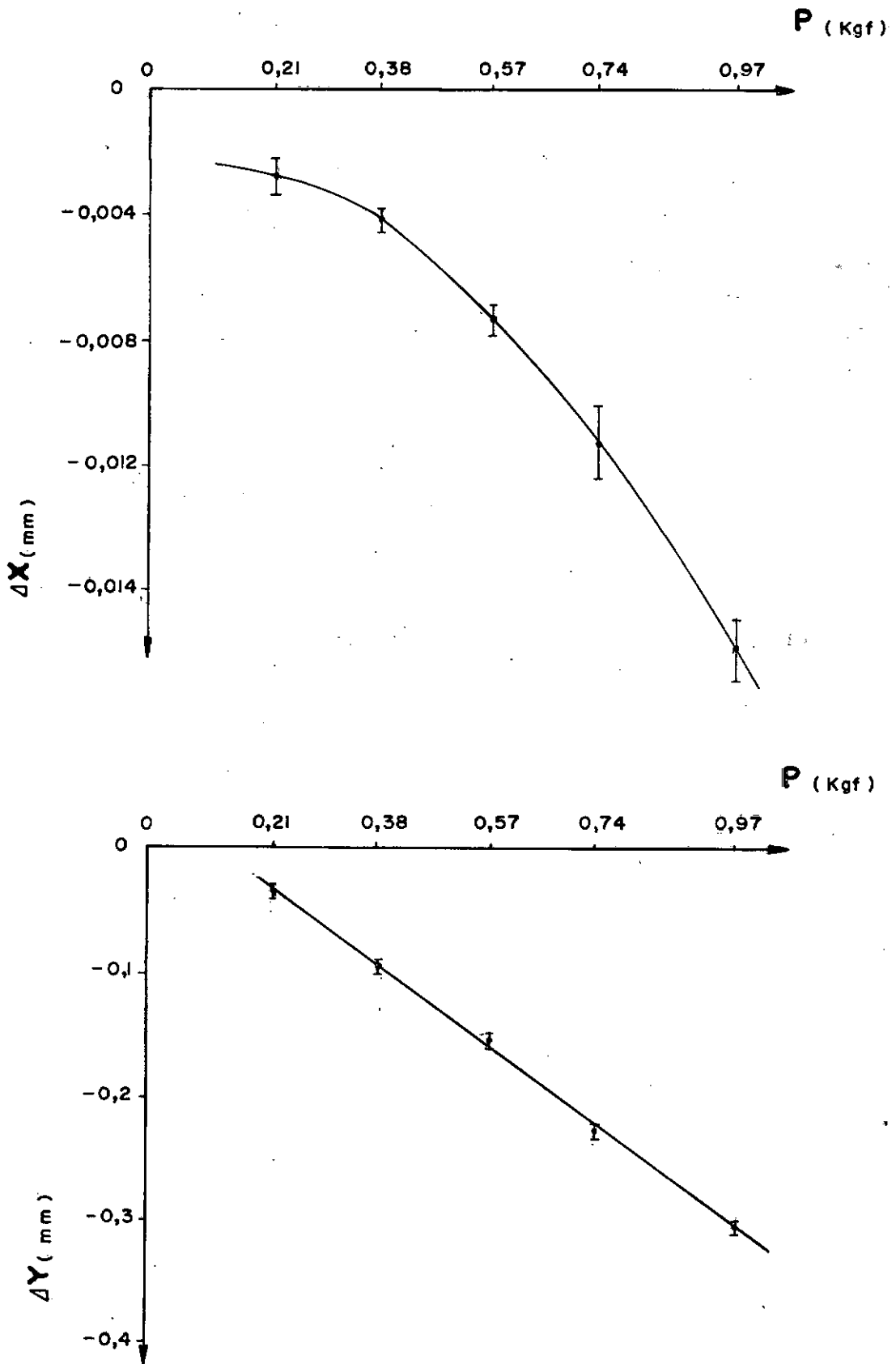


Fig. 7.7 - Resultados dos deslocamentos nas direções (x, y) da mão mecânica com a variação do peso aplicado

Curva I: peso = 0,38 (kgf)

Curva II: peso = 0,57 (kgf)

Curva III: peso = 0,74 (kgf)

Curva IV: peso = 0,97 (kgf)

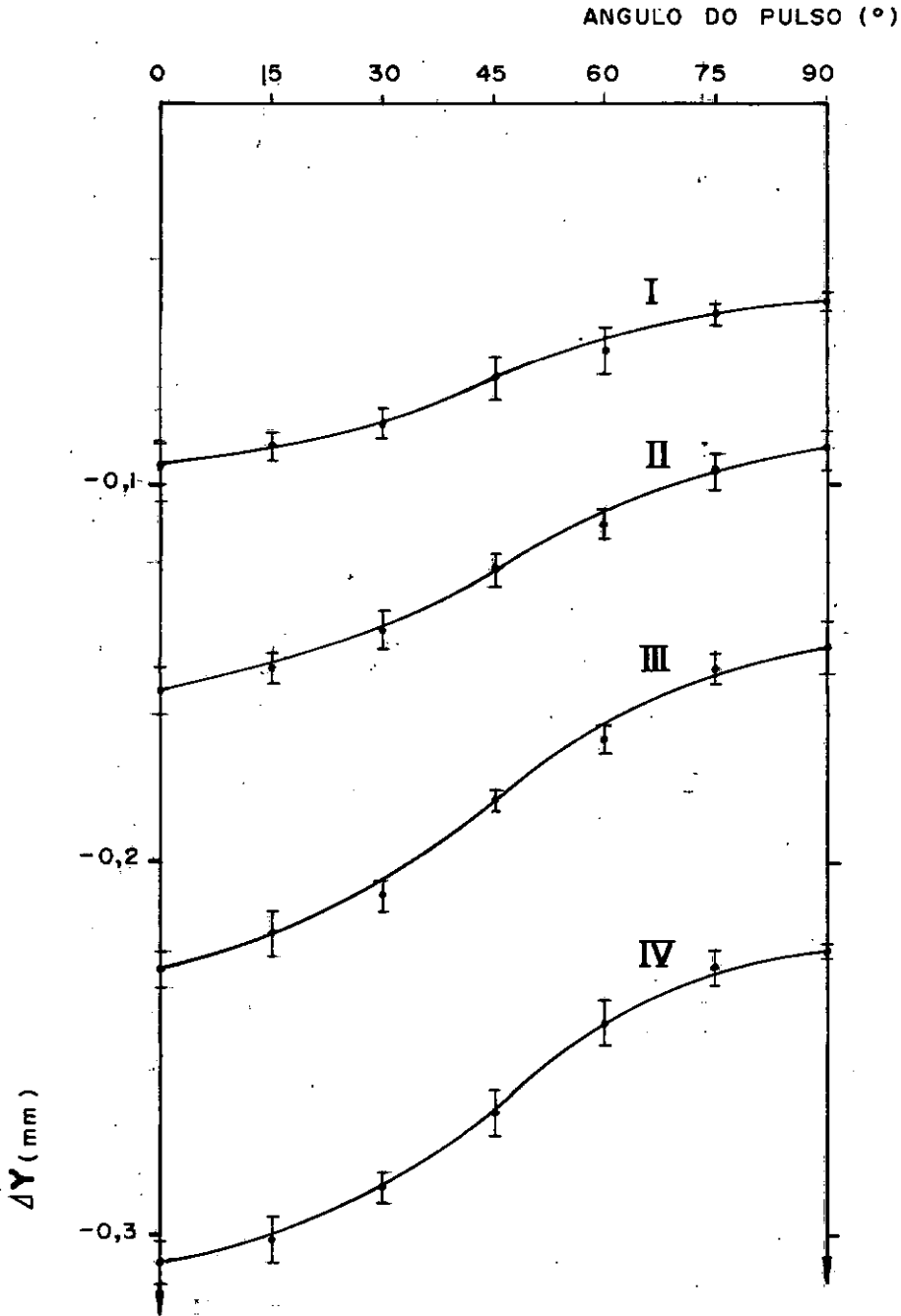


Fig. 7.8 - Resultados dos deslocamentos na direção "y" da mão mecânica com a variação do ângulo de pulso

membros da mão mecânica o qual aumenta seu valor a medida que o ângulo do pulso cresce, razão pela qual a construção do protótipo.

7.2.2.3 - Deslocamento Vertical com Folga

Na Figura 7.9 (Tabela C.5) mostra-se os deslocamentos do centro da garra na direção vertical causado por folga nas articulações e no mancal do pulso com a variação do peso, para a posição da garra horizontal. As folgas podem atuar tanto para cima quanto para baixo dependendo da última força aplicada, como foi descrito no Capítulo VI, por esta razão a curva de folga foi traçada para os dois sentidos de deslocamento conforme a figura. Devido à tensão de montagem existente nas articulações dos membros os deslocamentos por folga variam como função do peso aplicado, pois se não existisse esta tensão os deslocamentos teriam seu valor constante, isto é, independente do peso. É importante frisar também que os deslocamentos totais a serem considerados são a soma da curva da folga com a da sem folga como mostrado na curva III da figura em questão.

7.2.3 - Deslocamento em (x, y) nas Articulações do Braço e do Antebraço

A Figura 7.10 (Tabela C.6) e a Figura 7.11 (Tabela C.7) mostram os deslocamentos do centro das articulações 1, 2, 4, 10 e 11 na direção horizontal e vertical com a variação do peso aplicado para os ângulos de posições (ϕ_{01} , ϕ_{02}) em

○ = curva do deslocamento vertical (curva I)

□ = curva de folga (curva II)

● = curva de deslocamento vertical total (curva I + curva II)

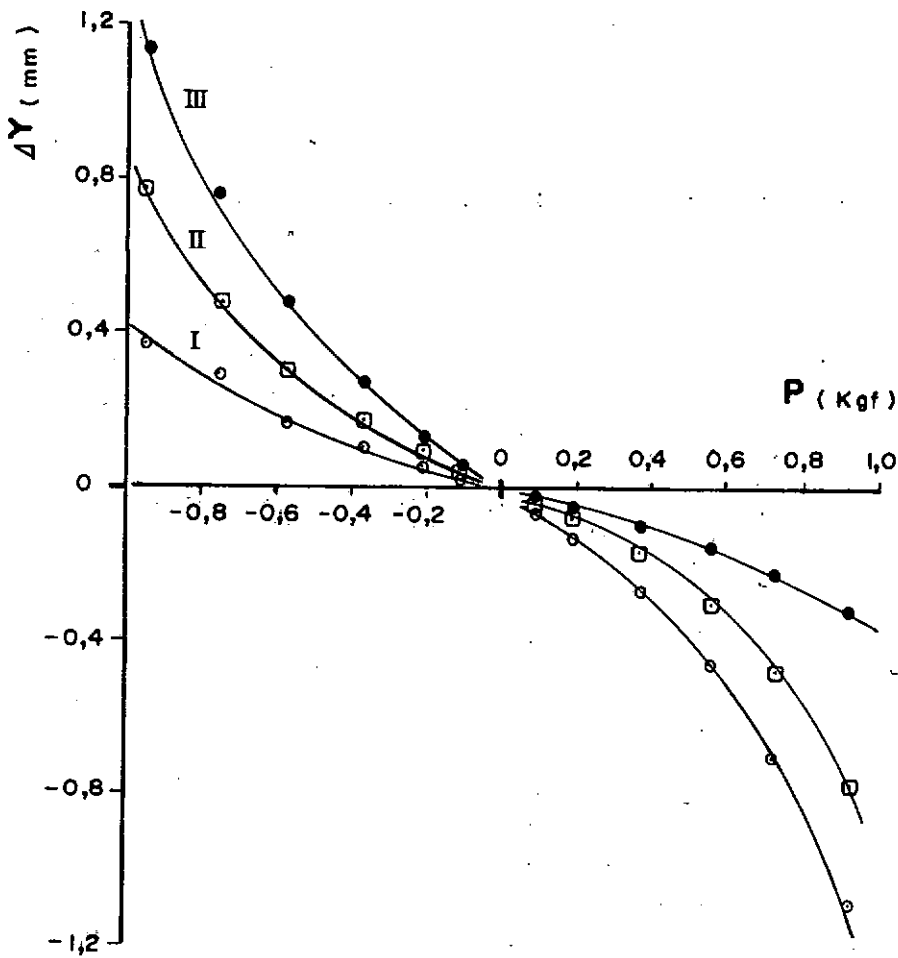


Fig. 7.9 - Resultados dos deslocamentos verticais por folga da mão mecânica com a variação do peso aplicado

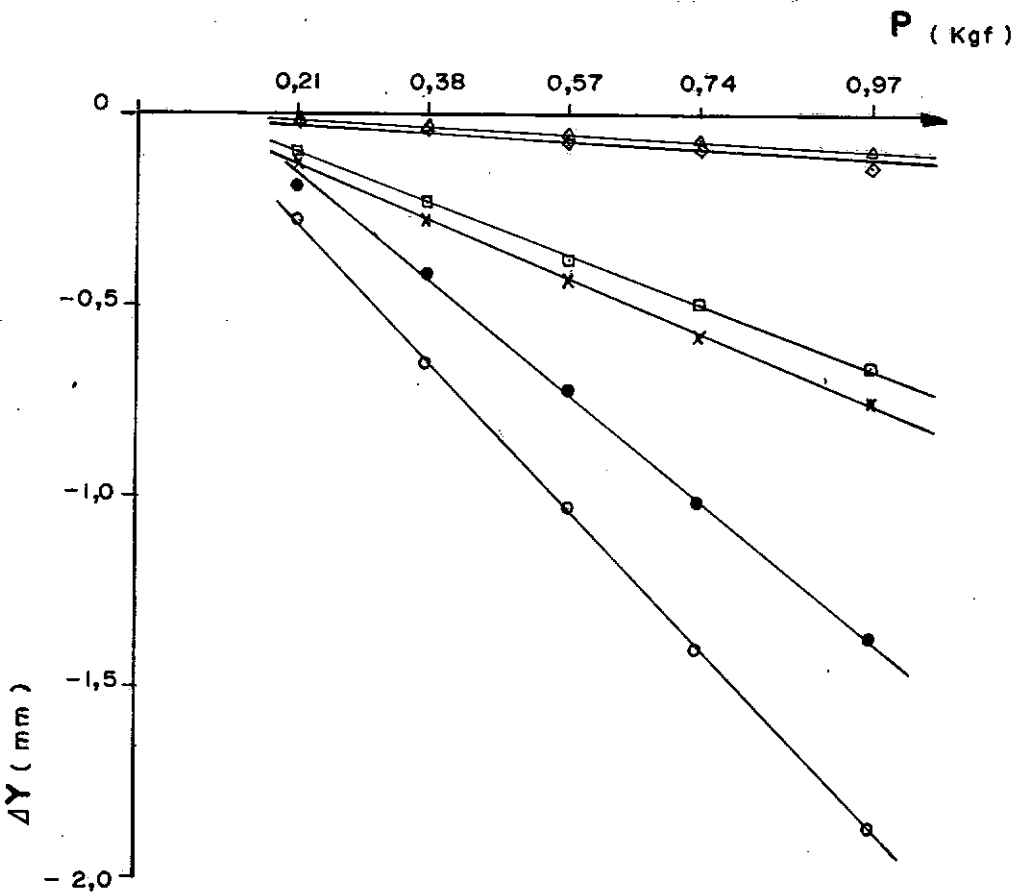
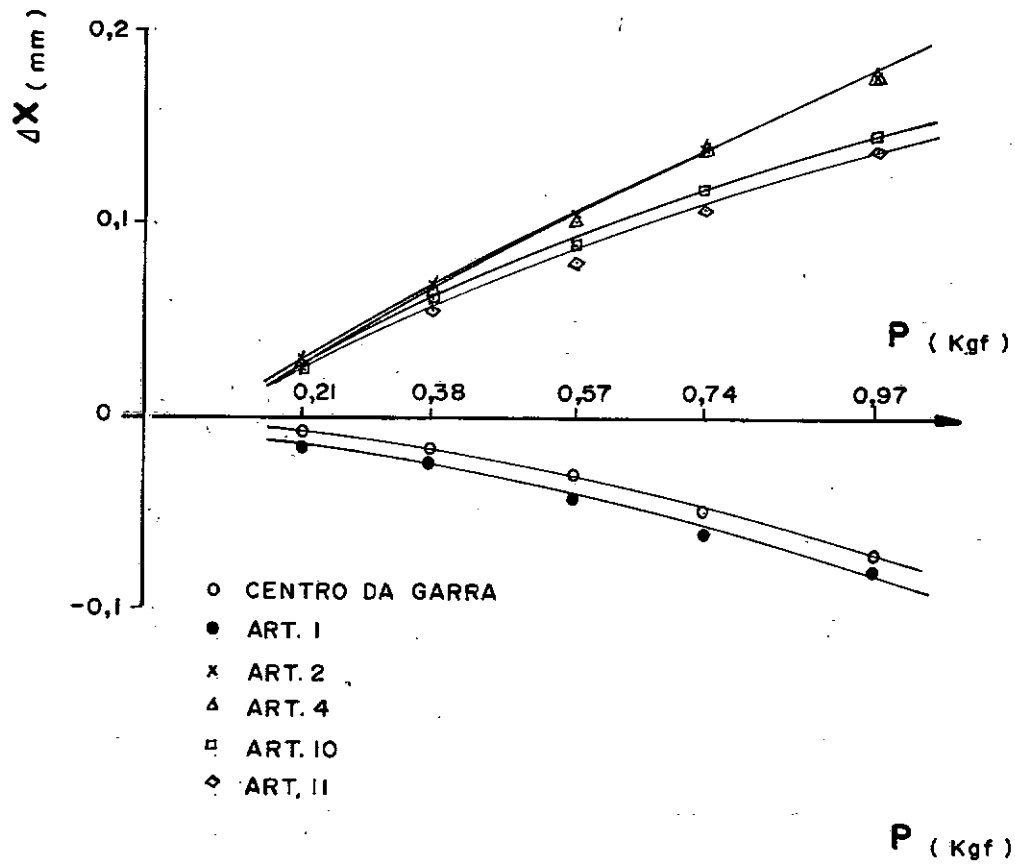
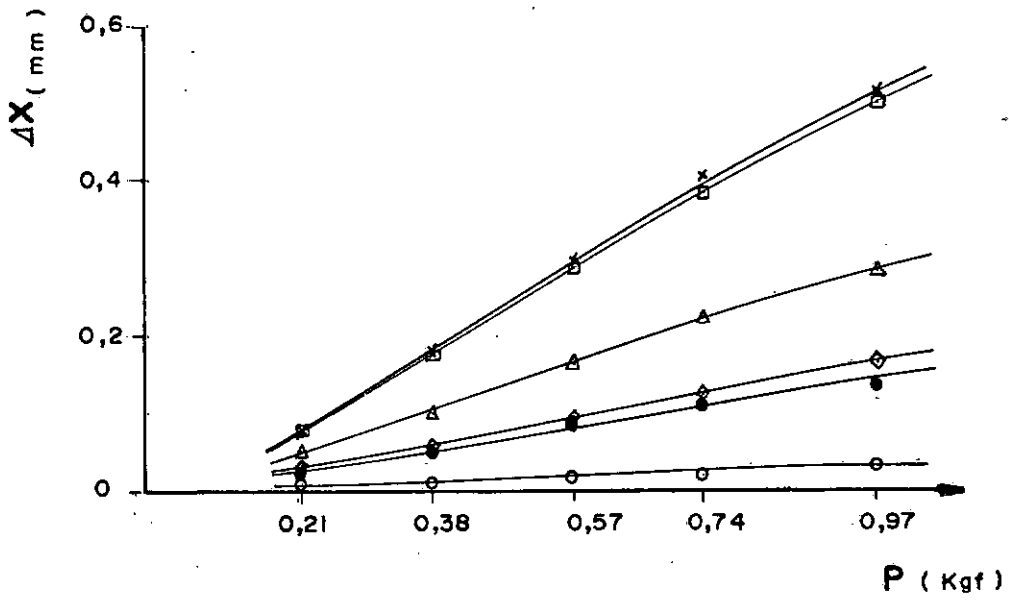


Fig. 7.10 - Resultados dos deslocamentos nas articulações com a variação do peso para $(\phi_{01}, \phi_{02}) = (0^{\circ}, 60^{\circ})$



- CENTRO DA GARRA
- ART. I
- × ART. 2
- △ ART. 4
- ART. 10
- ◇ ART. 11

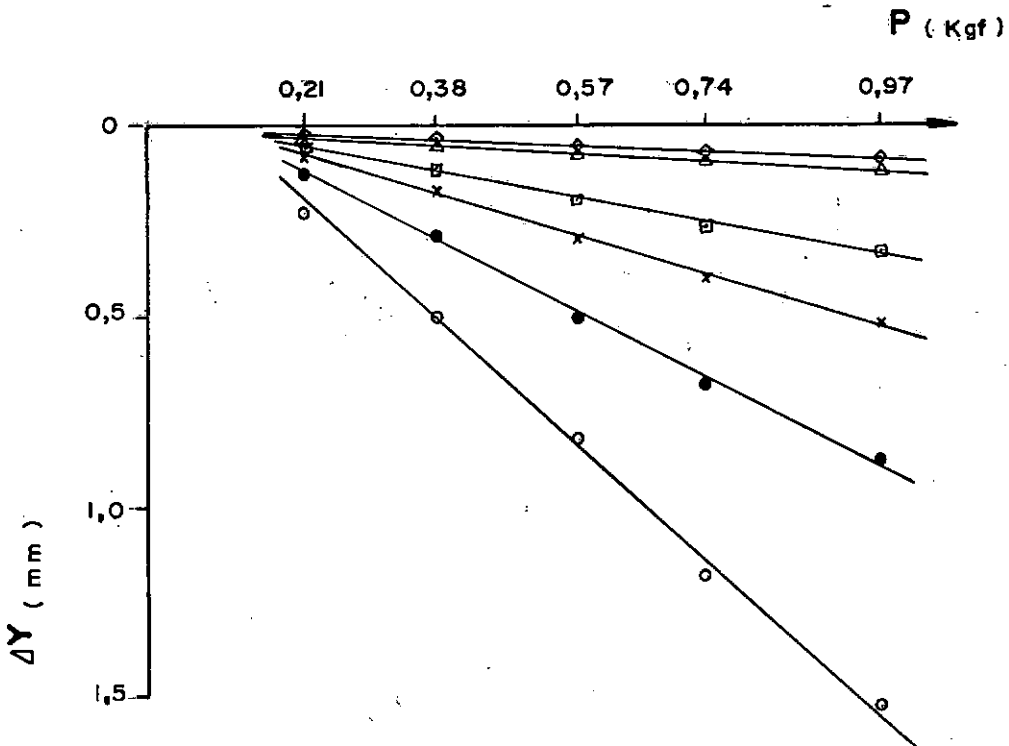


Fig. 7.11 - Resultados dos deslocamentos nas articulações com a variação do peso para $(\phi_{01}, \phi_{02}) = (45^\circ, 45^\circ)$

$(0^{\circ}, 60^{\circ})$ e $(45^{\circ}, 45^{\circ})$ respectivamente. Nestas figuras aparecem também as curvas de deslocamento do centro da garra a qual finalmente nos interessa para o posicionamento.

Na Figura 7.11 aparecem os deslocamentos negativos da articulação 1 e do centro da garra, devido à maior deflexão do membro q_8 da Figura 3.1 e por rotação da placa 2a provocada pelo deslocamento da referência sobre o qual encontra-se mais detalhes na seção 7.2.4. Nota-se que as curvas de deslocamento das articulações 2 e 10 pertencentes a placa 2a não coincidem devido à rotação da placa.

7.2.4 - Deslocamento da Referência

Na Tabela C.8 mostra-se os deslocamentos do centro das articulações 9 e 11 na direção horizontal e vertical com a variação do peso aplicado para os ângulos de posição (ϕ_{01}, ϕ_{02}) em $(0^{\circ}, 60^{\circ})$, $(45^{\circ}, 45^{\circ})$ e $(90^{\circ}, 60^{\circ})$.

Lembrando que a origem da coordenadas de referência da Figura 2.7 foi tomada em um ponto equidistante das articulações 9 e 11, o deslocamento desta origem pode ser considerado como uma média aritmética das articulações em questão conforme a Figura 7.12a.

$$x_0 = (x_9 + x_{11})/2 \quad (7.2)$$

$$y_0 = (y_9 + y_{11})/2$$

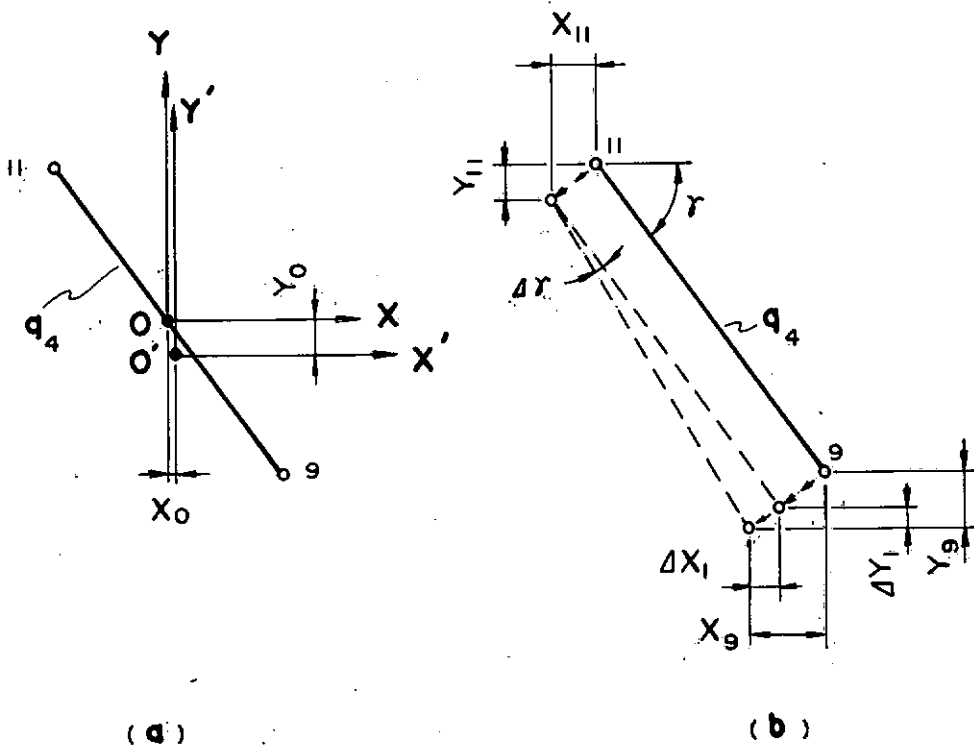


Fig. 7.12 - Deslocamento da referência

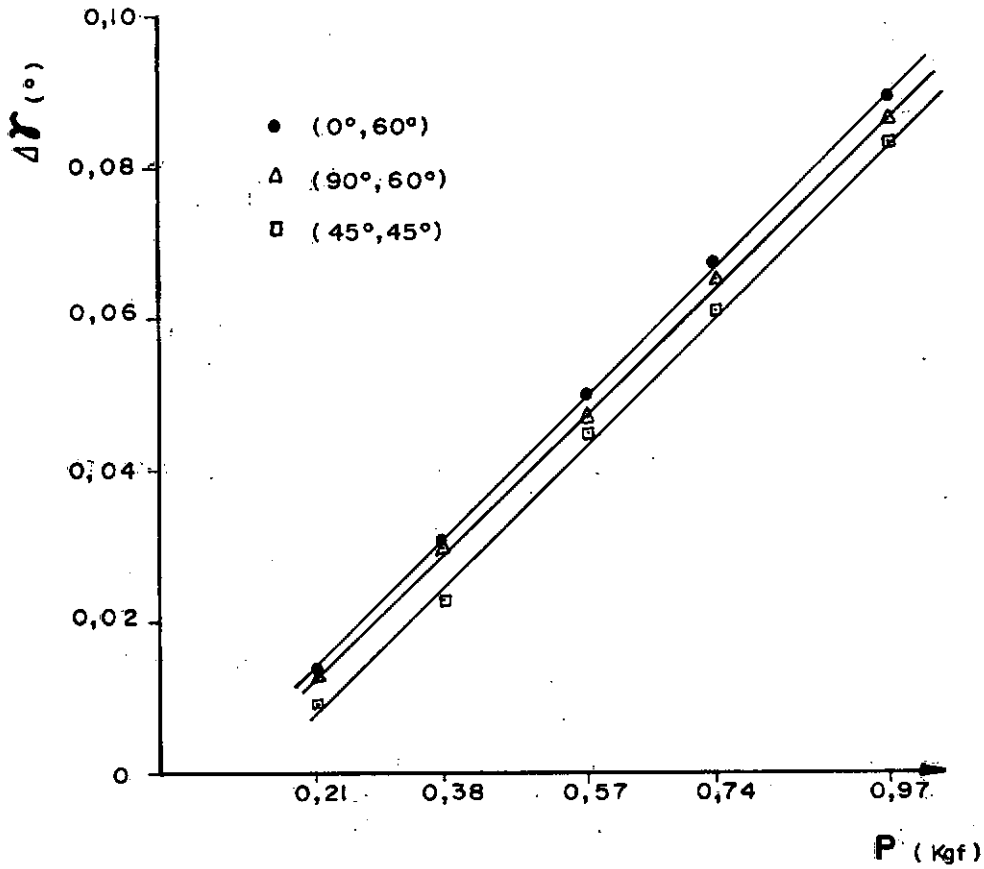


Fig. 7.13 - Rotação da referência com a variação do peso

onde,

x_0 - deslocamento da origem na direção horizontal

y_0 - deslocamento da origem na direção vertical

x_9 - deslocamento da articulação 9 na direção horizontal

x_{11} - deslocamento da articulação 11 na direção horizontal

y_9 - deslocamento da articulação 9 na direção vertical

y_{11} - deslocamento da articulação 11 na direção vertical

Por outro lado a Tabela C.8 mostra também a existência de uma rotação da coordenada $(0, x, y)$ conforme a Figura 7.12b, onde 9' e 11' da figura indicam os deslocamentos paralelos das articulações 9 e 11 e por conveniência tomou-se a rotação do membro q_4 em torno da articulação 11'. Portanto, para o ângulo de rotação $\Delta\gamma$ pequeno, pode-se escrever:

$$\Delta\gamma = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2}/R \quad (\text{rad}) \quad (7.3)$$

onde,

$\Delta\gamma$ - ângulo de rotação

Δx_1 - diferença de deslocamentos das articulações 9 e 11 na direção horizontal ($\Delta x_1 = x_9 - x_{11}$)

Δy_1 - diferença de deslocamentos das articulações 9 e 11 na direção vertical ($\Delta y_1 = y_9 - y_{11}$)

R - distância entre as articulações 9 e 11
(R = 100 mm)

Na Figura 7.13 (Tabela C.9) mostra o ângulo de rotação da referência com a variação do peso aplicado para os ângulos de posições (ϕ_{01}, ϕ_{02}) em $(0^\circ, 60^\circ)$, $(45^\circ, 45^\circ)$ e $(90^\circ, 60^\circ)$. Da figura nota-se que a variação Δy em relação a das posições do braço e do antebraço é pequena, pois depende mais do peso aplicado. Por esta razão, para o cálculo teórico de deslocamento aplicou-se a média aritmética dos Δy , x_0 , y_0 das três posições de (ϕ_{01}, ϕ_{02}) a fim de comparar com os resultados experimentais. Para a rotação admitiu-se que ela ocorre em torno de origem da coordenada de referência.

CAPÍTULO VIII

COMPARAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

8.1 - ROTAÇÃO DAS PLACAS DE LIGAÇÕES

Devido ao fato de ter assumido o mesmo erro para cada membro do braço e do antebraço a comparação das curvas teóricas e experimentais serve apenas qualitativamente, pois o objetivo da análise teórica deste assunto é saber a contribuição do erro de cada membro para a rotação das placas.

A Figura 8.1 reapresenta os resultados teóricos e experimentais do ângulo de rotação das placas. Da Figura 8.1a, nota-se que a curva experimental está mais próxima da curva do ângulo de rotação causado por Δq_2 , isto significa que o erro do membro q_2 do protótipo contribuiu acentuadamente para a rotação da placa 2a. Novamente da Figura 8.1b, a curva experimental assemelha-se a curva causada por Δq_6 , portanto pode-se interpretar que o erro do membro q_6 do protótipo contribuiu acentuadamente para a rotação da placa 2b.

8.2 - DESLOCAMENTO NAS ARTICULAÇÕES DO BRAÇO E DO ANTEBRAÇO

Na Figura 8.2 representa-se os resultados experimentais do deslocamento nas articulações 1 e 2 junto com os resultados teóricos para os ângulos de posições (ϕ_{01}, ϕ_{02}) em $(0^\circ, 60^\circ)$ com a variação do peso aplicado. Na figura, houve um

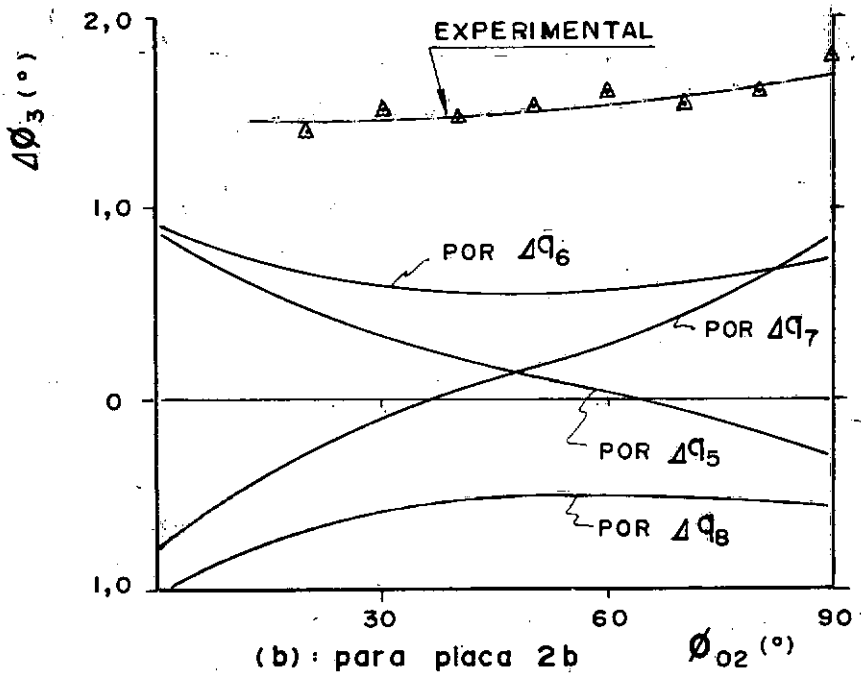
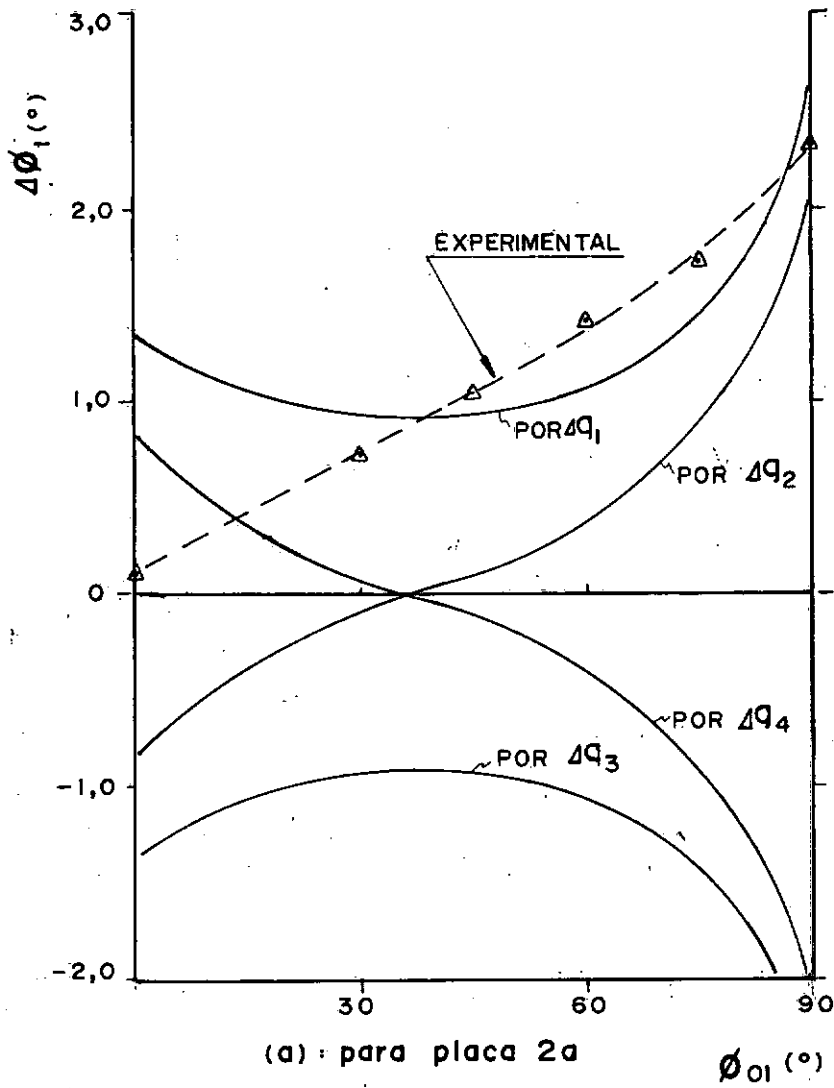


Fig. 8.1 - Comparação dos resultados para rotação de placas

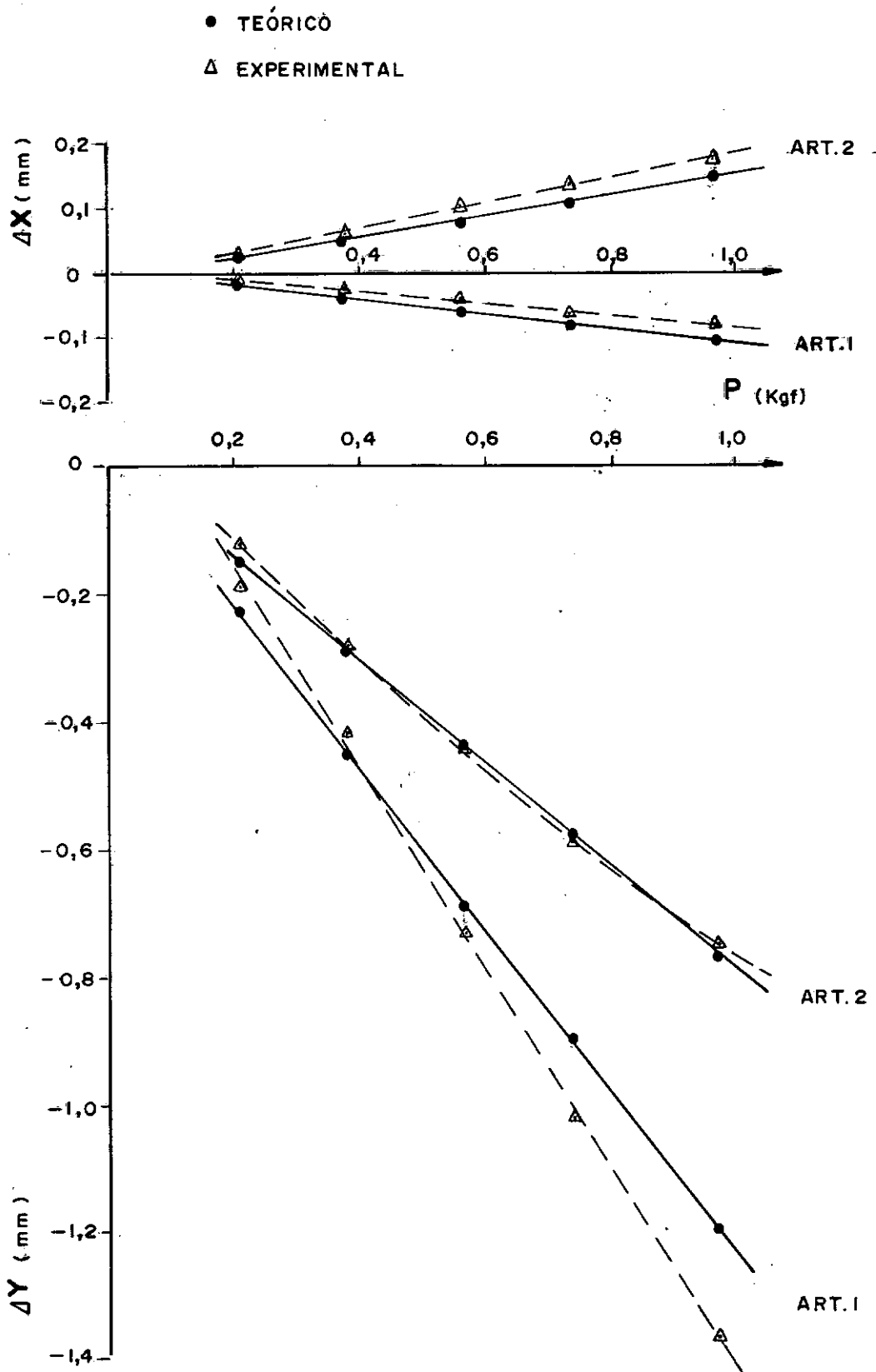


Fig. 8.2 - Comparação dos resultados para deslocamentos nas articulações com $(\phi_{01}, \phi_{02}) = (0^\circ, 60^\circ)$

cruzamento das curvas teóricas e experimentais para deslocamento vertical, isto devido ao fato de que foram assumidos os valores médios aritméticos do deslocamento das articulações da referência 9 e 11 e do ângulo de rotação da coordenada da referência. Pois, se existisse apenas um dos fatores as curvas teóricas e experimentais deveriam ser paralelas tanto na direção horizontal como na direção vertical. Entretanto, comparando apenas as diferenças entre as curvas teóricas e experimentais pode-se concluir que o modelo analítico é suficientemente confiável.

Analogamente a Figura 8.3 mostra as curvas teóricas e experimentais como na Figura 8.2, porém com os ângulos de posições (ϕ_{01}, ϕ_{02}) em $(45^{\circ}, 45^{\circ})$. Percebe-se que as curvas teóricas e experimentais para deslocamento vertical nesta figura não se cruzam, pois o ângulo de rotação da referência para estas posições do braço e do antebraço é pequeno em relação ao valor médio do ângulo $(\Delta\gamma)$ tomado para cálculo teórico.

No resultado da análise teórica do deslocamento não foi mostrado a contribuição do deslocamento das articulações da referência e a rotação da coordenada da mesma para o deslocamento final. Pois, estes fatores devem ser anulados para a construção final do manipulador que normalmente não se inclui ou mesmo sendo considerado, sua influência seria muito pequena na análise teórica. No entanto, houve uma grande influência destes fatores para o protótipo construído que se os desprezasse a comparação teórica-experimental não teria mais significado.

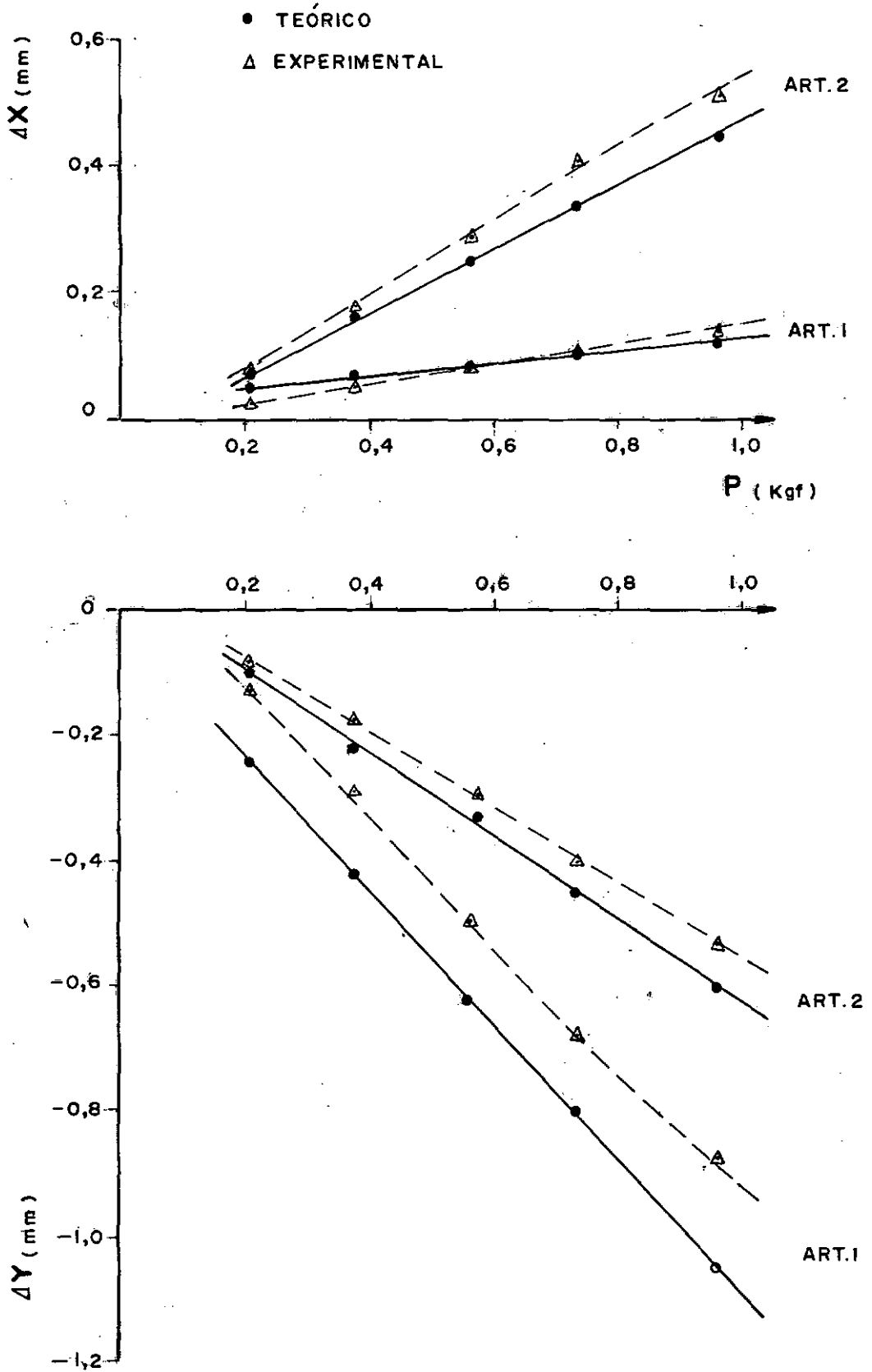


Fig. 8.3 - Comparação dos resultados para deslocamentos nas articulações com $(\phi_{01}, \phi_{02}) = (45^\circ, 45^\circ)$

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

9.1 - CONSTRUÇÃO

A construção do protótipo mostrou um desempenho razoável para a manipulação de uma carga média (1 ~ 2 kgf) com a velocidade relativamente baixa (3 ~ 10 rpm).

Devido ao atrito existente entre o cabo de aço e o tubo flexível necessitou-se uma força na garra bem maior do que a esperada.

A utilização do sistema de transmissão por cabo de aço causou um atraso de comando.

O mancal deslizante utilizado na mão mecânica causou um deslocamento maior na extremidade da garra, devido a existência da folga entre o mancal e o eixo, porém, este problema será facilmente resolvido pela substituição por mancal de rolamento.

O pequeno deslocamento da estrutura do corpo causou um deslocamento maior na extremidade da garra, principalmente na rotação das articulações da referência.

A precisão de posicionamento foi obtido em $\pm 1,3$ mm na direção vertical e $\pm 0,04$ mm na direção horizontal para a

carga de 1kgf com as posições do braço ϕ_{01} e antebraço ϕ_{02} em 0° e 60° respectivamente.

O espaço útil obtido é do formato de um cilindro de diâmetro interno ϕ_{615} mm e diâmetro externo ϕ_{815} mm cujo comprimento tem 300 mm, ou seja, a área útil retangular de 200 mm (horiz.) x 300 mm (vertical).

Sendo este trabalho pioneiro no laboratório depa-rou-se com problemas diversos, porém espera-se que o mesmo sirva como base para futuros projetos de manipuladores.

9.2 - MODELO ANALÍTICO

Os modelos analíticos apresentaram resultados satisfatórios, preenchendo os requisitos descritos anteriormente.

No modelo analítico de deslocamento não foi considerada a influência da folga nas articulações a qual deve ser tratada estatisticamente a sua localização no plano (x, y). A sua existência explica em parte as diferenças analítico-experimentais.

Convém frisar que a influência do deslocamento da estrutura do corpo foi desprezada inicialmente, porém, devido a maior percentagem de contribuição no deslocamento total, posteriormente considerou-se este fato no modelo analítico.

É possível utilizar o modelo analítico para a rotação das placas para o dimensionamento de um mecanismo de barras semelhante ao protótipo, pois, conhecendo as contribuições de cada elemento constituinte do mesmo nas rotações finais de um corpo rígido ligado neste mecanismo, pode-se controlar as tolerâncias de cada elemento para obter menor erro na transmissão do ângulo de rotação.

9.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Além dos estudos feitos neste trabalho, o estudo dinâmico do manipulador é um assunto importante.

Em termos de facilidade de construção, o mecanismo de barras para manipuladores mostra grande vantagem em relação a outros mecanismos, porém é importante frisar que a distância entre os furos das articulações deve ser feita com a mínima tolerância possível, utilizando para isto dispositivos de furação e a montagem do mecanismo será facilitada também desde que se disponha das ferramentas adequadas.

A verificação de precisão de posicionamento no espaço tem grande importância para definir a característica do manipulador, entretanto, para isto necessita-se de uma mesa de posicionamento de alta precisão além do controle eletrônico completo.

BIBLIOGRAFIA

1. T. UETAKI - Journal of the J. S. M. E., Vol. 75, N° 636, Jan. 1972.
2. KAWASAKI-UNIMATE ROBOT SYSTEM - Cat. N°. 3M192, Dec. 1981.
3. F. J. M. RODRIGUES - Tese de M. Sc., Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1978.
4. T. HAGIWARA - Journal of the J. S. M. E., Vol. 72, N° 604, May 1969.
5. K. J. WALDRON and A. KUMAR - Development of a Theory of Errors for Manipulators, ASME, 1979, p. 821-826.
6. R. S. HARTTENBERG and J. DENAVIT - Kinematic Synthesis of Linkage, McGraw-Hill, 1964, p. 315-318.
7. C. A. BREBBIA and A. J. FERRANTE - Computational Methods for the Solution of Engineering Problems, Pentech Press, London, 1978.
8. GERE and WEAVER - Analyses of Framed Structures, D. Van Nostrand Company, 1965.
9. L. P. M. MAIA - Dinâmica do Sistema, IONELI Indústrias Gráficas Ltda., 1979.

10. T. PACITTI e C. P. ATKINSON - Programação e Métodos Computacionais, Vol. 2, Livros Técnicos e Científicos S. A., 1977.
11. R. J. ROARK and W. C. YOUNG - Fórmulas for Stress and Strain, Internacional Student Editions, 5th Edition, 1975.
12. TIMOSHENKO - Resistência dos Materiais, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1976.
13. F. P. BEER and E. RUSSELL - Mecânica Vetorial para Engenheiros, McGraw-Hill, 1976.
14. O. P. ALBUQUERQUE - Dinâmica das Máquinas, McGraw-Hill, 1977.

APÊNDICE ADETERMINAÇÃO DE $\partial F_4 / \partial \phi_4$

$$\frac{\partial F_4}{\partial \phi_4} = \frac{\partial}{\partial \phi_4} (A_4 \text{ sen } \phi_3 + B_4 \text{ cos } \phi_3 + C_4) \quad (\text{A.1})$$

onde,

$$A_4 = 2q_7 [q_8 \text{ sen}(\phi_4 + \Delta\phi_4) - q_5 \text{ sen } \alpha]$$

$$B_4 = 2q_7 [q_8 \text{ cos}(\phi_4 + \Delta\phi_4) - q_5 \text{ cos } \alpha]$$

$$C_4 = q_5^2 - q_6^2 + q_7^2 + q_8^2 - 2q_5 \cdot q_8 \text{ cos}[(\phi_4 + \Delta\phi_4) - \alpha] \quad (\text{A.2})$$

Chamando os termos independentes de ϕ_4 da equação A.1 de A_4 , B_4 , C_4 dados pela equação 3.23, tem-se:

$$\rho_1 = 2q_7 q_8 \text{ sen } \phi_3$$

$$\rho_2 = 2q_7 q_8 \text{ cos } \phi_3 \quad (\text{A.3})$$

$$\rho_3 = - 2q_5 q_8$$

Então,

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_4}{\partial \phi_4} = \frac{\partial}{\partial \phi_4} \{ & \rho_1 \text{ sen}(\phi_4 + \Delta\phi_4) + \rho_2 \text{ cos}(\phi_4 + \Delta\phi_4) \\ & \rho_3 \text{ cos}[(\phi_4 + \Delta\phi_4) - \alpha] \} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

onde,

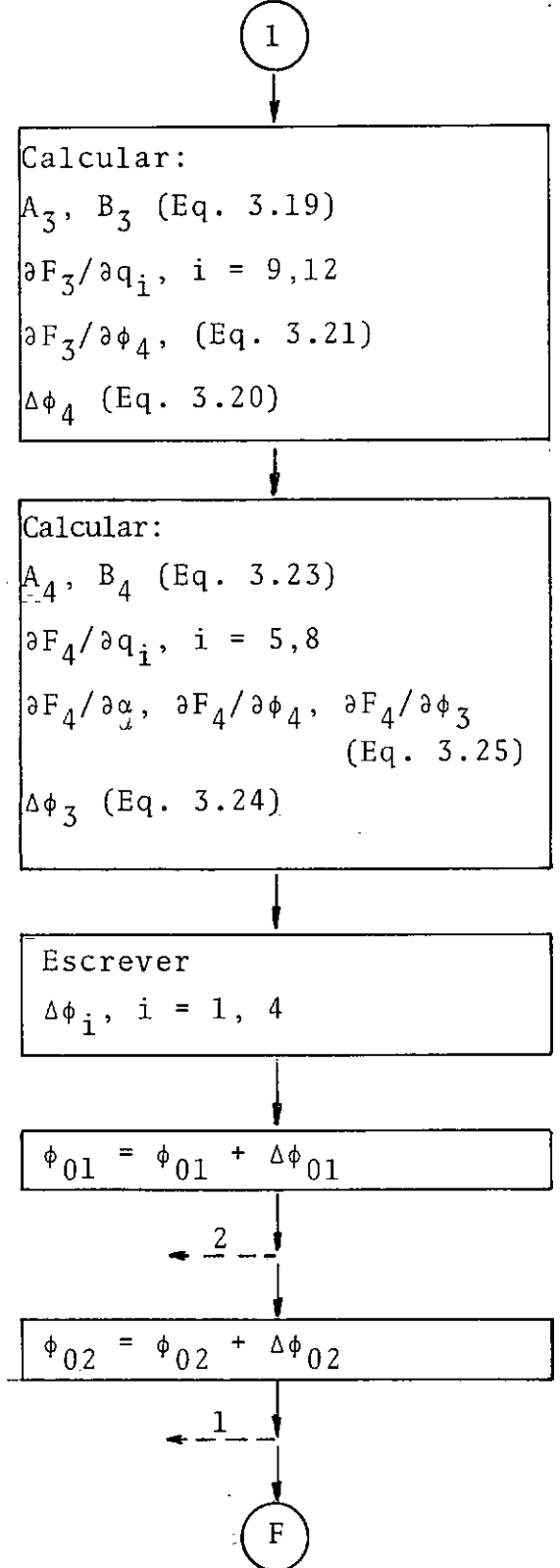
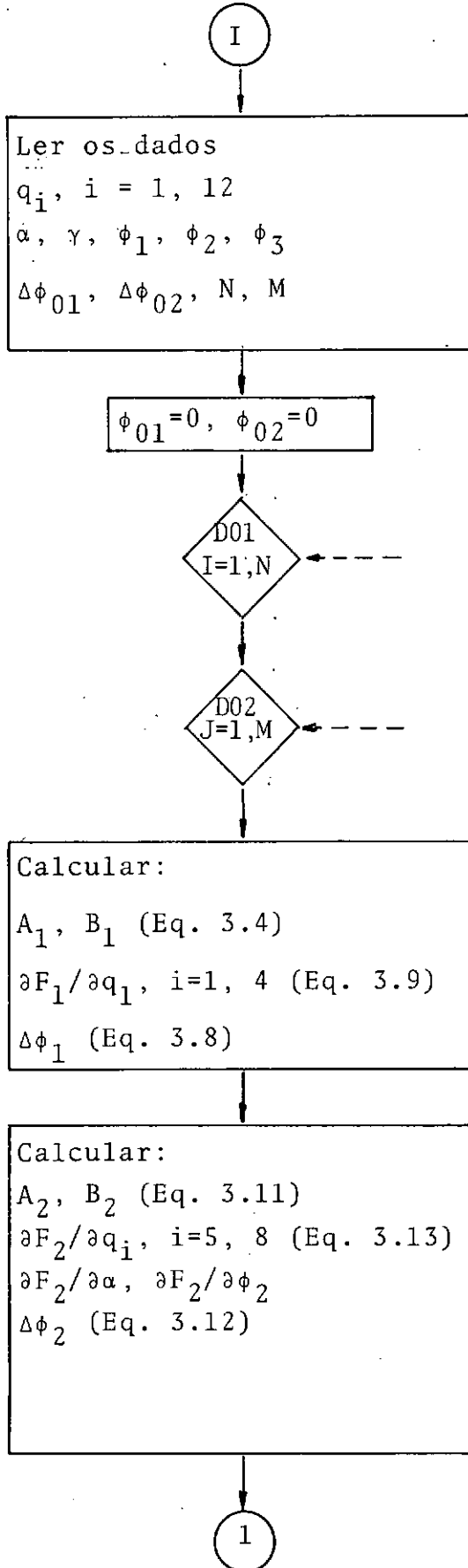
$$\frac{\partial}{\partial \phi_4} [\text{sen}(\phi_4 + \Delta \phi_4)] = \cos(\phi_4 + \Delta \phi_4) \cdot (1 + \frac{\partial \Delta \phi_4}{\partial \phi_4}) \quad (\text{A.5})$$

APÊNDICE B

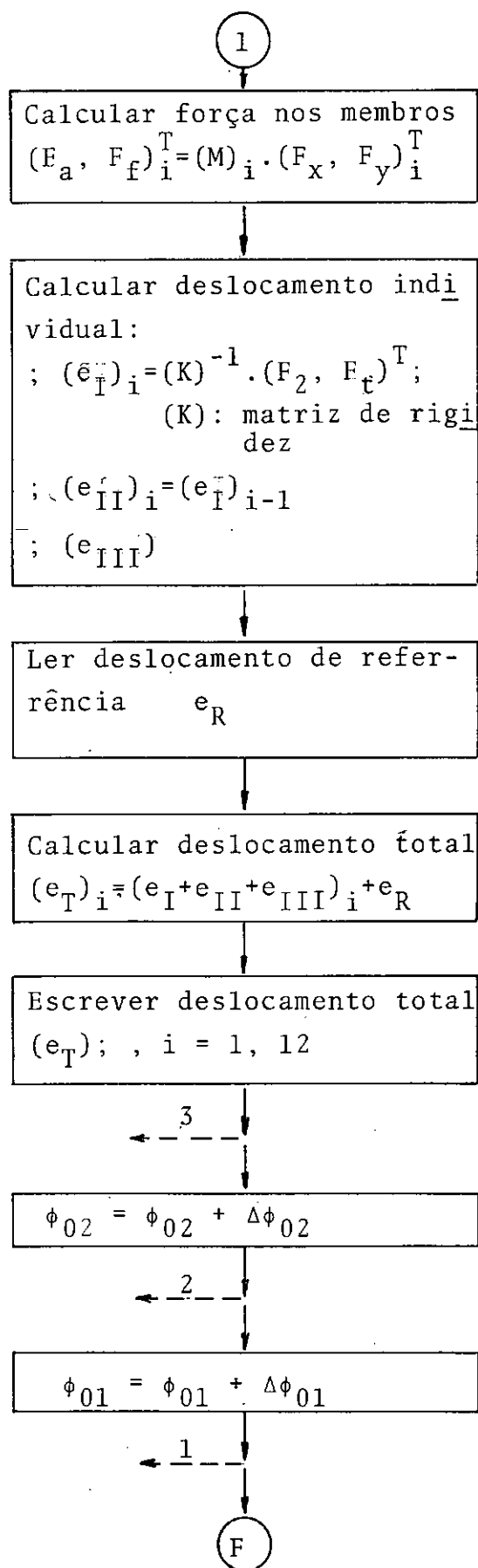
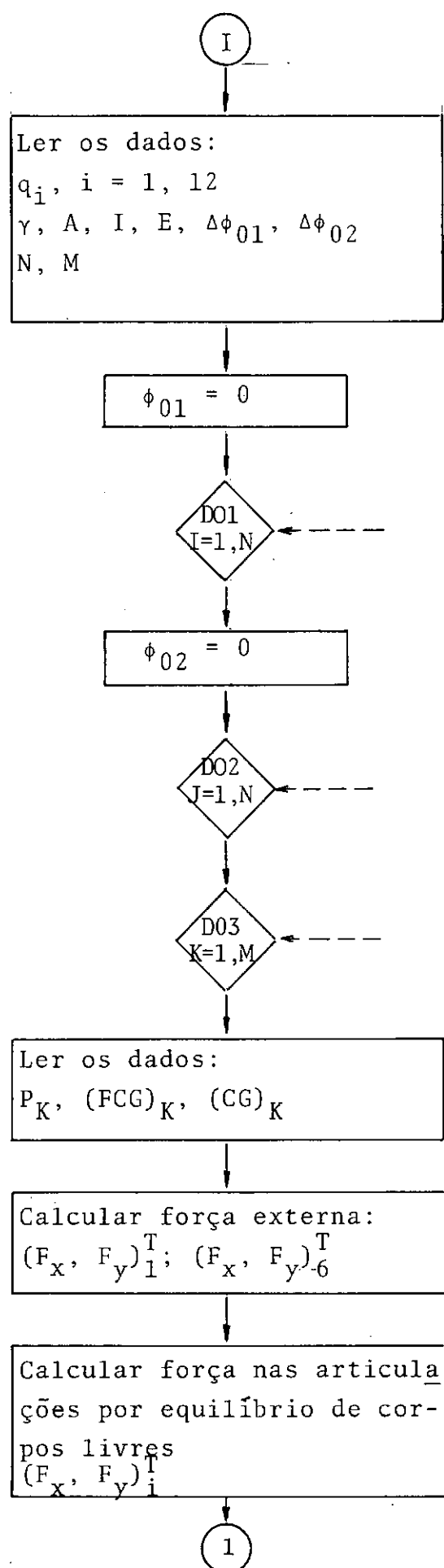
FLUXOGRAMA PARA CÁLCULO DE;

"Rotação nas placas"

"Deslocamento nas articulações"



"Fluxograma para cálculo de rotação das placas"



"Fluxograma para cálculo de deslocamento nas articulações"

APÊNDICE C

TABELAS DE DESLOCAMENTO

TABELA C.1 - Ângulo de rotação da placa 2a com a variação de ϕ_{01}

$(^{\circ}) \phi_{01}$	(mm) $\Delta \bar{x}$	σ	$(^{\circ}) \Delta \phi_{01}$	σ
0	0.14	0.02	0.10	0.01
15	0.64	0.04	0.46	0.03
30	1.00	0.02	0.72	0.01
45	1.42	0.03	1.02	0.02
60	1.95	0.03	1.40	0.02
75	2.36	0.01	1.69	0.01
90	3.26	0.03	2.33	0.02

TABELA C.2 - Ângulo de rotação da placa 2b com a variação de ϕ_{02} , fixando $\phi_{01} = 60^{\circ}$

$(^{\circ}) \phi_{02}$	(mm) $\Delta \bar{x}$	σ	$(^{\circ}) \Delta \phi_{02}$	σ
20	1.97	0.03	1.41	0.02
30	2.13	0.05	1.53	0.04
40	2.03	0.06	1.45	0.04
50	2.13	0.05	1.53	0.04
60	2.20	0.01	1.58	0.01
70	2.13	0.02	1.53	0.01
80	2.21	0.01	1.58	0.01
90	2.51	0.02	1.80	0.01

TABELA C.3 - Deslocamento (mm) em (x,y) com a variação de peso aplicado

(kgf) PESO	$x \cdot 10^{-3} \bar{x}$	$x \cdot 10^{-3} \sigma$	$x \cdot 10^{-3} \bar{y}$	$x \cdot 10^{-3} \sigma$
0.21	2.8	0.8	34	7
0.38	4.2	0.4	96	7
0.57	7.4	0.5	155	6
0.74	11.4	1.3	229	5
0.97	18.0	1.0	307	6

TABELA C.4 - Deslocamento (mm) da mão mecânica com a variação de ângulo do pulso

(kgf) PESO	$\theta = 0^{\circ}$		$\theta = 15^{\circ}$		$\theta = 30^{\circ}$		$\theta = 45^{\circ}$	
	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ
0.38	0.096	0.007	0.090	0.004	0.084	0.004	0.072	0.006
0.57	0.155	0.006	0.149	0.004	0.139	0.005	0.123	0.004
0.74	0.229	0.005	0.219	0.006	0.209	0.004	0.184	0.007
0.97	0.307	0.006	0.301	0.006	0.287	0.004	0.267	0.006

TABELA C.4 - Continua...

TABELA C.4 - Continuação

(kgf) PESO	$\theta = 60^{\circ}$		$\theta = 75^{\circ}$		$\theta = 90^{\circ}$	
	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ	\bar{y}	σ
0.38	0.065	0.006	0.055	0.003	0.052	0.002
0.57	0.111	0.004	0.097	0.005	0.091	0.005
0.74	0.168	0.004	0.149	0.004	0.143	0.007
0.97	0.243	0.006	0.228	0.005	0.224	0.002

TABELA C.5 - Deslocamento (mm) vertical devido a folga da mão mecânica com a variação do peso aplicado

(kgf) PESO	$+\bar{y}$	σ	FOLGA	σ	$-\bar{y}$	σ
0.11	0.022	0.001	0.028	0.001	0.021	0.001
0.21	0.034	0.007	0.085	0.012	0.047	0.008
0.38	0.096	0.007	0.172	0.006	0.102	0.009
0.57	0.155	0.006	0.313	0.008	0.176	0.007
0.74	0.229	0.005	0.482	0.041	0.292	0.011
0.97	0.307	0.006	0.774	0.084	0.373	0.023

TABELA C.6 - Deslocamento (mm) nas articulações do braço, antebraço e centro da garra com a variação do peso aplicado para $(\phi_{01}, \phi_{02}) = (0,60)$.

(kgf) PESO	CENTRO DA GARRA				ARTICULAÇÃO 1			
	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ
0.21	0.005	0.001	0.284	0.005	0.008	0.001	0.192	0.008
0.38	0.017	0.002	0.754	0.036	0.025	0.002	0.418	0.004
0.57	0.030	0.001	1.032	0.011	0.042	0.002	0.730	0.023
0.74	0.048	0.002	1.410	0.012	0.062	0.001	1.020	0.007
0.97	0.070	0.001	1.868	0.011	0.079	0.002	1.370	0.010

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 2				ARTICULAÇÃO 4			
	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ
0.21	0.030	0.002	0.124	0.005	0.028	0.001	0.014	0.005
0.38	0.067	0.002	0.280	0.010	0.063	0.001	0.034	0.004
0.57	0.106	0.001	0.442	0.008	0.102	0.002	0.056	0.005
0.74	0.141	0.003	0.586	0.011	0.141	0.001	0.076	0.005
0.97	0.177	0.002	0.752	0.011	0.178	0.003	0.098	0.004

TABELA C.6 - Continua...

TABELA C.6 - Continuação

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 10				ARTICULAÇÃO 11			
	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ
0.21	0.027	0.001	0.100	0.012	0.028	0.003	0.014	0.002
0.38	0.057	0.001	0.228	0.011	0.055	0.001	0.037	0.003
0.57	0.089	0.001	0.376	0.005	0.082	0.003	0.064	0.005
0.74	0.118	0.001	0.506	0.005	0.109	0.003	0.091	0.013
0.97	0.148	0.002	0.670	0.012	0.140	0.003	0.140	0.017

TABELA C.7 - Deslocamento nas articulações do braço, antebraço e centro da garra com a variação do peso aplicado para $(\phi_{01}, \phi_{02}) = (45, 45)$

(kgf) PESO	CENTRO DA GARRA				ARTICULAÇÃO 1			
	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ
0.21	0.004	0.001	0.235	0.005	0.025	0.001	0.130	0.007
0.38	0.010	0.002	0.497	0.002	0.048	0.001	0.288	0.008
0.57	0.016	0.002	0.830	0.007	0.085	0.002	0.502	0.016
0.74	0.021	0.001	1.186	0.028	0.112	0.002	0.682	0.004
0.97	0.028	0.003	1.536	0.011	0.137	0.001	0.874	0.055

Tabela C.7 - Continua...

TABELA C.7 - Continuação

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 2				ARTICULAÇÃO 4			
	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ
0.21	0.079	0.001	0.084	0.006	0.052	0.002	0.024	0.006
0.38	0.180	0.001	0.176	0.006	0.102	0.002	0.046	0.006
0.57	0.288	0.001	0.296	0.006	0.166	0.002	0.068	0.005
0.74	0.405	0.003	0.402	0.011	0.226	0.004	0.093	0.005
0.97	0.513	0.002	0.530	0.007	0.284	0.005	0.116	0.006

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 10				ARTICULAÇÃO 11			
	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ	\bar{x}	σ	\bar{y}	σ
0.21	0.080	0.001	0.044	0.009	0.028	0.002	0.018	0.006
0.38	0.175	0.002	0.116	0.006	0.060	0.001	0.028	0.003
0.57	0.287	0.004	0.190	0.007	0.094	0.002	0.047	0.005
0.74	0.385	0.006	0.256	0.006	0.126	0.003	0.068	0.003
0.97	0.499	0.007	0.334	0.006	0.168	0.003	0.087	0.005

TABELA C.8 - Deslocamento (mm) das articulações da referência 9 e 11 com a variação do peso aplicado

Para (0° , 60°)

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 9		ARTICULAÇÃO 11		ORIGEM	
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{x}	\bar{y}	x_o	y_o
0.21	0.025	0.039	0.028	0.014	0.027	0.027
0.38	0.050	0.091	0.055	0.037	0.053	0.044
0.57	0.073	0.150	0.082	0.064	0.078	0.107
0.74	0.098	0.027	0.109	0.091	0.104	0.149
0.97	0.122	0.295	0.140	0.140	0.131	0.218

Para (45° , 45°)

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 9		ARTICULAÇÃO 11		ORIGEM	
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{x}	\bar{y}	x_o	y_o
0.21	0.024	0.034	0.028	0.018	0.026	0.026
0.38	0.053	0.067	0.060	0.028	0.057	0.048
0.57	0.082	0.124	0.094	0.047	0.088	0.086
0.74	0.111	0.173	0.126	0.068	0.119	0.121
0.97	0.147	0.231	0.168	0.087	0.158	0.159

Para $(90^{\circ}, 60^{\circ})$

(kgf) PESO	ARTICULAÇÃO 9		ARTICULAÇÃO 11		ORIGEM	
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{x}	\bar{y}	x_o	y_o
0.21	0.020	0.038	0.023	0.015	0.022	0.027
0.38	0.048	0.087	0.054	0.034	0.051	0.061
0.57	0.073	0.135	0.083	0.054	0.078	0.095
0.74	0.101	0.185	0.113	0.072	0.107	0.129
0.97	0.125	0.236	0.145	0.088	0.135	0.162

TABELA C.9 - Ângulo de rotação da referência

(kgf) PESO	$\Delta\gamma (^{\circ})$		
	(0, 60)	(45, 45)	(90, 60)
0.21	0.014	0.009	0.013
0.38	0.031	0.023	0.030
0.57	0.050	0.045	0.047
0.74	0.067	0.061	0.065
0.97	0.089	0.083	0.086