

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

RELAÇÃO ENTRE A PROFUNDIDADE DO FURO, A VIDA DA BROCA E A POTÊNCIA DE CORTE QUANDO DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES SISTEMAS LUBRI-REFRIGERANTES

Eder Silva Costa, edercosta@ufu.br¹
Carla Eloisa Ramos, careloram@hotmail.com¹
Álison Rocha Machado, alisson.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 trabalho avalia a influência da relação comprimento diâmetro do furo (L/D) na vida da ferramenta, expressa inicialmente em número de furos até o colapso da broca e posteriormente em comprimento usinado, e na potência média exigida durante o corte. Foram usinados furos cegos com profundidades de 12 e 30 mm em tarugos de aço microligado DIN 38MnS6 utilizando-se brocas helicoidais de aço-rápido/cobalto com cobertura TiN e diâmetro de 10 mm. 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 integral, e aplicação de fluido de corte na forma convencional por jorro com óleos mineral integral e semi-sintético) e a velocidade de corte (45 e 60 m/min). O avanço foi mantido constante para os testes em 0,25 mm/rot e a combinação entre as variáveis de entrada resultaram em 20 condições de corte. Os testes foram realizados (corrida A) e repetidos (corrida B), quando a dispersão entre a corrida A e B foi maior que 20%, uma terceira corrida foi realizada (corrida C) e o valor médio entre as corridas foi o atribuído à resposta analisada. A análise estatística geral dos resultados via Planejamento de Experimentos (DOE - Design of Experiments), mostrou que o aumento da relação L/D (de 1,2 para 3,0) diminui o comprimento usinado em média 14%. Em relação ao corte a seco, a aplicação de fluidos de corte em MQF tendeu a reduzir ligeiramente a potência de corte, enquanto que a aplicação de fluidos na forma de jorro tendeu a aumentar a potência durante a usinagem do aço microligado. A velocidade de corte provou ser a variável mais influente nas respostas, em média, reduziu o comprimento usinado das brocas de 77% e aumentou a potência de corte de 24%.

Palavras-chave: relação L/D , vida da broca, potência de corte, mínima quantidade de fluido de corte-MQF, fluidos de corte

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, 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).

O método de aplicação de fluido de corte internamente à broca tem demonstrado sucesso na usinagem de furos profundos. Esta forma de aplicação permite obter uma excelente penetração do fluido na região de corte. Porém, o emprego desta técnica exige condições e características apropriadas no conjunto máquinas-ferramentas, suportes e ferramentas de corte, de modo a permitir a circulação dos fluidos até a zona de corte. Tudo isso se traduz em maiores custos dos equipamentos e exigem maiores cuidados com o ferramental (Teixeira, 2001).

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 Sahn 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 e Diniz, 2000).

Este estudo tem como objetivo avaliar a influência da relação comprimento/diâmetro do furo (L/D) na vida de brocas de aço-rápido/cobalto revestidas com TiN e na potência consumida durante o corte do aço microligado DIN 38MnS6. A vida das ferramentas foi quantificada pelo comprimento usinado, até o momento de seus colapsos, e a potência de corte foi monitorada ao longo da vida das brocas. Os testes foram realizados sob 5 sistemas lubri-refrigerantes: usinagem a seco, 2 sistemas MQF na vazão de 30 ml/h (com óleos vegetal e integral) e 2 sistemas jorro convencional (com óleos integral e semi-sintético). Em relação aos parâmetros de corte, 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 colapso da broca, segundo recomendação da norma Nordtest NT Mech 038 (1997), e a vida da ferramenta foi quantificada, inicialmente, em relação ao número de furos usinados e posteriormente convertida em comprimento usinado. 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. Os testes foram realizados (corrida A) e repetidos (corrida B), quando a dispersão entre o teste e a réplica foi maior que 20%, uma terceira corrida foi realizada (corrida C). Para todas corridas utilizou-se uma broca nova e o valor médio entre as corridas foi o atribuído à resposta analisada. A Tab. 2 apresenta a planilha de testes com as condições de corte ensaiadas.

Tabela 1. Variáveis de entrada 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)	Comprimento usinado (mm)		
	Potência de corte (W)		

A potência de corte foi monitorada, ao longo da vida das ferramentas, indiretamente pelo sensoriamento simultâneo da corrente e tensão que alimentava as fases do motor principal do centro de usinagem CNC. Estes sensores, de efeito Hall, enviavam sinais a uma placa de conversão e aquisição de sinais, modelo PCI-6035E da National Instruments,

ligada a um computador com o software LabVIEW 6.5®, do mesmo fabricante. Os sinais foram colhidos a uma taxa de aquisição de 6000 pontos/segundo durante 2 segundos. O programa computacional processava estes pontos transformando-os em potência.

Tabela 2. Número dos testes e suas respectivas condições de corte para a etapa 3.

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

De forma a se ter certeza que a aquisição dos sinais aconteceu realmente durante a fase de usinagem, foi elaborado um programa em MATLAB-R12 que fazia a leitura dos sinais adquiridos e traçava o gráfico da potência de usinagem em função do número de pontos adquiridos. Neste gráfico selecionava-se a faixa de pontos que apresentavam a potência de corte mais uniforme e com valores superiores (faixa de usinagem).

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 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 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.

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 de naturezas diferentes, vegetal e mineral. Para a aplicação de fluido 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.

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	-

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 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 regulagem 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. A Fig. 1 mostra os principais componentes do o aparelho pulverizador de MQF.

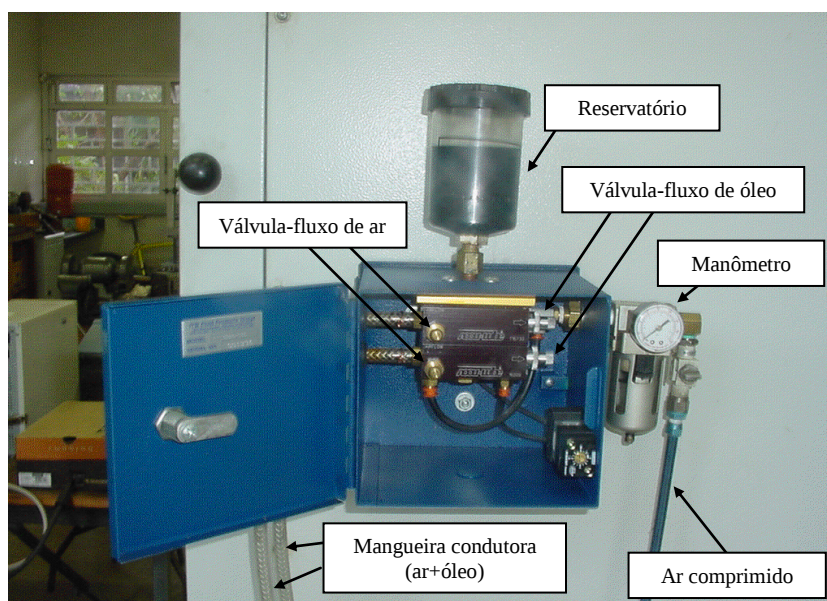


Figura 1. Aparelho pulverizador para aplicação de mínima quantidade de fluido de corte (COSTA, 2004).

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.



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 apresenta 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. Vida das Ferramentas de Corte

Os resultados para estes testes de furação, em relação à vida média das brocas, estão apresentados na Tabela 5. Conforme mostrado na Tab. 2, os primeiros 10 testes correspondem aos furos usinados com 30 mm e os seguintes com 12 mm. Assim, o comprimento usinado relativo a cada condição de corte foi obtido multiplicando o número de furos médio pelo respectivo comprimento do furo. Ainda em relação à Tab. 5, pode ser observado que os testes 02, 06, 07, 09, 10 e 17 apresentaram desvios entre o número de furos das 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.

A Tab. 6 apresenta uma análise estatística dos resultados de vida das brocas, expressa em comprimento usinado, 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. Nesta tabela nota-se que a aplicação dos fluidos contribuiu para o aumento do comprimento usinado, sendo que o sistema jorro com óleo semi-sintético o mais eficiente. A usinagem com o sistema Jorro-S.S, ao invés, do corte a seco, aumenta em média o comprimento usinado em 6,32 m, que em relação ao valor médio dos testes (8,96 m) corresponde a um percentual de 71%. Já os sistemas MQF-Veg, MQF-Int e Jorro-Int apresentaram valores de vida (comprimento usinado) próximos entre si e superiores ao sistema seco em 16%, 17% e 21%, respectivamente.

Os resultados obtidos para os sistemas lubri-refrigerantes confirmam que para as condições de corte impostas aos testes de furação, os fluidos de corte conseguiram desempenhar suas funções básicas que são a lubrificação e refrigeração, porém, diante da supremacia do sistema jorro com óleo semi-sintético em relação ao demais, a propriedade

de refrigeração foi a preponderante, uma vez que este sistema, por ter em sua composição 95% de água, tem um poder de refrigeração muito superior aos outros sistemas concorrentes.

Tabela 5. Resultados de vida para os ensaios de furação.

TESTE Nº	CORRIDA (nº furos)		DESVIO (%)	CORRIDA C (nº furos) [desvio > 20%]	VIDA MÉDIA	
	A	B			Nº Furos	Comprimento Usinado (m)
01	361	313	13,3	-	337	10,11
02	101	159	36,5	118	126	3,78
03	407	501	18,8	-	454	13,62
04	216	175	19,0	-	196	5,88
05	213	259	17,8	-	236	7,08
06	130	92	29,2	103	108	3,24
07	264	345	23,5	299	303	9,09
08	152	160	5,0	-	156	4,68
09	355	252	29,0	342	316	9,48
10	109	192	43,2	153	151	4,53
11	891	919	3,0	-	905	10,86
12	316	337	6,2	-	327	3,92
13	1920	-	-	-	1920	23,04
14	490	497	1,4	-	494	5,93
15	732	722	1,4	-	727	8,72
16	330	359	8,1	-	345	4,14
17	762	608	20,2	740	703	8,44
18	424	410	3,3	-	417	5,00
19	638	762	16,3	-	700	8,40
20	438	388	11,4	-	413	4,96

Tabela 6. Efeito proporcionado na vida média das brocas (comprimento usinado) quando da mudança dos níveis das variáveis.

Sistema Lubri-Refrigerante	Vida Média [m]	Efeito na Vida Média (Comprimento Usinado)		
		Sist. Lub-Ref	Vel. de Corte (45 → 60 m/min)	Relação L/D (1,2 → 3,0)
Seco → MQF-Veg	6,30	1,01 (↑16%)	-4,07 (↓ 65%)	-0,55 (↓ 09%)
Seco → MQF-Min	6,32	1,05 (↑17%)	-4,20 (↓ 66%)	-0,47 (↓ 07%)
Seco → Jorro-Min	6,48	1,37 (↑21%)	-5,42 (↓ 84%)	-0,86 (↓ 13%)
Seco → Jorro-S.S	8,96	6,32 (↑71%)	-8,32 (↓ 93%)	-3,00 (↓ 33%)

Pode-se também deduzir dos resultados, em relação aos desempenhos dos sistemas lubri-refrigerantes, que as velocidades de corte empregadas nos ensaios (45 e 60 m/min) são relativamente altas para as demais condições de corte, provocando assim o desenvolvimento de temperaturas elevadas e desta forma demandando fluidos com maior poder refrigerante. Merece destaque também nos resultados da Tab. 6, os desempenhos muito próximos na vida das brocas dos sistemas MQF e Jorro que utilizaram óleo mineral, 17% e 21%, respectivamente, lembrando que o volume de óleo liberado em 1 hora do sistema Jorro-Min é superior a 24.000 vezes o volume do sistema MQF-Min. Este fato corrobora com a literatura, que diz que quantidades mínimas de fluido são suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta, 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).

A velocidade de corte foi a variável mais influente na vida das brocas. O aumento da velocidade de 45 para 60 m/min provocou uma redução média no comprimento usinado de 77%, Tab. 6. O aumento desta variável tem uma relação direta com o aumento da temperatura da ferramenta de corte, o que compromete fortemente a sua resistência.

Das 3 variáveis de entrada pesquisas a menos influente na vida das brocas foi a relação L/D. O aumento da profundidade dos furos de 12 mm para 30 mm sempre contribui para reduzir a vida das ferramentas, em média, a redução no comprimento usinado foi de 14%, Tab. 6. O fato da vida da ferramenta diminuir com o aumento da profundidade de furação tem uma relação direta com a dificuldade que o cavaco enfrenta para sair de dentro do furo,

que cresce à medida que a profundidade do mesmo aumenta, contribuindo de forma decisiva para a elevação da temperatura na ferramenta de corte. Em usinagem, de 97 a 99% da energia consumida é convertida em calor e a maior parte deste calor gerado na região de corte vai para o cavaco, estima-se em torno de 75% (Machado *et al.*, 2015).

3.2. Potência de Corte

A Tab.7 mostra os resultados de potência efetiva de corte para os testes de furação. Destaca-se também nesta tabela o desvio padrão relativamente baixo entre todas as aquisições de cada teste, na média o desvio foi de 7%.

Tabela 7. Resultados da potência efetiva de corte monitorada ao longo da vida das brocas.

Teste	Corrida / Potência [W]			Nº de Aquisições	Desvio-padrão	Potência Média [W]
	A	B	C			
01	1400	1350	-	17	102	1374
02	1855	1816	1847	24	116	1839
03	1440	1460	-	17	150	1451
04	1913	1741	-	11	134	1819
05	1329	1386	-	18	98	1357
06	1803	1672	1658	23	100	1713
07	1372	1340	1318	25	65	1344
08	1712	1733	-	16	79	1723
09	1346	1301	1344	25	101	1331
10	1680	1702	1725	25	65	1703
11	1419	1375	-	16	133	1397
12	1800	1783	-	13	81	1794
13	1472	-	-	09	155	1472
14	1850	1784	-	17	131	1815
15	1367	1366	-	17	154	1366
16	1796	1748	-	18	128	1772
17	1444	1334	1384	27	139	1387
18	1691	1686	-	18	111	1689
19	1333	1370	-	18	100	1352
20	1754	1771	-	18	113	1762

A Tab. 8 apresenta uma análise estatística da potência de corte via *Planejamento de Experimentos* 2³, nos mesmos moldes do que foi feito para a resposta “vida das brocas”. Nota-se nesta tabela que os efeitos proporcionados pela variação do sistema lubri-refrigerante e da relação L/D na potência de corte foram muito pequenos, não ultrapassando 5%. Por outro lado, a variação da velocidade de corte provocou um aumento expressivo na potência, em média em torno de 24%.

Tabela 8. Efeito proporcionado na potência de corte quando da mudança de nível das variáveis.

Sistema Lubri-Refrigerante	Potência Média [W]	Efeito na Potência de Corte Média [W]		
		Sist. Lub-Ref	Vel. de Corte (45 → 60 m/min)	Relação L/D (1,2 → 3,0)
Seco → MQF-Veg	1544	-16 (↓ 1%)	361 (↑ 23%)	-19 (↓ 1%)
Seco → MQF-Min	1545	-15 (↓ 1%)	386 (↑ 25%)	-37 (↓ 2%)
Seco → Jorro-Min	1577	49 (↑ 3%)	406 (↑ 26%)	-11 (↓ 1%)
Seco → Jorro-S.S	1596	87 (↑ 5%)	368 (↑ 23%)	-21 (↓ 1%)

Em relação aos sistemas lubri-refrigerantes testados, a Tab. 8 mostra que os dois sistemas jorros provocaram uma ligeira tendência de elevar a potência de corte em relação ao corte a seco, já os sistemas MQF praticamente não provocaram efeitos na potência, porém, a tendência foi de reduzir a potência de corte em torno de 1%. Estes resultados sugerem a seguinte explicação, os sistemas jorros por terem uma ação predominantemente refrigerante, podem aumentar as forças de usinagem, por promover um aumento da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento, pela redução da temperatura. No caso dos sistemas MQF a ação é predominantemente lubrificante, o que pode reduzir a área de contato cavaco-ferramenta e diminuir a força de usinagem (Machado *et al.*, 20015).

A potência de corte tem uma relação direta com o produto da força de corte pela velocidade de corte, desta forma deve ser feito um balanço destes parâmetros para se chegar ao comportamento final da potência. Na Tab. 8 ficou

evidenciado que o aumento da velocidade de corte ocasionou aumentos médios na potência de corte em torno de 24%. O aumento de velocidade parece ter promovido uma redução na força de corte, pela possibilidade desse aumento eliminar a formação de aresta postiça de corte (APC) e ocasionar uma maior geração de calor, o que contribui para a redução da resistência ao cisalhamento do material nas zonas de cisalhamento e também para a redução na área de contato cavaco-ferramenta (Machado *et al.*, 20015). Por outro lado, o simples fato de elevar a velocidade de corte de 45 para 60 m/min, aumento de 33%, impactaria no acréscimo da potência de corte neste mesmo percentual. Então combinando os efeitos de redução da força de corte, provocado pelo aumento da velocidade, com o aumento da própria velocidade de corte, se chegou ao percentual médio de elevação da potência de corte que foi por volta de 24%.

Analisando a influência da profundidade do furo na potência de corte, os resultados encontrados na Tab. 8 apontam para uma tendência muito pequena de redução da potencia quando se usina os furos de 30 mm, em relação aos de 12 mm, redução média em torno de 1%. 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 acesso dos fluidos na região de corte, o que pode diminuir a resistência do material usinado, embora também possa ocorrer, em contrapartida, um aumento dos esforços de corte em função da maior dificuldade de escoação do cavaco do interior do furo.

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 reduziu a vida das brocas em 14% e praticamente não influenciou a potência de corte, porém, em todas as condições lubri-refrigerantes testadas a tendência foi de reduzir a potência em torno de 1%.
- Todos os sistemas lubri-refrigerantes testados, em relação ao corte a seco, promoveram aumento na vida das ferramentas, porém, o jorro com óleo semi-sintético foi o mais eficiente, aumento médio de 71%, os demais sistemas (jorro com óleo mineral, MQF vegetal e MQF mineral) provocaram aumentos médios próximos entre si, em torno de 20%.
- Em relação ao corte a seco, os sistemas jorros (mineral e semi-sintético) tenderam a aumentar a potência de corte, 3% e 5%, respectivamente, já os sistemas MQF (vegetal e mineral) tenderam a provocar uma ligeira redução na potência de corte, em torno de 1%.
- A velocidade de corte provou ser a variável mais influente tanto na redução da vida das brocas como no aumento da potência de corte. O aumento da velocidade de 45 para 60 m/min, em média, reduziu o comprimento usinado das brocas de 77% e aumentou a potência de corte de 24%.

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 Desing and Grinding", Journal of Engineering for industry, Vol. 117, pp 277-287.
- Machado, A..R. and Wallbank, J., 1997, "The Effect of Extremely low Lubricant Volumes in Machining", Wear, 210, pp. 76-82.
- Machado, A.R. e 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.
- NT MECH 038, 1997, "Cutting Fluids for Drilling: Evaluation by Drill Life Test. Published by NORDTEST.
- 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.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

RELATIONSHIP BETWEEN THE DEPTH OF THE HOLE, THE LIFE OF THE DRILL AND THE CUTTING POWER WHEN APPLYING DIFFERENT LUBRI-COOLING SYSTEMS

Eder Silva Costa, edercosta@ufu.br¹

Carla Eloisa Ramos, careloram@hotmail.com¹

Álison 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 evaluates the influence of the length to diameter ratio (L/D) in the tool life, initially expressed in number of drill holes until the failure drill and subsequently in machined length, and the average cutting power required during cutting. Blind holes were machined with depths of 12 and 30 mm in microalloyed steel DIN 38MnS6 using HSS/cobalt twist drill coated with TiN and diameter of 10 mm. 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 of the input variables resulted in twenty cutting conditions. The tests were conducted (run A) and repeated (run B), when the dispersion between the run A and B was greater than 20% a third run was conducted (run C) and the average value between the runs was assigned to the response analyzed. The general statistical analysis of results through Design of Experiments (DOE) showed that Increasing L / D ratio (1.2 to 3.0) decreased the machined length in average 14%. Regarding the dry cutting, the application of cutting fluids in MQL tended to slightly reduce the cutting power while the application of cutting fluid in flood cooling tended to increase power during the machining of the microalloyed steel. The cutting speed proved to be the variable most influential in responses, on average, reduced the length machined of the drill of 77% and increased the cutting power of 24%.*

Keywords: length to-diameter- ratio (L/D), Drill life, cutting power, minimum quantity lubrication-MQL, cutting fluids