

MECANISMO DE REMOÇÃO DE MATERIAL NO PROCESSO AJEDM¹

*Ernane Rodrigues da Silva²
Rogério Felício dos Santos²
Alberto Arnaldo Raslan³*

Resumo

No processo de usinagem por descargas elétricas auxiliado por jato erosivo, processo AJEDM, tem-se um implemento significativo da velocidade ou taxa de remoção de material (TRM). O objetivo deste trabalho foi o de investigar o mecanismo segundo o que se processa a remoção de material durante o processo AJEDM. Os ensaios foram realizados em uma máquina de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) por penetração especialmente adaptada para permitir a injeção sob pressão de um fluxo de fluido dielétrico com partículas abrasivas dispersas, sob pressão de 240 bar. Como eletrodo ferramenta foi usado um cilindro vazado de cobre eletrolítico. Como eletrodo peça, usou-se barras de aço M2. A água deionizada foi utilizada como fluido dielétrico. Os abrasivos empregados foram Al_2O_3 , SiC e B_4C , com granulometria de 320 mesh e SiC de 600 mesh. As análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) não evidenciaram a presença de marcas de desgaste erosivo na superfície do aço. A influência da dureza dos abrasivos não foi constatada. Também não foi verificada degradação das partículas abrasivas. Os resultados obtidos mostraram que o mecanismo de remoção de material não está associado aos mecanismos clássicos de erosão/abrasão. O que ocorre, essencialmente, é a interação de partículas sólidas com metal liquefeito que, devido ao fato de estarem em movimento, arrastam o metal para fora da cavidade usinada. Isso evita a redeposição de metal fundido e provoca o implemento da TRM.
Palavras-chave: AJEDM; Água deionizada; Abrasivos; Mecanismo de remoção de material.

MATERIAL REMOVAL MECHANISMS IN THE AJEDM PROCESS

Abstract

In Abrasive Jet Electrical Discharge Machining (AJEDM), there is a significant speed (or material removal rate (MRR)) improvement. The aim of this study was to investigate the mechanism which material removal occurs during the AJEDM. Assays were performed on a Electrical Discharge Machining (EDM) machine die sinking, adapted to allow the injection under pressure of a dielectric fluid flow with abrasive particles dispersed under pressure of 240 bar. As electrode tool, a hollow cylinder of electrolytic copper was used. M2 steel bars were used as workpiece. Deionized water was used as dielectric fluid. The abrasives used were Al_2O_3 , B_4C , 320 mesh SiC and 600 mesh SiC. Analysis by scanning electron microscopy (SEM) did not show the presence of erosive wear marks on the steel surface. The influence of the abrasive hardness was not detected. It was also not observed abrasive particles degradation. The results showed that the material removal mechanism is not related to the erosion/attrition classical mechanisms. What occurs, essentially, is the abrasive solid particles interaction with the molten metal that, due to the fact that they are moving, drags the metal out of the machined cavity. This avoids the molten metal redeposition and causes TRM improvement.

Key words: AJEDM; Deionized water; Abrasives; Material removal mechanism.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Matemático. Professor Doutor, Cefet-MG, Betim, MG, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico. Professor Doutor, UFU, Betim. MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O processo não convencional de Usinagem por Descargas Elétricas (*Electrical Discharge Machining – EDM*) trabalha com baixas taxas de remoção de material (TRM), em comparação com os processos de usinagem convencionais. Ele é extensamente utilizado pelas indústrias na confecção de moldes e ferramentas, devido à vantagem de usinar materiais de dureza elevada.

Erden e Kaftanoglu,⁽¹⁾ estimam que apenas 10% a 15% do material fundido por descargas elétricas durante o processo é removido da superfície, enquanto o restante resolidifica, o que é responsável pelo baixo rendimento do processo.

Segundo Khanra, Pathak e Godkhindi,⁽²⁾ a circulação do fluido dielétrico na fenda de trabalho, durante o resfriamento da superfície, produz vapores que tornam o fluxo turbulento. A presença do vapor reduz a taxa de resfriamento das gotas de metal líquido arrancadas da superfície, que solidificam no formato esférico.

De acordo com Norasetthekul et al.,⁽³⁾ as micro-partículas que se formam durante o processo de EDM têm tamanhos diferentes, e esses ainda variam em função da corrente empregada no processo. A deposição dessas micro-partículas na superfície da peça reduz a taxa de remoção do material.

Além da baixa velocidade de usinagem, o processo EDM produz alguns inconvenientes na superfície usinada como a formação da camada refundida, trincas e poros (bolhas). Uma possibilidade de melhorar o desempenho do processo EDM e amenizar os defeitos superficiais é a combinação do mesmo com outros processos de fabricação.

Raslan e Arantes⁽⁴⁾ desenvolveram um processo híbrido de usinagem, denominado Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM), que consiste na aplicação simultânea dos processos de EDM e Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM). Esse processo utiliza a interação térmica da EDM, cuja remoção de material ocorre por fusão e evaporação, com a interação da ação mecânica de erosão por jato de água com partículas abrasivas. Essa mistura é submetida a pressões muito superiores às pressões nominais da máquina de EDM. As partículas de pó formam uma ponte para a corrente ao reduzirem a rigidez dielétrica do fluido dielétrico, entre a ferramenta e a peça, aumentando a fenda de trabalho. O jato de fluido sob pressão promove uma melhora no processo de lavagem, o que acarreta em melhora na TRM. Um ganho adicional na TRM é obtido com a ação das partículas abrasivas diluídas no fluido, que provocam desgaste e aumentam a eficácia na remoção de material.

O objetivo deste trabalho foi o de estudar o mecanismo de remoção de matéria no processo AJEDM com a variação da pressão de trabalho e com a utilização de abrasivos carboneto de silício (SiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e carboneto de boro (B_4C).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa foi realizado em uma máquina de EDM por penetração, em conjunto com hidrojateadora de pressão nominal 250 bar. Foi necessário montar uma cuba auxiliar (Figura 1) no tanque de trabalho, para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico (óleo mineral) da máquina EDM. A cuba auxiliar possui abas laterais que se estendem por toda periferia de sua abertura para proteção do tanque. Foram instaladas, também, tampas para evitar os respingos provocados pelo jato de alta pressão. Pode-se observar, ainda, a bomba centrífuga

para esvaziar a cuba auxiliar fixada na tampa, a pistola de alta pressão da hidrojateadora para alimentação de água deionizada conectada ao suporte, onde foram posicionados o bico *venturi* e a mangueira de alimentação do abrasivo.

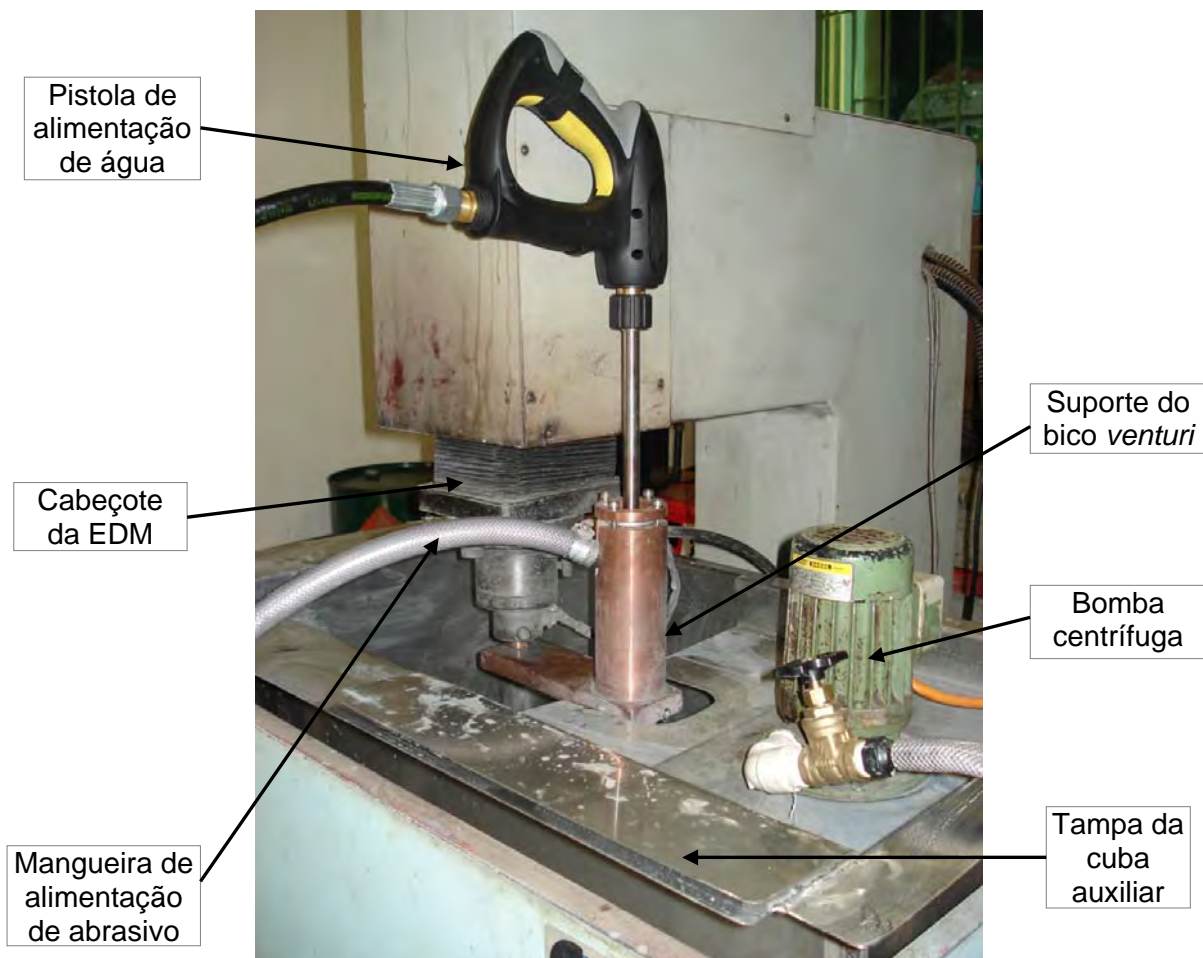


Figura 1. Desenho esquemático das adaptações implementadas para aplicação do processo AJEDM.

O regime de usinagem escolhido foi de desbaste com os parâmetros de EDM estabelecidos por Arantes⁽⁵⁾ mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de EDM estabelecidos para regime de trabalho

Parâmetro		Unidade
Polaridade da ferramenta	+	
Tensão	110	V
Corrente	18 e 30	A
Tempo de pulso (T_{ON})	200	μs
Relação entre o tempo de pulso e o tempo total (DT)	70	%
TS (1/3 da corrente)	6 e 10	
Tempo de erosão	6	s
Afastamento periódico da ferramenta	0,4	mm
Intervalo entre tempos de erosão e de afastamento periódico	0	s

Foram usinadas amostras em aço ABNT M2 de seção transversal quadrada de 12,7 mm e comprimento de 101,6 mm. O eletrodo ferramenta, de cobre eletrolítico, foi fabricado no formato tubular com diâmetros de 19 mm (externo), 6,3 mm (interno) e com comprimento de 30 mm. Os abrasivos usados nos testes foram Al_2O_3 e B_4C de

granulometria 320 mesh e SiC, de 320 e 600 mesh. Os testes tiveram duração de 5 minutos para cada ensaio de uma série de três. Os ensaios foram realizados nas seguintes condições: (a) com água deionizada como fluido dielétrico sem pressão; (b) com água deionizada como fluido dielétrico com pressão de 240 bar; (c) água deionizada com pressão e abrasivo (AJEDM) e (d) óleo mineral sem pressão e sem abrasivo.

A taxa de remoção de material (TRM), a taxa de desgaste (TD) e o desgaste volumétrico relativo (DVR) foram avaliados por gravimetria interrompida, usando balança de precisão 10^{-3} g. A TRM caracteriza o volume de material removido da peça em um determinado tempo. A TD representa o volume de material perdido pela ferramenta durante sua operação em um determinado tempo. As TRM e TD são expressas em mm^3/min . O DVR é dado, em valores percentuais, pela razão entre TD e TRM.

A Integridade da camada refundida na peça foi observada por meio de microscopia ótica. A morfologia da superfície usinada, forma e dimensões das partículas abrasivas foram observadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3 RESULTADOS/DISCUSSÃO

Silva⁽⁶⁾ observou que durante a usinagem no processo AJEDM o jato empurra uma pequena quantidade da camada refundida para fora da cavidade usinada, formando rebarbas na periferia externa da cavidade (Figura 2). A Figura 3 ilustra imagem de MEV desse efeito da pressão ao empurrar o material fundido da camada refundida para fora da cavidade usinada, no trecho da periferia externa da cavidade.

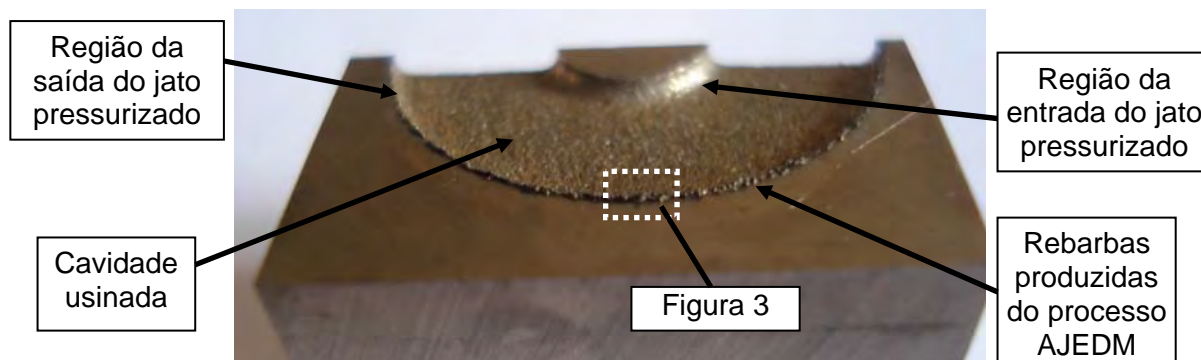


Figura 2. Cavidade usinada produzida no aço AISI M2 pelo processo AJEDM com SiC de 600 mesh na pressão de 240 bar.

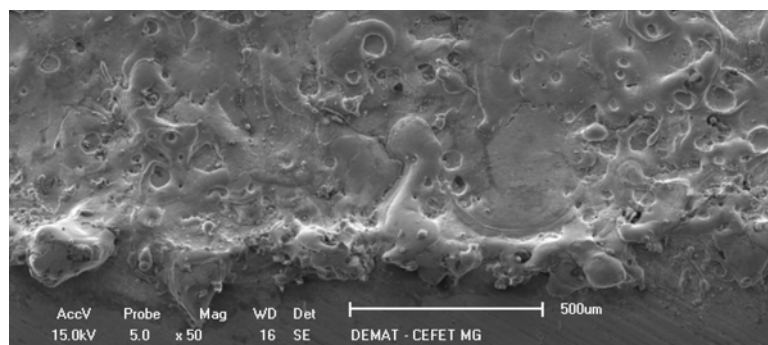


Figura 3. Imagem de MEV de trecho da periferia externa da cavidade usinada pelo processo com pressão de 240 bar.

A camada refundida, produzida pela usinagem com abrasivo SiC de 600 mesh na pressão de 240 bar, não é uniforme ao longo da seção transversal da cavidade. A camada forma-se com uma espessura menor na entrada do jato de água pressurizado, na região do furo central do eletrodo-ferramenta. A espessura cresce da região de entrada do jato até atingir valores máximos na região de saída. Essa variação é provocada pelo fluxo do jato de água abrasivo sob alta pressão, que acentua o efeito da lavagem, pelo fluido dielétrico, das micro-partículas do material arrancado da superfície da peça pelas descargas elétricas.

As Figuras 4 a 7 ilustram imagens de microscopia ótica da seção transversal de metade da cavidade usinada. Nas imagens, pode-se observar o formato da camada refundida. Os ataques químicos foram feitos com Nital 2%.

As Figuras 4 e 5 referem-se à usinagem com água deionizada e óleo mineral, ambas sem pressão.



Figura 4. Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com água deionizada sem pressão.



Figura 5. Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com óleo mineral sem pressão.

Observa-se que a camada refundida produzida pelas usinagens com água deionizada e óleo mineral, ambos sem pressão, têm formatos e espessuras uniformemente distribuídos ao longo da cavidade usinada. Apenas em alguns trechos, a espessura sofre redução na medida.

A Figura 6 refere-se a usinagem com água deionizada pressurizada a 240 sem abrasivo.

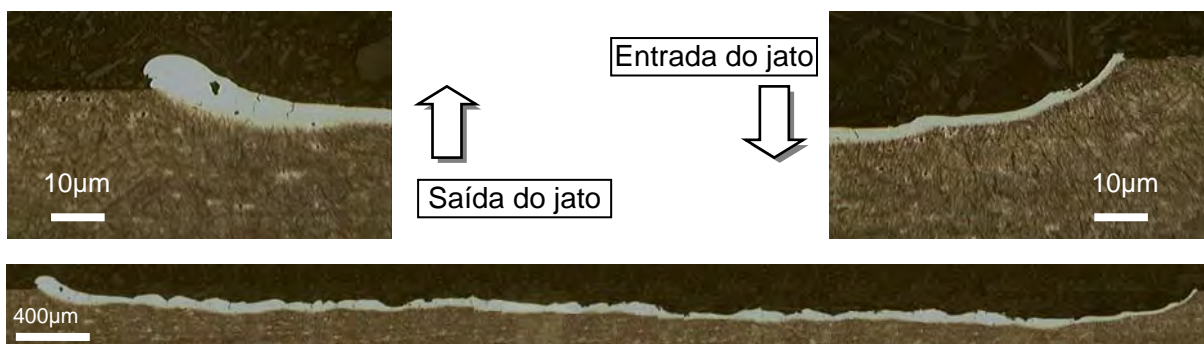


Figura 6. Imagens de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com água pressurizada a 240 bar, sem abrasivo.

A Figura 7 refere-se à usinagem com água deionizada na presença de abrasivo SiC de 600 mesh na pressão de 240 bar.

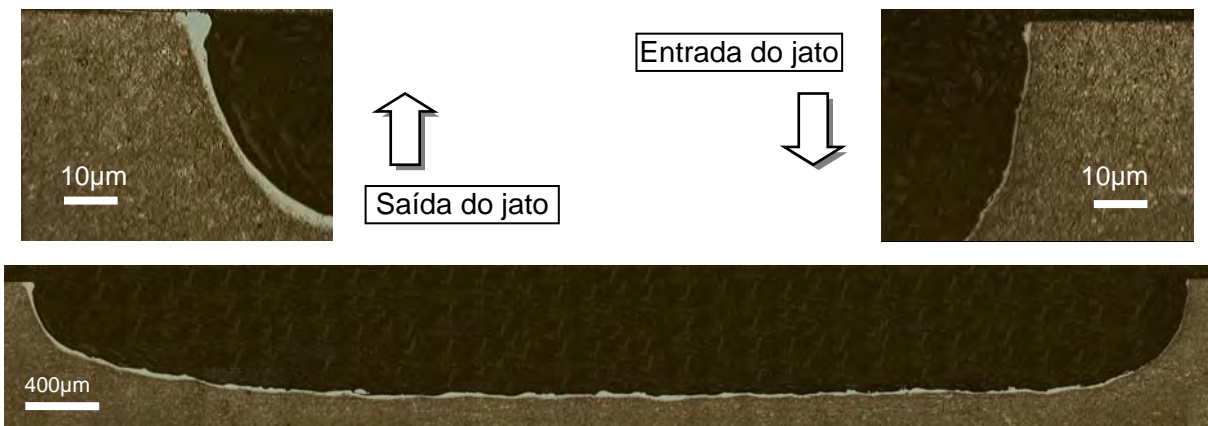


Figura 7. Imagem de microscopia ótica da seção transversal da cavidade usinada com pressão de 240 bar com SiC de 600 mesh.

Na usinagem com água pressurizada a 240 bar, nota-se discreta redução da espessura (mínimas) na região de entrada do jato; e maior espessura (máximas) na região de saída do jato, contrastando-se com a usinagem com água deionizada sem pressão. Observa-se também que a camada refundida produzida na usinagem pelo AJEDM destaca-se entre as demais, pois ocorreu uma redução em sua espessura na região de entrada do jato, com aumento gradual ao longo de toda a extensão da cavidade, até atingir valores máximos, próximos da região de saída do jato. Nota-se também que a espessura da camada refundida, ao longo da cavidade usinada pelo AJEDM, é menor que nas condições de aplicação dos fluidos dielétricos sem pressão, água deionizada e óleo mineral, bem como água deionizada pressurizada a 240 bar, sem abrasivo.

As Figuras 8 e 9 mostram a morfologia das superfícies usinadas com água deionizada e óleo, ambos sem pressão.

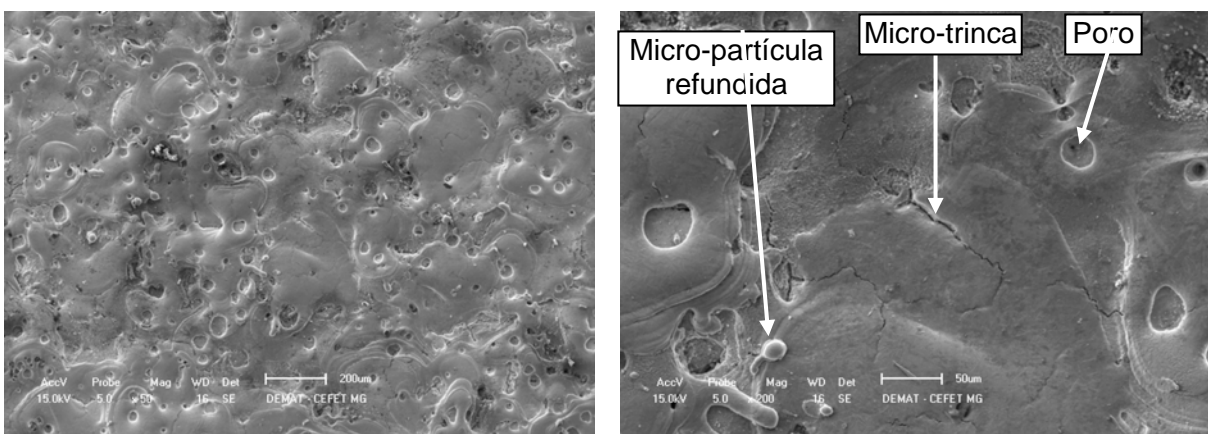


Figura 8. Imagens de MEV das superfícies usinadas com água deionizada sem pressão e sem abrasivo.

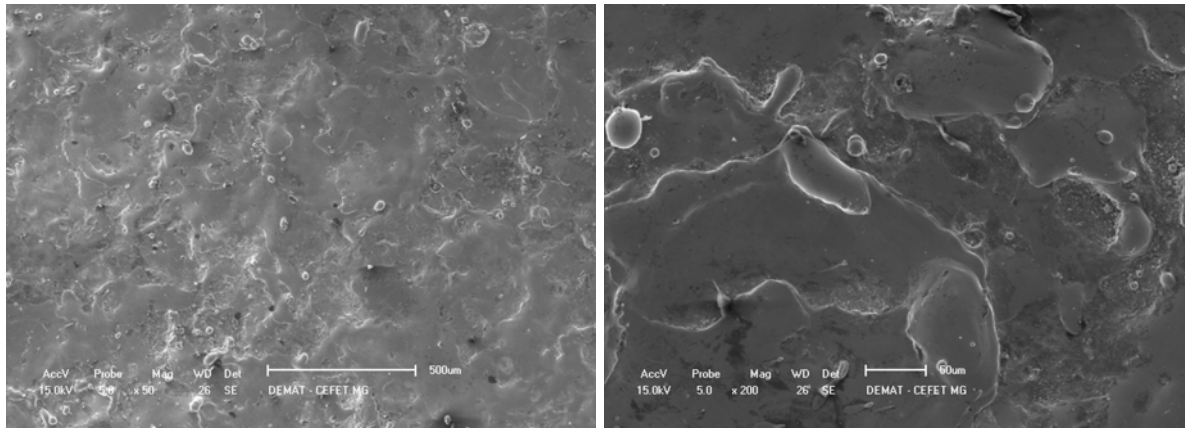


Figura 9. Imagens de MEV das superfícies usinadas com óleo mineral sem pressão e sem abrasivo.

A Figura 10 refere-se à usinagem com água deionizada pressurizada a 240 bar. A Figura 11 refere-se à usinagem com água deionizada na presença de abrasivo SiC de 600 mesh na pressão de 240bar.

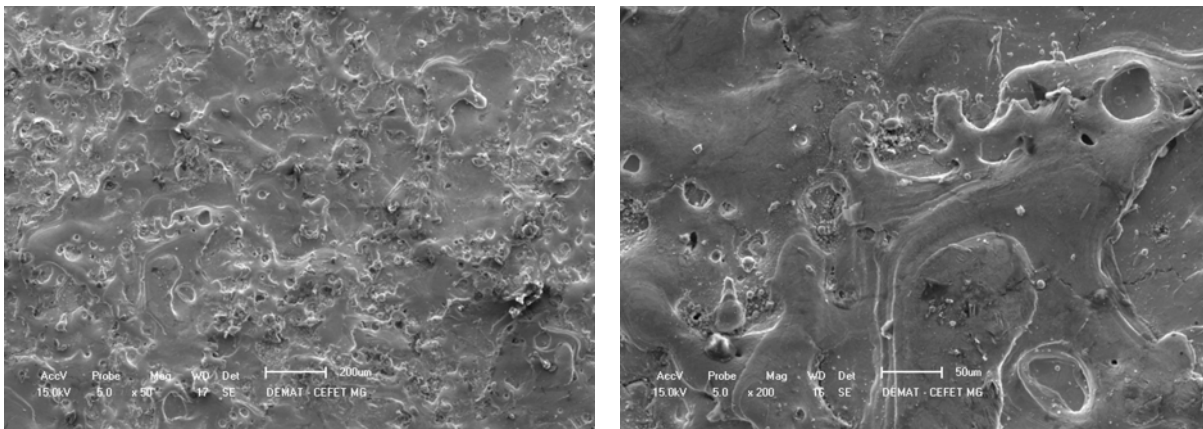


Figura 10. Imagens de MEV das superfícies usinadas com água deionizada pressurizada a 240 bar sem abrasivo.

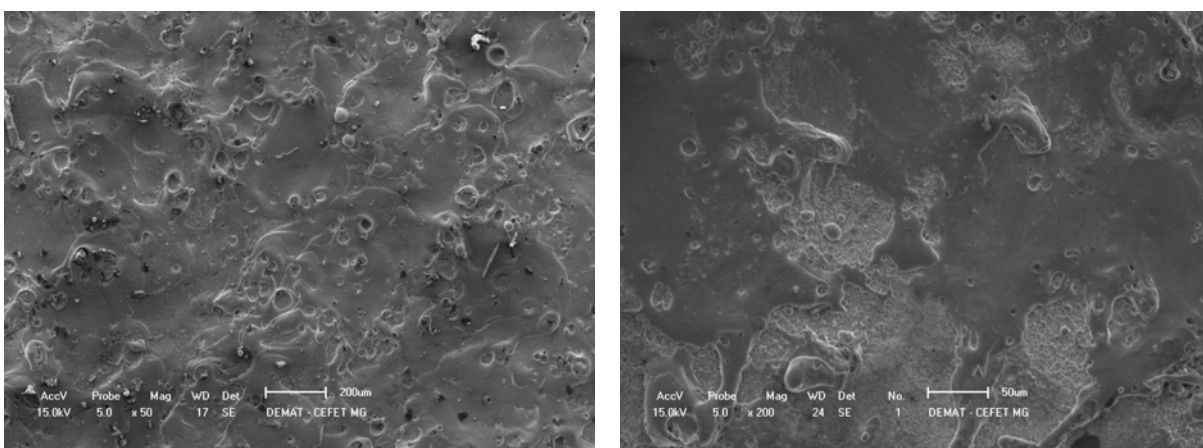


Figura 11. Imagens de MEV das superfícies usinadas pelo processo com SiC de 600 mesh na pressão de trabalho de 240 bar.

Nota-se, por meio das imagens de MEV, que as superfícies obtidas pelo processo AJEDM não apresentam diferenças significativas das usinadas por EDM convencional com óleo mineral sem pressão. Até mesmo, da produzidas com água

deionizada pressurizada ou sem pressão. Ocorre a formação de poros, micro-trincas e absorção de micro-partículas refundidas na superfície.

A Figura 12 (a) ilustra uma imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura obtida da superfície usinada com abrasivo Al_2O_3 na pressão de 240 bar. Nela, pode-se observar uma partícula abrasiva de Al_2O_3 incrustada. A Figura 12b ilustra o espectro de EDS realizado nessa partícula abrasiva. A seta na Figura 12a indica a posição onde foi realizada a análise de EDS pontual.

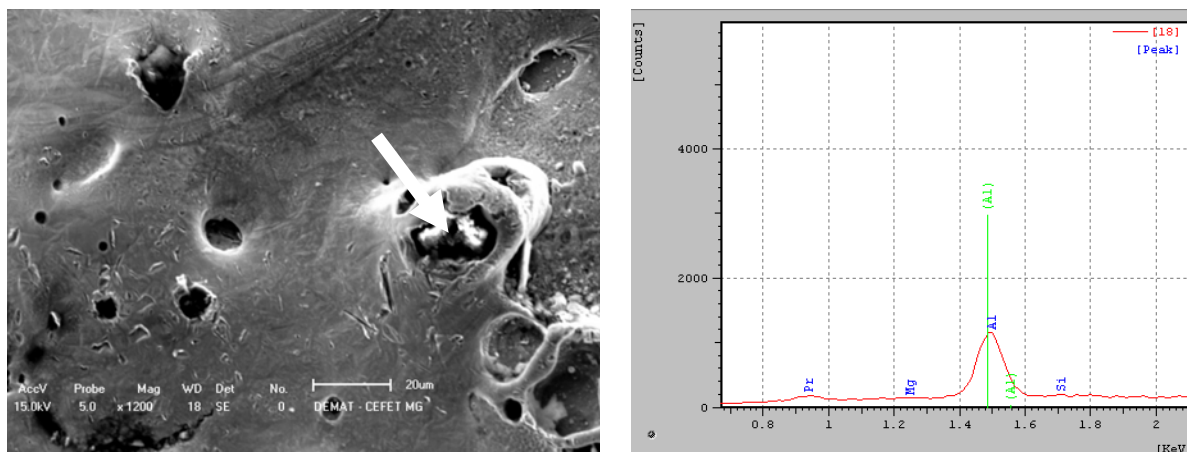


Figura 12. Imagem de MEV da superfície usinada (a), imagem do espectro de EDS pontual na partícula abrasiva incrustada na superfície usinada (b), com Al_2O_3 na pressão de 240 bar.

Os resultados mostraram que a superfície usinada não difere muito da usinada por EDM convencional, ocorrem formação de poros, micro-trincas e adesão de partículas refundidas. Porém o fato que difere uma superfície da outra é a ocorrência da incrustação de partículas e/ou fragmentos de abrasivo na superfície usinada pelo processo, como podem ser observado pelo espectro de EDS realizado na partícula de Al_2O_3 incrustada na superfície da cavidade usinada. Isso demonstra que houve uma efetiva participação das partículas abrasivas no processo de remoção de material da peça usinada, refletindo no aumento substancial da TRM.

Os gráficos das Figuras 13 a 15 apresentam os resultados de TRM, TD e DVR, respectivamente, referentes à influência dos abrasivos SiC, Al_2O_3 e B_4C de granulometria 320 mesh no processo AJEDM. Pressão de 240 bar e regime de trabalho de desbaste com corrente de 30 A.

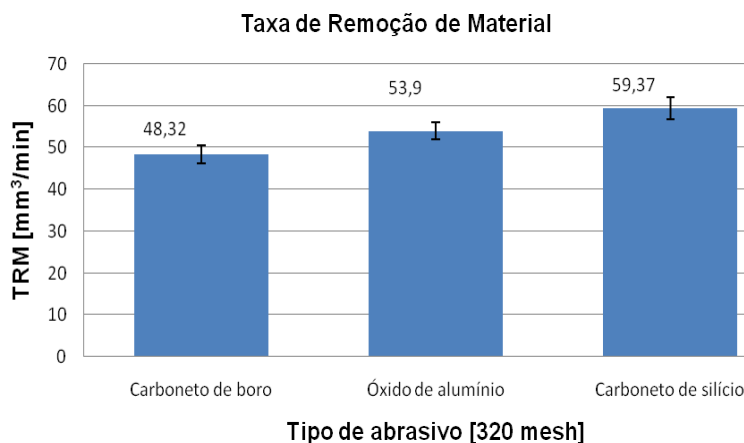


Figura 13. TRM dos abrasivos SiC, Al_2O_3 e B_4C com granulometria de 320 mesh na pressão de 240 bar.

Observa-se um discreto ganho na TRM, usando-se o abrasivo SiC em relação ao B₄C, com valor aproximadamente 20% maior.

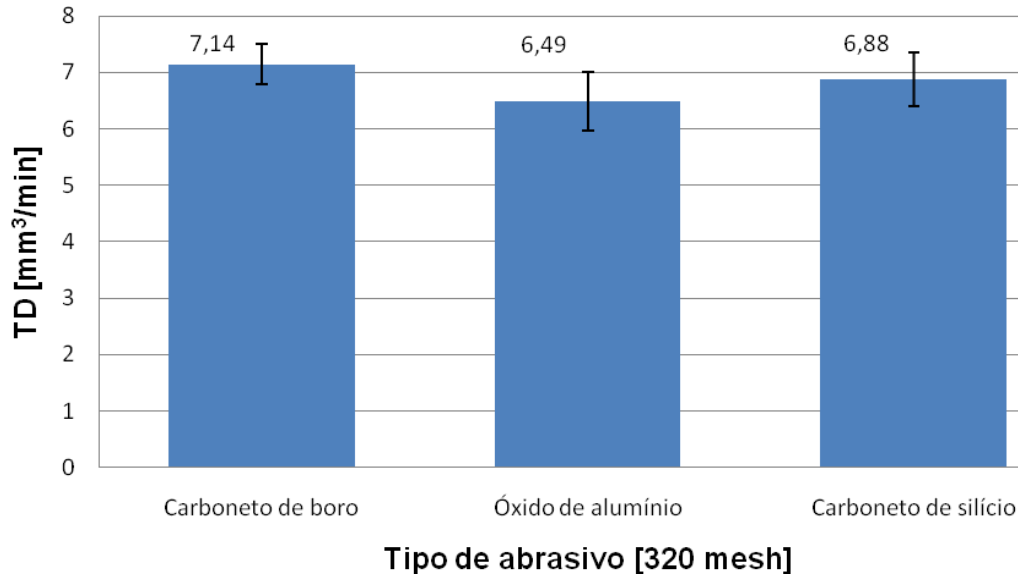


Figura 14. TD dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de granulometria 320 mesh na pressão de 240 bar.

Nota-se que, entre os valores da TD, não ocorreu mudança significativa.

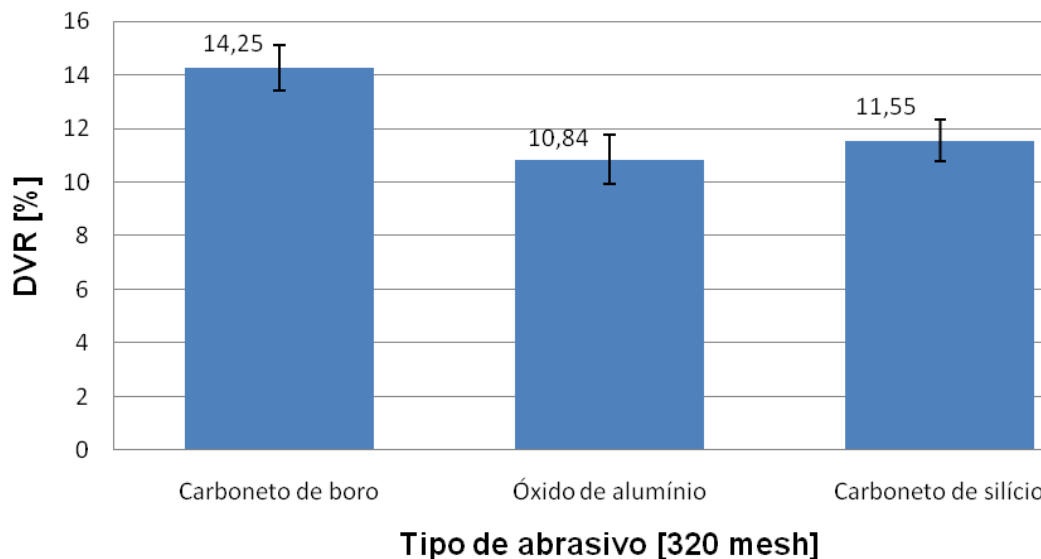


Figura 15. DVR dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de 320 mesh para pressão de trabalho de 240 bar.

A menor TRM, promovida pelo B₄C, em relação aos abrasivos SiC e Al₂O₃, acompanhada da equivalência nos valores da TD entre os três tipos de abrasivos, aumentou o valor do DVR do B₄C em aproximadamente 40% a mais em relação ao Al₂O₃.

As Figuras 16 e 17 ilustram imagens de MEV dos abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de granulometria 320 mesh, novos.

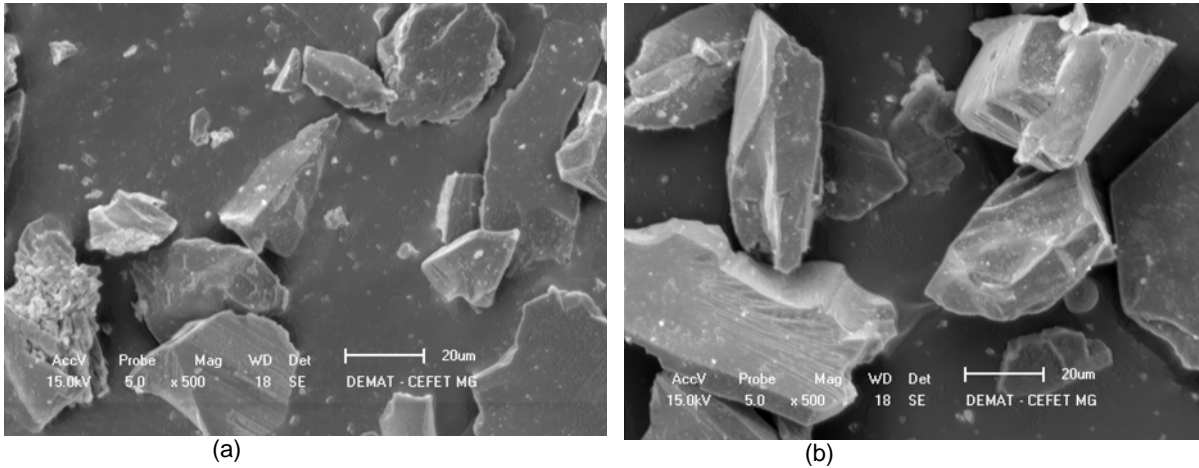


Figura 16. Imagens de MEV do abrasivo SiC (a) e Al₂O₃ (b) de granulometria 320 mesh.

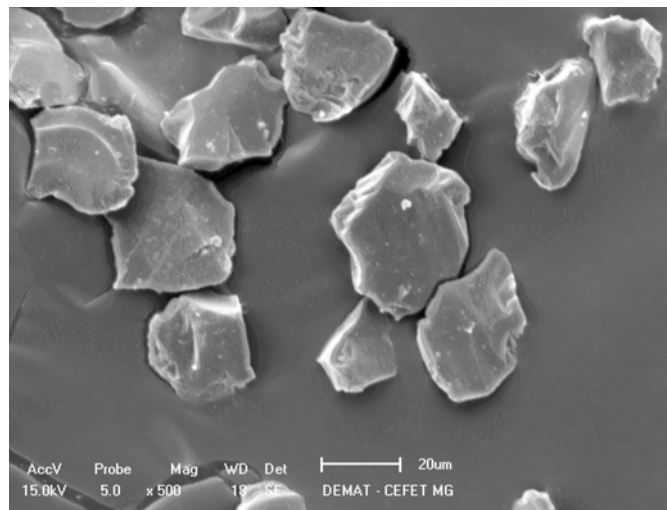


Figura 17. Imagens de MEV do abrasivo B₄C de granulometria 320 mesh.

As imagens de MEV dos abrasivos mostram que o B₄C tem menor angulosidade que SiC e Al₂O₃. Nota-se também que o abrasivo B₄C apresenta uma distribuição mais uniforme no tamanho das partículas. A maior angulosidade dos abrasivos SiC e Al₂O₃ melhora as condições de remoção de material, nesse caso, da camada refundida.

A maior variação no tamanho das partículas abrasivas do SiC e da Al₂O₃ exercem uma discreta influência na taxa de remoção de material destes abrasivos em relação ao B₄C.

A explicação para a contribuição das partículas abrasivas no processo AJEDM é a de que as mesmas atuam sobre uma superfície de metal líquido. Esse fato pode ser comprovado pelas seguintes observações:

- não há registros de marcas de desgastes por erosão na superfície da camada refundida do eletrodo-peça;
- presença de partículas abrasivas incrustadas na superfície da camada refundida do eletrodo-peça;
- não observância de influência da dureza dos abrasivos na TRM; e
- preservação da integridade das partículas abrasivas.

Para reforçar essa hipótese, adotou-se um procedimento que permitiu a análise do material subtraído da superfície usinada.

Após realização da usinagem com o processo AJEDM no aço AISI M2, as partículas abrasivas que ficaram sobrepostas à cavidade usinada foram recolhidas e analisadas por meio de imagens de MEV.

A Figura 18 ilustra uma imagem de MEV das micro-partículas extraídas, misturadas ao pó abrasivo, nesse caso, B₄C.

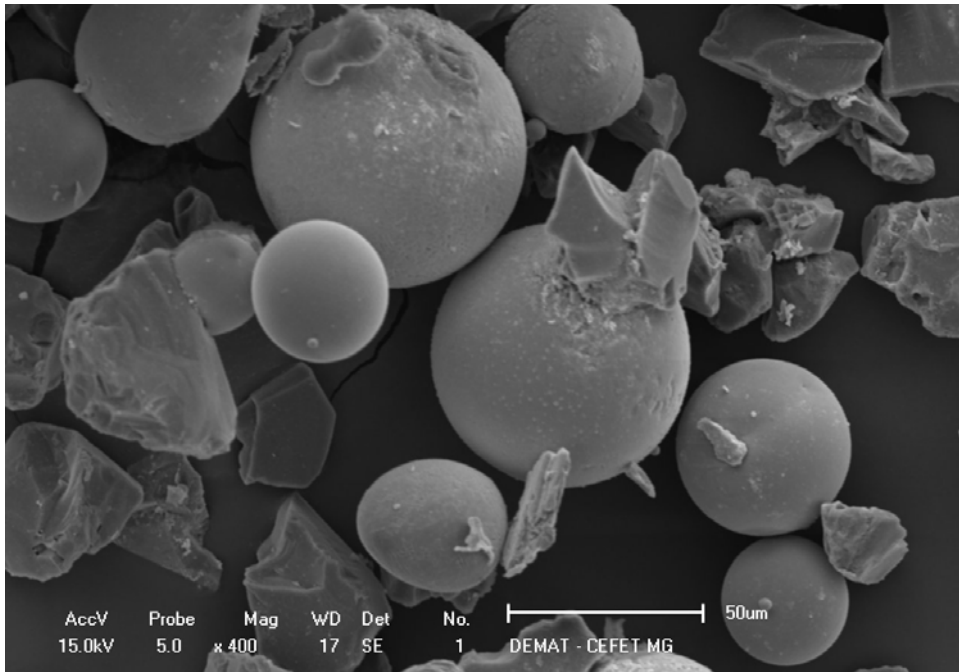


Figura 18. Imagem de MEV das micro-partículas extraídas obtidas da usinagem do aço AISI M2 pelo processo misturadas ao abrasivo B₄C de 320 mesh.

A Figura 19 ilustra uma imagem de MEV de uma quantidade de partículas abrasivas de SiC de 320 mesh aglutinadas ao material removido da peça de aço AISI M2.

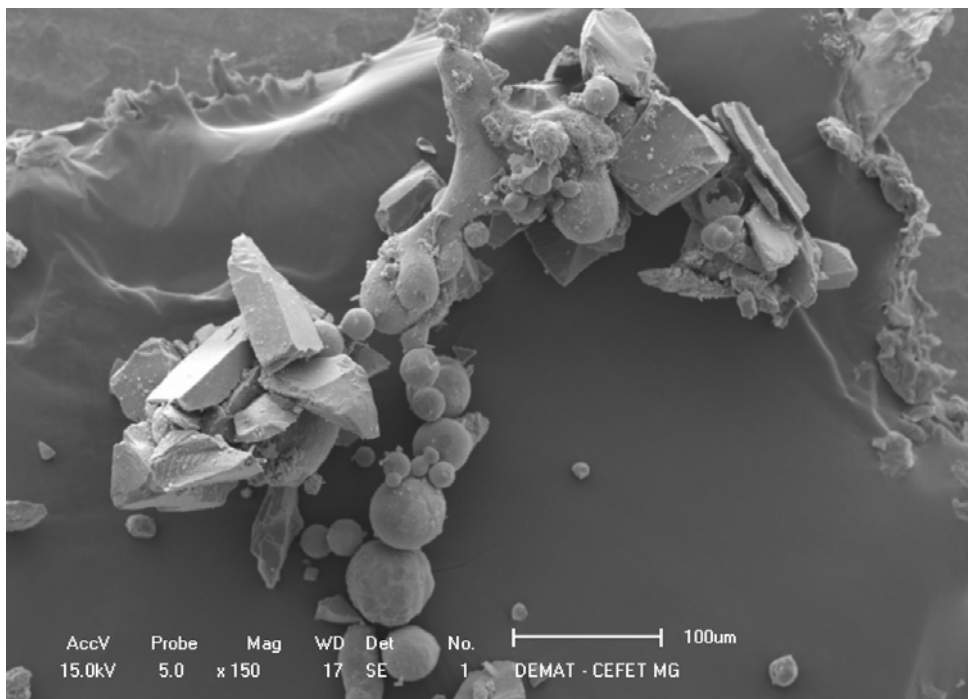


Figura 19. Imagem de MEV de partículas abrasivas de SiC de 320 mesh aglutinadas ao material removido da peça de aço AISI M2.

Nota-se que algumas partículas abrasivas e fragmentos das mesmas ficaram aderidas nas micro-partículas extraídas.

Durante a usinagem com o abrasivo SiC ocorreram a formação de micro-partículas de ferro provenientes da peça de aço AISI M2, que se juntam ao abrasivo.

Assim, fica evidenciada a ação das partículas abrasivas no processo AJEDM. Essas análises demonstram que o mecanismo de desgaste atuante não é propriamente erosivo. As partículas abrasivas não atuam sobre uma superfície sólida. A contribuição delas está relacionada a uma ação de arraste de metal líquido fundido pelas altas temperaturas geradas pelas descargas elétricas. Esse tipo de interação não tem uma classificação ou modelamento conhecido.

4 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados e dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a camada refundida produzida pelo processo AJEDM, ao longo da seção transversal da cavidade usinada, não é uniforme. A menor espessura ocorre na região de entrada do jato sob pressão, enquanto a maior espessura está na periferia da cavidade, na região de saída do jato;
- os abrasivos SiC, Al₂O₃ e B₄C de granulometria 320 mesh e pressão de 240 bar tiveram um comportamento semelhante nas TRM, TD e DVR; e
- os resultados da condição de aplicação do fluido dielétrico demonstraram que o mecanismo de desgaste provocado pelas partículas abrasivas atua no material líquido que forma a camada refundida.

Agradecimentos

À Fapemig, pela liberação de recursos do projeto TEC APQ 01481/09. À Capes, pelo auxílio financeiro aos pesquisadores.

REFERÊNCIAS

- 1 ERDEN, A.; KAFTANOGLU, B. Thermo-Mathematical Modelling and Optimization of Energy Pulse Forms in Electric Discharge Machining (EDM). **Int. J. Math. Tool Des. Res.** v. 21, n.1, p. 11- 22, 1981.
- 2 KHANRA, A. K.; PATHAK, L.C., GODKHINDI, M. M. Microanalysis of Debris Formed During Electrical Discharge Machining (EDM). **J. Mater. Sci.**, v. 42, p. 872–877, 2007.
- 3 NORASETTHEKUL, S.; EUBANK, P. T.; BRADLEY, W. L.; BOZKURT, B.; STUCKER, B. Use of Zirconium Diboride-Copper as an Electrode in Plasma Applications. **Journal of Materials Science**, v. 34, p. 1261–1270, 1999.
- 4 RASLAN, A. A.; ARANTES, L. J.; FAPEMIG, Fundação de Amparado a Pesquisa de Minas Gerais (Belo Horizonte, MG); UFU, Universidade Federal de Uberlândia (Uberlândia, MG). **Método de Usinagem Híbrida Combinando Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva**. BR n. PI0703468-7, 06 set. 2007, 24 mar. 2009.
- 5 ARANTES, L. J. Desenvolvimento e avaliação do processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM). 2007. 125f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- 6 SILVA, E. R. Otimização e Avaliação dos Parâmetros de Influência do Processo AJEDM. 2013. 107f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.