

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE ACABAMENTO DE MACHOS PARA FERRAMENTAS DE INJEÇÃO

Eng. Guilherme Oliveira de Souza

SENAI-CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
gsouza@fieb.org.br

Prof. Dr. Eng Jefferson Oliveira Gomes

SENAI-CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
jefferson@fieb.org.br

Eng. Marco Antônio Pitorri

SENAI-CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
mpitorri@zaz.com.br

Resumo. *A otimização do processo de acabamento de superfícies fabricadas em aço, como é o caso da maioria das ferramentas de injeção, está relacionada com o desenvolvimento de estratégias de usinagem aplicadas. Neste estudo, são comparadas diferentes estratégias CAM para acabamento de uma peça-teste composta por superfícies complexas, com cantos com raios de curvatura pequenos, rampas e paredes de inclinação extrema, analisando as condições de contato do topo da ferramenta de corte com o material para otimização da qualidade superficial e diminuição do erro dimensional.*

Palavras-chave: *Moldes, Fresamento, Acabamento, Estratégias CAM*

1. INTRODUÇÃO

A otimização do processo de acabamento de superfícies fabricadas em aço, como é o caso da maioria das ferramentas de injeção, está relacionada com o desenvolvimento de estratégias de usinagem aplicadas.

Análises de tempos gastos na indústria de moldes americana constatarem um consumo de 27 a 39% para a fase de acabamento em fresamento e de 13 a 23% para o acabamento manual (Altan et al, 1993). No Brasil, este último costuma ser de 40 a 50% do tempo total de usinagem (Lima et al, 1994). Se esse tempo for reduzido pela otimização do processo de usinagem, não somente o custo de fabricação será reduzido, bem como a precisão da peça aumentará (Sandvik-Coromant, 1999).

Estima-se que, se forem utilizadas cerca de 50 horas a mais de programação avançada e acabamento em uma máquina-ferramenta mais precisa, pode-se reduzir o polimento de 100 a 150 horas. As peças serão mais precisas e necessitarão de menos tempo para teste da ferramenta (tryout) (Klocke, 1998).

Em comparação com o regime de desbaste, as profundidades de corte tipicamente aplicadas na etapa de acabamento são caracterizadas pelas pequenas seções de usinagem e, conseqüentemente, pelas pequenas forças de usinagem envolvidas no processo. Devido às pequenas geometrias de contato, com valores típicos na direção tangencial à superfície (a_{et}), entre 0,2 mm e 0,8 mm, e na direção normal à

superfície (a_n), entre 0,1 mm e 1 mm, o tempo total de acabamento representa de 50 a 80% do tempo total de usinagem (Warkentin et al, 1994).

Se a velocidade de avanço for aumentada, a distância entre as linhas de fresamento pode ser diminuída e, para um mesmo tempo de acabamento anteriormente utilizado no processo convencional, a qualidade superficial da peça será otimizada. Desse modo, o termo fresamento com altas velocidades de corte (High Speed Cutting - HSC) é associado, convencionalmente, às operações de acabamento.

Neste estudo, serão comparadas diferentes estratégias CAM para acabamento de uma peça composta por superfícies complexas, analisando as condições de contato do topo da ferramenta de corte com o material para otimização da qualidade superficial e diminuição do erro dimensional.

2. ANÁLISE DO MATERIAL

O material utilizado foi um aço AISI P20, aço-ferramenta de baixa liga, temperável em óleo, com boa usinabilidade e boa estabilidade dimensional durante o tratamento térmico. Apresenta alta polibilidade, sendo possível a obtenção de superfícies espelhadas, o que o torna apropriado para a fabricação de moldes de injeção de plásticos. Quando se desejar maior resistência ao desgaste, pode-se submetê-lo a tratamentos termoquímicos tipo cementação ou nitretação.

Neste estudo, o aço utilizado apresentou a seguinte composição química média Tab. (1):

Tabela 1. Composição química em percentual do aço AISI P20.

AISI	C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)
P20	0,28-0,40	0,60-1,00	0,030	0,030	0,20-0,80	1,40-2,00	0,30-0,55

3. ANÁLISE DA USINABILIDADE

3.1. Máquinas, Equipamentos e Métodos

Os ensaios foram realizados com a peça fixada por morsa, sobre um centro de usinagem Hermle C800 U, 3 eixos, com curso máximo de deslocamento das guias em X de 800 mm, Y de 600 mm e Z de 500 mm, rotação máxima do eixo árvore de 16.000 rpm, com potência máxima de 15 kW e comando numérico CNC Heidenhain TNC 430.

Com o auxílio de um projetor de perfil Zoller (Presseter Zoller Junior), ajustou-se a ferramenta para os dois ensaios com o mesmo comprimento em balanço, em relação à base do porta-ferramenta.

O programa CAM onde geraram-se as estratégias de corte foi o SurfCam, versão 2002.

A rugosidade das superfícies foi mediada com um rugosímetro de contato da marca Mitutoyo, modelo SurfTest SJ-201.

3.2. Identificação da Geometria e Material da Ferramenta

As superfícies acabadas dos produtos industriais, especialmente superfícies complexas, tais como ranhuras, superfícies cônicas e esféricas, são acabadas com ferramentas de topos arredondados. Essas geometrias de topo das ferramentas produzem superfícies em formato de ondas, que são diretamente dependentes das condições de contato adotadas (Sandvik-Coromant, 1998; Stemmer, 1992; Broomhead, 1986; Loney et al, 1987; Ding et al, 1987; Faux et al, 1979; Tsao et al, 1997 e Americam Machinist, Technology Trends, 1994). Em alguns sistemas CAD/CAM/NC existentes, é possível especificar a máxima altura dessas ondas, controlando a distância entre cada linha executada.

Devido à característica geométrica do topo esférico da fresa, o ângulo de inclinação entre a haste e a normal da superfície (β) não influencia na rugosidade teórica (R_{th}). Todavia, a influência da

profundidade de corte radial (a_e) é grande, comparada às fresas de topo reto e toroidal (Bieker, 1991; Zander, 1995 e Tsao et al, 1997).

Para todos os tipos de topo de ferramentas, na direção longitudinal ao avanço, a rugosidade teórica (R_{th}) aumenta proporcionalmente ao avanço por dente (f_z). Entretanto, para ferramentas de topo esférico e toroidal, a influência do avanço por dente (f_z) é menos sensível, devido ao elevado valor do raio de quina (r_e) (Zander, 1995 e Faux et al, 1979).

Desse modo, devido à independência do ângulo de inclinação entre a haste e a normal da superfície (β) e da pequena relação com o avanço por dente (f_z), as ferramentas de topo esférico são mais adequadas para o acabamento em três eixos de superfícies complexas, pois nessas a inclinação da normal da superfície varia ponto a ponto, o que evidencia a vantagem da ausência de influência desse parâmetro.

A relação de materiais de ferramenta é extensa para o acabamento de aço P20. Desse modo, baseando-se em experiências anteriores (Gomes, 2001), escolheu-se, junto com um fabricante parceiro, a fresa inteiriça de metal duro, classe K03, da PWZ, de dez milímetros de diâmetro e dois dentes.

Realizou-se a combinação dos parâmetros de corte, expostos na Tab. (2), baseada nas informações recomendadas pelos fabricantes para cada material e também por experimentos anteriores (Gomes, 2003).

Tabela 2. Condições ensaiadas no aço AISI P20.

Parâmetros de corte	
Velocidade de corte (v_c) [m/min]	503
Avanço por dente (f_z) [mm/dente]	0,2
Velocidade de avanço (v_f) [mm/min]	6400
Rotação (n) [rpm]	16000
Altura de Crista Programada [μ m]	0,5

3.3. Identificação da Peça e das Estratégias Adotadas

Desenvolveu-se uma geometria com cantos com raios de curvatura pequenos, rampas e paredes de inclinação extrema, Fig. (1).



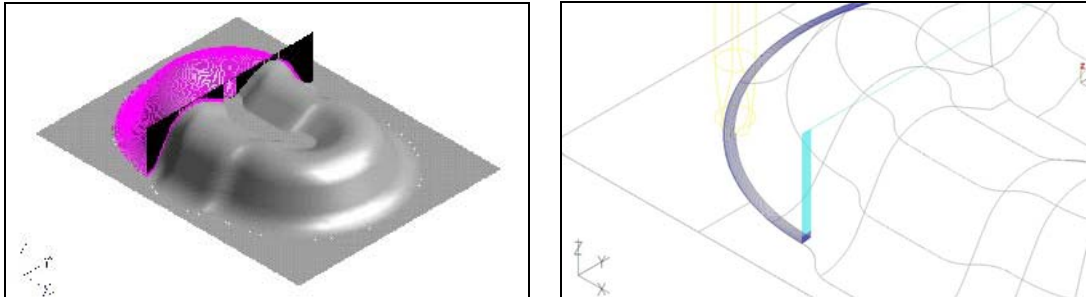
Figura 1. Peça-teste.

A estratégia de usinagem é dependente da topografia da superfície desejada. Superfícies convexas com rampas extremamente inclinadas (maiores que 75°) são usinadas em linhas, mantendo Z constante (em 2½ eixos). Desta maneira, são evitadas mudanças abruptas de direção de corte e a ferramenta é sempre mantida em contato constante com a peça (König et al, 1995). Superfícies planas são melhores

usinadas no modo espiral, pois também é mantido o contato constante da ferramenta (Enselmann, 1995).

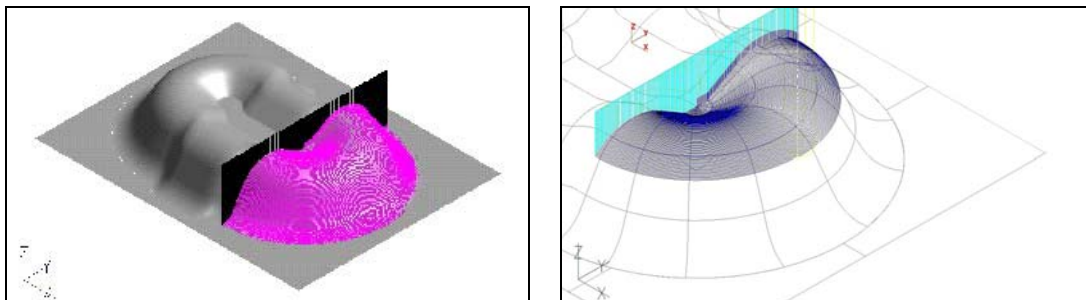
Foram fabricadas duas peças, uma foi dividida em três superfícies, e a segunda em duas metades, de modo que pudessem ser testadas cinco diferentes estratégias. Os parâmetros de corte, assim como a altura de crista programada foram mantidos para todas as superfícies.

A superfície situada à esquerda na primeira peça, peça 1, foi acabada com passadas da ferramenta seguindo as isolinhas da superfície no sentido longitudinal, como mostrado nas Fig. (2a) e Fig. (2b), com sentido de corte predominantemente concordante, e incrementos para próximas passadas feitos tangentes à peça, de baixo para cima.



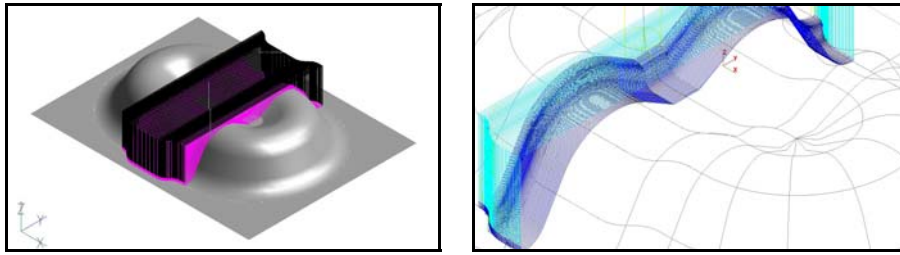
Figuras 2a e 2b. Caminho da ferramenta seguindo as isolinhas da superfície, com incrementos feitos de baixo para cima.

Na superfície situada à direita na mesma peça foi utilizada uma estratégia com passadas da ferramenta seguindo as isolinhas da superfície no sentido longitudinal, como mostrado nas Fig. (3a) e Fig. (3b), com sentido de corte predominantemente concordante, e incrementos para próximas passadas feitos tangentes à peça, de cima para baixo.



Figuras 3a e 3b. Caminho da ferramenta seguindo as isolinhas da superfície, com incrementos laterais de cima para baixo.

Para a superfície situada na região intermediária desta peça, a estratégia aplicada foi usinagem 3-eixos com passadas no sentido transversal a peça, como se fossem feitas diversas seções nesta em planos paralelos ao plano YZ e a ferramenta seguisse o caminho gerado pelas interseções desses planos com a peça, como pode ser visto nas figuras Fig. (4a) e Fig. (4b) abaixo. O sentido de corte adotado foi concordante e com incremento lateral feito da esquerda para direita.



Figuras 4a e 4b. Acabamento 3-eixos com passadas no sentido transversal a peça e incremento da direita para a esquerda.

Para a segunda peça, peça 2, a estratégia utilizada foi um acabamento com a ferramenta fazendo passadas em 3-eixos, seguindo caminhos cujas projeções no plano XY são linhas inclinadas de 45° . Primeiro a peça foi totalmente usinada da direita para esquerda, e com um programa subsequente, esse mesmo processo foi feito no sentido contrário, com linhas perpendiculares as anteriores, até a metade da peça, resultando em uma usinagem com passadas cruzadas do lado direito da peça, como pode ser visto nas Fig. (5), Fig. (6a) e Fig. (6b) abaixo.

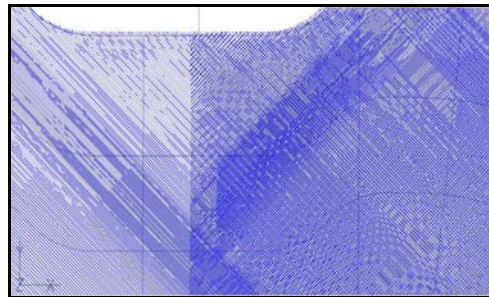
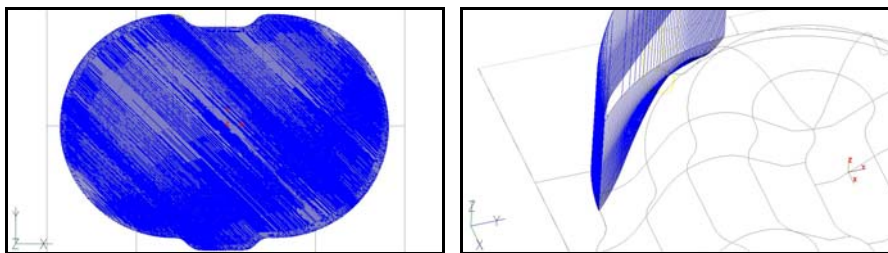


Figura 5. Acabamento à 45° simples, à esquerda, e cruzado, à direita.



Figuras 6a e 6b. Vista de topo do caminho da ferramenta e aproximação do início do percurso desta.

4. RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1. Qualidade Superficial

A qualidade superficial das peças-teste fabricadas foi analisada através do estudo da rugosidade obtida nestas ao final da etapa de acabamento. Foram definidas regiões de análise, de acordo com as áreas onde foram aplicadas as diferentes estratégias CAM, onde foram feitas medições de R_z e R_{th} em três pontos distintos.

Na primeira peça foram definidas as regiões de análise indicadas abaixo na Fig. (7) por variadas cores.

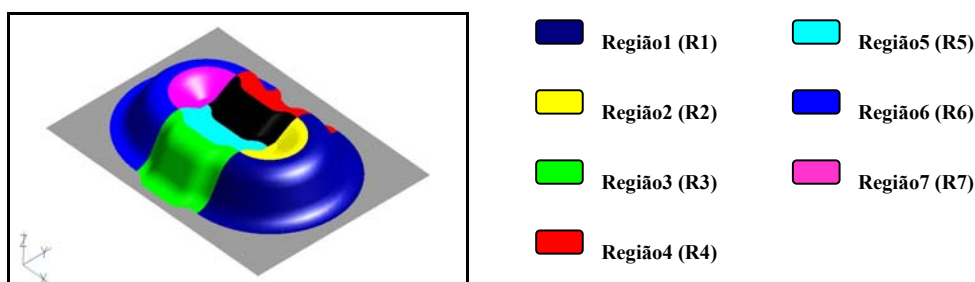


Figura 7. Regiões de análise de rugosidade para a peça 1.

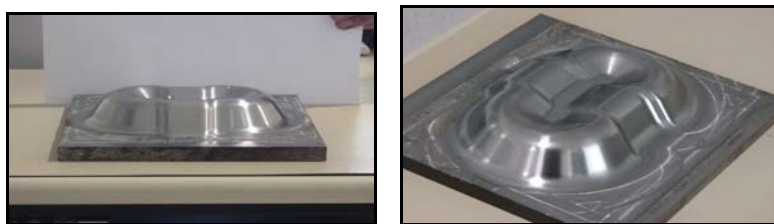
Os seguintes valores, dispostos na Tab. (3) abaixo, foram obtidos nas medições de rugosidade para a peça 1.

Tabela 3. Valores de rugosidade para a peça 1 em μm .

Medidas Longitudinais								
	R _{a1}	R _{a2}	R _{a3}	Média	R _{z1}	R _{z2}	R _{z3}	Média
R1	0,69	0,68	0,68	0,68	2,89	2,85	3,04	2,93
R2	1,18	1,12	1,13	1,14	8,51	8,54	8,52	8,52
R3	1,34	1,49	1,28	1,37	7,73	11,26	6,58	8,52
R4	0,72	0,75	0,75	0,74	4,47	4,32	4,52	4,44
R5	1,47	1,08	0,87	1,14	8,56	7,04	4,75	6,78
R6	1,01	1,02	1,02	1,02	4,60	4,48	4,57	4,55
R7	1,10	1,70	1,70	1,50	9,86	12,40	12,43	11,56
Medidas Transversais								
	R _{a1}	R _{a2}	R _{a3}	Média	R _{z1}	R _{z2}	R _{z3}	Média
R1	1,22	1,75	1,50	1,49	7,18	9,72	8,04	8,31
R2	1,60	1,36	2,15	1,70	10,97	10,39	12,81	11,39
R3	2,49	2,40	2,44	2,44	10,69	10,53	10,14	10,45
R4	2,07	1,86	2,07	2,00	12,98	11,77	13,26	12,67
R5	2,00	1,67	2,07	1,91	11,42	9,66	12,49	11,19
R6	2,64	2,63	2,63	2,63	13,25	13,24	13,22	13,24
R7	2,86	2,82	2,82	2,83	14,16	13,55	13,38	13,70

Essa tabela nos mostra que uma melhor qualidade superficial foi atingida na R1. Se esta for comparada com a R6, onde há uma superfície simétrica à primeira, podemos observar que para situações de corte semelhantes, o fato da ferramenta realizar seus incrementos para próximas passadas de cima para baixo garantiu um melhor acabamento do que aquele obtido com a situação inversa. A resistência que o material que está sendo usinado oferece no segundo caso, tende a puxar a ferramenta para fora da fixação, o que causa uma maior instabilidade se comparado com o primeiro caso, que tende a forçá-la contra a fixação, situação em que o conjunto ferramenta-fixação apresenta maior rigidez.

Situação semelhante é encontrada quando são comparadas as R4 e R5 com a R3. Nas duas primeiras, onde a ferramenta avançou no sentido de declive, a qualidade superficial foi melhor que para a situação oposta, ocorrida na R3. Mas com a mudança da direção de avanço, de transversal a inclinação, para longitudinal a esta, a rugosidade aumentou, para ambos os casos, indicando uma situação mais severa de corte. As Fig. (8a) e Fig. (8b), mostram a peça 1 após ser usinada.



Figuras 8a e 8b. Fotos da peça 1

Já para a peça 2, as seguintes regiões de análise foram as escolhidas (Fig. (9)):

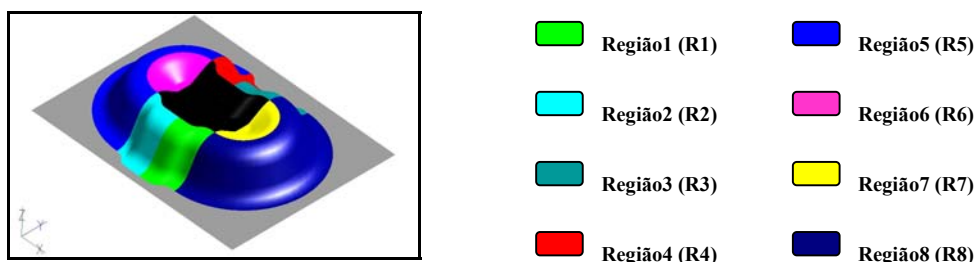


Figura 9. Regiões de análise de rugosidade para a peça 2.

E os valores de rugosidade encontrados para esta peça são os abaixo apresentados na Tab. (4).

Tabela 4. Valores de rugosidade para a peça 2 em μm .

Medidas Longitudinais								
	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	Média	R_{z1}	R_{z2}	R_{z3}	Média
R1	0,92	1,02	1,34	1,09	4,82	5,25	6,71	5,59
R2	0,87	1,01	1,01	0,96	4,44	5,43	5,55	5,14
R3	0,64	0,57	0,67	0,63	3,61	3,29	3,51	3,47
R4	0,55	0,53	0,44	0,51	3,09	2,79	2,61	2,83
R5	0,76	0,67	0,75	0,73	4,17	4,09	4,14	4,13
R6	0,95	0,88	0,79	0,87	5,83	4,98	4,77	5,19
R7	0,80	0,78	0,66	0,75	4,58	5,03	4,19	4,60
R8	0,90	0,67	0,64	0,74	4,30	4,27	3,71	4,09
Medidas Transversais								
	R_{a1}	R_{a2}	R_{a3}	Média	R_{z1}	R_{z2}	R_{z3}	Média
R1	1,34	1,28	1,37	1,33	6,98	6,74	6,00	6,57
R2	1,11	1,22	1,17	1,17	6,84	6,25	6,75	6,61
R3	1,10	1,08	1,22	1,13	5,34	5,35	5,31	5,33
R4	0,84	0,71	0,81	0,79	3,86	3,56	4,07	3,83
R5	0,82	0,98	0,83	0,88	4,11	4,53	4,20	4,28
R6	1,57	1,35	1,10	1,34	9,11	7,54	7,15	7,93
R7	1,23	1,01	1,36	1,20	9,55	6,93	9,09	8,52
R8	0,67	0,79	0,71	0,72	3,33	3,84	3,63	3,60

Vemos na tabela acima que, para regiões de geometria semelhante (R5 e R8; R6 e R7; R1 e R2; R3 e R4) a qualidade superficial obtida é melhor, hora para usinagem a 45° simples, hora para a usinagem a 45° cruzada, e as discrepâncias entre esses valores são muito pequenas, de modo que podemos afirmar que, entre as duas aplicadas na peça dois, a estratégia utilizada no lado esquerdo é mais propícia, condição essa ratificada pelo menor tempo de processo, uma vez que são dispensados os passes para o cruzamento.

Já se formos estabelecer uma comparação entre as regiões de geometria semelhante da peça 1 para a peça 2 (R1 e R6 peça 1, e R5 e R8 peça 2; R2 e R7 peça 1, e R6 e R7 peça 2; R3 peça 1, e R1 e R2 peça 2; R4 peça 1, e R3 e R4 peça 2), vemos que a qualidade superficial foi sempre melhor na peça 2, sendo que há apenas uma exceção, a R1 da peça 1 apresentou uma menor rugosidade longitudinal ao avanço quando comparada as R5 e R8 da peça 2. No entanto, com as estratégias usadas na peça 2, não ocorreu uma completa remoção do material, ficando uma sobremedida nos cantos da cavidade que a peça apresenta em sua parte superior, como pode ser notado na Fig. (10) abaixo.



Figura 10. Peça 2 após ser acabada.

Mas isso não torna essas estratégias descartáveis, uma vez que, como pôde ser visto, no restante da peça foi atingido um excelente acabamento superficial, provando que elas podem ser aplicadas em outras situações. Entretanto, como para todo programa gerado, deve-se checá-lo anteriormente em uma simulação realística, onde é possível notar esse tipo de situação. Como a integridade da peça não era o foco principal desse estudo, os ensaios foram levados adiante mesmo com essas imperfeições sendo notadas anteriormente.

5. CONCLUSÕES

O intuito maior desse trabalho foi analisar a aplicabilidade à fabricação de machos para ferramentas de injeção, de algumas das principais estratégias de acabamento oferecidas pelos sistemas CAM disponíveis no mercado, através de um estudo comparativo entre eles levando-se em conta a característica mais importante dessa etapa da fabricação, a qualidade superficial.

Pudemos ver que a melhor qualidade superficial obtida, de uma maneira geral, foi para o acabamento a 45°, simples ou cruzado, entretanto, para essa aplicação, não seria a ideal, pois acarretaria na necessidade de uma nova operação para acabar os cantos da cavidade.

Dessa forma, a escolha pelo acabamento seguindo as isolinhas da superfície na direção longitudinal, com sentido de corte concordante e com incrementos sendo feitos de cima para baixo, se mostrou a mais viável, apresentando valores de rugosidade próximos aos do acabamento a 45°, e se mostrando mais estável que as demais.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa da Bahia (FAPESB) e a Rede Cooperativa de Pesquisa (RECOPE-FINEP).

7. REFERÊNCIAS

- ALTAN, T., LILLY, B. W., KRUTH, J. P., KÖNIG, W., TÖNSHOFF, H. K., van LUTTERVELT, KHAIRI, A. B., 1993, "Advanced Techniques for Dies and Mold Manufacturing", *Annals of the CIRP*, 42 (2), pg. 707-715.
- BIEKER, R., 1991, "NC-Fräsen von Stahlhohlformen", VDI-Verlag GmbH, ISBN 3-18-401190-9, Düsseldorf.
- BROOMHEAD, M., 1986, "Generating NC Data at the Machine Tool for the Manufacture of Free-form Surfaces" *Int. J. Prod. Res.*, pg. 1-14, 24 (1).
- Sandvik-Coromant, 1999, *Die and Mould Making, Application Guide*.
- DING, Q., DAVIS, J. B., 1987, "Surface Engineering Geometry for Computer Aided Design and Manufacture", Ellis Horwood, Chichester, UK.
- ENSELMANN, A., 1999, "HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken. Schriftenreihe des ISF", Vulkan Verlag, ISBN 3-8027-8703-X, Essen.
- FAUX, I. D., PRATT, M., 1979, "Computational Geometry for Computer Aided Design and Manufacture", Halsted (Wiley), New York.
- GOMES, J.O., 2001, "Fabricação de Superfícies de Forma Livre por Fresamento no Aço Temperado ABNT 420, na Liga de Alumínio AMP 8000 e na Liga de Cobre Cu-Be", Tese de Doutorado da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 150p.
- GOMES, J.O., Vallejos, R.V., Knodt, S., 2003, "Ferramentas de Desbaste para o Fresamento dos Aços ABNT 420 e SAE H13", Universidade Federal de Uberlândia, Anais do Cobef-2003, 10 p.
- KLOCKE, F., 1998, "The Process Sequence in Tool- and Diemaking", *VDI Berichte Nr. 1405*.
- KÖNIG, W., KLOCKE, F., KÖNIG, M., 1995, "Hochleistungserschwingung von Graphit", *Produktion und Management* 85, pg. 503-509, Springer Verlag.
- LIMA, A. M. A., RODRIGUES NETO, V. A., 1994, "Projeto e Fabricação de Moldes para a Injeção de Plásticos", *Máquinas e Metais*, pg. 96-101, Agosto.
- LONEY, G. C., OZSOY, T. M., 1987, "NC Machining of Free Form Surfaces", *Computer Aided Design*, pg. 85-90, 19 (2).
- STEMMER, C. E., 1992, "Ferramentas de Corte II". Editora da UFSC, 1ª Edição.
- Americam Mach, 1994, "Technology Trends", 138, 16.
- TSAO, C., CHEN, W., 1997, "Effects of Cutting Parameters on the Scallop Size During Milling Process", *Materials Processing Technology*, pg. 208-213, 72.
- WARKENTIN, A., BEDI, F., ISMAIL, F., 1994, "Five-axis Milling of Spherical Surfaces", *ASME, J. Eng. Ind.*, pg. 253-259, 116.
- ZANDER, M., 1995, "Potentiale beim Mehrachsen-Fräsen mit Toruswerkzeugen im Formenbau", Dissertation, RWTH-Aachen, junho.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

INJECTION MOLDS FINISHING PROCESS OPTIMIZATION

Eng. Guilherme Oliveira de Souza

SENAI-CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
gsouza@fieb.org.br

Prof. Dr. Eng. Jefferson Oliveira Gomes

SENAI-CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
jefferson@fieb.org.br

Eng. Marco Antônio Pitorri

SENAI-CIMATEC, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, CEP 41.650-010
mpitorri@zaz.com.br

Abstract. *The finishing process optimization of freeform surfaces in the manufacturing of steelmade parts, which is the case of injection molds, hardly depends on applied machining strategies developments. This paper presents a comparison between different CAM strategies for the finishing operation of a test-part that has complex surfaces, with small curvature radiuses, and extremely slopped walls, analyzing the cutter contact conditions for the surface quality improvement and the dimensional inaccuracy reduction.*

Keywords: *Mold Making, Milling, Finishing Operations, CAM Strategies*