

ANDERSON DE LIMA PADILHA

EFEITO DE ALISAMENTO NO FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO

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 de 2012

EFEITO DE ALISAMENTO NO FRESAMENTO HELICOIDAL INTERPOLADO

Anderson de Lima Padilha

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: O fresamento helicoidal interpolado para a abertura de furos de grandes diâmetros é uma opção ao processo de furação convencional. O propósito deste trabalho foi investigar o efeito da aresta secundária da pastilha de corte sobre as paredes dos furos obtidos por fresamento helicoidal interpolado (FHI) em aço SAE 1045. Como forma de avaliação dos furos realizados pelo FHI foram realizados ensaios com furos em cheio, isto é sem pré-furo e posteriormente reutilizando alguns corpos de prova na condição de pré-furo para operação de acabamento. Para isso utilizou-se fresas com insertos intercambiáveis de metal duro em centro de usinagem CNC comumente utilizado na indústria. Para analisar a qualidade dos furos quanto à qualidade superficial foi avaliada a rugosidade (R_a , R_z e R_y) em μm . Como conclusão deste experimento observou-se que se a pastilha de corte utilizada e a sua montagem na fresa dentro das condições ensaiadas, provocam alisamento nas paredes dos furos obtidos pelo processo de FHI.

Palavras-chave: fresamento helicoidal interpolado, alisamento, pastilha.

1. INTRODUÇÃO

O fresamento helicoidal interpolado (FHI) surgiu como alternativa à furação convencional, o qual exige a interpolação simultânea em três eixos, o que torna este tipo de processo uma melhor opção dentro dos processos de furação de grandes diâmetros, pois além da produtividade, Iyer et al (2007) e Denkena et al (2008) têm apontado dois aspectos vantajosos do FHI. O primeiro é a sua flexibilidade intrínseca, isto é, a redução ou o aumento do diâmetro do furo que pode ser feito pela mudança de um único parâmetro na programação CNC. A segunda, em oposição à furação convencional, é a redução da quantidade de ferramentas disponíveis no inventário. Brinksmeier et al (2008) destacam que o FHI permite que com a mesma ferramenta se realize a operação de desbaste e acabamento dos furos e ainda a obtenção de furos de vários diâmetros. Sendo assim a furação obtida pelo fresamento helicoidal interpolado pode otimizar o processo de furação. A cinemática do fresamento helicoidal interpolado, já foi estudada por alguns pesquisadores como: (Da Costa et al 2006, Denkena et al 2008, Brinksmeier et al 2008). O FHI é uma técnica que consiste no avanço da ferramenta em um trajeto helicoidal na direção axial do fuso.

Desta forma o FHI é empregado principalmente na fabricação de moldes e matrizes, apresentando grandes vantagens na usinagem de furos com diâmetros elevados.

Pangrácio (2003) avaliou a qualidade dos furos obtidos por FHI, utilizando como material do corpo de prova o aço 1045. A ferramenta de corte utilizada foi uma fresa de topo toroidal de diâmetro 25 mm de dois insertos redondos ISO RCKT 10T3.

Observou-se em seu experimento que a redução do avanço axial implicou sempre numa redução da rugosidade Ra. As rugosidades obtidas ficaram entre 1,10 e 1,94 μm .

Já Wenda (2009), a partir do trabalho realizado por Pangrácio (2003), incluiu um segundo tipo de ferramenta cujos dados são mostrados na figura 1v.

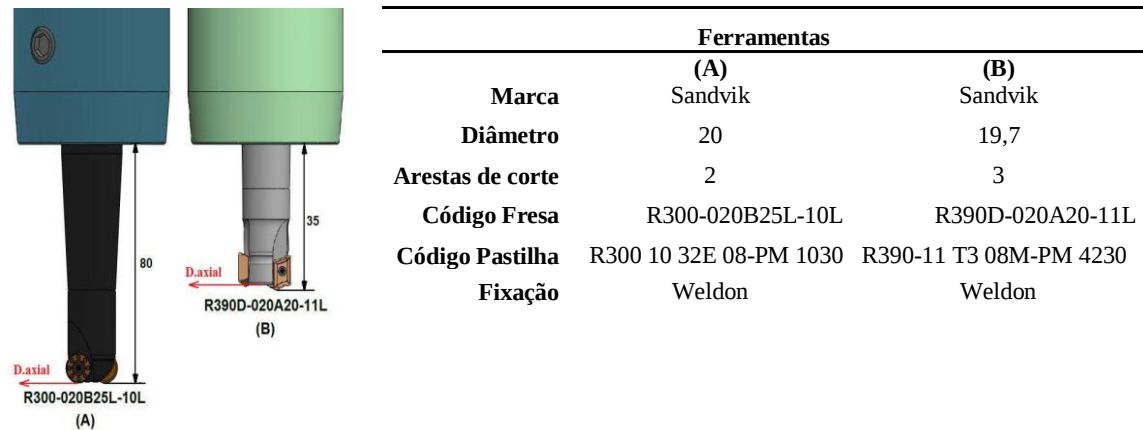


Figura 1- (Fonte: Wenda (2009)).

Os resultados das medidas de rugosidades podem ser observados na tabela 1 .

Tabela 1- (Fonte: Wenda (2009))

FHI_Desbaste							FHI_Acabamento						
Corpo de prova	XRa	SRa	XRy	SRy	XRz	SRz	Corpo de prova	XRa	SRa	XRy	SRy	XRz	SRz
1	1,542	0,188	14,643	2,555	9,804	1,019	1	1,267	0,147	6,303	0,483	5,593	0,352
2	1,237	0,178	6,641	0,722	5,514	0,622	2	1,468	0,095	6,642	0,465	6,193	0,330
3	1,200	0,331	6,777	3,415	4,876	1,517	3	0,967	0,336	6,331	1,408	4,927	1,334
4	1,567	0,276	8,866	1,629	6,750	1,393	4	1,683	0,103	7,429	0,626	6,387	0,275
5	1,656	0,189	10,035	1,983	8,136	1,322	5	1,555	0,112	7,403	0,568	6,458	0,379
6	1,673	0,132	10,674	0,337	8,743	0,335	6	0,242	0,026	1,740	0,790	1,331	0,376
Valores do FHI_Desbaste							Valores do FHI_Acabamento						

Observando a tabela 1 onde estão os valores das rugosidades medidas foi concluído que as rugosidades obtidas utilizando a fresa de topo reto foram sempre menores do que os obtidos com a fresa de topo toroidal. Em especial no ensaio 6 em acabamento obteve-se a rugosidade de 0,242 μm .

Uma possível explicação para essa diferença de desempenho entre as duas fresas seria o alisamento gerado pela ferramenta de topo reto.

Diante disso o objetivo foi estudar se o efeito de alisamento no processo do FHI ocorre quando da utilização da ferramenta de topo reto. Procuramos dentro da literatura, embasamento que nos confirmem as evidências de tal comportamento.

Além desta introdução, o artigo contém nas próximas seções a metodologia, a apresentação e discussão dos resultados, conclusão e referências.

2. EFEITO DE ALISAMENTO EM OUTROS PROCESSOS DE USINAGEM

De acordo com a empresa Sandvik (2001) insertos alisadores (Wiper) de cerâmica e CBN fornecem novos níveis de produtividade. Com estas pastilhas pode ser mantido o acabamento utilizando o dobro do convencional nos valores de avanço. A

ilustração abaixo da figura 2 compara os dois tipos de pastilhas, a convencional e a alisadora.

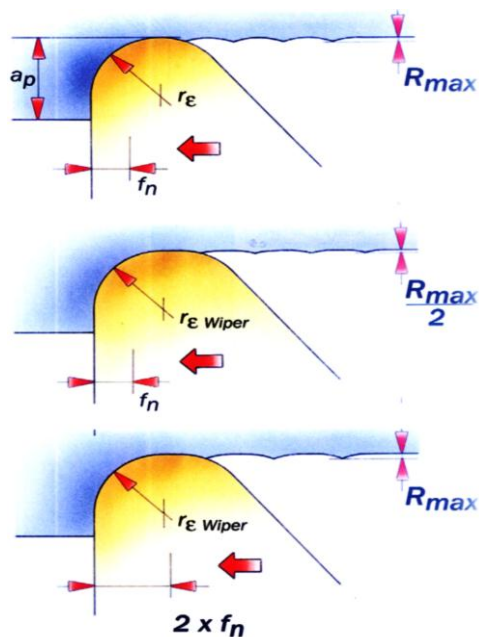


Figura 2. Ilustração que compara pastilhas convencionais com as pastilhas alisadoras. (Fonte: Sandvik (2001))

Pastilhas alisadoras têm surgido como uma significativa classe de ferramentas de corte, que são cada vez mais sendo utilizadas nos últimos anos. Correia et al (2001) compararam a influência dos insertos alisadores em relação aos insertos convencionais sobre a rugosidade, utilizando como material usinado o aço AISI 1045. Com pastilhas alisadoras e alto avanço axial foi possível obter qualidade de superfície de precisão sem a necessidade de operações de retificação obtendo $R_a < 0,8 \mu m$. Pastilhas alisadoras tem geralmente, uma grande área de contato com a peça de trabalho, por consequência produz forças elevadas sobre a peça. Ainda segundo estes autores a usinagem com pastilhas alisadoras fornece uma rugosidade semelhante, quando comparado com ao torneamento com pastilhas convencionais utilizando baixos avanços. Já com altas taxas de avanço, as pastilhas convencionais apresentam valores elevados de rugosidade comparados com as pastilhas alisadoras.

Gaitonde et al (2009) fizeram o torneamento do aço ferramenta AISI D2 com pastilhas convencionais e com pastilhas alisadoras. Eles concluíram que as pastilhas alisadoras CC650WG tem melhor desempenho com relação à rugosidade e desgaste da ferramenta.

Grzesik et al (2006) estudaram a aplicação mais ampla de ferramentas de cerâmica e PCBN com geometrias alisadoras. No referido artigo mostra características importantes da rugosidade produzida por pastilhas convencionais e alisadoras em operações de torneamento. Segundo esses autores, dobrando o avanço em comparação a um processo com pastilhas convencionais, as pastilhas alisadoras produzem rugosidades semelhantes às rugosidades produzidas pelas pastilhas convencionais. Como pode ser observado na Figura 3 abaixo:

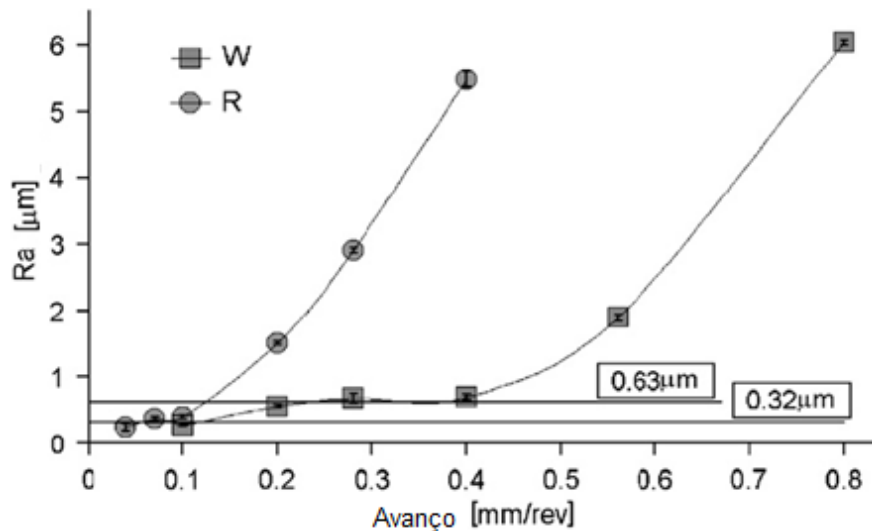


Figura 3. Valores de Ra comparando usinagem utilizando pastilha convencional (R) e alisadora (W) .
(Adaptado da fonte: Grzesik et al (2006))

Guddat et al (2011) avaliou a qualidade de superfícies usinando aço AISI 52100 comparando pastilhas convencionais e pastilhas alisadoras PCBN, e o resultado foi que com as pastilhas alisadoras a rugosidade foi bem menor e maiores foram as tensões residuais compressivas, comparado com as pastilhas convencionais. Sendo assim concluíram que as pastilhas alisadoras conduzem a uma qualidade de superfície superior em comparação com as pastilhas convencionais, ao mesmo tempo que uma maior produtividade pode ser alcançada.

Souza et al (2005) mostrou que a usinagem com sistemas alisadores oferecem o melhor acabamento superficial. Neste experimento eles compararam fresas montadas com pastilhas alisadoras somente e fresas montadas com pastilhas PCBN intercaladas com pastilhas alisadoras, o que mostrou que com as pastilhas intercaladas o desempenho foi satisfatório e reduzem os custos de usinagem já que o desgaste das pastilhas é menor do que comparado com o sistema com apenas pastilhas alisadoras.

Em resumo, de acordo com o embasamento obtido com autores acima as pastilhas alisadoras produzem baixa rugosidade nas superfícies usinadas. Entretanto de acordo com Grzesik et al (2006) esse efeito é mais evidente para maiores valores de avanço.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a confecção dos furos realizados por FHI foi utilizado o centro de usinagem de três eixos, Cincinatti modelo Milacron Arrow 500 sediado na Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUC/Pr que apresenta suas características abaixo na tabela 2.

Tabela 2 - Características da máquina

Máquina	
Marca	Cincinatti
Modelo	Milacron Arrow 500
Comando	Acramatic 2100
Curso x y z respectivamente	500 x 500 x 500
Rotação máxima (rpm)	6000
Cone ISO	50

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 ferramenta no centro de usinagem se deu através de cone Weldon, fuso cone ISO 50.

O processo de FHI foi empregado em desbaste na condição inicial em cheio e posteriormente, reaproveitando alguns corpos de prova na condição de pré-furo, foi realizado o processo de acabamento. A fresa utilizada esta descrita na figura 4 abaixo. A fresa R390D-020A20-11L possui quebra cavaco e raio de ponta 0,8 mm. Após a usinagem de cada furo foi realizada inspeção visual e troca da aresta. Para cada furo usinado foram utilizadas sempre arestas novas, para que o desgaste das mesmas não tivesse influência nos resultados dos ensaios.

Ferramenta	
Marca	Sandvik
Diâmetro	19,7
Arestas de corte	3
Código Fresa	R390D-020A20-11L
Código Pastilha	R390-11 T3 08M-PM 4230
Fixação	Weldon

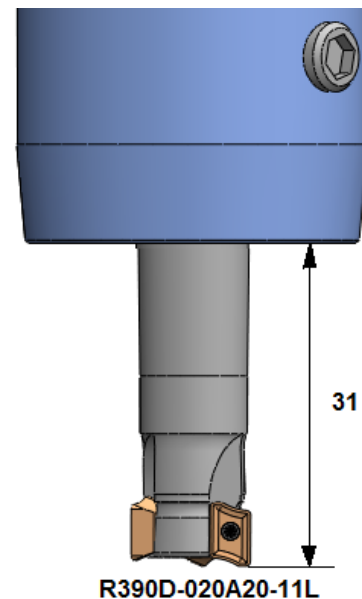


Figura 4 - Características e desenho da ferramenta

Um dispositivo foi desenvolvido para a fixação do corpo de prova. Seu desenho esquemático pode ser observado na figura 5 à esquerda.

Como a técnica do FHI 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 experimento foram confeccionados de Aço SAE 1045.

Os corpos de prova foram confeccionados no formato cilíndrico como mostrado na figura 5 à direita.

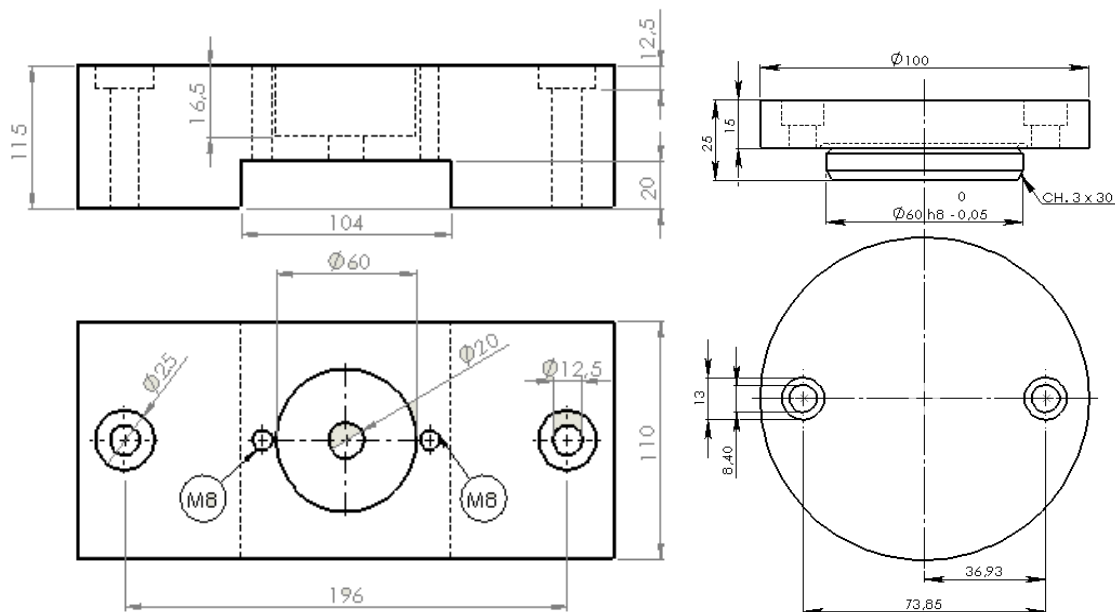


Figura 5 - Dispositivo de fixação do corpo de prova à esquerda e corpo de prova à direita. (Adaptado da fonte: Wenda (2009))

Os corpos de prova foram usinados inicialmente em cheio na condição de desbaste, onde foi utilizado fluido de corte com emulsão de 20% de óleo e 80% de água (FUCHS – ECOCOOL DURANT 71). Os dois bicos de refrigeração foram direcionados à ponta da ferramenta. Primeiramente foram realizados furos de $\varnothing 35$ mm em desbaste de oito copos de prova conforme os parâmetros da tabela 3. O objetivo nesta fase do experimento foi observar o efeito do parâmetro [fz] sobre a rugosidade. Em seguida um nono furo de $\varnothing 35$ mm foi executado com os parâmetros mostrados na tabela 4, posteriormente reutilizando dois corpos de prova utilizados nos ensaios de desbaste, com a condição de pré-furo adotando-se um valor interpolado de $\varnothing 37$ mm executou-se operação de acabamento. Nesta fase o objetivo foi verificar se o efeito de alisamento continuava ocorrendo mesmo quando o avanço axial [fz] teve seu valor quase duplicado como mostra a tabela 5.

Esta faixa de valores para os diâmetros dos furos foi escolhida com base no diâmetro das fresas disponíveis para os ensaios, procurando minimizar custos e também buscando um furo de diâmetro elevado, quando comparado à furação com brocas de aço rápido. Os parâmetros de usinagem foram especificados tendo como base a tese de mestrado de Pangrácio (2003). Entretanto, esses parâmetros são influenciados por quase todas as variáveis independentes, com exceção do [fxy]. Dessa forma, apesar de os ensaios similares terem sido realizados com taxa de remoção muito próximos destas, os valores reais de [fz] e [fxy] são diferentes.

Tabela 3 - Valores de variáveis independentes referentes aos parâmetros de usinagem na operação de desbaste

Ensaio	Vc - Velocidade de corte (m/min)	“fxy” - Avanço circular (mm/K)	fz – Avanço axial (mm/volta)
1	225	0,2	0,001
2	150	0,3	0,001
3	150	0,2	0,001
4	225	0,3	0,0015
5	225	0,2	0,0015
6	150	0,3	0,0015
7	150	0,2	0,0015
8	225	0,3	0,001

Tabela 4 - Valores de variáveis independentes referentes aos parâmetros de usinagem na operação de desbaste.

Ensaio	Vc - Velocidade de corte (m/min)	“fxy” - Avanço circular (mm/K)	fz – Avanço axial (mm/volta)
Teste 5	225	0,2	0,0025

E para a condição de acabamento foram utilizados os corpos de prova 1 e 2 em condição de pré-furo e com os seguintes parâmetros apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Valores de variáveis independentes referentes aos parâmetros de usinagem na operação de acabamento.

Ensaio	Vc - Velocidade de corte (m/min)	“fxy” - Avanço circular (mm/K)	fz – Avanço axial (mm/volta)
1	225	0,2	0,0015
2	225	0,2	0,0025

Por meio de um programa desenvolvido por Da Costa et al (2006), foi possível gerar o programa CN. Os parâmetros de entrada do programa são: comprimento do furo [Lf] o diâmetro do furo a ser interpolado [dh], o diâmetro da fresa [dt], seu número de arestas, o avanço circular [fxy], o avanço axial [fz] e velocidade de corte [Vc].

Todos os tempos de corte foram cronometrados manualmente, com o intuito de subsidiar as discussões dos resultados.

Para a medição da rugosidade, os corpos de prova foram posicionados no rugosímetro de mesa Taylor Hobson modelo TalySurf Series 2. Seu cut-off foi ajustado em 0,8 mm e a agulha coletou pontos num percurso de 4 mm, como pode ser observado na figura 6.

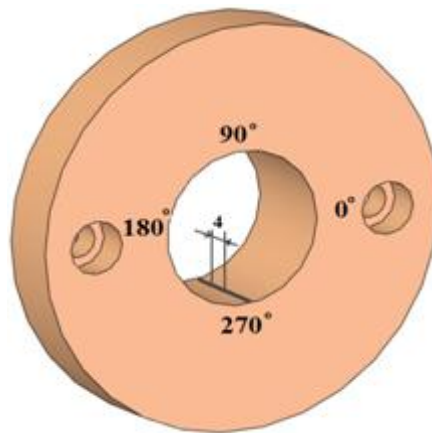


Figura 6 - Medição de rugosidade.(Fonte: Wenda (2009))

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores médios de R_a , R_y e R_z em (μm) medidos no rugosímetro na fase de desbaste e os tempos cronometrados estão apresentados na tabela 6. Na fase de desbaste foram descartados as medidas da rugosidade dos corpos de prova 1 e 2 por falhas no procedimento da execução dos furos.

Cp	$\overline{Ra}$	$\overline{Ry}$	$\overline{Rz}$	Tc
Ensaio 3	0,789	6,752	4,759	4'21"14
Ensaio 4	0,765	7,424	5,468	2'06"10
Ensaio 5	0,627	6,955	4,617	2'02"11
Ensaio 6	0,759	7,824	5,550	2'54"20
Ensaio 7	0,696	8,849	5,901	2'56"16
Ensaio 8	0,768	7,547	5,737	2'55"27

Tabela 6 - Valores médios da rugosidade no FHI em desbaste e tempo cronometrado

A partir da análise dos dados de rugosidade medidos na fase de desbaste, foi observado que as medidas de rugosidade para todos os corpos de prova de 3 a 8 foram praticamente idênticos, na média de $0,734 \mu\text{m}$, considerado de boa qualidade para uma operação de desbaste. Suspeitamos a princípio em inspeção visual que a aresta lateral da fresa estivesse causando efeito de alisamento nas paredes do furo, já que as variações utilizadas para o avanço axial [fz] não influenciaram na oscilação dos valores da rugosidade.

Os valores médios de R_a , R_y e R_z em (μm) medidos no rugosímetro na fase de desbaste durante o teste 5 modificado e tempo cronometrado estão apresentados na tabela 7.

Cp	$\overline{Ra}$	$\overline{Ry}$	$\overline{Rz}$	Tc
Ensaio T5	1,787	13,721	10,479	1'11"59

Tabela 7 Valores médios da rugosidade no FHI em desbaste e tempo cronometrado

No ensaio denominado teste 5 com um avanço axial [fz] superior, mas ainda em operação de desbaste foi possível observar o aumento da rugosidade, mas com um tempo de execução do furo bastante reduzido, comparado com os melhores tempos dos ensaios anteriores.

Para justificar o comportamento observado nos valores de rugosidade medidos e comprovar que a aresta da pastilha de corte estava promovendo o alisamento das paredes dos furos apresenta-se abaixo o gráfico 1, que mostra a medição feita com relógio comparador nas três arestas das pastilha de corte utilizadas, montadas na fresa e porta ferramenta utilizado, que tem por objetivo mostrar a inclinação da aresta de corte vertical em relação ao eixo vertical da fresa, já que o fabricante não nos fornece nenhuma informação a esse respeito e nem nos diz que estas pastilhas possuem efeito de alisamento.

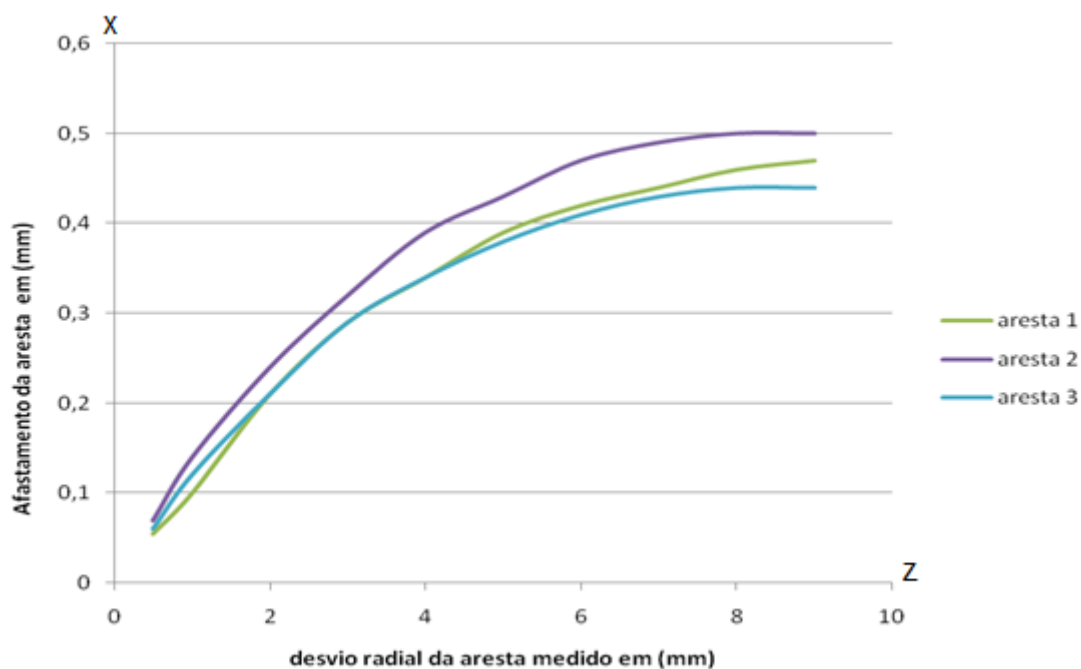


Gráfico 1

Observando o gráfico 1, pode-se verificar que a inclinação da aresta lateral da pastilha próximo ao seu raio de ponta realmente é muito pequena e que a dinâmica deste processo de furação faz com que uma pequena flexão na fresa promova um contato maior do que o esperado entre a aresta secundária da pastilha e a parede do furo como podemos observar na ilustração abaixo da figura 7, o que produz o alisamento das paredes do furo. Comprovando o que Iyer et al (2007) avaliaram, que do ponto de vista das forças atuantes no conjunto, observa-se que a flexão da ferramenta resulta em uma força radial durante a interpolação helicoidal, fazendo com que mais de um ponto da pastilha esteja em contato com a parede do furo durante a usinagem devido à geometria da pastilha escolhida, o que pode estar levando a ferramenta a um efeito de alisamento.

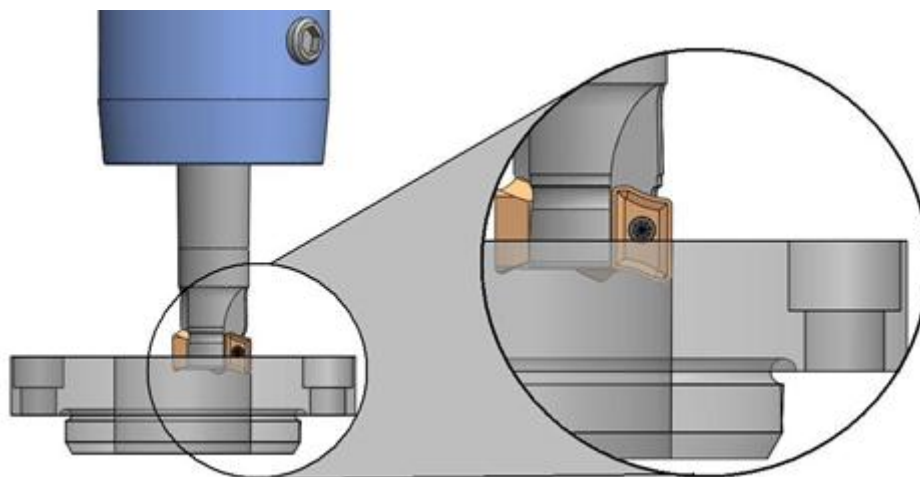


Figura 7 - ilustra como ocorre o contato da pastilha de corte com a parede do furo durante a execução do furo.

Já na figura 7 podemos observar a ilustração de como seria o alinhamento vertical esperado entre a parede do furo e a pastilha, com uma pequena inclinação. Isso se a flexão causada pela dinâmica do processo de furação não ocorresse.

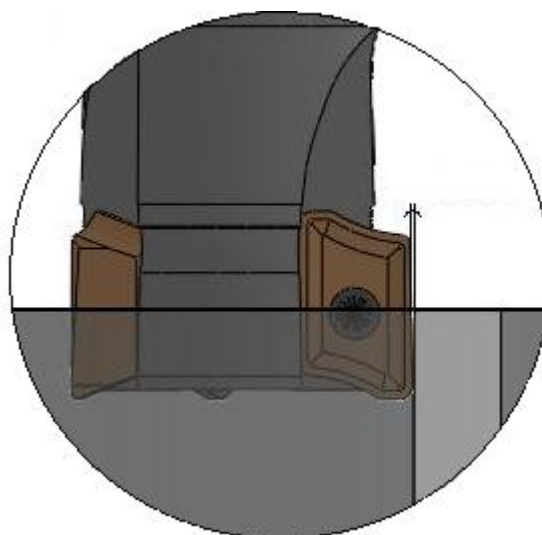


Figura 8

Para confirmarmos este comportamento realizamos dois ensaios em acabamento com condições de pré-furo nos corpos de prova 1 e 2, apenas alterando do ensaio 1 para o 2, o avanço axial que passou de (0,0015 para 0,0025 mm/volta).

Os valores médios de R_a , R_y e R_z em (μm) medidos no rugosímetro na fase de acabamento com os corpos de prova 1 e 2 na condição de pré-furo e o tempo cronometrado estão apresentados na tabela 8.

Cp	$\overline{Ra}$	$\overline{Ry}$	$\overline{Rz}$	Tc
Ensaio 1	0,434	3,282	2,901	2'01"94
Ensaio 2	0,457	3,183	2,916	1'14"14

Tabela 8 Valores médios da rugosidade no FHI em desbaste e tempo cronometrado.

Nesta situação observamos novamente o efeito de alisamento já que os valores de rugosidade praticamente não se alteraram de um ensaio para o outro. Podemos observar também que no processo de acabamento com pré-furo o efeito de alisamento se torna mais acentuado, já que a flexão da fresa se torna maior ainda devido a inexistência de material no interior do furo.

Mesmo não sendo o escopo deste trabalho, buscar tempos reduzidos neste processo, os tempos de execução dos furos para algumas combinações de parâmetros foram muito bons, como podemos verificar nos resultados dos tempos cronometrados.

5. CONCLUSÃO

Embasados na literatura encontrada sobre o efeito de alisamento de pastilhas alisadoras e pelo fato de que o resultados obtidos neste experimento terem se comportado de forma bastante semelhante à encontrada na literatura que descreve este fenômeno, comprovamos que ocorreu sim um processo de alisamento em nosso experimento.

Entretanto, deve-se registrar que o alisamento aqui reportado é decorrente do contato entre a aresta secundária da fresa e a parede já usinada do furo. Isto é diferente do efeito de alisamento reportado na seção 2, onde o arredondamento da ponta de ferramenta é, intencionalmente, modificado para provocar esse efeito.

Em resumo, pode-se concluir que, dentro das condições ensaiadas, a fresa utilizada é uma boa opção como ferramenta de corte para o FHI, pois possibilita o aumento do avanço axial [fz] e, por conseguinte a redução do tempo de corte, sem aumentar a rugosidade.

6. REFERÊNCIAS

- Brinksmeier, E.; Fangmann, S.; Meyer, I.; 2008, “Orbital Drilling Kinematics”, *Production Engineering*, Vol 2(3), pp 277-283.
- Correia A. E., Davim J.P., 2001, Surface roughness measurement in turning carbon steel AISI 1045 using wiper inserts. *Measurement* 44 1000-1005.
- Da Costa D.D., Gomes O.L., Pangrácio M.L., 2006, Análise de qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado. *Maquinas e Metais* 485 pp 34-51.
- Denkena, B.; Boehnke, D.; Dege, J.H.; 2008, “Helical Milling of CFRP-titanium Layer Compounds”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 1, Nº 2, pp 64-69.
- Gaitonde V.N, Karnik S. R, Figueira L, Davim P., 2009, Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*; 27:754-763.
- Guddat J., M'Saoubi R., Alm P., Meyer D., 2011, Hard turning of AISI 52100 using PCBN wiper geometry inserts and the resulting surface integrity. *Procedia Engineering* 19 118 – 124

- Grzesik W. , Wanat T., 2006, Surface finish generated in hard turning of quenched alloy steel parts using conventional and wiper ceramic inserts, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46 (15) 1988–1995.
- Iyer R., Koshy P., NG. E., 2007, Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel, Department of Mechanical Engineering, McMaster Manufacturing Research Institute, McMaster University, Hamilton, Canadá.
- Pangrácio M.L., 2003. Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado, Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Paraná.
- Sandvik Coromant, 2001, Wiper Tools. Turning Productivity, www.SandvikCoromant.com
- Souza M. Jr., Sales W. F., Santos S. C., Machado A. R., 2005, Performance of single Si₃N₄ and mixed Si₃N₄C+PCBN wiper cutting tools applied to high speed face milling of cast iron. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 335–344.
- Wenda J., 2009, “Avaliação de furos obtidos por fresamento helicoidal sobre diferentes condições de usinagem”, Dissertação de graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Paraná.