

COMPARAÇÃO DO ERRO DE CILINDRICIDADE E RUGOSIDADE NA USINAGEM DE FUROS CEGOS E PASSANTES EM FUNÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS LUBRI-REFRIGERANTES

Éder Silva Costa

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG. Unidade Descentralizada de Divinópolis - Campus V, 35502-036, Divinópolis-MG, Brasil. eder@div.cefetmg.br

Rosemar Batista da Silva*

rsilva@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado*

alisonm@mecanica.ufu.br

*Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Engenharia Mecânica, Bloco 1 M, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia-MG, CEP 38400-089, Brasil.

Resumo. Este trabalho compara a qualidade de furos cegos e passantes, com $L/D=3$, em termos de erro de cilindridade e rugosidade R_a das paredes dos furos, quando se utiliza diferentes sistemas lubri-refrigerantes e velocidades de corte (45 e 60 m/min). Utilizou-se como ferramenta de corte brocas helicoidais maciças com duas arestas cortantes de aço-rápido com diâmetros de 10 mm revestidas com TiAlN na furação do aço microligado DIN 38MnS6. Usinou-se sob os sistemas lubri-refrigerantes seco, aplicação externa de Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQF) de óleo vegetal e integral na vazão de 30 ml/h e fluido de corte integral e semi-sintético aplicados na forma convencional (jorro sobre-cabeça). Os resultados mostraram, em geral, que a usinagem de furos passantes, ao invés de cegos, proporcionou valores menores de R_a e erro de cilindridade (redução em média de 8% e 13%, respectivamente). Em geral, a aplicação de MQF resultou em menores valores de rugosidade e erro de cilindridade, enquanto a usinagem a seco nos maiores valores de R_a e a usinagem com aplicação de óleo integral na forma de jorro nos maiores valores de erro de cilindridade. Finalmente, o aumento da velocidade de corte de 45 para 60 m/min praticamente não influenciou nos valores de R_a , redução média de 1%, porém reduziu o erro de cilindridade em torno de 8%, em média.

Palavras-chave: Erro de cilindridade, Rugosidade, Furos cegos e passantes, Mínima Quantidade de Fluido (MQF).

1. INTRODUÇÃO

O processo de furação enfrenta dificuldades em termos de precisão. A tolerância dimensional normal de peças furadas é da ordem IT 11, contra, por exemplo, tolerâncias entre IT 4 e IT 6 para a operação de retificação. Portanto, quando são exigidos furos de precisão após a operação de furação, o furo passa por operações de acabamento, tais como alargamento, brochamento, mandrilamento, torneamento interno, retificação interna, etc⁽¹⁾.

Os erros geométricos e dimensionais, a presença de rebarbas e a textura superficial definem usualmente a qualidade do processo de furação. A precisão resultante dos furos depende do tipo de processo de furação, da peça, da ferramenta, da máquina, dos parâmetros do processo e rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça. Além disso, o grau de afiação e geometria da ponta da broca também influenciam fortemente a precisão do furo⁽²⁾.

Entre os erros de forma comumente usados como avaliadores da qualidade de furos usinados, destaca-se o erro de cilindridade. Este erro é causado principalmente pela falta de rigidez (fixações inadequadas das peças e condições da máquina), desgaste das ferramentas, variações de temperatura e na furação de furos profundos^(3,4).

O acabamento superficial pode ser determinado pela medição de alguns parâmetros, sendo a rugosidade média “ R_a ” um dos mais importantes⁽⁵⁾. Ela é obtida medindo-se os desvios dos picos e vales em relação a uma linha de centro. Esta linha de centro é tal que a área abaixo é igual à área acima do traço do perfil. Na furação o valor esperado para R_a está compreendido entre 2,54 e 6,35 μm ⁽⁶⁾, porém, Ferraresi⁽⁷⁾ define esta faixa como sendo entre 1,60 e 6,30 μm , podendo em certos casos exceder estes limites. Devido às muitas variáveis envolvidas no processo, é difícil prever claramente o acabamento superficial nas muitas variações do processo de furação.

Os fluidos de corte vêm encontrando, durante os últimos anos, sérias restrições com relação ao seu uso nos processos de usinagem. Os fatores importantes que justificam este procedimento incluem os altos custos operacionais, as questões ecológicas, as exigências legais relacionadas à preservação do meio ambiente e a saúde do ser humano⁽⁸⁾.

Os fatores apontados anteriormente têm levado as empresas da área produtiva, em especial a indústria metal-mecânica, a reverem seus processos, direcionando-os no sentido da “produção limpa”⁽⁵⁾. Do esforço deste direcionamento tem surgido novas alternativas de trabalho, como a usinagem a seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQF), que vêm sendo cada vez mais possíveis em função do surgimento de novas tecnologias como o crescente uso de materiais com usinabilidade melhorada e, principalmente, pelo grande desenvolvimento dos materiais, revestimentos e geometrias das ferramentas que aumentam sua resistência ao desgaste e permitem que estas usinem em temperaturas elevadas compensando a ausência e até mesmo a inexistência dos meios lubri-refrigerantes no processo^(9, 10 e 11).

A técnica MQF promete ser uma alternativa promissora quando a usinagem a seco, batizada por muitos autores como usinagem ecológica, for economicamente inviável ou esbarrar em limitações operacionais para algumas aplicações como é o caso do processo de furação, onde a inexistência do fluido e a conseqüente falta do meio transportador de cavacos podem causar danos à integridade da ferramenta precocemente. O sistema MQF pode ser definido como a pulverização de uma quantidade mínima de lubrificante em um fluxo de ar comprimido⁽¹²⁾. Segundo Sahn e Schneider⁽¹³⁾ a vazão do sistema varia, geralmente, de 10 a 100 ml/h, a uma pressão de 4 a 6 kgf/cm^2 . Estas quantidades mínimas de fluido são suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta e evitar a aderência de material.

Este trabalho tem como objetivo principal comparar a qualidade de furos passantes e não passantes (cegos) quando se utiliza diferentes sistemas lubri-refrigerantes nas velocidades de corte de 45 e 60 m/min. Os sistemas lubri-refrigerantes testados foram: seco, aplicação externa de MQF com óleo vegetal e integral na vazão de 30 ml/h e fluido de corte integral e semi-sintético aplicados na forma convencional (jorro). Os parâmetros avaliadores da qualidade dos furos foram a rugosidade média R_a e o erro de cilindridade.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os testes de furação foram realizados na posição vertical, sentido descendente, sem pré-furo e sem furo de centro (furação em cheio) e com avanço constante de 0,25 mm/volta. Como critério de fim de vida para os ensaios utilizou-se o colapso das brocas⁽¹⁴⁾, sendo a vida das ferramentas quantificada pelo número de furos usinados. Para realização dos ensaios experimentais utilizou-se da seguinte estratégia. Cada teste foi realizado (corrida A) e repetido (corrida B), quando o desvio entre o teste e sua repetição, com relação ao número de furos usinados, era superior a 20% uma nova repetição era realizada (corrida C). A Tabela 1 apresenta todos os testes de furação realizados e as suas respectivas condições de corte.

Devido à impossibilidade de se avaliar todos os furos usinados, adotou-se um procedimento que dividia a vida das ferramentas em 7 pontos. Estes pontos correspondiam aos furos referentes a 1%,

18%, 36%, 50%, 64%, 82% e 98% do total de furos usinados. Para cada furo representativo destes 7 níveis de desgaste avaliava-se também o furo anterior e o posterior, portanto, para cada corrida tinha-se a análise de 21 furos. Os valores assumidos para o erro de cilindricidade e rugosidade R_a para cada corrida e para o teste foram dados pela média de todas as medições realizadas nas corridas e no teste, respectivamente.

Tabela 1. Número dos testes e suas respectivas condições de corte

Teste N°	Tipo de Furo (L/D=3,0)	Sistema Lubri-Refrigerante	Vel. de Corte (m/min)
01	Cego	JORRO INTEGRAL	45
02	Cego	JORRO INTEGRAL	60
03	Cego	JORRO SEMI-SINTETICO	45
04	Cego	JORRO SEMI-SINTETICO	60
05	Cego	SECO	45
06	Cego	SECO	60
07	Cego	MQF VEGETAL	45
08	Cego	MQF VEGETAL	60
09	Cego	MQF INTEGRAL	45
10	Cego	MQF INTEGRAL	60
11	Passante	JORRO INTEGRAL	45
12	Passante	JORRO INTEGRAL	60
13	Passante	JORRO SEMI-SINTETICO	45
14	Passante	JORRO SEMI-SINTETICO	60
15	Passante	SECO	45
16	Passante	SECO	60
17	Passante	MQF VEGETAL	45
18	Passante	MQF VEGETAL	60
19	Passante	MQF INTEGRAL	45
20	Passante	MQF INTEGRAL	60

Os erros de cilindricidade foram medidos usando um circularímetro modelo Talyrond 131 fabricado pela Taylor Hobson. Este instrumento é constituído basicamente de um fuso, que gira automaticamente a peça colocada manualmente sobre a sua mesa, de um braço radial e uma coluna para o posicionamento do medidor, cuja extremidade apresenta uma pequena esfera de rubi de 2 mm de diâmetro (apalpador). Acoplado ao circularímetro está um computador com um software dedicado, que movimenta o medidor e analisa todas as informações sobre as medições. A precisão deste equipamento é de $0,03 \mu\text{m}$. Foram usados 5 planos para a avaliação dos erros de cilindricidade, localizados a 25, 20, 15, 10 e 5 mm da borda de entrada dos furos. A Figura 1 mostra uma vista do circularímetro e sistema de aquisição.

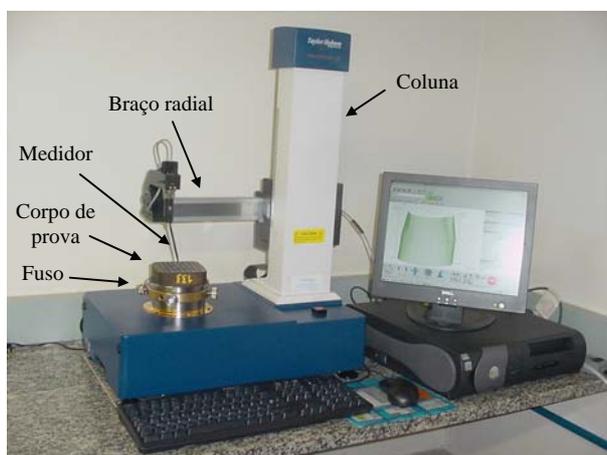


Figura 1. Circularímetro e sistema de aquisição utilizados para medições do erro de cilindricidade

Para medição da rugosidade R_a foi usado um rugosímetro portátil Surtronic 3+ modelo 112/1590 fabricado pela Taylor Hobson. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,01 μm e trabalha com carga de 150 a 300 mg. A Figura 2 mostra o rugosímetro preparado para fazer uma medição em um corpo de prova usinado.

As medições de R_a foram realizadas sobre os mesmos furos selecionados para medições dos erros de cilíndricidade. Os resultados de pré-medições de R_a mostraram, na sua maioria, valores superiores a 2 μm , o que levou à utilização de um *cut-off* de 2,5 mm⁽¹⁵⁾. A escolha deste *cut-off* resultou em um intervalo de medição de 12,5 mm (5 x 2,5). A medição da rugosidade dos furos foi realizada em um único ponto da parede do furo. A escolha desse ponto para posicionamento da agulha do apalpador foi tal que o intervalo de medição ficou na região central do furo.



Figura 2. Rugosímetro portátil utilizado para medição de R_a em posição de medição

A máquina-ferramenta usada para os ensaios foi um Centro de Usinagem Vertical CNC linha Discovery modelo 760 com potência do motor principal de 9 KW e rotação máxima de 10.000 rpm, fabricado pelas Indústrias Romi S.A.

Para realização dos testes de furação utilizou-se brocas de aço-rápido/cobalto tipo M42 (8% Co) maciças de corte à direita e com duas arestas cortantes revestidas com TiAlN (10HSS-Co.FUTURA®), diâmetro de 10 mm e ângulos de hélice e ponta iguais a 30° e 130°, respectivamente.

O material dos corpos de provas para os testes de vida das brocas foi o aço microligado perlítico DIN 38MnS6, com dureza média de 252 HV. A composição química deste aço fornecido pelo fabricante Aços Villares S.A, está ilustrada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do aço DIN 38MnS6

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
0,3960	1,4400	0,0180	0,0650	0,5900	0,0500	0,1300	0,0200	0,0040	0,0040
Cu	Pb	Ti	Nb	B	Sn	Ca	H2	N2	Te
0,1000	0,0030	0,0021	0,0050	0,0008	0,0050	0,0006	0,0002	0,0171	0,0001

Os corpos de prova apresentavam seção quadrada de 100 mm e altura de 65 mm para os furos cegos, o que permitiu usinar a duas faces. O comprimento dos furos de 30 mm (L/D=3) foi medido a partir da ponta da broca, o que resultou em um comprimento aproximado de 27,7 mm para a parte cilíndrica do furo, uma vez que o ângulo de ponta das brocas era de 130°. Portanto, os corpos de prova para os furos passantes possuíam os mesmos 27,7 mm de altura. O programa CNC gerado para os testes permitia a obtenção de 67 furos por face, alternados em fileiras de 7 e 8 furos com espaçamento lateral entre eles de 2,1 mm. Os corpos de prova para os furos passantes permitiam a obtenção de apenas 53 furos, uma vez que se retirou do programa a primeira e a última linha de

furos, ambas com 7 furos cada, devido a colocação de dois calços nestas posições para elevação do corpo de prova.

Os fluidos de corte utilizados nos testes de furação foram: óleo de origem vegetal (integral), óleo integral (origem mineral) e óleo semi-sintético usado na concentração de 5%. As características, formas de aplicação externa e a vazão dos fluidos de corte utilizados no trabalho, podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3. Características, formas de aplicação externa e vazão dos fluidos utilizados nos testes

Tipo de Fluido	Composição/Densidade	Forma de Aplicação (Externa)	Vazão
Vegetal (Accu-Lube- LB-2000®)	Biodegradável, atóxico e insolúvel em água. Composição de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos. Densidade (-3/20° C): 0,900-0,940	MQF	30 ml/h
Integral (DMI 410®)	Composto de óleos minerais refinados, parafínicos derivados de petróleo, enxofre, gordura de origem animal e aditivos de extrema pressão, anticorrosivo e antiespuma. Densidade (4/20° C): 0,9032	MQF JORRO	30 ml/h 750 l/h
Semi-sintético (DMS 250 EP ®)	Contém óleo lubrificante mineral, agente anticorrosivo, antiespumante, base emulgadora bioestável e aditivo de extrema pressão. Forma micro-emulsão semi-translúcida e foi usado na concentração de 5%. Densidade (4/20° C): 0,9850	JORRO	1230 l/h

O aparelho pulverizador do fluido, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW Fluid Products Group, funcionava com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 0,43 MPa (4,3 bar), e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo. O fluido de corte era conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de uma outra maior que conduz o ar comprimido. A mistura ar comprimido-fluido era injetada sobre a ferramenta-peça por meio de 2 bicos simetricamente opostos.

O sistema utilizado para aplicação dos fluidos na forma de jorro foi o próprio sistema de bombeamento do centro de usinagem CNC, que distribuía a vazão total do fluido por meio de três bicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados para os testes de furação e as Figuras 3 e 4 mostram graficamente estes resultados para a rugosidade R_a e o erro de cilindridade, respectivamente. Nesta tabela observa-se que os testes 02, 06, 07, 09, 10, 12, 16, 18 e 20 tiveram 3 corridas, uma vez que a diferença, em relação ao número de furos usinados, entre as corridas A e B foi superior a 20%. A Tabela 4 também revela dispersões relativamente altas para os resultados de rugosidade e erro de cilindridade. Levando-se em consideração todos os testes realizados, o desvio-padrão médio para a rugosidade e o erro de cilindridade foi de 1,25 e 16,53 μm , que em relação aos valores médios, 3,72 e 39,18 μm , corresponde a 34% e 42%, respectivamente.

A Figura 3 mostra, para uma análise genérica, que a usinagem a seco produz as maiores rugosidades nas paredes dos furos e a usinagem com os sistemas MQF as menores, seguida de perto pelos sistemas jorros. Destaca-se nesta figura o desempenho praticamente igual entre os sistemas MQF de óleo vegetal e MQF com óleo integral em todas as condições de corte testadas, sendo que a usinagem com o sistema com óleo vegetal resulta em valores de R_a ligeiramente menores que o com óleo integral. Os sistemas jorro com óleo integral e jorro com óleo semi-sintético também produziram, em geral, resultados próximos um do outro.

Assim como para a rugosidade, os sistemas MQF vegetal e MQF integral proporcionaram erros de cilindridade, em geral, menores que os demais sistemas e muito próximos um do outro em

todas as condições de corte testadas, Figura 4. Outro fato que se destaca nesta figura são os desvios-padrões relativamente menores para a usinagem a seco.

Tabela 4. Resultados dos testes de furação

Teste Nº	CORRIDA / Vida [nº furos] / R _a [µm] / Cil. [µm]									Nº Dados (Furos Analisados Ra/Cil.)	Desvio Padrão [µm]		MÉDIA [µm]	
	A			B			C				R _a	Cil.	R _a	Cil.
	Vida	R _a	Cil.	Vida	R _a	Cil.	Vida	R _a	Cil.					
01	361	4,59	48,59	313	3,64	37,67	-	-	-	42	1,37	18,29	4,11	43,13
02	101	6,38	75,93	159	2,29	26,80	118	5,82	64,12	63	2,85	29,40	4,83	55,61
03	407	4,58	52,87	501	4,82	58,77	-	-	-	42	1,94	23,70	4,70	55,82
04	216	3,42	31,25	175	3,47	40,10	-	-	-	42	1,91	26,36	3,45	35,68
05	213	4,67	40,55	259	4,64	36,28	-	-	-	42	1,31	16,24	4,65	38,42
06	130	4,07	27,85	92	4,81	41,22	103	4,11	34,63	63	1,15	9,85	4,33	34,57
07	264	3,45	31,96	345	3,38	55,42	299	2,58	45,12	63	1,42	31,65	3,14	44,16
08	152	3,76	42,18	160	2,36	27,59	-	-	-	42	1,02	16,78	3,06	34,89
09	355	2,68	50,25	252	3,38	35,75	342	3,68	39,89	63	1,44	27,65	3,25	41,96
10	109	3,45	39,41	192	2,57	27,98	153	3,18	30,02	63	0,79	14,27	3,07	32,47
11	253	4,27	52,07	238	2,99	33,32	-	-	-	42	0,94	15,15	3,63	42,70
12	147	2,64	32,79	81	3,59	45,81	108	3,43	40,35	63	0,71	11,43	3,22	39,65
13	256	3,04	30,67	290	3,25	35,18	-	-	-	42	0,90	7,89	3,14	32,92
14	120	3,93	34,56	148	3,38	30,32	-	-	-	42	0,90	10,84	3,66	32,44
15	164	4,47	41,68	196	3,97	35,28	-	-	-	42	0,91	8,98	4,22	38,48
16	120	4,34	46,56	90	4,70	33,96	78	5,28	52,42	63	1,49	13,49	4,78	44,31
17	234	3,02	36,87	226	3,15	30,58	-	-	-	42	0,54	9,35	3,09	33,73
18	99	3,39	39,62	165	3,06	23,80	138	2,78	35,20	63	0,66	14,30	3,08	32,87
19	244	3,00	33,05	209	3,65	40,18	-	-	-	42	0,67	13,73	3,33	36,62
20	83	5,70	32,46	154	2,85	30,33	134	2,22	36,82	63	2,09	11,23	3,59	33,20

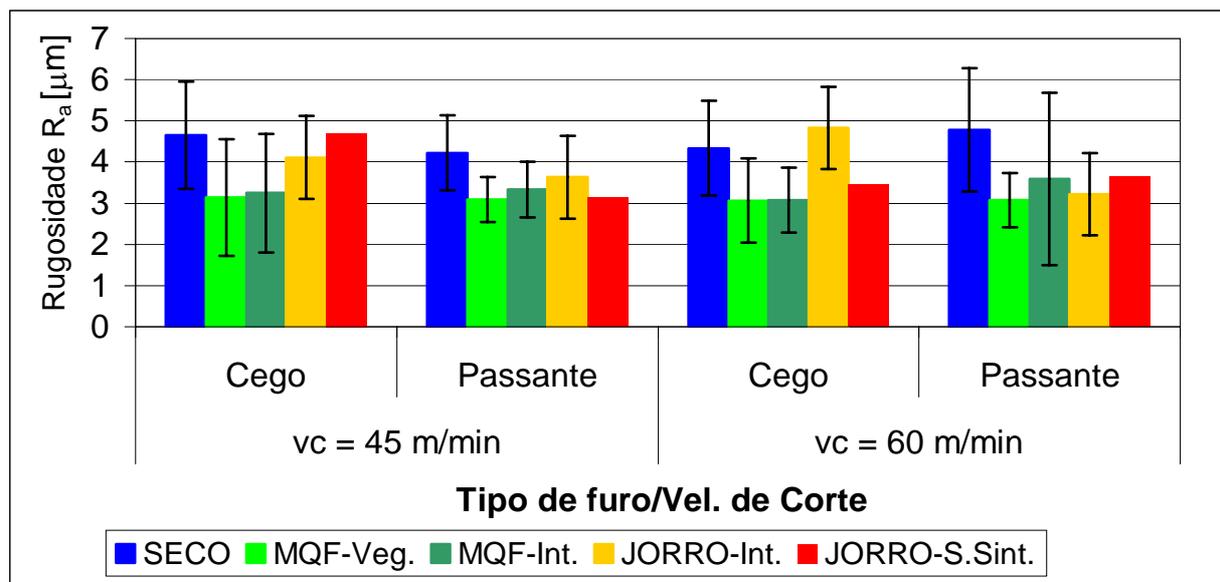


Figura 3. Rugosidade R_a média para os testes

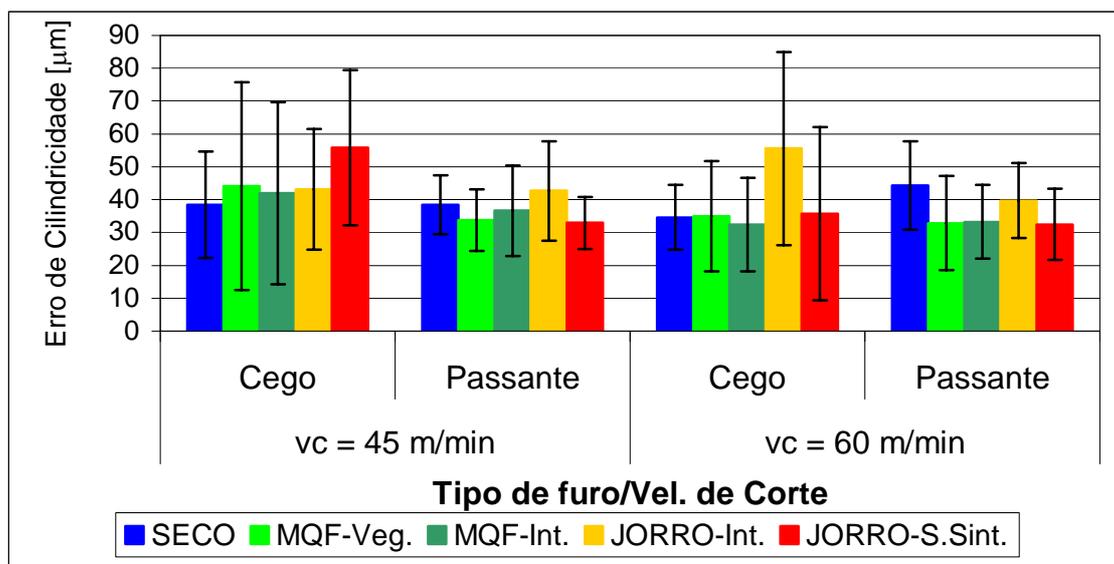


Figura 4. Erro médio de cilindridade para os testes

A Tabela 5 mostra os valores médios de R_a e erro de cilindridade e suas variações, quando se passa da usinagem de furo cego para passante e da velocidade de corte de 45 para 60 m/min, em função dos sistemas lubri-refrigerantes testados. Observa-se nesta tabela que a usinagem com os sistemas MQF resultaram em valores de R_a e erro de cilindridade praticamente iguais e menores que os demais sistemas (células amarelas). Os maiores valores de R_a e erro de cilindridade foram obtidos quando da usinagem a seco e com aplicação de jorro com óleo integral, respectivamente. Ainda de acordo com esta tabela, a mudança da usinagem de furos cegos para passantes quando se usinou a seco e com MQF vegetal não influenciou na rugosidade, variação não superior a 1%. A usinagem aplicando o sistema MQF com óleo integral aumentou a rugosidade em 9%, em média. Quando se usinou com os sistemas jorro com óleo integral e jorro com óleo semi-sintético as rugosidades diminuíram, 27% e 18%, respectivamente. Com relação ao erro de cilindridade, somente quando se usinou a seco a passagem de furo cego para passante aumentou o erro, em média 13%, quando se usinou sob os demais sistemas lubri-refrigerantes a mudança de furo cego para passante diminuiu o erro de cilindridade. Em geral, a usinagem de furos passantes, ao invés de cegos, diminuiu os valores de R_a e erro de cilindridade, em média, de 8% e 13%, respectivamente.

Tabela 5. Valores médios de R_a e erro de cilindridade e suas variações, quando da mudança na usinagem de furo cego para passante e da velocidade de corte de 45 para 60 m/min

SISTEMA	MÉDIA		Cego \Rightarrow Pas.		45 \Rightarrow 60 [m/min]	
	R_a (μm)	Cil. (μm)	R_a (μm)	Cil. (μm)	R_a (μm)	Cil. (μm)
SECO	4,50	38,95	0,01 (00%)	4,90 (\uparrow 13%)	0,12 (\uparrow 03%)	0,99 (\uparrow 03%)
MQF-Veg.	3,09	36,41	-0,02 (\downarrow 01%)	-6,23 (\downarrow 17%)	-0,05 (\downarrow 02%)	-5,07 (\downarrow 14%)
MQF-Int.	3,31	36,06	0,30 (\uparrow 09%)	-2,31 (\downarrow 06%)	0,04 (\uparrow 01%)	-6,46 (\downarrow 18%)
JORRO-Int.	3,95	45,27	-1,05 (\downarrow 27%)	-8,20 (\downarrow 18%)	0,16 (\uparrow 04%)	4,72 (\uparrow 10%)
JORRO-S.Sint.	3,74	39,22	-0,68 (\downarrow 18%)	-13,07 (\downarrow 33%)	-0,37 (\downarrow 10%)	-10,31 (\downarrow 26%)
GERAL	3,72	39,18	-0,29 (\downarrow 08%)	-4,98 (\downarrow 13%)	-0,02 (\downarrow 01%)	-3,23 (\downarrow 08%)

Costa⁽¹⁶⁾ observou em seus experimentos que tanto a usinagem de furos passantes, ao invés de cegos, como também na usinagem com 60 m/min, ao invés de 45 m/min, reduziu a vida de brocas de aço-rápido com cobertura TiAlN, em média, 30% e 71%, respectivamente, pelo fato destas condições acelerarem o desgaste nas brocas. Em geral, o desgaste da ferramenta tende a piorar a qualidade da peça usinada, tanto em relação ao acabamento superficial quanto aos erros de forma^(4 e 5). Quando se usinou furos passantes, ao invés de cegos, verificou-se um aumento acentuado da taxa de desgaste no estágio final de vida das brocas, o que promoveu em um espaço relativamente curto de tempo a quebra das ferramentas. Já na usinagem dos furos cegos observou-se uma taxa de desgaste constante. Isso indica que na usinagem de furos cegos as brocas mesmo apresentando altos níveis de desgaste continuavam cortando, de forma que o desgaste médio das brocas medido ao longo de sua vida foi superior ao desgaste provocado nas brocas quando da usinagem de furos passantes. Isto explica por que os valores médios de R_a e erro de cilindridade, que também foram medidos ao longo da vida das brocas, foram superiores, em geral, para a condição de furo cego. As Figuras 5-a e 5-b mostram o desgaste da região da ponta de corte e guia das brocas para a usinagem de furo cego (teste 1 corrida A) e furo passante (teste 11 corrida A) em pontos aproximados de suas vidas, 90% e 84% de desgaste, respectivamente. Estas figuras confirmam um desgaste médio menor da broca que estava usinando furos passantes, em relação ao desgaste provocado na broca utilizada para usinar furos cegos, apesar da condição de furo passante proporcionar uma vida menor para a broca.

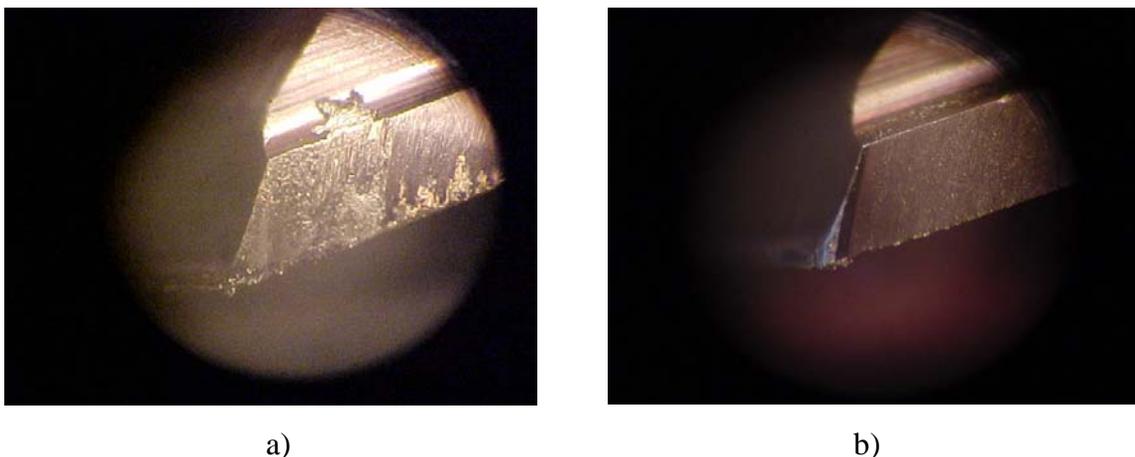


Figura 5. Desgastes da região de ponta de corte e guia das brocas para aplicação de jorro de óleo integral e $v_c = 45$ m/min . a) Desgaste para o furo cego 325 em uma vida de 361 furos (90% de desgaste); b) Desgastes para o furo passante 212 em uma vida de 253 furos (84% de desgaste).

Em geral, o aumento da velocidade de 45 para 60 m/min praticamente não influenciou nos valores de R_a (redução média de 1%), porém, diminuiu o erro de cilindridade em torno de 8%, em média, Tabela 5.

O aumento da velocidade corte pode melhorar substancialmente o acabamento superficial da peça usinada somente quando este aumento promover o desaparecimento da aresta postiça de corte, o que parece não ser o caso dos resultados encontrados neste trabalho. Para velocidades de corte acima da crítica, velocidade que elimina a aresta postiça de corte, a força de corte tende a estabilizar, porém, com tendência de uma ligeira redução, devido a maior geração de calor e conseqüente redução da resistência ao cisalhamento do material e pela ligeira redução na área de contato cavaco-ferramenta, o que pode ser traduzido em uma melhora da rugosidade e erro de cilindridade, uma vez que menores esforços de usinagem podem gerar menores vibração do sistema máquina-ferramenta-peça⁽⁵⁾.

Percebe-se também na Tabela 5, para uma análise genérica dos resultados, uma tendência comum para o comportamento de R_a e erro de cilindridade, ou seja, quando os valores de R_a aumentam os erros de cilindridade também tendem a aumentar, e vice-versa.

4. CONCLUSÕES

Apesar da alta dispersão dos valores medidos de rugosidade e erro de cilindridade, os resultados obtidos dos testes de furação sugerem, para uma análise geral, as seguintes conclusões:

- A usinagem com os sistemas MQF vegetal e MQF integral resultaram em valores de R_a e erro de cilindridade praticamente iguais e menores que os demais sistemas (na média R_a e erro de cilindridade iguais a 3,20 μm e 36,24 μm);
- A usinagem de furos passantes, ao invés de cegos, diminuiu os valores de R_a e erro de cilindridade, em média, 8% e 13%, respectivamente;
- O aumento da velocidade de 45 para 60 m/min praticamente não influenciou nos valores de R_a (redução média de 1%), porém, diminuiu o erro de cilindridade em torno de 8%, em média;
- Há uma tendência comum para o comportamento de R_a e erro de cilindridade, ou seja, quando os valores de R_a aumentam os erros de cilindridade também tendem a aumentar, e vice-versa.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, à CAPES, ao IFM e ao CNPq, pelo suporte financeiro, e às empresas: Aços Villares S.A., Shell do Brasil S.A. e OSG-Ferramentas de Precisão Ltda, pelo fornecimento do aço, dos fluidos de corte e das brocas, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

1. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C e CUPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**: MM Editora, São Paulo, 1999. 242 p.
2. TOOL and MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK. **Machining**. 4. ed., v.1, Society of Manufacturing Engineers, Dearbon, Michigan, 1983. p.10.1-10.76.
3. SANDVIK COROMANT. **Modern metal cutting – a practical handbook**. Sweden, 1. ed. ISBN 91972299-0-3, 1994. 840 p.
4. MIRANDA, G. W. A. A. **Uma contribuição ao processo de furação sem fluidos de corte com brocas de metal duros revestidas com TiAlN**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado Eng. Mecânica) - UFSC, Florianópolis-SC, junho, 2003.
5. MACHADO, A. R. e SILVA M. B. **Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, Universidade federal de Uberlândia, 7º versão , agosto, 2000.
6. CASTRO, P. R. A. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal**. 2001. 178 f. Dissertação (Mestrado Eng. Mecânica) - UFSC, Florianópolis-SC, julho, 2001.
7. FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. Edgard Blücher: São Paulo-SP, 1977. 751 p.
8. HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R. e WALTER, U. A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte. **Máquinas e Metais**, Editora aranda: p. 22-38, fev. 1998.
9. MIRANDA, G. W. A. et al. Quando as brocas de metal duro revestidas dispensam os fluidos de corte. **O Mundo da Usinagem**, ISSN 1518-6091, RG.BN 217.147, p. 20-25, mar. 2001.
10. KUBEL, E. Coatings crank up tool performance. **Manufacturing Engineering**, p. 40-46, jan. 1998.
11. TEETER, F. J. Coating takes place of coolant. **American Machinist**, p. 50-52, 1999.
12. MACHADO, A. R. e DINIZ A. D. Corte a seco, com mínima quantidade de fluido e com fluido em abundância: usos, aplicações, vantagens e desvantagens. In: CONGRESSO USINAGEM 2000, São Paulo-SP, 2000.
13. SAHM, D. e SCHNEIDER. A produção sem refrigeração é interessante e deve ser mais conhecida. **Máquinas e Metais**. Editora Aranda: p. 38-55, agosto 1996.

14. **NT MECH 038**. Cutting fluids for drilling: evaluation by drill life test. Published by NORDTEST, 1997.
15. **ISO 4287-1**. Surface Roughness – Terminology – Part 1: Surface and its parameters. 1984.
16. COSTA, E. S. **Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluidos de Corte - MQF**. 2004. 311 f. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, dezembro, 2004.

COMPARISON OF CYLINDRICITY AND SURFACE ROUGHNESS ON THE MACHINING OF BLIND AND THROUGH HOLES IN FUNCTION OF DIFFERENT LUBRI-COOLING SYSTEMS

Éder Silva Costa

Federal Center of Technological Education of Minas Gerais - CEFET-MG. Divinópolis Division Unit - Campus V, 35502-036, Divinópolis-MG, Brazil. eder@div.cefetmg.br

Rosemar Batista da Silva*

rsilva@mecanica.ufu.br

Álison Rocha Machado*

*Federal University of Uberlândia – UFU. Faculty of Mechanical Engineering, Bloco 1 M, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia-MG, CEP 38408-100, Brazil.

alissonm@mecanica.ufu.br

Abstract. *This work compares the quality of blind and through holes, with $L/D = 3$, in terms of cylindricity and surface roughness (R_a parameter) when different lubri-cooling systems were employed with two cutting speed (45 and 60 m/min). TiAlN coated HSS twist drills with 10mm of diameter were used to drill DIN 38MnS6 micro-alloyed steels. External application of Minimum Quantity Lubrication (MQL) of vegetal and mineral neat oils at a flow rate of 30 ml/h and floodings of mineral neat oil and semi-synthetic fluids were the lubri-cooling conditions tested. Generally the results showed that machining of through holes, instead of blind holes, provided smaller R_a and error of cylindricity (average of 8% and 13% respectively). Also, in general, application of mist (MQL) provided the best surface roughness values and the smallest error of cylindricity. Machining in a dry condition gave the highest R_a values while flooding application of mineral neat oil gave the highest error of cylindricity. Finally, no significant variation was observed in the R_a parameter values when cutting speed raised from 45 to 60 m/min (average reduction by about 1%), however, error of cylindricity was reduced by an average of 8%.*

Key-words: *Cylindricity; Roughness; Blind and through holes; Minimum quantity lubrication (MQL).*