



MODELAGEM GEOMÉTRICA E FUNCIONAL DE PLACAS DE TORNO PARA AUXILIAR A DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE PEÇAS EM SISTEMAS PRODUTIVOS

Ernesto Massaroppi Jr.

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica

massarop@sc.usp.br – São Carlos, SP, Brasil

Paulo C. Masiero

Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Departamento de Ciências de Computação e Estatística

masiero@icmc.sc.usp.br – São Carlos, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho apresenta um breve histórico dos Sistemas Flexíveis de Fabricação e discute um dos principais problemas encontrados nas suas implementações: verificar a possibilidade do fluxo de peças pelo sistema. Ainda hoje a verificação é realizada durante as paradas do sistema. Apresenta-se então um método que, baseado na descrição geométrica das placas de fixação de tornos, determina as diversas possibilidades de fixação da peça. Em um passo seguinte, definiu-se um índice que qualifica as possíveis fixações, levando-se em conta o acréscimo da carga de fixação para suportar a força de corte. Assim, pode-se determinar automaticamente as fixações mais viáveis por meio de sistema computacionais e utilizar essa informação diretamente para simular o fluxo da peça no Sistema Flexível de Fabricação.*

Palavras-chave: *Placa de fixação, Fluxo de peça, Modelo funcional.*

1. INTRODUÇÃO

As exigências do mercado consumidor da indústria metal mecânica dos anos 80, caracterizadas principalmente pelo aumento da complexidade dos produtos, pelo aumento da diversificação de seus tipos, bem como pela diminuição de sua vida útil, associada à necessidade da diminuição do tempo entre o pedido e a entrega, levaram à instalação de sistemas produtivos capazes de manufaturar lotes cada vez menores, com alta produtividade, qualidade e principalmente flexibilidade. A fim de se poder fabricar um maior espectro de peças, sem a necessidade de reconfiguração do sistema produtivo, as indústrias viram-se obrigadas a uma automação flexível de sua produção. Desde então, os chamados Sistemas Flexíveis de Fabricação (SFF) têm aumentado em importância e número de instalações (Weck *et al.*, 1987).

Nos anos seguintes, o desenvolvimento dos SFF foi caracterizado pelo acréscimo de unidades produtivas a eles agregados. Entretanto, a realização do fluxo de material através dos

SFF permaneceu desde o início, como sendo um problema mecânico, que abrange principalmente a configuração das interfaces mecânicas. O encadeamento de diferentes unidades produtivas, com o auxílio de equipamentos para manipulação, transporte, teste e/ou armazenamento, gerou requisitos, até mesmo normas, para a configuração das interfaces mecânicas, tanto do lado das máquinas quanto do lado dos meios produtivos (dispositivos de fixação e sistemas de apoio de peças, entre outros). Apesar das deficiências de padronização, a interligação de cada um dos componentes dos SFF tornou-se possível graças a trabalhos abrangentes de adaptação dessas interfaces (Weck *et al.*, 1990). Entretanto a verificação da possibilidade de realização do fluxo da peça

Ao contrário dos componentes dos SFF e dos meios produtivos por eles utilizados, as peças a serem produzidas não podem ser padronizadas. Além disso, deve-se considerar a variação de sua forma durante o processo produtivo. Como consequência, a verificação da possibilidade de realização do fluxo da peça continua sendo um grande problema (Kogan *et al.*, 1997, Gertosio *et al.*, 2000). Devido a essa dificuldade, as interfaces mecânicas entre os componentes do SFF, ou de seus meios produtivos, e a peça normalmente só podem ser verificadas durante os intervalos de funcionamento dos SFF.

Os anos 90 caracterizaram-se pela globalização do comércio, e os mercados que antes eram locais ou regionais, tornaram-se mercados mundiais. Com isso aumentou a quantidade de clientes, mas também a quantidade de fornecedores. A concorrência ficou ainda mais acirrada, exigindo que as reações da indústria metal mecânica às mudanças do mercado fossem cada vez mais rápidas.

Os softwares comerciais hoje existentes simulam cada vez com melhor qualidade o funcionamento de diversos componentes dos SFF, gerando até mesmo os comandos necessários (programas comando numérico para máquinas, robôs, etc.) para controle desses componentes. Os softwares utilizados são subdivididos de acordo com o tipo de componente simulado, apesar de em muitos casos considerarem de forma simplificada os demais componentes (por exemplo, a necessidade de espaço). Assim, pode-se evitar a colisão entre dois componentes do SFF e/ou seus meios produtivos, atuando diretamente sobre a peça, no instante em que esta é transferida entre eles.

Não são conhecidas soluções que considerem todas as interfaces mecânicas com a peça a ser produzida, durante a realização de seu fluxo pelo sistema produtivo, principalmente naqueles interligados de forma complexa. Portanto, para se poder utilizar completamente a flexibilidade de sistemas produtivos complexamente interligados, devem ser desenvolvidos métodos que, após a análise da seqüência de fabricação de uma peça, sejam capazes de apontar alternativas viáveis para sua fabricação, sem que para isso seja necessária a paralisação do sistema produtivo.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar um método capaz de simular o emprego de placas de fixação de tornos, levando em conta não só a geometria, mas também a funcionalidade das mesmas. Assim é possível obter-se as diversas alternativas de fixação da peça na placa do torno, ordenadas por um critério de qualidade. Com isso pode-se determinar a posição relativa entre a peça e o torno e, conseqüentemente, a localização espacial da peça, para que o sistema de alimentação e descarga da máquina possa atuar.

3. PLACA DE FIXAÇÃO

Durante o processo de fabricação as peças devem ser asseguradas em posição e orientação predefinidas. Nas máquinas operatrizes em que o equipamento de fixação é

rotativo, ele recebe o nome de placa de fixação. As placas de fixação são utilizadas principalmente em tornos e algumas vezes em retificadoras (Ganiyusufoglu, 1985).

As placas de fixação representam a interface mecânica entre o torno e a peça. Ela é composta por um corpo cilíndrico e por castanhas, geralmente em número de três, que podem movimentar-se na direção radial dentro do limite de um curso preestabelecido (Fig. 1). As castanhas possuem duas superfícies principais. A superfície de fixação age no sentido radial e é responsável pela centragem da peça. Com isso obtém-se o posicionamento em dois eixos de translação e a orientação nos três eixos de rotação. O posicionamento no terceiro eixo de translação, aquele na direção do eixo de rotação da placa de fixação, é garantido pela superfície de apoio. Normalmente as castanhas possuem mais de uma superfície de fixação e de apoio. Além delas, a superfície frontal da própria castanha ou a superfície frontal do corpo da placa podem também ser utilizadas como superfície de apoio. Da mesma forma a superfície mais interna da castanha pode também ser utilizada como superfície de fixação.

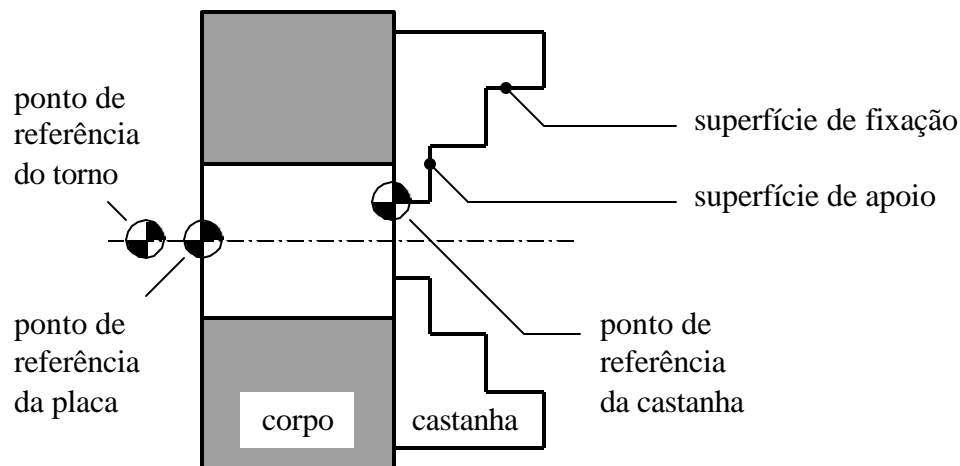


Figura 1 – Representação esquemática de uma placa de fixação

As placas são equipamentos rígidos, dificilmente adaptáveis a um grande espectro de peças. Essa adaptação está relacionada a custos relativamente elevados, muitas vezes impossibilitando a utilização economicamente viável em produções unitárias ou de pequenas séries. A falta de flexibilidade levou ao desenvolvimento de placas de fixação com a troca automática das castanhas com o auxílio de sistemas de manipulação (Ganiyusufoglu, 1988). As soluções utilizadas distinguem-se na maneira como é feita a troca. As castanhas podem ser trocadas uma a uma ou todas simultaneamente (Wagner, 1987).

Normalmente as superfícies de fixação e apoio pertencem a um único elemento. Com o objetivo de aumentar a flexibilidade e conseqüentemente economizar trocas de castanhas, foram construídos sistemas onde as duas superfícies fazem parte de peças distintas, que são comandadas separadamente. Michaelis (1982) mostra tanto uma construção em que a posição da superfície de apoio pode variar continuamente, como uma na qual a posição varia discretamente.

Hahner (1989) mostra um sistema em que a placa de fixação completa, com a peça a ser usinada já fixada, pode ser trocada, ao invés de trocar as castanhas. O custo de preparação é menor, caso a interface entre a placa de fixação e o torno seja prevista para uma troca rápida (Ganiyusufoglu, 1985). A vantagem desse sistema está, primeiro, na possibilidade de realizar a fixação e o afrouxamento de uma peça durante o tempo de usinagem de outra, e segundo, na precisão da centragem, que é maior que nos sistemas de troca de castanhas. A desvantagem está no custo para aquisição das diversas placas de fixação, para sua armazenagem e para administração das informações.

3.1 Modelo geométrico

O modelo geométrico da fixação de uma peça por meio de uma placa consiste basicamente dos dados geométricos. Todas as dimensões e distâncias de interesse devem ser conhecidas antes de verificar-se a possibilidade de fixação de uma determinada peça. Eles são mostrados na Figura 2. Os dados geométricos do corpo da placa são o seu diâmetro externo (D_{cp}) e interno (d_{cp}), sua largura (l_{cp}) e o curso total das castanhas (c_{cp}). Os dados geométricos da castanha consistem da sua altura (h_{ct}) e sua largura (l_{ct}), bem como da sua posição relativa ao curso do corpo da placa (p_{ct}). As informações geométricas da castanha só são completadas quando cada um de seus degraus está definido. As informações geométricas dos degraus são as suas coordenadas relativas à castanha, uma na direção da largura (p_l) e outra na direção da altura (p_h), e o raio de curvatura (R) da sua superfície de fixação. Complementando as informações geométricas, é também informada a possibilidade (ou não) de utilização da superfície interna da castanha como superfície de fixação (\blacktriangledown), bem como da superfície frontal do corpo da placa e da superfície frontal da castanha, como superfícies de apoio (\blacktriangleright).

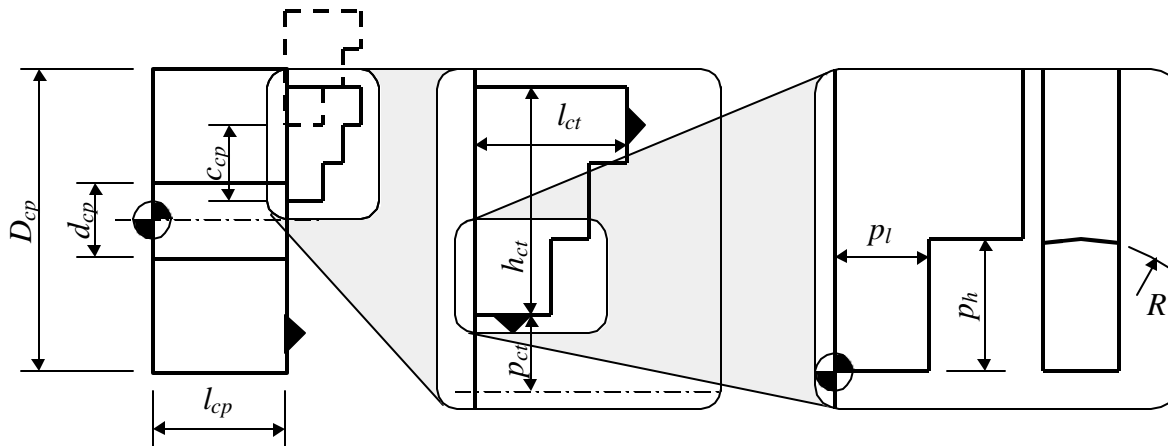


Figura 2 – Modelo geométrico da placa de fixação

A utilização do modelo geométrico dá-se ao confrontar cada possível par de superfície de apoio e superfície de fixação da placa com cada possível par de superfície plana (perpendicular ao eixo de simetria) e superfície cilíndrica da peça. Para realizar a fixação deve-se primeiro deslocar a castanha até que a posição da superfície de fixação coincida com o raio da superfície cilíndrica da peça. Posteriormente desloca-se a peça ao longo do eixo de simetria até que a superfície de apoio coincida com a superfície plana da peça. Como resultado obtêm-se possíveis posições relativas entre o corpo da placa, a castanha e a peça, que descrevem fixações geometricamente válidas. Determina-se o comprimento e o diâmetro de fixação e o comprimento de apoio, bem como uma possível obstrução ao processo de torneamento em regiões da peça próximas à fixação. A Figura 3 mostra diversos casos de fixações válidas.

Em contrapartida, diversos fatores podem determinar que a fixação é inválida. Entre eles destaca-se: falta de contato entre a superfície de fixação e a superfície cilíndrica da peça; falta de contato entre a superfície de apoio e a superfície plana da peça; interferência entre peça e castanha; interferência entre peça e corpo da placa; posição ocupada pela castanha fora dos limites de seu curso; posição ocupada pela castanha ultrapassando o limite da linha de centro, o que caracteriza a interferência entre as castanhas; etc.

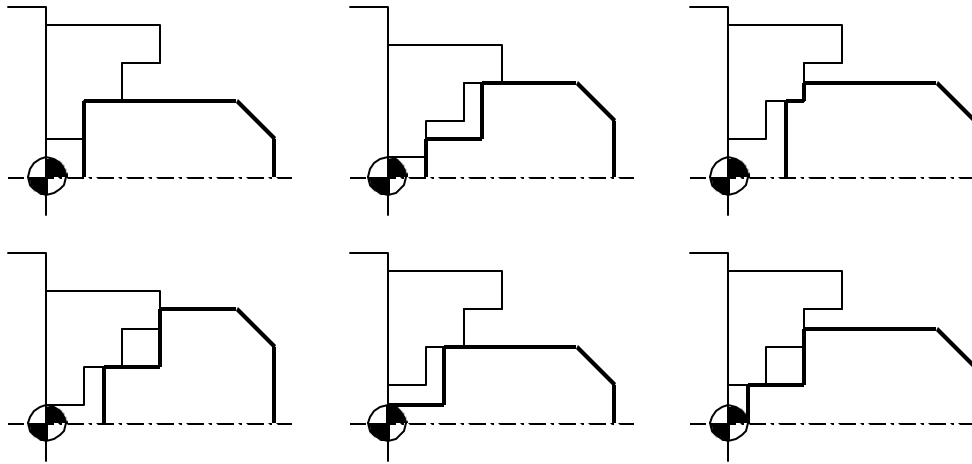


Figura 3 – Fixações válidas

3.2 Modelo funcional

O modelo funcional descreve a interação de esforços entre a castanha e a peça. De acordo com a diretriz VDI 3106 as possibilidades de contato entre castanha e peça podem ser divididas em: pelo centro, pelas bordas ou completo, em que o raio de curvatura da superfície de fixação da castanha é respectivamente maior, menor e igual ao raio da peça (VDI, 1983). Wagner (1987) adota, respectivamente, uma distribuição de pressão superficial elíptica, de acordo com a teoria de Hertz, constante e parabólica. Com isso ele pôde determinar a rigidez teórica de contato e da peça e comparar com valores experimentais. Os autores realizaram o tratamento teórico dos três casos, mas no escopo deste trabalho só será apresentado o caso em que o contato entre a castanha e a peça dá-se pelo centro.

A Figura 4a mostra uma seção transversal da peça, perpendicular ao eixo de simetria, na região de fixação por meio de uma placa de três castanhas, onde pode ser vista a rigidez radial da peça (k_{rp}), desde seu centro até o ponto de contato com a castanha e a rigidez de contato (k_c), em cada uma das três direções. Devido à simetria, pode-se afirmar que tanto a rigidez radial da peça como a de contato são iguais entre si em cada uma das direções.

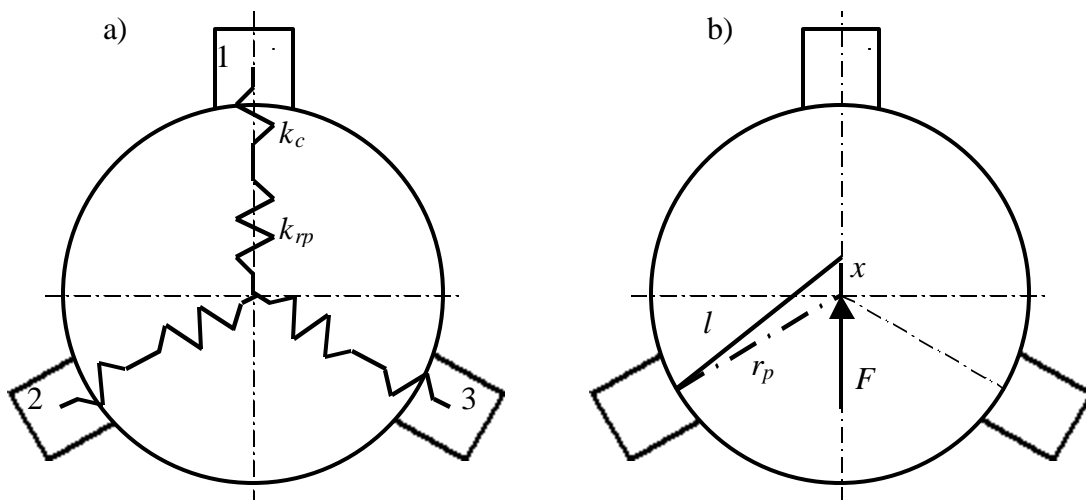


Figura 4 – Peça fixa na placa submetida a carga centrada

Ao aplicar-se uma carga F no ponto central ocorrerão deformações (Fig. 4b). Admitindo-se que a carga seja em sentido à castanha nº 1, e que o ponto central desloca-se nesse sentido

de um valor x , a distância l da nova posição do ponto de aplicação da carga até as castanhas nº 2 e 3 é dada pela Eq. (1), onde r_p representa o raio da peça.

$$l = \sqrt{3 \cdot r_p^2 / 4 + (r_p / 2 + x)^2} \quad (1)$$

Diferenciando-se a Eq. (1) em relação à variável x tem-se:

$$dl/dx = (r_p / 2 + x) / \sqrt{3 \cdot r_p^2 / 4 + (r_p / 2 + x)^2} \quad (2)$$

No limite, onde se inicia a deformação, ou seja $x \rightarrow 0$, o diferencial da Eq. (2) assume o valor 0,5 (meio). Esse resultado indica que uma carga externa aplicada provoca um acréscimo da carga de contato na castanha nº 1 igual ao dobro do decréscimo provocado nas castanhas nº 2 e 3. Como as variações das cargas sobre as castanhas nº 2 e 3 formam um ângulo de 120° entre si e possuem o mesmo módulo, a resultante da soma das variações sofridas por essas cargas possui também o mesmo módulo e seu sentido é contrário à variação de carga na castanha nº 1. Portanto, 2/3 da carga externa aplicada é suportada pela castanha nº 1 e as castanhas nº 2 e 3 são descarregadas de um valor correspondente a 1/3 da carga externa.

Define-se densidade de carga q como sendo a relação entre a carga Q aplicada em um intervalo pequeno do contato e o comprimento desse intervalo L .

$$q = \lim_{L \rightarrow 0} Q/L \quad (3)$$

No caso de uma carga externa F aplicada no centro da peça (Fig. 4b) e no meio da largura de contato L , a variação da densidade de carga na castanha mais carregada é dada por:

$$\Delta q_F = 2 \cdot F / 3 \cdot L \quad (4)$$

Caso a carga aplicada não seja no sentido de uma das castanhas, ela pode ser decomposta em outras duas defasadas de 60°, onde uma será em sentido a uma das castanhas e a outra em sentido oposto a uma segunda castanha. A análise segue os mesmos passos e verifica-se facilmente que o caso crítico é quando a carga atua em sentido a uma das castanhas.

Ao realizar-se uma usinagem, a solicitação crítica é aquela aplicada na extremidade da peça (z_{ext}), no ponto mais distante do centro de gravidade da fixação (z_{CG}) (Fig. 5a).

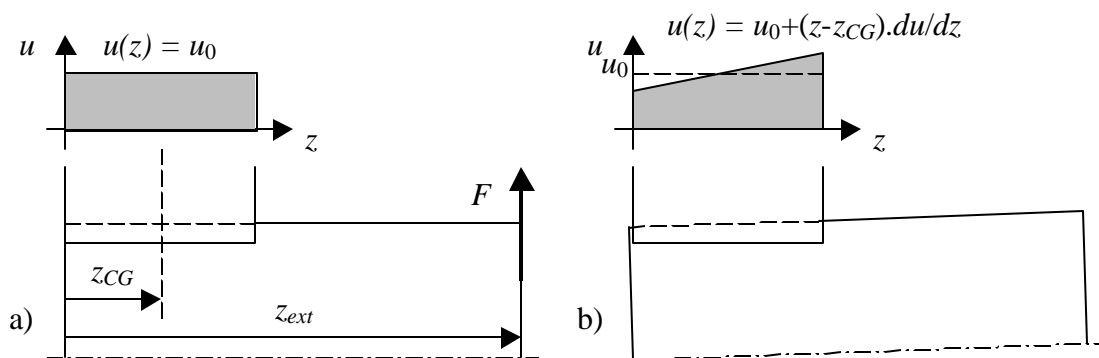


Figura 5 – Peça fixa na placa submetida a momento de flexão

A carga F aplicada na extremidade pode ser decomposta em uma carga aplicada no centro de gravidade do contato e em um momento de flexão M . A análise para a carga no centro do contato é aquela dada pela Eq. (4). O momento de flexão é dado pela Eq. (5):

$$M = F \cdot (z_{ext} - z_{CG}) \quad (5)$$

Como a rigidez radial da peça é significativamente maior que a rigidez do contato, a peça praticamente não se deforma. Ela sofre um movimento de corpo rígido de rotação em torno do centro de contato (Fig. 5b). A deformação sofrida pelo sistema sob a ação do momento de flexão M está concentrada na região do contato, dada pela aproximação entre peça e castanha, segundo a teoria de Hertz. A variação da aproximação u ao longo do contato é então dada por:

$$u(z) = u_0 + (z - z_{CG}) \cdot du/dz \quad (6)$$

Segundo a teoria de Hertz, a pressão máxima p no contato linear entre dois cilindros de diâmetros D_1 e D_2 (negativo para superfícies côncavas), largura L e módulo de elasticidade E , submetidos a uma carga Q , é dada por (Niemann, 1981):

$$p = \sqrt{Q \cdot E \cdot (1 + D_1/D_2) / 2,86 \cdot D_1 \cdot L} \quad (7)$$

A teoria de Hertz não quantifica a aproximação u entre os dois cilindros, mas Kunert apresenta a seguinte relação (Niemann, 1981):

$$u = 0,398 \times 10^{-4} \cdot Q^{0,925} / L^{0,85} \quad (8)$$

Admitindo-se que a força de fixação aplicada pela placa seja Q_0 e que a aproximação correspondente seja u_0 , pode-se linearizar a Eq (8) em torno desse ponto, tendo-se o valor da carga Q dada por:

$$Q = Q_0 + dQ/du \cdot (u - u_0) \quad (9)$$

A partir da aproximação u de cada ponto de contato, dado pela Eq. (6), calcula-se a densidade de carga q correspondente. Mostra-se então, que a variação máxima da densidade de carga observada na castanha mais carregada, para equilibrar o momento de flexão aplicado, é dada por:

$$\Delta q_M = q_{\max} - q_0 = 4 \cdot M / L^2 \quad (10)$$

Ao submeter uma peça presa em uma placa de fixação à carga externa F , em sua extremidade haverá um acréscimo da densidade de carga entre a castanha e a peça Δq , dado pela composição dos efeitos da carga centrada (Eq. (4)) e do momento de flexão (Eq. (10)).

Para cada uma das possíveis fixações da peça pela placa de fixação define-se o Índice de fixação (I_f) para uma força de usinagem unitária, dado pela razão entre o acréscimo da densidade de carga provocado pela força de usinagem e a própria força de usinagem (Eq. (11)). A fixação mais segura para a peça durante o processo de usinagem é aquela que apresentar o menor índice de fixação.

$$I_f = (\Delta q_M + \Delta q_M) / F \quad (11)$$

4. CONCLUSÃO

Apresentou-se um método que, baseado nos dados de uma placa de fixação e da peça a ser usinada, pode determinar as possíveis fixações e um índice que mede a qualidade de cada uma delas, baseado no acréscimo da densidade de carga no contato entre a castanha e a peça. Com isso pode-se determinar automaticamente as fixações mais viáveis e utilizar esta informação em sistemas computacionais. Efetuando-se uma análise semelhante para outros meios produtivos (garras de robôs, paletes de transporte, etc.), que entram em contato direto com a peça a ser produzida, bem como se efetuando uma análise da transferência da peça entre os respectivos meios produtivos, pode-se determinar automaticamente, dentro de um sistema computacional, qual a possibilidade de realização do fluxo de peças, bem como com que qualidade ele pode ser realizado.

O método acima descrito foi implementado, tanto para o contato pelo centro, como para os demais citados e não apresentados, bem como para fixação interna da peça. Já se implementou também parte da modelagem geométrica e funcional de outros meios produtivos, bem como a modelagem da transferência da peça entre eles. Os resultados até então obtidos são promissores e induzem os autores a concluir que em breve será possível propor um método para determinar automaticamente o fluxo de uma peça em Sistemas Produtivos, baseado na possibilidade de manipulação da peça.

REFERÊNCIAS

- Ganiyusufoglu, Ö.S., 1985, Wirtschaftliche Nutzung flexibler Fertigungszellen am Beispiel der Drehbearbeitung. Dissertation, TU Berlin.
- Ganiyusufoglu, Ö.S., 1988, Flexible Drehzellen als autonome Fertigungsinseln. In: 5. Europäische Kongreßmesse für technische Automation "KommTech", ed M. Weck, 7-10 Juni, Essen, Deutschland.
- Gertosio, C., Mebarki, N. and Dussauchoy, A., 2000, Modeling and simulation of the control framework on a flexible manufacturing system. International Journal of Production Economics. n. 64, pp 285-293.
- Hahner, W., 1989, Werkstücke und Werkzeug sicher und präzise spannen. Werkstatt und Betriebe, vol. 122, n. 12, pp. 1067-1070.
- Kogan, K., Khmel'nitsky, E., Shtub, A. and Maimon, O., 1997, Optimal flow of flexible manufacturing systems: Setup localization by an iterative procedure. International Journal of Production Economics. n. 51, pp 37-46.
- Michaelis, D., 1982, Rechnerunterstützte Konstruktion von Funktionssystemen zur flexiblen Handhabung rotationssymmetrischer Werkstücke. Dissertation, TU Berlin.
- Niemann, G., 1981, Maschinenelemente, vol 1, Springer Verlag, Berlin.
- VDI 3106, 1983, VDI-Richtlinie 3106. Ermittlung der zulässigen Drehzahl von Drehfutter (Backenfutter). Juli, VDI-Verlag, Düsseldorf, Deutschland.
- Wagner, H. D., 1987, Spannkraftverlust beim Drehen unter Beachtung der radialen Verformung und Steifigkeit von Werkstücken. Dissertation, TH Darmstadt.
- Weck, M. *et al.*, 1987, Bausteine flexibler Fertigungssysteme. in: Produktionstechnik: Auf dem Weg zu integrierten Systemen. Vortrag 2.1 zum Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, Mai, VDI Verlag, Düsseldorf, Deutschland, pp. 119-164.
- Weck, M. *et al.*, 1990, Realisierung des Materialflusses in integrierten Systemen: das Schnittstellenproblem. in: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Vortrag 3.2 zum Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, Mai, VDI Verlag, Düsseldorf, Deutschland, pp. 309-347.

GEOMETRICAL AND FUNCTIONAL MODELING OF LATHE CHUCKS TO AID THE DETERMINATION OF THE PARTS FLOW IN PRODUCTION SYSTEMS

***Abstract.** This work presents a brief historical of Flexible Manufacturing Systems and discusses one of the major problems found in its implementations: to verify the possibility of parts flow through the system. This verification is still done with the system still standing. Therefore a method is presented based on the geometric description of the lathe chucks, that determines several possibilities of part holding. In a following step, it is defined an index that qualifies the possible holdings, taking into account the increment of the holding load to support the cutting force. Thus, it can be determined the viable holdings automatically by means of a computational system and to use that information directly to simulate the part flow in a Flexible Manufacturing System.*

***Keywords:** Lathe chuck, Part flow, Functional model.*