



CONTRIBUIÇÕES PARA OTIMIZAÇÃO DA USINAGEM DE CAVIDADES 2 ½D

Leandro Costa de Oliveira

Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia – Dep. de Eng. Mecânica –
Campus Universitário – Santa Maria – RS – CEP 97105-900

leandro@inf.ufsm.br

Marcos de Sales Guerra Tsuzuki

Universidade de São Paulo – Escola Politécnica – Dep. de Eng. Mecatrônica e Sistemas
Mecânicos – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP
05508-900

mtsuzuki@usp.br

***Resumo.** Este trabalho apresenta algumas contribuições para otimização da usinagem de cavidades 2 ½ D. A estratégia de usinagem considerada é dividida em usinagem interna e usinagem dos cantos. A usinagem interna é realizada através de trajetórias equidistantes ao contorno (offset) obtidas através do uso de Diagrama de Voronoi e a usinagem dos cantos segue o mesmo princípio equidistante ao contorno. Como o Diagrama de Voronoi é parametrizado, o espaçamento entre as trajetórias pode variar entre os valores do raio e do diâmetro da ferramenta utilizada, sendo que em alguns casos torna-se necessário a utilização de novas trajetórias sobre os bissetores a fim de remover material não usinado. Assim, pode-se determinar a melhor situação de espaçamento entre trajetórias visando a otimização do processo. Através do uso de Programação Dinâmica, pode-se também identificar a melhor combinação de dimensões das ferramentas disponíveis para remover o material da cavidade em menor tempo. As implementações propostas são comparadas com outras estratégias de usinagem e os resultados demonstram as vantagens de sua utilização.*

***Palavras-chave:** usinagem de cavidades, usinagem CNC, programação CNC.*

1. INTRODUÇÃO

A usinagem de cavidades 2 ½ D em máquinas-ferramentas com Comando Numérico Computadorizado (CNC) tornou-se um grande recurso na produção de peças mecânicas devido à flexibilidade e precisão proporcionada por estes equipamentos. Além disso, a capacidade de trabalhar geometrias mais complexas, de forma programada e repetitiva, proporcionou a difusão de seu uso. 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, o objetivo desta pesquisa foi analisar algumas propostas de otimização do caminho de corte visando demonstrar como tais medidas podem contribuir na redução do tempo de usinagem. Os testes realizados são apresentados indicando quais alternativas contribuem para a otimização da usinagem deste tipo de cavidades.

2. OTIMIZAÇÃO DA USINAGEM DE CAVIDADES 2 ½ D

Entende-se por otimização, a busca do melhor resultado na realização de determinada tarefa. Tratando-se de usinagem, certamente contribuem para esta otimização a correta escolha dos seguintes itens:

- seleção de ferramentas (material, afiação);
- determinação de velocidades de corte e avanço;
- condições de sujeição da peça;
- uso de fluidos de corte.

No caso de usinagem de cavidades 2 ½D, pode-se listar outras indicações para alcançar este objetivo:

- a) redução do comprimento da trajetória da ferramenta, seja em usinagem, como em posicionamento, explorando estratégias de usinagem;
- b) uso de um conjunto maior de ferramentas visando um melhor aproveitamento;
- c) redução do número de comandos, o que pode ser realizado, quando possível, trocando a combinação de alguns movimentos lineares por um movimento em arco circular. Isso promove além da redução de memória consumida, uma diminuição nas acelerações e desacelerações dos eixos de posicionamento.

O primeiro item trata das estratégias de movimentação da ferramenta e o segundo do uso de mais ferramentas de dimensões distintas, o que pode contribuir tanto na remoção de maior volume de material em situações de desbaste quanto no melhor acabamento com aplicação de ferramentas menores em regiões que necessitem. Estes aspectos serão discutidos com maior detalhamento na próxima seção.

O terceiro item se aplica preferencialmente à usinagem de superfícies, onde ocorrem muitas trocas de direção em movimentos relativamente curtos, configurando um grande volume de comandos. Uma alternativa a ser considerada é a possibilidade de utilizar interpolações circulares para que movimentos em arcos possam substituir um conjunto de movimentos lineares. Tal possibilidade foi inicialmente proposta por Meek & Walton (1992) e posteriormente aprimorada por Yeung & Walton (1994), considerando o uso de curvas chamadas de “biarcos” para aproximar movimentos lineares a arcos *splines*. Uma outra proposta foi apresentada por Vickers & Bradley (1992) onde o objetivo era reduzir os movimentos lineares na usinagem de superfícies através do uso de interpolações circulares. Os casos estudados apresentaram, em média, uma redução de 5:1, o que tem forte influência não só no tamanho dos programas, como também no tempo perdido nas acelerações e desacelerações.

3. ALTERNATIVAS PROPOSTAS

A abordagem apresentada neste trabalho baseia-se inicialmente na proposta de Veeramani & Gau (1997), de considerar a usinagem em 2 etapas: usinagem interna e usinagem de cantos. Esta proposta de sistematizar a usinagem de cavidades 2 ½D permitiu a implementação de algumas propostas que serão detalhadas a seguir.

3.1 Usinagem Interna

A usinagem 2 ½D caracteriza-se por uma movimentação da ferramenta em um plano limitado pelo contorno da cavidade. Assim, todo o tratamento de geração do caminho de corte baseia-se na forma deste contorno. Existem várias estratégias de movimentação da ferramenta, sendo as mais usuais a de trajetórias eqüidistantes ao contorno (*offset*) e de trajetórias paralelas a uma direção (*zigzag*). Este segundo método exige após a trajetória em *zigzag* a geração de uma trajetória eqüidistante ao contorno para remover material não removido nas mudanças de direção. Por esta razão, neste trabalho, foi considerado o método de trajetórias eqüidistantes ao

contorno (*offset*). Este método, pode ser implementado baseado em duas técnicas principais: contorno das reentrâncias e diagramas de Voronoi, sendo que neste estudo considerou-se a segunda alternativa.

O Diagrama de Voronoi, ilustrado na Fig. (1), é uma ferramenta de geometria computacional que foi inicialmente apresentada matematicamente por Voronoi (1908) *apud* Held (1991). Entretanto, sua utilização na usinagem com CNC ficou mais popular através da proposta de Persson (1978) que implementou um sistema computacional para geração do caminho de corte de cavidades 2 ½D arbitrárias. Sua proposta é 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. O Diagrama de Voronoi consiste num conjunto de pontos que possuem a seguinte característica: dividem a área interna da cavidade (*pocket*) em sub-áreas chamadas regiões de Voronoi. Os lugares dos pontos que definem estas regiões são os bissetores de pares de elementos de contorno. Estes bissetores também são chamados de limites de Voronoi e são constituídos de pontos que equidistam de uma distância mínima de dois lados e guardam uma distância maior do resto dos elementos de contorno.

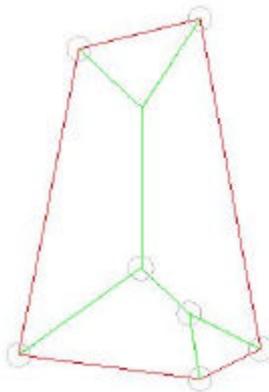


Figura 1. Exemplo de Diagrama de Voronoi.

O espaçamento entre as trajetórias equidistantes ao contorno pode variar até o diâmetro da ferramenta. O uso de valores menores ou iguais ao raio da ferramenta garantem a remoção total do material apenas com trajetórias em *offset*. Porém, este afastamento pode ser maior e trazer alguns benefícios. Stemmer (1992) argumenta que com valores de espaçamento maiores que o raio tem-se o impacto inicial da ferramenta absorvido pela face (superfície de saída) e não pelo gume (aresta de corte), como ocorre em valores de espaçamento menores, conforme Fig. (2). Isto contribui com a vida da ferramenta.

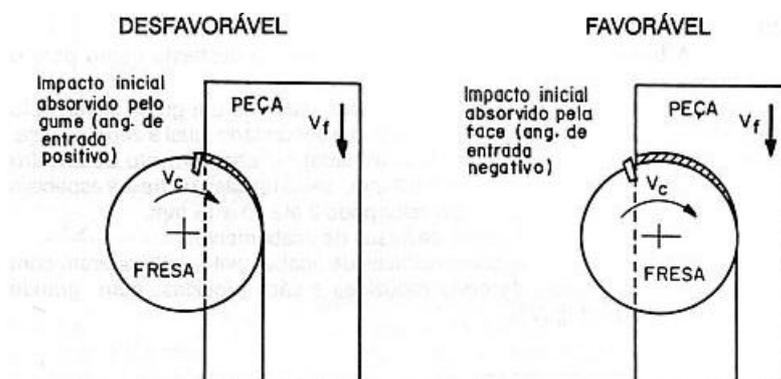


Figura 2. Impacto inicial na fresagem frontal (Stemmer, 1992).

De acordo com Oliveira & Tsuzuki (2000), a utilização de maior espaçamento entre as trajetórias pode necessitar a geração de trajetórias posteriores sobre os bissetores, entretanto, tal medida ainda é vantajosa em função da redução do comprimento do caminho de corte obtida com o aumento do espaçamento.

3.2 Usinagem de Cantos

Esta etapa caracteriza-se pela remoção do material não usinado com as ferramentas maiores até a dimensão que configure o arredondamento do canto da cavidade. Visando uma sistematização deste procedimento, Veeramani & Gau (1997), propuseram uma usinagem em ziguezague e posteriormente um movimento equidistante ao contorno do canto para a remoção das saliências, como mostrado na Fig. (3).

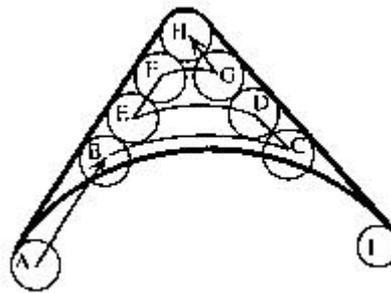


Figura 3. Usinagem dos Cantos (Veeramani & Gau, 1997).

O movimento tem a seqüência A-B-C-D-E-F-G-H, depois uma retração até A e posteriormente a usinagem entre A-H-I.

Também nesta etapa observa-se a vantagem de realizar todos os movimentos equidistantes ao contorno e desta forma, sugere-se o uso desta estratégia de movimentação culminando com uma trajetória sobre o bissetor para a remover o material restante, conforme Fig. (4).

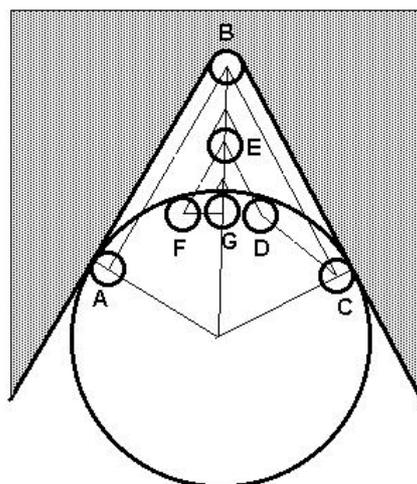


Figura 4. Nova Proposta de Usinagem de Cantos.

Na abordagem proposta, a seqüência de movimentação da ferramenta é A-B-C-D-E-F-G-B. Deste modo, observa-se uma trajetória sem retrações ou movimentos em vazio. As posições da ferramenta são determinadas de forma equidistante ao contorno, sendo que D, F e G são obtidos

através da interseção entre o movimento paralelo ao limite da cavidade e a circunferência que representa a área usinada pela ferramenta maior. Os pontos A e C são obtidos na posição da tangente entre a circunferência da ferramenta maior e o limite do contorno.

Buscando identificar a melhor situação de usinagem de cantos, ambas estratégias foram implementadas e diversas combinações de diâmetros de ferramentas e dimensões angulares dos cantos foram testadas, sendo os resultados apresentados em tabelas comparativas, Tab. (1) e Tab. (2), e em um gráfico apresentado na Fig. (5).

Tabela 1 - Exemplo com D = 20 mm e d = 2 mm.

Ângulo	Offset	Veeramani	% pró Offset
20	296,5	332,2	12,06%
30	184,7	203,6	10,25%
40	127,3	140,7	10,53%
50	95,7	104,6	9,32%
60	73,2	78,2	6,77%
70	56,8	60,9	7,32%
80	46,4	46,0	-0,84%
90	37,2	39,7	6,68%
100	28,7	34,2	19,14%
		Média =	9,03%

Tabela 2 - Exemplo com D = 4 mm e d = 2 mm

Ângulo	Offset	Veeramani	& pró Offset
20	10,4	11,3	8,83%
30	6,6	7,5	13,46%
40	4,6	5,5	18,39%
50	3,5	4,3	23,80%
60	2,7	3,5	29,90%
70	2,1	2,9	37,01%
80	1,6	2,4	45,53%
90	1,3	2,0	56,07%
100	1,0	1,7	69,51%
		Média =	33,61%

Os resultados demonstram que o Método Equidistante ao Contorno (*Offset*) apresentou menor comprimento de corte para usinagem dos cantos comparando-o com a proposta de Veeramani & Gau (1997).

3.3 Seleção Otimizada de Ferramentas de Corte

De acordo com Oliveira & Tsuzuki (1999), a sistematização das estratégias de usinagem permite a aplicação de um método de seleção de ferramentas de corte, baseado em programação dinâmica. Este método possibilita a escolha, dentre um determinado conjunto de ferramentas, de quais e qual seqüência de uso garante um menor tempo de usinagem. O método é bastante simples e de fácil implementação.

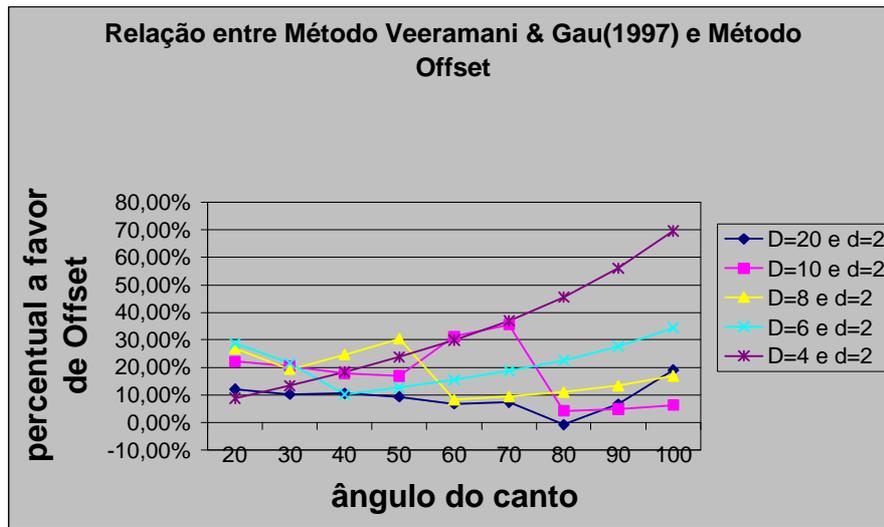


Figura 5. Relação entre Métodos de Usinagem de Cantos.

4. RESULTADOS

Um sistema computacional foi implementado com as propostas de otimização relatadas neste trabalho e nesta seção é apresentado um exemplo na Fig. (6) para ilustrar os resultados obtidos.

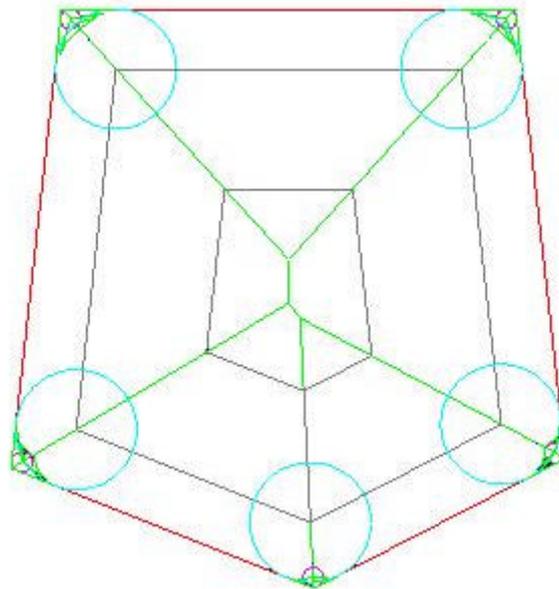


Figura 6. Exemplo de Usinagem de Cavidade 2 1/2 D.

Para usinagem desta cavidade estão disponíveis as ferramentas de diâmetro 20 mm, 16 mm, 12 mm, 8 mm, 4 mm e 2 mm. A Tabela (3) apresenta os valores do comprimento do caminho de corte (mm), determinado para esta cavidade com as ferramentas disponíveis.

Tabela 3. Comprimento do Caminho de Corte em mm.

Raio.ferr (mm)	10	8	6	4	2	1
Estág/ferr	1	2	3	4	5	6
0	123,13	175,16	229,89	342,64	672,07	1339,64
1		203,03	153,29	127,47	158,59	224,33
2			151,11	109,49	116,50	162,46
3				100,61	76,40	104,01
4					54,75	58,25
5						27,37

Considerando os valores de velocidade de avanço para as ferramentas existentes, tem-se uma nova tabela com os tempos acumulados para a usinagem da cavidade. Com estes dados, é possível determinar quais ferramentas proporcionam um menor tempo de usinagem.

Tabela 4. Tempos de Usinagem Acumulados, em segundos.

Raio.ferr (mm)	10	8	6	4	2	1
Vel avanço (mm/s)	2	2	2	2	1	1
Estág/ferr	1	2	3	4	5	6
0	61,56	87,58	114,95	171,32	672,07	1339,64
1		168,08	143,21	130,30	225,16	290,90
2			168,14	147,33	209,08	255,04
3				170,25	196,35	223,96
4					190,05	193,55
5						217,42
Min	61,56	87,58	114,95	130,30	190,05	193,55

De acordo com os valores calculados, observa-se a seleção das ferramentas de 20 mm, 8 mm e 2 mm para uma melhor situação visando a redução do tempo de usinagem.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As situações apresentadas ilustram algumas possibilidades de redução do tempo de usinagem. Observa-se que o aumento do espaçamento entre as trajetórias é uma alternativa vinculada diretamente às condições de corte, ou seja, à relação da potência da máquina e material de ferramenta e peça.

A nova abordagem da usinagem dos cantos também pode proporcionar redução do caminho de corte, além da eliminação da retração da ferramenta.

O uso da programação dinâmica possibilitou a seleção ótima das ferramentas que devem ser utilizadas para a obtenção do menor tempo de usinagem.

6. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS

- Held, M., 1991, “On the Computational Geometry of Pocket Machining”, Springer-Verlag, 178p.
- Oliveira, L. C. de, Tsuzuki, M. de S. G., 1999, “Um método de seleção de dimensões de ferramentas de corte para usinagem de cavidades em máquinas com CNC”, Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM'99, Águas de Lindóia - SP.
- Oliveira, L. C. de, Tsuzuki, M. de S. G., 2000, “Aspectos da Implementação do Diagrama de Voronoi e sua Aplicação na Geração do Caminho de Corte para Cavidades 2 ½D”, Anais do 1º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2000, Natal - RN.
- Persson, H., 1978, “NC machining of arbitrarily shaped pockets”, Computer-Aided Design, v. 10, n. 3, pp. 169-174.
- Stemmer, C. E., 1992, “Ferramentas de Corte II”, Editora da UFSC, Florianópolis – SC, 314 p.
- Veeramani, D., Gau, Y.-S., 1997, “Selection of an optimal set of cutting-tools for a general triangular pocket”, International Journal of Production Research, v. 35, n. 9, p. 2621-2637.
- Vickers, G. W., Bradley, C., 1992, “Curved surface machining through circular arc interpolation”, Computers in Industry, v. 19, p. 329-337.
- Wang, H. S., Chang, H., Wysk, R. A., 1988, “An Analytical Approach to Optimize NC Tool Path Planning for Face Milling Flat Convex Polygonal Surfaces”, IIE Transactions, v. 20, n. 3, p. 325- 332.
- Yeung, M. K., Walton, D. J., 1994, “Curve fitting with arc splines for NC toolpath generation”, Computer-Aided Design, v. 26, n. 11, p. 845-849.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

CONTRIBUTIONS FOR OPTIMIZATION OF THE 2 ½ D POCKETS MACHINING

Leandro Costa de Oliveira

Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia – Dep. de Eng. Mecânica – Campus Universitário – Santa Maria – RS – CEP 97105-900

leandro@inf.ufsm.br

Marcos de Sales Guerra Tsuzuki

Universidade de São Paulo – Escola Politécnica – Dep. de Eng. Mecatrônica e Sistemas Mecânicos – Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP 05508-900

mtsuzuki@usp.br

***Abstract.** This work presents some contributions for optimization of the 2 ½ D pocket machining. The machining strategy considered is divided in internal machining and corners machining. The internal machining is carried through equidistant paths to the contour (offset) gotten through the use of Voronoi Diagram and the corner machining the same follows equidistant principle to the contour. As the Voronoi Diagram is parametric, the spaces enters the paths can vary enters the values of the ray and the diameter of the used tool, being that in some cases the use of new paths becomes necessary on the bisectors in order to remove material not machined. Thus, the best situation of spaces between paths can be determined aiming at the optimization of the process.*

Through the use of Dynamic Programming, the best combination of dimensions of the available tools can also be identified to remove the material of the pocket in lesser time. The implementations proposals are compared with other machining strategies and the results demonstrate the advantages of its use.

Keywords. *Pocket machining, CNC machining, CNC programming.*