

# MODIFICAÇÕES SUPERFICIAIS DO AÇO ABNT M2 USINADO PELO PROCESSO HÍBRIDO DE ELETROEROSÃO E JATO EROSIVO (AJEDM)<sup>1</sup>

*Luciano José Arantes<sup>2</sup>  
Alberto Arnaldo Raslan<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Atualmente, os processos híbridos de usinagem são importantes alternativas aos processos tradicionais de fabricação pois, muitas vezes, aumentam a velocidade de usinagem e melhoram a qualidade superficial das peças usinadas. O principal objetivo deste trabalho é o de avaliar as modificações superficiais do aço ABNT M2 usinado pelo processo híbrido associando a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) com a Erosão por Jato de Água Abrasivo (AWJM), particularmente quanto à utilização de água deionizada como substituição dos fluidos hidrocarbonetados. Uma máquina EDM foi especialmente adaptada para viabilizar a aplicação, sob alta pressão, de uma mistura contendo fluido dielétrico com abrasivo SiC em dispersão. Os resultados obtidos corroboram a tese de que o sistema de lavagem tem fundamental importância no desempenho da usinagem EDM, com ganhos significativos na velocidade de usinagem e na qualidade das superfícies usinadas. Na condição de fluido a alta pressão e SiC em dispersão, houve considerável deposição de Si na superfície usinada. Estes resultados mostram que houve participação efetiva das partículas abrasivas no processo de remoção de material.

**Palavras-chave:** EDM; Usinagem híbrida; Morfologia; Carboneto de Silício.

## **SUPERFICIAL MODIFICATIONS OF ABNT M2 STEEL MACHINED BY EDM AND EROSIVE JET HYBRID MACHINING PROCESS (AJEDM)**

### **Abstract**

Nowadays, hybrid machining processes are relevant alternatives to the conventional ones because they can increase the material removal rate and improve the surface quality. The main objective of this work is evaluate the superficial modifications of the ABNT M2 high speed steel machined by the association of Electrical Discharge Machining (EDM) and Erosive Jet Machining, specially with the use of deionized water as a real substitute to ordinary hydrocarbon fluids. An EDM machine was specially prepared to use high-pressured dielectric fluid mixtured with SiC. The results corroborate the theory that wash system has high importance on the EDM performance with significant improvement in machining velocity and surface roughness. Was detected significant deposition of SiC on the surface of the work piece, which proves that the SiC has effective participation on the material removal process.

**Key words:** EDM; Hybrid machining; Morphology; Silicon Carbide.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Doutor – Whirlpool - Embraco S.A. - Joinville - SC*

<sup>3</sup> *Professor Doutor – Universidade Federal de Uberlândia - MG*

# 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico dos processos de usinagem tem sido alcançado pelo desenvolvimento e aplicação industrial da Usinagem Híbrida (HMP), que combina de diferentes ações físico-químicas ao material de trabalho, em particular a ação mecânica, que é utilizada nos processos convencionais e pode ser associada a um ou mais processos não-tradicionais tais como a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM), Usinagem Eletroquímica (ECM) e Usinagem a Laser (LBM). A grande razão para o desenvolvimento da Usinagem Híbrida é fazer uso das vantagens combinadas e evitar ou reduzir os efeitos adversos que os processos constituintes apresentam individualmente.<sup>(1-2)</sup>

Os Processos Híbridos de Usinagem trouxeram grandes melhorias à usinagem. Como resultados dessas associações, foram obtidas maiores velocidades de usinagem, melhoria na precisão das peças usinadas, diminuição de sobre-corte, melhoria significativa no acabamento superficial, e em alguns casos, diminuição da ZAC (Zona Afetada pelo Calor), além de menores comprimentos e concentração de trincas e menores espessuras de camadas refundidas, em especial nas superfícies usinadas por EDM.<sup>(3)</sup>

O principal objetivo deste trabalho é avaliar as modificações superficiais sofridas pelo aço rápido ABNT M2 usinado por um processo híbrido associando a Usinagem por Descargas Elétricas com a Erosão por Jato de Água com Abrasivo (AJEDM), com a particularidade da utilização de água deionizada como substituição aos fluidos hidrocarbonetados em EDM. Estes são extremamente tóxicos e nocivos ao operador e ao meio ambiente e sua substituição por fluidos ecológicos representa um avanço importante na indústria metal-mecânica.

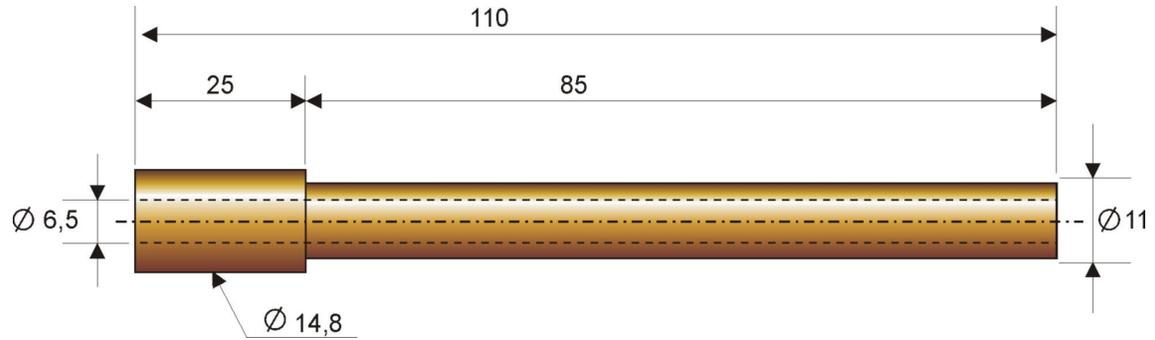
## 2 METODOLOGIA

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 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

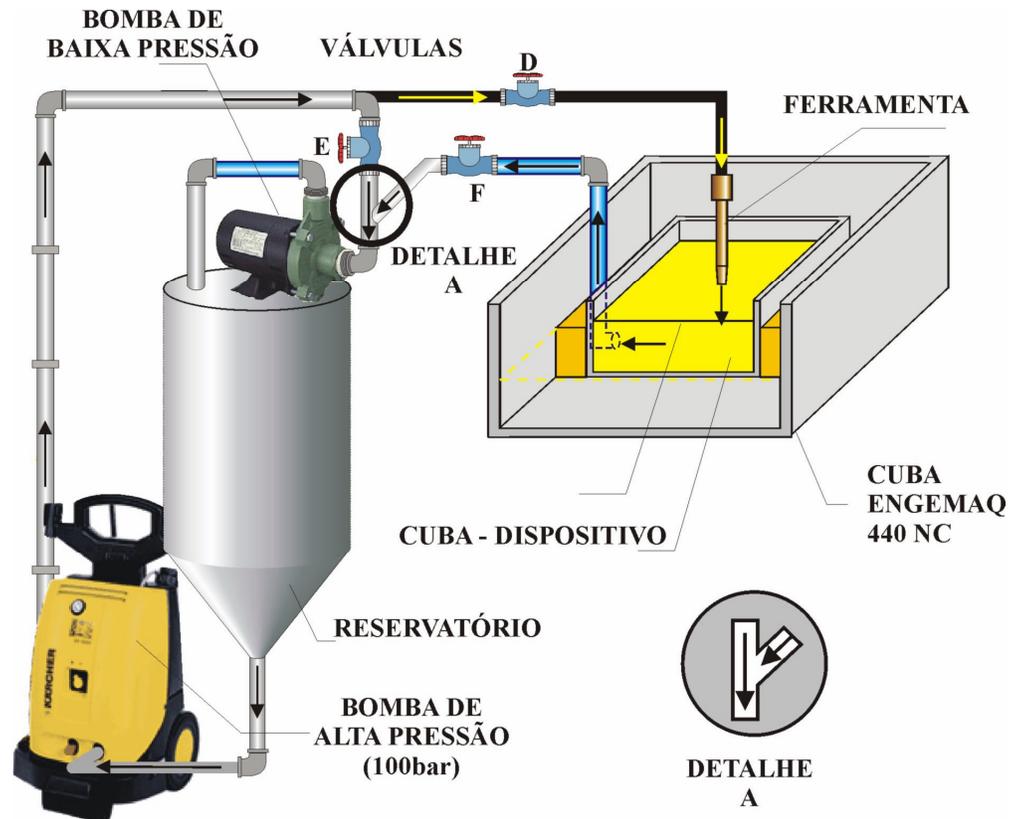
Dados / Regime	
Tempo de Pulso ( $T_{ON}$ )	300 [ $\mu$ s]
Porcentagem de Pulso (DT)	90 [%]
Corrente	5 [A]
Tensão	15 [V]

A geometria da ferramenta é tubular e impõe um sistema de lavagem interno à ferramenta (Figura 1). Principalmente em operações de furação, uma desvantagem do sistema de lavagem por injeção em relação ao de sucção interno à ferramenta, conforme comenta McGeough,<sup>(4)</sup> é a conicidade gerada pelas descargas laterais entre ferramenta e peça criada pelo arraste de partículas erodidas que emergem do fundo do furo para a superfície e depende também da área frontal do eletrodo, da pressão de injeção e do grau de contaminação do fluido dielétrico.<sup>(5)</sup>



**Figura 1.** Geometria da ferramenta de cobre utilizada nos ensaios.

Foi adaptado a um equipamento EDM por penetração uma bomba de 100 bar para injetar fluido dielétrico a alta pressão, aliando o efeito térmico das descargas com o efeito erosivo do jato com abrasivo (carboneto de silício). O esquema mostrado na Figura 2 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 2.** 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

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

Os fluidos dielétricos utilizados foram: Querosene Desodorizado, Óleo tipo Premium específico para eletroerosão (por questões comerciais, designado neste trabalho como ÓLEO A) e Água Deionizada, obtida por aparelho deionizador da marca Quimis. Para efeito comparativo, foram realizados ensaios com jato de alta pressão com fluido sem abrasivo e fluido com abrasivo.

Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo DSM 960, para visualização da morfologia e análise EDS das superfícies usinadas. Um interferômetro laser UB3D foi utilizado para cálculo das rugosidades  $S_a$  e plotagem das topografias 3D.

### 3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Análise EDS

Foi realizada análise EDS comparativa das superfícies usinadas. A Tabela 3 apresenta os resultados. Para condição de fluido a alta pressão e sem adição de SiC, não foi observado deposição de Si ou SiC. Já na condição de fluido a alta pressão e SiC em dispersão, houve considerável deposição de Si na superfície usinada. O Querosene apresentou menor deposição (1,25%). Estes resultados mostram que, na situação em que foi utilizado o SiC, houve participação efetiva das partículas abrasivas no processo de remoção de material. Não foi possível detectar a deposição de C devido ao seu baixo número atômico.

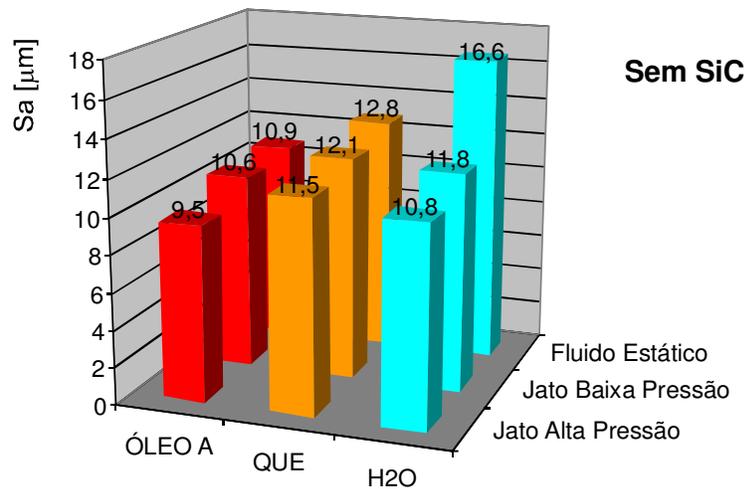
**Tabela 3.** Análise EDS das superfícies usinadas com Fluido a Alta Pressão, com e sem SiC, quanto à deposição de Si (%)

Si (%)	OLEO A	QUE	H <sub>2</sub> O
Sem SiC	-	-	-
Com SiC	1,36	1,25	1,69

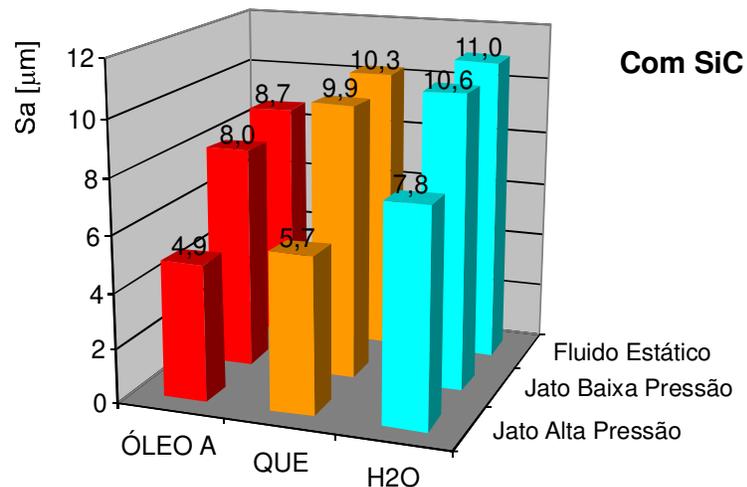
#### 3.2 Rugosidade

A Figura 3 apresenta o resultado de rugosidade  $S_a$  para as amostras usinadas com os diversos fluidos e sem adição de carboneto de silício (SiC). Observa-se que o Óleo A apresentou melhor resultado em todas as condições, quando comparados com os resultados apresentados pelos demais fluidos, Querosene e Água Deionizada, sendo que esse último apresentou o pior desempenho em especial quando utilizado fluido estático. Conclui-se então que o aumento na pressão do sistema de lavagem da interface ferramenta-peça diminuiu a diferença de rugosidade das superfícies usinadas. Isso se deve ao fato de que o sistema de lavagem contribui não somente para elevação das TRMs mas também para melhoria do acabamento superficial da peça.<sup>(6)</sup>

Os resultados para rugosidade  $S_a$  das amostras usinadas com SiC encontram-se na Figura 4. Observa-se que houve, na condição em que a ação erosiva do abrasivo contribui para a remoção de material, sensível melhora no acabamento superficial das amostras usinadas. Por exemplo, sem adição da SiC e com Jato a Alta Pressão, o valor de  $S_a$  com o Óleo A foi de  $9,5 \mu\text{m}$ , enquanto que com o abrasivo, esse valor caiu para  $4,91 \mu\text{m}$ . Essa sensível diferença corrobora a expectativa de que o processo híbrido AJEDM não é apenas mais rápido, mas também gerando superfícies de melhor qualidade.<sup>(7)</sup>



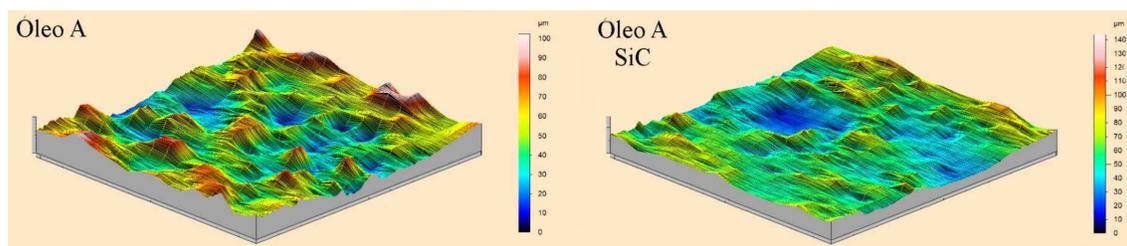
**Figura 3.** Rugosidade  $S_a$  para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, sem abrasivo, fluido a baixa pressão e jato a alta pressão.



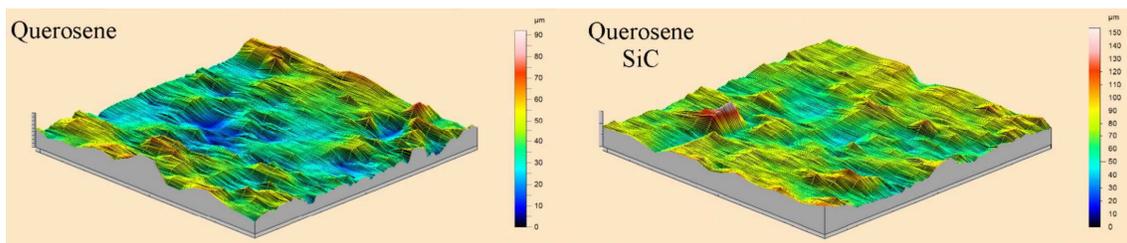
**Figura 4.** Rugosidade  $S_a$  para as amostras usinadas com Óleo A, Querosene e Água, com abrasivo, fluido a baixa pressão e jato a alta pressão.

### 3.3 Topografia de Superfície

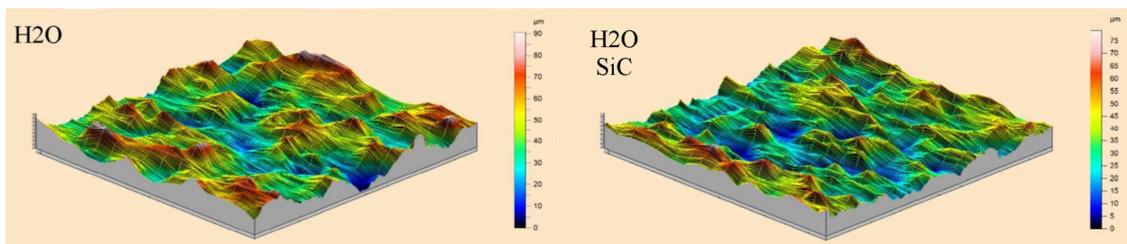
As Figuras 5 a 7 apresentam as topografias geradas por interferometria laser, das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, comparando o efeito da adição de abrasivo, corroborando os valores de  $S_a$  encontrados. Observa-se que a adição de SiC melhora consideravelmente a qualidade superficial, com amplitude de picos e vales menores que as amostras que foram usinadas sem SiC, mesmo com fluido estático. Portanto, fica claro que o abrasivo age melhorando o mecanismo de usinagem, pela melhor distribuição das descargas elétricas<sup>(8)</sup> e gerando energia de impacto na superfície, conseqüentemente melhorando velocidade de usinagem e integridade superficial. O efeito erosivo não ocorre no material solidificado, pelo menos de forma significativa; mas ocorre de forma efetiva no material fundido, que por gravidade, depois da implosão, volta a se depositar na superfície já usinada, pela descarga elétrica posterior. As partículas abrasivas a alta pressão removem essa camada de material fundido, durante sua solidificação. Esse mecanismo potencializa o processo EDM, como uma espécie de catalisador mecânico.



**Figura 5.** Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo (área de  $1 \text{ mm}^2$  e  $1.000 \times 50$  pontos).



**Figura 6.** Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo (área de  $1 \text{ mm}^2$  e  $1.000 \times 50$  pontos).



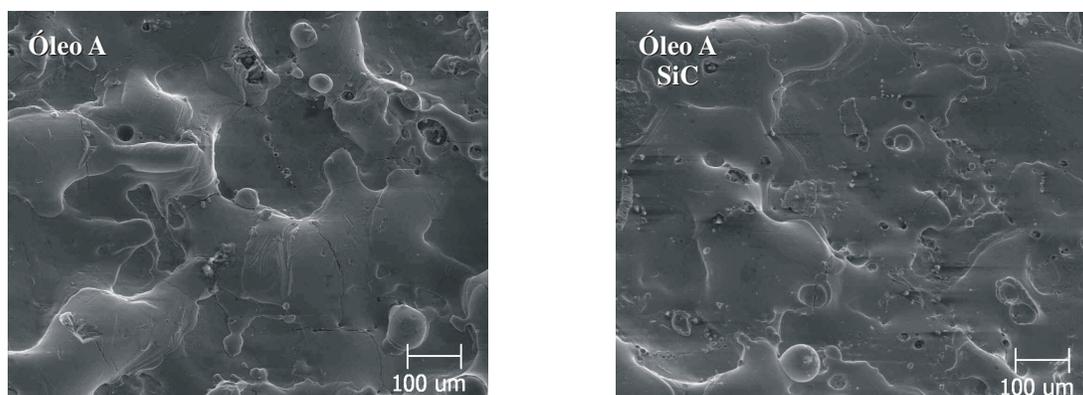
**Figura 7.** Topografias geradas por interferometria laser das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo (área de  $1 \text{ mm}^2$  e  $1.000 \times 50$  pontos).

### 3.4 Morfologia

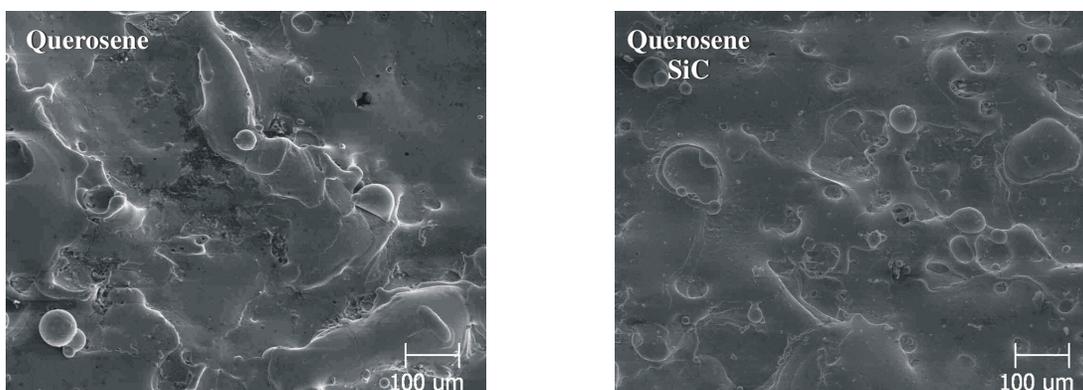
A morfologia das superfícies usinadas é apresentada nas Figuras 8 a 10. Morfologicamente, observa-se sensíveis diferenças entre as superfícies usinadas pelos diferentes óleos, corroborando o trabalho de Arantes<sup>(9)</sup> sobre a influência dos fluidos dielétricos na morfologia de superfícies do aço ABNT M2. O óleo A gerou uma superfície com menos trincas, menos bolhas e crateras em relação às superfícies geradas pelo querosene ou pela água deionizada. Esta última mostrou morfologia de superfície inferior, com maior número de trincas, bolhas e crateras.

O efeito do SiC no fluido dielétrico foi observada em todas as figuras, o que corrobora os trabalhos de Yih-Fong<sup>(10)</sup> e Zhao et al.,<sup>(11)</sup> que reportaram a ação de partículas abrasivas como estabilizadoras do processo EDM e capaz de melhorar a TRM, rugosidade, topografia e morfologia das superfícies. Em todos os casos, foi observado a “suavização” da superfície, diminuição do número de crateras e bolhas; tanto em condição de fluido estático quanto em alta pressão.

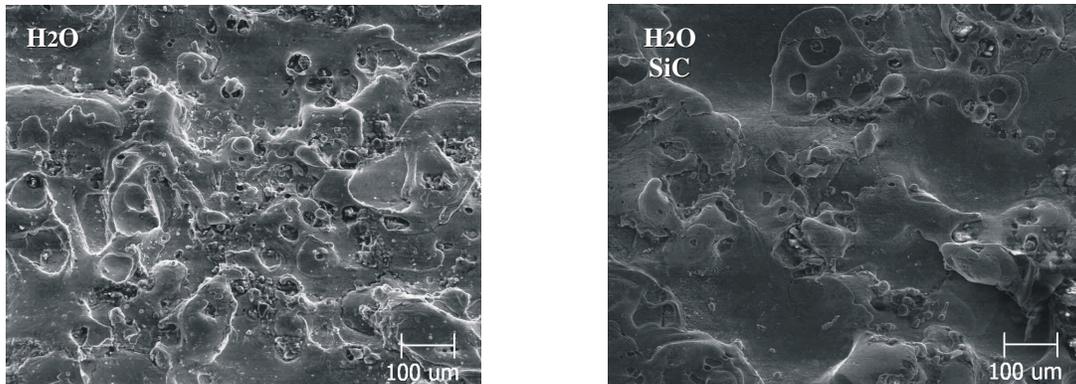
O efeito da pressão do fluido dielétrico pode ser observado em termos de morfologia de superfície. Quanto maior a pressão, melhor a morfologia apresentada pela superfície. O aumento da pressão melhora o sistema de lavagem no GAP, melhorando a remoção de metal refundido, diminuindo o fecho de bolhas e crateras comuns na camada refundida em peças usinadas por EDM.



**Figura 8.** Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Óleo A, com e sem abrasivo.



**Figura 9.** Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Querosene, com e sem abrasivo.



**Figura 10.** Morfologias geradas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies usinadas com fluido a alta pressão, Água Deionizada, com e sem abrasivo.

#### 4 CONCLUSÕES

◆ O sistema de lavagem tem fundamental importância no desempenho da usinagem EDM. Quanto maior a pressão do fluido dielétrico, maior a Taxa de Remoção de Material (TRM) e menores os valores de rugosidade. Isso porque as partículas fundidas são evacuadas da interface ferramenta-peça com maior eficiência.

◆ A simples adição de abrasivo (SiC) melhora consideravelmente os valores de rugosidade da peça usinada por EDM. Conclui-se então 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 AJEDM, associando a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) e Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM) é viável, por produzir superfícies com melhor qualidade e com poucas restrições tecnológicas.

◆ Com fluido dielétrico puro a alta pressão, não foi observado deposição de Si ou SiC. Já na condição de fluido a alta pressão e SiC em dispersão, houve considerável deposição de Si na superfície usinada. O Querosene apresentou menor deposição. Estes resultados mostram que, na situação em que foi utilizado o SiC, houve participação efetiva das partículas abrasivas no processo de remoção de material.

◆ A utilização da água deionizada como dielétrico é viável tecnicamente no processo híbrido proposto, uma vez que os valores de rugosidade tornaram-se compatíveis com os 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 uma superfície menos rugosa, o melhor fluido é o hidrocarboneto específico para eletroerosão, cujas propriedades físico-químicas demonstraram maior eficiência no processo AJEDM.

#### Agradecimentos

Agradecemos à Fapemig pelo suporte dado através do Projeto TEC 727/2004 – Avaliação e Otimização de Parâmetros de Usinagem por Descargas Elétricas Via Superfícies de Resposta.

## REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 PAJAK, P. T.; SILVA, A. K. M.; HARRISON, D. K.; MCGEOUGH, J. A. Modeling the Aspects of Precision and Efficiency in Laser-assisted Jet Electrochemical Machining (LAJECM). *Journal of Materials Processing Technology* 149, p. 512-518, 2004.
- 3 KOZAK, J.; RAJURKAR, K. P. Hybrid Machining Process Evaluation and Development. University of Nebraska, Lincoln, U.S.A, 2001.
- 4 MCGEOUGH, J. A. *Advanced Methods of Machining*. Chapman and Hall, London, 1989.
- 5 AMORIM, F. L. Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos, 2002. 134 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- 6 WONG, Y. S.; LIM, L. C.; LEE, L. C. Effects of Flushing on Electro-Discharge Machining Surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 48, p. 299-305, 1995.
- 7 MING, Y. Q., HE, L. Y. Powder-suspension Dielectric Fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 52, p. 44-54, 1995.
- 8 FERNANDES, A. L. Efeito da Adição de Pó de Carboneto de Silício nos Fluidos Dielétricos Sobre o Desempenho da Usinagem por Descargas Elétricas do Aço-Rápido ABNT M2, 1999. 72 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- 9 ARANTES, L. J. Avaliação de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas, 2001. 74 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
- 10 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.
- 11 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.