

UTILIZAÇÃO DE ÁGUA DEIONIZADA E CARBONETO DE SILÍCIO (SiC) NO PROCESSO HÍBRIDO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS E JATO DE ÁGUA ABRASIVO

Luciano José Arantes, luciano_j_arantes@embraco.com.br¹

Alberto Arnaldo Raslan, itm-raslan@ufu.br²

¹Engenheiro Doutor da Whirlpool S.A. - Unidade Embraco
Gestão de Tecnologia em Produtos e Processos
Grupo de Tecnologia em Usinagem
Fone: (47) 3441-2017

²Professor Doutor da Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica
Laboratório de Tribologia e Materiais
Fone: (34) 3239-4186

Resumo: O aparecimento de novos materiais, bem como altas exigências de velocidade, integridade superficial e apertadas tolerâncias tem demandado o desenvolvimento de novos processos de usinagem. Uma tendência mundial é o crescimento dos chamados processos híbridos de usinagem, que associam dois ou mais processos de usinagem em uma única operação. Tais processos oferecem vantagens adicionais aos processos de fabricação, uma vez que tendem a unir vantagens dos processos constituintes em um só processo. O principal objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade da água deionizada no processo híbrido associando a Usinagem por Descargas Elétricas com a Erosão por Jato de Água Abrasivo (SiC) quanto à Taxa de Remoção de Material (TRM). Os resultados apresentaram TRMs consideravelmente superiores com a utilização do jato de água abrasivo, quando comparados com as TRMs obtidas sem adição de SiC. A utilização da água deionizada como dielétrico é viável tecnicamente no processo híbrido proposto, uma vez que as TRMs tornaram-se compatíveis com as obtidas com hidrocarbonetos em EDM convencional. A água deionizada é reciclável, de baixo custo, não tóxica e sem problemas de manuseio e estocagem. Sua utilização representa um avanço na Usinagem por Descargas Elétricas, em especial na EDM por penetração, uma vez que muitas pesquisas apontam como inviável a utilização de água como dielétrico. Entretanto, o aumento da TRM está associado ao aumento do desgaste da ferramenta, principalmente quando pós abrasivos são adicionados ao fluido. As mesmas partículas abrasivas que associadas potencializam o mecanismo de erosão da superfície usinada, também arranca mais material da ferramenta.

Palavras-chave: Usinagem híbrida, EDM, Erosão, Fluidos dielétricos, TRM.

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico dos processos de usinagem pode ser alcançado pela combinação de diferentes ações físico-químicas ao material de trabalho. Em particular, a ação mecânica, que é utilizada nos processos convencionais pode ser combinada com interações aplicadas por um processo não-tradicional tal como a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM), Usinagem Eletroquímica (ECM) e Usinagem Laser (LBM). A grande razão para o desenvolvimento da Usinagem Híbrida (HMP) é fazer uso das vantagens, combinadas ou mútuas, e evitar ou reduzir os efeitos adversos que os processos constituintes apresentam quando são aplicados individualmente (Rajurkar et al, 1999; Pajak et al, 2004).

A tendência mundial, de desenvolvimento dos processos de usinagem híbrida tem sido investigada há mais de uma década. Como exemplo, processos híbridos que associam a usinagem eletroquímica com a retificação abrasiva (Ramos; Cruz, 2000), retificação associada à usinagem por descargas elétricas e o processo EDM com a adição de abrasivos, mas, com a utilização de fluidos dielétricos hidrocarbonetados e com jato de baixa pressão.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade do processo híbrido associando a Usinagem por Descargas Elétricas com a Erosão por Jato Abrasivo, com a particularidade de utilização de água deionizada como substituição dos fluidos hidrocarbonetados comuns em EDM, quanto à Taxa de Remoção de Material.

2. METODOLOGIA

Neste trabalho, foram usinadas barras de aço rápido ABNT M2, que geralmente é usinado pelo processo EDM. Os ensaios de usinagem por descargas elétricas foram realizados em uma máquina da marca Engemaq, modelo EDM 440 NC. Os valores dos parâmetros de usinagem foram selecionados do manual do equipamento e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do equipamento para realização dos ensaios.

Dados / Regime	
Tempo de Pulso (T_{ON})	300 [μ s]
Porcentagem de Pulso (DT)	90 [%]
Corrente	~5 [A]
Tensão	~15 [V]

Para a realização dos ensaios foi confeccionada uma ferramenta de cobre com seção transversal circular e vazada com diâmetro de 10mm e com uma espessura de parede de 1,5 mm.

Foi adaptado a um equipamento EDM por penetração uma bomba de alta pressão de 100 bar para injetar fluido dielétrico com alta pressão, aliando o efeito térmico das descargas com o efeito erosivo do jato com abrasivo (carboneto de silício). O esquema mostrado na Figura 1 apresenta as modificações necessárias para passar o sistema auxiliar de baixa pressão para alta pressão. As configurações da Bomba de Alta Pressão encontram-se na Tabela 2.

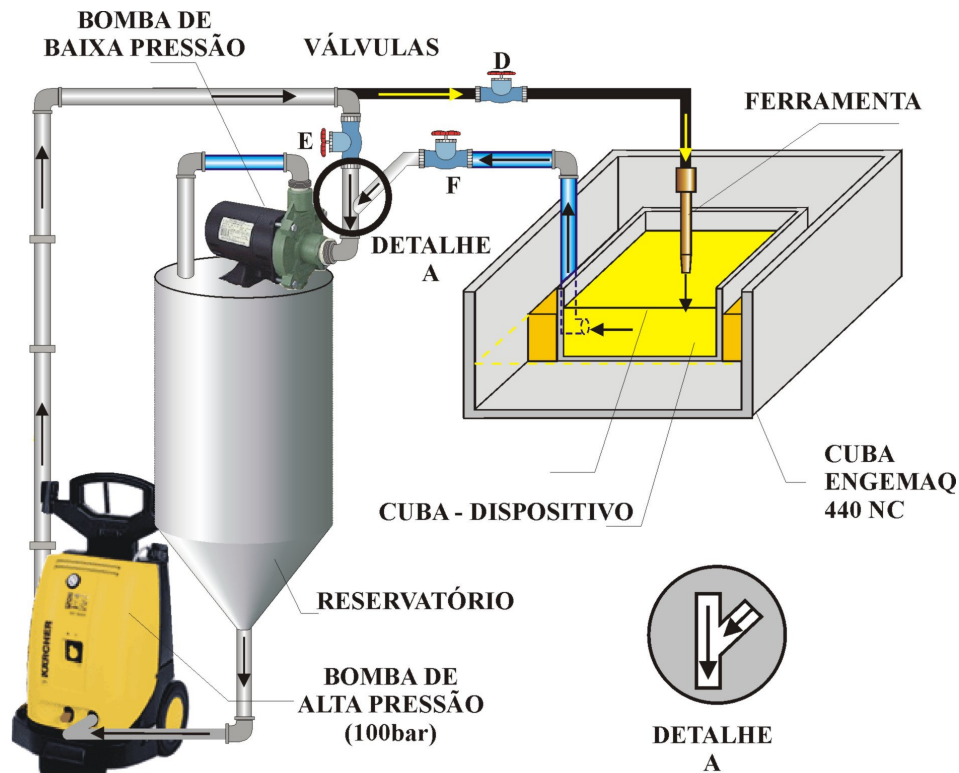


Figura 1. Esquema da montagem do protótipo experimental de Jato de Água Abrasivo na máquina EDM (alta pressão).

Tabela 2. Especificação da Bomba de Alta Pressão utilizada no sistema auxiliar.

Bomba de Alta Pressão	
Potência do Motor [Watts]	1100
Voltagem [Volts]	220
Pressão [bar]	100
Rotação do Motor [rpm]	3450
Vazão [litros/min]	42,9

A TRM é o volume de material removido da peça pelo tempo de usinagem, expressa em mm^3/min e calculada medindo-se o volume de material removido da peça [mm^3] e tomando o tempo de usinagem [min].

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1. Taxa de Remoção de Material

Os resultados de TRM são apresentados na Tabela 3 e foram separados em duas figuras, ensaios sem abrasivo (Figura 2) e ensaios com abrasivo (Figura 3). Observa-se na Figura 2, que com a melhoria do sistema de lavagem, passando de fluido estático, para fluido a baixa pressão e finalmente para fluido a alta pressão, os valores de TRM crescem consideravelmente. Com jato a alta pressão, a remoção das partículas erodidas é melhorada, o que aumenta a velocidade de usinagem. O aumento na pressão torna mais efetivo a ação da lavagem das micro-partículas fundidas e re-solidificadas.

Tabela 3. Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água Deionizada.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
TRM	Média	47,1	33,4	8,6	58,5	46,1	10,1	64,7	50,7	10,2
	D. Padrão	8,4	7,1	3,6	5,3	6,4	4,3	6,4	8,2	4,6
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
TRM	Média	44,2	31,0	12,3	68,5	55,9	19,4	119,6	138,1	82,7
	D. Padrão	12,8	12,0	4,1	25,9	19,7	4,9	23,4	30,5	8,5

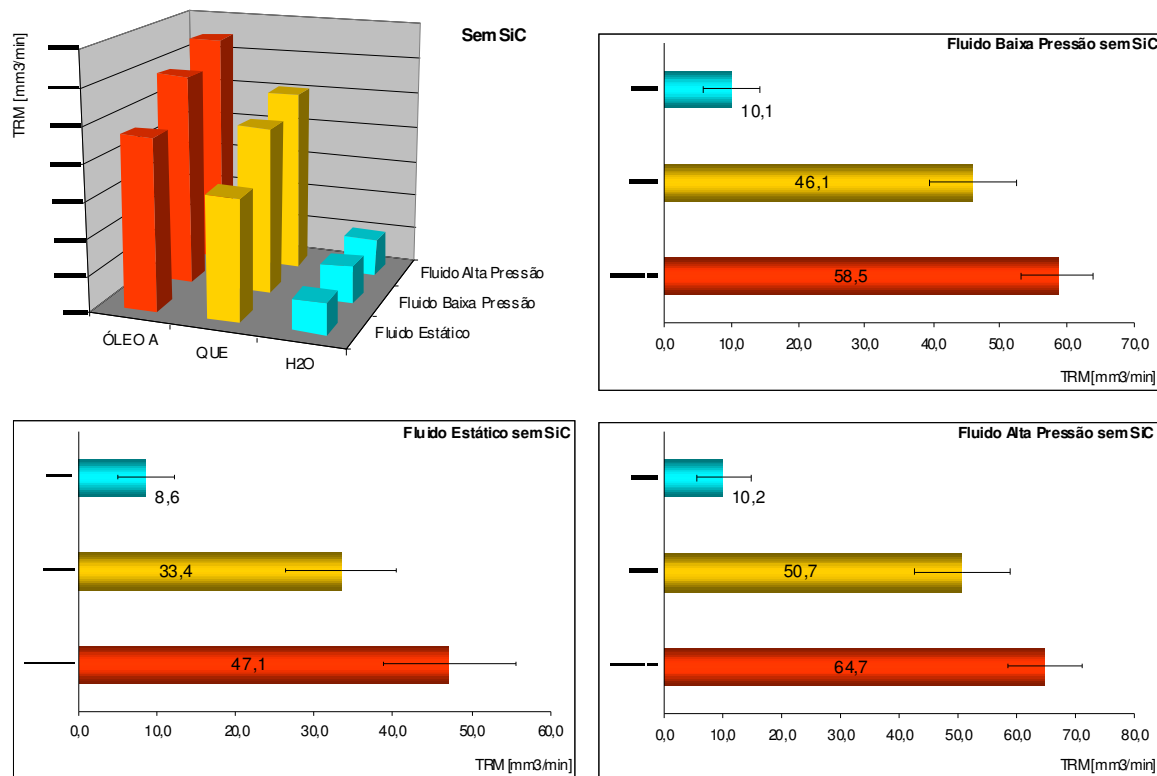


Figura 2. Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água Deionizada.

Os resultados para TRM dos ensaios com adição de abrasivo (SiC) são apresentados na Figura 3. Observa-se que os valores de TRM aumentaram com a adição do abrasivo, quando comparados os resultados nas mesmas condições, porém, sem adição de SiC. Fica evidente que, comparando os resultados de TRM sem a adição e com adição de SiC, houve ação erosiva das partículas abrasivas. A água deionizada demonstrou maior ganho percentual de desempenho, quando comparado com as TRMs dos demais fluidos. Porém, a velocidade de usinagem com água ainda é inferior àquela obtida com fluidos hidrocarbonetados.

Comparando os resultados de fluido estático, observou-se que a simples adição de abrasivo melhora os valores de TRM. Esse efeito é devido o aumento da densidade do fluido dielétrico, o que ocasiona aumento da resistência do meio ao arco de plasma, mantendo assim, as descargas menos dispersas e aumentando a potência efetivamente desprendida sobre a peça usinada (ZHAO et al, 2002). Independente do fluido utilizado, observou-se nos três casos melhoria na

TRM. Porém, o fluido dielétrico ainda exerce influencia na velocidade de usinagem, ou seja, a adição de abrasivo melhora o processo, mas não torna os fluidos equiparados.

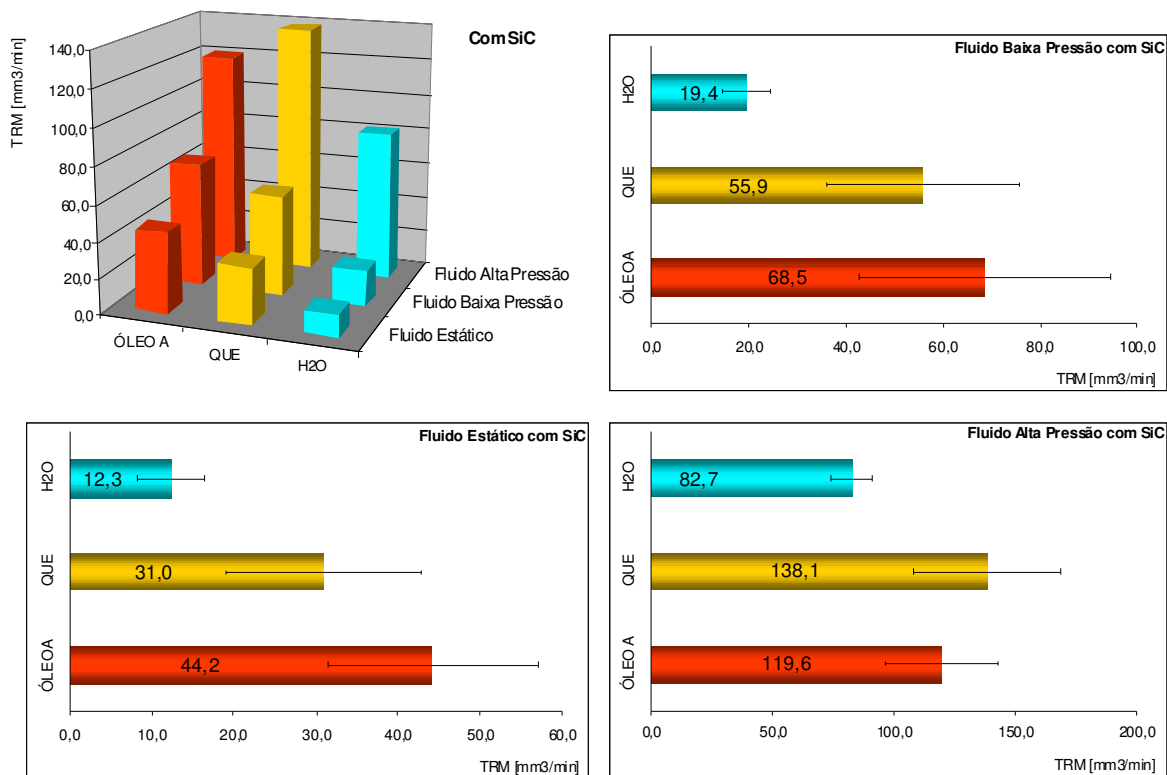


Figura 3. Taxa de Remoção de Material para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com fluido estático, jato de baixa e alta pressão.

A água e o querosene possuem maior fluidez, ou seja, têm menor viscosidade, o que é positivo na lavagem, pois possuem melhor capacidade de penetração em pequenas frestas. Por outro lado, sua menor densidade gera menor pressão no arco de plasma, diminuindo a capacidade térmica das descargas, o que leva à menores TRMs.

Em muitos processos híbridos, em adição à contribuição dos processos componentes, uma nova formulação pode ocorrer levando-se em consideração um termo de interação dos processos, EDM e AWJM – Usinagem por Jato de Água Abrasivo. A formulação para TRM_{Total} é a seguinte:

$$TRM_{Total} = TRM_{EDM} + TRM_{AWJM} + TRM_{(EDM \rightarrow AWJM)} \quad (1)$$

A equação (1) ilustra o efeito sinérgico na TRM nos processos híbridos. Para a aplicação dessa equação, faz-se necessário a determinação, experimentalmente, dos valores de $TRM_{(EDM \rightarrow AWJM)}$, que é a TRM do processo EDM auxiliado por AWJM. Faz-se então, o cálculo para a água deionizada:

$$\begin{aligned} TRM_{Total} &= 80 \text{ mm}^3/\text{min}; \\ TRM_{(EDM)} &= 11 \text{ mm}^3/\text{min}; \\ TRM_{(AWJM)} &= 0; \\ \text{Portanto, o valor de } TRM_{(EDM \rightarrow AWJM)} &= 69 \text{ mm}^3/\text{min}. \end{aligned}$$

Esse é o valor da TRM do processo EDM com o auxílio do processo AWJM. TRM_{Total} é a Taxa de Remoção de Material do processo híbrido AEJDM. A $TRM_{(AWJM)}$ é praticamente zero porque a pressão de 100bar é insuficiente para erosão sem as descargas elétricas. Portanto, o processo híbrido provou ser muito mais eficaz que os processos EDM e AEDM em separado, com um rendimento 420% superior ao apresentado por esses processos.

As Figuras 4 a 6 apresentam os resultados de posição instantânea da ponta da ferramenta, no eixo Z, para a água deionizada, cujo desempenho de TRM foi o que sofreu maior influência com o jato abrasivo com adição de carboneto de silício (SiC). Essas figuras corroboram os resultados de TRM, em que o desempenho entre fluido estático e jato a baixa pressão não foi tão significativo. Porém, fica evidenciado a ação do processo AEDM (Usinagem por Descargas Elétricas com Adição de Abrasivo), em que as partículas abrasivas, ao modificarem a densidade do fluido dielétrico, aumentam a pressão no arco de plasma, melhorando a dispersão das descargas e aumentando a velocidade de usinagem.

A Figura 6 permite visualização instantânea da sensível melhoria quando os processos constituintes (EDM e AWJM) somam-se e potencializam o processo híbrido.

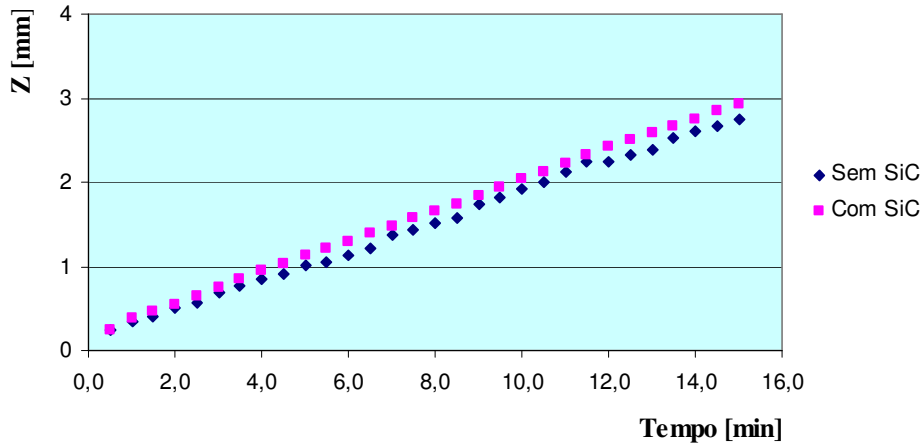


Figura 4. Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com fluido estático, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.

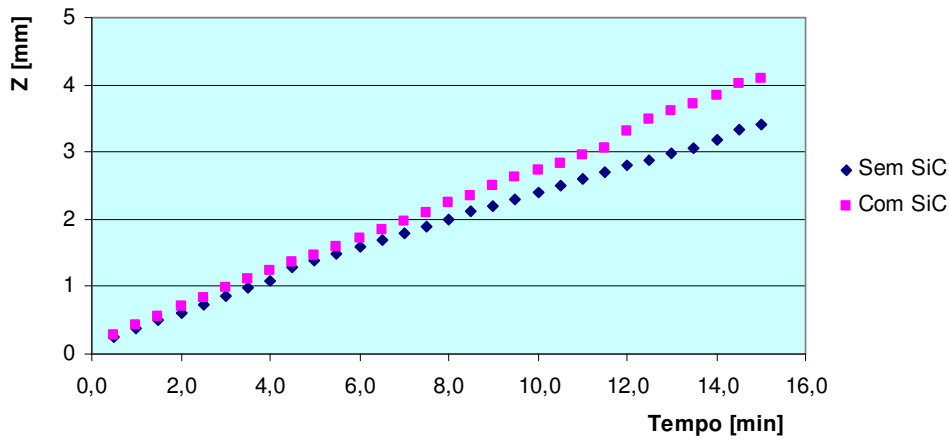


Figura 5. Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com jato a baixa pressão, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.

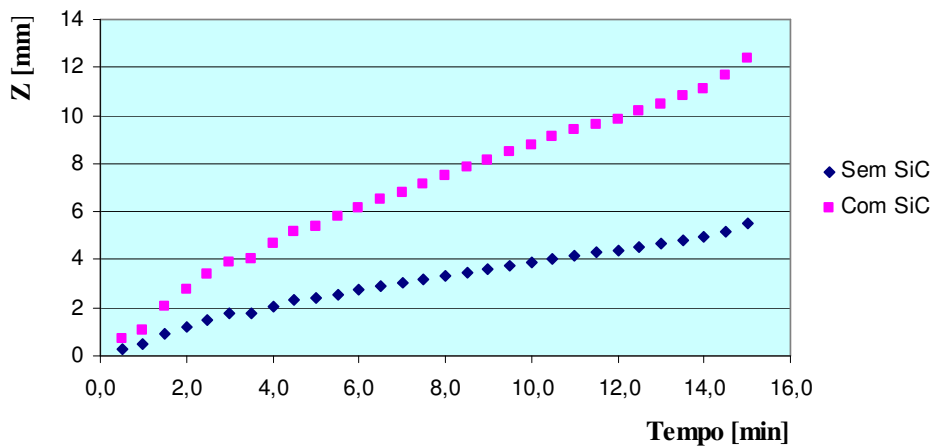


Figura 6. Variação instantânea de Z para Água Deionizada, com jato a alta pressão, com e sem abrasivo (SiC), à concentração de 30 g/l.

3.2. Desgaste Volumétrico Relativo (DVR)

Os resultados de DVR encontram-se na Tabela 4 e nas Figuras 7 (sem abrasivo) e 8 (com abrasivo). A Figura 7 apresenta os resultados para Desgaste Volumétrico Relativo nas condições de Fluido Estático, Jatos de Baixa e Alta Pressão, sem adição de SiC. O Óleo A apresentou o melhor desempenho em relação aos demais fluidos, em especial em relação à Água deionizada. Porém, na condição de Jato a Alta Pressão, as diferenças de DVR não foram tão significativas, quando comparados com os resultados com Fluido Estático, em que os valores de DVR para o Óleo A e o Querosene foram muito menores. Isso significa que quanto maior a pressão do jato de dielétrico, maior o desgaste da ferramenta, mesmo em condições sem presença de abrasivo, como é o caso. Entretanto, observou-se que não houve considerável diferença de DVR quando a pressão passa de baixa para alta. Em todos os casos em que foi utilizada Água Deionizada, não houve considerável diferença de DVR entre as diferentes condições de aplicação do fluido.

Tabela 4. Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem e com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Sem SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
RD	Média	0,0893	0,0926	0,1563	0,1042	0,1087	0,1695	0,0154	0,0161	0,1163
	D. Padrão	0,0310	0,0620	0,0530	0,0200	0,0240	0,0650	0,0020	0,0021	0,0487
Com SiC		Fluido Estático			Fluido Baixa Pressão			Fluido Alta Pressão		
		ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O	ÓLEO A	QUE	H2O
RD	Média	0,0990	0,0641	0,1538	0,0870	0,0431	0,1724	0,0175	0,0146	0,1282
	D. Padrão	0,0326	0,0247	0,0449	0,0198	0,0193	0,0445	0,0022	0,0035	0,0360

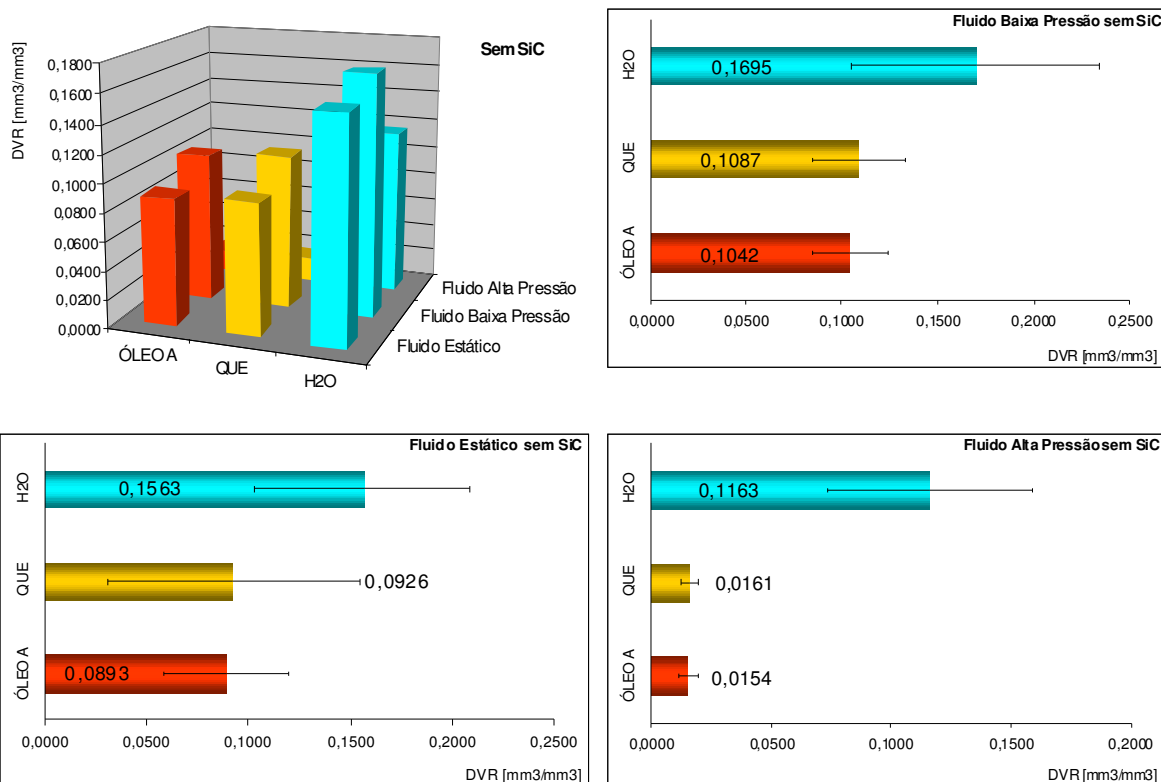


Figura 7. Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, com fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

Os resultados para a DVR com adição de abrasivo apresentam-se na Figura 8. Nota-se que não houve considerável diferença dos resultados comparando-os com os obtidos sem adição de SiC. A configuração do gráfico para fluido com abrasivo é parecida com a sem abrasivo. Portanto, a adição de abrasivo aumenta o desgaste da ferramenta, mas esse desgaste é compensado pelo aumento da TRM. Esse pode ser um problema quando se é necessária extrema acuracidade na peça usinada, pois um desgaste maior pode gerar problemas dimensionais.

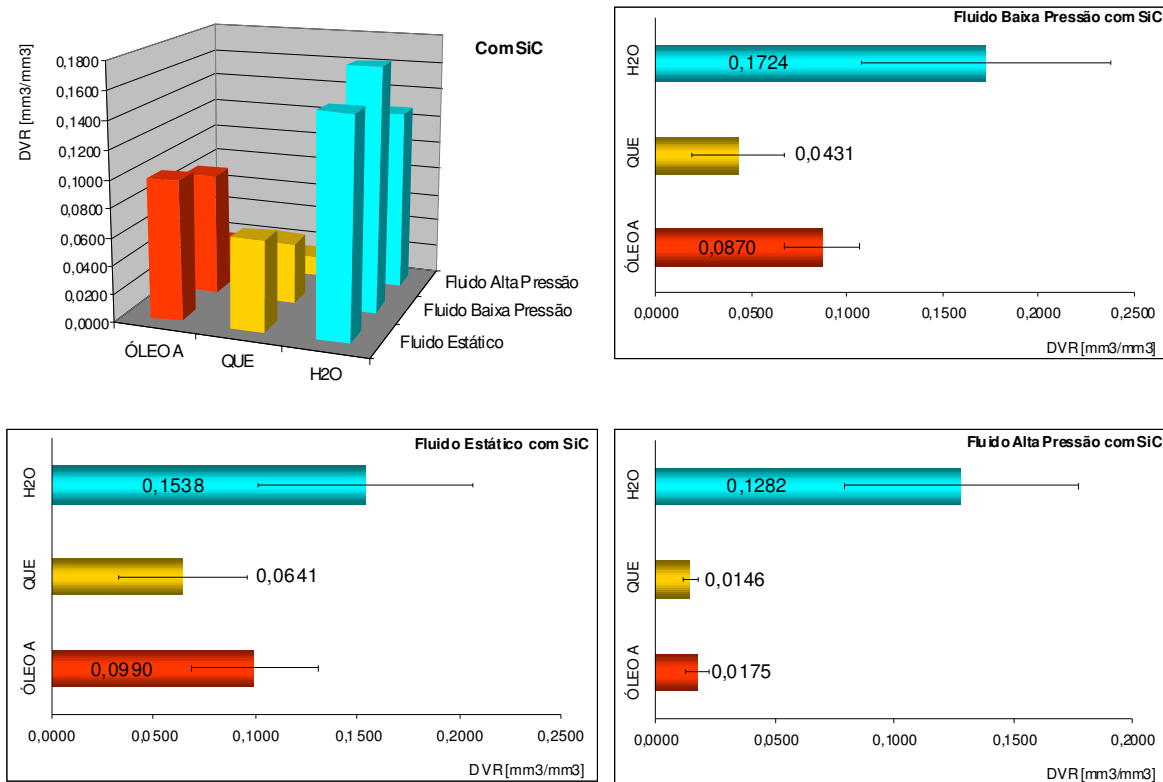


Figura 8. Desgaste Volumétrico Relativo para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido estático, jato a baixa pressão e jato a alta pressão.

A Figura 9 apresenta fotografia das ferramentas utilizadas nos ensaios EDM (duas fotos diferentes das mesmas ferramentas), com água deionizada, com adição de abrasivo, com fluido estático (ferramenta com menor desgaste) e jato a alta pressão (ferramenta com maior desgaste). Observa-se a sensível diferença do desgaste das duas ferramentas. Esse desgaste acaba por ser compensado, quando observada a RD, pois as TRMs foram suficientemente elevadas com a melhoria do sistema de lavagem e pela ação híbrida EDM + AWJM e pela erosão mecânica causada pelo impacto das partículas de SiC.



Figura 9. Desgaste das ferramentas nos ensaios com água deionizada e com adição de abrasivo: (a) vista 1 e (b) vista 2.

4. CONCLUSÕES

◆ O sistema de lavagem tem fundamental importância no desempenho da usinagem EDM. Quanto maior a pressão do fluido dielétrico, maior a TRM. Isso porque as partículas fundidas são evacuadas da interface ferramenta-peça com mais eficiência.

◆ A simples adição de abrasivo (SiC) melhora consideravelmente a TRM. Esses resultados corroboram a teoria de que a presença do abrasivo melhora a dispersão das descargas e modifica a densidade do fluido dielétrico,

potencializando a energia térmica empregada na peça ao redistribuir melhor a energia entre a ferramenta, o plasma e a peça.

◆ Os resultados com jato a alta pressão mostraram que o processo híbrido, associando a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) e Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM) é viável, por apresentar TRMs até 8 vezes maior que o processo EDM sem sistema de lavagem. Concomitantemente ao processo EDM, a erosão abrasiva se faz presente e melhora o processo.

◆ A utilização da água deionizada como dielétrico é viável tecnicamente no processo híbrido proposto, uma vez que as velocidades de usinagem (TRM) tornaram-se compatíveis com as obtidas com hidrocarbonetos e EDM convencional, com a vantagem de menor custo, maior segurança ao operador e de ser ecologicamente viável. Entretanto, quando se deseja TRMs ainda maiores, o melhor fluido é o hidrocarboneto específico para eletroerosão, uma vez que suas propriedades físico-químicas demonstraram maior eficiência no processo AJEDM, corroborando o trabalho de Arantes, 2001.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arantes, L. J., Raslan, A. A. Case Study for Conventional and Vegetal Dielectric Fluids Influence on EDM Processes, In: 38th CIRP'05 - International Seminar on Manufacturing Systems, 2005, Florianópolis.
- Chen, S. L.; Yan, B. H.; Huang, F. Y. Influence of Kerosene and Distilled Water as Dielectric on the Electric Discharge Machining Characteristics of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 107-111, 1999.
- Kozak, Jerzy; Rajurkar, Kamlakar P. Hybrid Machining Process Evaluation and Development. University of Nebraska, Lincoln, U.S.A, 2001.
- Masuzawa, T.; Tanaka, K.; Nakamura, Y. Water-based dielectric Solution for EDM. *Ann. CIRP* 32, p. 119-122, 1983.
- Ming, Y. Q., He, L. Y. Powder-suspension Dielectric Fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 52, p. 44-54, 1995.
- Rajurkar, K. P.; Zhu, D.; McGeough, J. A.; Kozak, J.; De Silva, A. New Developments in electro-Chemical Machining. *Annals of the CIRP*, vol. 48/2, p. 569-579, 1999.
- Ramachandran, N.; Ramakrishnan, N. A Review of Abrasive Jet Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 21-31, 1993.
- Ramos, C. A. D.; Cruz, C. Estudo do Desempenho do Processo de Retificação Eletroquímica na Usinagem do Aço Rápido ABNT M2, Uberlândia, UFU, IV POSMEC (Anais), p. 207-212, 2000.
- Ramulu, M. Dynamic Photoelastic Investigation on the Mechanics of Waterjet and Abrasive Waterjet Machining. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 19, 43-65, 1993.
- Rodrigues, J. R. P. Efeito da Adição de Carboneto de Silício em Pó na Geração de Microtrincas e na Topografia da Superfície Usinada por Descargas Elétricas do Aço-rápido ABNT M2, 1999. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- Summers, A. David. *Waterjetting Technology*. Chapman and Hall, 1995, 882 p.
- Yan, B. H.; Tsai, H. C.; Huang, F. Y. The Effect in EDM of a Dielectric of a Urea Solution in Water on Modifying the Surface of Titanium. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application*, p. 194-200, 2005.
- Yeo, S. H.; Tan, H. C. Assessment of Waste Streams in Electric-discharge Machining for Environmental Impact Analysis. *Proc. Inst. Mech. Eng. B: J. Eng. Manuf.* 212, p. 393-401, 1998.
- Yih-Fong, T.; Fu-Ghen, C. Investigation into some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-suspension Dielectric Oil. *Journal of Materials Processing Technology* 170, p. 385-391, 2005.
- Zhao, W. S., Meng, Q. G., Wang, Z. L. The Application, of Research on Powder Mixed EDM in Rough Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 129, p. 30-33, 2002.
- Yih-Fong, T.; Fu-Ghen, C. Investigation into some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-suspension Dielectric Oil. *Journal of Materials Processing Technology* 170, p. 385-391, 2005.

DEIONIZED WATER AND SILICON CARBIDE USED ON THE HYBRID ABRASIVE JET ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (AJEDM)

Luciano José Arantes, luciano_j_arantes@embraco.com.br¹

Alberto Arnaldo Raslan, itm-raslan@ufu.br²

¹Doctor Engineer of Whirlpool S.A. - Embraco
Product and Process Technology Management
Machining Technology Group

²Professor of the Federal University of Uberlândia
Faculty of Mechanical Engineering
Laboratory of Tribology and Materials

Abstract: The emergence of new materials, as well the requirement of machining velocity, high surface finishing and tight tolerances have demanding the rapidly development of new processes. A new technology in non-traditional machining that has been developed is the association of two or more machining process in only one. This worldwide tendency has been observed for more than a decade. For example, the Abrasive Electrical Discharge Grinding (AEDG), which associates the EDM process to grinding, showed good results to Metal Removal Rate (5 times higher), compared to the die-sinking EDM. This paper has as objective evaluate the hybrid machining process which associates EDM to Abrasive Water Jet Machining, called Abrasive Jet Electrical Discharge Machining (AJEDM), especially the use of deionized water as dielectric fluid as a replace alternative to the hydrocarbon fluids generally used as dielectric mixed with abrasive powders of silicon carbide. These fluids are, in general, based on aromatic hydrocarbons derived from petrol, highly toxic and dangerous to the health of operators as well as to the environment. The results showed higher MRRs with the association of the EDM to the AWJM. The surface generated by the hybrid process showed lower roughness compared to the other machining conditions. The use of deionized water as dielectric fluids showed good technical performance for the hybrid machining AJEDM, since the MRR was similar to that one obtained with hydrocarbon fluid on the die-sinking EDM. However, the increase of the MRR is related to the increase of the tool wear, specially with the use of abrasive powders. The same particles that reinforce the erosion mechanism also remove more material from the electrode.

Keywords: Hybrid machining, EDM, Erosion, Dielectric fluids, MRR.