

**JORGE WENDA**

**AVALIAÇÃO DE FUROS OBTIDOS POR  
FRESAMENTO HELICOIDAL SOB  
DIFERENTES CONDIÇÕES DE  
USINAGEM**

---

Trabalho apresentado na disciplina  
TM-202 Trabalho de graduação IV  
como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico, no Curso de Graduação  
de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Paraná.  
Orientador: Prof. Dr. Dalberto Dias  
da Costa.

Curitiba, Dezembro 2009

# AVALIAÇÃO DE FUROS OBTIDOS POR FRESAMENTO HELICOIDAL SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM

**Jorge Wenda**

Universidade Federal do Paraná Bloco IV do Setor de Tecnologia, Centro Politécnico  
Campus II Bairro Jardim das Américas Cx. 19011, CEP 81531-990, Curitiba, PR

**Resumo:** Não é de hoje que “onde há concorrência não há tempo a perder” através desta idéia as empresas visam reduzir custos e aumentar a qualidade por meio da otimização dos processos de fabricação. Um dos processos de usinagem mais utilizados na fabricação de diversos componentes do setor metal mecânico é a furação, e esta é a responsável por grande parte do tempo de corte efetivo na usinagem, o que a torna um processo complexo influenciando diretamente nos custos produtivos e improdutivos. Equivalente aos processos convencionais de usinagem tem-se a recomendação dos fabricantes de ferramentas pelo fresamento helicoidal interpolado como uma opção para abertura de furos de grande diâmetro. O propósito principal deste trabalho é apresentar e discutir a qualidade de furos obtidos por fresamento helicoidal interpolado (FHI) em aço AISI P20, sob diferentes condições de usinagem desta forma um estudo observacional foi realizado com o intuito de estudar a influência das variáveis: velocidade de corte, avanço axial e a velocidade de avanço do movimento circular, assim as variáveis independentes no processo serão: dois modelos de centros de usinagem, dois tipos de fresa, e condições de corte. Como formas de avaliação dos furos realizados pelo FHI serão realizados ensaios em cheio posteriormente reutilizando estes mesmos corpos de prova na condição de pré-furo para acabamento através de fresas com insertos intercambiáveis em metal duro. Para analisar a qualidade dos furos sob ponto de vista do erro de forma será avaliado a cilindricidade e a circularidade, e para quantificar segundo a qualidade superficial será avaliada a rugosidade ( $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_y$ ). Esperam-se como conclusão deste trabalho definir o FHI com um processo de furação vantajoso onde os custos em relação ao processo convencional de furação sejam reduzidos obtendo qualidade superficial e de forma.

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

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de furação esta presente no nosso dia a dia e é comumente utilizado no setor metal mecânico para atender requisitos de projetos em peças e componentes realizando as mais variáveis funções nos elementos usinados. Este método usinagem exige elevado número de ferramentas, pois, para cada diâmetro de furo é necessário uma broca correspondente. Surgem ainda mais problemas no processo de furação quando se necessita abrir furos em diâmetros superiores, pois, necessitam de pré-furação ou quando as tolerâncias dimensionais envolvidas são mais restritas, além da qualidade superficial requerida.

Ressalta-se também que para a abertura de furos pode ser utilizada uma técnica que cresce a cada dia, onde utilizamos centros de usinagem para abertura de furos através de interpolação helicoidal.

Assim neste trabalho foi utilizado o processo de fresamento de topo com pastilhas intercambiáveis onde as condições de usinagem para desbaste e de acabamento foram diferentes respeitando as condições de corte entre as máquinas ferramentas foram equivalentes. Assim tem por objetivo comparar dois centros de usinagem através da avaliação da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado (FHI) em aço AISI P20. Onde os parâmetros utilizados para esta avaliação foram a cilindricidade, circularidade, rugosidade média Ra, R<sub>máx</sub>, e Rz para isto serão utilizadas ferramentas estatísticas e gráficas que analisarão os dados coletados dos corpos de prova. Este trabalho ainda visa à possibilidade da redução do inventário de ferramentas e conseqüentemente redução dos tempos improdutivos, que serão convertidos em redução de custos para as indústrias que utilizam processos de furação através de máquinas com comando numérico.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fresamento helicoidal interpolado (FHI) ou freso furação é uma técnica que consiste no avanço da ferramenta em um trajeto espiral na direção axial do fuso.

Este tipo de processo de usinagem geralmente ocorre com apenas uma ferramenta e sem problemas de quebra, escoamento de cavaco ou vibrações uma vez que é considerado o diâmetro da ferramenta menor que o diâmetro do furo a ser usinado. Também para este tipo de processo se pode usar máquinas de menor porte e com potência limitada para abertura de furos e cavidades equivalentes as produzidas por máquinas de uma capacidade maior. Desta forma o fresamento helicoidal interpolado é empregado principalmente na fabricação de moldes e matrizes, apresentando grandes vantagens na usinagem de furos com diâmetros elevados.

Realizando uma breve análise das forças sobre a ferramenta, e a peça, talvez o um ponto negativo do processo seja a flexão da ferramenta devido à força radial durante a interpolação helicoidal, o que compromete as características geométricas do furo.

Entretanto, este ponto negativo pode ser contornado de algumas formas como, realizando o FHI em duas etapas, sendo a primeira através de uma operação de desbaste e a segunda por meio com o acabamento do furo, tornando o processo equivalente a técnica de furação convencional com pré-furo, uma segunda alternativa para minimizar as forças atuantes sobre a ferramenta consiste na utilização uma fresa de diâmetro maior.

O aspecto sob ponto de vista dos parâmetros de corte são os mesmos utilizados para o fresamento comum de maneira que a técnica FHI pode ser bastante rápida em materiais que permitam altos valores de velocidade de corte e de avanço.

A velocidade de avanço, no entanto, será limitada a máquina ferramenta utilizada e ao diâmetro do furo. Outro limitante do processo FHI é a profundidade do furo, pois, através da utilização de fresas de topo existe a relação L/D, isto é profundidade sobre diâmetro.

Para uma melhor compreensão do processo a figura 1A representa esquematicamente o avanço da ferramenta num trajeto em espiral na direção axial (Z) do fuso, donde se pode comparar com o processo de abertura de roscas onde o passo da hélice no processo de rosqueamento corresponde ao (*fa*) no caso do fresamento helicoidal.

Em sua maioria os comandos numéricos utilizados em centros de usinagem já possuem ciclos para fresamento helicoidal pré-determinados. O caminho da ferramenta é obtido controlando a velocidade axial com o movimento planetário (N<sub>XY</sub>).

Este movimento planetário é o resultado da rotação da ferramenta de corte e do avanço circular, como exemplificado na Figura 1B. O movimento linear do sentido axial (Z) é mostrado na figura 1A. Esquemáticamente na vista inferior do fresamento helicoidal interpolado Figura 1B se pode observar o diâmetro da fresa ( $d_t$ ), o diâmetro do furo a ser interpolado ( $d_x$ ), o diâmetro do furo ( $d_h$ ), e se nota que na direção tangencial do círculo interpolado se tem o movimento de corte mostrado pela expressão da velocidade de corte ( $V_c$ ) dada pela equação (1) assim a taxa de avanço periférica circular ( $V_{fp}$ ) determina da por (2) na segunda relação tirada da figura 1B.

$$V_c = \frac{\pi \times D_t \times N}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right] \quad (1)$$

$V_c$  = Velocidade de corte [m/min].

$D_t$  = Diâmetro da fresa [mm].

$N$  = Rotação da fresa no eixo [RPM].

A segunda relação obtida através da figura 1B é determinado como:

$$V_{fp} = k \times f_{xy} \times N \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (2)$$

$V_{fp}$  = Taxa de avanço periférico circular [mm/min].

$f_{xy}$  = Avanço por dente do movimento circular [mm/rev].

$N$  = rotação [RPM].

$k$  = é o número de dentes da ferramenta.

Pode-se encontrar o diâmetro do círculo a ser interpolado através da subtração do diâmetro do furo pelo diâmetro da fresa expressão (3).

$$d_{xy} = (d_h - d_t) \text{ [mm]} \quad (3)$$

$d_{xy}$  = mostra o diâmetro do furo interpolado a uma taxa de avanço constante [mm].

$d_h$  = representa o diâmetro do furo final [mm].

$d_t$  = representa o diâmetro da fresa [mm].

$V_{fxy}$  definida como velocidade de avanço no plano cartesianos xy mostrado através da equação (4).

$$V_{fxy} = V_{fp} \times \frac{d_{xy}}{d_h} \text{ [mm/min]} \quad (4)$$

A taxa de avanço axial ( $V_{fz}$ ) para uma ferramenta de corte com  $K$  dentes pode ser encontrada através da expressão (5).

$$V_f = k \times f_z \times N_{xy} \text{ [mm/min]} \quad (5)$$

Sendo

$f_z$  = avanço axial por dente (mm/min)

Ainda é possível calcular o tempo de corte pela expressão (6) para um comprimento de furo  $L_h$ .

$$t_c = \frac{L_h}{V_{fz}} \quad [mm/min] \quad (6)$$

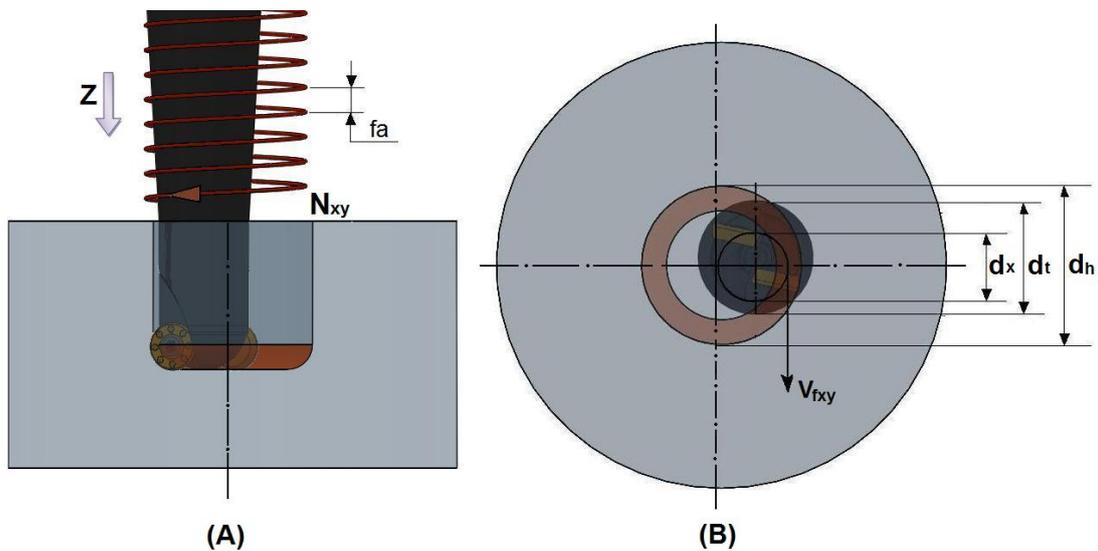


Figura 1 Representação dos movimentos no fresamento helicoidal interpolado

Após a usinagem se torna necessário a verificação da qualidade dos furos obtidos através do fresamento helicoidal, desta forma os furos de uma maneira geral estão diretamente ligados a fatores como o material, o tipo de ferramenta, modo de fixação da peça, da máquina em si, do processo utilizado e dos parâmetros de corte escolhidos.

Com este número de variáveis é muito difícil obter um furo ideal, no entanto é possível obter um furo aceitável dentro das tolerâncias dimensionais e de forma.

As tolerâncias de forma estão relacionadas com a geometria dos furos e as tolerâncias dimensionais estão relacionadas com a medida nominal e a medida real encontrada no furo.

Além disso, as peças apresentam tolerâncias geométricas onde é considerado os desvios das formas da superfície teórica em relação à real.

Estes desvios descritos acima apresentam ainda uma subclassificação onde se tem os desvios macro geométricos como a cilindridade e a circularidade e os desvios micro geométricos onde a rugosidade superficial é levada em consideração.

Através desta previa abordagem pode se enfatizar os dois parâmetros observados.

O campo da tolerância de cilindridade é limitado por dois cilindros coaxiais, distantes em “t”, a diferença entre estes cilindros coaxiais é a cilindridade segundo (NBR 6409 : 1997).

A tolerância para o desvio de circularidade também é classificada de forma macro geométrica onde apresenta uma relação com os diâmetros encontrados na peça. Tais relações são as diferenças do círculo real para o círculo teórico denominadas genericamente de ovalizações.

A circularidade é referenciada no campo de tolerância no plano considerado é limitado por dois círculos concêntricos e distantes de “t, sucintamente a tolerância de circularidade é a variação entre duas circunferências do ponto mais próximo do centro, ao ponto mais afastado. Segundo (NBR 6409:1997),

Em muitos casos as variações na superfície de trabalho são imperceptíveis a olho nu, devido a vales e cristas formadas pela ação do gume de

cutte da ferramenta. Estas variações na superfície são causadas pelas vibrações e variações no processo, pelo desgaste no gume de corte, ou ainda por defeito no material. Assim estas imperfeições na superfície são conhecidas como rugosidade sendo definidas com base na ABNT NBR 6405.

Rugosidade média ( $R_a$ ): é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $\mu\text{m}$ ).

Este parâmetro foi utilizado, pois as principais vantagens do  $R_a$  é que ele é aplicável na maioria dos processos de fabricação e devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro. Dentre suas principais desvantagens são apresentadas segundo o valor de  $R_a$  em

um comprimento de amostragem onde indica a média da rugosidade, desta forma se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito, outra desvantagem deste parâmetro é o fato de não fazer nenhuma distinção entre picos e vales.

Rugosidade máxima ( $R_y$  ou  $R_{\text{max}}$ ): está definida como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição. Dentre as suas principais vantagens ele informa sobre a máxima deteriorização da superfície vertical da peça além de fornecer informações complementares ao parâmetro  $R_a$  (que dilui o valor dos vales e picos). A desvantagem deste parâmetro esta ligada ao fato de individualmente não apresenta informação suficientes a respeito da superfície.

Rugosidade ( $R_z$ ) Corresponde à média dos cinco valores de rugosidade parcial dentre suas vantagens principais do parâmetro  $R_z$  destaca-se informando a distribuição média da superfície vertical, além de fácil obtenção em equipamentos que fornecem gráficos, onde em perfis periódicos, definem muito bem a superfície. Sua desvantagem principal é o fato de que nem todos os equipamentos apresentam este parâmetro.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a avaliação dos furos realizados por fresamento helicoidal interpolado foi utilizado dois tipos de centro de usinagem o tipo (A) Centro de Usinagem marca Romi modelo 4022 sediado na Universidade Federal do Paraná e tipo (B) Centro de Usinagem Cincinatti modelo Milacron Arrow 500 sediado na Pontifícia Universidade Católica do Paraná os quais tem sua comparação observada na tabela 1 abaixo.

<i>Máquina</i>	<i>(A)</i>	<i>(B)</i>
<i>Marca</i>	Romi	Cincinatti
<i>Modelo</i>	4022	Milacron Arrow 500
<i>Comando</i>	Mach 9	Acrumatic 2100
<i>Curso x y z respectivamente</i>	560 x 406 x 508	500 x 500 x 500
<i>Rotação máxima (rpm)</i>	10000	6000
<i>Cone ISO.</i>	40	50

Tabela 1 Comparativo de máquinas

A fixação da ferramenta se deu através de um dispositivo que age como uma interface intercambiável entre fuso de uma máquina ferramenta e uma ferramenta de corte, de maneira que não seja diminuída a eficiência dos elementos mencionados, desta forma o porta ferramentas nos dois centros de usinagem se deu através de cone Weldon de mesma marca, uma diferença na fixação da ferramenta entre as máquinas foi em relação ao tipo de fuso cone ISO 40 no tipo de máquina (A) e ISO 50 no tipo de máquina (B).

Com as ferramentas de corte utilizadas, o processo de fresamento de topo foi empregado como desbaste na condição inicial em cheio e posteriormente, reaproveitando os corpos de prova na condição de pré-furo onde foi realizado o acabamento, mantendo as condições de corte equivalente entre as máquinas e adotando dois tipos de fresas que são comparados na tabela 2. A fresa tipo (A) R300-020B25L-10L Toroidal e a fresa (B) R390D-020A20-11L ambas com quebra cavaco e raio de ponta 0,8 mm, após usinagem de cada furo foi realizada inspeção visual e trocada a aresta de corte quando se julgou necessário.

Seus comprimentos foram diferentes proporcionando ao sistema maior deflexão axial no caso da figura 2A e conseqüentemente uma menor deflexão sofrida pela fresa da figura 2B.

Ferramentas		
Marca	Sandvik	Sandvik
Diâmetro	20	19,7
Arestas de corte	2	3
Código Fresa	R300-020B25L-10L	R390D-020A20-11L
Código Pastilha	R300 10 32E 08-PM 1030	R390-11 T3 08M-PM 4230
Fixação	Weldon	Weldon

Tabela 2 Comparativo de ferramentas

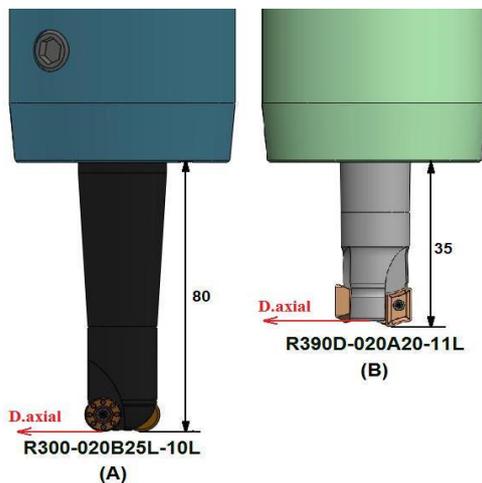


Figura 2 Comparativo de ferramentas

Fixação do corpo de prova para usinagem teve duas etapas, sendo a primeira da morsa na mesa da máquina e a segunda através de gabarito que ficou fixo nos mordentes na morsa.

Um detalhe importante na avaliação dos furos e na usinagem dos

corpos de prova é a orientação no plano cartesiano, ilustrado na figura 3, sendo que posteriormente na etapa da medição de circularidade e cilindridade o corpo de prova deve respeitar a mesma orientação a fim de minimizar discordâncias entre a usinagem e a metrologia.

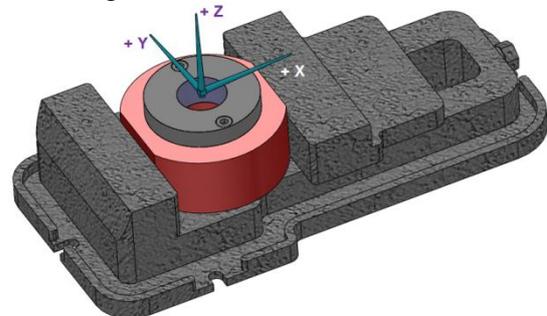


Figura 3 Fixação do corpo de prova.

Como a técnica de fresamento helicoidal interpolado é utilizada com maior frequência em ferramentarias,

onde ocorre à fabricação de matrizes para estampagem e fundição, além de moldes para injeção os corpos de prova deste trabalho foram comprados de material AISI P20 em barra com diâmetro de 4" na sua condição de dureza comercial fornecida esta entre 280 – 320 HB.

Os aspectos relevantes para a confecção do modelo do corpo de prova são os instrumentos disponíveis para avaliação dos dados coletados através do circularímetro e rugosímetro, a utilização de gabarito proporcionando troca rápida entre os corpos de prova, uma melhor distribuição de carga axial. Deste modo se optou por confeccionar um corpo de prova no formato cilíndrico como mostrado na figura 4.

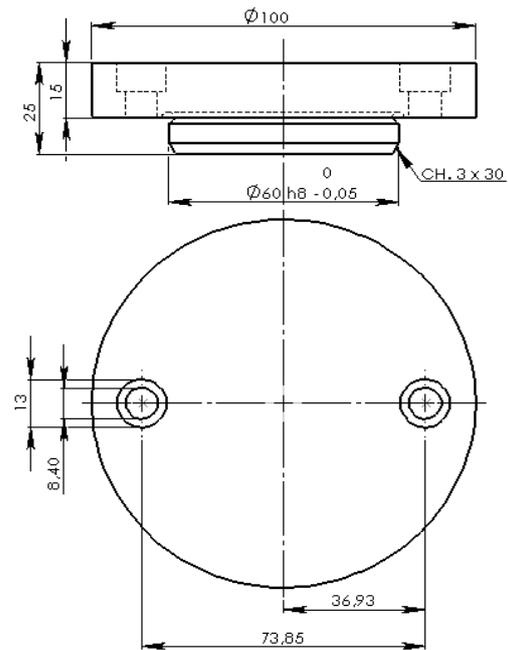


Figura 4 Dimensões do corpo de prova.

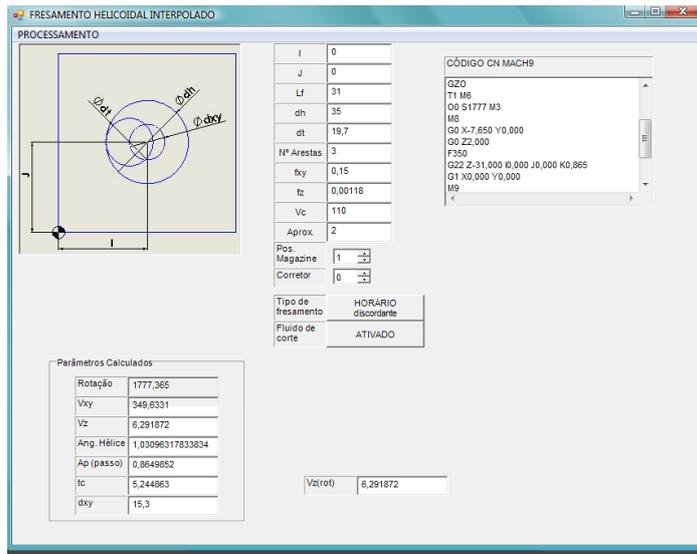
Os corpos de prova foram usinados inicialmente em cheio na condição de corte para desbaste onde foi utilizado fluido de corte emulsão de 20% de óleo e 80% de água direcionada a ponta da ferramenta e foi realizado o fresamento helicoidal de 35 mm de diâmetro posteriormente reutilizando os mesmos corpos de prova na condição de pré-furação adotando-se um valor interpolado de  $\varnothing$  38 mm executou-se operação de acabamento. Esta faixa de valores para os diâmetros dos furos foi escolhida com base no diâmetro das fresas disponíveis procurando minimizar custos e também buscando um furo de diâmetro elevado, quando comparado a furação com brocas de aço rápido e tendo por base trabalhos como os de: D.D.Costa<sup>[1]</sup>, Denkena B<sup>[2]</sup> e R.T. Coelho<sup>[3]</sup>.

Para as condições de desbaste detalhadas na tabela 3 foram utilizadas as duas ferramentas da tabela 2, em três diferentes condições de corte.

Na reutilização dos corpos de prova para a condição de pré-furo realizando acabamento condições de corte são disponibilizadas na tabela 4.

Na geração do código CN se empregou o programa FHI desenvolvido na UFPR onde este programa permite o controle simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita através de código G. Desta forma informamos ao programa alguns parâmetros como o comprimento do furo  $L_f$  o diâmetro do furo a ser interpolado  $dh$ , o diâmetro da fresa  $dt$ , seu número de arestas  $n^\circ$  arestas, além do passo  $f_{xy}$ , o avanço por dente  $f_z$ , a velocidade de corte  $V_c$  e por ultimo a aproximação de segurança que corresponde a quanto à ferramenta ficará afastada da peça antes do início da usinagem, ainda é possível inserir no programa a posição da ferramenta no magazine da máquina bem como o número do corretor de ferramenta, além do tipo de fresamento concordante ou discordante e fluido de corte ON ou OFF.

O programa nos retorna o código CN para o comando Acramatic 2100 da máquina Cincinnati Milacron Arrow 500 ou comando Mach9 para o centro de usinagem Romi 4022 como exemplo ilustrado na Figura 5.



### MÁQUINA ROMI COMANDO MACH9

G99.  
G90.  
G71.  
G17.  
G66.  
GZO  
T1 M6  
O0 S1777. M3  
M8  
G0 X-7,650 Y0,000  
G0 Z2,000  
F799.  
G22 Z-31,000 I0,000 J0,000 K0,300  
G1 X0,0 Y0,0  
M9  
GZO  
M5  
M2

Figura 5 Programa Fresamento Helicoidal Interpolado.

Os corpos de prova um, dois e três, foram usinados tanto no desbastes como no acabamento através da máquina A e os corpos de prova quatro, cinco e seis, nas condições equivalentes foram usinados pela máquina B.

Corpo de prova	Máquina (A)			Máquina (B)		
	1	2	3	4	5	6
velocidade de corte vc (m/min)	110	110	110	110	110	110
n (RPM)	1750	1750	1777	1750	1750	1777
vfc (mm/min)	0,0018	0,0012	0,0018	0,0018	0,0012	0,0018
fa (mm/v)	0.4517	0.4507	0.4507	0.4517	0.4507	0.4507
Diâmetro da fresa (mm)	20	20	19,7	20	20	19,7
n° arestas	2	2	3	2	2	3

Tabela 3 Condições de corte para desbaste

Utilizando sentido horário de rotação da fresa “Fresamento discordante” e mantendo constantes as condições de velocidade de corte, rotação, velocidade de avanço circular constante se usinou seis furos reutilizando os corpos de prova na condição de acabamento segundo as condições de corte mostradas na tabela 4.

Corpo de prova	Máquina (A)			Máquina (B)		
	1	2	3	4	5	6
vc (m/min)	110	110	110	110	110	110
n (RPM)	1750	1750	1777	1750	1750	1777
vfc (mm/min)	0,0018	0,0018	0,001162	0,0018	0,0018	0,001162
fa (mm/v)	0,445	0,446	0,445	0,445	0,445	0,445
Diâmetro da fresa (mm)	20	20	19,7	20	20	19,7
n° arestas	2	2	3	2	2	3

Tabela 4 Condições de corte para acabamento

Como forma de mensurar a qualidade superficial dos furos obtidos, os corpos de prova foram avaliados segundo os desvios micro geométricos onde a rugosidade superficial é levada em consideração. Desta maneira para medição da rugosidade, os corpos de prova foram posicionados no circularímetro de mesa Taylor Hobson modelo TalySurf Series 2 e orientados na posição vertical, onde a agulha se desloca na direção axial coletando pontos na geratriz do furo. Seu cut-off foi ajustado em 0,8 mm e a agulha coletou pontos num percurso de 40 mm de comprimento.

Para medir a rugosidade, o corpo de prova sofreu rotação no sentido radial com quatro incrementos de 90° até finalizar rotação completa de 360° em torno de seu eixo. A figura 6 representa as quatro posições medidas e o percurso da agulha na coleta dos dados onde os parâmetros avaliados foram Ra, Rmax e Rz.

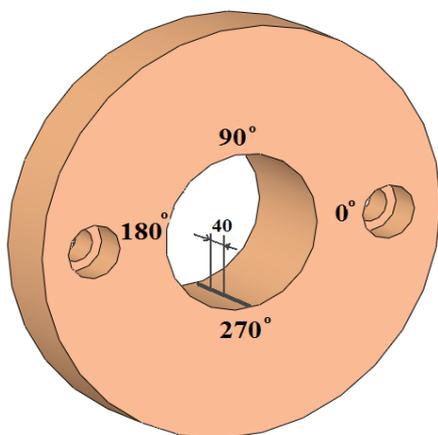


Figura 6 Medição de rugosidade

Na obtenção da circularidade e cilindridade bem como em todo o procedimento experimental, procurou-se realizar cada etapa nas mesmas condições para que houvesse uma uniformização nos procedimentos realizados, esperando com isso obter resultados melhores e mais confiáveis.

Desta forma para a medição de circularidade e da cilindridade os corpos de prova foram colocados no circularímetro marca Taylor Hobson modelo Talyrond 252 e orientados segundo o mesmo sistema cartesiano utilizado na operação de usinagem, e com o auxílio apalpador se realizou três leituras em alturas “Z” diferentes utilizando filtro Gaussian 1-50 upr.

Os valores para referencia de altura “Z” são  $Z_1=43$  mm e  $Z_3=33$  mm como os valores das extremidades e  $Z_2=38$  mm sendo o valor médio. Estes valores de altura Z foram referenciados a partir do zero máquina como ilustrados na figura 7

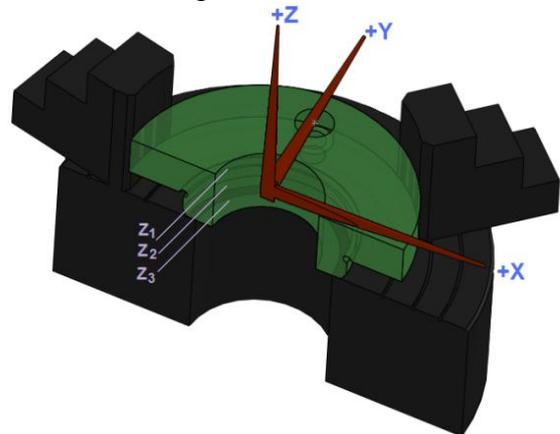


Figura 7 Alturas para medição de circularidade e cilindridade.

#### 4. RESULTADOS

A influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade foi determinada por meio das medições expressas através do valor médio e de Ra, Ry e Rz, além da determinação do seu desvio padrão como uma forma de avaliar a dispersão dos dados colhidos e representados na tabela 5 para a operação de desbaste e na tabela 6 abrangendo os valores coletados no acabamento.

Corpo de prova	FHI_Desbaste					
	XRa	SRa	XRy	SRy	XRz	SRz
1	1,542	0,188	14,643	2,555	9,804	1,019
2	1,237	0,178	6,641	0,722	5,514	0,622
3	1,200	0,331	6,777	3,415	4,876	1,517
4	1,567	0,276	8,866	1,629	6,750	1,393
5	1,656	0,189	10,035	1,983	8,136	1,322
6	1,673	0,132	10,674	0,337	8,743	0,335

Tabela 5 Valores do FHI\_Desbaste

Corpo de prova	FHI_Acabamento					
	XRa	SRa	XRy	SRy	XRz	SRz
1	1,267	0,147	6,303	0,483	5,593	0,352
2	1,468	0,095	6,642	0,465	6,193	0,330
3	0,967	0,336	6,331	1,408	4,927	1,334
4	1,683	0,103	7,429	0,626	6,387	0,275
5	1,555	0,112	7,403	0,568	6,458	0,379
6	0,242	0,026	1,740	0,790	1,331	0,376

Tabela 6 Valores do FHI\_Acabamento

Os valores dos desvios da rugosidade média (Ra) estão comparando a operação de desbaste e acabamento mostrados através do gráfico 1.

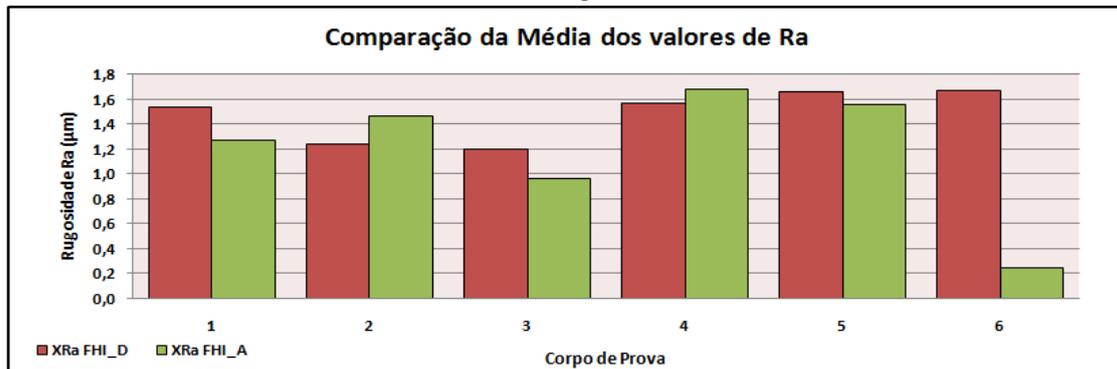


Gráfico 1 Comparação rugosidade média (Ra)

A apresentação dos valores referentes aos desvios da rugosidade máxima (Ry) no FHI\_Desbaste e FHI\_Acabamento foi comparado através do gráfico do gráfico 2.

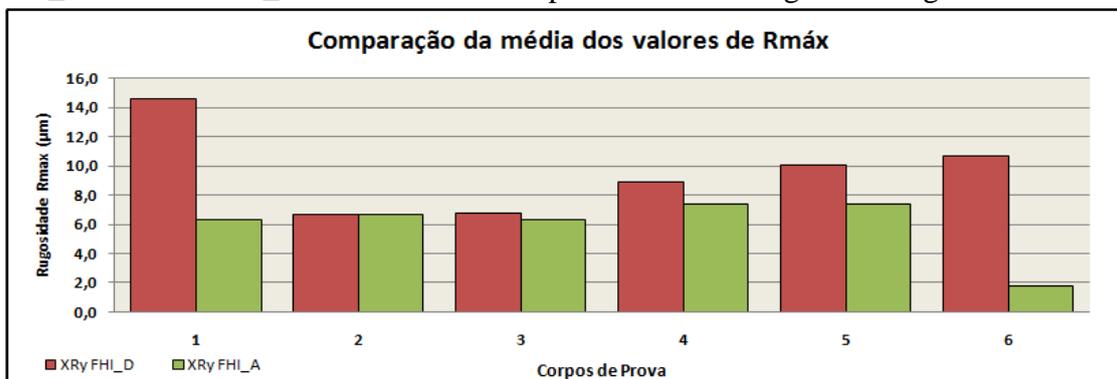


Gráfico 2 Comparação rugosidade máxima (Ry)

Por fim os valores dos desvios da media dos cinco valores de rugosidade parcial é dado pela Rugosidade média (Rz) desbaste e acabamento estão explícitos através do gráfico 3.

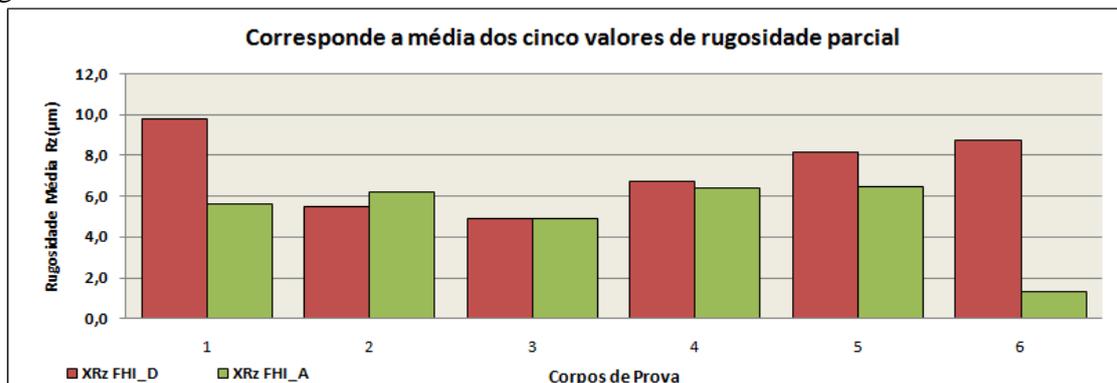


Gráfico 3 Comparação rugosidade média (Rz)

A cilindridade compreende desvios de forma ao longo da seção longitudinal do furo realizado, e a circularidade pode ser entendida como qualquer divergência entre a peça construída e a peça teoricamente exigida com tolerância especificada assim através da média dos valores de  $Z_1$ ,  $Z_2$  e  $Z_3$  os dados referentes a circularidade mostrados na tabela 8 e representados através do gráfico 6 e os resultados da medição de cilindridade podem ser observados na tabela 7, bem como seu gráfico 7. Os gráficos 4 e 5 representam corpo de prova seis na condição de acabamento.

Cilindridade		
CP	FHI_Desbaste $\mu\text{m}$	FHI_Acabamento $\mu\text{m}$
1	66,70	29,40
2	46,50	23,65
3	40,90	30,85
4	25,75	27,60
5	56,20	17,85
6	22,25	20,30

Tabela 7 Valores medidos de cilindridade

Circularidade Média		
CP	FHI_Desbaste $\mu\text{m}$	FHI_Acabamento $\mu\text{m}$
1	39,97	14,97
2	36,70	20,38
3	38,50	27,55
4	23,42	19,83
5	17,40	14,60
6	24,02	14,22

Tabela 8 Valores médios de circularidade

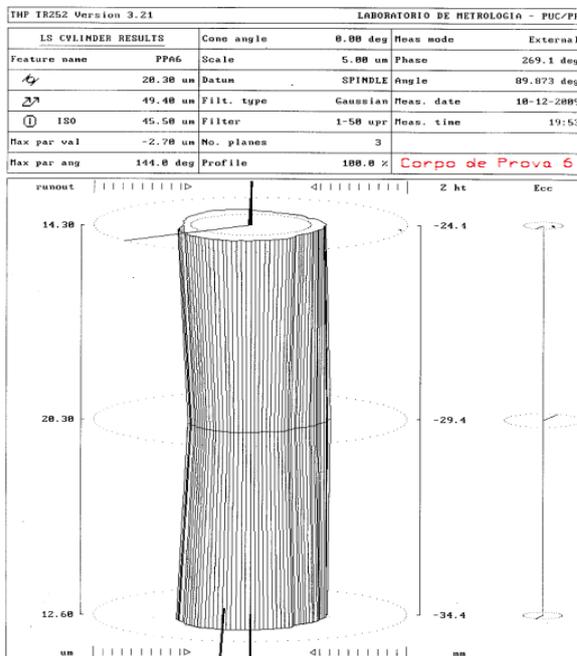


Gráfico 4 Corpo de prova 6 FHI\_Acabamento

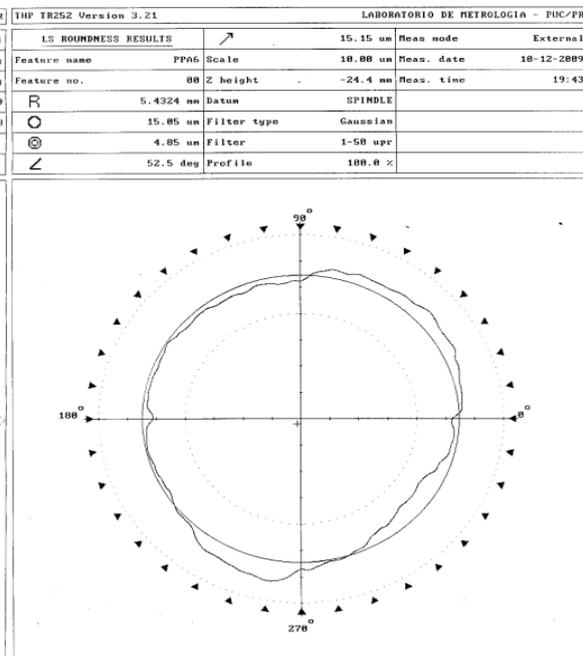


Gráfico 5 Valor de  $Z_1$  no FHI\_Acabamento

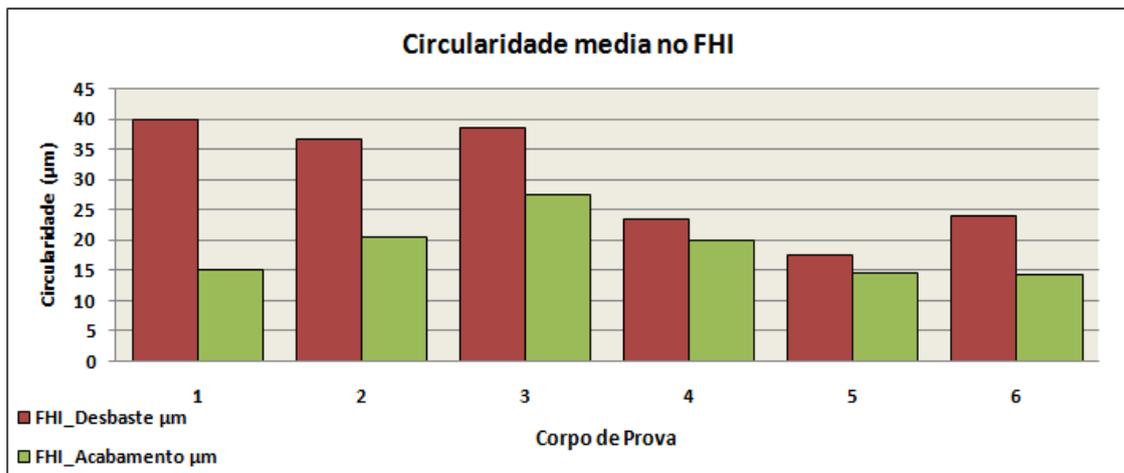


Gráfico 6 Comparação da Circularidade Média

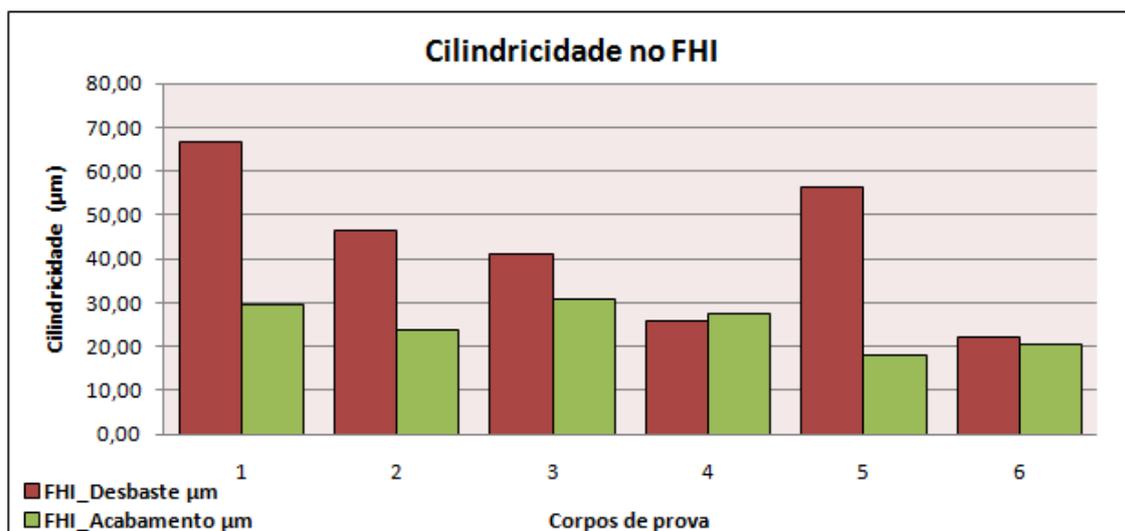


Gráfico 7 Comparação da Cilindridade

## 5. ANALISE

Tanto para a condição de pré-furo com diâmetro de  $\varnothing 38$  mm como para a condição onde ocorreu o fresamento em cheio com  $\varnothing 35$  mm os corpos de prova 3 e 6 utilizando a fresa de topo R390D-020A20-11L nas condições de corte,  $V_c=110$  e rotação do eixo árvore de 1777 RPM, segundo os parâmetros de rugosidade Ra, Ry, e Rz, se mostrou superior quando comparada a ferramenta toroidal de duas arestas de corte.

Na operação de acabamento do corpo de prova 6, donde ocorreu a situação de aumento de  $\varnothing 35$  mm para  $\varnothing 38$  mm, nas condições de corte  $f_a=0,445$ ,  $V_{fc}=0,001162$ , e se mantendo constante a rotação do eixo árvore, e a velocidade de corte da condição de desbaste, se pode observar através dos parâmetros de rugosidade Ra, Ry, e Rz, uma considerável discrepância, tendo o valor de rugosidade Ra igual a  $0,242 \mu\text{m}$  que foi atingido pela ferramenta de  $\varnothing 19,5$ . Como referência foi tomado o segundo valor mais baixo que foi obtido no corpo de prova 3 com Ra igual  $0,967 \mu\text{m}$  usinado pela máquina "A".

A discrepância do valor de Ra, para o acabamento se torna mais evidente quando é comparado com a mesma ferramenta de corte, e o mesmo corpo de prova usinado na condição de desbaste alcançando seu valor de "Ra" igual a  $1,673 \mu\text{m}$  o que representa um valor quase 7 vezes superior. Uma possível causa desta discrepância se deve troca de pastilhas por um novo jogo, uma vez que com um menor desgaste ocorreu uma menor vibração da fresa obtendo uma rugosidade inferior, pois foi mantida constante a tanto a altura da fresa R390D-020A20-11L, quanto o fluido de corte, uma vez que as condições de corte não sofreram alterações significantes.

O maior valor da rugosidade foi avaliado pelo parâmetro Ry onde no desbaste a fresa esférica foi seguida da fresa de topo reto com um valor próximo nas condições ensaiadas pela máquina A. Já na operação de pré-furo novamente a máquina B desempenhou melhor usinagem utilizando a fresa de três arestas.

Através dos gráficos da cilindridade como da circularidade, se pode afirmar que a máquina "A" apresenta desempenho inferior a máquina "B" tanto para o acabamento quanto para o desbaste utilizando para isto a fresa de  $\varnothing 19,7$ mm.

## 6. CONCLUSÕES

Através da qualidade dos furos obtidos pelo FHI é possível avaliar de forma observacional qual máquina e qual ferramenta desempenhou o melhor papel ao realizar o fresamento helicoidal interpolado segundo as condições aplicadas no experimento.

Assim conclui-se que a máquina “B” teve desempenho superior que a máquina “A” quando comparado com as mesmas ferramentas em condições equivalentes de corte.

Também é possível afirmar que a fresa de topo reto R390D-020A20-11L se mostrou superior a fresa toroidal devido ao formato do inserto e a menor vibração ocorrida no sistema.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Da Costa, DD, Gomes, OL e Pangrácio, ML. Análise de qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado. *Maquinas e Metais* 485 (2006) pp 34-51.
- [2] Denkena B, Boehnke D, Dege, JH. Fresamento helicoidal de CFRP-titânio. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (2008) p64–69. Institute of Production Engineering and Machine Tools, Leibniz Universita t Hannover, An der Universita t 2, 30823 Garbsen, Germany.
- [3] Coelho R.T, Watanuki H.M, Arai R. Furação com fresa de topo usando estratégia helicoidal em aço endurecido AISI H13 Metal mecânica, Brasil, p49–58, 01 ago. 2006.
- [4] Iyer R, Koshy P, o Ng E. Fresamento Helicoidal: Uma tecnologia que permite a usinagem de precisão furação em aço ferramenta AISI D2. *Diário internacional de Ferramenta elétrica e Fabrica*.
- [5] Sandvik – Manual Técnico de Usinagem, 2006 D3 - D185.
- [6] Sandvik - de Ferramentas rotativas, 2003 A67, A248.