



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESEMPENHO DA APLICAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE EM MÍNIMA QUANTIDADE-MQF NA QUALIDADE DO FURO QUANDO DA VARIAÇÃO DA RELAÇÃO L/D

Eder Silva Costa, edercosta@ufu.br¹
Carla Eloisa Ramos, careloram@hotmail.com¹
Álison Rocha Machado, alison.rocha@pucpr.br²

¹Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica - Bloco 1M, CEP 38.400-902, Uberlândia- MG,

²Escola Politécnica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM - Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, Av. Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho, 80.215 901 - Curitiba-PR

Resumo: Este estudo avalia a influência da aplicação de fluidos de corte em mínima quantidade na qualidade da parede de furos usinados com as relações comprimento/diâmetro (L/D) de 1,2 e 3,0. Utilizou-se brocas helicoidais de aço rápido/cobalto revestidas com TiAlN e diâmetros de 10 mm para usinar furos cegos em aço microaligado DIN 38MnS6. As variáveis de entrada, além da relação L/D, foram cinco sistemas lubri-refrigerante (usinagem a seco, aplicação de mínima quantidade de fluido-MQF na vazão de 30 ml/h com óleos integrais vegetal e mineral e aplicação de fluido de corte na forma convencional por jorro com óleos integral mineral e semi-sintético) e a velocidade de corte (45 e 60 m/min). O avanço foi mantido constante em 0,25 mm/rot e a combinação entre os níveis das variáveis de entrada resultaram em 20 condições de corte. Como critério de encerramento dos testes adotou-se o colapso da broca, sendo as rugosidades médias Ra/Rz e o desvio de cilindridade as respostas investigadas. A análise estatística dos resultados, obtidos através de um Planejamento Fatorial (DOE) com três fatores em dois níveis revelou, em geral, que as variáveis pesquisadas, sistema lubri-refrigerante, velocidade de corte e relação L/D, influenciaram as respostas de forma similar. A aplicação de fluidos de corte em MQF, em relação ao corte a seco, e o aumento da velocidade de corte, tenderam a reduzir Ra, Rz e o desvio de cilindridade, por outro lado, o aumento da profundidade do furo de 12 mm para 30 mm elevou fortemente os valores das rugosidades e do desvio de cilindridade, em média 65% e 40%, respectivamente.

Palavras-chave: relação L/D, rugosidades Ra/Rz, desvio de cilindridade, mínima quantidade de fluido de corte-MQF, fluido de corte de base vegetal

1. INTRODUÇÃO

A dificuldade de controle da operação de furação aumenta com a profundidade do furo. Para muitos autores, de uma maneira simplificada, pode-se considerar a furação curta quando a relação profundidade (L) diâmetro (D) do furo (L/D) é baixa, geralmente menor que 3. Pode-se dizer que a diferença entre uma furação curta e profunda não se restringe apenas à relação L/D. Parâmetros como a saída de cavaco, qualidade do furo e taxa de remoção de material formam a base para diferenciar furação curta da profunda. De qualquer forma, a relação L/D depende muito do método utilizado e do desvio de linearidade requerido (Santos, 2002 e Lin *et al.*, 1995).

Quanto mais profundo o furo, mais difícil é a remoção do cavaco e a penetração do fluido de corte, sobretudo quando este é aplicado externamente à broca. Dependendo da profundidade do furo, pode ser necessária a interrupção do processo com a retirada da broca de dentro do furo, para que o fluido de corte acesse o interior do furo e desta forma o cavaco possa ser removido e o calor gerado minimizado, principalmente quando o material usinado forma cavacos longos. Os modernos centros de usinagem CNC possuem ciclos de furação de forma que a profundidade final é atingida após sucessivas penetrações, podendo a ferramenta recuar até um plano de referência para eliminar cavacos, ou recuar cerca de um milímetro para quebrar o cavaco (Costa, 2004).

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 a geometria da ponta da broca também influenciam fortemente a precisão do furo (Tool and Manufacturing, 1983).

São denominados desvios de forma (erros de forma) os desvios de um elemento geométrico em relação à sua forma teórica, tais como retas, planos, círculos, cilindros, perfis e superfícies. Entre os erros de forma comumente usados como avaliadores da qualidade de furos usinados, destacam-se os erros de circularidade e cilindridade. Estes erros são causados principalmente pela falta de rigidez (fixações inadequadas das peças e condições da máquina), batimento e desgaste das ferramentas, variações de temperatura e na furação de furos profundos (Sandvik Coromant, 1994 e Miranda, 2003).

Os fluidos de corte surgiram com o objetivo final de reduzir o custo de usinagem pela redução do desgaste da ferramenta e/ou aumentar a taxa de produção, pelo emprego de maiores velocidades e avanços no corte. Porém, nas últimas décadas, fatores como custo e a pressão exercida por agências de proteção ambiental e de saúde estão apontando na direção da usinagem a seco sempre que for possível, ou pelo menos na redução da vazão do fluido de corte (usinagem com Mínima Quantidade de Fluido de Corte-MQF) e utilização de fluidos de base vegetal. Estas técnicas estão sendo cada vez mais possíveis de realização, devido ao enorme avanço tecnológico nas áreas dos materiais e geometrias das ferramentas de corte (Costa, 2004).

O sistema MQF pode ser definido como a pulverização de uma quantidade mínima de lubrificante em um fluxo de ar comprimido (Heisel et al, 1998 e Machado e Diniz, 2000). Segundo Sahm e Schneider (1996) a vazão do sistema MQF varia, geralmente, de 10 a 100 ml/h, a uma pressão de 4 a 6 kgf/cm². Estas quantidades mínimas de fluido são suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta e evitar a aderência de material, já que a área de contato cavaco-ferramenta é muito pequena e sugere-se que a vazão de fluido necessária para promover a ação lubrificante seja também pequena. Machado e Wallbank (1997) fizeram estudos e cálculos teóricos e chegaram ao valor de 0,1 ml/h para a vazão necessária à lubrificação. A usinagem com MQF surge como alternativa quando a usinagem a seco, usinagem ecologicamente correta, for economicamente inviável ou esbarrar em limitações operacionais, como é o caso do processo de furação, onde a inexistência do fluido e a consequente falta do meio transportador de cavacos podem causar danos à integridade da ferramenta precocemente (Machado; Diniz, 2000).

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a influência de três variáveis de entrada, relação comprimento/diâmetro do furo (L/D), sistema lubri-refrigerante e velocidade de corte, na qualidade de furos usinados com brocas de aço-rápido/cobalto com revestimento TiN e diâmetro de 10 mm, em termos dos parâmetros de rugosidades Ra/Rz e desvio de cilindridade. Os testes foram realizados sob 5 sistemas lubri-refrigerantes: usinagem a seco, 2 sistemas MQF na vazão de 30 ml/h (com óleos integrais vegetal e integral) e 2 sistemas jorro convencional (com óleos integral mineral e semi-sintético). Utilizou-se duas profundidades de corte (12 e 30 mm), variou-se a velocidade em 45 e 60 m/min e manteve-se o avanço por rotação constante em 0,25 mm.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. Testes de Furação

Os ensaios experimentais consistiram na operação de furação na vertical, sentido descendente, sem pré-furo e sem furo de centro (furação em cheio). Como critério de encerramento dos testes adotou-se o número de furos usinados até o colapso da broca, segundo recomendação da norma NORDTEST NT MECH 038 (1997). Foram usinados furos com profundidades de 12 e 30 mm, o que resultou em uma relação L/D (comprimento/diâmetro) do furo de 1,2 e 3,0 mm.

As variáveis de entrada pesquisadas, com os seus respectivos valores, e as respostas obtidas dos ensaios de furação, estão ilustrados na Tab. 1. A combinação entre as variáveis de entrada resultaram em 20 condições de corte, Tab.2. Os testes foram realizados (corrida A) e repetidos (corrida B), quando a dispersão entre as vidas das brocas (número de furos usinados) para o teste e réplica foi maior que 20%, uma terceira corrida foi realizada (corrida C). Para todas as corridas utilizou-se uma broca nova.

Tabela 1. Variáveis de entrada e saída dos testes de furação.

VARIÁVEL			VALOR
DE ENTRADA	SISTEMA LUBRI-REFRIGERANTE	ar ambiente (usinagem a seco)	-
		MQF (óleo vegetal)	30 ml/h
		MQF (óleo mineral)	
		Jorro (óleo mineral)	
		Jorro (óleo semi-sintético)	1230 L/h
	Relação L/D		1,2 e 3,0
	Velocidade de corte (m/min)		45 e 60
DE SAÍDA (resposta)	Rugosidades médias Ra e Rz (µm)		
	Desvio de cilindridade (µm)		

Tabela 2. Condições de corte para os ensaios experimentais.

Teste	L/D	Sistema Lubri-Refrigerante	V _c (m/min)
01	3,0	Jorro Mineral	45
02	3,0	Jorro Mineral	60
03	3,0	Jorro Semi-Sintético	45
04	3,0	Jorro Semi-Sintético	60
05	3,0	Seco	45
06	3,0	Seco	60
07	3,0	MQF Vegetal	45
08	3,0	MQF Vegetal	60
09	3,0	MQF Mineral	45
10	3,0	MQF Mineral	60
11	1,2	Jorro Mineral	45
12	1,2	Jorro Mineral	60
13	1,2	Jorro Semi-Sintético	45
14	1,2	Jorro Semi-Sintético	60
15	1,2	Seco	45
16	1,2	Seco	60
17	1,2	MQF Vegetal	45
18	1,2	MQF Vegetal	60
19	1,2	MQF Mineral	45
20	1,2	MQF Mineral	60

Devido à impossibilidade de tempo para se avaliar a qualidade de todos os furos usinados adotou-se um procedimento que dividia a vida das ferramentas em sete 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. O valor atribuído à resposta para cada condição de corte foi o obtido pela média de todas as medições realizadas nas corridas do respectivo teste.

O desvio de cilindridade foi medido utilizando-se um circularímetro modelo Talyrond 131 fabricado pela Taylor Hobson, a precisão deste equipamento é de 0,03 μm , Fig. 1a. Acoplado ao circularímetro está um computador com um software dedicado, que movimenta o apalpador e analisa todas as informações sobre as medições. Foram usados cinco planos para avaliação do erro de cilindridade para os furos com L/D=3,0, distantes da borda de entrada dos furos de 5, 10, 15, 20 e 25 mm. Para os furos com L/D=1,2 adotou-se três planos, distantes de 3, 6 e 9 mm.

As medições das rugosidades foram realizadas sobre os mesmos furos selecionados para medição do desvio de cilindridade. Para tal 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 e resolução de 0,01 μm , Fig. 1b.



a)



b)

Figura 1. Instrumentos utilizados para medição das respostas. a) Circularímetro com um corpo de prova sobre o furo; b) Rugosímetro com o apalpador dentro do furo.

A rugosidade dos furos analisados 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. Resultados de pré-medições de R_a mostraram, na sua maioria, valores superiores a $2\text{ }\mu\text{m}$, o que levou a utilização de um cut-off de $2,5\text{ mm}$ (normas DIN 4762 e ISO 4287/1). Entretanto, para os furos com 12 mm de profundidade ($L/D=1,2$) teve-se que optar pelo cut-off de $0,8\text{ mm}$, pois neste caso não seria possível a agulha do rugosímetro percorrer o intervalo efetivo de medição de $12,5\text{ mm}$ ($5 \times 2,5$).

2.2. Máquina de Usinagem, Ferramenta e Material Usinado

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 , rotação máxima de 10.000 rpm e potência total instalada de 15 KVA , fabricado pelas Indústrias Romi S.A.

Como ferramenta de corte utilizou-se brocas de aço-rápido/cobalto com revestimento TiN (10HSSCo.TiN®), diâmetro de 10 mm e ângulos de hélice e ponta iguais a 30° e 130° , respectivamente. O revestimento apresenta dureza de 2300 HV e coeficiente de atrito contra o aço de $0,4$.

O material dos corpos de provas para os testes de vida das brocas foi o aço microligado perlítico de forja DIN 38MnS6, com dureza média de 252 HV . A composição química deste aço, fornecido pelo fabricante Aços Villares S.A., está ilustrada na Tab. 3.

Tabela 3. Composição química do aço microligados perlítico de forja DIN 38MnS6.

COMPOSIÇÃO (%peso)									
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	0,005	0,0008	0,005	0,0006	0,0002	0,0171	0,0001

Este material apresentava seção aproximadamente quadrada de 100 mm de lado e foi recebido em barras de $3,5\text{ m}$ de comprimento, que foram serradas transversalmente e posteriormente faceadas em tarugos com alturas de 65 mm e 28 mm , para os furos com $L/D\ 3,0$ e $1,2$, respectivamente. Com estas dimensões foi possível furar as duas faces dos corpos de prova.

Para otimizar o número de furos, foi gerado um programa CNC que permitia a obtenção de 67 furos por face, alternados em fileiras de 7 e 8 furos. A distância lateral entre os furos no corpo de prova foi $2,11\text{ mm}$. A fixação do material usinado aconteceu por meio de uma morsa, e esta foi rigidamente presa à mesa do centro de usinagem CNC por parafusos, a fig. 1b mostra uma face de um corpo de prova após a usinagem de furos com $L/D\ 3,0$.

2.3. Sistemas Lubri-refrigerantes, Fluidos de Corte e Formas de Aplicação

Os fluidos de corte foram aplicados externamente por meio de bicos na forma de mínima quantidade (MQF) e jorro convencional. Para a aplicação em MQF utilizou-se óleos integrais de naturezas diferentes, bases vegetal e mineral. Para a aplicação dos fluidos na forma de jorro utilizou-se o mesmo óleo mineral da aplicação em MQF e um fluido semi-sintético. Estas formas de aplicação, associada à natureza do fluido de corte, juntamente com a usinagem com ar ambiente (a seco) resultaram em 5 sistemas lubri-refrigerantes. A Tab. 4 traz detalhadamente informações sobre os sistemas lubri-refrigerantes utilizados na pesquisa.

Para a aplicação dos fluidos de corte em MQF, utilizou-se o aparelho pulverizador, modelo O2AO-STD, fabricado pela ITW Fluid Products Group, que trabalhou com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de $4,3\text{ bar}$, e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo. Este sistema consiste de um reservatório para o fluido de corte com alimentação manual, válvulas para regulação do fluxo de ar comprimido e óleo, manômetro, mangueiras condutoras (ar comprimido e fluido) e 2 bicos com base de fixação magnética, para aplicação externa da mistura ar comprimido-fluido sobre a ferramenta-peça. O fluido de corte é conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de outra maior que conduz o ar comprimido.

O sistema utilizado para aplicação do fluido na forma de jorro foi o próprio sistema de bombeamento do Centro de Usinagem CNC, que proporcionou que as vazões de 730 L/h e 1230 L/h dos óleos mineral e semi-sintético, respectivamente, fossem distribuídas por três bicos, a Fig. 2 ilustra a aplicação de fluido de corte semi-sintético na forma de jorro.

Tabela 4. Detalhes dos sistemas lubri-refrigerantes utilizados na pesquisa.

Sistema Lubri-refrigerante	Natureza do Fluido	Características	Vazão
MQF-Veg	Vegetal	Integral (insolúvel em água), biodegradável, atóxico, com composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos	30 ml/h
MQF-Min	Mineral	Integral (insolúvel em água), composto de óleos minerais, derivados de petróleo, enxofre, gordura de origem animal e aditivos de extrema pressão, anticorrosivo e antiespuma.	730 L/h
Jorro-Min			
Jorro-S.S	Semi-sintético	óleo lubrificante mineral, agente anticorrosivo, antiespumante, base emulgadora bioestável e aditivo de extrema pressão, usado na concentração de 5%	1230 L/h
Seco	Ar ambiente		-



Figura 2. Aplicação por jorro do fluido de corte semi-sintético, vazão total de 1230 L/h (Costa, 2004).

2.4. Estratégia para Análise dos Resultados

As influências das variáveis de entrada nas respostas foram analisadas estatisticamente pelo método Planejamento de Experimentos (DOE - Design of Experiments) com 3 variáveis (relação L/D, velocidade de corte e sistema lubri-refrigerante) em dois níveis, com uma confiabilidade de 95%. Como a variável sistema lubri-refrigerante apresentava 5 níveis, foi realizado uma combinação entre eles, mantendo sempre a usinagem a seco como o nível inferior. Os resultados do planejamento foram obtidos através do software STATISTICA 7.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos dos ensaios experimentais serão apresentados e discutidos na sequência.

3.1. Rugosidades Ra e Rz

Os resultados para as rugosidades médias Ra e Rz estão apresentados na Tab. 5. Conforme mostrado na Tab. 2, os primeiros 10 testes correspondem aos furos usinados com 30 mm e os seguintes com 12 mm. Pode ser observado que os testes 02, 06, 07, 09, 10 e 17 apresentaram desvios na vida das ferramentas entre as corridas A e B superiores a 20%, desta forma, de acordo com o critério imposto aos ensaios, foi necessário a realização de mais uma repetição (corrida C), já o ensaio 13 não passou por repetições, em função do expressivo número de furos que a corrida A demandou (1920) e limitação do material usinado.

As dispersões dos resultados para as rugosidades, conforme evidenciado pela Tab. 5, foram relativamente altas, os desvios padrões médios foram 1,08 μm e 5,01 μm , que em relação às rugosidades médias Ra e Rz para todos os testes, 3,06 μm e 16,64 μm , representam 35% e 30%, respectivamente.

A Tab. 6 apresenta uma análise estatística dos resultados para as rugosidades Ra e Rz, realizada através de um Planejamento de Experimentos 2^3 , levando-se em consideração as variáveis: sistemas lubri-refrigerante, velocidade de corte e relação L/D.

Tabela 5. Resultados para as rugosidades Ra e Rz

Teste	Corrida / Rugosidade [μm]						Nº Dados	Desv. Padrão Médio [μm]		Rugosidade Média [μm]	
	A		B		C			Ra	Rz	Ra	Rz
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz					
01	4,59	25,4	3,64	19,82	-	-	42	1,37	6,77	4,11	22,62
02	6,38	30,79	2,29	12,95	5,82	29,56	63	2,85	13,70	4,83	24,43
03	4,58	24,28	4,82	23,90	-	-	42	1,94	7,57	4,70	24,09
04	3,42	17,03	3,47	18,20	-	-	42	1,91	6,93	3,45	17,62
05	4,67	28,88	4,64	28,34	-	-	42	1,31	7,58	4,65	28,61
06	4,07	26,05	4,81	28,42	4,11	26,01	63	1,15	6,28	4,33	26,83
07	3,45	19,72	3,38	18,00	2,58	15,47	63	1,42	5,89	3,14	17,73
08	3,76	20,64	2,36	14,20	-	-	42	1,02	4,94	3,06	17,42
09	2,68	14,79	3,38	19,00	3,68	20,65	63	1,44	6,20	3,25	18,15
10	3,45	18,89	2,57	16,30	3,18	17,70	63	0,79	4,44	3,07	17,63
11	2,77	13,96	2,71	13,65	-	-	42	0,76	3,72	2,74	13,80
12	2,28	11,38	2,24	11,44	-	-	42	0,58	2,30	2,26	11,41
13	3,53	17,47	-	-	-	-	21	1,23	5,71	3,53	17,47
14	1,82	9,41	1,89	10,03	-	-	42	0,46	2,19	1,85	9,72
15	1,67	9,59	2,48	12,94	-	-	42	0,67	3,21	2,07	11,26
16	2,52	12,27	1,91	10,67	-	-	42	0,73	2,84	2,21	11,47
17	2,46	13,06	2,75	13,39	1,78	10,24	63	0,62	2,86	2,33	12,23
18	1,56	8,68	1,61	9,10	-	-	42	0,38	2,31	1,59	8,89
19	2,57	12,75	2,39	12,55	-	-	42	0,60	2,92	2,48	12,65
20	1,76	9,25	1,43	8,21	-	-	42	0,43	1,80	1,59	8,73

Tabela 6. Efeito proporcionado nas rugosidades Ra e Rz quando da mudança dos níveis das variáveis.

Sistema Lubri- Refrigerante	Média		Efeito na Rugosidade Ra/Rz (μm)					
	Ra	Rz	Sist. Lub-Ref		Vel. de Corte (45 $\rightarrow$ 60 m/min)		Relação L/D (1,2 $\rightarrow$ 3,0)	
			Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
Seco $\rightarrow$ MQF-Veg	2,92	16,81	-0,79 ($\downarrow$ 27%)	-5,47 ($\downarrow$ 33%)	-0,25 ($\downarrow$ 9%)	-1,31 ($\downarrow$ 8%)	1,75 ($\uparrow$ 60%)	11,69 ($\uparrow$ 70%)
Seco $\rightarrow$ MQF-Min	2,96	16,92	-0,72 ($\downarrow$ 24%)	-5,25 ($\downarrow$ 31%)	-0,31 ($\downarrow$ 11%)	-1,50 ($\downarrow$ 9%)	1,74 ($\uparrow$ 59%)	11,78 ($\uparrow$ 70%)
Seco $\rightarrow$ Jorro-Min	3,40	18,80	0,17 ($\uparrow$ 5%)	-1,48 ($\downarrow$ 8%)	0,01 ($\uparrow$ 0%)	-0,54 ($\downarrow$ 3%)	2,16 ($\uparrow$ 64%)	13,64 ($\uparrow$ 73%)
Seco $\rightarrow$ Jorro-S.S	3,35	18,38	0,07 ($\uparrow$ 2%)	-2,32 ($\downarrow$ 13%)	-0,78 ($\downarrow$ 23%)	-3,95 ($\downarrow$ 21%)	1,87 ($\uparrow$ 56%)	11,81 ($\uparrow$ 64%)

Na Tab. 6 nota-se que as aplicações dos fluidos em MQF, em comparação com a condição a seco, contribuíram sempre para a redução de Ra e Rz, em média de 27%. Para as aplicações em jorro a influência foi bem menor, praticamente não influenciou Ra e tendeu a diminuir Rz, em média, de apenas 10%. Ao que tudo indica as aplicações em MQF conseguiram alcançar melhor a região de corte, uma vez que com esta técnica o óleo foi aplicado, juntamente com o ar comprimido, a uma pressão próxima de 4,3 bar. Destaca-se ainda, em relação à avaliação da rugosidade, que aplicação de MQF com óleo vegetal apresentou tendência de um desempenho levemente superior à aplicação de MQF com óleo mineral, o que demonstra que óleos de base vegetal tem potencial para substituir os de base mineral, com possibilidades reais de ganhos técnicos e ambientais.

A velocidade de corte foi, para uma avaliação geral, a variável menos influente nas rugosidades. O aumento da velocidade de 45 para 60 m/min provocou uma redução em Ra e Rz, em média, de 11%, Tab. 6. O aumento desta variável tem uma relação direta com o aumento da temperatura na região de corte, o que pode contribuir para a redução da resistência ao cisalhamento do material, diminuindo assim a força de corte e por consequência a vibração do sistema máquina-ferramenta-peça, melhorando desta forma o acabamento superficial.

Das três variáveis de entrada pesquisas a mais influente nas rugosidades foi a relação L/D. O aumento da profundidade dos furos de 12 mm para 30 mm sempre contribui para piorar substancialmente a qualidade do

acabamento superficial das paredes dos furos, em média, o acréscimo nas rugosidades Ra e Rz foi em torno de 65%, Tab. 6. O fato dos valores dos parâmetros de rugosidades crescerem com o aumento da profundidade de furação tem uma relação direta com a dificuldade que os cavacos enfrentam para sair de dentro do furo, que cresce à medida que a profundidade do mesmo aumenta, uma vez que é de se esperar um maior atrito entre os cavacos e a parede dos furos, que além de prejudicar a qualidade da superfície usinada podem também aumentar as forças de usinagem, provocando vibrações, o que poderá reforçar ainda mais a piora da qualidade das paredes dos furos.

3.2. Desvio de Cilindricidade

A Tab.7 mostra os resultados do desvio de cilindridade para os testes de furação. Da mesma forma que para as rugosidades, destaca-se nesta tabela o alto desvio padrão apresentado entre as medições de cada teste, na média geral o desvio foi de 15,61 μm , que em relação ao valor médio geral dos desvios (34,01) corresponde a 46%.

Tabela 7. Resultados do desvio de cilindridade avaliado ao longo da vida das brocas.

Teste	Desvio de Cilindridade [μm]			Nº Dados	Desv. Padrão	Média
	A	B	C			
01	48,59	37,67	-	42	18,29	43,13
02	75,93	26,80	64,12	63	29,40	55,61
03	52,87	58,77	-	42	23,70	55,82
04	31,25	40,10	-	42	26,36	35,68
05	40,55	36,28	-	42	16,24	38,42
06	27,85	41,22	34,63	63	9,85	34,57
07	31,96	55,42	45,12	63	31,65	44,16
08	42,18	27,59	-	42	16,78	34,89
09	50,25	35,75	39,89	63	27,65	41,96
10	39,41	27,98	30,02	63	14,27	32,47
11	35,31	32,49	-	42	15,55	33,90
12	27,93	22,95	-	42	7,28	25,44
13	31,58	-	-	42	7,99	31,58
14	28,25	23,25	-	42	13,25	25,75
15	17,18	23,40	-	42	7,06	20,29
16	41,34	23,37		42	17,15	32,35
17	26,41	23,23	21,02	63	6,75	23,55
18	23,79	26,41	-	42	9,49	25,10
19	27,78	23,19	-	42	6,41	25,48
20	23,73	18,45	-	42	6,99	21,09

A Tab. 8 apresenta uma análise estatística do desvio de cilindridade via *Planejamento de Experimentos* 2³, nos mesmos moldes do que foi feito para os parâmetros de rugosidades. Nota-se nesta tabela que os efeitos proporcionados pela variação do sistema lubri-refrigerante e da velocidade de corte no desvio de cilindridade foram relativamente pequenos, em geral, os efeitos médios foram 9% e 2%, respectivamente, e não tiveram um comportamento padrão, no sentido de só aumentarem ou diminuir estas respostas. Porém, uma análise mais detalhada destas variáveis no Planejamento de Experimentos (DOE), mostra uma interação forte entre elas e quase sempre no sentido de reduzir os desvios. Por exemplo, nos confrontos Seco x MQF-Veg e Seco x Jorro-S.S a interação entre o sistema lubri-refrigerante e a velocidade de corte reduziu em média o desvio de cilindridade de 5,52% e 8,55%, em média, que são valores superiores aos efeitos das variáveis isoladas. A interpretação desta interação é a seguinte, quando se passa a usinar furos com aplicação dos fluidos, no caso MQF vegetal e jorro semi-sintético, e velocidade de corte de 60 m/min, ao invés do corte a seco e velocidade de 45 m/min, os desvios de cilindridade diminuem em média nos percentuais anunciados acima.

Analisando a influência da profundidade do furo no desvio de cilindridade, Tab. 8, é evidente perceber que para todos os confrontos entre os sistemas lubri-refrigerantes, o aumento da profundidade do furo de 12 mm para 13 mm causou um efeito considerável de sempre elevar o desvio de cilindridade, em média, 40%. Quando se usina furos mais profundos é de se esperar que a temperatura no interior do furo aumente, pelo fato de haver uma maior área de atrito entre as arestas de corte e a parede do furo e também pela maior dificuldade de escoação do cavaco do interior do furo, é também razoável considerar que poderá haver uma maior variação da temperatura, em função da instabilidade dos

fluidos alcançarem a região de corte. Segundo estudos (Sandvik Coromant, 1994; Miranda, 2003) a variação de temperatura tem uma influência marcante no desvio de cilindridade.

Tabela 8. Efeito proporcionado no desvio de cilindridade quando da mudança de nível das variáveis.

Sistema Lubri-Refrigerante	Média (µm)	Efeito no Desvio de Cilindridade (µm)		
		Sist. Lub-Ref	Vel. de Corte (45 → 60 m/min)	Relação L/D (1,2 → 3,0)
Seco → MQF-Veg	31,67	0,52 (↑ 2%)	0,12 (0%)	12,69 (↑ 40%)
Seco → MQF-Min	30,83	-1,16 (↓ 4%)	-1,42 (↓ 5%)	12,05 (↑ 39%)
Seco → Jorro-Min	35,46	8,11 (↑ 23%)	3,06 (↑ 9%)	14,94 (↑ 42%)
Seco → Jorro-S.S	34,31	5,80 (↑ 17%)	-4,44 (↓ 13%)	13,63 (↑ 40%)

Diante de uma análise geral dos resultados obtidos, pode se notar que as três variáveis pesquisadas, sistema lubri-refrigerante, velocidade de corte e relação L/D, tenderam a influenciar as respostas de forma similar, ou seja, a aplicação de fluidos de corte em MQF, em relação ao corte a seco, e o aumento da velocidade de corte, tenderam a reduzir as rugosidades e o desvio de cilindridade, já o aumento da relação L/D (1,2→3,0) aumentou fortemente as rugosidades e o desvio de cilindridade.

4. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados, mediante a metodologia impostas aos testes de furação, permitem as seguintes conclusões:

- O aumento da relação L/D do furo de 1,2 para 3,0 mm elevou fortemente os valores das rugosidades Ra/Rz e do desvio de cilindridade, em média 65% e 40%, respectivamente;
- As três variáveis de entrada pesquisadas, sistema lubri-refrigerante, velocidade de corte e relação L/D, em geral, influenciaram as rugosidades e o desvio de cilindridade de forma similar;
- A aplicação de fluidos de corte em mínima quantidade (MQF), tanto com óleo de base vegetal como com óleo mineral, apresentou melhor desempenho que a aplicação dos fluidos por jorro, nas rugosidades Ra/Rz e também no desvio de cilindridade.
- Em relação à avaliação da rugosidade, a aplicação de MQF com óleo vegetal apresentou tendência de um desempenho levemente superior à aplicação de MQF com óleo mineral.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro, e às empresas Blaser Swisslube do Brasil Ltda e OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda pelo fornecimento dos fluidos de corte e ferramentas de corte, respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

- Costa, E.S. 2004, "Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte-MQF". Tese Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia-MG, 2004, 311p.
- Heisel, U.; Lutz, M.; Spath, d.; Wassmer, R.; Walter, U. 1998, "A Técnica da Quantidade Mínima de Fluidos e sua Aplicação nos Processos de Corte", Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, fev., pp. 22-38.
- Lin, C., Kang, S.K., Ehmann, K.F. 1995, "Helical Micro-Drill Point Design and Grinding", Journal of Engineering for industry, Vol. 117, pp 277-287.
- Machado, A.R.; Wallbank, J., 1997, "The Effect of Extremely low Lubricant Volumes in Machining", Wear, 210, pp. 76-82.
- Machado, A.R.; Diniz A.D, 2000, "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.
- Machado, A.R., Abrão, A.M., Coelho, R.T., da Silva, M.B., 2015, "Teoria da Usinagem dos Materiais", 3 ed., São Paulo, Blucher, v.1, 407p.
- Miranda, G.W.A.A., 2003, "Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluidos de Corte com Brocas de Metal Duros Revestidas com TiAlN", Tese de Doutorado Eng. Mecânica, UFSC, Florianópolis-SC, junho, 157 p.
- NT MECH 038, 1997, "Cutting Fluids for Drilling: Evaluation by Drill Life Test. Published by NORDTEST.
- Sandvik Coromant, 1994, "Modern metal cutting – a practical handbook", Sweden, 1. ed. ISBN 91972299-0-3, 840 p.
- Sahm, D., Schneider, T., 1996, "A Produção sem Refrigerante é Interessante e Deve ser Mais Conhecida", Máquinas e Metais, No. 367, Ago, pp. 38-55.

- SANTOS, S.C., 2002, "Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluidos de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-rápido e de Metal Duro integral na Usinagem de Ferro Fundido", Tese de doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 199 p.
- Teixeira, C.R. 2001. Benefícios ecológicos da redução e eliminação de fluidos de corte nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida. Florianópolis, SC. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 153 p.
- Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 1983, "Machining", Society of Manufacturing Engineers, 4. ed., v.1, Dearborn, Michigan, pp.10.1-10.76.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PERFORMANCE OF THE APPLICATION OF CUTTING FLUIDS IN MINIMUM QUANTITY LUBRICATION-MQL IN THE HOLE QUALITY WHEN OF THE VARIATION LENGTH-TO-DIAMETER RATIO (L/D)

Eder Silva Costa, edercosta@ufu.br¹

Carla Eloisa Ramos, careloram@hotmail.com¹

Álisson Rocha Machado, alisson.rocha@pucpr.br²

¹Faculty of Mechanical Engineering - Federal University of Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2160, Campus Santa Monica - Block 1M, CEP 38400-902, MG, Uberlândia, MG, Brazil

²Polytechnic School - Graduate Program in Mechanical Engineering - Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR, Av. Imaculada Conceição, 1155 - Prado Velho, 80.215 901 - Curitiba-PR, Brazil

Abstract. This study evaluated the influence of the application of the cutting fluids in minimum quantity in the quality of the wall of holes machined with length-diameter ratios (L/D) of 1.2 to 3.0. It was used HSS/cobalt twist drill coated with TiN and diameter of 10 mm to machining blind holes in microalloyed steel DIN 38MnS6. The input variables in addition to the L/D ratio, were five lubri-cooling systems (dry machining, minimum quantity lubrication-MQL with vegetable and mineral oils neat at flow rate of 30 ml/h, and flood cooling of mineral neat oils and semi-synthetic) and the cutting speed (45 and 60 m/min). The feed rate was fixed for the tests in 0.25 mm/rev and the combination between the levels of input variables resulted in twenty cutting conditions. As criterion for termination of testing was adopted the collapse of the drill, and the average roughness Ra/Rz and the cylindricity deviation was the investigated responses. The statistical analysis of results through Design of Experiments (DOE) with three factors at two levels revealed, in general, that the variables studied lubri-cooling systems, cutting speed and length-to-diameter ratio influence the responses similarly. The application of cutting fluids in MQL, in relation to dry cutting, and the increased cutting speed tend to reduce Ra, Rz and the cylindricity deviation, on the other hand the increase of the depth of the hole of 12 mm to 30 mm strongly increased the values of roughness and cylindricity deviation on average 65% and 40%, respectively.

Keywords: length-to-diameter ratio, Ra/Rz roughness, cylindricity deviation, minimum quantity lubrication-MQL, vegetable base cutting fluid