

INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE USINAGEM NA MANUFATURA DE MOLDES E MATRIZES.

Saulo Castellari Pereira

Universidade Metodista de Piracicaba - SCPM - Rodovia Santa Bárbara /Iracemápolis, Km1 - 13450-000 - Santa Bárbara d'Oeste, SP - scpereira@unimep.br

Prof. Dr.-Ing. Klaus Schützer

Universidade Metodista de Piracicaba - SCPM - Rodovia Santa Bárbara /Iracemápolis, Km1 - 13450-000 - Santa Bárbara d'Oeste, SP - schuetzer@unimep.br

MSc. Eng. André Luis Helleno

Universidade Metodista de Piracicaba - SCPM - Rodovia Santa Bárbara /Iracemápolis, Km1 - 13450-000 - Santa Bárbara d'Oeste, SP - alhelleno@unimep.br

1 INTRODUÇÃO

O aumento das exigências do projeto industrial, buscando formas cada vez mais harmônicas para a apresentação de um produto, somado ao desenvolvimento dos métodos e softwares para o modelamento e manipulação de superfícies complexas, assim como a redução dos custos de hardware, fez com que o uso da Tecnologia CAD/CAM se intensificasse no desenvolvimento do produto⁽¹⁾.

Dentro desse conceito, a manufatura de moldes e matrizes vem ganhando espaço de destaque na medida em que a economia mundial avança em direção à redução de lotes, grande diversidade de produtos e principalmente a exigência de redução do tempo de lançamentos de novos produtos.

No entanto, as aplicações destas Tecnologias encontram grandes dificuldades na indústria, uma vez que novos fatores surgem como variáveis no processo de manufatura⁽²⁾. Dentre estas variáveis, a estratégia de usinagem destaca-se por representar o percurso da ferramenta, sendo com isso, responsável pelo tempo de usinagem, exatidão geométrica e pelo acabamento superficial que irão compor as características do produto para as etapas subsequentes.

Dentro da Tecnologia CAD/CAM/CNC, a manufatura do produto é realizada através da geração do modelo geométrico num sistema CAD e a transferência do mesmo para um sistema CAM, onde o programador fornecerá os dados da manufatura, resultando nas trajetórias da ferramenta.

Após a geração da trajetória da ferramenta, um pós-processador interno do sistema CAM criará o Programa NC em função de todas as trajetórias da ferramenta, que será interpretado pelo CNC da máquina-ferramenta em movimentos⁽³⁾.

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa a investigação da influência das estratégias de usinagem como, por exemplo, o acabamento superficial além do tempo de usinagem e programação do sistema CAM, aplicados no desenvolvimento do produto. Para isso, será utilizado um sistema CAD/CAM na geração de Programas NC para o Centro de Usinagem Discovery 760 e apropriar conhecimento prático das estratégias de usinagem e programação no sistema CAM Unigraphics NX2 para manufatura de sólidos por meio de um corpo de prova provido de superfícies complexas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir tais objetivos foram utilizadas apostilas didáticas do sistema CAD/CAM que acompanham o software e apostila desenvolvida pelo Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura SCPM⁽⁴⁾. Além disso, foi feito o treinamento no Centro de Usinagem CNC

Discovery 760 e o estudo da programação do Comando Numérico Siemens 810D, utilizando os manuais do fabricante⁽⁵⁾.

O estudo prático do sistema CAD/CAM sucedeu-se por meio do modelamento do corpo de prova com dimensões de 100x100x70 mm, conforme ilustrado na Figura 1, sendo usinado em seguida, em aço AISI-SAE 1045 no Centro de Usinagem Discovery disponível na UNIMEP, a fim de simular as condições práticas da manufatura. A análise dos resultados foi realizada através de comparação das estratégias de corte utilizadas nos corpos de prova usinados, por meio dos seguintes parâmetros:

- tempo de usinagem real;
- tempo de programação CAM;
- aspecto superficial;
- rugosidade superficial.

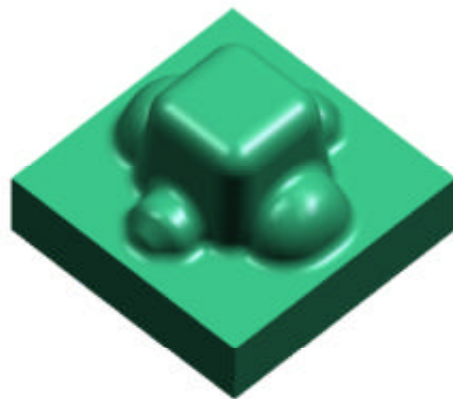


Figura 1: Corpo de prova utilizado nos ensaios.

Para efeito de comparação e visando alcançar plenamente os objetivos propostos foram usinados 2 corpos de prova, sendo que no primeiro foi utilizada a estratégia *Zig-Zag* com 45 graus de inclinação em relação ao eixo x . Dentre as estratégias disponíveis no sistema CAM, essa estratégia foi adotada em virtude da rapidez com que ela pode ser programada, e ao bom acabamento superficial obtidos em alguns casos⁽⁶⁾.

No corpo de prova 2, foram separadas 4 regiões de usinagem, sendo que em cada uma delas foi utilizada uma estratégia diferente, como por exemplo a estratégias *Radial Lines*, que consiste em movimentos de *Zig-Zag* contendo um ponto central de onde partirá a trajetória da ferramenta.

Este método foi adotado visando a comparação dos resultados mediante à geometria. Para a validação dos resultados, mantiveram-se os mesmos parâmetros de usinagem, como avanço e passo lateral utilizados no corpo de prova 1.

3.1 Planejamento do Experimento

Na usinagem dos corpos de prova foram utilizadas as operações de desbaste, pré-acabamento e acabamento.

Para todos os corpos de prova foram utilizados os mesmos parâmetros tecnológicos para a realização das operações, tais como: velocidade de avanço programada, profundidade e espessura de corte e avanço por aresta de corte.

Os dados tecnológicos descritos na Tabela 1 foram extraídos de catálogos do fornecedor das ferramentas a fim de serem utilizados para as operações de desbaste e pré-acabamento.

Tabela 1: Parâmetros de corte utilizados nas operações de usinagem.

PARÂMETROS DE CORTE	OPERAÇÕES	
	DESBASTE	PRÉ ACABAMENTO
Estratégia de corte	Follow Periphery	Follow Periphery
Ferramenta	1 cabeçote de 50 mm de diâmetro com pastilhas intercambiáveis.	1 fresa esférica 10 mm inteiriça de metal duro.
Rotação (n)	1180 min^{-1}	7960 min^{-1}
Velocidade de Avanço (Vf)	1130 mm/min	1590 mm/min
Velocidade de Corte (Vc)	185 m/min	250 m/min
Avanço por Aresta (f)	0.11 mm	0.10 mm
Profundidade de Corte (ap)	1 mm	1,5 mm
Aresta de Corte (quantidade)	4	2

- **Corpo de Prova 1**

Para o corpo de prova 1, foi utilizada a estratégia Zig-Zag com 45 graus de inclinação em relação ao eixo x. Essa estratégia foi adotada mediante a rapidez com que ela pode ser programada e resultando num acabamento superficial satisfatório em alguns casos⁽⁶⁾. Os parâmetros de usinagem estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de corte utilizados nas operações de acabamento.

PARÂMETROS DE CORTE	OPERAÇÃO ACABAMENTO
Estratégia de corte	Zig Zag 45°
Ferramenta	Fresa esférica 8 mm inteiriça de metal duro.
Rotação (n)	8000 min^{-1}
Velocidade de Avanço (Vf)	1400 mm/min
Velocidade de Corte (Vc)	200 m/min
Avanço por Aresta (f)	0,08 mm
Espessura de Corte	0,1 mm
Aresta de Corte (quantidade)	2

- **Corpo de Prova 2**

Para a análise das estratégias de usinagem no corpo de prova 2, foram separadas 4 regiões de usinagem, sendo que em cada uma delas foi utilizada uma estratégia diferente, mas mantendo-se os mesmos parâmetros de usinagem, como avanço e passo lateral do corpo de prova 1.

A Figura 2 ilustra as regiões e as estratégias de corte foram definidas de acordo com a geometria e são identificadas como:

- região 1: Raios, estratégia Follow Periphery que consiste na trajetória da ferramenta baseada em *offsets* da peça;
- região 2: Cantos superiores, estratégia Radial Lines que consistem em movimentos de *Zig-Zag* contendo um ponto central de onde partirá a trajetória da ferramenta no sentido radial;
- região 3: Corpo lateral da peça, estratégia Radial Lines;
- região 4: Geometria esférica inferior, estratégia Zig-Zag;

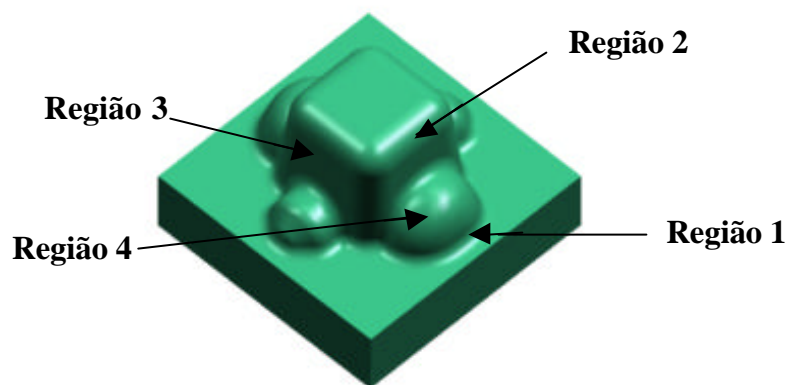


Figura 2: Regiões de usinagem estudadas.

3.2 Ferramental utilizado nos ensaios

Os ensaios de usinagem foram realizados com as seguintes ferramentas:

- operação de Desbaste: 1 cabeçote de 50 mm de diâmetro com 4 arestas de cortes utilizando insertos classe 4040;
- operação de Pré-acabamento: 1 fresa esférica 10 mm inteiriça de metal duro com duas arestas de corte;
- operação de Acabamento: 1 fresa esférica 8 mm com quatro arestas de cortes inteiriça de metal duro.

3.3 Centro de Usinagem utilizado nos ensaios

A usinagem foi realizada em um centro de usinagem Discovery 760, conforme ilustrado na Figura 3, apresentando as seguintes especificações técnicas:

- rotação máxima: 10000 min^{-1} ;
- avanço rápido : 25000 mm/min ;
- máximo avanço programável: 5000 mm/min ;
- comando Siemens 810D configurado especialmente, para o SCPM-UINIMEP, permitindo além de sua configuração *standard*, características adicionais como: execução de funções *Splines* e interface para *ethernet*.



Figura 3: Centro de Usinagem Discovery 760.

3.4 Avaliação dos corpos de prova

A avaliação dos corpos de prova será realizada através de comparação das estratégias de corte utilizadas nos corpos de prova usinados e será composta da medição dos tempos de usinagem e programação CAM e análise do acabamento superficial.

3.4.1 Obtenção dos tempos de usinagem e programação CAM

A obtenção dos tempos de usinagem foi por meio de um cronômetro, dado o “*start*” no começo de cada operação de usinagem e “*stop*” ao fim de cada operação.

O tempo de programação, que também foi medido com a ajuda de um cronômetro, foi obtido a partir de um processo de fabricação previamente definido, considerando a geração da trajetória da ferramenta no Sistema CAM incluindo o tempo de seleção das geometrias envolvidas no processo e a criação das ferramentas de usinagem.

3.4.2 Análise da qualidade superficial

Foi realizada uma comparação do aspecto superficial de algumas regiões dos corpos de prova, através de imagens obtidas através de uma máquina fotográfica digital de alta resolução. Nesta comparação foram obtidas imagens para apresentação dos resultados.

3.4.3 Análise da rugosidade superficial

A qualidade superficial foi determinada através do valor de Ra de rugosidade nas superfícies usinadas, obtidas com o auxílio de um rugosímetro digital.

A medição da rugosidade foi realizada no sentido perpendicular ao sentido de deslocamento da ferramenta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos tempos de usinagem e Programação CAM dos corpos de prova

O tempo de programação e de usinagem (ver item 3.4.1) é apresentado na Figura 4 na qual pode-se observar que o tempo de programação CAM foi aproximadamente 6 vezes maior no conjunto de estratégias estudadas comparando-se com a estratégia Zig-Zag 45°.

Este resultado deve-se ao fato da estratégia Zig-Zag necessitar de apenas a escolha de uma geometria como um todo, enquanto que o conjunto de estratégias necessita de diversas escolhas de geometrias, assim como configuração de parâmetros para cada uma delas.

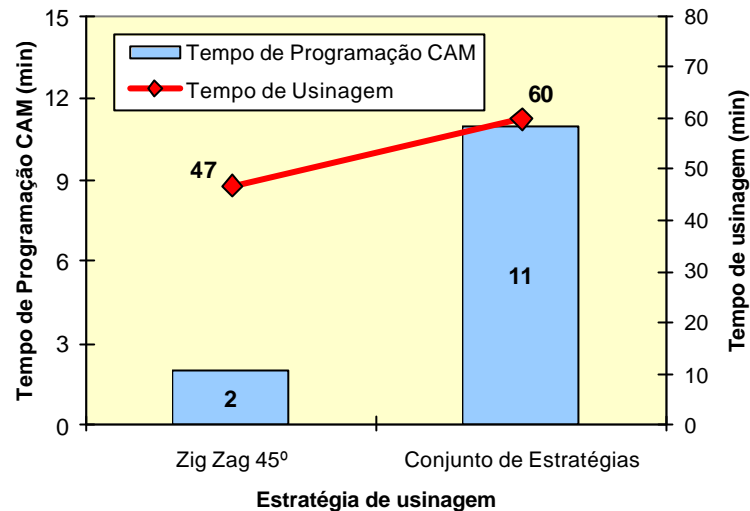


Figura 4: Tempos de usinagem.

O tempo de desbaste e semi-acabamento ficaram iguais devido a utilização dos mesmos parâmetros, mas o tempo de acabamento entre os dois corpos de prova foi diferente, resultando num aumento de 23 minutos de usinagem para o conjunto de estratégias.

4.2 Aspecto superficial

As imagens a seguir ilustram os corpos de prova 1 e 2, sendo possível comparar visualmente a diferença no acabamento superficial das geometrias estudadas.

- **Corpo de Prova 1**

Observou-se nos ensaios do corpo de prova 1 que as regiões representadas por geometrias com grande inclinação não apresentaram uma boa qualidade superficial quando a trajetória da ferramenta era descrita na direção lateral da geometria inclinada. No entanto quando a trajetória da ferramenta era descrita na direção frontal da geometria inclinada, esta apresentou uma boa qualidade superficial.

Foi observado também que a uniformidade da trajetória da ferramenta varia conforme a direção que a mesma atua em relação à geometria da peça. Isto pode ser observado na Figura 5, onde:

- Figura 5a: quando a ferramenta atua na direção lateral à geometria, o resultado é um passo lateral não-uniforme acarretando numa superfície irregular;
- Figura 5b: com o modelo rotacionado em 90°, a ferramenta atua na direção frontal à geometria da peça, a trajetória da ferramenta apresenta um passo lateral uniforme.

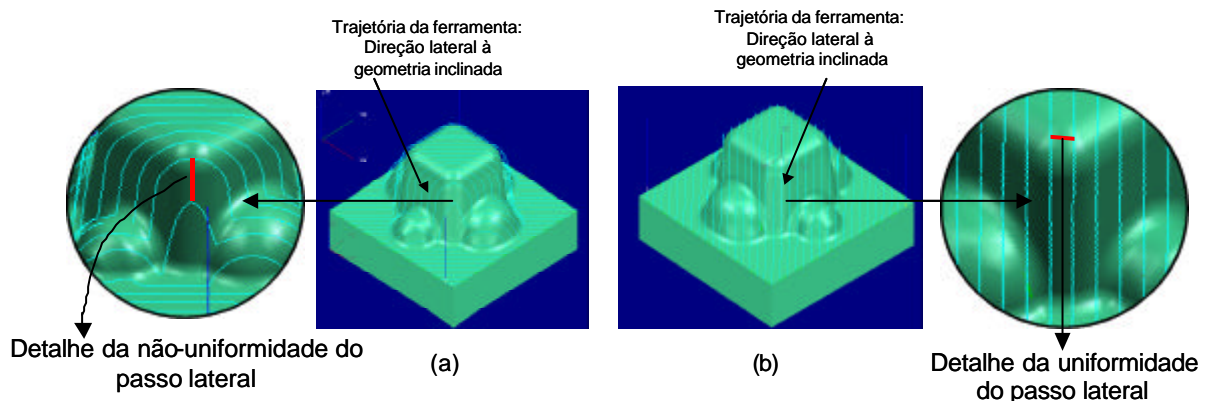


Figura 5: Trajetória da ferramenta em Zig Zag 45°.

Como consequência, as regiões onde a trajetória da ferramenta apresentou uma falta de uniformidade no passo lateral, houve um comprometimento na qualidade superficial.

No corpo de prova 2, onde houve a adequação das estratégias adotadas para cada tipo de geometria e uma uniformidade do passo lateral, obteve-se um bom acabamento superficial.

A influência entre a uniformidade da trajetória da ferramenta e o acabamento superficial pode ser observado na Figura 6. Na figura 6a, é mostrado o canto onde a ferramenta tem um contato frontal com a peça, resultando numa qualidade superficial satisfatória devido ao fato da uniformidade da trajetória da ferramenta.

Na figura 6b, é nítida a superfície irregular devido ao fato da ferramenta ter um contato lateral na peça, resultando na não-uniformidade do passo lateral e numa qualidade superficial insatisfatória.

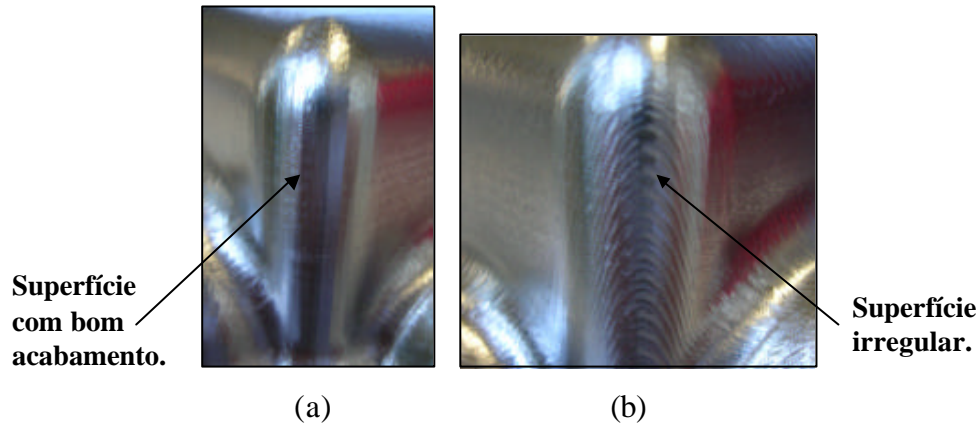


Figura 6: Detalhes do corpo de prova 1 após acabamento Zig-Zag 45°.

- **Corpo de Prova 2**

A Figura 7 ilustra as regiões 2 e 3 do corpo de prova 1 e 2, referentes ao raio superior e ao corpo lateral respectivamente. É evidente o bom acabamento superficial resultante das estratégias de corte escolhidas de acordo com a geometria, como no caso do corpo de prova 2.

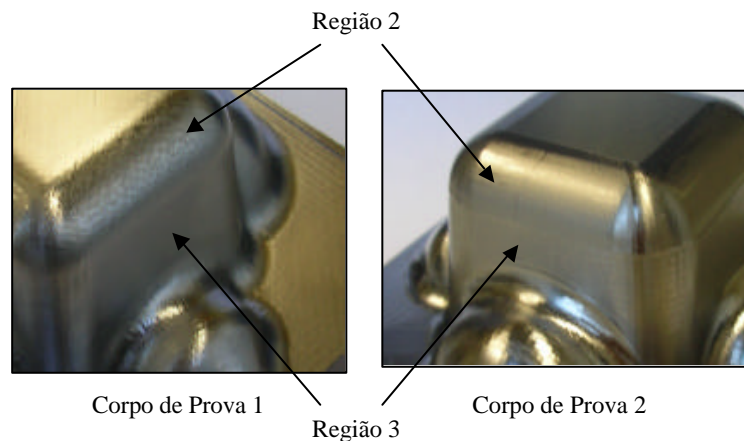


Figura 7: Detalhe da região 2 (raios superiores) e região 3 (corpo lateral).

No que diz respeito à região 1, ou seja aos raios da base, a aplicação de uma estratégia específica para a geometria acarretou resultados melhores. A comparação com o corpo de prova 1 mostra que a qualidade superficial do acabamento no corpo de prova 2 é nitidamente melhor.

A Figura 8 ilustra esta comparação. Na figura 8a, está ilustrado parte dos raios do corpo de prova 1, cuja a estratégia adotada foi a *Zig-Zag 45°*. Na figura 8b, é mostrada parte dos raios do corpo de prova 2, cuja estratégia adotada foi a *Follow Periphery* para esta geometria.

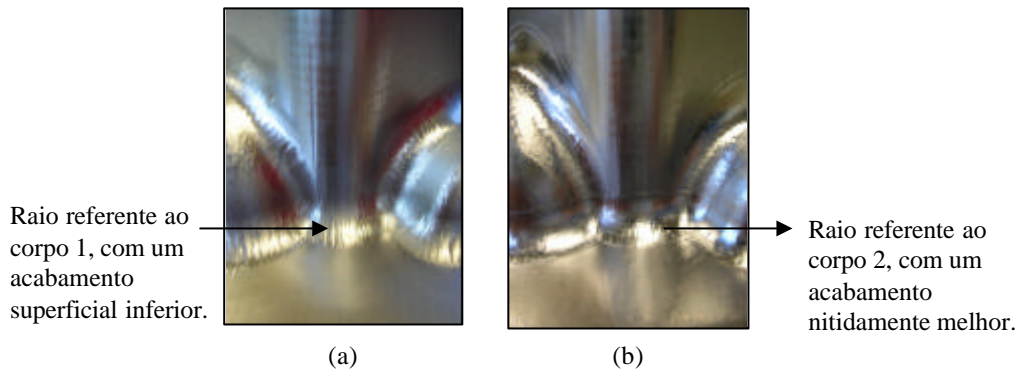


Figura 8: Detalhe dos raios após o acabamento do corpo de prova 1.

Da mesma maneira, a região 4 obteve a mesma diferença no acabamento superficial entre a estratégia Zig Zag 45° e a estratégia Follow Periphery, usada no corpo de prova 2, conforme ilustra a Figura.9.

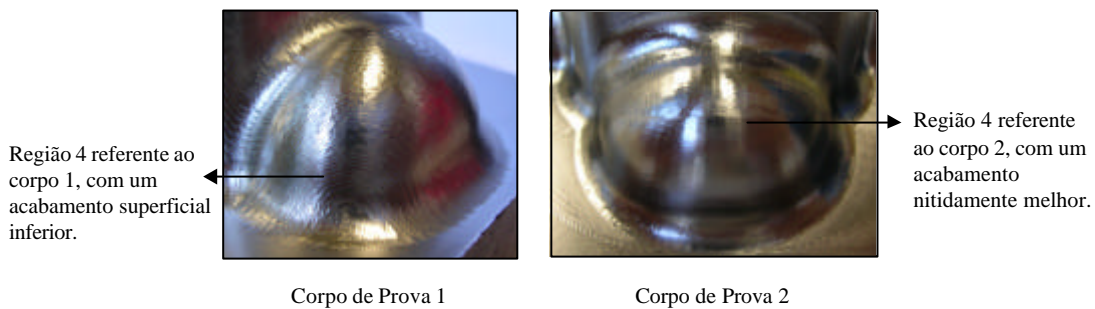


Figura.9: Comparação das estratégias na região 4.

4.3 Rugosidade Superficial

A rugosidade foi medida nas regiões 2 e 3 dos dois corpos de prova, a fim de comparar a performance dos tipos de estratégias adotadas nos corpos de prova. O valor da rugosidade apresentado é uma média aritmética de três ensaios realizados ao longo de cada geometria.

Através dos valores analisados, foi possível verificar que não houve sensíveis variações entre as estratégias adotadas conforme ilustra a Tabela 3 abaixo.

Não foi possível medir a rugosidade superficial nas regiões 1 e 4, devido à limitação do instrumento ao tipo da geometria (cilíndrica e em forma de raio).

Tabela 3: Comparação das rugosidades obtidas.

Corpo de Prova 1		Corpo de Prova 2	
Região 2	0,81 μ	Região 2	0,98 μ
Região 3	0,85 μ	Região 3	0,84 μ

5 CONCLUSÕES

Foi possível apropriar conhecimento e entender de uma forma mais clara a influência que as estratégias de corte têm com relação à geometria a ser usinada, observando que essas influências vão desde tempo de usinagem, ao acabamento superficial e tempo de programação CAM.

Observou-se que durante a programação CAM do corpo de prova que o tempo de programação para a estratégia Zig-Zag 45° foi mais rápida comparada com a aplicação do conjunto de estratégias. Este resultado deve-se ao fato da estratégia Zig-Zag necessitar de apenas a escolha de uma geometria como um todo, enquanto que o conjunto de estratégias necessita de diversas escolhas de geometrias, assim como configuração de parâmetros para cada uma delas.

Desse resultado, certifica-se que a escolha das geometrias é um fator dependente do tempo de programação CAM devido ao maior tempo que se leva para selecionar cada geometria.

Com relação ao tempo de usinagem, o aumento de operações de acabamento no corpo de prova 2, em função de um maior detalhamento da geometria a ser estudada, resultou num aumento do tempo de usinagem em relação ao corpo de prova 1.

No que diz respeito à análise do acabamento superficial, observa-se no corpo de prova 1 que as regiões representadas por geometrias com grande inclinação não apresentaram uma boa qualidade superficial quando a trajetória da ferramenta era descrita na direção lateral da geometria inclinada.

No entanto quando a trajetória da ferramenta era descrita na direção frontal da geometria inclinada, esta apresentou uma boa qualidade superficial devido à influência da uniformidade da trajetória da ferramenta.

Por fim, a conclusão verificada na qualidade superficial dos corpos de prova foi que houve uma grande diferença na qualidade final de acabamento. O corpo de prova 2 obteve um resultado satisfatório comparado com o corpo de prova 1, devido a escolha das estratégias que melhor se adequassem à geometria. O corpo de prova 1 obteve um acabamento “facetado” devido à descrição da trajetória da ferramenta e foi considerado insatisfatório.

Devido a baixa variação da rugosidade superficial obtida, pode-se concluir que a influência das estratégias se apresentaram somente no tempo de programação CAM e tempo de usinagem, além do acabamento superficial, fatores em que houve diferenças sensíveis entre os corpos de prova.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com apoio do Projeto ProBrAl - Otimização da cadeia Produtiva com a Utilização de Fresamento com Altíssima Velocidade (Tecnologia HSC) e da Tecnologia de Form Features, com apoio do Instituto fábrica do Milênio (IFM) e com apoio do Programa de Apoio à Formação Científica do Discente (FAPIC/UNIMEP e PIBIC/CNPq).

7 REFERÊNCIAS

1. CHOI, B.K.; JERARD, R.B.: **Sculptured Surface Machining - Theory and applications**. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 1998. 368 p. ISBN 0-412-78020-8.
2. HELLENO, A.L.: **Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matrizes com Alta Velocidade**, 2004, 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.
3. SCHÜTZER, K. et al.: **Usinagem em Altíssimas Velocidades**. São Paulo: Editora Érica, 2003. 214 p.
4. SCHÜTZER, K.; HELLENO, A.L.: **Curso de Treinamento Unigraphics CAM versão NX**. Universidade Metodista de Piracicaba, Laboratório de Sistemas Computacionais de Projeto e Manufatura. Manual de treinamento. Santa Bárbara d'Oeste, 2003. Módulos 1 à 9.
5. ROMI: **Manual de Programação e operação Siemens 810D**. Indústrias ROMI S/A, São Paulo
6. ABELE, E; SCHULZ, H; STANIK, M; VON GYLDENFELDT, C.: **Improving the High Speed Machining of Sculptured Surfaces by HSC-Freeform Manufacturing Features Technology**. Production Engineering, v. IX/2, pp. 67-70, 2002.