



## UM MÉTODO DE SELEÇÃO DE DIMENSÕES DE FERRAMENTAS DE CORTE PARA USINAGEM DE CAVIDADES EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS COM CNC

**Leandro Costa de Oliveira**

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia,  
Depto. de Fabricação e Projeto de Máquinas - 97105-900 - Santa Maria, RS, Brasil

**Marcos de Sales Guerra Tsuzuki**

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica/Mecatrônica  
Av. Mello Moraes, 2231 – 05508-900 – São Paulo, SP, Brasil

***Resumo.** A usinagem em máquinas-ferramentas com CNC permitiu um grande avanço por possibilitar a obtenção de geometrias mais complexas. Existem algumas estratégias para geração do caminho de corte, sendo que, geralmente, considera-se somente uma ferramenta para a determinação da trajetória. Entretanto, as máquinas atuais oferecem a possibilidade de troca automática de ferramentas, o que indica o uso de mais de uma ferramenta visando a redução do tempo de usinagem. Diante das diversas aplicações das máquinas CNC, destaca-se usinagem de cavidades  $2 \frac{1}{2} D$  pelo grande número de peças que apresentam tal geometria, além da utilização deste tipo de procedimento no desbaste de geometrias de forma livre em planos de corte. O método baseia-se na utilização de estratégias de usinagem pré-definidas, como zigzag (usinagem paralela a uma direção) e offset (usinagem equidistante ao contorno), e determina a melhor combinação de dimensões de ferramentas para minimizar o tempo total da operação de usinagem. As trajetórias são geradas e os tempos de usinagem, somados aos tempos de posicionamento e troca de ferramentas, são tabelados para, com o uso de programação dinâmica, definir o conjunto de ferramentas que proporciona o menor tempo total de usinagem.*

***Palavras-chave:** Seleção de ferramentas de corte, Usinagem de cavidades, Usinagem CNC.*

### 1. INTRODUÇÃO

A usinagem em máquinas-ferramentas com Comando Numérico Computadorizado (CNC) tornou-se um grande recurso na produção de peças mecânicas. A flexibilidade e precisão proporcionada por estes equipamentos associada à capacidade de trabalhar geometrias mais complexas, de forma programada e repetitiva, tem contribuído para a difusão de seu uso.

Este desenvolvimento produzido pelo avanço da indústria eletrônica e da informática está promovendo, há alguns anos, uma verdadeira revolução na fabricação. A utilização de sistemas computacionais de auxílio ao projeto (CAD – *Computer-Aided Design*) e à fabricação (CAM – *Computer-Aided Manufacturing*) já são indispensáveis, somados a outros

sistemas de bancos de dados, gerenciamento de projetos e produção, análise de tensões, planejamento de processos, dentre outros.

Tratando-se especificamente de processos de fabricação por usinagem, destaca-se além da flexibilidade de produção, o uso de magazines para troca automática de ferramentas o que reduziu consideravelmente os tempos totais de usinagem.

A geração da trajetória da ferramenta, ou caminho de corte, na usinagem de uma determinada peça, pode ser realizada com o uso de sistemas computacionais desenvolvidos para este fim, entretanto, em sua maioria, são consideradas estratégias padronizadas de usinagem com o uso de uma única ferramenta. Por esta razão, busca-se neste trabalho, apresentar um método de seleção de ferramentas visando reduzir ainda mais o tempo de usinagem. Este estudo baseia-se na utilização de determinadas estratégias de usinagem e na aplicação de um método para identificar, de um conjunto de ferramentas disponíveis, quais e qual combinação permitem um menor tempo de fabricação.

Muitos pesquisadores tem se interessado por este tema. Bala & Chang (1991) afirmaram que a dimensão da ferramenta é um dos fatores que mais afetam o tempo usinagem e desenvolveram, então, uma proposta de trajetória para usinagem de cavidades 2 ½ D usando duas ferramentas.

Lee *et al.* (1992) e Oliveira (1997), trabalhando com superfícies de forma livre, também consideraram o uso de duas ferramentas, sendo uma para desbaste e outra para acabamento. Para cada etapa foram utilizadas ferramentas de geometria específica, sendo de extremidade cilíndrica no desbaste em planos de corte e de extremidade esférica no acabamento.

Veeramani & Gau (1997) propuseram, em dois artigos, uma metodologia para seleção de um conjunto ótimo de ferramentas para usinagem de cavidades 2 ½ D. Tratando inicialmente de cavidades triangulares, e posteriormente, com cavidades prismáticas de cantos arredondados, propuseram uma estratégia de duas fases sendo a primeira de cálculo do tempo de usinagem e a segunda de obtenção do conjunto ótimo de ferramentas, usando programação dinâmica.

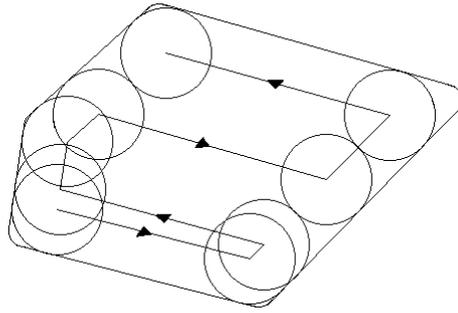
## **2. USINAGEM DE CAVIDADES**

Autores como Held (1991), consideram que cerca de 80 % das operações de usinagem na fabricação de peças mecânicas podem ser realizadas através de usinagem 2 ½ D, que é um tipo de usinagem caracterizada por uma movimentação em planos perpendiculares à ferramenta, ou seja, movimentos em dois eixos mantendo o terceiro fixo. Tratando-se de cavidades de forma livre, observa-se que a estratégia de desbaste em planos de corte é bastante utilizada. Neste caso, cada plano de corte é trabalhado como uma cavidade 2 ½ D. As estratégias mais usuais são: usinagem em ziguezague e usinagem equidistante ao contorno (*offset*), que são apresentadas, neste trabalho, para a usinagem da região interna das cavidades. Para a usinagem dos cantos utiliza-se uma trajetória em ziguezague.

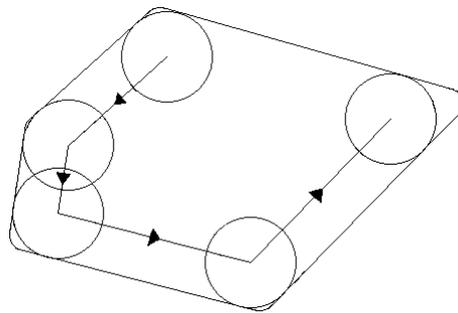
### **2.1 Usinagem em Ziguezague**

A usinagem em ziguezague é realizada através de movimentos paralelos a uma determinada direção (Fig. 1). Wang *et. al.* (1988), verificaram que para contornos poligonais convexos, os movimentos paralelos à maior aresta proporcionaram um menor comprimento da trajetória da ferramenta.

Jamil (1997), verificou que neste tipo de trajetória torna-se necessário a remoção das saliências deixadas pela ferramenta. Isto é realizado com movimentos paralelos às arestas. Portanto, além do movimento em ziguezague existe um movimento equidistante ao contorno para remoção do material deixado (Fig. 2).



**Figura 1 - Trajetória inicial em ziguezague.**



**Figura 2 - Trajetória final equidistante ao contorno.**

## 2.2 Usinagem em *Offset*

De acordo com Tsuzuki & Moscato (1995), a estratégia de usinagem paralela ao contorno utiliza o conceito de deslocar elementos do contorno paralelamente para definir o caminho de corte.

Esta estratégia pode ser dividida em duas técnicas principais:

- a) contorno das reentrâncias, e;
- b) diagramas de Voronoi.

Os algoritmos que implementam a primeira técnica estão concentrados na definição de *offsets* sucessivos a partir do contorno original. O problema principal nesta técnica é a necessidade de se determinar as auto-intersecções.

Vários autores propuseram métodos para obtenção do caminho de corte equidistante ao contorno. Ferreira, 1993, propôs uma técnica que ele denominou por “shrinking”, que é baseada na teoria de grafos. Cota *et al.* (1993,1995), propuseram e aprimoraram uma técnica baseada em subcontornos que são deslocados paralelamente ao contorno original.

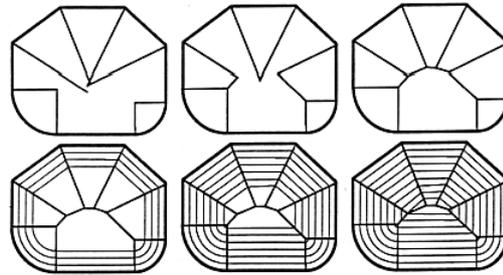
Persson (1978), propôs uma eficiente técnica baseada em duas etapas. Inicialmente, toda reentrância é dividida em sub-áreas independentes e, em seguida, o caminho de corte é criado diretamente a partir das sub-áreas. A idéia principal do método é que um ponto entre dois segmentos de caminho de corte consecutivos possui a mesma distância mínima de dois elementos de contorno e está a uma distância maior de qualquer outro elemento de contorno. Considerando o conjunto de pontos que possuem esta propriedade obtemos um grafo conhecido como Diagrama de Voronoi. Desta forma, o algoritmo para gerar o caminho de corte fica assim:

- 1) construa um segmento de offset elementar a partir do elemento de contorno;

2) interseccione o segmento de offset elementar com os bissetores que delimitam a área de Voronoi associada ao segmento de offset.

3) conecte os segmentos de offset de forma a produzir o caminho de corte.

A Fig. 3 ilustra os passos citados acima.



**Figura 3 - Geração do Caminho de Corte com o uso do Diagrama de Voronoi.**

### **3. MÉTODO PROPOSTO**

Esta solução está baseada na proposta inicial de Veeramani & Gau (1997) que fundamenta-se na determinação do tempo total de usinagem, formado pelo tempo de usinagem, tempo de troca de ferramentas e tempo de posicionamento.

#### **3.1 Sistematização da Usinagem**

A idéia básica deste método é ter um procedimento sistematizado para a usinagem. Deve-se definir esta seqüência de operações para uma correta aplicação da metodologia.

Para o caso de cavidades em  $2\frac{1}{2} D$  usa-se apenas ferramentas (fresas) de extremidade cilíndrica, devido à base plana da cavidade e às paredes paralelas ao eixo da ferramenta. A usinagem inicia-se com a maior ferramenta possível para uma maior remoção de material e após, em ordem decrescente de diâmetro, troca-se em função da necessidade até a menor dimensão disponível, que deverá ser de raio menor ou igual ao raio do canto da cavidade. Cada ferramenta selecionada deve usinar o material deixado pela ferramenta anterior.

#### **3.2 Obtenção dos Tempos**

Considerando uma usinagem sistematizada, os tempos de usinagem, posicionamento, e troca de ferramenta são utilizados para a seleção das ferramentas. O tempo de usinagem é obtido através do comprimento da trajetória executada pela ferramenta com uma velocidade de avanço específica. O tempo de troca de ferramenta tem um valor médio considerado, já que para as diversas posições do *magazine* este valor pode variar. O tempo de posicionamento é determinado pelo comprimento do movimento da ferramenta com a velocidade de posicionamento em marcha rápida.

#### **3.3 Aplicação da Programação Dinâmica**

De acordo com Novaes (1978), a Programação Dinâmica não se caracteriza como um tipo de algoritmo ou processo de otimização. É na realidade, um enfoque especial, um método lógico, que pode ser aplicado a um grande número de problemas dos mais variados tipos. Um dos seus conceitos básicos é o de **estágio**, que indica um instante de tempo representativo da

evolução do processo em análise. Portanto, é um método que busca a obtenção de uma seqüência de pontos ótimos no processo analisado, ou seja, um ponto ótimo em cada **estágio**.

Para aplicar a Programação Dinâmica, cada ferramenta de corte representa um **estado**, e cada uso da ferramenta representa um **estágio**. O estágio inicial (0) corresponde ao material bruto. O método consiste de  $N$  estágios, onde  $N$  representa o número total de ferramentas de corte de dimensões distintas, no intervalo considerado. O último estágio deverá corresponder ao uso da ferramenta de corte cuja diâmetro é igual ao dobro do raio do canto da cavidade.

O relacionamento recursivo que é característico deste problema pode ser representado por:

$$P_n(i, j) = C(i, j) + P_{n-1}^*(i) \quad (1)$$

sendo  $1 \leq i \leq N, j > i \geq n-1, n > 1$ .

$$P_{n-1}^*(i) = \text{Min}\{P_{n-1}(k, i)\} \quad (2)$$

sendo  $0 \leq k \leq i-1$ .

$P_n(i, j)$  é o tempo total de usinagem do material bruto (estágio 0) para o estágio  $n$ , onde a ferramenta usada (estado) no estágio  $n-1$  é  $i$  e a ferramenta usada (estado) no estágio  $n$  é  $j$ , e  $P_{n-1}^*(i)$  representa o mínimo tempo de usinagem para atingir o estado  $i$  no estágio  $n-1$ .

$C(i, j)$  representa o tempo associado com o uso da ferramenta de corte  $j$  (incluindo o tempo de troca de ferramenta) para usinar a área não usinada depois do uso da ferramenta  $i$ .

Com os tempos calculados, monta-se uma tabela (Tabela 1) com os tempos acumulados e determina-se, partindo da última ferramenta, qual o menor tempo encontrado. Com este valor identifica-se qual estado é executado. De forma decrescente, segue-se este procedimento, identificando em função do estado, qual a ferramenta deve anteceder até chegar à primeira ferramenta.

**Tabela 1. Tabela de Programação Dinâmica**

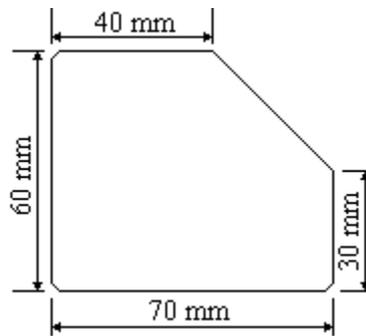
Ferramenta Estágio	Maior			Menor	
	1	2	...	N-1	N
0	$P_1(0,1)$	$P_2(0,2)$	...	$P_{N-1}(0,N-1)$	$P_N(0,N)$
1		$P_2(1,2)$	...	$P_{N-1}(1,N-1)$	$P_N(1,N)$
2				$P_{N-1}(2,N-1)$	$P_N(2,N)$
-					
N-3					$P_N(N-3,N)$
N-2					$P_N(N-2,N)$
N-1					$P_N(N-1,N)$
<b><math>P^*(i)</math></b>					

#### 4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Visando um melhor entendimento do método exposto, são apresentados dois exemplos de aplicação. O primeiro usa a estratégia de usinagem em ziguezague e o segundo demonstra a estratégia em *offset*.

#### 4.1 Exemplo 1 – Usinagem em Ziguezague

Considere uma cavidade 2 ½ D mostrada na Fig. 4.



**Figura 4 - Exemplo de usinagem em ziguezague.**

Para usiná-la, 4 ferramentas com os seguintes diâmetros estão disponíveis:  
16 mm, 10 mm, 8 mm e 6 mm.

Sendo o tempo de troca de ferramenta de 5 s e diferentes velocidades de avanço para cada ferramenta, como apresentado na segunda linha da Tabela 2, então os tempos de usinagem, em segundos, são apresentados na Tabela 2:

**Tabela 2 – Tempo de Usinagem para cada ferramenta, em segundos**

Ferr	1	2	3	4
Diam mm	16 mm	10 mm	8 mm	6 mm
	40 cm/min	30 cm/min	20 cm/min	10 cm/min
0	53,12	172,90	452,05	1368,73
1		22,48	41,33	97,89
2			13,51	41,79
3				23,08

Aplicando a Programação Dinâmica, os seguintes tempos acumulados são determinados:

**Tabela 3 – Tempos Acumulados para Programação Dinâmica, em segundos**

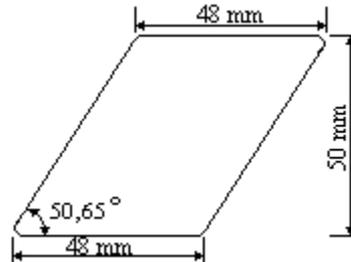
Ferr	1	2	3	4
Diam mm	16 mm	10 mm	8 mm	6 mm
	40 cm/min	30 cm/min	20 cm/min	10 cm/min
0	<b>53,12</b>	172,90	452,05	1368,73
1		<b>80,60</b>	99,45	156,01
2			<b>99,10</b>	127,39
3				122,18
Min	<b>53,12</b>	<b>80,60</b>	<b>99,10</b>	<b>122,18</b>

Do resultado, verifica-se a indicação do uso de todas as quatro ferramentas disponíveis para usinar esta cavidade no tempo mínimo. Na coluna da ferramenta de 6 mm, o tempo

mínimo encontrado foi de 122,18 s, identificado no estágio 3. Desta forma, a ferramenta que a precede é a ferramenta 3, com 8 mm, cujo tempo mínimo acumulado é 99,10 s. Sucessivamente, verifica-se a necessidade do uso de todas as ferramentas disponíveis.

#### 4.2 Exemplo 2. – Usinagem em *Offset*

Considere uma cavidade  $2 \frac{1}{2} D$  mostrada na Fig. 5.



**Figura 5 - Exemplo de usinagem em offset.**

Para usiná-la, 4 ferramentas com os seguintes diâmetros estão disponíveis:  
10 mm, 8 mm, 6 mm e 4 mm.

Sendo o tempo de troca de ferramenta de 5 s e diferentes velocidades de avanço para cada ferramenta, como apresentado na segunda linha da Tabela 4, então os tempos de usinagem, em segundos, são apresentados na Tabela 4:

**Tabela 4 – Tempo de Usinagem para cada ferramenta, em segundos**

Ferr	1	2	3	4
Diam Mm	10 mm	8 mm	6 mm	4 mm
	30 cm/min	20 cm/min	10 cm/min	8 cm/min
0	71,85	143,68	413,98	856,73
1		9,58	28,28	50,11
2			16,01	34,70
3				19,32

Aplicando a Programação Dinâmica, os seguintes tempos acumulados são determinados:

**Tabela 5 – Tempos Acumulados para Programação Dinâmica, em segundos**

Ferr	1	2	3	4
Diam Mm	10 mm	8 mm	6 mm	4 mm
	30 cm/min	20 cm/min	10 cm/min	8 cm/min
0	<b>71,85</b>	143,68	413,98	856,73
1		86,43	<b>105,13</b>	126,96
2			107,44	126,13
3				<b>124,45</b>
Min	<b>71,85</b>	86,43	<b>105,13</b>	<b>124,45</b>

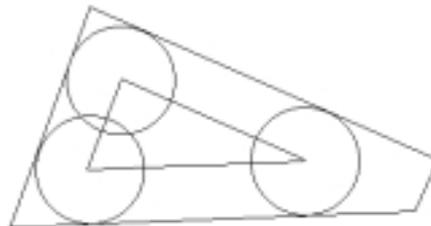
Do resultado, verifica-se a indicação do uso de três das quatro ferramentas disponíveis para usinar esta cavidade no tempo mínimo. Na coluna da ferramenta de 4 mm, o tempo mínimo encontrado foi de 124,45 s, identificado no estágio 3. Desta forma, a ferramenta que a precede é a ferramenta 3, com 6 mm, cujo tempo mínimo acumulado é 105,13 s, que identifica como estágio anterior ao de número 1, com a ferramenta de 10 mm, cujo tempo é de 71,85. Portanto, neste caso a ferramenta de 8 mm não é utilizada.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados ilustram o método de seleção de ferramentas para usinagem de cavidades em máquinas com CNC. Cabe ressaltar que estes resultados independem da forma da cavidade ou do método de usinagem escolhido, sendo função dos tempos calculados para cada estágio. No primeiro caso mostrado foram selecionadas todas as 4 ferramentas disponíveis e no segundo caso o uso de apenas 3 proporciona o menor tempo.

Nestes exemplos mostrados, é muito grande a diferença de resultados entre o uso de somente uma ferramenta, no caso a de menor diâmetro, e o conjunto de ferramentas selecionado como melhor opção. Na primeira situação a diferença foi de 100 % -  $(122,18/1348,73) * 100 = 90,94$  % e na segunda, foi de 100 % -  $(124,45/856,73) * 100 = 85,47$ %.

As cavidades apresentadas nos exemplos acima são convexas e as ferramentas disponíveis tem acesso para usinagem da região interna. Nestes casos, a usinagem é realizada em duas etapas: usinagem interna e usinagem dos cantos, sendo a primeira etapa realizada com a maior ferramenta e a segunda etapa com o uso de uma ou mais ferramentas. Para os casos onde não é possível a usinagem interna com todas as ferramentas, ou seja, casos em que exista uma ou mais ferramentas que não possam ser deslocadas por toda a região interna da cavidade (Fig. 6), há a necessidade de utilizar operações booleanas de polígonos para a identificação do material não removido pela ferramenta anterior. Assim, é possível determinar o caminho de corte da próxima ferramenta para, de forma acumulada, obter o tempo total de usinagem naquela situação.



**Figura 6 - Situação onde há a necessidade de operações booleanas para identificar o material não removido.**

## 6. CONCLUSÕES

O método apresentado demonstra ser muito importante na seleção de ferramentas para usinagem de cavidades em máquinas com CNC. Com isso, pode-se otimizar esta tarefa visando a redução do tempo de usinagem. Apesar dos vários parâmetros envolvidos na determinação do tempo total de usinagem, o método é bastante simples e flexível. Observa-se que o procedimento pode ser aplicado a outros tipos de usinagem CNC, já que basta sistematizar as etapas de usinagem e calcular corretamente os tempos acumulados.

Como continuidade do trabalho, pode-se experimentar a aplicação em cavidades não convexas, de contorno formado por curvas paramétricas e até mesmo em superfícies de forma livre.

### ***Agradecimentos***

Este trabalho foi suportado pela FAPESP – proc. 98/11310-9. O primeiro autor foi parcialmente suportado pelo PICDT/UFSM/CAPES e o segundo autor foi parcialmente suportado pelo CNPq – proc. 300224/96-6.

### **REFERÊNCIAS**

- Bala, M. & Chang, T.-C., 1991, Automatic cutter selection and optimal cutter path generation for prismatic parts, *International Journal Of Production Research*, vol. 29, n. 11, pp. 2163-2176.
- Cota, F. E., Queiroz, A. A., Gonçalves Filho, E. V., 1993, Usinagens de cavidades em formas arbitrarias em máquinas-ferramentas de comando numérico, *Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 93*, Brasília, vol. III, pp. 1599-1602.
- Cota, F. E., Gonçalves Filho, E. V., 1995, Otimização de Cavidades em Formas “Arbitrarias”, *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 95*, 12-15 de dezembro, Belo Horizonte.
- Ferreira, J. C. E., 1993, An algorithm for generating the tool paths for machining complex 2 ½ D components, *Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM 93*, Brasília, vol. III, pp. 1587-1590.
- Held, M., 1991, A geometry-based investigation of the tool path generation for zigzag pocket machining, *Visual Computer*, vol. 7, pp. 296-308.
- Jamil, A. T. M., 1997, A computerized algorithm for milling non-convex pockets with numerically controlled machines, *International Journal of Production Research*, vol. 35, n. 7, pp. 1843-1855.
- Lee, Y. S., Choi, B. K. and Chang, T.-C., 1992, Cut Distribution and Cutter Selection for Sculptured Surface Cavity Machining, *International Journal of Production Research*, vol. 30, n. 6, pp. 1447-1470.
- Novaes, A. G., 1978, *Métodos de Otimização: aplicações aos transportes*, Edgar Blücher, São Paulo.
- Oliveira, L. C. de, 1997, *Um Sistema de Geração de Trajetórias de Ferramentas em 3 Eixos*, Dissertação de Mestrado, CPGCC da UFRGS, Porto Alegre-RS.
- Persson, H., 1978, NC machining of arbitrarily shaped pockets, *Computer-Aided Design*, vol. 10, n. 3, pp. 169-174.
- Tsuzuki, M. S. G. & Moscato, L. A., 1995, Diagramas de Voronoi e sua Utilidade na Determinação do Caminho de Corte de Reentrâncias Complexas, *Boletim Técnico do Depto. de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP*.
- Veeramani, D. & Gau, Y.-S., 1997, Selection of an optimal set of cutting-tools for a general triangular pocket, *International Journal of Production Research*, vol. 35, n. 9, pp. 2621-2637.
- Veeramani, D. & Gau, Y.-S., 1997, Selection of an optimal set of cutting-tool sizes for 2 ½ D pocket machining, *Computer-Aided Design*, vol. 29, n. 12, pp. 869-877.
- Wang, H. S., Chang, H. and Wysk, R. A., 1988, An analytical approach to optimize NC tool path planning for face milling flat convex polygonal surfaces, *IIE Transactions*, vol. 20, n. 3, pp. 325- 332

## **A METHOD OF CUTTING-TOOLS SIZE SELECTION FOR POCKET MACHINING IN CNC MACHINE TOOLS**

**Summary.** *The machining with CNC machine-tools allowed a great advance for making possible the attainment of more complex shapes. There are several strategies for generation of the tool path and, generally, only one tool is considered for the determination of the path. However, the current machines offer the possibility of automatic change of tools, what indicates the possibility using of more than one tool aiming, using this property, the machining time can be reduced. In front of the diverse applications of CNC machines, 2 ½ D pockets machining is distinguished for the great number of parts that present such geometry, The method deal with the use of standardized machining strategies, as zigzag (parallel machining to a line) and offset (equidistant machining to the contour), and determines the best combination of tools dimensions to minimize the total time of the machining operation. The paths are generated and the machining time, added to the time of thread and tools change, are tabulated for, with the use of dynamic programming, to define the set of tools that will imply in smaller total machining time.*

**Keywords:** *Cutting-tools selection, Pocket machining, CNC machining.*