

INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO FURO NOS ESFORÇOS NA FURAÇÃO COM MQL DE FERRO FUNDIDO CINZENTO

COBEF2017-0315

Resumo: Este trabalho tem como alvo principal avaliar e quantificar de que forma a profundidade do furo afeta a força de avanço- F_z e o torque- M_z . Os ensaios consistiram na usinagem de furos não passantes com seis profundidades (5, 10, 15, 20, 25 e 32 mm) em uma placa de ferro fundido cinzento. Utilizou-se brocas helicoidais de aço rápido revestidas com TiAlN de 10 mm de diâmetro. As variáveis de entrada, além da profundidade do furo, foram: o sistema lubri-refrigerante (usinagem com aplicação de fluido de corte em mínima quantidade de lubrificante -MQL e a seco); a velocidade de corte (15 e 25 m/min) e o avanço (0,1 e 0,2 mm/volta). A análise dos resultados, utilizando como ferramenta estatística “Planejamento de Experimentos (DOE- Design of Experiments)”, revelou que a força de avanço é muito mais sensível à variação dos parâmetros de entrada do que o torque. Quando se usinou com 0,2 mm/volta, ao invés de 0,1 mm/volta, o F_z aumentou em média 77%, enquanto que o acréscimo em M_z foi de 50%. Outra constatação foi que o aumento da profundidade de furação provoca efeitos estatisticamente significativos e crescentes em F_z e em M_z , aumentos médios de 152 N (16%) e 0,13 N.m (3%), respectivamente. Também foi observado que a aplicação de MQL, em média, reduziu F_z e M_z em 8% e 2%, respectivamente, em comparação com o corte a seco, porém, para furos com a relação comprimento/diâmetro (L/D) maior que 1,5, o sistema MQL perdeu eficiência na redução dos esforços.

Palavras-chave: relação comprimento/diâmetro (L/D), força de avanço, torque, mínima quantidade de lubrificante-MQL

1. INTRODUÇÃO

A furação é o processo mais utilizado no setor metal mecânico (Tönshoff et al, 1994). Quanto mais profundo o furo, maiores são as dificuldades para usiná-lo, uma vez que a penetração do fluido de corte, para aplicação externa, é reduzida e a remoção dos cavacos para fora do furo é dificultada. Tais fatos aumentam o atrito nas regiões de corte e consequentemente os esforços de usinagem, com reflexos diretos na qualidade do furo (Costa, 2004 e Santos, 2002).

Para muitos autores, de uma maneira simplificada, pode-se considerar a furação curta quando a relação profundidade/diâmetro do furo (L/D) é baixa, geralmente menor que 3. Alguns definem furação profunda como aquela que apresenta relação L/D maior que 5, outros maior que 6. Existem vários fatores que são afetados pela relação L/D. Parâmetros como a saída de cavaco, qualidade do furo e taxa de remoção de material variam muito quando da furação curta ou profunda. De qualquer forma, a relação L/D depende muito do método utilizado e do desvio de linearidade requerido (Costa et al, 2016; Costa, 2004; Santos, 2002 e Lin et al, 1995).

O processo de furação, em relação a outros processos convencionais de usinagem, apresenta maiores dificuldades de dissipação de calor gerado pela deformação plástica durante a formação do cavaco, por conta de ser realizado no interior da peça. Desta forma, ele se torna quase sempre economicamente inviável ou esbarra em limitações operacionais quando a usinagem é realizada sem fluido de corte, pois a inexistência de fluido compromete o transporte de cavacos, podendo causar danos à integridade da ferramenta prematuramente (Sales, 1998; Machado e Diniz, 2000).

Os fluidos de corte são de grande importância durante a usinagem, pois melhoram o acabamento superficial, ajudam na remoção do cavaco, permitem o resfriamento durante a usinagem, dentre outros benefícios. Porém, estes têm encontrando restrições quanto ao uso, por conta dos altos custos operacionais, exigências legais relacionadas à saúde do trabalhador e à preservação do meio ambiente (Heisel et al, 1998 e Dörr, Sahm, 2000).

O sistema MQL pode ser definido como a pulverização de uma quantidade mínima de lubrificante, normalmente de base vegetal, em um fluxo de ar comprimido (Heisel et al, 1998 e Machado, Diniz, 2000). Segundo Sahm e Schneider (1996) a vazão do sistema MQL varia, geralmente, de 10 a 100 ml/h, a uma pressão de 4 a 6 kgf/cm². A usinagem com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL) vem sendo usada com sucesso como alternativa ao corte a seco,

pois reduz o consumo de fluido de corte, aliada à boa capacidade de lubrificação, com certa estabilidade térmica proporcionada pelo ar comprimido (Costa, 2004 e Kubota, Tabei, 1999).

Este trabalho tem como meta principal verificar o comportamento da força de avanço e do torque na furação do ferro fundido cinzento (FC 250) quando da variação da profundidade do furo. Os testes foram realizados sob dois sistemas lubri-refrigerantes, ar ambiente (furação a seco) e aplicação de óleo lubrificante em mínima quantidade (MQL). Os parâmetros de corte também foram variados e utilizou-se brocas helicoidais de aço rápido revestidas com TiAlN de 10 mm de diâmetro para a usinagem de furos cegos com seis profundidade (5, 10, 15, 20, 25 e 32 mm).

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. Testes de Furação

Os ensaios experimentais de usinagem consistiram na operação de furação na vertical e em cheio de uma placa de ferro fundido cinzento. Foram investigadas quatro variáveis de entrada e observadas duas respostas (variáveis de saída). A Tab. (1) mostra as variáveis presentes no trabalho.

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

VARIÁVEL			VALOR
DE ENTRADA	Profundidade de furação (mm)		5, 10, 15, 20, 25 e 32
	Velocidade de corte - vc (m/min)		15 e 25
	Avanço por rotação - f (mm/volta)		0,1 e 0,2
	Sistema lubri-refrigerante	ar ambiente (usinagem a seco)	-
		MQL (óleo vegetal)	22 ml/h
DE SAÍDA (resposta)	FORÇA DE AVANÇO-Fz (N)		
	TORQUE (N.m)		

As condições de corte impostas aos ensaios experimentais resultaram da combinação entre todos os níveis das variáveis de entrada, totalizando 48 testes (6x2x2x2). Antes da realização dos testes definitivos foram realizadas várias baterias de pré-testes com a finalidade de se ajustar os valores dos parâmetros de corte e testar o sistema de aquisição de sinal dos esforços de corte.

Para esta pesquisa foram disponibilizadas 12 brocas na condição de novas, assim, a cada quatro testes, a broca era trocada e tomou-se o cuidado de não se realizar testes com condições severas de corte com a mesma broca, tudo isso com o objetivo de não tornar o desgaste da ferramenta uma variável influente. Para assegurar isto, fotografou-se as brocas após os testes. Estas imagens foram adquiridas através de um Estéreo Microscópio SZ6145TR Olympus, acoplado ao sistema de Captura e Análise de Imagens Colorido, modelo Image-Pro Express Kit e o desgaste de flanco máximo medido nunca excedeu o valor de 0,1 mm.

Para cada condição de corte, ou seja, para cada teste, foram usinados 3 furos em sequência, mantendo-se uma distância entre seus centros de 12mm.

2.2. Máquina de Usinagem, Ferramenta de Corte e Material Usinado

Os experimentos foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical CNC, modelo Discovery 760, fabricado pela Romi/Bridgeport, com a potência do motor principal igual a 9 kW e rotação máxima no eixo-árvore de 10.000 rpm.

Utilizou-se para os testes de furação brocas helicoidais de aço-rápido/cobalto tipo M42 (8% Co), revestidas com TiAlN, com duas arestas cortantes. A Tab. (2) mostra os principais ângulos e dimensões das brocas.

Tabela 2. Ângulos e dimensões das brocas helicoidais ensaiadas.

Ângulos		Comprimento (mm)		
Ponta (σ)	Hélice (δ)	Total	Canal	Diâmetro
130°	30°	137	87	10

O material usinado foi uma placa de ferro fundido cinzento 250 (FC250), com matriz 100 % perlítica e dureza média de 187 HB. Esta placa foi fixada à mesa da máquina CNC por meio de castanhas e fresada em sua face superior, resultando nas dimensões 400x245x35 mm.

2.3. Sistemas Lubri-refrigerantes

Neste trabalho foi utilizada a condição a seco, na qual somente o ar ambiente estava presente, e a furação aplicando óleo de corte em mínima quantidade (MQL). O MQL foi aplicado externamente, por meio de um bico a uma vazão de 22 ml/h. A Tab. (3) traz algumas propriedades do fluido aplicado em MQL. Trata-se de um óleo Accu-Lube LB2000, fabricado pela ITW Chemical Products Ltda, biodegradável, atóxico e insolúvel em água, que é uma composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos.

Tabela 3 - Características típicas do óleo vegetal Accu-Lube/LB-2000®.

Propriedade	Valor
Densidade, g/ml (20/-3 °C)	0,900 – 0,940
Ponto de Ebulição	>100°C
Ponto de Fulgor	>300°C

O aparelho pulverizador utilizado para a aplicação de MQL, modelo O2AO-STD fabricado pela ITW Chemical Products Ltda, trabalhava com um fluxo contínuo de ar comprimido, ajustado em torno de 4,9 bar. Neste equipamento o óleo 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 mistura ar comprimido-óleo era injetada sobre a ferramenta-peça conforme mostrado na Fig. (1).



Figura 1. Aplicação de mínima quantidade de fluido de corte (MQL) na vazão de 22 ml/h.

2.4. Monitoramento da Força de Avanço e do Torque

Para o monitoramento da força de avanço e do momento torçor foi utilizado um dinamômetro rotativo Kistler, modelo 9123C1211, interligado a um decodificador do sinal Kistler 5223 e uma placa de aquisição de sinais PCI-6251 da National Instruments, acoplada a um computador gerenciado pelo software LabVIEW® 2009. A taxa de aquisição foi de 1 kHz. Os sinais correspondentes aos esforços de corte (F_z e M_z) foram adquiridos e salvos para os três furos representativos de cada teste. Posteriormente eles foram abertos no software Excel®, para que o gráfico do esforço fosse levantado e assim a média da aquisição fosse calculada somente no intervalo em que a broca estava efetivamente cortando. O valor do esforço atribuído ao teste foi o resultado da média aritmética simples entre os pontos obtidos nos três furos que compunham o teste.

2.5. Estratégias Estatísticas para Análise dos Resultados

As influências das variáveis de entrada nas respostas foram analisadas estatisticamente pela técnica “Planejamento de Experimentos” (DOE - Design of Experiments) com 4 variáveis (profundidade do furo, velocidade de corte, avanço por rotação e sistema lubri-refrigerante) em dois níveis, com um nível de confiabilidade de 95%. Como a variável profundidade do furo apresenta 6 níveis, foi realizado uma combinação entre eles, mantendo sempre a profundidade de 5 mm como o nível inferior. Os resultados do planejamento foram obtidos utilizando o software STATISTICA® 7.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios experimentais para a força de avanço (F_z) e torque (M_z) para a condição de lubri-refrigeração ar ambiente (furação a seco) e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL) são mostrados na Fig. (2), Fig. (3), Fig. (4) e Fig. (5), respectivamente. Os valores plotados nos gráficos de F_z e M_z são referentes à média da usinagem dos três furos representativos de cada teste, e a barra inserida no topo das colunas indicam o valor da dispersão (desvio padrão) das medidas.

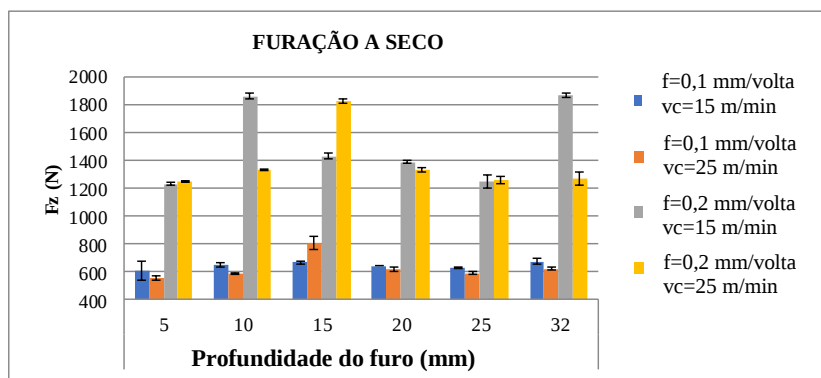


Figura 2. Influência da profundidade do furo na força de avanço (F_z) em função dos parâmetros de corte quando da furação utilizando o sistema lubri-refrigerante ar ambiente (furação a seco).

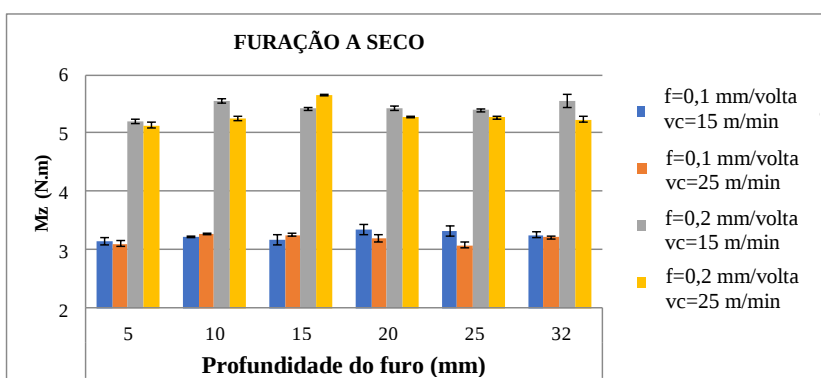


Figura 3. Influência da profundidade do furo no torque (M_z) em função dos parâmetros de corte quando da furação utilizando o sistema lubri-refrigerante ar ambiente (furação a seco).

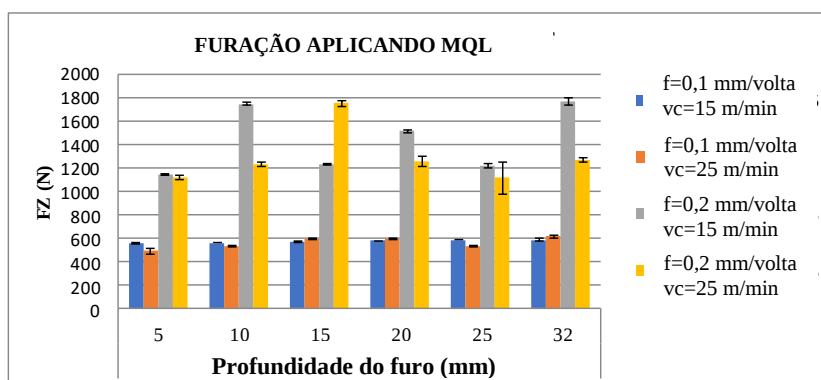


Figura 4. Influência da profundidade do furo na força de avanço (F_z) em função dos parâmetros de corte quando da furação aplicando fluido de corte em mínima quantidade (MQL).

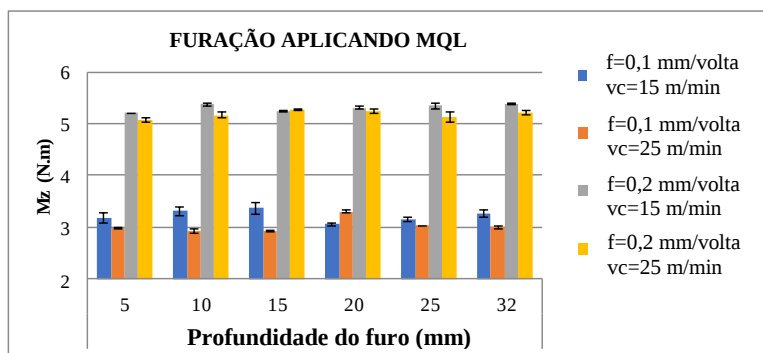


Figura 5. Influência da profundidade do furo no torque (Mz) em função dos parâmetros de corte quando da furação aplicando fluido de corte em mínima quantidade (MQL).

Observando os gráficos das Figs. (2) a (5) é bastante notório a forte influência da variável “f” (avanço/rotação) em Fz e Mz. Também se destacam nos gráficos, em geral, os valores relativamente baixos dos desvios padrão. As análises e quantificações dos efeitos das variáveis de entrada pesquisadas em Fz e Mz, que foi realizada através da ferramenta estatística “Planejamento de Experimentos” (DOE - Design of Experiments), serão detalhados a seguir.

3.1. Resultados dos Efeitos das Variáveis de Entrada na Força de Avanço (Fz)

A Tabela (4) apresenta os efeitos médios em Fz quando o nível da variável de entrada pesquisada é alterado. Nesta tabela, além dos efeitos das variáveis principais, também é mostrado o efeito das duas interações mais fortes entre as variáveis. Os valores dos efeitos destacados em vermelho indicam que o software identificou a variável como estatisticamente significativa, com um nível de confiabilidade de 95%.

Nota-se na tabela, de forma muito contundente, o poder que a variação do avanço (f) provoca em Fz, fazendo com que esta variável produzisse efeitos estatisticamente significativos em todos os confrontos de profundidade. Quando a furação é realizada com o avanço maior (0,2 mm/volta) ao invés do avanço menor (0,1 mm/volta) a valor de Fz aumenta em média 733 N (77%), tomando como referência o valor de Fz médio para os testes dos confrontos. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que na região de corte as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário são diretamente proporcionais ao avanço, o que resulta em aumento da força de usinagem, numa proporção direta, quase que linear (Machado et al, 2009).

Tabela 4. Efeito médio provocado em Fz em função da alteração do nível da variável pesquisada, calculados através de um Planejamento de Experimentos com dois níveis e quatro variáveis (DOE-2⁴).

Variável Entrada		EFEITO NA FORÇA - Fz (N)				
		Variação da Profundidade (mm)				
		5 → 10	5 → 15	5 → 20	5 → 25	5 → 32
1 – Profundidade do furo		193 (↑20%)	239 (↑24%)	122 (↑13%)	29 (↑3%)	216 (↑22%)
2 - vc (m/min) 15→25		-159 (↓16%)	118 (↑12%)	-58 (↓6%)	-40 (↓5%)	-157 (↓16%)
3 - f (mm/volta) 0,1→0,2		796 (↑82%)	765 (↑78%)	698 (↑75%)	629 (↑71%)	775 (↑79%)
4 - Sist. Lub-Ref. MQL→SECO		84 (↑9%)	112 (↑11%)	44 (↑5%)	73 (↑8%)	64 (↑7%)
Interação	1º	163 (1-3) (↑17%)	151 (1-2) (↑15%)	64 (1-3) (↑7%)	22 (1-2) (↑2%)	141 (1-3) (↑14%)
	2º	-125 (1-2) (↓13%)	131 (1-3) (↑13%)	-35 (1-4) (↓4%)	22 (1-3) (↑2%)	-124 (1-2) (↓13%)
MÉDIA Fz →		965	987	929	883	976

A segunda variável mais influente na força de avanço foi a profundidade do furo. Quando se aumenta a profundidade, partindo da profundidade de 5 mm, o efeito é sempre de aumentar Fz. No geral, e em média, o aumento foi de 152 N (16%). 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 de atrito e consequentemente para elevação dos esforços de corte (Costa et al., 2016). Além

disso, com o aumento da profundidade, a guia cilíndrica da broca tem mais contato com a parede do furo, podendo, desta forma, também contribuir para o aumento dos esforços.

Continuando a análise da influência da variação da profundidade do furo em F_z , é possível perceber pela Tab. (4) que até a profundidade de 15 mm, tendo como partida as profundidades de 5 mm e 10 mm, os valores médios de F_z foram crescentes, aproximadamente 20% e 4%, respectivamente. Já a partir da profundidade de 15 mm, em comparação com as profundidades de 20 mm e 25 mm, houve uma redução nos valores médios de F_z em aproximadamente 11% e 10%, respectivamente. Por último, fazendo-se o confronto entre os valores dos efeitos em F_z das profundidades de 25 mm e 32 mm, percebe-se um aumento médio em F_z de aproximadamente 19%. A Fig. (6) ilustra graficamente a variação da força de avanço média em função da profundidade do furo, levando-se em consideração todos os níveis das demais variáveis de entrada.

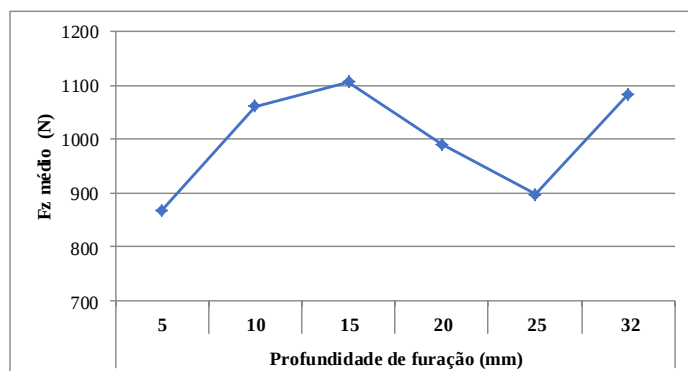


Figura 6. Valores médios de F_z em função da profundidade do furo para todas as condições de corte.

Os resultados encontrados para os valores médios de F_z em função da variação da profundidade de furação revelaram que até a profundidade de furação de 10 mm ($L/D=1,0$), os valores da força aumentam significativamente, na próxima etapa, que vai até a profundidade de 15 mm ($L/D=1,5$), o aumento da força é menos acentuado. A partir desta profundidade há um decréscimo da força de avanço para 20 mm ($L/D=2,0$) e 25 mm ($L/D=2,5$). Finalmente, os valores de F_z voltam a subir fortemente quando a profundidade do furo alcança a máxima profundidade investigada de 32 mm ($L/D=3,2$). Assim, parece razoável concluir que o processo de furação apresenta uma instabilidade na força de avanço à medida que profundidade do furo aumenta. Para os níveis das variáveis pesquisadas e tomando como o valor inicial de F_z o referente ao da menor profundidade, F_z aumentou até aproximadamente $L/D=1,5$, aumento médio de 28%. No percurso entre $L/D=1,5$ e $L/D=2,5$, F_z reduziu em média de 19%. Após $L/D=2,5$ o valor de F_z subiu em torno de 21%.

Os resultados encontrados para F_z em função da variação da profundidade do furo, sugerem que relações L/D maiores que 3,2 fossem também investigadas, porém, como a placa de ferro fundido usada como corpo de prova possuía altura de 34 mm isto não foi possível.

A interação entre as variáveis profundidade e avanço, interação 1-3, foi em geral a que produziu os maiores efeitos em F_z , sendo que em duas oportunidades eles foram estatisticamente significativos, células em vermelho da Tab. (4). Os resultados desta interação indicam que quando a furação é realizada com o maior avanço e furos mais profundos, ao invés do menor avanço e furos menos profundos, a força de avanço aumenta em média de 11%. Destaca-se também na tabela que em todas as interações importantes a variável profundidade do furo estava presente.

De acordo com a Tab. (4) a variável velocidade de corte foi a terceira mais influente em F_z . O aumento de v_c de 15 m/min para 25 m/min tendeu a reduzir F_z , em média 11%. O acréscimo da velocidade provoca um aumento da temperatura na interface cavaco ferramenta, o que facilita o cisalhamento do material e consequentemente ocasiona uma diminuição dos esforços de corte. Destaca-se ainda nos resultados que a combinação entre a velocidade e profundidade do furo produziu, em geral, a segunda interação mais importante. Percebe-se ainda na tabela, que em algumas situações a variável velocidade e suas interações provocaram acréscimos em F_z . Este fato sugere que em algumas situações pode ter ocorrido a formação de aresta postiça de corte (APC), uma vez que as velocidades de corte ensaiadas foram relativamente baixas. Este fenômeno, conforme explicado por Machado et al. (2011), pode causar instabilidade nas forças de usinagem.

Entre as variáveis de entrada, a menos influente em F_z foi o sistema lubri-refrigerante. A furação a seco, tendo como referência a furação aplicando MQL, aumentou em média, os valores de F_z em 8%, Tab. (4). A aplicação de fluido de corte, mesmo em mínimas quantidades, produz uma redução do atrito na ferramenta, já que a área de contato cavaco-ferramenta é muito pequena, o que por consequência diminuirá as forças de corte (Machado e Wallbank, 1997). Ainda pode ser constatado na tabela, que conforme a profundidade do furo aumenta, diminui o poder do sistema MQL, em relação à furação a seco, de reduzir F_z . Até a profundidade de 15 mm a aplicação de MQL reduz F_z em cerca de 10%, já para profundidades maiores a redução em F_z é em média de 6,6%. À medida que a profundidade do furo aumenta, mais difícil fica o acesso do fluido para a região de corte, uma vez que a aplicação do fluido para estes testes foi feita externamente por meio de um bico.

3.2. Resultados dos Efeitos das Variáveis de Entrada no Torque (Mz)

A Tabela (5) apresenta os efeitos médios em Mz quando o nível da variável de entrada pesquisada é alterado. As considerações feitas sobre a Tab. (4) se aplicam integralmente à Tab. (5). Ressalta-se que as explicações dadas ao comportamento de Fz em relação às variáveis de entrada se aplicam também, em sua maioria, a Mz.

Tabela 5. Efeito médio provocado em Mz em função da alteração do nível da variável pesquisada, calculados através de um Planejamento de Experimentos com dois níveis e quatro variáveis (DOE-2⁴).

Variável Entrada	EFEITO NO TORQUE - Mz (N.m)				
	Variação da Profundidade (mm)				
	5 → 10	5 → 15	5 → 20	5 → 25	5 → 32
1 – Profundidade do furo	0,13 (↑3%)	0,16 (↑4%)	0,14 (↑3%)	0,08 (↑2%)	0,13 (↑3%)
2 - vc (m/min) 15→25	-0,16 (↓4%)	-0,07 (↓2%)	-0,07 (↓2%)	-0,14 (↓3%)	-0,16 (↓4%)
3 - f (mm/volta) 0,1→0,2	2,10 (↑50%)	2,13 (↑51%)	2,07 (↑49%)	2,09 (↑50%)	2,10 (↑50%)
4 - Sist. Lub-Ref. MQL→SECO	0,08 (↑2%)	0,11 (↑3%)	0,06 (↑1%)	0,07 (↑2%)	0,07 (↑2%)
Interação (1° / 2°)	0,07 (2-4) (↑2%)	0,12 (2-4) (↑3%)	0,04 (1-2) (↑1%)	-0,03 (1-2) (↓1%)	0,05 (1-3) (↑1%)
	0,05 (1-3) (↑1%)	0,08 (1-3) (↑2%)	-0,04 (2-4) (↓1%)	0,03 (1-4) (↑1%)	-0,04 (1-2) (↓1%)
MÉDIA → Mz	4,19	4,21	4,20	4,17	4,20

Os resultados de torque explicitados na Tab. (5) evidenciam que os efeitos das variáveis de entrada em Mz são muito menores que aqueles produzidos em Fz, Tab. (4). Porém, a ordem de influência das variáveis foi mantida. A variável avanço é a que produz os maiores efeitos em Mz. A furação com o avanço maior da broca provocou um crescimento expressivo no torque, em média de 2,1 N.m (50%), contra um aumento médio de 77% em Fz.

A variação da profundidade do furo, embora tenha provocados efeitos estatisticamente significativos em Mz, células em vermelho da Tab. (5), em todos os confrontos, produziu efeitos relativamente pequenos em Mz, aumento médio de 0,13 N.m (3%). A Fig. (7) mostra os valores médios de Mz para as profundidades investigadas, levando-se em consideração todos os níveis das demais variáveis. As próprias médias de Mz entre os confrontos de profundidades, Tab. (5), comprova este fato.

O aumento da velocidade de corte de 15 m/min para 25 m/min provocou sempre redução em Mz, e em três confrontos de profundidades (5→10, 5→25 e 5→32) os efeitos foram significativos, embora na média essa redução em Mz tenha sido de apenas cerca de 3%. Nas interações mais importantes, em geral, a variável velocidade (2) esteve presente, Tab. (5).

A variável sistema lubri-refrigerante, da mesma forma que em Fz, foi a menos influente em Mz. A usinagem a seco tendeu a elevar os valores de Mz em média de 2%, quando comparado com a furação com mínima quantidade de lubrificante (MQL).

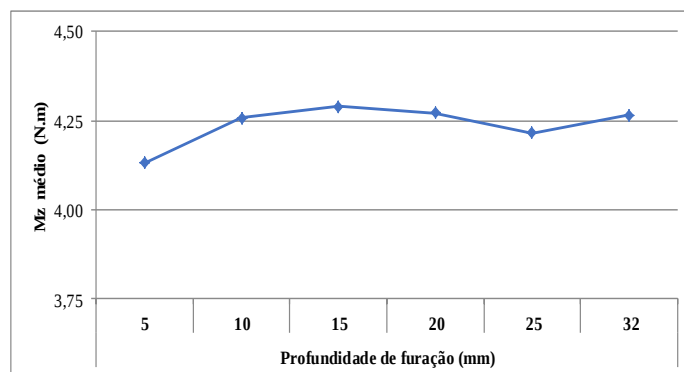


Figura 7. Valores médios de Mz em função da profundidade do furo para todas as condições de corte.

4. CONCLUSÕES

Diante da metodologia imposta aos experimentos e dos consequentes resultados obtidos dos ensaios de furação, destacam-se seguintes conclusões:

- Todas as variáveis de entrada pesquisadas (profundidade de furação, velocidade de corte, avanço por rotação e sistema lubri-refrigerante) influenciaram mais a força de avanço (Fz) do que o torque (Mz),
- O aumento da profundidade de furação provoca efeitos estatisticamente significativos e crescentes em Fz e em Mz, aumentos médios de 152 N (16%) e 0,13 N.m (3%), respectivamente;
- O processo de furação apresentou uma instabilidade em Fz à medida que profundidade do furo aumenta. Em valores médios, Fz aumentou até L/D=1,5 de 28%, depois reduziu de 19% até L/D=2,5 e finalmente subiu 21% ao chegar na máxima profundidade (L/D=3,2);
- Embora o comportamento de Mz, em relação à profundidade de furação, tenha seguido o perfil de Fz, as variações foram mínimas, em média diferenças de 3%. No entanto, o software as identificou como estatisticamente significativas;
- O aumento da velocidade de corte na maioria das vezes, reduziu Fz e sempre atuou no sentido de reduzir Mz, reduções de 11% e 3%, respectivamente.
- A variável sistema lubri-refrigerante foi a menos influente nos esforços de corte. A furação aplicando mínima quantidade de lubrificante - MQL, em geral, reduziu Fz e Mz em 8% e 2%, respectivamente, em comparação com o corte a seco, porém, para furos com profundidades superiores a L/D=1,5 o sistema MQL perdeu eficiência na redução dos esforços.
- O avanço por rotação foi a variável que mais afetou os esforços de corte. Quando o avanço subiu de 0,1 mm/volta para 0,2 mm/volta, Fz e Mz aumentaram em média 733 N (77%) e 2,1 N.m (50%), respectivamente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, à CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro, e à OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda pelo fornecimento das ferramentas de corte.

6. REFERÊNCIAS

- Bennett, E.O., 1992, "Systemic diseases in machinists", Biotech Publishing: Angleton, Texas, USA, 1995, 190 p.
- Bennett, E.O., 1994, "Dermatitis in machinists – Causes and solutions", Biotech Publishing: Angleton, Texas, USA, 240 p.
- Clark, J.A., 1986, Private Communication, University of Michigan, Ann Harbor.
- Coimbra, A.L., 1978, "Lessons of Continuum Mechanics", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 428 p.
- Costa, E.S. 2004, "Furação de Aços Microligados com Aplicação de Mínima Quantidade de Fluido de Corte – MQF", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2004, 311 pags.
- Clark, J.A., 1986, Private Communication, University of Michigan, Ann Harbor.
- Costa, E.S.; Ramos, C.E. ; Machado, Á.R., 2016, "Relação entre a Profundidade do Furo, a Vida da Broca e a Potência de Corte quando da Aplicação de Diferentes Sistemas Lubri-Refrigerantes". Anais do IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2016, Fortaleza-CE.
- Dörr, J. e Sahm, A., 2000, "A mínima quantidade de lubrificantes avaliada pelos usuários", Máquinas e Metais: Editora Aranda, novembro, p. 20 – 39.
- Heisel, U., Lutz, M., Spath, D., Wassmer, R. and Walter, U, 1998, "A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte", Máquinas e Metais: Editora Aranda, p. 22-38, fev. 1998.
- Kalhöfer, E., 1987, "Dry machining – principles and applications", 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia, UNIMEP, Santa Bárbara D'Oeste –SP, julho7.
- Kloche, F. and Eisenblätter, G., 1997, "Presented at the opening session dry cutting", Annals of the Cirp, v. 46 (2), p. 519-526.
- Kubota, H., and Tabei, H., 1999, "Drilling of A Small and Deep Hole Using a Twist Drill", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C 62 (601), pp. 3691-3697.
- Lee, Y.B., 2003, "Studies on the growth of the frost layer based on heat and mass transfer through porous media", Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.
- 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.
- Luke, W.E. Toxity of metalworking fluids: myths and reality - A chemist's perspectives. Journal of the Society of Tribologists and Lubrification Engineers, vol. 48, p. 425-429.
- 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, 2000.

- Sahm, D. and Schneider, 1996, "A Produção sem Refrigeração é Interessante e Deve ser mais Conhecida", Máquinas e Metais, Editora Aranda, agosto, pp 38-55.
- Sales, W.F. et al., 1988, "Influência do fluido de corte no desgaste de brocas de aço-rápido", In: IV Seminário de Desgaste, São Paulo SP. Anais
- 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.
- Tönshoff, H.K., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994, "Machining of Holes – Developments in Drilling Technology", Annals of CIRP, Vol. 43, pp 551-561.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

INFLUENCE OF HOLE DEPTH ON FORCE AND TORQUE IN DRILLING WITH MQL OF GREY CAST IRON

COBEF2017-0315

Abstract: This paper has as main target to evaluate and quantify how the depth of the hole affects the thrust force (F_z) and torque (M_z). Blind holes were drilled in the gray cast iron with a six different depths ((5, 10, 15, 20, 25 e 32 mm). It was used 10 mm diameter twist drills coated with TiAlN. The input variables, beyond depth of the hole, were: the lubricant-cooling system (dry, Minimum Quantity Lubrication-MQL); cutting speed (15 and 25 m/min , and feed rate (0.1 and 0.2 mm/rev). The results showed that, using as statics tool “Experimental Planning (DOE- Design of Experiments)”, demonstrated that the thrust force (F_z) is much more sensitive to input variables than the torque. A proof of this fact is in the variation of the feed rate, when machining with 0,2 mm/rev, rather than 0,1 mm/rev, the F_z increased average 77%, while the M_z were the increase was 50%. Another observation was that the increase of the depth causes effects statistically significant and growing in F_z and in M_z , average increases of 152 N (16%) and 0.13 N.m (3%), respectively. Also, was observed that the MQL application, in average, decrease F_z and M_z in 8% and 2%, respectively, in comparison with dry cutting, however, for holes with the relationship length / diameter (L/D) bigger than 1.5, other system MQL has lost efficiency in reducing efforts.

Keywords: the relationship length / diameter (L/D), thrust force (F_z), torque, Minimum Quantity Lubrication-MQL