

# PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO AJEDM<sup>1</sup>

Ernane Rodrigues da Silva<sup>2</sup>  
Rogério Felício dos Santos<sup>2</sup>  
Alberto Arnaldo Raslan<sup>3</sup>

## Resumo

A usinagem com o uso de descargas elétricas por penetração (eletroerosão) caracteriza-se pelo baixo rendimento em comparação com os métodos tradicionais de usinagem. Com o desenvolvimento do processo misto de Usinagem por Descargas Elétricas com Jato Abrasivo, verifica-se que ocorre um implemento significativo na Taxa de Remoção de Material. Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência de alguns parâmetros no processo de usinagem, a saber: pressão do jato erosivo, tipo e granulometria do abrasivo e material do eletrodo. Uma bomba foi adaptada ao equipamento de eletroerosão para permitir a aplicação de pressões de até 240 bar. Como abrasivos, foram usados  $Al_2O_3$  e SiC de granulometrias variadas. Diferentes materiais empregados na confecção de eletrodos, além dos tradicionais cobre e grafite. Observou-se que o aumento na pressão do jato erosivo provoca um incremento da Taxa de Remoção de Material. Em contrapartida, há um desgaste mais acentuado dos eletrodos. O tipo de abrasivo não exerce influência. Contudo, o aumento na granulometria provoca aumento da Taxa de Remoção de Material. Pela alta condutividade elétrica do cobre e alto ponto de fusão da grafite, eles foram os materiais que apresentaram um melhor desempenho como eletrodos. Com os resultados obtidos, conclui-se que o processo pode ser empregado em situações em que o desgaste do eletrodo possa ser tolerado.

**Palavras-chave:** Desgaste erosivo; Usinagem; Eletroerosão; Camada refundida.

## PARAMETERS INFLUENCING THE PROCESS AJEDM

### Abstract

The machining using electrical discharges by penetration (Electrical Discharge Machining) is characterized by low incomes compared to traditional methods of machining. It is checked that there is a significant implement about the Material Removal Rate with development of the mixture process AJEDM (Abrasive Jet-EDM). This study aims to evaluate the influence of some parameters in the AJEDM process, namely: water pressure, type and particle size of the abrasive and the electrode material. A pump was adapted to the EDM equipment allowing to apply pressures up to 240 bar.  $Al_2O_3$  and SiC in different particle sizes were used as abrasives. Besides copper and graphite, varied materials were used to the manufacture of electrodes. It was observed that the increase in water pressure causes an increment of Material Removal Rate. On the other hand, there is a more pronounced wear of the electrodes, but the type of abrasive does not exert influence about that wear. However, the particle size increase causes an increase in Material Removal Rate. Because the high electrical conductivity of copper and high melting point of graphite, they were the materials that performed the best as electrodes. With the results obtained, the conclusion is that the AJEDM process may be applied in situations where the electrode wear can be tolerated.

**Key words:** Erosive wear; Abrasive Jet - EDM; Electrical Discharge Machining; recast layer.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico. Mestre. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil.

<sup>3</sup> Físico. Professor Doutor (Universidade Federal de Uberlândia). Uberlândia. Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Kozak e Rajurkar,<sup>(1)</sup> a indústria transformadora enfrenta grandes desafios quando necessita usinar materiais como super-ligas extremamente duras. A aplicação dos processos de usinagem tradicionais nem sempre é economicamente viável ou eficaz na fabricação de peças com esses materiais. Para solucionar os desafios, novos processos de usinagem precisam ser desenvolvidos, por exemplo, os híbridos, que combinam diferentes propriedades físicas, em especial a ação mecânica, para remoção de material, utilizado pelos processos convencionais, com as interações térmica, química ou eletroquímica aplicadas em processos de fabricação não convencionais.

Para Raslan e Arantes,<sup>(2)</sup> o processo híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas com Jato Abrasivo (AJEDM) consiste na aplicação simultânea dos processos de Usinagem por Descargas Elétricas, que é também conhecido com eletroerosão e Usinagem com Jato de Água Abrasivo. O processo utiliza a interação térmica da eletroerosão, cuja remoção de material ocorre por fusão e evaporação com a interação da assistência mecânica da ação do pó abrasivo do processo de usinagem. Essa combinação promove uma melhor dispersão das descargas elétricas com o aumento da fenda de trabalho entre os eletrodos peça e ferramenta e maior remoção de material, devido ao impacto das partículas abrasivas na superfície usinada.

De acordo com McGeough,<sup>(3)</sup> a eletroerosão é, essencialmente, um processo térmico. O material é removido pelo calor promovido pelo fluxo de eletricidade entre os eletrodos. O material, nos pontos mais próximos, onde a faísca se inicia e termina, aquece a ponto de vaporizar-se. Com isso, uma quantidade de material é arrancada das superfícies e arrastada para fora da fenda de trabalho pelo fluido dielétrico.

Segundo Fuller,<sup>(4)</sup> como a superfície da peça é aquecida pela descarga elétrica e resfriada rapidamente, com a ajuda do fluido dielétrico, uma camada refundida, forma-se nesta região provocando o aparecimento de poros e microtrincas. Além disso, ocorre a adesão de partículas erodidas sobre a superfície usinada da peça. O fluido dielétrico tem papel fundamental ao controlar a potência de abertura da descarga; ele pode ser querosene, hidrocarboneto aditivado (ambos derivados do petróleo), água deionizada ou certas soluções aquosas.

De acordo com Benedict,<sup>(5)</sup> a Usinagem com Jato de Água Abrasivo usa um jato de alta velocidade, que trabalha com pressões elevadas, para produzir um fluxo de água que se desloca rapidamente. Uma corrente de pequenas partículas abrasivas é introduzida e arrastada pelo jato de água, de modo que as partículas abrasivas misturam-se com o fluxo de água, promovendo a capacidade de corte de diversos materiais.

Para Kansal, Singh e Kuma,<sup>(6)</sup> o pó abrasivo adicionado ao fluido dielétrico, na eletroerosão, melhora a característica de rigidez dielétrica, ou seja, a força isolante do líquido diminui; e a distância entre ferramenta e peça (fenda de trabalho - *gap*) aumenta, isso promove uma lavagem uniforme do material arrancado da peça. Como resultado, o processo se torna mais estável, melhorando a Taxa de Remoção de Material e o acabamento superficial.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do material do eletrodo ferramenta, o efeito da variação da pressão de trabalho, o desempenho e a degradação dos abrasivos SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e, ainda, a influência do tamanho da partícula do abrasivo SiC no processo de usinagem híbrido. Para tanto, foram analisadas a Taxa de Remoção

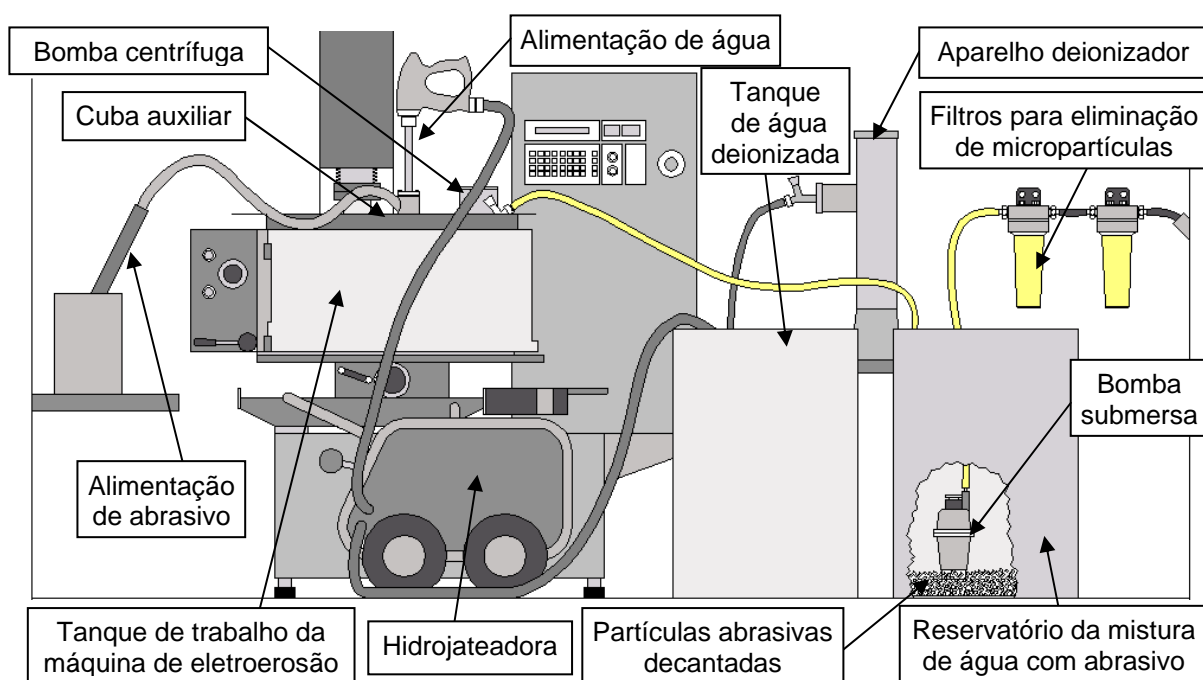
de Material (TRM), a TD (Taxa de Desgaste), o DVR (Desgaste Volumétrico Relativo), desgaste de eletrodos, degradação de abrasivos, integridade da camada refundida.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma máquina de eletroerosão por penetração, em conjunto com uma hidrojateadora de pressão nominal de 250 bar. Como fluido dielétrico foi usado água deionizada.

### 2.1 Adaptações implementadas

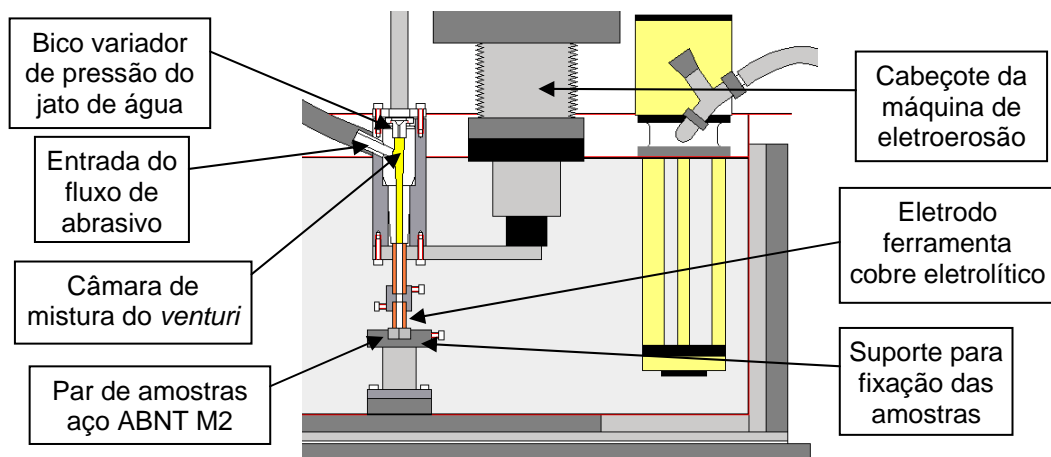
Uma cuba auxiliar, em aço inox, foi adaptada à máquina de eletroerosão, para que não ocorresse contaminação do fluido dielétrico, que começa a circular no tanque de trabalho da máquina, quando a mesma entra em operação. A cuba possui abas laterais e tampas, as quais evitam os respingos provocados pelo jato de alta pressão. Também foram acrescentados ao conjunto, um aparelho deionizador e um tambor de plástico para armazenagem da água deionizada. Uma bomba centrífuga, fixada na tampa, esvazia a cuba auxiliar e armazena a mistura de água mais abrasivo em outro tambor, para a decantação das partículas abrasivas. A Figura 1 ilustra esquematicamente essas adaptações.



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

Uma bomba submersa, posicionada dentro do tambor, que contém a mistura de água mais abrasivo (Figura 1), foi utilizada no processo de filtragem da água, para eliminar as micropartículas abrasivas não decantadas no fundo do tambor. A filtragem da água deionizada, após o processo, foi realizada por meio de um conjunto de dois filtros. O primeiro retém partículas de até 25  $\mu\text{m}$  e o segundo até 5  $\mu\text{m}$ . Sendo que as maiores são separadas, manualmente e retiradas, após um tempo para repouso no fundo do tambor, depois são colocadas para secagem, ao ar livre.

A Figura 2 ilustra esquematicamente um suporte para fixação das amostras adaptado no interior da cuba auxiliar; e outro para fixação do bico *venturi* e eletrodo ferramenta preso ao cabeçote da máquina de eletroerosão. A figura destaca ainda, a câmara de mistura do bico *venturi*, a mangueira de alimentação de abrasivo e o bico variador de pressão, usado para promover o jato de água pressurizada. Existe um conjunto de bicos que são trocados de acordo com a pressão de trabalho desejada.



**Figura 2.** Desenho esquemático da montagem do bico *venturi* no cabeçote da máquina.

Foram usinadas amostras em aço ABNT M2 de seção transversal de 12,7 mm e comprimento de 101,6 mm. Eletrodo ferramenta, em cobre eletrolítico (exceto na avaliação do material do eletrodo), no formato tubular com diâmetros de 19 mm (externo) e 6,3 mm (interno) com comprimento de 30 mm (exceto na avaliação do material do eletrodo, cujo diâmetro externo foi 12,7 mm). Sistema de lavagem sobre pressão com fluxo do fluido dielétrico passando pelo interior do eletrodo ferramenta.

## 2.2 Parâmetros avaliados

Foram realizados três ensaios, com duração de 5 minutos cada (exceto na avaliação da degradação), para as diferentes séries de testes, que foram divididas de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1.** Séries de testes dos parâmetros avaliados

Parâmetro	Abrasivo	Granulometria [mesh]	Pressões [bar]	Duração [min]
Material da ferramenta	SiC	600	80	5
Varição da pressão	SiC	600	80, 130, 170 e 240	5
Tamanho da partícula	SiC	400, 600, 1.000 e 2.000	240	5
Desempenho do abrasivo	SiC e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	600	240	5
Degradação do abrasivo	SiC e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	240	5, 4 e 3

Nas duas primeiras séries de testes para avaliar a degradação, foi possível realizar testes de 5 minutos. Nas séries intermediárias, terceira, quarta e quinta, a quantidade foi suficiente para 4 minutos apenas. Nas duas últimas (sexta e sétima) séries, 3 minutos.

A pressão foi observada por meio de manômetro instalado na saída da bomba hidrojateadora. A vazão de água fixada em 1000 litros por hora. A condutividade elétrica da água foi monitorada com condutivímetro, mantendo-se inferior a 10 µS.

## 2.3 Parâmetros de Entrada de Eletroerosão

O regime de usinagem escolhido foi de desbaste moderado com os parâmetros de eletroerosão compatíveis com os estabelecidos por Arantes<sup>(7)</sup> e são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Parâmetros de eletroerosão estabelecidos para regime de trabalho de desbaste moderado

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

A polaridade indica a posição dos eletrodos: ferramenta e peça, se anodo ou catodo, em relação às descargas elétricas, propiciando uma maior retirada de material de uma das superfícies, geralmente, do eletrodo peça, já que a ferramenta deve sofrer o menor desgaste possível.

A tensão para ionização foi mantida constante. A corrente de descarga consumida, no processo, influencia diretamente a qualidade da superfície e o rendimento da operação, no caso da máquina utilizada no experimento, o valor da corrente depende do parâmetro TS, regulado na mesma, ela (a corrente) vale 3 vezes TS. O DT está relacionado com o tempo de pausa,  $t_{OFF}$ , e tempo de duração do pulso,  $t_{ON}$ , ambos expressos em  $\mu s$ . A Equação (1) determina seu valor.

$$DT = \frac{t_{ON}}{(t_{ON} + t_{OFF})} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Foram ajustados, também, o *gap* e a sensibilidade do *gap*, para promover o melhor desempenho do processo junto aos demais parâmetros.

## 2.4 Principais Aspectos Observados

Foram avaliados os seguintes aspectos:

- TRM – caracteriza o volume do material removido da peça durante um determinado tempo em  $mm^3/min$ ;
- TD – representa o volume de material perdido pela ferramenta durante sua operação em determinado tempo em  $mm^3/min$ ;
- DVR – relaciona o volume do material perdido pela ferramenta em relação ao volume do material removido da peça, dado pela razão entre TD e TRM, normalmente expresso em valores percentuais;
- Integridade da camada refundida na peça, observada por meio de microscopia ótica; E
- Forma e dimensões das partículas abrasivas após uso, observadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).



### 3 RESULTADOS/DISCUSSÃO

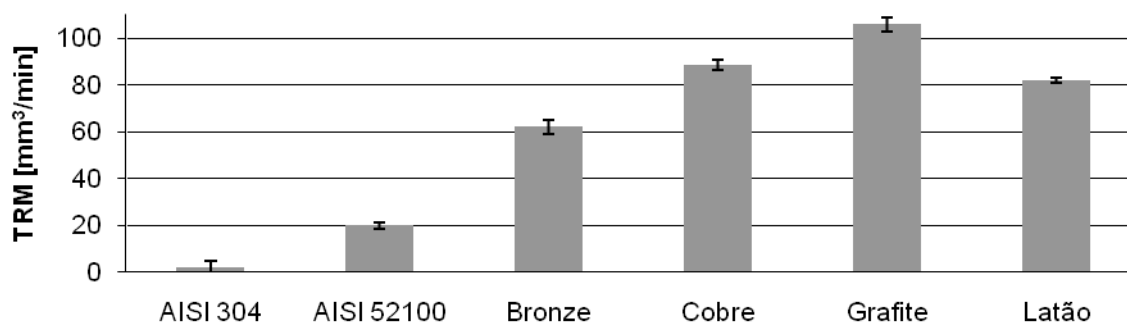
#### 3.1 Material do Eletrodo Ferramenta

Pelo fato do processo ser misto, ou seja, exigir do material do eletrodo características de boa condutividade elétrica e ponto de fusão (eletroerosão) e resistência mecânica (desgaste erosivo), selecionou-se materiais para a confecção de eletrodos que apresentassem essas características diferenciadas, como mostra a Tabela 3.

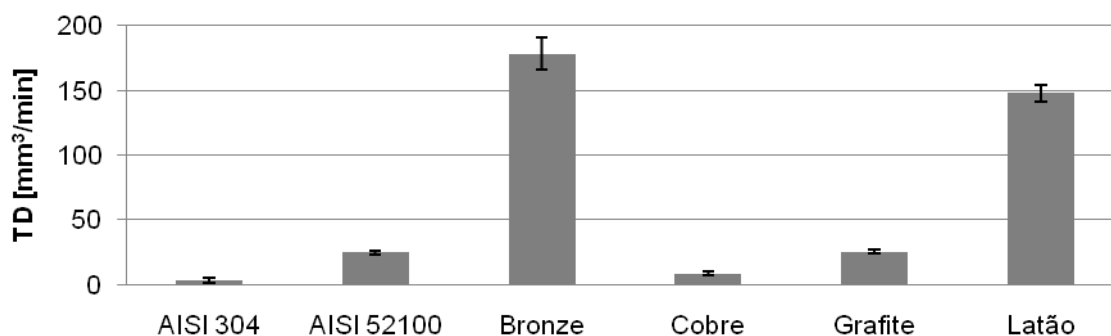
**Tabela 3.** Condutividade elétrica e propriedades mecânicas dos materiais dos eletrodos

Material do eletrodo	Condutividade elétrica [S.m/mm <sup>2</sup> ]	Ponto de fusão [°C]	Dureza [HV]	Tenacidade à fratura [MPa.m <sup>1/2</sup> ]
Aço AISI 52100	8,76	1.590	700	250
Aço AISI 304	2,8	1.500	325	280
Bronze	14,9	1.020	170	100
Cobre	61,7	1.080	240	90
Grafite	0,07	3.820	400	5
Latão	14,9	960	150	100

O desempenho dos eletrodos confeccionados com diferentes materiais e testados no processo em relação à TRM, TD e DVR é mostrado nas Figuras 3, 4 e 5.



**Figura 3.** TRM em processo AJEDM do aço AISI M2 com diferentes materiais de eletrodo.



**Figura 4.** TD em processo AJEDM do aço AISI M2 com diferentes materiais de eletrodo.

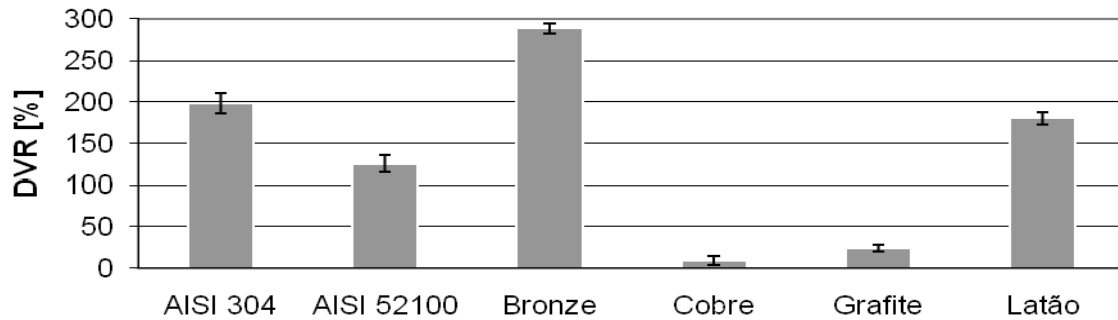


Figura 5. DVR em processo AJEDM do aço AISI M2 com diferentes materiais de eletrodo.

Os resultados mostram que a ação do desgaste erosivo não modifica o desempenho dos materiais tradicionalmente usados como eletrodos: cobre e grafite. A melhor condutividade elétrica do cobre e o alto ponto de fusão do grafite determinam os seus melhores desempenhos. A resistência mecânica, importante sob o ponto de vista do desgaste erosivo, ficou em segundo plano, como mostra o resultado do aço AISI 52100. Também a fragilidade ficou em segundo plano, já que o grafite apresentou um desempenho superior ao aço inoxidável AISI 304.

### 3.2 Efeito da variação da pressão

Os resultados de TRM, DVR e concentração de abrasivo em função da taxa de alimentação de abrasivo, referentes ao efeito da variação da pressão de trabalho, estão apresentados nos gráficos das Figuras 6 e 7. A Figura 6(a) ilustra os resultados da TRM e Figura 6(b) o DVR obtidos da usinagem com abrasivo SiC de granulometria 600 mesh nas pressões de 80, 130, 170 e 240 bar.

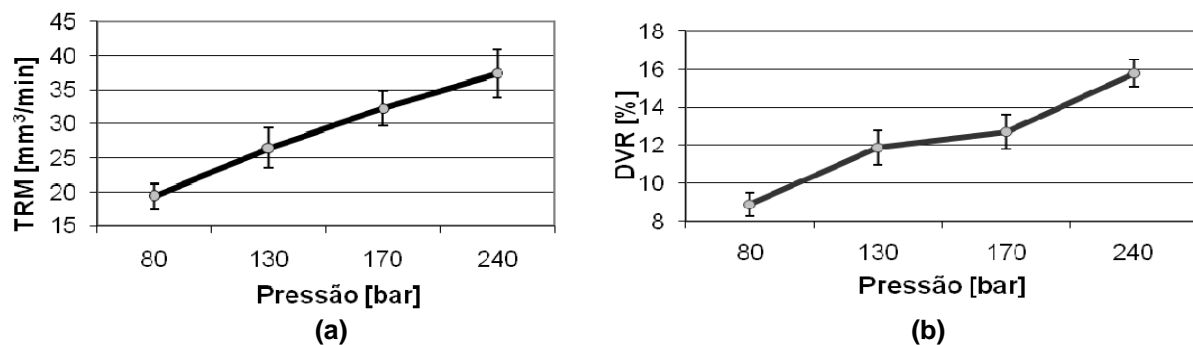
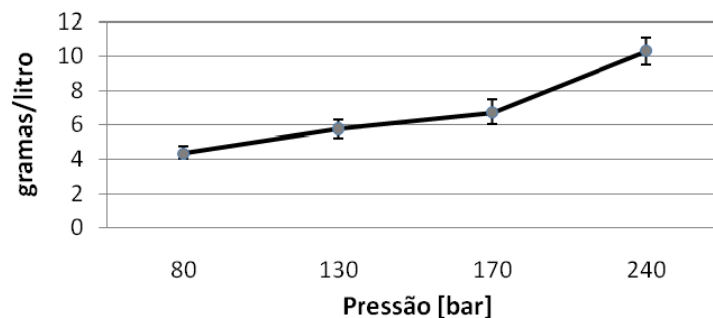


Figura 6. Resultados da TRM (a) e DVR (b) devido à variação da pressão.

Os resultados de TRM estão compatíveis com as verificações de Summers<sup>(8)</sup>, para o processo de Usinagem com Jato de Água Abrasivo, a TRM promovida pela erosão está diretamente relacionada à taxa de alimentação de abrasivo, quantidade do fluxo abrasivo e velocidade de impacto das partículas. A velocidade é modificada em relação à alta pressão de alimentação da água.

Os resultados do DVR mostram que o aumento da pressão exerce influência sobre o desgaste relativo de modo a aumentá-lo, à medida que a pressão aumenta. A elevação da pressão proporciona um acréscimo nas TRM e TD, devido ao fato de ambas as superfícies, do eletrodo e peça ficarem sujeitas à ação dos efeitos das descargas elétricas da eletroerosão, e do desgaste erosivo promovido pelas partículas abrasivas.

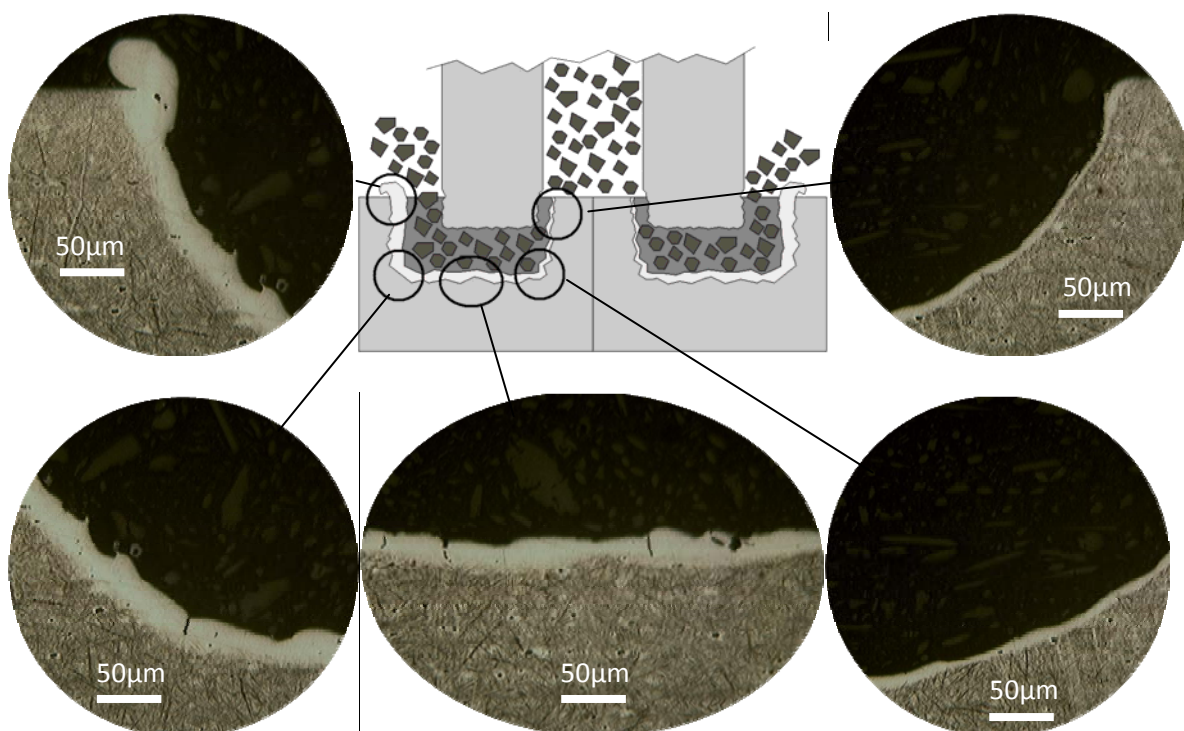
A Figura 7 ilustra os resultados da concentração do abrasivo SiC de granulometria 600 mesh, em função da variação da taxa de alimentação de abrasivo, que é modificada com a pressão de trabalho 80 bar, 130 bar, 170 bar e 240 bar.



**Figura 7.** Resultados da concentração de abrasivo devido à variação da pressão de trabalho.

Conforme foi observado por Momber e Kovacevic,<sup>(9)</sup> a pressão da bomba influencia a taxa do fluxo de alimentação de abrasivo. A quantidade que é sugada para dentro da câmara de mistura no bico *venturi*, depende da velocidade do fluxo de ar devido à pressão na mangueira de sucção de abrasivo, a sucção cresce com o aumento na pressão do jato de água, que arrasta o fluxo de partículas abrasivas.

A Figura 8 ilustra esquematicamente a variação na espessura da camada refundida, ao longo da seção transversal da amostra, com imagens de microscopia ótica (ataque com nital 2%) em detalhes, após a usinagem na pressão de 240 bar com SiC de granulometria 600 mesh.



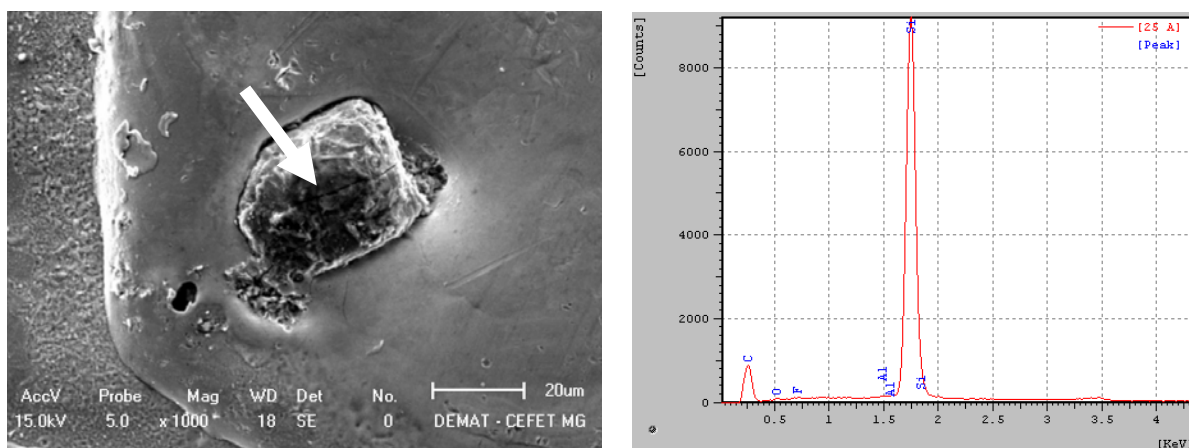
**Figura 8.** Variação na espessura da camada refundida ao longo da seção transversal da cavidade usinada com SiC 600 mesh na pressão de trabalho de 240 bar. Nital.

A camada refundida, produzida pela usinagem com SiC 600 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 abrasivo, na região do furo central do eletrodo ferramenta. A espessura cresce da região de entrada do jato até atingir a saída. Esta variação é provocada pelo fluxo do jato de água abrasivo sobre alta pressão, que acentua o efeito da lavagem, pelo fluido dielétrico, das micropartículas do material arrancado da superfície da peça pelas descargas elétricas.

A Figura 9 (a) ilustra uma imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura obtida da superfície usinada com abrasivo SiC 600 mesh na pressão de 240 bar. Nela, pode-se observar uma partícula abrasiva de SiC incrustada. A Figura 9(b) ilustra o espectro de EDS realizado nessa partícula abrasiva. A seta na Figura 9(a) indica a posição onde foi realizada a análise de EDS pontual.



(a) Imagem de MEV da superfície usinada.

(b) Imagem do espectro de EDS pontual.

**Figura 9.** Imagem de MEV da superfície usinada (a), imagem do espectro de EDS pontual na partícula abrasiva incrustada na superfície usinada (b), com SiC 600 mesh na pressão de 240 bar.

Os resultados mostraram que a superfície usinada não difere muito da usinada por eletroerosão convencional, ocorrem formação de poros, microtrincas 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 SiC 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.

### 3.3 Influência do Tamanho da Partícula Abrasiva de SiC

Os resultados de TRM e DVR, referentes à influência do tamanho da partícula abrasiva, estão apresentados nos gráficos das Figuras 10 e 11. A Figura 10 ilustra os resultados da TRM obtidos da usinagem com abrasivo SiC nas granulometrias 400 mesh, 600 mesh, 1.000 mesh e 2.000 mesh com pressão 240 bar.

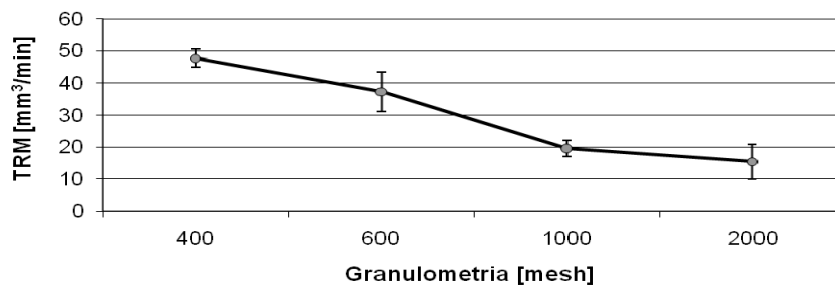


Figura 10. Resultados da TRM devido a influência do tamanho da partícula abrasiva de SiC.

Como observado por Benedict,<sup>(5)</sup> o tamanho da partícula do abrasivo tem influência sobre a remoção de material, maiores granulometria retiram maior quantidade de material.

Partículas maiores aumentam a TRM, provavelmente estas exercem um efeito erosivo mais acentuado na superfície da peça.

A Figura 11 ilustra os resultados do DVR obtidos da usinagem com abrasivo SiC nas granulometrias 400 mesh, 600 mesh, 1.000 mesh e 2.000 mesh com pressão 240 bar.

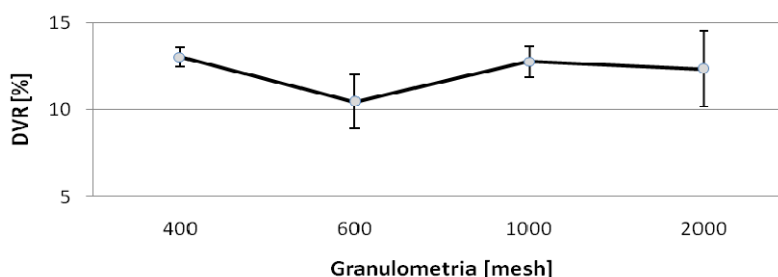


Figura 11. Resultados da DVR devido a influência do tamanho da partícula abrasiva de SiC.

Podemos observar que o desgaste volumétrico praticamente não sofre alterações significativas, devido à mudança na granulometria durante o processo, mantendo-se na faixa de 9% a 15%.

### 3.4 Desempenho dos abrasivos SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Os resultados de TRM, TD e DVR referentes ao desempenho dos abrasivos SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, estão apresentados nos gráficos das Figuras 12 e 13. A Figura 12(a) ilustra os resultados de TRM; e a Figura 12(b) de TD obtidos da usinagem com os dois tipos de abrasivos na granulometria 600 mesh com pressão 240 bar.

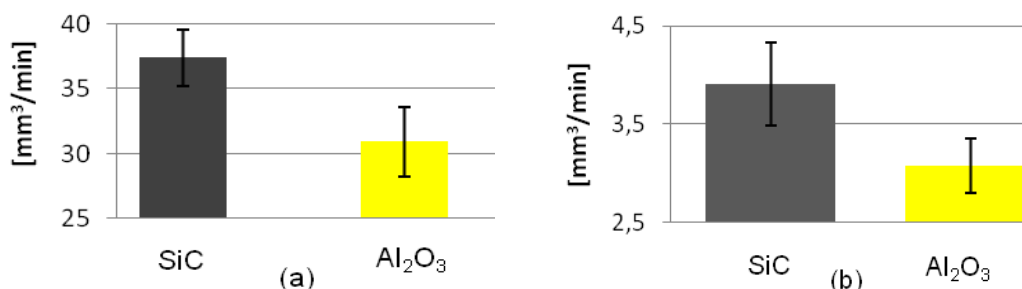
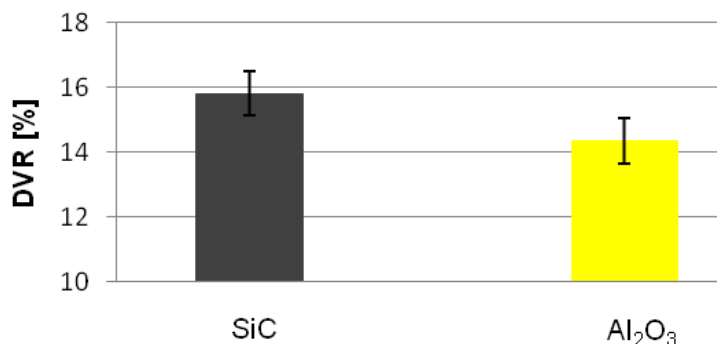


Figura 12. Resultados de TRM (a) e TD (b) devido a avaliação do desempenho dos abrasivos SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com granulometria de 600 mesh na pressão de 240 bar.

Os resultados demonstram que ambos os abrasivos (SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) comportaram-se de modo semelhante com relação ao desempenho quanto aos parâmetros de TRM e TD, com uma pequena vantagem para o SiC com relação à TRM, que é compensada a favor do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com relação ao menor desgaste da ferramenta promovido por esse.

A Figura 13 ilustra os resultados de DVR, obtidos, na usinagem, com os abrasivos (SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na granulometria de 600 mesh com pressão de 240 bar.



**Figura 13.** Resultados do DVR devido a avaliação do desempenho dos abrasivos SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com granulometria de 600 mesh.

Os resultados do DVR referentes ao desempenho dos abrasivos ficaram bem próximos, na faixa de 13,5 a 16,5%. O gráfico mostra que não ocorreu variação significativa.

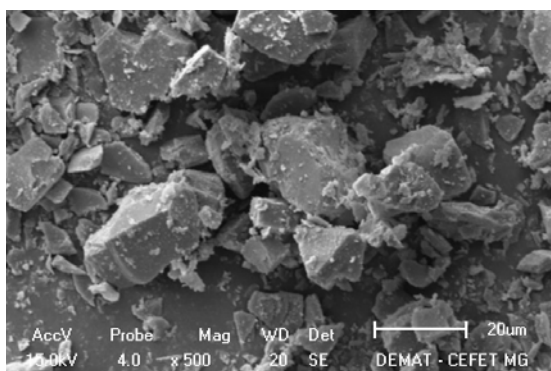
### 3.5 Degradação dos abrasivos SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

A Figura 14 ilustra o abrasivo SiC novo (a) e após a reciclagem no 7<sup>o</sup> teste (b).

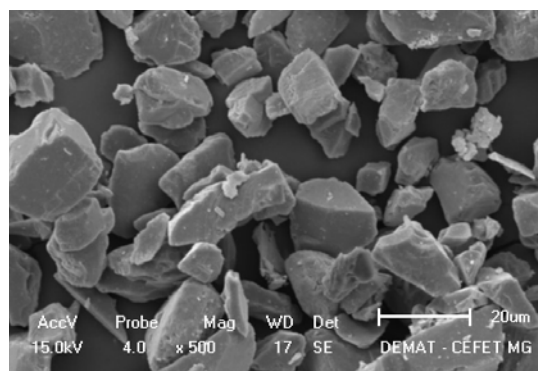
A Figura 15 ilustra o abrasivo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> novo (a) e após a reciclagem no 7<sup>o</sup> teste (b).

Nota-se, em ambos os casos, uma perda de granulometria.

De acordo com as observações de Babu e Chetty<sup>(10)</sup>, algumas partículas abrasivas sofrem desintegração durante o processo Usinagem com Jato de Água Abrasivo, devido: ao impacto que elas recebem, quando são arrastadas pelo fluxo do jato de água; ao choque de umas com as outras, dentro da câmara de mistura do bico *venturi*; e ao atingirem o material alvo.

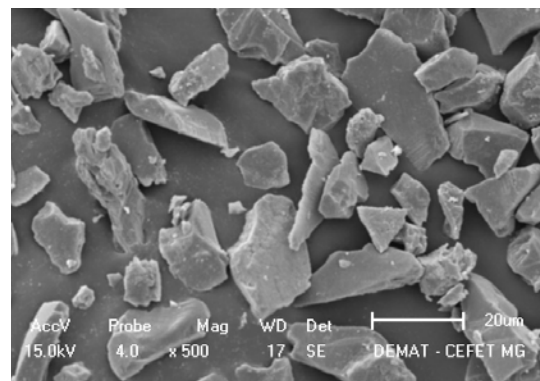
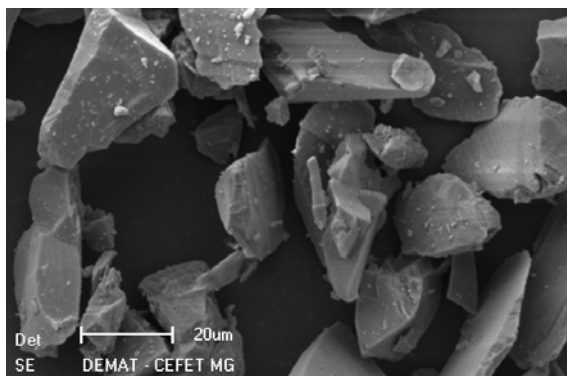


(a) SiC de 400 mesh novo.



(b) SiC de 400 mesh usado – 7<sup>o</sup> ensaio.

**Figura 14.** Imagens de MEV do abrasivo SiC com granulometria de 400 mesh novo (a) e usado após o 7<sup>o</sup> ensaio (b).



(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 400 mesh novo. (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 400 mesh usado – após 7<sup>o</sup> ensaio.  
**Figura 15.** Imagens de MEV do abrasivo  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com granulometria de 400 mesh novo (a) e usado após o 7<sup>o</sup> ensaio (b).

## 4 CONCLUSÕES

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

- Entre os materiais avaliados, o cobre eletrolítico e o grafite tiveram melhor desempenho na usinagem pelo processo híbrido.
- A variação da pressão do jato tem influência na TRM, TD e DVR, já que os mesmos têm seus valores aumentados com o acréscimo da pressão.
- A camada refundida, ao longo da seção transversal da cavidade usinada, não é uniforme; sua menor espessura ocorre na região de entrada do jato sobre pressão; e sua maior espessura fica na periferia da cavidade, na região de saída do jato.
- As partículas de 400 mesh promoveram maior valor de TRM, comparado as granulometrias de 600 mesh, 1.000 mesh e 2.000 mesh. O DVR, não sofreu mudanças significativas.
- O desempenho dos dois tipos de abrasivos ( $\text{SiC}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) avaliados foi bem semelhante, não ocorreu variações significativas para TRM, TD e DVR, durante a usinagem com partículas de 600 mesh na pressão de 240 bar.
- Durante o processo de reciclagem dos abrasivos ( $\text{SiC}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ocorreu fratura dos abrasivos com conseqüente perda de granulometria dos mesmos.
- A superfície usinada pelo processo híbrido não difere muito da usinada pela eletroerosão por penetração convencional, surgem poros, microtrincas e ocorre adesão de partículas refundidas, porém algumas partículas e/ou fragmentos de abrasivos ficaram incrustadas na superfície obtida pelo processo híbrido.

## Agradecimentos

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

## REFERÊNCIAS

- 1 KOZAK, J.; RAJURKAR, K. P. Hybrid Machining Process Evaluation and Development. Disponível em:  
<[http://www.mrl.columbia.edu/ntm/CrossProcess/hybrid\\_machining.htm](http://www.mrl.columbia.edu/ntm/CrossProcess/hybrid_machining.htm)> Acesso em: 20 set. 2008.

- 2 FAPEMIG, Fundação de Amparado a Pesquisa de Minas Gerais; UFU, Universidade Federal de Uberlândia (MG). RASLAN, A. A.; ARANTES, L. J. Método de Usinagem Híbrida Combinando Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva. BR n. PI0703468-7, 06 set. 2007, 24 mar. 2009.
- 3 MCGEOUGH, J. A. Advanced methods of machining. London: Chapman and Hall, 1988. cap. 6, p. 128-152.
- 4 FULLER, J. E. Electrical Discharge Machining, Metals Handbook. 9. ed. 1989. v. 16, p. 557-564.
- 5 BENEDICT, G. F. Nontraditional manufacturing processes. New York: Marcel Dekker, 1987. cap. 4, p. 37-51.
- 6 KANSAL, H. K.; SINGH, S.; KUMA, P. Technology and research developments in powder Mixed electric discharge machining (PMEDM). Journal of Materials Processing Technology. India, v. 184, p. 34-41, oct. 2006.
- 7 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.
- 8 SUMMERS, D. A. Waterjetting Technology. London: Chapman & Hall, 1995. cap. 10, p. 667-795.
- 9 MOMBER, A. W.; KOVACEVIC, R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. London: Springer, 1998. cap. 7, p. 195-229.
- 10 BABU, M. K.; CHETTY, O. V. K. A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining. Wear. v. 254, p. 763-773, feb. 2003.