

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DA PRESSÃO DO JATO DE ÁGUA ABRASIVO NO PROCESSO DE USINAGEM HÍBRIDA AJEDM COM ELETRODOS FERRAMENTA DE COBRE E GRAFITA

Aderci de Freitas Filho, aderciff@gmail.com¹

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com²

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br³

Isa Carla Nicesio, isanics@yahoo.com.br⁴

^{1,2,3,4} Centro Federal de Educação Tecnologia de Minas Gerais – CEFET-MG – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – CEP. 30480-000.

Resumo: Os processos de usinagem não convencionais são amplamente conhecidos e têm sua aplicabilidade e resultados divulgados em inúmeros trabalhos. O interesse na utilização de processos híbridos não convencionais abre novas frentes de pesquisa no campo da usinagem. No caso da Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) o processo é lento e a Taxa de Remoção de Material (TRM) é baixa se comparado aos processos convencionais como torneamento e fresamento. Os processos híbridos oferecem vantagens adicionais aos processos de fabricação, uma vez que tendem a unir vantagens dos processos constituintes em um só processo. Este trabalho avaliou a influência da pressão do jato abrasivo com eletrodos ferramentas de cobre e grafita na EDM por penetração. Os parâmetros avaliados foram TRM, Taxa de Desgaste (TD) e Desgaste Volumétrico Relativo (DVR). Como material das amostras foi usado o aço M2. Como fluido dielétrico água deionizada e como abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) com granulométrica de 600 mesh. Para a realização do processo híbrido uma hidrojateadora foi adaptada ao equipamento EDM possibilitando a aplicação de pressões de até 300bar. Por meio de microscopia óptica foi possível avaliar a influência da pressão na limpeza da cavidade usinada. A morfologia da superfície usinada e a incrustação do abrasivo na superfície foram avaliados por meio de MEV. O eletrodo ferramenta com polaridade positiva favoreceu o desempenho da TRM com menor TD do eletrodo ferramenta. Os resultados apresentam TRM consideravelmente superiores em comparação com o processo EDM tradicional e aumento da TRM duas vezes maior com a variação da pressão do jato de água abrasivo até 300bar em todos os materiais de eletrodo ferramenta avaliados. A grafita teve um desgaste muito superior ao cobre eletrolítico e cobre cromo no processo AJEDM. O desgaste volumétrico relativo teve um aumento conforme aumentou os valores de pressão, sendo este compensado pelo aumento da TRM, na grafita houve um desgaste volumétrico relativo superior ao cobre no processo AJEDM, com um aumento significativo de 75% na condição de 300bar.

Palavras-chave: Usinagem por Descargas Elétricas, AJEDM, Usinagem Híbrida, Óxido de Alumínio, Taxa de Remoção de Material.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de transformação metal mecânica está enfrentando grandes desafios, que vão desde o avanço dos materiais de difícil usinagem: superligas e materiais sinterizados, somado a elevados requisitos de projeto: dimensional, forma, qualidade superficial e custos. Os processos de usinagem convencionais já não atendem esses desafios como antes, sendo necessária a busca por processos não convencionais mais eficientes, que substituam de maneira viável estas demandas crescentes.

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 (Silva, 2013). Sua aplicação nas indústrias de confecção de moldes e ferramentas é extensa, devido à vantagem de usinar materiais de dureza elevada e alto grau de complexidade geométrica, diminuindo o custo e melhorando a qualidade das cavidades usinadas.

Segundo Erden e Kaftanoglu (1981) estima-se que apenas 10 a 15% do material fundido por descargas elétricas durante o processo é removido da superfície enquanto o restante re-solidifica, sendo assim, responsável pelo baixo rendimento do processo. O processo EDM, além da baixa velocidade de usinagem, produz alguns inconvenientes na superfície usinada como a formação da camada refundida, trincas e poros (crateras). Uma possibilidade de melhorar o desempenho do processo EDM e amenizar os defeitos superficiais é a combinação do mesmo com outros processos de fabricação.

Os processos híbridos têm se desenvolvido rapidamente nos últimos anos, com seu início na década de 1990, quando surgiram várias associações: processos não convencionais entre si e processos convencionais com não convencionais. Como exemplos, são inúmeros trabalhos sobre processos híbridos, dentre eles: Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) combinada com Usinagem por Ultra-som (USM), gerando o processo de Usinagem Ultrasônica por Descargas Elétricas (UEDM) (Lin; Yan; Huang, 2001); Usinagem Rotacional por Descargas Elétricas (REDM) (Mohan; Rajudurai; Satyanarayana, 2002); Usinagem Eletroquímica com Descargas Elétricas (ECSM), associando EDM com Usinagem Eletroquímica (Pandey, 1999).

Os Processos Híbridos de Usinagem trouxeram grandes melhorias à fabricação, como resultados dessas associações pode-se destacar: maiores velocidades de usinagem, melhoria da qualidade dimensional e geométrica das peças usinadas, diminuição de sobre-corte, melhoria significativa no acabamento superficial e em alguns casos diminuição da ZAC (Zona Afetada pelo Calor), menores comprimentos e concentração de trincas, além de menores espessuras de camadas refundidas em especial nas superfícies usinadas por EDM.

O processo híbrido de usinagem, denominado Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM), consiste na aplicação simultânea dos processos de EDM e Usinagem por Jato de Água Abrasivo (AWJM) (Raslan e Arantes, 2009). 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, e consequentemente, uma melhora na TRM. O jato de fluido sob pressão promove uma melhor eficiência no processo de limpeza, o que acarreta em maiores TRM's. Um ganho adicional na TRM é obtido com a ação das partículas abrasivas diluídas no fluido, que provocam desgaste erosivo e aumentam a eficácia na remoção de material (Raslan e Arantes, 2009).

2. METODOLOGIA

Para a realização dos testes foi necessário a adaptação do equipamento EDM integrando-o a um sistema de alta pressão (bomba hidrojetadora), além de um bico *venturi* para a mistura das partículas abrasivas no fluxo de água. Também com o objetivo de não agredir o equipamento EDM um reservatório auxiliar foi posicionado dentro do reservatório principal para receber o fluido abrasivo utilizado.

Cada teste teve duração de 5min e foram aplicadas pressões de 240, 260, 280 e 300bar. Essas pressões foram reguladas mediante abertura ou fechamento da válvula reguladora de pressão localizada no interior da hidrojetadora e conferida por meio de um manômetro instalado na mangueira de saída da máquina hidrojetadora. A regulação foi aproximada até atingir uma estabilidade na pressão desejada Fig. 1. A pressão do jato d'água abrasivo aumentava ao girar a válvula no sentido horário e vice-versa, no aperto máximo a pressão ficou em torno de 300bar.

Em todas as regulações, a pressão do jato d'água abrasivo foi aferida com o eletrodo ferramenta próximo da superfície da amostra, de maneira a diminuir ao máximo as variações decorrentes do efeito de perda de carga do fluido abrasivo no contato com a superfície do eletrodo peça.

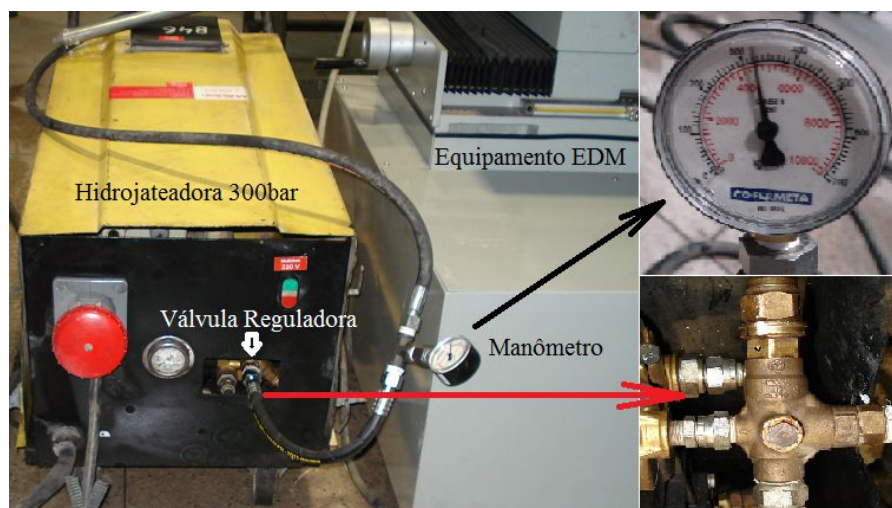


Figura 1. Manômetro para aferição e válvula reguladora de pressão da hidrojetadora

Uma bomba centrífuga foi instalada na tampa e acionada assim que o volume da cuba auxiliar cobria todo o eletrodo ferramenta, evitando que a água deionizada transbordasse da cuba auxiliar conforme Fig. 2.

Pelo fato do processo AJEDM ser misto, ou seja, exigir do material da ferramenta características de boa condutividade elétrica, ponto de fusão e resistência mecânica (desgaste erosivo), selecionou-se materiais para confecção dos eletrodos ferramenta que apresentassem essas características: cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita.

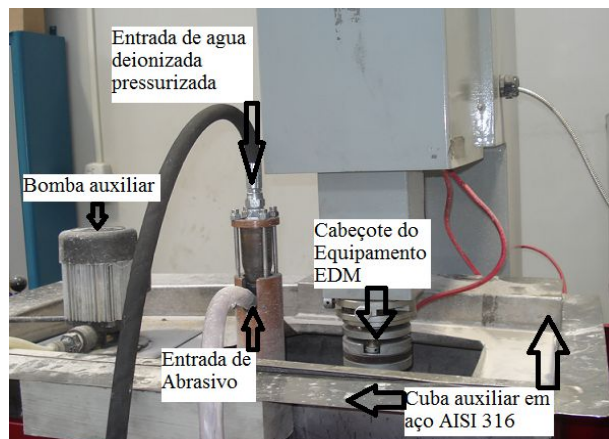


Figura 2. Adaptações do cabeçote do equipamento EDM e cuba auxiliar.

Segundo Silva (2013) a melhor condição é que os eletrodos ferramenta sejam confeccionados no formato tubular com diâmetro externo de 19 mm e furo central com 6,3 mm por 30 mm de comprimento, pois neste formato aproveita-se melhor a bitola comercial de 3/4" (19,05mm) e tem-se o melhor posicionamento do jato abrasivo no centro da cavidade usinada, melhorando a retirada da camada refundida Fig. 3 (a, b).

Para servir de eletrodo peça foi usado o aço AISI M2 tratado termicamente com dureza de 55HRC $\pm$ 2, aço ferramenta para trabalho a frio, conhecido comercialmente como "aço rápido". O aço AISI M2 é comumente usado como ferramenta de corte na indústria para confecção de estampos de corte, dobra e repuxo. As amostras foram adquiridas em bastões quadrados de $\frac{1}{2}$ " (12,70mm) por 4" (101,6mm) de comprimento Fig. 3 (c). A quantidade de amostras definida foi de três para cada pressão de trabalho e material do eletrodo ferramenta, para os eletrodos ferramentas cobre cromo e grafita, foram realizados os testes somente na pressão máxima da hidrojetadora (300bar).

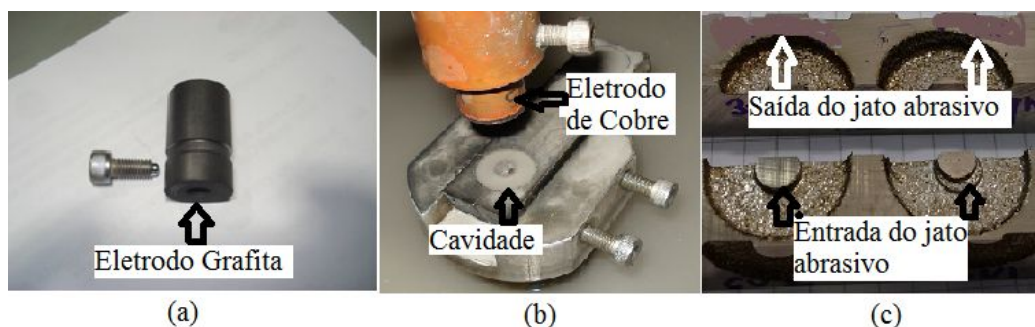


Figura 3 – Geometria dos eletrodos ferramentas de grafita (a), cobre eletrolítico (b) e eletrodo peça de aço AISI M2 (c).

Quanto ao abrasivo, foi utilizado o óxido de alumínio (Al_2O_3), granulometria de 600 mesh e pressão de trabalho variável de 240 a 300bar, com intervalos de aproximadamente 20bar.

Os testes tiveram duração de 5 minutos cada, executados três vezes para cada condição de pressão (240, 260, 280 e 300bar) somente para o eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico. A vazão de trabalho da hidrojetadora é de aproximadamente 22l/min, conforme informação do fabricante, com consumo de aproximadamente 110 litros por teste. A condutividade da água deionizada foi verificada com um condutivímetro, mantendo-se inferior a 10 μS . O consumo das partículas abrasivas foi mensurado com a pesagem antes e após cada um dos testes AJEDM.

2.1. Parâmetros do Processo Híbrido AJEDM

Os parâmetros de trabalho escolhidos para as séries de testes foram de desbaste severo. O ajuste da corrente foi o limite da máquina de EDM 40A. A corrente da descarga elétrica consumida no processo exerce influência direta na

qualidade da superfície e no rendimento da operação. Com isto, uma melhor qualidade implica em corrente baixa e pequena quantidade de material removido com tempo de usinagem maior. Neste caso, a qualidade da superfície dependerá das pressões de trabalho e da variação do material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita).

Os demais parâmetros de EDM são compatíveis com os estabelecidos por Arantes (2007) no desenvolvimento do processo AJEDM, exceto a corrente. A tabela 1 apresenta esses parâmetros.

Tabela 1. Parâmetros de ajuste do equipamento EDM.

Parâmetro	Valor
Polaridade do eletrodo ferramenta (cobre/grafita)	Positiva
Tensão (V)	120
Corrente (A)	40
T_{on} (μs)	200
T_{off} (μs)	20
DT (Duty Time %)	91
Gap	1,1
Afastamento periódico da ferramenta ou retração	2
Velocidade do servo	3

O ajuste do DT (*Duty Time*) está relacionado com os tempos de pausa (t_{off}) e duração do pulso (t_{on}). A Equação (1) expressa seu valor em porcentagem [%].

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

Onde: t_{on} = tempo de pulso [μs] e t_{off} = tempo de pausa [μs].

Foram ajustados os parâmetros de tempo de erosão, retração da ferramenta e intervalo de acordo com os parâmetros estabelecidos por Arantes (2007).

A polaridade foi definida como eletrodo ferramenta positiva e peça negativa, em relação às descargas elétricas, desta forma haverá maior TRM na peça e menor desgaste do eletrodo ferramenta.

2.2. Parâmetros Avaliados Após Processo AJEDM

Um dos aspectos importantes avaliados nos experimentos é a TRM, para esse controle o eletrodo peça foi pesado antes e após cada teste e a TD no eletrodo ferramenta da mesma forma. Foi utilizada uma balança eletrônica com capacidade máxima para 100 gramas e resolução de 10^{-4} g. O eletrodo ferramenta de grafita foi seco em forno durante 4 horas na temperatura de 300 °C aproximadamente, antes de cada pesagem, pois o mesmo é umedecido pelo fluido dielétrico após o teste (Silva, 2013).

A variação de massa foi determinada pela diferença entre as massas inicial e final, obtida da Eq. (2), expressa em gramas [g].

$$\Delta_m = m_i - m_f \quad (2)$$

Onde: m_i = massa inicial [g] e m_f = massa final do eletrodo [g].

Para quantificar a TRM foi utilizada a Eq. (3), expressa em milímetro cúbico por minuto [mm^3/min].

$$TRM = \frac{\Delta_m}{(0,00768) \cdot t} \quad (3)$$

Onde: Δ_m = variação de massa da peça [g], t = tempo de usinagem [min] e a constante 0,00768 g/mm^3 corresponde ao peso específico do aço AISI M2.

Para quantificar a Taxa de Desgaste (TD) do eletrodo ferramenta foi utilizada a Eq. (4), expressa em milímetro cúbico por minuto [mm^3/min].

$$TD = \frac{\Delta_m}{\rho \cdot t} \quad (4)$$

Onde: Δ_m = variação de massa da ferramenta [g], t = tempo de usinagem [min] e ρ [g/mm³] corresponde ao peso específico do material do eletrodo ferramenta que para o cobre $\rho = 0,008925\text{g/mm}^3$ e para a grafita $\rho = 0,001672\text{g/mm}^3$.

A Equação (5) foi usada para determinar o Desgaste Volumétrico Relativo (DVR), que é a relação entre TD e TRM expresso em porcentagem [%].

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (5)$$

A integridade das superfícies usinadas foi verificada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), observando a morfologia da região usinada e a presença de abrasivo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da TRM com a variação da pressão do jato d'água abrasivo e eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico são mostrados na Fig. 4, foram testadas pressões de 240, 260, 280 e 300bar com o abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3).

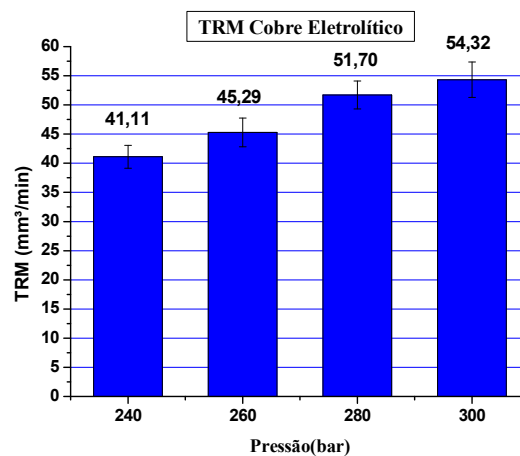


Figura 4. Evolução da TRM no processo AJEDM com pressões de 240, 260, 280 e 300bar, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh no aço AISI M2 e fluido dielétrico água deionizada.

A variação da pressão exerce influência direta na TRM, comprovando resultados obtidos por Silva (2013), onde os valores à 240bar (limite da pesquisa) são muito próximos. A taxa de alimentação de abrasivos e a quantidade do mesmo no fluxo mostram aumento do consumo de abrasivo em relação à variação da pressão.

Segundo Arantes (2007), quanto maior a pressão maior será a remoção das partículas erodidas, o que aumenta a velocidade de usinagem. Este aumento da pressão tornou mais efetiva a ação da lavagem das micropartículas fundidas e resolidificadas.

A Figura 5 avalia os resultados de TD do cobre eletrolítico como material do eletrodo ferramenta com a variação da pressão de trabalho entre 240 e 300bar com intervalos de 20bar do processo híbrido AJEDM.

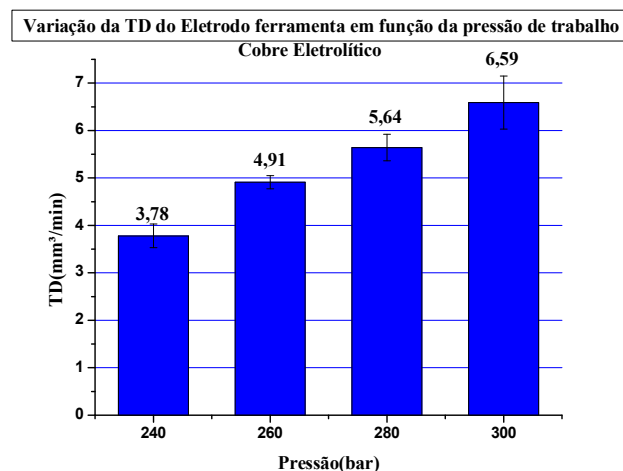


Figura 5. Evolução da TD no processo AJEDM com pressões de 240, 260, 280 e 300bar, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico e fluido dielétrico água deionizada.

A avaliação na TD do eletrodo ferramenta cobre eletrolítico demonstra que a pressão de trabalho influencia diretamente no consumo do eletrodo. Segundo Arantes (2007) que estudou o efeito sinérgico das partículas abrasivas no processo AJEDM com pressão de trabalho de 100bar e concluiu que essa pressão é insuficiente para provocar erosão sem o auxílio das descargas elétricas, verificou-se que no caso de pressões superiores a 100bar e com uso de descargas elétricas, há sim uma tendência ao desgaste mais acentuado, resultando em valores próximos a 75% em uma variação de 240 a 300bar, no entanto, nesta análise não se pode mensurar o quanto deste desgaste é relativo à pressão de trabalho e quanto é oriundo das descargas elétricas normais do processo EDM. Ainda Segundo Arantes (2007), a adição de partículas abrasivas, no processo AJEDM, aumenta a energia de impacto do fluido dielétrico contra a superfície, melhorando a velocidade de usinagem. Porém, sob pressões baixas tem-se pouca eficácia na ação erosiva das partículas, devido à baixa energia de impacto.

A Figura 6 avalia os resultados de DVR do cobre eletrolítico como material do eletrodo ferramenta com a variação da pressão de trabalho entre 240 e 300bar com intervalos de 20bar do processo híbrido AJEDM.

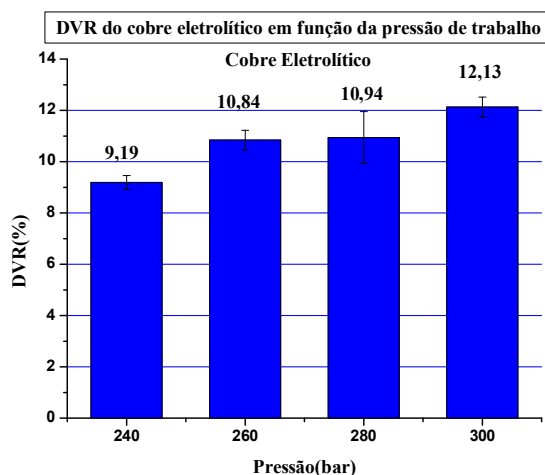


Figura 6. Evolução da DVR no processo AJEDM com pressões de 240, 260, 280 e 300bar, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh no eletrodo ferramenta cobre eletrolítico e fluido dielétrico água deionizada.

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, mas não se pode afirmar estatisticamente um aumento considerável, o que se pode concluir é que há uma tendência de aumento sutil.

A tabela 2 ilustra os valores de TRM's, TD's e DVR's obtidos na usinagem com água deionizada como fluido dielétrico, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh, nas pressões de 300bar (limite da hidrojateadora no processo híbrido AJEDM) e pressão de trabalho normal do Equipamento EDM (1bar) variando o material do eletrodo ferramenta, cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita.

Tabela 2. Variação dos valores de TRM's, TD's e DVR's nos processos AJEDM (pressão de 300bar) e EDM (pressão de 1bar).

Material eletrodo ferramenta	Processo AJEDM Pressão 300bar			Processo EDM baixa pressão		
	TRM (mm^3/min)	TD (mm^3/min)	DVR (%)	TRM (mm^3/min)	TD (mm^3/min)	DVR (%)
Cobre eletrolítico	$54,32 \pm 3,04$	$6,59 \pm 0,56$	$12,13 \pm 0,39$	$25,96 \pm 1,11$	$4,25 \pm 0,24$	$16,39 \pm 1,28$
Cobre cromo	$58,03 \pm 2,54$	$7,51 \pm 1,25$	$12,91 \pm 1,74$	$23,33 \pm 1,32$	$4,24 \pm 0,29$	$18,18 \pm 1,42$
Grafita	$93,44 \pm 4,59$	$20,64 \pm 1,23$	$22,09 \pm 0,81$	$38,02 \pm 1,55$	$5,65 \pm 0,27$	$14,88 \pm 1,14$

A Figura 7 ilustra os resultados da TRM nas pressões de 300bar (limite da hidrojateadora no processo híbrido AJEDM) e pressão de trabalho normal do Equipamento EDM (1bar) variando o material do eletrodo ferramenta, cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita.

Os resultados da TRM apresentados na Fig. 7 abaixo mostram clara tendência de melhoria no desempenho do processo híbrido AJEDM em relação ao processo EDM nas mesmas condições. O processo híbrido AJEDM configurado com os mesmos parâmetros do processo EDM teve um ganho superior a 100% em todos os materiais avaliados, com destaque para a grafita. Com relação aos materiais do eletrodo ferramenta não se nota grande diferença entre o cobre eletrolítico e o cobre cromo tanto em alta como em baixa pressão (avaliados separadamente), mantendo-se dentro do limite de erro estatístico. Segundo Silva (2013) entre o cobre e a grafita como eletrodos ferramenta, a grafita

supera com grande margem o desempenho do cobre no processo de desbaste, cabendo a análise da TD entre os dois para melhor avaliar os resultados e aplicabilidade do processo híbrido AJEDM na grafita.

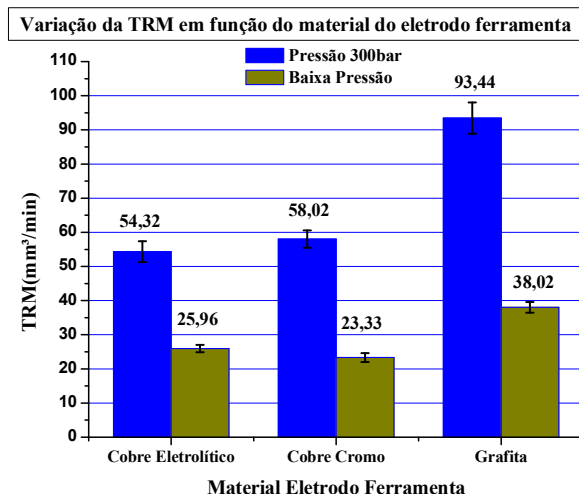


Figura 7. Evolução da TRM no processo AJEDM com pressão de 300bar comparado ao processo EDM com baixa pressão no eletrodo peça AISI M2, fluido dielétrico água deionizada variando o material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita).

As propriedades mecânicas não demonstram influência sobre o desempenho dos materiais para eletrodo ferramenta, o que continua prevalecendo são os parâmetros tradicionais de seleção, ou seja, o ponto de fusão elevado (grafite) e uma alta condutividade elétrica (cobre).

Os resultados da TD obtidos na usinagem com água deionizada como fluido dielétrico, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh, nas pressões de 300bar (limite da hidrojetadora no processo híbrido AJEDM) e pressão de trabalho normal do equipamento EDM (1bar) variando o material do eletrodo ferramenta, cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita é mostrada na Fig. 8.

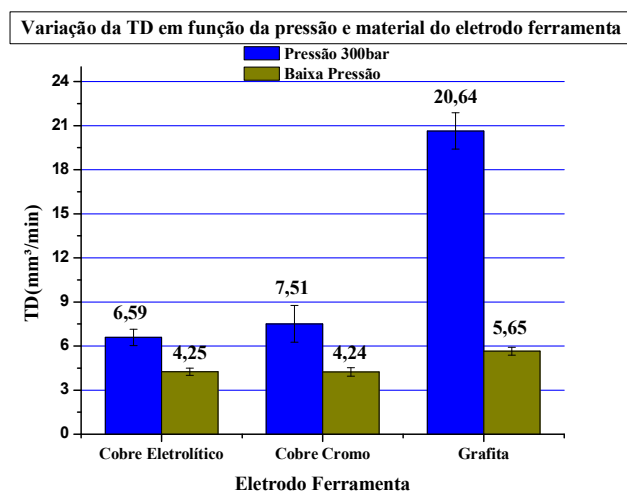


Figura 8. Evolução da TD no processo AJEDM com pressão de 300bar comparado ao processo EDM com baixa pressão no aço AISI M2, fluido dielétrico água deionizada variando o material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita).

A TD nos diversos materiais analisados para eletrodo ferramenta seguiu a mesma tendência da TRM, muito próxima no cobre eletrolítico em relação ao cobre cromo tanto em alta como em baixa pressão (analisados separadamente) e muito discrepante na grafita quando se compara a baixa e alta pressão. A grafita por ser um material muito frágil, sofre maior ação do impacto do jato abrasivo (90°). Segundo Summers (1995), em materiais frágeis, como os cerâmicos, a resposta à falha vai crescendo com o aumento do ângulo de ataque até atingir o ângulo crítico, nesse caso 90° . Em contraste, os materiais dúcteis, como a maioria dos metais, a taxa de erosão aumenta até atingir um ângulo de aproximadamente 20° , porém, para valores de ângulos maiores que esse a taxa de desgaste diminui, o que mostra a redução do efeito do impacto das partículas abrasivas. Segundo Mcgeough (1988) cobre e grafite tem desgaste parecido no processo EDM, justificando os resultados em baixa pressão, e sendo extremamente diferentes no processo AJEDM.

Os resultados da DVR obtidos na usinagem com água deionizada como fluido dielétrico, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh, nas pressões de 300bar e pressão de trabalho normal do equipamento EDM (1bar) variando o material do eletrodo ferramenta, cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita é mostrada na Fig. 9.

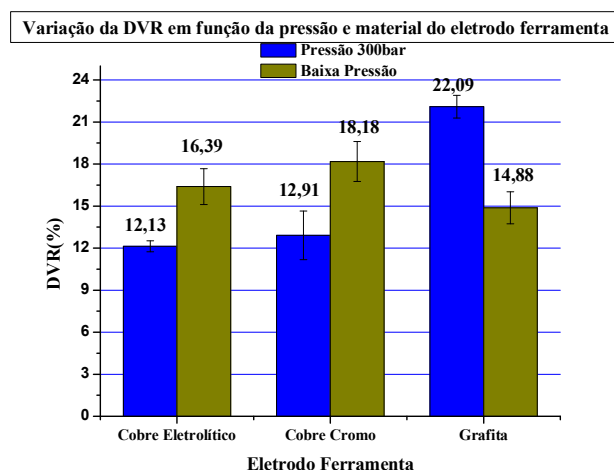


Figura 9. Variação da DVR no processo AJEDM com pressão de 300bar comparado ao processo EDM com baixa pressão no eletrodo peça AISI M2, fluido dielétrico água deionizada variando o material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita).

O DVR em baixa pressão teve pouca variação nos valores nominais, mas muito elevado se comparado a alta pressão. Na alta pressão o desgaste do eletrodo ferramenta é compensado pela velocidade de usinagem, pois melhora a TRM, já o eletrodo ferramenta de grafita sofre um desgaste erosivo muito superior aos demais materiais, este desgaste é explicado por sua fragilidade, que ao receber o impacto do jato d'água abrasivo em um ângulo crítico de 90° aumenta significativamente este processo erosivo Summers (1995).

As superfícies foram analisadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura obtidas na usinagem com água deionizada como fluido dielétrico, abrasivo óxido de alumínio (Al_2O_3) de 600 mesh, nas pressões de 300bar e pressão de trabalho normal do equipamento EDM (1bar) variando o material do eletrodo ferramenta, cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita é mostrada na Fig. 10.

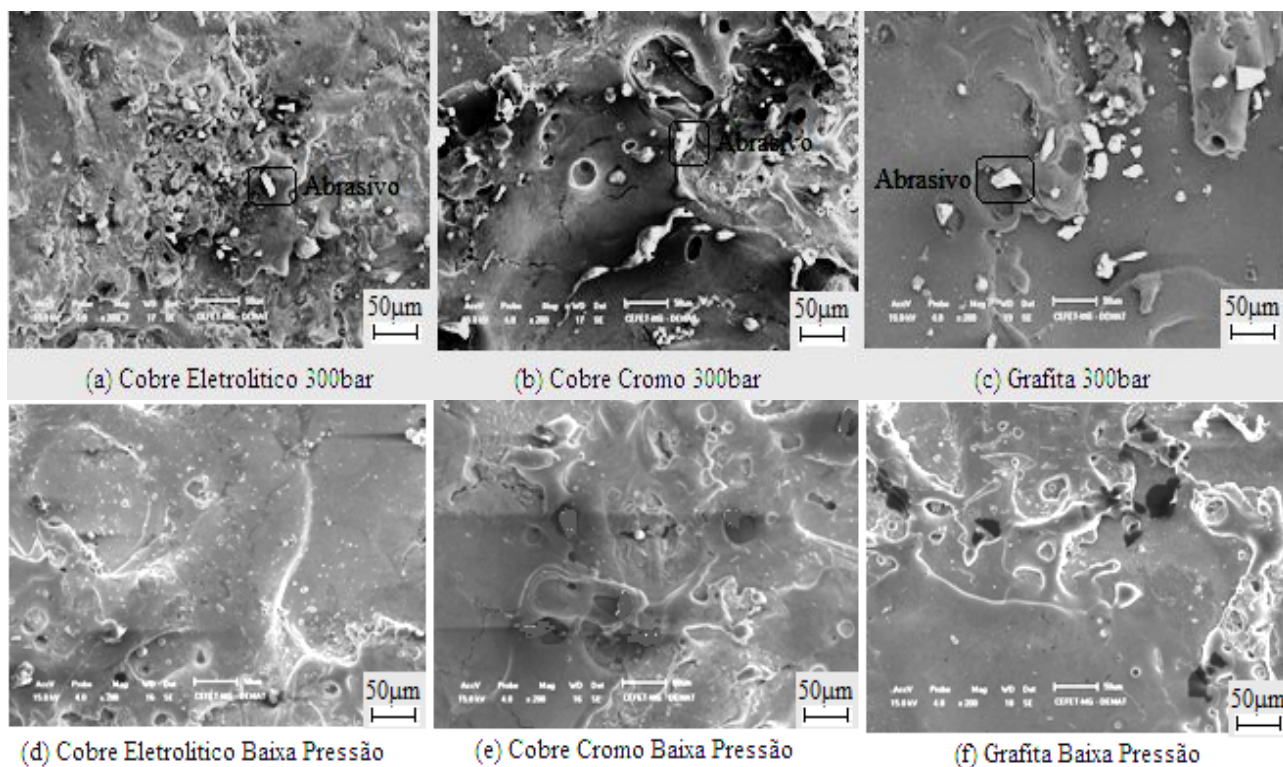


Figura 10. Imagens de MEV (200x) das superfícies usinadas no processo AJEDM com pressão de 300bar (imagens a, b, c) comparadas ao processo EDM de baixa pressão (imagens d, e, f), fluido dielétrico água deionizada variando o material do eletrodo ferramenta (cobre eletrolítico, cobre cromo e grafita).

Os resultados de imagem das superfícies usinadas no processo AJEDM mostram que há a presença de material refundido e a incrustação de abrasivos segundo Silva (2013), o que é notado nas imagens (a), (b), (c), porém na superfície usinada com eletrodo ferramenta de grafita os poros e trincas não são aparentes comparadas ao cobre eletrolítico e cobre cromo, segundo Mcgeough (1988) os efeitos sobre a superfície no processo de usinagem EDM tem influencia direta das descargas elétricas, fluido dielétrico e material do eletrodo ferramenta, como o fluido dielétrico é a água deionizada em todos os testes e os parâmetros de usinagem foram mantidos iguais, as diferenças visíveis podem estar relacionadas ao material do eletrodo ferramenta.

As imagens da usinagem EDM (d), (e), (f), são bem parecidas com a usinagem AJEDM, mostrando crateras, poros e material refundido, diferenciando apenas na incrustação de fragmentos de abrasivo

4. CONCLUSÕES

A variação da pressão tem influencia na taxa de remoção de material, já que a mesma tem seu valor gradualmente aumentado conforme há acréscimo da pressão.

O processo híbrido AJEDM apresenta TRM duas vezes maior que o processo EDM na pressão de 300bar, em todos os materiais de eletrodo ferramenta avaliados.

Entre os materiais avaliados a grafita se destaca com TRM três vezes maior que os demais, cobre eletrolítico e cobre cromo à pressão de 300bar.

A taxa de desgaste do eletrodo ferramenta também é influenciada pelo aumento da pressão, já que a superfície da ferramenta também sofre o ataque das partículas abrasivas que é evidenciado na pressão de 300bar.

A grafita teve desgaste superior ao cobre eletrolítico e cobre cromo no processo AJEDM, explicado por ser um material frágil, muito atacado pelo jato abrasivo no ângulo crítico de 90°.

O desgaste volumétrico relativo tem um aumento conforme aumenta os valores de pressão, sendo este compensado pelo aumento da TRM.

A grafita teve um desgaste volumétrico relativo superior ao cobre eletrolítico e cobre cromo no processo AJEDM, com um aumento significativo de 75% na condição de 300bar, porém ainda viável no processo de desgaste severo.

O aumento da TRM com o jato abrasivo no centro do eletrodo tubular foi significativo, mas não se pode garantir a mesma eficiência com formas complexas e condições do jato abrasivo diferentes.

A superfície usinada pelo processo AJEDM não difere muito da usinada pela EDM por penetração convencional, havendo poros, microtrincas, crateras e material refundido, porem alguns fragmentos de partículas do abrasivo ficam aderidas na superfície obtida pelo processo AJEDM.

A superfície usinada com eletrodo ferramenta de grafita apresentou melhores condições em relação a poros e microtrincas em comparação com cobre eletrolítico e cobre cromo.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CEFET-MG por disponibilizar os recursos necessários para realização desta pesquisa, e possibilitar a participação nesse congresso.

6. REFERÊNCIAS

- ARANTES, L. J., 2007, “Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM)”. 117f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- ERDEN, A.; KAFTANOGLU, B., 1981, “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.
- LIN, Y. C., YAN, B. H., HUANG, F. Y., 2001, “Surface modification of Al–Zn–Mg aluminum alloy using the combined process of EDM with USM”. *Journal of Materials Processing Technology*, Dortmund, v. 115, n. 3, p. 359-366.
- MCGEOUGH, J. A., 1988, “Advanced methods of machining”. Chapman and Hall, London, p. 128-152.
- MOHAN, B.; RAJUDURAI, A.; SATYANARAYANA, K. G., 2002, “Effect of SiC and rotation of electrode on electric discharge machining of Al-SiC composite”. *Journal of Materials Processing Technology*, Chennai, v. 124, n. 3, p. 297-304.
- PANDEY, A., 1999, “Current research trends in variants of electrical discharge machining”: A review. *International Journal of Engineering Science and Technology*, Agra, v. 2, n. 6, p. 2171-2191.
- RASLAN, A. A.; ARANTES, L. J., 2009, “Método de usinagem híbrida combinando descargas elétricas e erosão abrasiva”. Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. Projeto n. PI0703468-7.
- SILVA, E. R., 2013, “Otimização e Avaliação dos parâmetros de influência do processo AJEDM”. 106f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SUMMERS, D. A., 1995, “Waterjetting technology”. Chapman & Hall, London, 882 p.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF CHANGES OF ABRASIVE WATER JET PRESSURE IN PROCESS MACHINING HYBRID AJEDM WITH COPPER ELECTRODES TOOL AND GRAPHITE

Aderci de Freitas Filho, aderciff@gmail.com¹

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com²

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br³

Isa Carla Nicesio, isanics@yahoo.com.br⁴

^{1,2,3,4} Federal Center of Technological Education of Minas Gerais– CEFET-MG – Av. Amazonas, 5253 – Nova Suíça – Belo Horizonte – MG – CEP. 30480-000.

Abstract. *Unconventional machining processes are widely known and have their applicability and results reported in numerous studies. The interest in the use of non-conventional hybrid processes open new research in the field of machining fronts. In the case of Electrical Discharge Machining (EDM) process is slow and the material removal rate (MRR) is low compared to conventional processes such as turning and milling. Hybrid processes offer additional advantages to manufacturing processes, since they tend to combine advantages of the constituent processes in a single process. This study evaluated the influence of abrasive jet pressure with tools electrodes of copper and graphite in EDM by penetration. The parameters evaluated were MRR, wear rate (WR) and Relative Volumetric wear (RVW). As the sample material was used the M2 steel. As dielectric fluid deionized water and abrasive aluminum oxide (Al₂O₃) with particle size 600 mesh. To carry out the hybrid one High pressure washer process was adapted to EDM equipment enabling the application of pressures up to 300bar. By optical microscopy it was possible to evaluate the influence of pressure in cleaning the machined cavity. The morphology of the machined surface and the abrasive surface encrustation were evaluated by SEM. The electrode positive polarity with tool favored the performance of MRR less WR tool electrode. The results show considerably higher TMR compared with traditional EDM process and increased MRR twice with variation of abrasive water jet pressure of up to 300bar at all electrode materials evaluated tool. Graphite had a much higher wear electrolytic copper and copper chromium in AJEDM process. The relative volumetric wear was increased as increase the pressure values, and this is compensated by increased MRR, the graphite was on a volumetric wear superior to copper in AJEDM process, with a significant increase of 75% in the condition of 300bar.*

Keywords: *Electrical Discharge Machining, AJEDM, hybrid machining, aluminum oxide, Material Removal Rate.*