

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE BARRAS DE ANCORAGEM ANTAGÔNICAS CONTROLADAS EM ESTRUTURAS DE MÁQUINAS FERRAMENTAS DE CINEMÁTICA PARALELA (MCP)

Guilherme Raszl

Centro Universitário da FEI, UniFEI, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – bairro Assunção, CEP 09850-901 – São Bernardo do Campo, SP - C.P. 596, graszl@fei.edu.br

Tarcisio Antonio Hess Coelho

Departamento de Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, SP, CEP 05508-900, tarchess@usp.br

***Resumo.** A busca pela melhoria da qualidade nos processos de fabricação por usinagem em variados formatos e dimensões de peças de trabalho tem motivado as comunidades industrial e acadêmica, a empenhar-se no desenvolvimento de arquiteturas de máquinas ferramentas (MCP) com maior rigidez em todas as posições que ocupam no seu espaço de trabalho. As modificações do arranjo estrutural peculiar em mecanismos de cinemática paralela causam proporcionalmente alterações na rigidez da estrutura da máquina em níveis prejudiciais à qualidade em formato, dimensão e superfície da peça. Este artigo analisa as opções estruturais com barra de ancoragem antagônica capazes de produzir efeitos que permitam atingir um projeto de rigidez isotrópica compatível com o requerido em cada posição de operação da ferramenta. Quanto ao parâmetro geometria da peça, o tamanho ou extensão de usinagem pode exigir uma avaliação cuidadosa no projeto de rigidez da máquina e sua estrutura. Este artigo tem por objetivo apresentar e avaliar o conceito da rigidez suficiente dentro do espaço de trabalho auxiliado pelo emprego de barras de ancoragem antagônica controláveis.*

Palavras-chave: usinagem, cinemática paralela, rigidez, barras de ancoragem antagônica

1. INTRODUÇÃO

As máquinas ferramentas convencionais sugerem maior robustez quando realizam o processo de usinagem ao longo de seus três eixos ortogonais. A razão é a de possuírem estruturas que permitem o dimensionamento dos componentes da máquina em função da qualidade requerida, tipo e tamanho da peças de trabalho a que são destinadas a produzir. As categorias de máquinas com estruturas do Tipo C, Pórtico e Pórtico Móvel ^[1] são adequações de máquinas ferramentas frente às exigências de qualidade do produto em formato, extensão e textura superficial da peça. As máquinas ferramentas convencionais com suas guias prismáticas ortogonais provêem rigidez uniforme do cabeçote com a ferramenta em toda sua extensão de operação assegurando o mesmo comportamento da rigidez da ferramenta até o fim de curso do seu espaço de trabalho. As estruturas Tipo C, Pórtico e Pórtico móvel, geralmente possuem espaços de trabalho cúbicos e são enormes em tamanho, volume e peso.



Fig. 1 - Estrutura multi-pernas

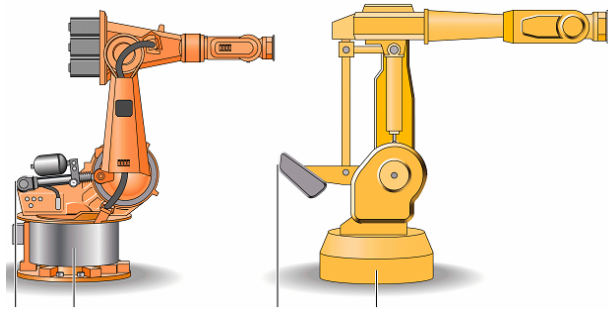


Fig 2 Exemplos de Estrutura serial

As Máquinas de Cinemática Paralela (MCP) com sua estrutura multi-pernas (fig. 1) caracterizam por um sistema de atuação simultânea ou paralela sobre a plataforma móvel que geralmente transporta a ferramenta, e, portanto torna-se uma arquitetura em constante alteração quando esta realizando uma operação em um determinado sentido no seu espaço de trabalho. As MCP's constituem um sistema de alta rigidez em decorrência de sua estrutura multi-pernas (fig.1) quando comparada a robôs seriais (fig.2) quando realizam as mesmas tarefas de manipulação.

Estas estruturas apresentam alteração na sua configuração, durante sua movimentação, ocasionando a variação na sua rigidez à medida que a ferramenta se afasta do centro geométrico do seu espaço de trabalho. Este comportamento estrutural da máquina afeta drasticamente a qualidade do produto em fabricação dependendo de como a extensão de operação se posiciona no espaço de trabalho.

Todas as vantagens potenciais das MCP's tais como leveza, elevada resposta dinâmica e alta capacidade de carga esbarram no parâmetro rigidez não constante. Atualmente há muitos indicadores que apontam o parâmetro rigidez como o elemento chave na viabilização das MCP's para utilização industrial.

A rigidez isotrópica é a uniformização do nível de rigidez de uma estrutura, seja ela de cinemática serial ou paralela, sendo sua tarefa principal a de posicionar uma ferramenta ou garra em seu espaço de trabalho e ser capaz de gerar níveis de rigidez dentro de uma faixa de tolerância considerada adequada e uniforme em qualquer posição que ocupe dentro do seu espaço de trabalho.

Atualmente estes fatos justificam a premente busca pela estrutura de rigidez isotrópica trazendo motivação para muitos estudos referentes à sua otimização bem como a comprovação experimental de seu comportamento teórico. Lee et al. [2] analisaram estas questões em mecanismos com *atuação redundante* [3, 4] utilizando um exemplo para definir o conceito da rigidez antagônica representado pelo efeito de mais de um motor no acionamento provendo o equilíbrio do sistema como uma mola física simples. Choi et al. [5] desenvolveram um novo algoritmo para investigar a matriz rigidez espacial utilizando “linhas simples de molas”. Propuseram uma matriz de rigidez isotrópica definida a partir de

um sistema equivalente formado por seis molas associadas à posição e orientação da estrutura considerada.

Sanger et al ^[6] desenvolveram um método geral para análise da rigidez de mecanismos manipuladores baseados nas forças externas aplicadas no sistema e avaliaram a rigidez ou flexibilidade infinitesimal do órgão terminal para manipuladores seriais e paralelos. O resultado deste trabalho mostrou a relação da precisão com a sua rigidez.

Opções estruturais utilizando-se *barras de ancoragem antagônicas* podem produzir efeitos que permitam atingir o requisito de rigidez necessário atendendo à qualidade especificada para fabricação de um produto. Desta forma, o presente trabalho avalia o efeito da introdução destas barras durante a operação de usinagem envolvendo fresamento. A seção 2 descreve o mecanismo em estudo, a sua composição, os tipos de acionamentos adotados para desenvolver o posicionamento desejado de uma ferramenta de usinagem em um espaço bidimensional. A seção 3 apresenta a modificação estrutural introduzida pelo emprego da barra de ancoragem, analisando-se as suas características de funcionamento. A seção 4 apresenta a modelagem para avaliação do seu comportamento. Na seção 5 determinam-se as deformações na tanto no sentido vertical e como no horizontal, confrontando-se a análise da rigidez do sistema sem e com a *barra de ancoragem*. Avalia-se, portanto, a melhoria da utilização da terceira barra através da intensidade de sua deformação. As principais conclusões deste trabalho são apresentadas seção 7.

2. DESCRIÇÃO DA MCP ANALISADA

Tipicamente, um mecanismo paralelo de três pernas é formado por cinco peças (1- base; 2- cilindros; 3- haste; 4- haste; 5; cilindro). Ele é composto de uma base e um órgão terminal, os quais são ligados por duas cadeias cinemáticas ativas. O órgão terminal representa a ferramenta e a base propriamente dita a estrutura fixa (fig. 3 e 4). Estas cadeias são formadas por dois atuadores (motores elétricos rotativos acoplados a fusos de esferas recirculantes) com curso extensível a um comprimento especificado, que podem em conjunto ter movimentos verticais e horizontais simultâneos, através de fusos e juntas. A base dos dois atuadores é fixa, e quando os motores são acionados, todo conjunto do acionamento pode rotacionar na sua junta rotação da base, proporcionando um movimento bidimensional no ponto P. Esta ação disponibiliza uma trajetória de movimento em dois eixos capaz de proporcionar no ponto P uma operação de fresamento por uma ferramenta na direção desejada. A arquitetura típica do mecanismo é mostrada na figura 3.

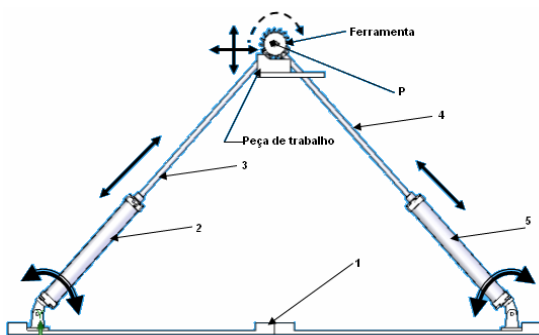


Fig 3– Esquema da MCP - RPRPR

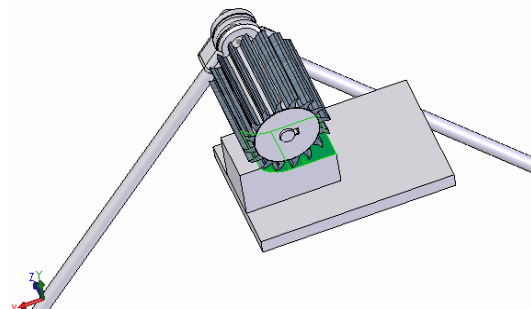


Fig 4– Detalhe do fresamento na MCP - RPRPR

A análise topológica das cadeias cinemática ativas, presentes no mecanismo paralelo, pode ser descrita por um esquema simples onde as juntas são representadas por quadrados e as barras por linhas. Cada cadeia cinemática pode ser, por exemplo, uma RPR , e deve satisfazer uma condição geométrica de tal maneira que o mecanismo ofereça duas translações. De acordo com a figura 5, exibe-se o conceito básico com detalhe completo da estrutura do mecanismo paralelo, com dois graus de mobilidade, cuja cadeia pode ser representada da seguinte maneira; 2 – RPR ou $RPRPR$.

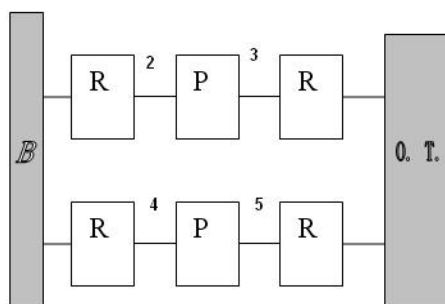


Fig 5 – Topologia do mecanismo

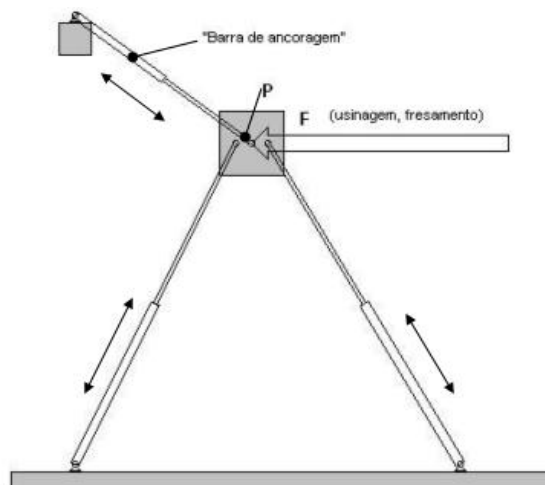


Fig. 6 – Diagrama cinemático da MCP com a barra de ancoragem.

3. MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL DA MCP: INTRODUÇÃO DA BARRA DE ANCORAGEM

O conceito da *barra de ancoragem* nasce com uma modificação estrutural da MCP; ou seja, a introdução da barra de comprimento variável que se opõe ao movimento acompanhando a ferramenta sem alterar a trajetória desejada do mecanismo. A *barra de ancoragem* de comprimento variável tem dupla função passiva intencional alterando a característica de rigidez local para complementar uma rigidez global desejada do sistema, de modo a assegurar melhoria na qualidade dimensional e de textura superficial quando da fabricação de um produto (fig. 6).

Dentre as diferentes formas construtivas para uma *barra de ancoragem*, optou-se por cilindro hidráulico de dupla ação, cuja função hidráulica é controlada por duas válvulas de controle de fluxo uma em cada cabeçote. Tanto na operação de avanço como na operação de retorno. Pelo controle do fluxo através das válvulas dosa-se a participação da *barra de ancoragem*, por exemplo, em operações de aproximação da ferramenta até a peça de trabalho, o curso trabalha no vazio, e, portanto a *barra de ancoragem* não possui nenhuma ação, é totalmente passiva. Entretanto quando entra em modo de operação de usinagem na interação com a peça de trabalho a *barra de ancoragem* passa a ser proporcionalmente ativa; conforme as forças de usinagem requeiram maior rigidez naquela operação específica.

4. MODELAGEM E ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

A modelagem é realizada admitindo-se que o seu comportamento estrutural seja o de uma treliça. Assim, para cada posição ocupada pela ferramenta realizou-se uma análise estática, considerando-se como carga externa, a força de corte pela interação de uma fresa cilíndrica com uma peça de trabalho. Adotamos a seção de uma barra simples de área equivalente à $A= 2000 \text{ mm}^2$, a força $F= 5 \text{ kN}$. O diagrama da figura 7 abaixo representa a estrutura estática sem barra (a) e com (b) *barra de ancoragem*.

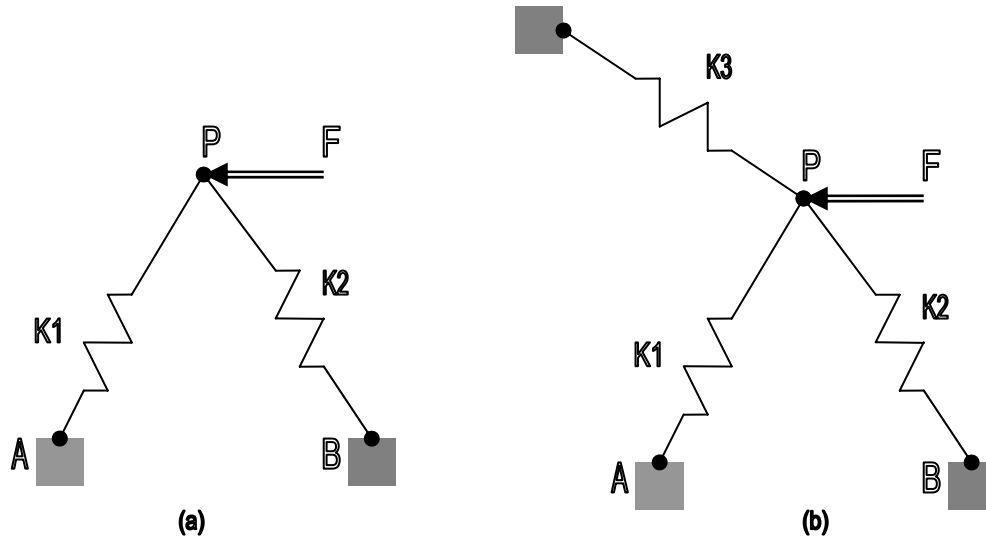


Fig. 7 – Modelo sem a ancoragem (a) e modelo com a barra de ancoragem (b)

Para análise dos deslocamentos, utilizamos o software “Ftool”^[7]. Para os modelos da Fig 7 (a) e Fig 7 (b) que correspondem, respectivamente, aos modelos sem *barra de ancoragem* e modelo com *barra de ancoragem*, definimos uma ordem para poses do órgão terminal dentro da sub área do espaço de trabalho. A varredura no sentido vertical foi definida de cima para baixo, enquanto que no sentido horizontal foi da esquerda para direita. Em cada ponto ocupado pelo órgão terminal, foi estabelecido um comprimento específico para os dois atuadores extensível, quando o modelo analisado era o da Fig 7 (a) e dois atuadores mais a *barra de ancoragem* quando o modelo era o da Fig 7 (b).

As posturas do órgão terminal (O.T.) em cada ponto sem empregar a força de usinagem F e ao mesmo tempo mostrando a força com a deformação na estrutura em azul, exibem as deformações no eixo-x – D_x e no eixo-y – D_y (fig.8). Sobre todos eles, a aplicação da força P foi na mesma intensidade e na mesma direção indicada.

5. RESULTADOS

Com aplicação das forças nos pontos previamente selecionados na posição vertical e na posição horizontal com o modelo sem e com *barra de ancoragem*, os pontos selecionados dentro do E.T. são identificados, conforme a figura 9(a) visão global dos pontos selecionados e 9(b) local. Através do emprego do software Ftool^[4] determinam-se os deslocamentos D_x e D_y causados pela ação da força F . Nas fig. 10 e 11, efetuamos como exemplo a análise da deformação respectivamente sem e com a *barra de ancoragem* da pose no. 3 com força horizontal equivalente a $F= -5 \text{ kN}$.

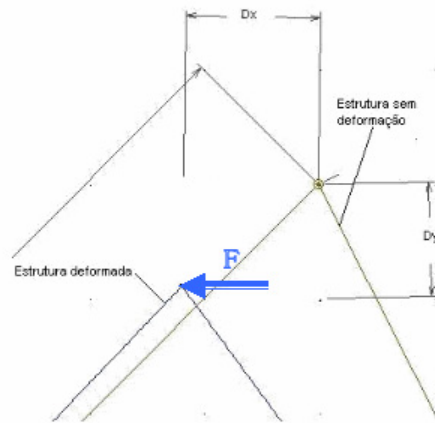


Fig 8 – Deformação dos pontos considerados do E.T.

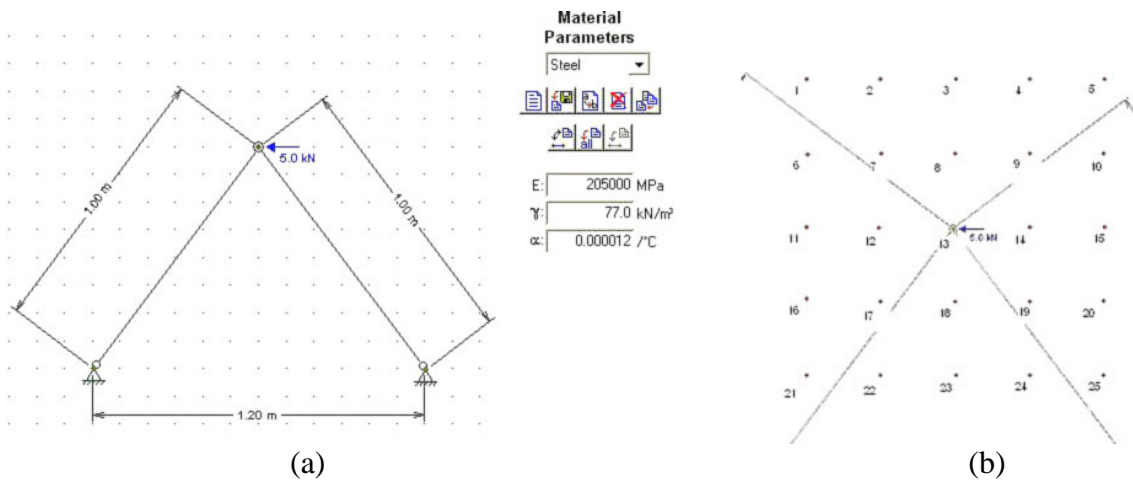


Fig.9 –Área com identificação dos Pontos (a) global (b) Sub área do local identificados

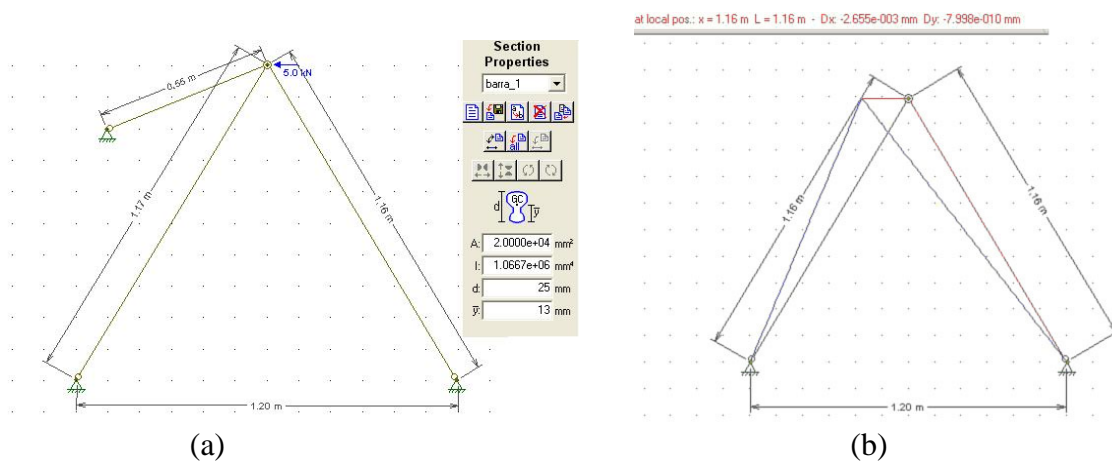


Fig.10 – Análise da pose No 3 da estrutura sem barra de ancoragem, (a) Modelo gerado pelo Ftool (b) Resultado após aplicação da carga

A distância das barras de comprimento variável na pose 3 foi de 1,16 metros para ambas as ativas e a distância para a **barra de ancoragem** de comprimento variável com 0,56 metros. Sem a **barra de ancoragem** obtivemos deformação de $D_x = -2655 \times 10^{-6}$ mm e $D_y = 0,0007998 \times 10^{-6}$ mm. Enquanto que com a barra obtivemos $D_x = -683,8 \times 10^{-6}$ mm e $D_y = 287,7 \times 10^{-6}$ mm. Os deslocamentos D_x e D_y representam o erro da trajetória de posicionamento da ferramenta causado pela força de corte da ferramenta F.

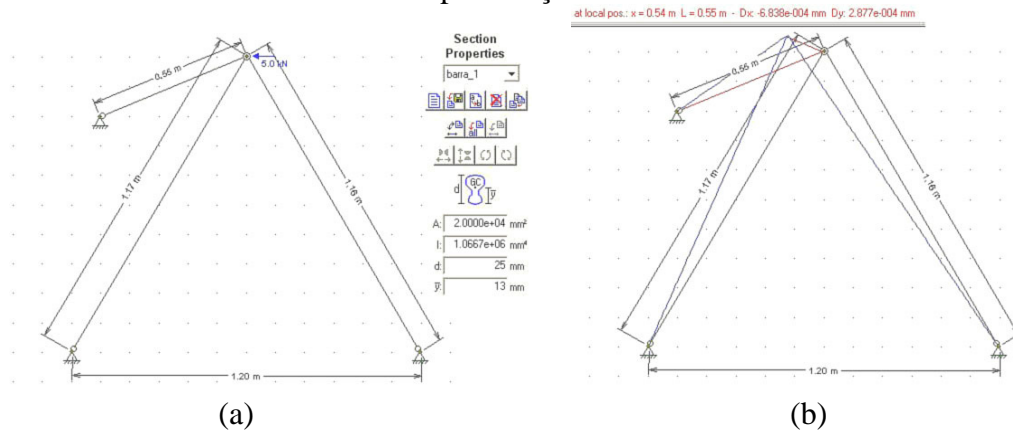


Fig.11 – Análise da pose No 3 da estrutura com barra de ancoragem.
 (a) Modelo gerado pelo Ftool (b) Resultado após aplicação da carga

Para análise da melhoria causada pela utilização da **barra de ancoragem** vamos analisar as poses verticais Nos. 3; 8; 13; 18; 23 e no sentido horizontal na seguinte ordem: Nos. 11, 12, 13, 14, 15. Com estes dados obtemos graficamente os seguinte resultados (fig.12 e 13)

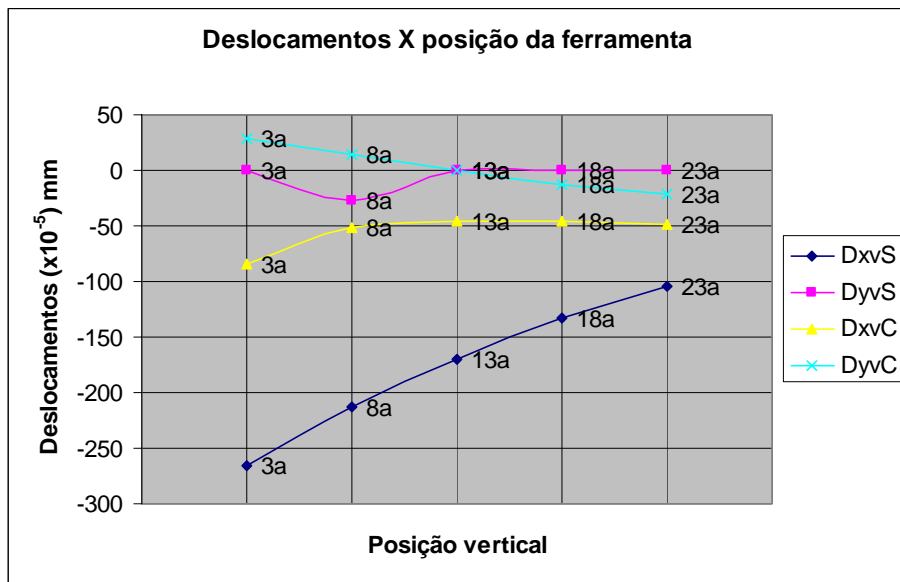


Fig. 12 –Deformações nos pontos de pose vertical

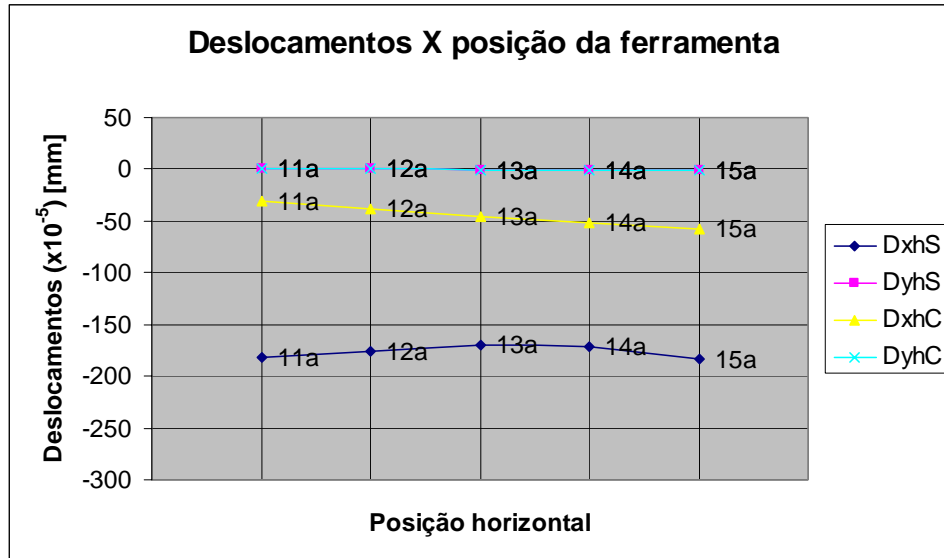


Fig. 13 – Deformações nos pontos de pose horizontal

O gráfico da figura 12 representa a maior oscilação dos valores de deslocamento nos pontos selecionados dentro da área de varredura vertical. Na pose 3 (a mais crítica), temos ganho de rigidez com aumento de 2,93 vezes quando comparada a estrutura com *barra de ancoragem* contra a estrutura sem *barra de ancoragem*. Na pose 23 (a menos crítica) demonstra um ganho na rigidez com aumento equivalente a 1,93 vezes quando comparada a estrutura com *barra de ancoragem* contra a estrutura sem *barra de ancoragem*.

O gráfico da figura 13 representa a menor oscilação dos valores de deslocamentos nos pontos selecionados dentro da área de varredura horizontal. Os posicionamentos na varredura horizontal tornam os alongamentos das barras do sistema (curso dos atuadores) menores. Assim, os alongamentos desde o ponto 11 até o ponto 15 requerem menor variação no comprimento do que a situação da varredura vertical. Esta configuração torna a rigidez entre os tipos de estruturas analisadas mais uniforme na varredura de todos os pontos em função da mesma força de usinagem e direção de usinagem.

Na pose 11, temos um ganho de rigidez com aumento em 6,2 vezes quando comparada a estrutura com *barra de ancoragem* contra a estrutura sem *barra de ancoragem*. Na pose 15, temos um ganho de rigidez com aumento em 3,14 vezes quando comparada a estrutura com *barra de ancoragem* contra a estrutura sem *barra de ancoragem*.

O gráfico da figura 12, além da significativa melhoria a partir da pose No 8 até a 23 a rigidez na direção-x sugere o atingimento de uma rigidez isotrópica, apenas adotando uma *barra de ancoragem* no sistema. Este fato é uma indicação que arranjos auxiliares podem melhorar aplicação em estruturas com soluções simples.

	Poses	Dxv	Dxh	Ganho
		Sem barra (μm)	Com barra (μm)	
a) Na figura 14	3	2,7	0,7	4
	23	1	0,5	2
b) Na figura 15	11	1,8	0,3	6
	15	1,8	0,5	3,5

Tabela 1 – Resumo dos valores críticos dos gráficos 12 e 13

6. DISCUSSÃO

Adotamos uma barra, cuja característica tais como E (modulo de elasticidade) e A (Área da secção adotada) não se alteraram e, entretanto mostraram significativos auxilio na rigidez do sistema em trabalhos futuros adotaremos motores atuadores no acionamento e um cilindro hidráulico na **barra de ancoragem**. Rearranjos na fixação na **barra de ancoragem** podem ser realizados com potencial melhoria no desempenho da rigidez do sistema durante um processo de usinagem. A instalação de um fuso na articulação da **barra de ancoragem** como se fosse uma barra seguidora controlada pode trazer grande progresso.

Durante a definição da rotina do processo de produção para se executar um produto, busca-se precisão uniforme em todos elementos gerados pela máquina no produto. As aplicações destes atributos devem ser atendidas ao longo de todo espaço de trabalho disponível para esta operação. Assim, especificamente para uma trajetória da ferramenta (horizontal ou vertical) podemos alterar as características da **barra de ancoragem** adotando-se válvulas de controle da retenção no fluxo do fluido hidráulico da **barra de ancoragem**. O controle da vazão pode trazer mudança na rigidez do sistema que atenda a um refinamento na rigidez requerida para um determinado processo de usinagem.

A variação da rigidez nos gráficos das figs. 12 e 13, com valores de deformação Dx e Dy, sugere a definição de uma precisão mínima desejada para uma determinada máquina.

Se a precisão desejada para um determinado produto é alcançada para uma máquina sem mudanças de suas características ela pode operar sem intervenção nas propriedades de sua estrutura. Entretanto, se na rotina do processo do produto outros elementos da peça exigem outras tolerâncias que requeiram maior precisão, então podemos adotar a **barra de ancoragem** ativa, utilizando-se o controle de sua rigidez com cilindros trabalhando com Fluidos Magneto – Reológicos (FMR) ^{[8] [9]}. A possibilidade da modulação fina do controle com campos magnéticos em fluido Magneto – Reológicos podem ser a resposta para usinagens de acabamentos finos. Há duas abordagens para serem estudadas como trabalhos futuros:

- a) Solução estrutural básica simplesmente adotando-se um cilindro hidráulico com controle de sua vazão com válvulas adotadas na hidráulica;
- b) Solução estrutural com controle das características internas do fluido de trabalho do cilindro dupla ação instalado como **barra antagônica** para controles em tempo real para confeccionar produtos de precisão e acabamentos complexos.

	K (kN/μm)	K (kN/μm)	Ganho
Pose	Sem barra	Com barra	
3	1,88	5,97	3,17
23	4,83	10,21	2,11
11	2,76	16,63	6,03
15	2,73	8,59	3,15

Tabela 2 – Ganho da rigidez global.

7. CONCLUSÃO

A arquitetura analisada foi para um mecanismo com cadeia RPRPR bidimensional plana. Utilizou-se apenas uma **barra de ancoragem**. Houve ganho na rigidez e o sistema foi projetado para resistir cargas na direção-x. Na varredura vertical obtemos resultados mais

significativos com melhoria da rigidez na ordem de 2,93 a 1,93 vezes maior quando comparada à estrutura com *barra de ancoragem* contra a estrutura sem *barra de ancoragem*. Na varredura horizontal obtemos resultados também mais significativos com melhoria da rigidez na ordem de 6,2 a 3,14 vezes maior quando comparada à estrutura com *barra de ancoragem* contra a estrutura sem *barra de ancoragem*.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Hess-Coelho, T.A., Raszl, G. “Desenvolvimentos e tendências em máquinas de cinemática paralela”. Máquinas e metais. ISSN 0025-2700. No. 481, p. 154-167, Fevereiro de 2006.
- [2] S. Lee, J. Lee, B. Yi, S. Kim, Y. Kwak “Optimization and experimental verification for the antagonistic stiffness in redundantly actuated mechanisms: a five-bar example”. Mechatronics, Volume 15, Issue 2, Pages 213-238
- [3] Valasek, M.; Sika, Z., Bauma, V. and Vampola, T., 2004, “The innovative potential of redundantly actuated PKM”, Proceedings of the 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chemnitz, April 20-21, IWU, 24, pp 365-383.
- [4] Kinkwan Choi Shilong Jiang Zexiang Li “Spatial stiffness realization with parallel springs using geometric parameters”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 18, No.3, 2002, pp 274-284.
- [5] D J Sanger, J Q Chen, S J Zhang, D Howard A general method for the stiffness analysis of manipulator mechanisms, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 214, Number 5 / 2000, pp. 673-685
- [6] Ftool – Two- Dimensional Frame Analysis Tool – Educational Version 2.11., Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro – PUC – Rio ,Department of Civil Engineering and Tecgraf/ PUC – Rio
- [7] G. Magnac, etal – Characterization of Magneto – Rheological Fluids For Actuators applications.Cedrat Technologies S.A. , Meylan, France
- [8] Gregory H. Hitchcock, et al – A New By- Pass, Fail- Safe, Magneto- Rheological Fluid Damper.University of Nevada, Reno, NV 89557, USA

EVALUATION OF POTENTIAL UTILIZATION OF ANTAGONIC CONTROLLED BARS IN PARALLEL KINEMATIC MACHINES (PKM)

Guilherme Raszl

Centro Universitário da FEI , UniFEI, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – bairro Assunção , CEP 09850-901 – São Bernardo do Campo, SP - C.P. 596, graszl@fei.edu.br

Tarcisio Antonio Hess Coelho

Departamento de Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, SP, CEP 05508-900, tarchess@usp.br

Abstract. *This paper proposes a structural modification by introducing an antagonistic bar in a planar parallel kinematic machine. The antagonistic bar produces some desirable benefits such as rigidity improvement and homogeneous distribution of rigidity inside the available workspace. These achievements definitely increase the overall precision of a parallel kinematic machine allowing it to reach higher performance levels comparable or even superior to conventional milling machines.*