

ANÁLISE DA QUALIDADE DE FUROS REALIZADOS POR FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO

Dalberto Dias da Costa

Universidade Federal do Paraná - Setor de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica -
Centro Politécnico – Caixa Postal 19011

CEP 81531-990 Curitiba – PR Fone/Fax: 41-361-3207

e-mail: dalberto@demec.ufpr.br

Jefferson de Oliveira Gomes

Instituto de Tecnologia Aeronáutica - Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica

Praça Marechal Eduardo Gomes, Vila das Acácias

12228-900, São José dos Campos-SP- Fone: 1239475814

e-mail: gomes@ita.br

Mauro Luiz Pangrácio

Universidade Federal do Paraná –PGMEC/DEMEC - Centro Politécnico – Caixa Postal 19011

CEP 81531-990 Curitiba – PR Fone/Fax: 41-361-3207

e-mail: mauropangracao@hotmail.com

Resumo. *A furação é o processo de usinagem mais importante na fabricação de furos. Entretanto, dependendo da qualidade exigida faz-se necessária a aplicação subsequente de outros processos, por exemplo, o mandrilamento, o alargamento e o brunimento. Atualmente, fábricas equipadas com máquinas CNC já dispõem de uma nova estratégia: o fresamento helicoidal interpolado. Essa nova opção é recomendada pelos fabricantes de ferramentas como uma técnica vantajosa para a confecção de furos de grandes diâmetros. O propósito principal deste trabalho é apresentar e discutir a qualidade de furos obtidos por esse método. A rugosidade das superfícies usinadas, a cilíndricidade e a circularidade foram os parâmetros empregados nesta avaliação. Um estudo observacional foi realizado com o intuito de estudar a influência das variáveis: velocidade de corte, o avanço axial e a velocidade de avanço do movimento circular. Vários furos foram fresados em placas de aço ABNT 1045 sem pré-furo e depois com pré-furo (em acabamento). Todos os ensaios foram realizados em um centro de usinagem vertical com fresa toroidal de 25 mm de diâmetro e insertos de metal duro. A principal conclusão deste trabalho é que o processo de fresamento helicoidal é uma técnica competitiva, tanto para desbaste como para o acabamento de furos. Essa vantagem competitiva reside na racionalização de ferramentas, quando comparada, por exemplo, aos processos convencionais de furação seguida de mandrilamento. Neste processo, a ferramenta empregada pode ser utilizada em outras operações, tais como o fresamento frontal e o periférico.*

Palavras-chave: *usinagem, fresamento helicoidal interpolado, qualidade de furos.*

1. INTRODUÇÃO

A furação é o processo de usinagem mais utilizado na confecção de furos de seção circular. Do ponto de vista cinemático, a furação é um processo extremamente simples que pode ser executado em vários tipos de máquinas-ferramenta, sendo que a mais simples, e mais especializada, é a furadeira.

No mercado de ferramentas existe uma gama extensa de geometria de brocas, variando desde helicoidais com afiação cônica, até brocas especiais do tipo canhão e aquelas que reúnem as características do mandrilamento e da furação por trepanação (BTA – Boring and Trepanning Association). Com esse grande leque de opções, o usuário pode fabricar furos de pequenos diâmetros (D), por exemplo 0,15 mm, até grandes, por exemplo 200 mm.

Por outro lado, o processo de furação apresenta algumas limitações, dentre as quais destacam-se as seguintes:

- na furação com brocas helicoidais o comprimento (L) do furo é uma restrição, sendo que a relação (L/D), dependendo da afiação da broca, é mantida abaixo de 5;
- furos de grandes diâmetros geralmente exigem operações preliminares de pré-furação;
- em empresas que operam com grande diversificação de produtos, existe a necessidade de manter um inventário de brocas muito elevado, pois para cada diâmetro deve existir uma broca correspondente.

Em empresas que dispõem de máquinas-ferramenta equipadas com tecnologia CNC (Comando Numérico Computadorizado), seja fresadoras ou centros de usinagem, existe uma alternativa ao processo de furação para a confecção de furos: o Fresamento Helicoidal Interpolado (FHI). Associado aos recursos de interpolação da máquina, observa-se um aumento crescente de fresas multifuncionais que vêm aumentando ainda mais a atratividade técnica e econômica deste processo.

Apesar de não ser um processo novo, existe pouca informação sobre o FHI na literatura técnico-científica, principalmente sobre a cinemática e a qualidade dos furos. Diante desse contexto, desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de apresentar e discutir a qualidade de furos obtidos por este método.

Uma análise cinemática completa do FHI está fora do escopo deste artigo. No tópico seguinte apresenta-se apenas uma síntese sobre os movimentos e grandezas principais, necessários à programação da máquina CNC. Maiores informações podem ser encontradas em Pangrácio ⁽¹⁾.

2. FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO

O processo de fresamento helicoidal (FH) não é uma técnica nova e foi desenvolvido bem antes do surgimento da tecnologia CNC. Fresadoras equipadas com dispositivos mecânicos para geração do movimento planetário da ferramenta em relação à circunferência do furo, associado com um movimento linear na direção axial já foram utilizadas, há várias décadas atrás, para operações de roscamento interno como também externo segundo Stemmer ⁽²⁾.

Com o surgimento e evolução da tecnologia CNC pôde-se vislumbrar a possibilidade de geração e controle de trajetórias helicoidais. Esse tipo de trajetória pode ser resultante da interpolação, de forma independente, do movimento axial e circular como também pode resultar da composição de um número bem elevado de pequenas interpolações lineares nos três eixos da máquina. Essa última possibilidade é bastante utilizada em sistemas CAM (Computer-Aided Manufacturing) cujas trajetórias resultantes são sempre segmentos de retas definidas pelo código G1.

A Figura 1(a) contém uma representação esquemática do movimento helicoidal resultante da interpolação circular associada ao movimento linear na direção axial do furo. Pode-se observar também que o movimento é o mesmo para o fresamento de roscas, sendo que o avanço axial (f_a) corresponde ao passo da hélice.

A Figura 1(b) contém um desenho esquemático equivalente à suposta vista superior da montagem apresentada na Figura 1(a). Pode-se observar que o movimento de corte tem a direção tangencial do círculo da fresa e velocidade de corte (v_c) dada por:

$$v_c = \frac{\pi d n_z}{1000} \left[\frac{m}{\min} \right] \quad (1)$$

Onde d [mm] corresponde ao diâmetro e n_z [min^{-1}] à rotação da fresa em torno do eixo “Z” (ver representação esquemática da máquina na Figura 2(a)). Ainda neste plano, o movimento de avanço é circular e tem velocidade tangencial (v_{fc}) e rotação (n_{xy}) que pode ser determinada por:

$$n_{xy} = \frac{vf_c}{\pi d_c} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (2)$$

Onde, n_{xy} é a rotação (ou frequência) deste movimento, o que coincide com o plano da mesa da máquina (Figura 2(a)). d_c é o diâmetro do círculo a ser interpolado e pode ser calculado por

$$d_c = D - d \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

A velocidade de avanço na direção axial (vf_a) pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$vf_a = f_a n_{xy} \quad [\text{mm}/\text{min}] \quad (4)$$

Onde, f_a corresponde ao avanço da ferramenta na direção axial, conforme apresentado na Figura 1(a).

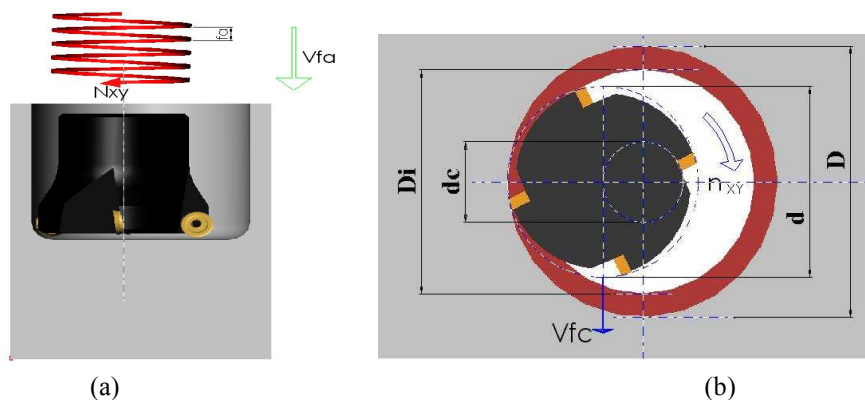


Figura 1. Movimentos principais do Fresamento Helicoidal Interpolado

Um exemplo de programa CN utilizando um ciclo fixo de roscamento pode ser visto na Figura 2(b). Nessa Figura ilustra-se a utilização do ciclo “G22” disponível no comando Romi Mach9. Os demais blocos de programação seguem o padrão ISO. Observando o programa listado na Figura 1(b) deve-se observar que os parâmetros S, F e K, correspondem, respectivamente, às variáveis n_z , Vf_c e f_a .

O FHI pode ser realizado em desbaste, isto é, sem a presença de um pré-furo ou em acabamento. Os fabricantes de ferramentas Sandvik⁽³⁾ e Seco⁽⁴⁾ recomendam, em termos de geometria, as mesmas fresas para ambas as operações. As limitações referem-se apenas aos diâmetros máximo, mínimo como também ao maior valor do ângulo da hélice a ser interpolado.

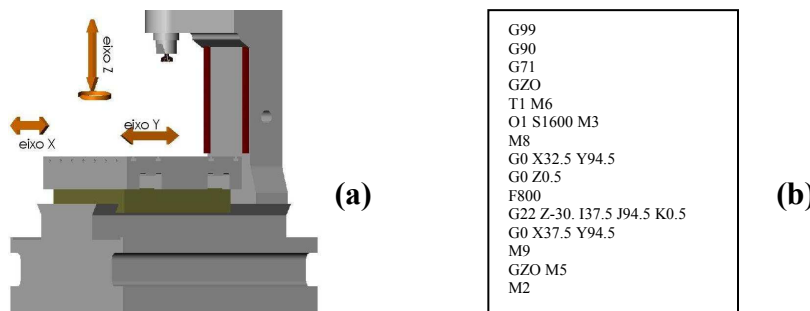


Figura 2 (a) Representação esquemática do centro de usinagem utilizado neste trabalho
(b) listagem do programa CN utilizando o ciclo fixo de fresamento (G22)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados partindo-se da premissa que o processo de fresamento helicoidal interpolado (FHI) é pouco aplicado no meio fabril e os dados encontrados na literatura científica também são escassos ver, por exemplo, Weikert⁽⁵⁾ e Drapa⁽⁶⁾. Além disso, a terminologia referente à geometria e cinemática, bem como as condições de corte encontradas em catálogos de ferramentas não são uniformes. Dessa forma, optou-se por um estudo observacional sobre o efeito de alguns parâmetros de corte na qualidade dos furos obtidos. Sob nenhuma hipótese os valores descritos a seguir devem ser tratados como condição otimizada, mas sim como referência para experimentações futuras.

Apesar de haver um certo consenso em relação à aplicação do FHI para a usinagem de furos de grandes diâmetros, neste trabalho usinou-se furos com diâmetros entre 35 a 38 mm. Esta faixa foi escolhida com o intuito de reduzir os custos da experimentação, porém ainda pode ser considerada como sendo composta de valores grandes, em relação aqueles comumente obtidos por furação.

O material dos corpos de prova ensaiados foi o aço ABNT 1045. Foram utilizadas duas placas nas dimensões de 242 x 272 x 25,4 mm. Estas foram submetidas a um tratamento térmico de normalização, realizado após o corte por plasma, nas seguintes condições: Temp = 600 °C por 6 horas em forno com atmosfera controlada.

Após o recebimento as placas foram fresadas para garantir o esquadramento das laterais, ficando ambas com as medidas finais de 240 x 270 mm. As duas superfícies maiores foram retificadas na dimensão final de 25 mm para propiciar uma melhor referência e fixação durante os ensaios.

Este aço foi selecionado por ser um material muito utilizado na construção de moldes e matrizes para injeção e conformação, o qual é geralmente empregado nas placas bases ou até mesmo nas cavidades. Nesses casos, essas placas recebem furos passantes que funcionam como guias ou alojamentos para as colunas do molde ou da matriz. Além disso, o diâmetro desses furos varia em função das dimensões do molde, o que implica na inviabilidade de se investir em ferramentas dedicadas para sua fabricação.

Todos os ensaios de fresamento foram realizados em um centro de usinagem vertical marca Romi, modelo Discovery 4022 equipado com comando Mach9, cuja representação esquemática pode ser vista na Figura 2(a).

A ferramenta utilizada nos experimentos foi uma fresa de topo toroidal de três arestas de corte adquirida da empresa Sandvik Coromant, conforme código R200-015A20-10H. Escolheu-se insertos intercambiáveis redondos, conforme código ISO RCKT 10 T3. Todos os insertos possuíam quebra cavaco MO-PM. O material dos insertos foi o metal duro revestido classe 4030. Após a realização de dois furos, em qualquer condição ensaiada, trocou-se a aresta de corte.

Após as pastilhas estarem montadas no suporte, foram realizadas as medidas de variações radiais e axiais, as quais não excederam o valor de 0,03mm.

Os corpos de prova foram posicionados e fixados na mesa da máquina com auxílio de calços e grampos. Em todos os ensaios utilizou-se fluido de corte. O fluido utilizado foi uma emulsão 80% água e 20% óleo (FUCHS – ECOCOOL DURANT 71) distribuído em três bocais alinhados a aproximadamente 45° em relação ao eixo árvore da máquina.

As rugosidades das superfícies usinadas foram avaliadas após cada ensaio via parâmetro Ra. A rugosidade de cada furo foi tomada pela média de quatro observações equidistantes sobre a mesma secção transversal considerada na metade do comprimento do furo. O rugosímetro foi posicionado em relação aos corpos de prova de forma a garantir que todas as medidas fossem feitas na direção do avanço axial. Empregou-se um rugosímetro de contato marca Mitutoyo, modelo SJ201 com cut-off 0,8 e comprimento de amostragem de 5 mm.

Os desvios de circularidade e cilindridade foram mensurados em uma MMC (Máquina de Medir por Coordenadas) marca Brown & Sharpe, modelo DEA Scirocco 070909 com apalpador de ponta esférica ϕ 4mm.

Os ensaios descritos a seguir foram delineados em duas etapas. Na primeira executou-se aqueles relacionados com o fresamento em cheio, isto é, sem pré-furo. Este processo é denominado aqui de Fresamento Helicoidal Interpolado em Cheio (FHI_C). Na segunda parte, os furos obtidos no desbaste foram acabados, em um processo de Fresamento Helicoidal Interpolado com Pré-Furo (FHI_{PF}).

3.1 Fresamento Helicoidal Interpolado em Cheio (FHI_C)

Este processo pode ser considerado como uma etapa de desbaste. Entretanto, as condições de corte selecionadas nesta etapa (ver Tabela 1) e em especial os valores de f_a , aproximam-se mais de uma operação de acabamento. O intuito disso foi avaliar se o nível da qualidade de trabalho obtido permite dispensar a aplicação subsequente do FHI_{PF}.

As variáveis de corte adotadas nesta etapa foram a velocidade de corte (v_c), a velocidade de avanço circular (v_{fc}) e o avanço axial (f_a). Escolheu-se tais grandezas, baseando-se na importância das mesmas enquanto parâmetros de programação, ver Figura 2(b). Entretanto, ressalta-se aqui, que tais variáveis, em especial a v_c e a v_{fc} , não são independentes, no sentido estatístico do termo. Portanto, os ensaios realizados foram tratados como um “estudo observacional” e não como experimentos. As variáveis dependentes foram a rugosidade, avaliada pelo parâmetro R_a , a circularidade e a cilindricidade.

Foram usinados oito furos de diâmetro 35 nas condições apresentadas na Tabela 1. Os furos foram executados em seqüência cruzada para minorar possíveis efeitos da liberação de tensões.

Tabela 1 – Condições de corte adotadas no FHI_C

Ordem de usinagem	v_c (m/min)	v_{fc} (mm/min)	f_a (mm/v)
01	125	800	0,5
02	100	600	0,3
03	125	800	0,3
04	125	600	0,5
05	100	800	0,5
06	125	600	0,3
07	100	600	0,5
08	100	800	0,3

3.2 Fresamento Helicoidal Interpolado com Pré-Furo (FHI_{PF})

A partir dos resultados obtidos pelo processo FHI_C adotou-se a condição (v_c ; v_{fc} ; f_a) que produziu o furo de melhor rugosidade. Com essas condições mantidas constantes, usinou-se seis furos em seqüência aleatória. Três foram fresados no sentido concordante e os demais no modo discordante, o que implicou em duas amostras de tamanho três para cada condição.

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente aplicando um teste de significância (comparação de duas amostras) baseado na distribuição de Student. A avaliação da qualidade dos furos foi feita apenas pelas variáveis dependentes rugosidade (R_a) e circularidade.

Na preparação do programa CN, ver Figura 2(b), o ciclo de fresamento utilizado deve ser alterado de G22 (concordante) para G23 (discordante).

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da Rugosidade para o FHI_C

A influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade está graficamente representada na Figura 3. Pode-se observar que os melhores valores de R_a foram obtidos com os menores valores de f_a . A única condição, na qual o f_a (0,5 mm) implicou em resultados melhores, foi observada para v_{fc} (600 mm/min). Dessa forma, pode-se dizer que existe uma tendência de influência do avanço axial sobre a rugosidade. Isto, de certa maneira, concorda com o efeito do avanço observado em outros processos, como por exemplo o torneamento. Não obstante, uma experimentação mais rigorosa

deve ser feita com intuito de separar e quantificar a influência real de cada fator e suas possíveis interações. Por outro lado, do ponto de vista prático, deve-se observar que menores valores de f_a conduzem, diretamente, a tempos de corte maiores.

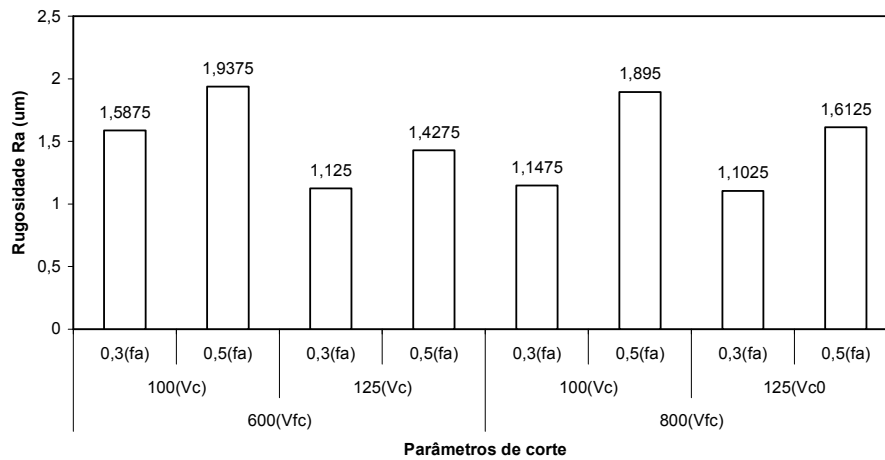


Figura 3. Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade (Ra)

4.2 Resultados da Circularidade para o FHIc

Nesta etapa foram avaliados os valores da circularidade em relação aos parâmetros de corte. Pode-se observar, a partir da Figura 4, que de forma similar ao que ocorreu com a rugosidade, os melhores desvios de ocorreram para $f_a = 0,3$ mm.

Na Figura 4 pode-se notar que o melhor valor da circularidade ficou com os parâmetros de $v_{fc} = 800$ mm/min, $f_a = 0,3$ mm e $v_c = 100$ m/min, coincidindo com os fatores v_{fc} e f_a em relação à rugosidade. Apesar de não ser possível afirmar que existe uma influência significativa na circularidade, os melhores valores foram encontrados com o menor valor de $f_a = 0,3$ mm.

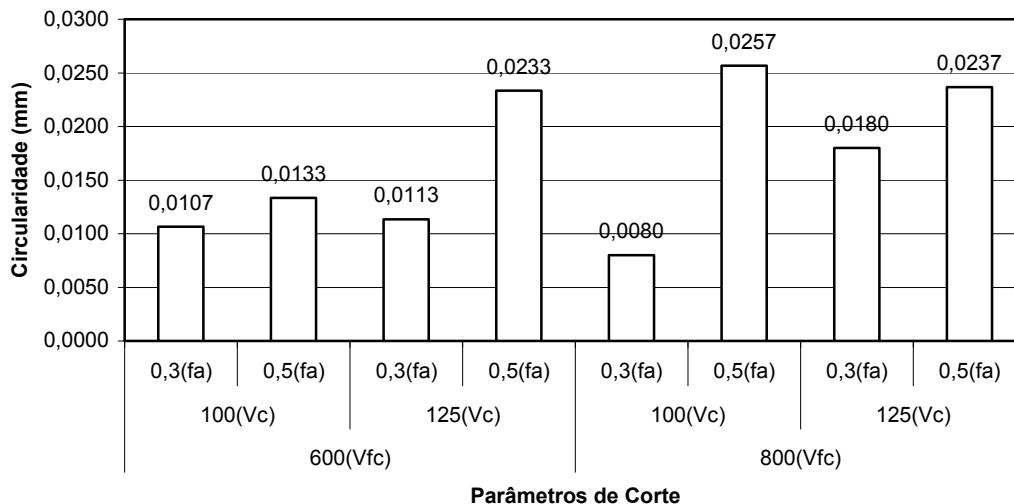


Figura 4. Variação da circularidade no FHI_C

4.3 Resultados da Cilindricidade para FHIc

Obteve-se o melhor valor de cilindridade com os parâmetros de corte $f_a = 0,3$ mm, $v_c = 125$ m/min e $v_{fc} = 600$ mm/min (Figura 5). O f_a tem uma influência maior, porém não se pode dizer que é significativa em relação aos outros fatores. Além disso, deve-se observar que a deformação elástica proveniente da grande retirada de massa entre furos adjacentes pode ter influenciado tanto a

circularidade como a cilindridade. Uma alternativa para isolar esta influência teria sido a realização de um único furo por corpo de prova.

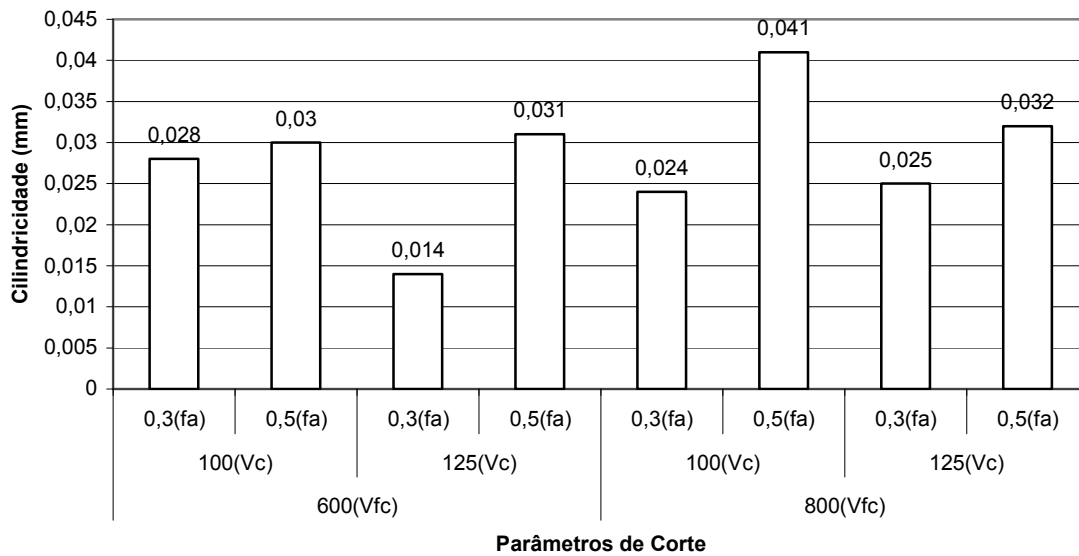


Figura 5. Variação da cilindridade no FHI_C

4.4 Resultados da Rugosidade para o FHI_{PF}

Para o processo FHI_{PF} realizado para a variação dos diâmetros de 35mm para 38mm, os parâmetros de corte utilizados foram: $f_a = 0,3\text{mm}$, $v_c = 125\text{m/min}$, $v_{fc} = 800\text{mm/min}$. Essa condição foi a que propiciou a obtenção da melhor qualidade de superfície ($R_a = 1,1025 \mu\text{m}$) no fresamento em cheio. Pode-se constatar que não houve, em média, uma diferença significativa ($P > 0,9$) do tipo de fresamento (concordante x discordante) em relação a rugosidade (Tabela 2). Isto pode ser explicado pela maior rigidez do sistema de acionamento da máquina (fusos de esferas pré-tensionadas) em relação à vantagem do fresamento concordante, quando avaliado em máquinas convencionais (sistema fuso-porca).

Além disso, em comparação aos valores do FHI_C e para a condição adotada, observou-se, ver Figura 6, rugosidades menores em todos os furos. Isto pode ser explicado pelo menor fluxo de cavacos e menor deformação plástica da superfície usinada, decorrente de uma menor taxa de remoção.

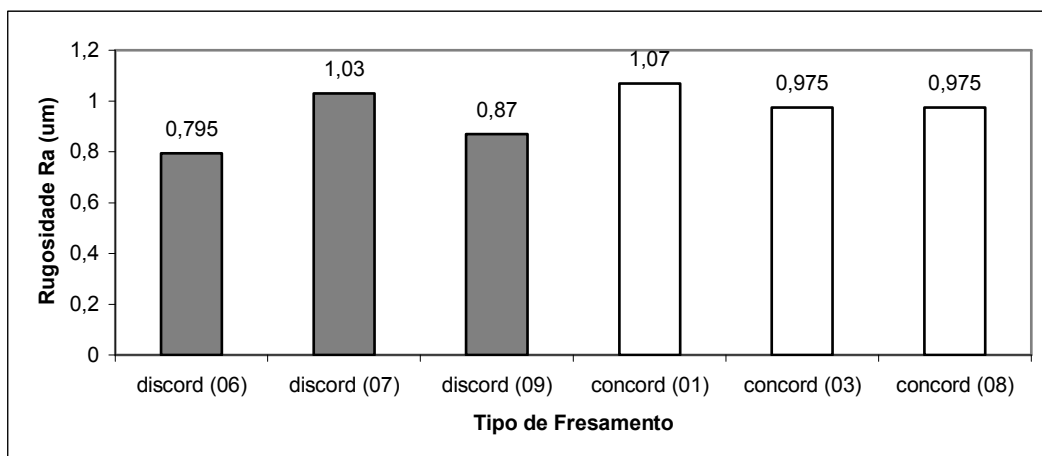


Figura 6. Representação da Rugosidade Ra no FHI_{PF}

Tabela 2. Teste estatístico do Ra para os tipos de fresamento concordante e discordante

	média	Desvio padrão	t	P
Concordante	1,006	0,054	0,1326	0,900
Discordante	0,898	0,12		

4.5 Resultados da Circularidade para o FHI_{PF}

Para a circularidade observa-se também que não houve diferença significativa entre os tipos de fresamento, ver valores na Figura 7. Para a condição de corte avaliada, pode-se concluir que o FHI_{PF} apresentou desvios menores de circularidade quando comparado ao FHI_C. Isto pode ser explicado pela provável redução dos esforços de corte decorrente da menor taxa de remoção adotada no FHI_{PF}.

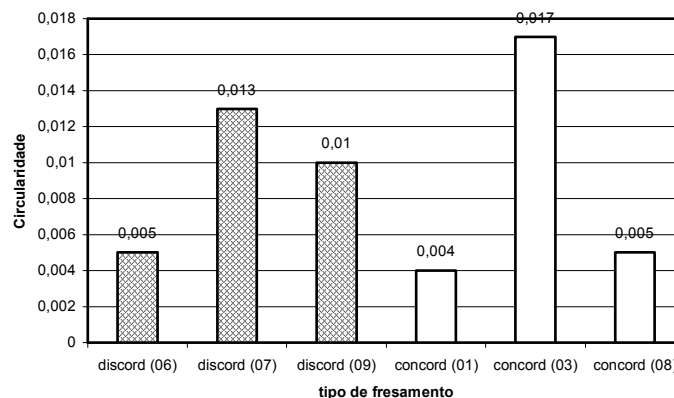


Figura 7 – Representação da Circularidade para o FHI_{PF}

5.CONCLUSÕES

A influência real dos diferentes parâmetros de corte, estudados neste trabalho, não foi possível de ser avaliada a partir dos ensaios realizados. Uma experimentação mais rica faz-se necessária para a quantificação dessas diferenças. Não obstante, pôde-se observar as seguintes tendências:

- valores menores de avanço axial (f_a) implicam em menor rugosidade da superfície usinada; e
- para as condições ensaiadas, o tipo de fresamento (concordante ou discordante) aparentemente não influencia a qualidade das superfícies usinadas.

Sob o ponto de vista da produtividade, pode-se constatar que o tempo de corte nas operações de desbaste (fresamento em cheio) e acabamento é muito alto, pois a ferramenta percorre uma trajetória mais extensa, quando comparados a outros processos, como por exemplo, a furação. Entretanto, o Fresamento Helicoidal Interpolado propicia uma maior racionalização de ferramentas, ou seja, uma mesma fresa pode ser aplicada na usinagem de superfícies internas (furos) e externas (cilindros) para uma larga faixa de diâmetros e também em operações de fresamento periférico e frontal.

Além disso, por se tratar de uma ferramenta “multi-operações”, a fresa utilizada neste processo pode ficar residente no magazine da máquina, reduzindo, de forma significativa, seu tempo de preparação, quando comparado às trocas de brocas e (ou) barras de mandril.

Como conclusão geral, pode-se afirmar que Fresamento Helicoidal Interpolado é uma excelente alternativa para empresas que trabalham sob encomenda e com alta diversificação, como por exemplo as ferramentarias.

6. REFERÊNCIAS

1. PANGRÁCIO, M. L. **Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado**. 2003. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
2. STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**, Santa Catarina, Ed. UFSC.
3. SANDVIK Coromant. **Catálogo de Ferramentas Rotativas**. 2002
4. SECO Tools. **Catálogo de Fresamento**. 2003
5. WEIKERT, S., RITTER, R. Fresamento circular versus mandrilamento. **Revista Máquinas e Metais**, v. 8, n. 435, p. 48-55, 2002
6. DRAPA Corporation. **Using helical interpolation to make large-diameter holes**. 2002

QUALITY ANALYSIS OF HOLES MACHINED BY INTERPOLATED HELICAL MILLING

Dalberto Dias da Costa

Universidade Federal do Paraná - Setor de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica - Centro Politécnico – Caixa Postal 19011 CEP 81531-990 Curitiba – PR Fone/Fax: 41XX361-3207
e-mail: dalberto@demec.ufpr.br

Jefferson de Oliveira Gomes

Instituto de Tecnologia Aeronáutica - Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica
Praça Marechal Eduardo Gomes, Vila das Acácias CEP 12228-900, São José dos Campos-SP-
Fone: 1239475814
e-mail: gomes@ita.br

Mauro Luiz Pangrácio

Universidade Federal do Paraná – PGMEC/DEMEC - Centro Politécnico – Caixa Postal 19011 CEP 81531-990 Curitiba – PR Fone/Fax: 41XX361-3207
e-mail: mauropangracao@hotmail.com

ABSTRACT: *Hole machining is largely done by drilling process. However, depending on the quality requirements, other process like boring, reaming or honing is demanded. Nowadays, the shop floors equipped with CNC machines and standard, end or face mills, can count on a new cutting strategy named Interpolated Helical Milling (IHM). This new option is recommended by the tool manufacturers as an advantageous technique in the machining of large holes. The main purpose of this paper is to present the results of the influence of cutting conditions on the milled hole's quality. This evaluation was based on surface roughness (Ra), roundness and cylindricity. Eight 35 mm diameter holes were milled in a SAE 1045 steel plate without previous drilling. After, they were finished, by the same process, to 38mm diameter. All tests were carried out in a vertical machine center using a thoroidal milling cutter with coated cemented carbides. The better surfaces were achieved with less material removal rate. Despite of a higher cutting time, IHM allow tool inventory reduction, because the same tool can be applied in other operations, such as peripheral and face milling.*

Keys words: *machining, hole's quality, interpolated helical milling*