



COMPENSAÇÃO DE DESVIOS DE POSICIONAMENTO PARA TELEROBÔ CARTESIANO EXECUTANDO MULTI-TAREFAS

Vitor Ferreira Romano

Claudio Violante Ferreira (mestrando)

Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE

Programa de Engenharia Mecânica - Laboratório de Robótica

Centro de Tecnologia, bloco G, sala 204

Cx. P. 68503 - 21945-970 Rio de Janeiro - RJ

***Resumo.** Este artigo apresenta uma metodologia de projeto para o cálculo da compensação de desvios de posicionamento em um manipulador cartesiano (tipo pórtico), modelado com corpos rígidos, considerando-se os efeitos das deformações estruturais durante a execução de tarefas. O método é essencialmente "off-line", sendo que seus resultados podem ser implementados em estratégias de controle convencionais de manipuladores, em tempo real.*

***Palavras-chave:** Projeto, Robótica, Manipulador, Modelagem*

1. INTRODUÇÃO

Os fabricantes de robôs industriais especificam como parâmetros de desempenho de uma determinada concepção de manipulador, a carga e velocidade/aceleração máxima de trabalho, a acurácia e repetibilidade de posicionamento. O controle para estes tipos de robôs, dentro destes parâmetros de desempenho, pode ser baseado puramente em variáveis cinemáticas. Porém, se os valores da carga de trabalho e/ou velocidade/aceleração forem acima dos especificados, os efeitos dinâmicos irão causar erros na acurácia e repetibilidade, devido principalmente à deformação estrutural. A solução usual para este problema é adotar manipuladores mais rígidos, ou seja, com elevada relação: massa manipulador / carga manipulada.

O projeto de manipuladores menos rígidos em relação à carga de trabalho, requer a monitoração dos desvios de posicionamento para a posterior compensação no sistema de controle, a fim de serem alcançados os parâmetros de desempenho previamente especificados. Outro fator limitante refere-se ao comportamento da frequência natural, cujo valor numérico é reduzido ao ter-se uma diminuição da rigidez estrutural.

2. METODOLOGIA

A metodologia apresentada a seguir, pode ser aplicada para um manipulador cartesiano, modelado com corpos rígidos. As principais etapas são:

- a) determinação das propriedades inerciais e geométricas de todos os componentes;
- b) modelagem cinemática usando matrizes de transformação homogêneas;
- c) modelagem dinâmica com equações de Newton-Euler;
- d) definição de ambiente de interação onde serão realizadas as tarefas (por exemplo, em células de manufatura);
- e) obtenção dos parâmetros cinemáticos das trajetórias definidas;
- f) utilização dos itens (b) a (e) para o cálculo das solicitações envolvidas ;
- g) utilização do item anterior para o mapeamento das deformações estruturais;
- h) realização de análise modal;
- i) cálculo da função-desvio na extremidade do telerobô;
- j) implementação do algoritmo de controle, utilizando a função-desvio.

3. MODELO DO MANIPULADOR

3.1. Aspectos gerais

O manipulador analisado neste artigo, é do tipo cartesiano e suas dimensões básicas são 1,53m x 0,871m x 1,379m. As dimensões adotadas no cálculo do volume de trabalho efetivo, devido ao caminho percorrido pelo pulso do manipulador, são: 1m x 0,5m x 0,5m. Na “Fig. 1” é mostrada a configuração com os três módulos denominados X, Y e Z.

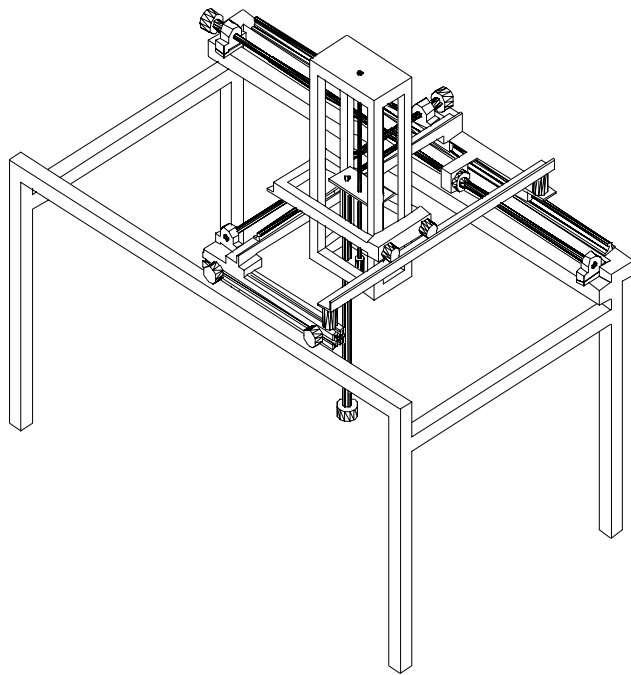


Figura 1 - Configuração do manipulador.

3.2. Parâmetros inerciais

Devido às múltiplas possibilidades de movimentação e manipulação de objetos com massas diversas, os cálculos de parâmetros como massas e inércias dos componentes, e posicionamento do centro de massa de cada módulo, são fundamentais para a correta modelagem dinâmica do manipulador. As massas das partes que se movimentam, módulos Z e Y, valem respectivamente: 8,9 Kg e 13,8 Kg. As massas do efetuador e carga de trabalho podem variar de acordo com a tarefa especificada.

A posição do centro de massa do módulo Z, depende dos valores da massa da carga de trabalho e das coordenadas impostas ao efetuador durante a sua movimentação. No cálculo, foram consideradas as massas de todos os componentes do módulo. Para o módulo Y, a posição do centro de massa depende apenas dos valores das massas dos componentes do módulo Y.

Considerando-se os módulos Y e Z conjuntamente, a posição do centro de massa (cm) depende dos valores das massas da carga de trabalho, dos módulos Y e Z, e das coordenadas impostas ao efetuador durante a sua movimentação. As “Equações (1), (2) e (3)” descrevem as coordenadas, em milímetros, do cm dos módulos Y e Z em relação ao referencial inercial localizado na base do módulo X.

$$X_{zcm} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(145500 \cdot mcarga + 3058727)}{(2832 + 125 \cdot mcarga)} \quad (1)$$

$$Y_{zcm} = \frac{1}{16} \cdot \frac{(460000 \cdot mcarga + 2000 \cdot y \cdot mcarga + 15066575 + 17732 \cdot y)}{(2832 + 125 \cdot mcarga)} \quad (2)$$

$$Z_{zcm} = \frac{1}{32} \cdot \frac{(4000 \cdot mcarga \cdot Zcar - 3124000 \cdot mcarga + 5882929 + 4360 \cdot Zcar)}{(2832 + 125 \cdot mcarga)} \quad (3)$$

3.3. Especificação das tarefas

A definição de uma tarefa, ou seja, a relação temporal entre os parâmetros cinemáticos e inerciais, irá nortear o desempenho do manipulador. Para este artigo, a tarefa resume-se a deslocar uma peça em um trecho diagonal, plano XY. Este movimento, mostra de forma mais representativa o comportamento do manipulador.

3.4. Parâmetros cinemáticos

Os movimentos gerados em cada módulo, são de tipo rampa de velocidade (linear-parabólica em posição). O algoritmo de planificação de movimento, assume como parâmetros de entrada: a velocidade máxima no trecho constante e a distância total a ser percorrida. O tempo de aceleração é considerado o mesmo da desaceleração.

Para a modelagem cinemática do manipulador cartesiano, utilizou-se o método denominado Denavit-Hartenberg (Fu *et al.*,1987). Neste caso, assume-se que os corpos do mecanismo formem uma cadeia cinemática aberta, com três graus de liberdade em translação. Outro corpo foi adicionado ao modelo, para obter-se a otimização dos parâmetros de D-H, conforme mostrado na “Fig. 2” e na “Tabela 1”.

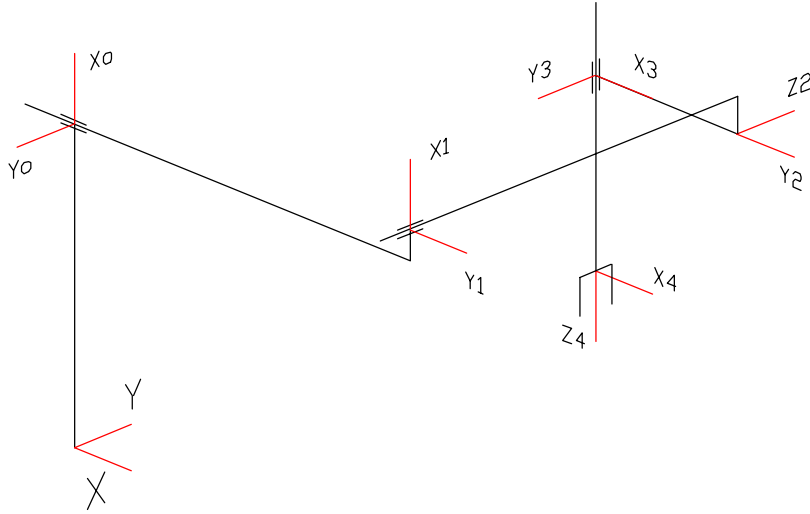


Figura 2 – Esquema simplificado do manipulador.

Tabela 1: Parâmetros de D-H

Corpo i	a_i [mm]	d_i [mm]	α_i [grau]	θ_i [grau]
1	$a_1 = 79,5$	$d_1 = \text{variável}$	$\alpha_1 = \pi/2$	$\theta_1 = 0$
2	$a_2 = -96$	$d_2 = \text{variável}$	$\alpha_2 = 0$	$\theta_2 = 0$
3	$a_3 = -173$	$d_3 = 0$	$\alpha_3 = -\pi/2$	$\theta_3 = \pi/2$
4	$a_4 = 0$	$d_4 = \text{variável}$	$\alpha_4 = 0$	$\theta_4 = 0$

A partir dos parâmetros D-H, foram obtidas as matrizes de transformação homogênea locais (relativas aos vínculos entre cada corpo), 0T_1 a 3T_4 , e global, 0T_4 , associando as variáveis de posição e orientação do efetuador (extremidade do manipulador), referidas no espaço cartesiano, às variáveis de juntas (Fu *et al.*,1987). As matrizes são apresentadas a seguir.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2T_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -a_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^0T_4 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_4 - a_2 + a_1 \\ 0 & 1 & 0 & -d_2 \\ 1 & 0 & 0 & -a_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A velocidade linear V_o (V_x , V_y e V_z) da extremidade do efetuador, pode ser obtida através das matrizes de transformação homogêneas. A equação para o manipulador cartesiano é (Sciavicco & Siciliano, 1995):

$$V_o = [(Q_1 \cdot {}^0T_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4) + ({}^0T_1 \cdot Q_2 \cdot {}^1T_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4) + ({}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot Q_4 \cdot {}^3T_4 \cdot \dot{q}_4)]P_4 \quad (4)$$

Desta forma, o vetor de velocidade linear reduzido do efetuador vale:

$$V_o = (V_x \ V_y \ V_z)^T = (-\dot{q}_4 - \dot{q}_2 \ \dot{q}_1)^T \quad (5)$$

onde:

\dot{q}_i = velocidade linear da junta i

$P_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$ - vetor posição da extremidade do manipulador;

Logo, o Jacobiano vale:

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Por ser uma matriz inversível, o Jacobiano não apresenta, portanto, singularidades.

4. MODELAGEM DINÂMICA

A modelagem dinâmica consiste de três partes: o modelo matemático da interação estática e dinâmica entre os módulos, o cálculo das deformações estruturais por elementos finitos, e a análise modal (frequências naturais e modos de vibração). Atualmente a etapa da análise modal está em implementação, não sendo portanto, apreciada neste artigo.

Para o cálculo das deflexões estruturais, o programa comercial ANSYS 5.4 foi utilizado, onde os valores das solicitações mecânicas aplicadas aos elementos foram aqueles calculados no modelo matemático.

4.1. Modelo matemático

Consiste no cálculo por meio de equações de Newton-Euler, das interações dinâmicas e estáticas entre os módulos que ocorrem nos elementos de transmissão/juntas (fusos, castanhas, guias e rodas). Para este modelo, foi considerada a influência do atrito.

4.2. Modelo por elementos finitos

O programa ANSYS possui o elemento “3-D Elastic Beam” (ANSYS, 1991), que devido às suas características, é o mais indicado ao modelo proposto. Este elemento engloba as solicitações de tensão, compressão, torção e flexão. Apresenta seis graus de liberdade em cada nó (três translações e três rotações nos eixos X, Y e Z).

A partir da definição do movimento do manipulador, obtém-se os parâmetros cinemáticos por trecho percorrido. A escolha da localização dos nós no modelo depende destes parâmetros, pois os nós serão especificados nos locais mais oportunos para que haja a análise mais abrangente possível. Para o trecho diagonal considerado no exemplo deste artigo, foram definidos três nós para cada uma das fase do movimento: (i) aceleração, (ii) velocidade constante e (iii) desaceleração, para o deslocamento dos módulos Z em Y e ZY em X.

Após as especificações dos nós e da cinemática, faz-se o cálculo das deflexões, considerando-se a ação das solicitações dinâmicas calculadas no modelo matemático sobre os nós, de acordo com a seqüência do movimento.

Na “Fig. 3”, é apresentado o modelo com as solicitações mecânicas aplicadas para a análise de deflexões no módulo X, onde o módulo Y está localizado na posição inicial de movimento. Já na “Fig. 4”, é mostrado o modelo para a análise de deflexões no módulo Y, com as solicitações localizadas na posição inicial de movimento do módulo Z.

5. DESVIO DE POSICIONAMENTO DO EFETUADOR

Para cada trecho percorrido durante a movimentação do manipulador numa dada tarefa, as deflexões causadas pelo deslocamento do módulo Z sobre as guias do módulo Y, assim como àquelas devido ao deslocamento dos módulos Z e Y sobre o módulo X, formam a base de dados para a elaboração das funções de interpolação. Estas funções associam as deflexões nodais às correspondentes posições dos módulos do manipulador.

Deve-se considerar ainda, as influências das folgas que existem em componentes como rolamentos, fusos de esfera recirculante e castanhas - valores fornecidos pelos fabricantes, mas sujeitos a alterações devido à natureza não-linear das solicitações mecânicas -, além de elementos de fixação.

6. RESULTADOS

Os valores usados como referência para o estudo do manipulador, estão, nas “Tabelas 2 e 3”.

Tabela 2. Parâmetros utilizados como entrada de dados

Parâmetro	Valor adotado
massa do efetuador	$m_{ef} = 1 \text{ Kg}$
massa da carga de trabalho	$m_{carga} = 9 \text{ Kg}$
velocidade máxima	$V = 0,5 \text{ m/s}$
Distância percorrida (direção X)	$D_x = 1000 \text{ mm}$
Distância percorrida (direção Y)	$D_y = 500 \text{ mm}$

A “Fig. 5” apresenta os resultados das deformações na estrutura do módulo X, na situação mostrada na “Fig. 3”, ou seja, com o módulo Y na posição inicial do movimento (uniformemente acelerado). Na “Fig. 6” tem-se o resultado das deformações na estrutura do módulo Y, sendo o módulo Z na posição inicial do movimento, conforme a “Fig. 4”.

Tabela 3. Valores das solicitações mecânicas

	Nó Módulo X			Nó Módulo Y			
	51	52	61	62	51	52	61
Força Fx [N]	3,24	3,32	0,22	0,27	0,15	0,14	3,31
Força Fy [N]	-93,26	-126,75	-44,16	-56,19	-32,64	-30,69	-121,75

Os valores máximos das deformações nodais para a análise dos módulos X e Y são mostrados na “Tabela 4” e na “Tabela 5”, com o sistema de referência do ANSYS®.

Tabela 4. Valores máximos de deformações no módulo X

	Deformações lineares [mm] $\times 10^{-3}$			Deformações angulares [rad] $\times 10^{-3}$		
	δx	δy	δz	$\delta\theta x$	$\delta\theta y$	$\delta\theta z$
Nó	4	6	40	40	21	5
Valor	92,988	-258,150	3,448	0,003	-0,400	-0,636

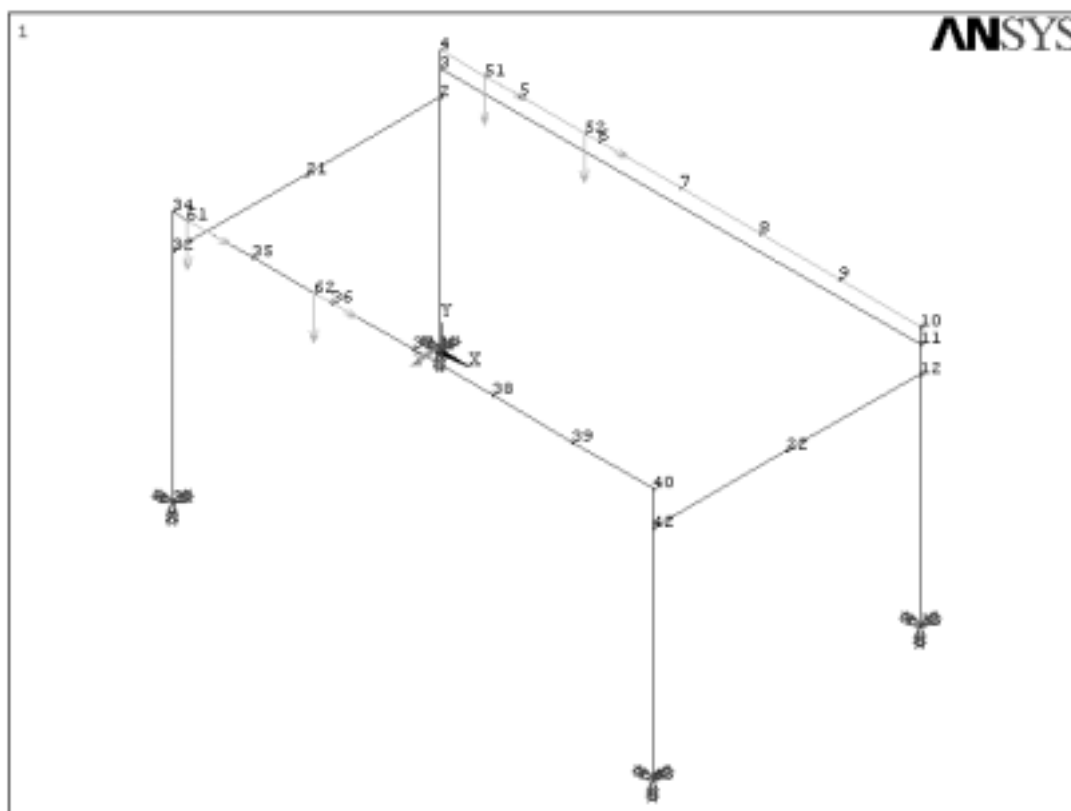


Figura 3 - Módulo X com solicitações na posição inicial do movimento do módulo Y.

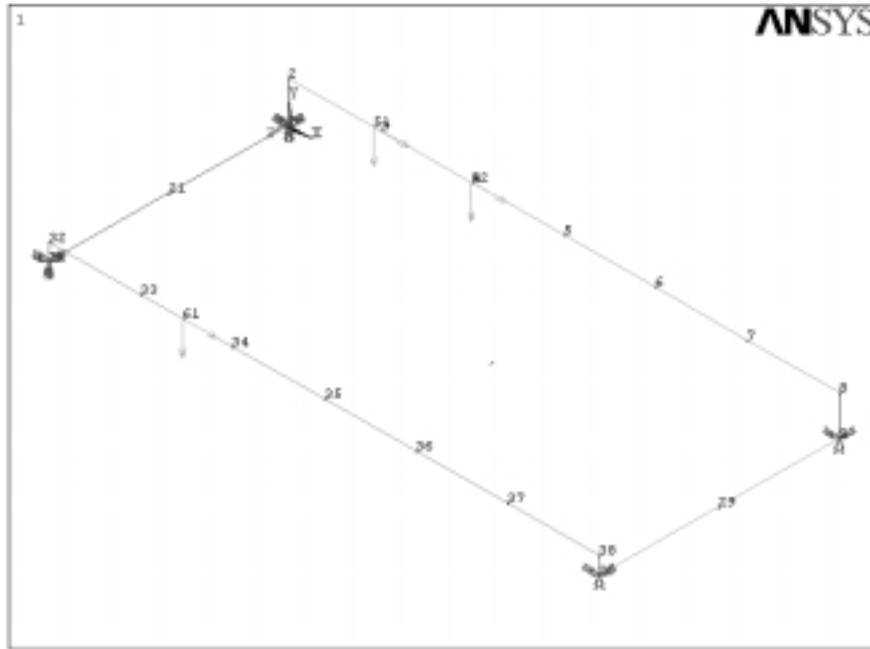


Figura 4 - Módulo Y com solicitações na posição inicial de movimento do módulo Z.

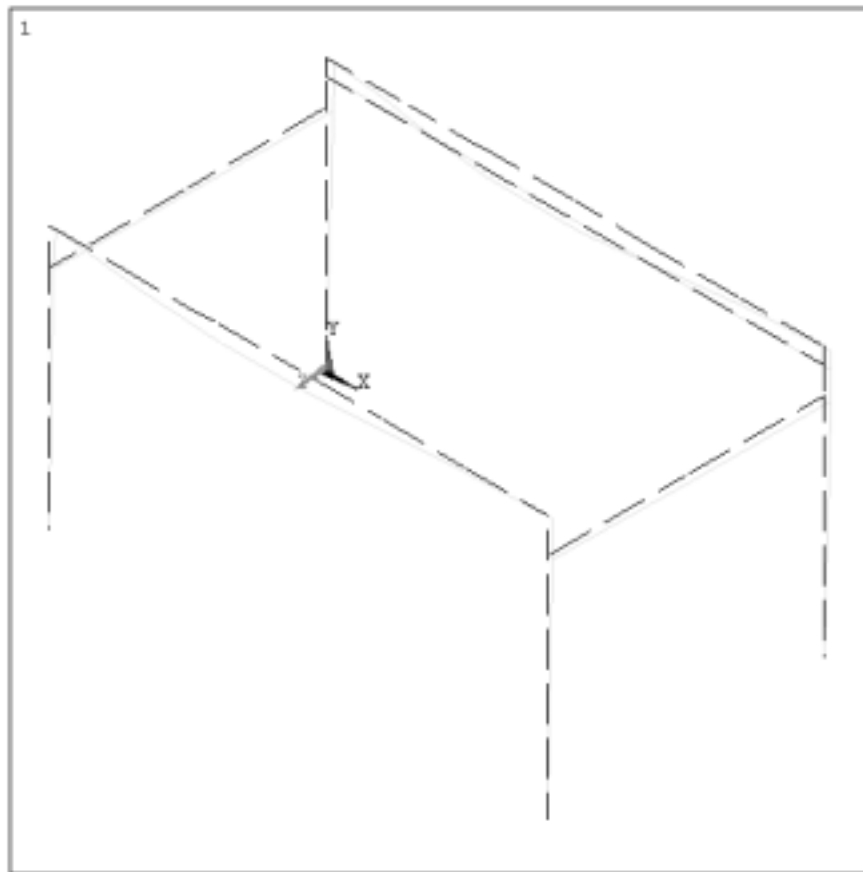


Figura 5 – Deformações nodais no módulo X.

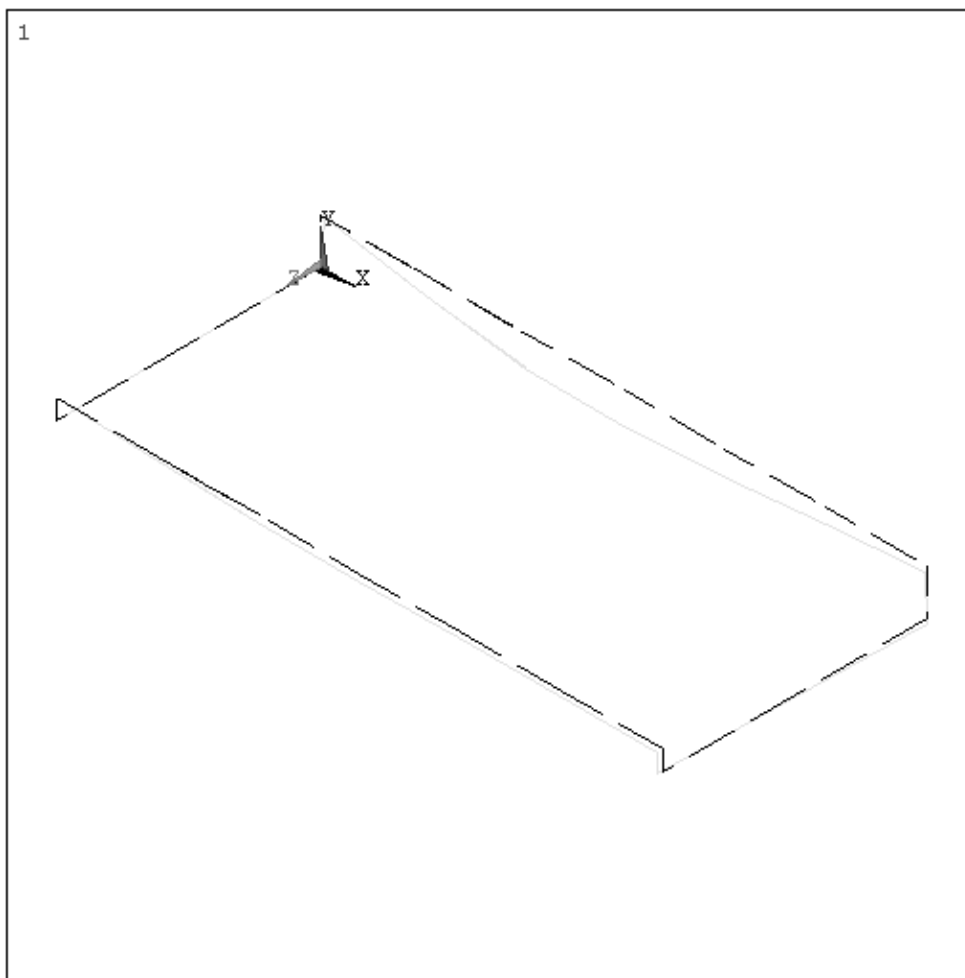


Figura 6 – Deformações nodais no módulo Y.

Tabela 5. Valores máximos de deformações no módulo Y

	Deformações lineares [mm] $\times 10^{-3}$			Deformações angulares [rad] $\times 10^{-3}$		
	δx	δy	δz	$\delta \theta x$	$\delta \theta y$	$\delta \theta z$
Nó	9	34	8	8	29	33
Valor	0,208	-2,415	0,182	0	0	0,013

7. CONCLUSÕES

As configurações das deformações mostradas nas “Fig. 5 e 6”, assim como os valores descritos nas “Tabelas 4 e 5”, são compatíveis com as solicitações mecânicas impostas aos modelos.

O método apresentado neste artigo, pode ser empregado como ferramenta de otimização capaz de identificar os limites estruturais, durante a fase de projeto de manipuladores do tipo pórtico, para uma aplicação convencional.

É fundamental ter-se uma análise experimental do manipulador, para que a modelagem seja convenientemente ajustada, devido às não-linearidades e eventuais imprecisões na montagem de componentes.

Atualmente, os resultados da análise modal, assim como as funções de interpolação para as deflexões, e a função desvio de posicionamento estão sendo implementados. Os resultados definitivos serão apresentados em breve.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto – processo nº 520864/97 -, e à CAPES pela bolsa de mestrado fornecida ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

- Rivin, E. I., 1988, Mechanical Design of Robots, McGraw-Hill, New York.
- Fu, K. S., Gonzalez, R. C., Lee, 1987, C. S. G., Robotics Control, Sensing, Vision, and Intelligence, , McGraw-Hill, Singapura.
- Sciavicco, L., Siciliano, B., 1995, Robotica Industriale – Modellistica e Controllo di Manipulatori, , McGraw-Hill, Milão.
- Warneck, H. J., Schraft, R. D., Wanner, M. C., 1985, Mechanical design of the robot system, in Handbook of Industrial Robotics, ed S. Y. Norf, John Wiley & Sons, pp. 44-79.
- Yong, Y. F., Gleave, J. A., Green, J. C., Bonney, M. C., Off-line programming of robots, in Handbook of Industrial Robotics, ed S. Y. Norf, John Wiley & Sons, pp. 366-380.
- ANSYS-PC, 1991, Reference Manual for Revision 4.4 Vol. I, Swanson Analysis Inc., Houston.

POSITIONING ERROR COMPENSATION FOR GANTRY TELEROBOT MULTI-TASK PERFORMANCE

Abstract. *This paper presents a design methodology for the calculation of positioning error compensation for a gantry manipulator, modelled as rigid body. Structural deformations due to task performance are considered. This method is mainly off-line, and the resulting output data can be implemented in real time conventional manipulator control strategies.*

Keywords: Design, Robotics, Manipulator, Modelling