

Avaliação do desempenho de brocas revestidas pelo processo sol-gel na furação de ferro fundido cinzento

Bruna Aparecida Rezende (UFMG) brunarezende12@yahoo.com.br
Ramon Gomes da Silva (UFMG) ramongomes.eng@gmail.com
Manuel Houmard (UFMG) mhoumard@ufmg.br
Marcelo Araújo Câmara (UFMG) marcelocamara@demec.ufmg.br
Juan Carlos Campos Rubio (UFMG) juan@ufmg.br

Resumo:

O ferro fundido cinzento é um material frequentemente utilizado na fabricação de peças automotivas, como por exemplo, em discos de freio. Estes podem passar por diferentes operações de usinagem, dentre eles a furação. Este trabalho tem como objetivo o estudo da furação de um disco de freio com brocas de aço rápido (HSS), por meio da análise da força de avanço, rugosidade e circularidade dos furos. Para a melhoria da qualidade dos furos, busca-se a minimização de tais variáveis. Foram utilizados diferentes níveis para os parâmetros ferramenta, velocidade de corte e avanço. O processo sol-gel foi utilizado para obtenção do revestimento de SiO_2 em brocas, sendo tratadas termicamente. Os desgastes presentes nas brocas foram analisados qualitativamente. A broca revestida apresentou uma vida maior até a falha.

Palavras chave: Furação, ferro fundido cinzento, sol-gel, revestimento de SiO_2 .

Performance evaluation of coated drills by sol-gel process in gray cast iron drilling

Abstract:

The gray cast iron is a material commonly used in the manufacture of automotive pieces such as brake discs, which may be manufactured by different machining operations, including drilling. This work aims at the study of drilling into a brake disc using high speed steel tools (HSS) through the analysis of thrust force, roughness and holes circularity. In order to improve the holes quality, the minimization of such parameters is desirable. Different tools and levels of cutting speed and feed are used. The sol-gel process was used to produce a SiO_2 coating on drills, which were also heat treated. Furthermore, the tool wear is qualitatively analyzed. The coated drill providing also a longer life to failure.

Key-words: Drilling, gray cast iron, sol-gel, SiO_2 coating.

1. Introdução

O ferro fundido é um dos materiais mais tradicionais aplicados na indústria metal-mecânica e pesada, indústria automobilística, máquinas, e componentes mecânicos (GUESSER, 2011). Os discos de freios automotivos são peças de ferro fundido cinzento que são fabricadas pelo processo de fundição, e posteriormente, são na sua maioria submetidos ao processo de usinagem. O ferro fundido cinzento é assim denominado devido ao aspecto da fratura deste

material, que é cinzenta. De acordo com Castillo (2005), no ferro fundido cinzento, a grafita existe na estrutura em forma de flocos ou veias na matriz ferrítica, que atuam como concentradores de tensão causando baixa resistência e baixa ductilidade. O carbono pode existir na forma de grafita ou carboneto de ferro. A tabela 1 resume as propriedades mecânicas e aplicações do Ferro Fundido Cinzento.

Tipo do Ferro Fundido Cinzento	Limite de Resistência (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)	Alongamento com comprimento inicial de 50 mm (%)	Aplicações Típicas
Ferrítico	170	140	0,4	Tubulações, componentes sanitários
Perlítico	275	240	0,4	Blocos de motor, máquinas ferramenta
Martensítico	550	550	0	Superfícies anti-desgaste

Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010)

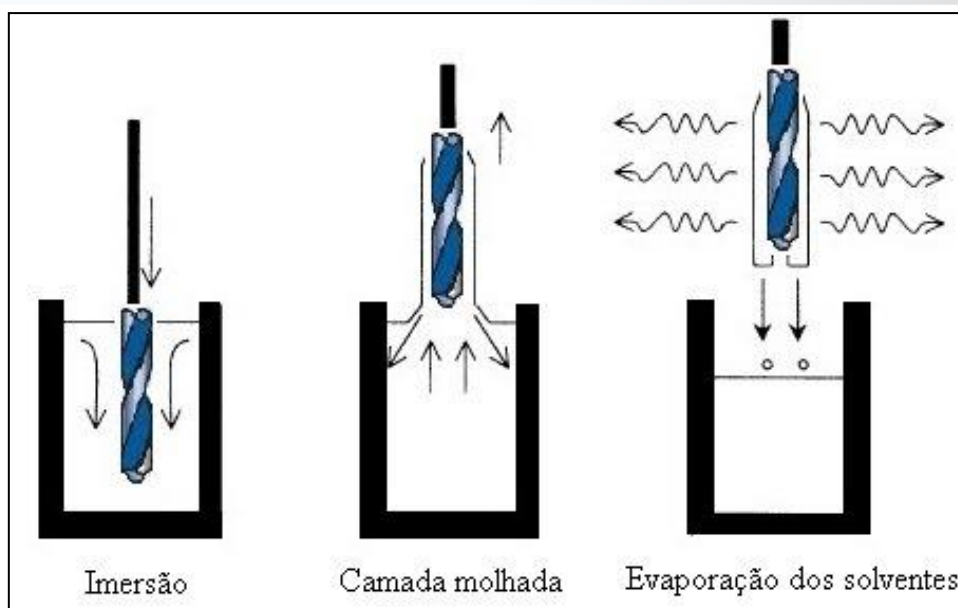
Tabela 1 - Propriedades mecânicas e aplicações do Ferro Fundido Cinzento

Assim como diversos materiais, o ferro fundido cinzento passa pela operação de furação. Esta é comumente usada para a união ou montagem das peças de um produto (MANIGANDANA, SRIVATSANB e QUICKC, 2012). Danos estão sujeitos a ocorrerem em todo tipo de operação. No caso da operação de furação, entre os principais danos presentes podem ser citados, a presença de rebarba, desvio de circularidade, danos relacionados à temperatura, entre outros. Ng e Li (2001) definem a circularidade como a relação entre os diâmetros mínimo e máximo circunscritos no furo e a mesma foi mensurada neste trabalho.

Além dos danos anteriormente citados, a qualidade de uma superfície pode ser caracterizada também através de vários fatores, como por exemplo pela rugosidade. Ela é composta de irregularidades ou erros oriundos da ação inerente ao processo de corte (MACHADO *et al.*, 2011). Entre os principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade tem-se o Ra (desvio médio aritmético), definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem (ABNT NBR ISO 4287 apud MACHADO *et al.*, 2011).

Com o propósito de minimizar esses danos na peça de trabalho, durante o processo de usinagem, busca-se a utilização de parâmetros de corte e ferramentas adequados. Neste sentido, surge a necessidade de avaliar o desempenho de ferramentas de corte revestidas.

Neste trabalho foi utilizado um revestimento de SiO₂, processado pela tecnologia sol-gel nas brocas. O processo é denominado sol-gel porque ocorre a transição de uma dispersão de partículas coloidais (sol) para uma estrutura rígida de partículas coloidais (gel). De acordo com Avellaneda (1999) e Wright e Sommerdijk (2001) as principais vantagens do processo sol-gel são a obtenção de filmes finos, grande homogeneidade, baixo custo e baixas temperaturas para a produção e processamento dos sólidos obtidos. Entre as técnicas para deposição da solução sol-gel em substratos, a mais antiga é a imersão (*dip-coating*). Esta técnica apresenta facilidade na utilização, capacidade de revestimento em substratos com geometrias complexas, além de filmes finos com boa aderência (GOUVEIA, 2013). Na figura 1 tem-se as etapas da deposição por imersão para uma broca.



Fonte: Rezende (2016)

Figura 1 - Etapas da deposição da solução sol-gel na broca pelo método de imersão (*dip-coating*)

Após a deposição do filme sobre o substrato, este fica exposto ao ar para evaporação dos solventes, e após a secagem há a formação de uma rede (gel) sobre o substrato. Finalmente, ocorre o processo de densificação a uma temperatura apropriada (de 100°C a 400°C) em que a água e grupos orgânicos são eliminados, com a formação do óxido (MELO, 2001).

O óxido utilizado, SiO_2 , também conhecido como sílica, é um material dielétrico, de alta estabilidade térmica, estabilidade química, e alta dureza que tem sido utilizado como revestimento em forma de filme fino processado pelo método sol-gel, principalmente em aplicações como camada dielétrica para constituintes microeletrônicos, como camada antireflexiva, e como camada de proteção contra corrosão (GUNDUZ, CAVAS e YAKUPHANOGU, 2011). Entretanto, ainda não há estudos detalhados sobre revestimentos sol-gel de SiO_2 para ferramentas de corte.

O presente trabalho consiste na furação de ferro fundido cinzento, bem como na medição da força de avanço, medição da rugosidade e circularidade do furo. São utilizadas ferramentas de aço rápido, sendo ferramentas sem revestimento sem tratamento térmico e com revestimento de SiO_2 (com tratamento térmico).

2. Materiais e Métodos

2.1 Ferro Fundido Cinzento GH190

O material utilizado para realização dos ensaios de furação foi o ferro fundido cinzento GH190. A tabela 2 resume a composição química deste material, o qual é comumente aplicado na produção de discos de freio.

Método:	Fe-20	Laboratório Metalurgia						Data:	27/10/2014				
Amostra								Hora:	09:47:05				
Disco de Freio 814								Análise Espectrômetro					
Liga:	Cinzentos												
Análise:	159												
Elemento:	C	Si	Mn	Cr	Cu	Sn	Ni	Mo					
Unidade:	%	%	%	%	%	%	%	%					
Valor:	3,37	2,23	0,29	0,20	0,16	0,081	0,03	0,01					
Elemento:	S	P	Al	Pb	Ti	Mg	Nb	La					
Unidade:	%	%	%	%	%	%	%	%					
Valor:	0,120	0,07	0,0021	0,00054	0,024	0,00027	0,0024	0,0013					
Elemento:	Zr	Co	V	W	As	Ca	Ce	Sb					
Unidade:	%	%	%	%	%	%	%	%					
Valor:	0,000078	0,00087	0,0074	0,00088	0,0029	0,0027	0,00017	< 0,00040					
Elemento:	B	N	Fe										
Unidade:	%	%	%										
Valor:	0,00025	< 0,0004	93,4										

Tabela 2 - Composição química do Ferro Fundido Cinzentos GH190

Para a furação, foram utilizadas brocas de aço rápido com 10 mm de diâmetro, ângulo de ponta de 65° e ângulo de hélice de 25°. As brocas são da marca Osco e tipo Ex-EDR, sendo ferramentas sem revestimento e sem tratamento térmico e revestidas com três camadas de SiO₂, tratadas termicamente.

2.2 Revestimento de dióxido de silício (SiO₂)

Um revestimento de SiO₂ foi utilizado em brocas de aço rápido (HSS). O revestimento foi processado por tecnologia Sol-Gel e depositado por imersão (dip-coating) a uma velocidade de 0,5 mm/s. Os reagentes utilizados para o revestimento foram tetraethoxylisane (TEOS), água deionizada, ácido clorídrico (HCl), e álcool absoluto como solvente. Na solução, a concentração de átomos de silício correspondeu a 1,5 mol/L, pH = 3,5 e razão de água/TEOS de 2,2. Após a deposição, a broca foi submetida a um tratamento térmico de 400°C por um período de 2 horas. O tratamento térmico tem por objetivo o aumento da densidade do SiO₂, através da redução da porosidade inerente ao processo sol-gel e então o endurecimento do revestimento.

2.3 Montagem Experimental e Equipamentos

A Figura 2 mostra a montagem experimental utilizada, onde pode ser observado o eixo árvore e a broca montada, assim como o suporte de fixação e o dinamômetro extensométrico utilizado para medição da força de avanço. O Centro de usinagem utilizado foi o ROMI modelo Discovery 560, com potência de 9 kW e rotação máxima de 7500 rpm no eixo árvore. Para a medição da rugosidade das paredes dos furos foi utilizado o rugosímetro portátil Taylor Robson modelo Surtronic 25 e para a medição da circularidade dos furos foi utilizada a máquina de medição por coordenadas TESA, modelo MICRO HITE 3D, com o software REFLEX SCAN. A circularidade foi medida em um ponto médio da espessura do furo, sendo que para essa medição foram considerados (7) sete pontos do diâmetro do furo.

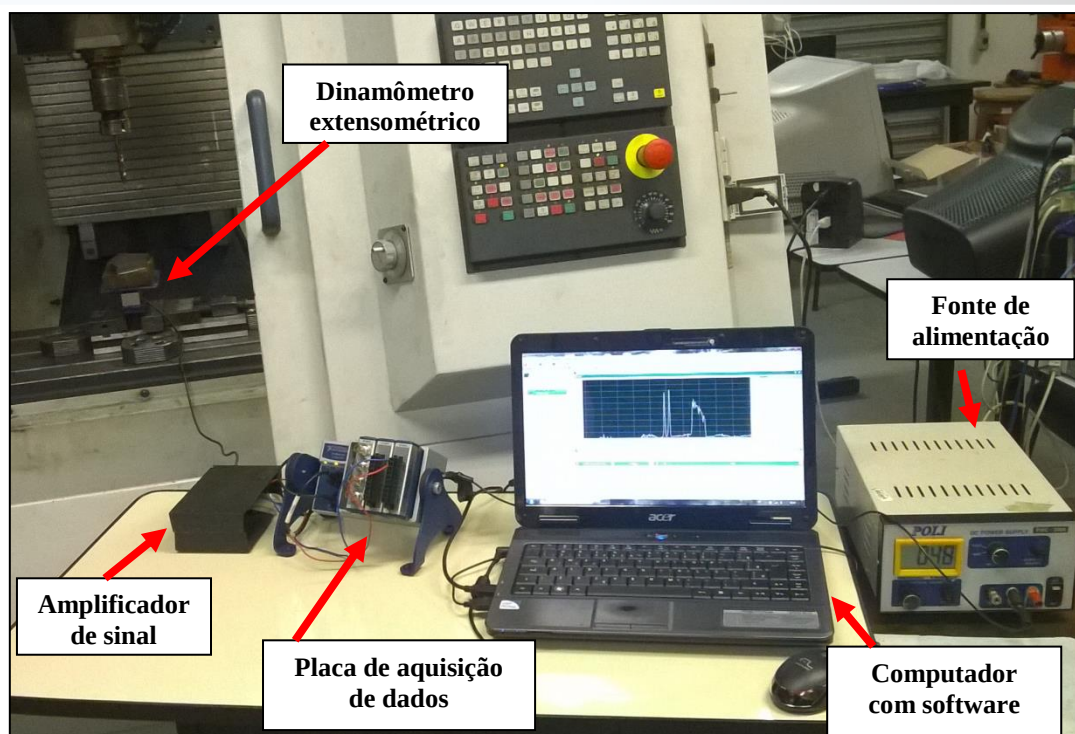


Figura 2 - Montagem do sistema de aquisição de dados

2.4 Planejamento experimental

No presente estudo foram considerados três parâmetros na furação do ferro fundido cinzento, sendo avanço, velocidade de corte e ferramenta. Os níveis de cada parâmetro estão na Tab. 3.

Símbolo	Parâmetros	Níveis		
		1	2	3
A	Ferramenta	Com revestimento de SiO_2 (3 camadas)	Sem revestimento e sem tratamento térmico	-
B	Velocidade de corte (m/min)	30	40	50
C	Avanço (mm/rev)	0,05	0,25	-

Tabela 3 - Condições experimentais utilizadas para a furação do ferro fundido cinzento

Cada teste foi realizado duas (2) vezes e foram obtidos os valores médios de força de avanço, rugosidade e circularidade para cada furo.

3. Resultados e Discussões

A tabela 4 resume os valores médios obtidos do teste e réplica para a força de avanço, circularidade e rugosidade, mensurada pelo parâmetro Ra.

Furo	Ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Força de Avanço (N)	Circularidade (mm)	R _a (µm)
1	1	1	1	605	0,077	3,37
2	1	1	2	1947	0,122	5,23
3	1	2	1	826	0,092	4,68
4	1	2	2	1758	0,116	4,30
5	1	3	1	627	0,110	4,21
6	1	3	2	4611	0,194	4,93
7	2	1	1	570	0,064	3,66
8	2	1	2	1368	0,107	5,55
9	2	2	1	589	0,105	4,18
10	2	2	2	1713	0,154	5,47
11	2	3	1	2279	0,151	3,47
12	2	3	2	*	*	*

Tabela 4 - Resultado das medições da força de avanço, circularidade e R_a

3.1 Força de Avanço

A figura 3 indica o comportamento da força de avanço com relação ao aumento da velocidade de corte e do avanço para a furação com as brocas revestidas de SiO₂ e sem revestimento.

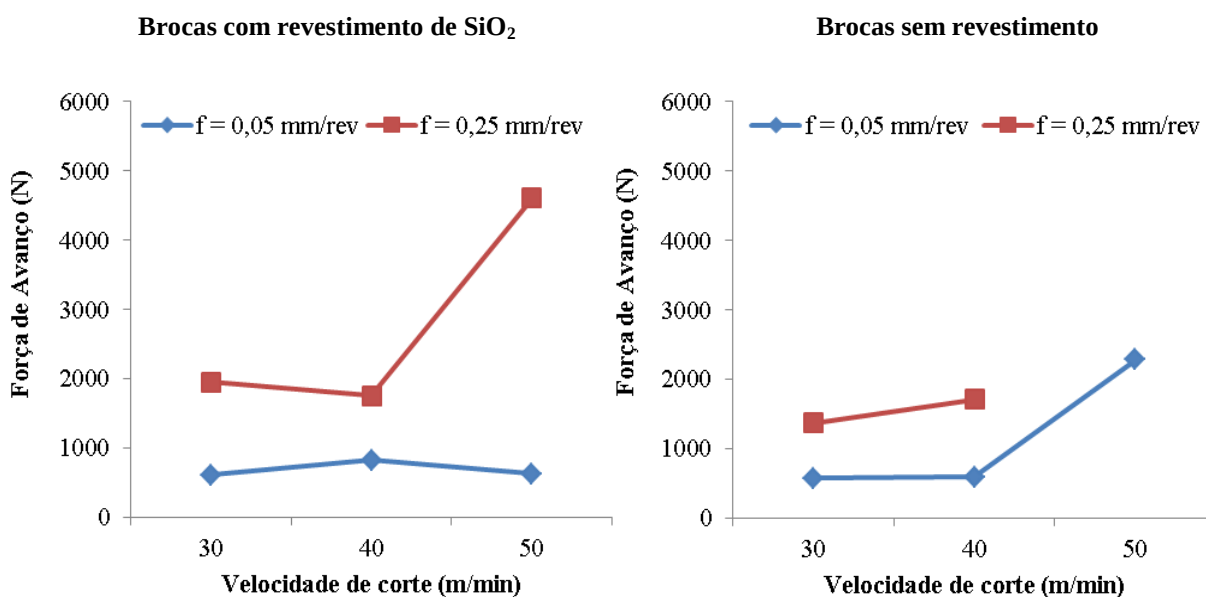


Figura 3 - Forças de avanço para a furação com (a) brocas com revestimento de SiO₂ e (b) brocas sem revestimento

Por meio da figura 3 tem-se que força de avanço aumentou com o aumento do avanço utilizado, o que corrobora com o fato de que com o aumento do avanço são necessários maiores esforços de corte, devido à retirada de maior quantidade de material. Não foi possível a realização do furo para velocidade de corte 50 m/min e avanço 0,25 mm/rev utilizando broca sem revestimento.

3.2 Circularidade

Na figura 4 tem-se a circularidade em função da velocidade de corte e avanço para a furação com as brocas revestidas de SiO₂ e sem revestimento.

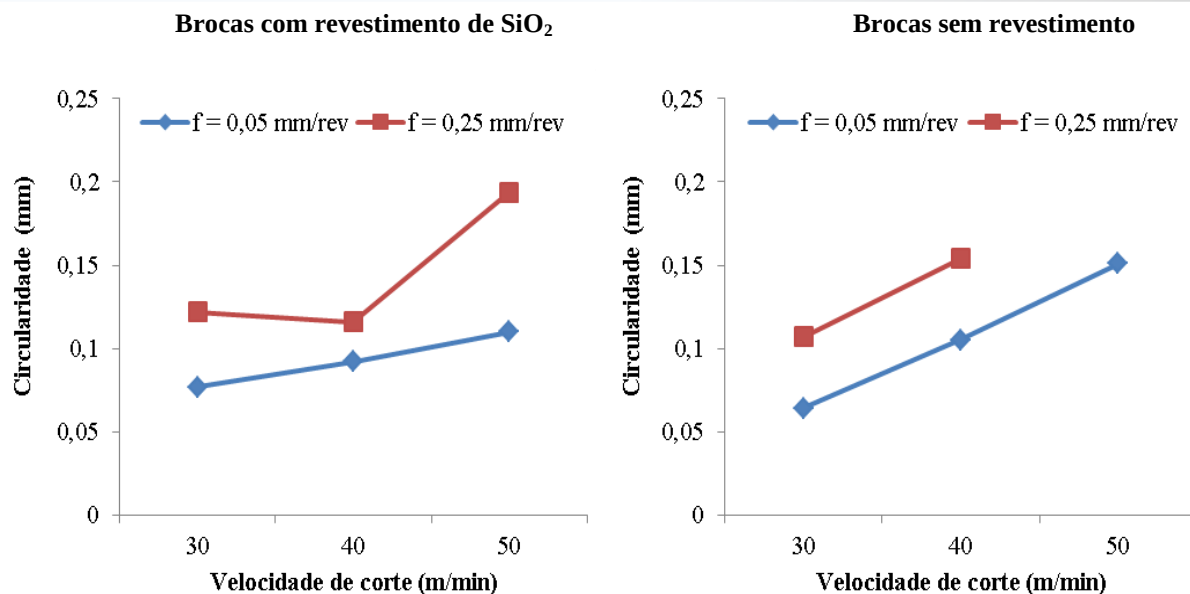


Figura 4 - Circularidade dos furos para a furação com (a) brocas com revestimento de SiO₂ e (b) brocas sem revestimento

Os furos decorrentes da furação com broca revestida apresentaram menor erro de circularidade para as velocidades de corte intermediária e superior, comparada à broca sem revestimento. Já para a furação com broca sem revestimento as menores circularidades foram oriundas da usinagem com a velocidade de corte de 30 m/min. De forma geral, as maiores velocidades de corte levaram à obtenção de maiores desvios de circularidade, provavelmente devido ao aumento de vibrações durante a furação do material. Com relação ao avanço, com o aumento deste foi observado um acréscimo para os erros de circularidade, o que pode ter ocorrido também devido ao aumento dos níveis de vibrações.

3.3 Rugosidade

A figura 5 resume o comportamento da rugosidade, por meio do R_a, para velocidades de corte e avanços especificados.

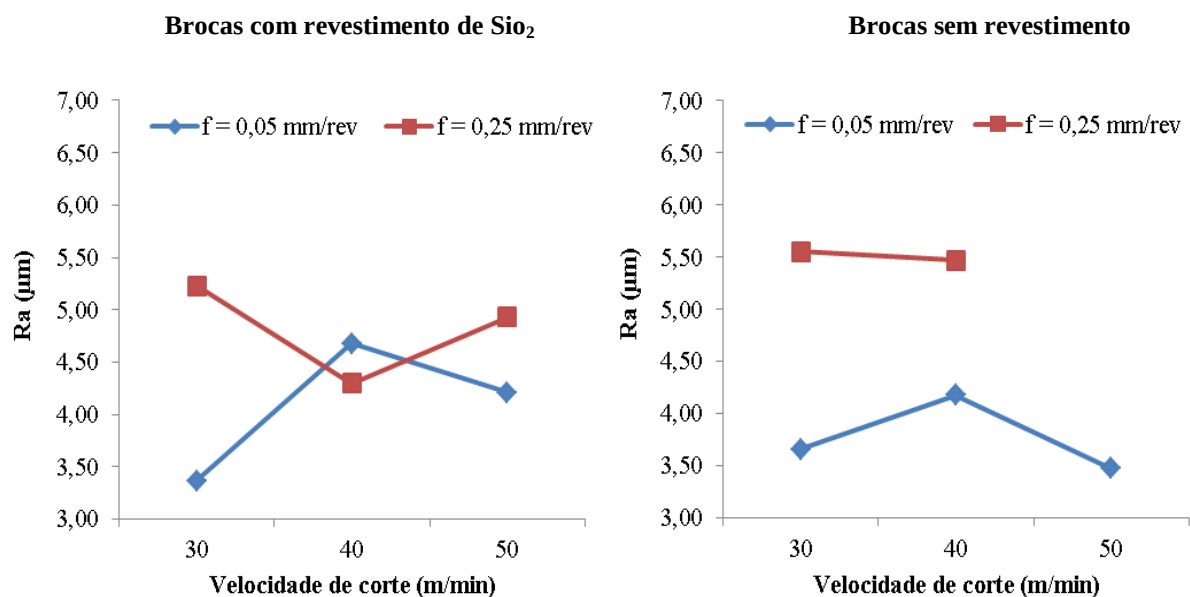


Figura 5 - Ra para a furação com (a) brocas com revestimento de SiO₂ e (b) brocas sem revestimento

Por meio da Fig. 5, observa-se que o R_a não segue uma tendência linear com relação ao aumento da velocidade de corte. Para o maior avanço os valores de R_a foram, em sua maioria, mais elevados, tanto para as brocas com e sem revestimento, devido ao aumento de vibrações durante o processo. O parâmetro mais influente na rugosidade é o avanço, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço (MACHADO *et al.*, 2011).

3.4 Desgaste das ferramentas

Durante a operação de furação foram observados os desgastes nas ferramentas revestidas e nas sem revestimento. Por meio da Fig. 6 pode-se observar a evolução do desgaste para a broca revestida e na Fig. 7 para a broca sem revestimento.



Ferramenta após deposição e tratamento a 400°C



Após 3 furos



Após 8 furos



Após 9 furos (falha)

Figura 6 - Evolução do desgaste para a broca com revestimento de SiO_2 em função do número de furos realizados



Ferramenta nova



Após 5 furos



Após 6 furos (falha)

Figura 7 - Evolução do desgaste para a broca sem revestimento em função do número de furos realizados

Em ambas situações (com revestimento e sem revestimento), nota-se a deposição de material, indicando que o acúmulo de material na ferramenta ocorre gradativamente, intensifica-se nos últimos furos antes da falha, mas acelera-se durante o furo onde ocorre a falha. Nota-se também a presença de oxidação para a broca sem revestimento em uma região extensa, inclusive ao redor da ponta de corte, indicando que as temperaturas atingidas foram elevadas. Houve acúmulo de ferro fundido oriundo da peça em toda a superfície principal de folga, partes da superfície secundária de folga e guia lateral, e parte da superfície de saída. Possivelmente o grande aumento de temperatura, devido à elevada velocidade de corte, induziu à falha ocorrida na broca após 6 furos. A broca com revestimento falhou após 9 furos.

Trent e Wright (2000) indicam que as ferramentas de HSS podem sofrer o mecanismo de deformação plástica da aresta sob compressão e desgaste abrasivo. Altas temperaturas acarretam queda de dureza (principalmente acima de 600°C) e a abrasão das zonas deformadas plasticamente conduzem a um desgaste acelerado da ferramenta (FERRARESI, 1970). Com isso, possivelmente, a região da ponta de corte das ferramentas de aço-rápido sofreu elevado desgaste abrasivo característico da usinagem do ferro fundido (MARQUES *et al.*, 2014), propiciando a perda da capacidade de corte. Ao fim, a região da ponta de corte a altas temperaturas é recoberta por camadas de material da peça.

Nas ferramentas revestidas por SiO₂, a deformação plástica da aresta de corte não parece tão severa. Portanto, nas ferramentas revestidas, possivelmente ocorreu a remoção do revestimento com posterior abrasão ou apenas abrasão na aresta principal de corte, e depois recobrimento de camadas de material da peça. A vida útil das ferramentas revestidas com 3 camadas de SiO₂ foi superior em relação à vida das ferramentas sem revestimento sob as condições utilizadas nos ensaios, sendo que também não houve presença de oxidação, devido à elevada estabilidade química e térmica do revestimento.

4. Conclusões

Após a realização dos testes de furação a seco em ferro fundido cinzento as seguintes conclusões podem ser descritas:

- Os valores das forças de avanço aumentaram de acordo com o aumento do avanço e com o aumento do desgaste das brocas;
- Para a maioria dos furos, os erros de circularidade foram maiores para a furação com velocidades de corte maiores. O aumento do avanço e o desgaste crítico da ferramenta também ocasionaram aumento nos desvios de circularidade;
- A rugosidade, mensurada por meio do parâmetro R_a, não seguiu uma tendência linear com relação à velocidade de corte. O avanço foi o parâmetro mais influente, sendo que com o aumento deste os valores de R_a foram consideravelmente maiores;
- A broca com revestimento de SiO₂ foi capaz de realizar uma maior quantidade de furos antes de atingir a falha (falha ocorrida no 9º furo), sendo que a broca sem revestimento falhou no 6º furo. A primeira ainda apresentou menor desgaste em relação à broca sem revestimento.

Referências

- AVELLANEDA, C. A. O. *Desenvolvimento de Janelas Eletrocromicas Preparadas pelo método Sol-Gel*, Tese de Doutorado - Instituto de Física de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- CASTILLO, W. J. G.: *Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos*, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 5.ed. São Paulo: Editora Blucher, 1970, 751p.
- GOUVEIA, W. J. S. *Estudo de revestimentos híbridos de sol-gel na proteção de ligas de alumínio para a construção civil*. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) - Departamento de Química e Bioquímica, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- GUNDUZ, B.; CAVAS, M.; YAKUPHANOGLU, F. *Quality Controlling of SiO₂ Thin Films by Sol Gel Method*, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- GUESSER, W. L. *Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular Através de Ensaios de Furação*, 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 11-15 de Abril, 2011, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.
- KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. T. *Manufacturing Engineering and Technology*. 6.ed. New Jersey: Editora Pearson, 2010. 1176p.
- MACHADO, Á. R. *et al. Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MARQUES, F. M.; ROCHA, A. S.; CAVALER, C. C.; CURI, E. I. M. *Caracterização de Desgaste de Brocas de HSS Revestidas com AlCrN e Não Revestidas, em Ensaios de Furação, na Usinagem de Ferro Fundido Nodular DIN GGG 50*, Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica, 2014, Vol 19, N.º 1, pp.87-104.

MELO, L. O. *Preparação e Caracterização de Filmes Finos de Sol-Gel de Nb₂O₅ Dopados com Li⁺ Visando Possível Aplicação em Arquitetura*, Dissertação de Mestrado – Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

NG, G.K.L.; LI, L. *The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling*, Optics & Laser Technology, 33; 393–402, 2001.

MANIGANDANA, K.; SRIVATSANB, T. S.; QUICKC, T. *Influence of silicon carbide particulates on tensile fracture behavior of an aluminum alloy*, Materials Science and Engineering A, 534 (2012) 711- 715.

REZENDE, B. A. *Estudo da furação de um material compósito tipo sanduíche*. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais.

TRENT, E. M., WRIGHT, P.K. *Metal cutting*. 4 ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

WHRIGHT, J. D.; SOMMERDIJK, N. A. J. M. *Sol-Gel Materials: Chemistry and Applications*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2001.