



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE FADIGA EM AÇO ABNT 4140 COM MATRIZ DE COBRE

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹

Aderci de Freitas Filho, adercaff@gmail.com¹

Carlos Eduardo, carloseduardo@deii.cefetmg.br¹

Isa Carla Nicesio, isanics@yahoo.com.br¹

Ítalo Bruno dos Santos, italobsantos@gmail.com²

José Rubens Gonçalves Carneiro, joserub@pucminas.br²

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30535-901

Resumo: O processo de nitretação convencional possibilita o aumento de resistência à fadiga e vida útil de componentes metálicos, devido a tensões compressivas induzidas na superfície. O processo de Nitretação por Descargas Elétricas (NDE), consiste na Usinagem por Descargas Elétricas (EDM), utilizando como fluido dielétrico água deionizada misturada com uréia como fonte de nitrogênio. O objetivo deste trabalho consiste na confecção de matriz metálica fabricada em cobre eletrolítico utilizada como eletrodo ferramenta e investigar a possibilidade de aplicação desta matriz no processo NDE. A cavidade da matriz foi construída utilizando tecnologias de fabricação CAD/CAM/CNC (Computer Aided Design-Drafting/Computer Aided Manufacturing/Computerized Numerical Control) e aplicada no processo EDM com o intuito de usinar e nitretar simultaneamente. Os testes NDE foram realizados em uma máquina de EDM por penetração convencional, com algumas adaptações. Como eletrodo peça, foi utilizado o aço ABNT 4140. As técnicas de caracterização usadas foram as de análise micrográfica via microscopia óptica (MO), microdureza Vickers e análise morfológica via microscópio eletrônico de varredura (MEV). A presença da camada nitretada foi observada por meio das imagens de MO e evidenciada com o ganho no valor de dureza em relação ao substrato.

Palavras-chave: Aço ABNT 4140, CAD/CAM/CNC, Cavidade da matriz, EDM, Nitretação por Descargas Elétricas.

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*), também conhecido como eletroerosão, é baseado no princípio da remoção de material por efeito térmico através de descargas elétricas. Este processo é muito utilizado na fabricação de peças compostas por materiais que apresentam difícil usinabilidade pelos processos convencionais e também na obtenção de formas complexas com elevada precisão dimensional. Isso se deve ao fato de que a eliminação do material por faiscamento exige basicamente o movimento de penetração do eletrodo que assegura a continuidade na remoção do material (Souza, 2013).

Segundo McGeough (1988), o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM), é definido como o bombardeamento de íons e elétrons contra a superfície da peça que promove a retirada de material por sublimação, deixando uma cavidade com o formato do negativo do eletrodo ferramenta. Esse processo, considerado como processo não convencional de usinagem, tem se destacado como um dos mais utilizados na fabricação de matrizes e moldes metálicos, devido à complexidade geométrica e de fabricação desses moldes e matrizes. A indústria de moldes para transformação de plásticos emprega amplamente as técnicas de fabricação auxiliadas por sistemas CAD/CAM para atender a esta demanda (Souza, 2013).

Segundo Both *et al.* (2010) o desgaste e falhas de matrizes de forjamento não apenas reduzem a vida útil das ferramentas, como também podem resultar em produtos com condições superficiais intoleráveis. Yan *et al.* (2005) e Camargo *et al.* (2009) investigaram o uso de EDM com solução de água deionizada e uréia como fluido dielétrico para

avaliar as modificações ocorridas durante a usinagem de titânio. Seus resultados evidenciaram a formação de nitreto de titânio, com modificações superficiais nos corpos de prova, refletidas, principalmente, na melhoria da resistência ao desgaste, atrito e aumento de microdureza superficial.

Esta técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio de descargas elétricas também foi pesquisada, por Raslan, Santos e Silva (2012); Silva (2012); Santos (2013), Raslan (2015), onde se destaca a relevância tecnológica da pesquisa, pelo pedido de depósito de patente feito por Raslan *et al.* (2012). Os autores desenvolveram um método de nitretação por meio da usinagem com descargas elétricas (NDE) que consiste no emprego de descargas elétricas geradas em equipamentos EDM por penetração, a fio (WEDM - *Wire EDM*), por jato de fluido (FJEDM - *Fluid Jet EDM*) e jato de fluido abrasivo (AJEDM - *Abrasive Jet EDM*). O processo consiste na utilização de uma solução de água deionizada e uréia como fluido dielétrico. Ao se passar corrente elétrica entre os eletrodos ferramenta e peça, forma-se um canal de plasma enriquecido com nitrogênio proveniente da uréia. Ao ocorrer a descarga, o nitrogênio é incorporado à superfície da peça, formando nitretos e, consequentemente, o endurecimento dessa superfície. O processo alia a nitretação ao processo de usinagem. Além disso, os autores concluíram que é um processo rápido e pouco oneroso, se comparado aos métodos tradicionais de nitretação.

Santos (2013) conduziu experimentos em três amostras de aço ABNT 4140, para tentar explicar se o endurecimento ocorrido na zona refundida (ZR) e na zona nitretada (ZAC) foi pelo efeito da nitretação ou pela têmpera. Inicialmente as amostras foram submetidas a tratamento térmico de têmpera em água, obtendo microdureza Vickers de 671 ± 55 (25 gf, 15 s, três resultados). Em seguida foi efetuado EDM em água deionizada em uma das amostras temperadas. Em outra amostra, aplicou-se o processo NDE. E para a outra o revenimento a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ por uma hora em forno mufla. Após o processo EDM e NDE, as amostras foram também submetidas ao mesmo processo de revenimento. Ao analisar a microdureza Vickers final nas três condições investigadas, obteve para as amostras apenas temperadas e revenidas valores de 312 ± 13 , para as amostras NDE 529 ± 26 na ZR, 422 ± 27 na ZAC, e para as amostras EDM 236 ± 14 na ZR e 280 ± 12 na ZAC, respectivamente médias e desvios padrões dos valores de microdureza Vickers (25 gf, 15 s, três resultados). O pesquisador observou que houve eliminação do efeito da têmpera na amostra NDE e que houve, de fato, uma contribuição de nitretos para o aumento de dureza das ZR e ZAC desta, sendo evidenciado por meio de uma análise de difração de raios x (DRX) *Bragg-Brentano* ou θ - 2θ , que os nitretos desta amostra continuaram presentes após o revenimento. Observou ainda que o mesmo não ocorreu para as amostras EDM, onde houve redução significativa de dureza. Ainda, segundo o pesquisador, a hipótese de haver nitrogênio nas camadas ZR e ZAC é pertinente, uma vez que existe uma fonte do mesmo, ou seja, a uréia diluída na água deionizada, usada como fluido dielétrico. O modelo proposto para nitretação por EDM se baseia na inserção do nitrogênio na superfície do aço por implantação iônica, o qual justifica o fenômeno do enriquecimento superficial, afirmam Raslan *et al.* (2012); Santos (2013); Raslan (2015).

O processo EDM com cavidade emprega um eletrodo com a cópia fiel do produto a ser usinado. Este eletrodo pode ser de cobre ou grafita, dependendo do caso. Após o modelamento do produto 3D no sistema CAD, denominado neste processo EDM de eletrodo peça, devem ser modeladas as cavidades que irão usar este produto. Alguns pesquisadores como Souza *et al.* (2013) denominam essas cavidades como cavidade macho e cavidade fêmea, conforme a geometria, convexo e côncavo, respectivamente. Operações de usinagem por eletroerosão são necessárias em regiões de difícil acesso às ferramentas de corte convencionais, como na usinagem de cavidades contendo cantos, na usinagem de materiais endurecidos e em superfícies com acabamento diferenciado. Nesta usinagem deve-se construir um eletrodo, de cobre ou grafita, com a forma geométrica a ser usinada. Com isso, em formas mais complexas, como no modelamento da geometria do eletrodo e na sua fabricação, deve-se empregar os sistemas CAM e as máquinas CNC.

O objetivo deste trabalho foi pesquisar a possibilidade de nitretação por descargas elétricas de corpo de prova fabricado em aço ABNT 4140 para ensaio de fadiga com matriz de cobre eletrolítico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta um diagrama de fluxo esquemático do trabalho realizado nessa pesquisa.

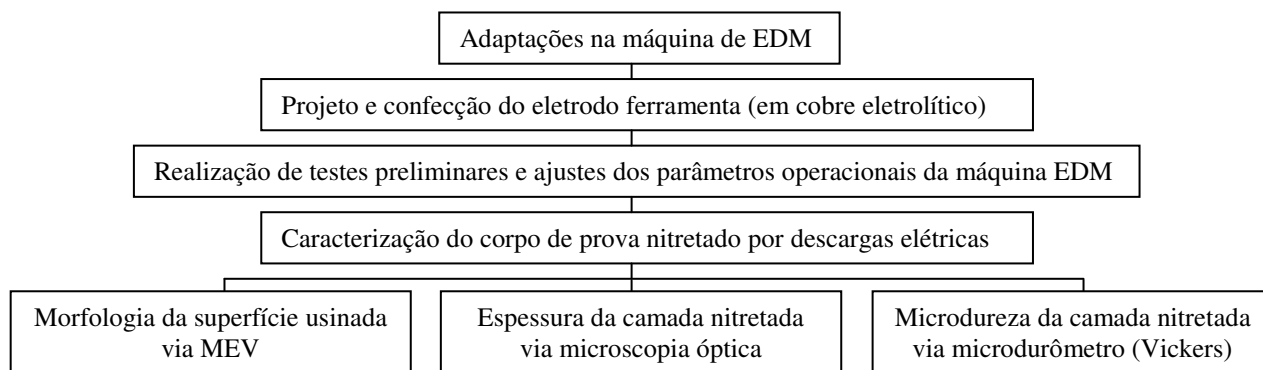


Figura 1. Diagrama de fluxo do trabalho realizado.

2.1. Processo de usinagem por descargas elétricas (EDM)

Os testes foram realizados em um equipamento EDM convencional por penetração, modelo Servspark Eletroplus EDM-540, com algumas adaptações, tais como uma cuba auxiliar fabricada em aço INOX 304 e uma bomba de recirculação do fluido dielétrico modelo CD 30002 de fabricação ASTEN com capacidade de 51 litros por minuto e pressão de 2 metros de coluna d'água (0,2 bar), acoplada em motor elétrico de corrente alternada, rotação de 3100 RPM e potência de 120 Watts (0,16 CV), frequência de 60 Hz. Esta bomba tem a função de propiciar a lavagem ou limpeza da fenda de trabalho no processo EDM. O processo de limpeza empregado foi por jato lateral, do mesmo fluido dielétrico, direcionado na região entre o eletrodo e a peça, garantindo assim uma abrangência da superfície de trabalho. A vantagem de utilizar o processo de jato de fluido dielétrico é a melhoria no sistema de lavagem da fenda de trabalho, contribuindo para uma remoção mais eficiente de partículas sólidas presentes na superfície da peça em processo de usinagem, o que resulta na melhoria da taxa de remoção de material (TRM) no processo EDM (Santos, 2013). Ainda, segundo o fabricante Servspark (2014), a limpeza adequada da fenda de trabalho é importante para a obtenção de melhores rendimentos no processo EDM, uma vez que o acúmulo de grandes quantidades de partículas em determinados pontos da zona de trabalho diminui a resistência, facilitando a formação de descargas anormais que podem formar arcos e danificar a peça e o eletrodo. A corrente elétrica nominal empregada neste trabalho foi 40 Amperes.

A Figura 2 apresenta a cuba auxiliar, fabricada em aço inox AISI 304, instalada dentro da cuba principal da máquina EDM. Essa adaptação é utilizada para que não ocorra contaminação do fluido dielétrico do próprio equipamento, que no caso é o óleo mineral.

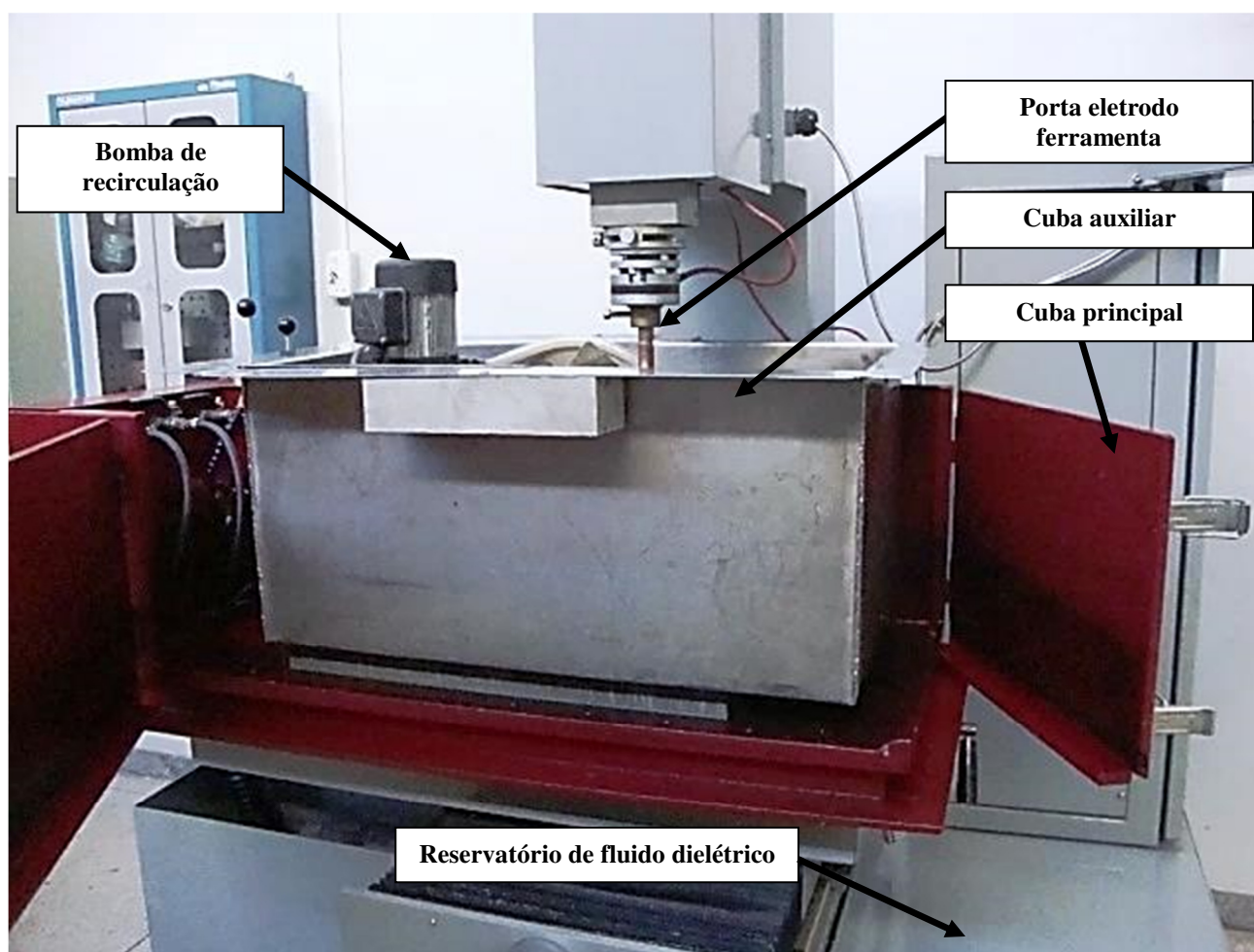


Figura 2. Cuba auxiliar instalada dentro da cuba principal da máquina EDM.

A Figura 3 ilustra o painel de controle da máquina Servspark Eletroplus EDM-540 com indicação dos parâmetros operacionais que foram empregados no processo NDE do aço ABNT 4140. O tempo de duração dos testes, para cada lado do corpo de prova foi de 5 minutos, sendo que foram usinados dois lados opostos em 180°.

A polaridade do eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico foi definida como positiva, conforme recomendado pelo fabricante Servspark (2014).



Figura 3. Painel de controle da máquina EDM com indicação dos parâmetros ajustados.

A polaridade, duração do pulso de descarga, intervalo do pulso de descarga e corrente de pico são as configurações básicas da máquina EDM. Conforme Kumar *et al.* (2009) estes parâmetros podem também ser expressos como fator de serviço (DT), frequência de pulso e corrente média (Amper). Fator de serviço é um percentual da duração do pulso (T_{ON}) sobre o ciclo ($T_{ON} + T_{OFF}$). Geralmente, um maior fator de serviço significa maior eficiência de corte. Frequência de pulso é o número de ciclos produzidos ao longo do *gap* em um segundo. Quanto maior a frequência, mais suave é o acabamento superficial que pode ser obtido. Com um aumento do número de ciclos por segundo, o comprimento do T_{ON} diminui. Curtos T_{ON} removem pouco material e cria pequenas crateras. Isso produz um acabamento superficial mais suave com menos danos térmico para a peça de trabalho. A frequência de pulso (kHz) é calculada dividindo o valor de 1000 pelo tempo total de ciclo ($T_{ON} + T_{OFF}$) em μs . Corrente de pico é a máxima corrente disponível para cada pulso fornecida pela fonte de alimentação/gerador. Corrente média é a amperagem média da abertura da faísca ao longo de um ciclo completo. Ela é calculada pela multiplicação da corrente de pico pelo fator de serviço.

No presente trabalho foi utilizado como fluido dielétrico uma solução de água deionizada misturada em uréia, na concentração de 30 g/l em volume de água deionizada de 55 litros para garantir a submersão da amostra.

Os dados principais e parâmetros operacionais ajustados no equipamento EDM estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Dados principais e parâmetros operacionais empregados no processo NDE

Parâmetros	Seleção
Fonte de Nitrogênio	Uréia
Concentração de uréia	30 [g/l]
Volume de água deionizada	55 [l]
Tempo de teste, cada lado do eletrodo peça	5 [min]
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva [+]
Tensão de trabalho, erodindo	40-50 [V]
Corrente nominal de trabalho	40 [A]
Controle de avanço do servomecanismo no eixo Z, <i>gap</i>	1*
Controle de velocidade do servomecanismo, cabeçote	1*
Tempo de pausa (afastamento periódico da ferramenta)	2*
Tempo de erosão	5*
Tempo de duração do pulso, T_{ON}	100 μs
Tempo de intervalo do pulso, T_{OFF}	10 μs
Fator de serviço (DT)	90 [%]

* Posição da chave ajustada diretamente no painel de controle da máquina EDM-540

A condutividade elétrica da solução aquosa foi monitorada antes e após as séries de experimentos, com o uso de um condutivímetro portátil, modelo CD203 da PHTeK e resolução de 0 a 1999 $\mu S/cm$.

2.2. Eletrodos peça e ferramenta

Os eletrodos peças foram fabricados em aço ABNT 4140, a partir de uma barra circular de diâmetro 5/8 polegada (15,87 mm). As dimensões finais dos corpos de prova de fadiga foram definidas conforme ASTM E466-15, sendo comprimento total de 132 mm, diâmetro maior de 14 mm e seção de testes com diâmetro mínimo 8 mm e comprimento útil de 52 mm.

Os eletrodos ferramentas aplicados no processo EDM e NDE foram confeccionados a partir de uma barra de cobre eletrolítico de seção transversal quadrada de 25,4 mm e comprimento final útil de 52 mm.

2.3. Projeto do eletrodo peça e eletrodo ferramenta

A Figura 4 apresenta o projeto do eletrodo peça e eletrodo ferramenta, auxiliado por sistema CAD.

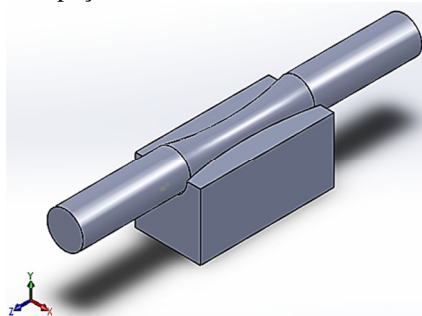


Figura 4. Projeto do eletrodo peça e eletrodo ferramenta

A Fig. 5 apresenta a matriz EDM (eletrodo ferramenta) e o corpo de prova montados dentro da cuba auxiliar.

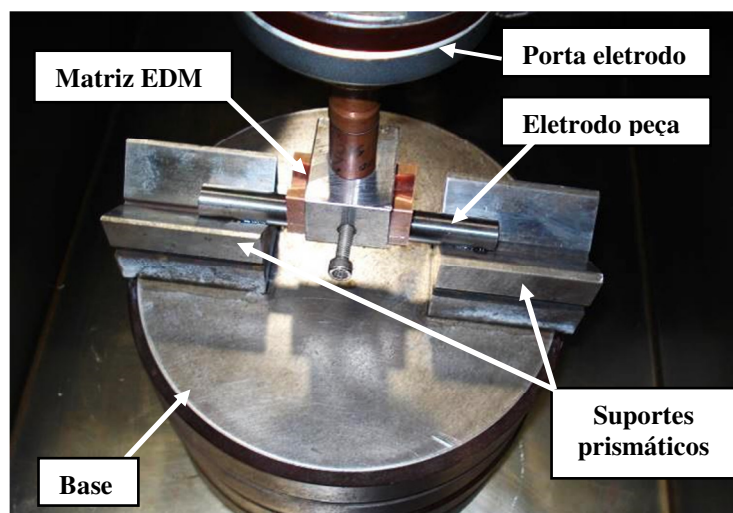


Figura 5. Eletrodo peça e eletrodo ferramenta montados dentro da cuba auxiliar

2.4. Usinagem por comando numérico computadorizado (CNC)

Para a fabricação da matriz EDM de cobre eletrolítico, foi utilizado um centro de usinagem CNC ROMI *Discovery 560 Bridgeport*, cujos parâmetros de usinagem utilizados estão resumidos na Tab. 3. Como ferramenta foi empregada uma fresa de topo esférica de diâmetro 6 mm com raio de canto 3 mm fabricada de metal duro. O sistema CAM utilizado foi o *edgcam* versão 2013, sendo a programação NC Siemens 840 D.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na usinagem CNC da matriz de cobre.

Parâmetro	Desbaste	Acabamento
Velocidade de corte (m/min)	30	56
Rotação (RPM)	1600	3000
Avanço (mm/min)	300	480
Incremento de corte (mm)	0,5	0,15

Para a fabricação do eletrodo peça em aço ABNT 4140, utilizou-se um torno CNC ROMI *Centur* 30D com comando NC *Siemens* 802 D, pastilha de corte *CoroTurn*® 107 para torneamento, código ISO VBMT 11 03 04-PF 4215, fabricante Sandvik Coromant, fluido de corte *Synergy* 905, fabricante Blaser Swissslube.

Neste trabalho foi empregada a cavidade da matriz de cobre eletrolítico fabricada com as mesmas dimensões do corpo de prova (eletrodo peça). Entretanto, percebeu-se durante o desenvolvimento deste trabalho que para manter a forma cilíndrica mais uniforme do corpo de prova usinado por EDM, foi necessário acrescentar um ressalto na matriz de cobre de forma a melhorar a forma geométrica cilíndrica do corpo de prova durante o processo EDM. A Figura 6 apresenta a fabricação do eletrodo ferramenta (matriz EDM) auxiliada por sistema CAD/CAM/CNC.

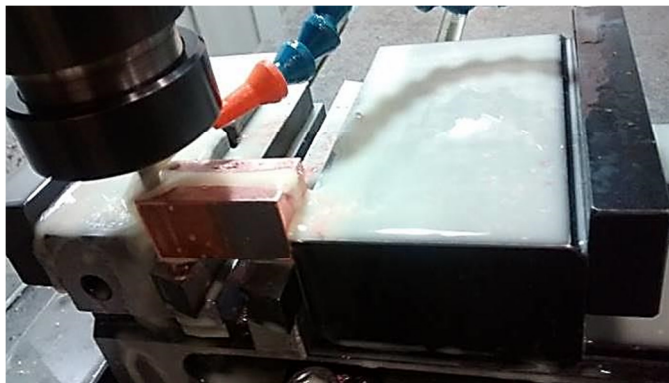


Figura 6. Fabricação do eletrodo ferramenta auxiliada por sistema CAD/CAM/CNC

2.5. Metalografia, microdureza e análise morfológica

Após os testes de usinagem por descargas elétricas, três amostras foram preparadas por técnicas convencionais de preparação metalográfica, ou seja, envolvendo corte com disco abrasivo, embutimento com resina e lixamento manual. As amostras foram: uma nitretada NDE (polida), outra nitretada NDE (sem polir) e a terceira EDM água (sem polir). O corte foi realizado na seção transversal à superfície usinada por EDM, por meio de um equipamento cortadora metalográfica CM80 Teclago com o objetivo de se conseguir superfícies planas da seção transversal para análise via microscopia óptica (MO). Nesta etapa foi utilizado disco de corte abrasivo para uso geral em aços e ferros fundidos, com lubri-refrigeração constante. Em seguida, foi feito o embutimento por meio de uma embutidora Arotec PRE40 automática, utilizando resina epóxi. Posteriormente, foi feito o processo de lixamento manual nas amostras, usando lixas com diferentes granulometrias (#180, #220, #320, #400, #600 e #1200 mesh). O polimento foi realizado em politriz automática rotativa com pasta de alumina de granulometria 9, 3 e 1 μm , respectivamente, durante tempo de 3 minutos. Com o acabamento superficial tendo aspecto de espelhado, foi possível realizar o ataque químico com Nital 2% (ácido nítrico em solução de álcool etílico). As micrografias e as medições das espessuras da ZR e da camada nitretada (CN) foram realizadas em microscópio óptico. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em microdurômetro com microscópio óptico incorporado, sendo a carga de 10 gf (98,07 mN) e tempo de aplicação da carga de 20 segundos. As imagens foram capturadas por meio de câmera digital acoplada ao equipamento. A presença da camada nitretada foi observada por meio das imagens de MO e evidenciada com o ganho no valor da dureza em relação ao substrato. A morfologia das superfícies das amostras de aço ABNT 4140 foi observada por meio do MEV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 7 apresenta a matriz de cobre eletrolítico aplicada no processo de nitretação por descargas elétricas de corpo de prova fabricado em aço ABNT 4140.



Figura 7. Corpo de prova em aço ABNT 4140 usinado pelo processo EDM com matriz de cobre.

Observou-se que a fixação e o alinhamento nos três eixos (X, Y, Z) do eletrodo ferramenta com o eletrodo peça é de extrema importância para garantir a formação de arco de plasma constante ao longo do perfil do corpo de prova durante a usinagem e nitretação por EDM. Resultando assim em melhoria da forma geométrica cilíndrica deste produto usinado por descargas elétricas. Quaisquer desalinhamentos na montagem contribuem para a formação de geometria não uniforme no corpo de prova usinado por EDM. Item este considerado crítico para o processo, uma vez que os corpos de prova serão submetidos posteriormente a ensaios de fadiga, cujo requisito para aumento de vida à fadiga é evitar pontos de concentração de tensões.

3.1. Condutividade elétrica

Os valores de condutividade elétrica obtidos da solução de água deionizada e uréia com concentração de 30 g/l estão mostrados na Tab. 2, sendo que a condutividade inicial, para ambos os processos, foi de 0 $\mu\text{S/cm}$.

Tabela 2. Condutividade elétrica dos dielétricos, antes e após os experimentos.

Processo	Condutividade elétrica média ($\mu\text{S/cm}$)	
	Antes do processo	Após o processo
Usinagem por EDM	1	3
Nitretação por EDM	91	101

Estes resultados mostraram satisfatórios, uma vez que Santos (2013) conduziu experimentos de condutividade elétrica para diferentes soluções de uréia em água deionizada, obtendo resultados que variaram de 4 à cerca de 2000 $\mu\text{S/cm}$, dependendo do nível de concentração de uréia, e constatou que a usinagem por EDM da amostra de aço ABNT 4140 não foi possível somente para condutividades maiores que 1570 $\mu\text{S/cm}$, devido à alta condutividade elétrica adquirida pelo fluido.

3.2. Morfologia da superfície do ABNT 4140 nitretado por EDM e caracterização microestrutural

As descargas elétricas geradas pelo processo EDM com eletrodo ferramenta de cobre e aplicadas na superfície de amostras de aço ABNT 4140 laminado, usando como fluido dielétrico solução de água deionizada e uréia, na concentração de 30 g/l, produziram as morfologias das superfícies mostradas na Fig. 8.

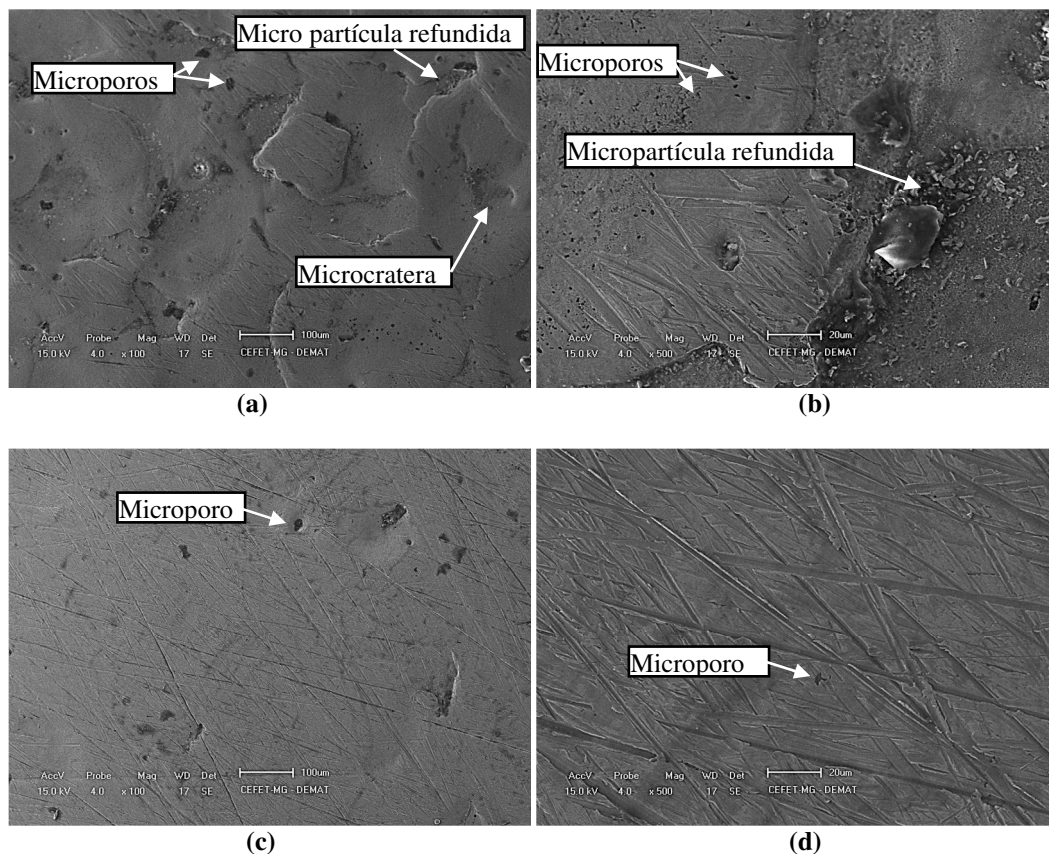


Figura 8. Imagem MEV da superfície do aço ABNT 4140 após nitretação por EDM com água deionizada + uréia ($I=40\text{ A}$, $T_{\text{ON}} 100\text{ }\mu\text{s}$ e $T_{\text{OFF}} 10\text{ }\mu\text{s}$). (a) Sem polir (100x); (b) Sem polir (400x); (c) Polida (100x); (d) Polida (400x). Nital 2%.

Observa-se que as imagens (a) e (b), NDE sem polir, apresentam crateras, poros e micro partículas refundidas na superfície. Ou seja, o aspecto típico de superfícies usinadas por EDM. Nota-se nas imagens das superfícies polidas (c) e (d), uma redução nos números de poros em relação às superfícies sem polir.

A Figura 9 apresenta as espessuras referenciais da coloração das camadas ZR e nitretada por EDM das seções transversais dos corpos de prova polido e sem polimento e a ZR do corpo de prova usinado por EDM com água deionizada sem polir.

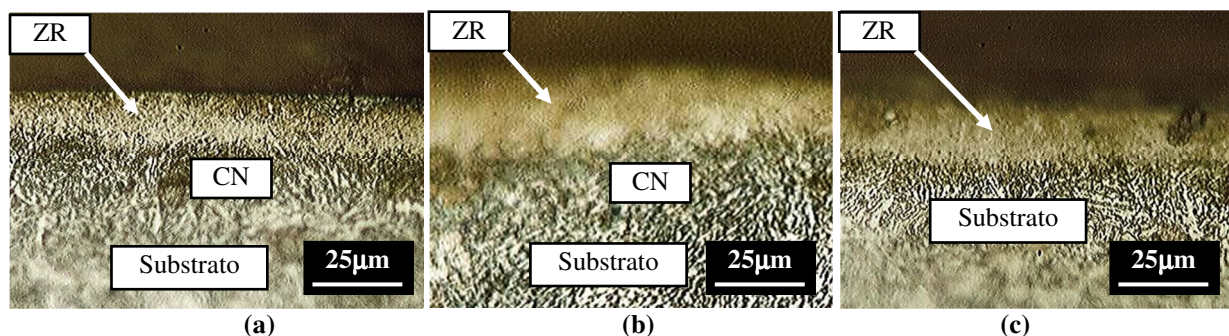


Figura 9. Microscopia óptica das camadas nitretada e refundida do corpo de prova ABNT 4140 com ampliação de 400x (a) Nitretada NDE (polida); b) Nitretada NDE (sem polir); c) EDM Água (sem polir). Nital 2%.

Observa-se que as espessuras médias das camadas nitretada e refundida sem polir com base na coloração, possuem medidas na faixa de 20-25 µm, corroborando com os resultados encontrados por Santos (2013). É válido ressaltar que houve variações nessas espessuras de camadas. Esse efeito pode ser atribuído aos parâmetros utilizados no equipamento EDM, onde a potência da descarga elétrica é o produto da tensão e corrente elétrica, as quais sofrem variação durante o processo de EDM.

A Figura 10 apresenta os resultados da microdureza Vickers do corpo de prova em aço ABNT 4140 nitretado por EDM com solução de água deionizada e uréia (concentração de 30 g/l), assim como do corpo de prova ABNT 4140 usinado por EDM com água deionizada.

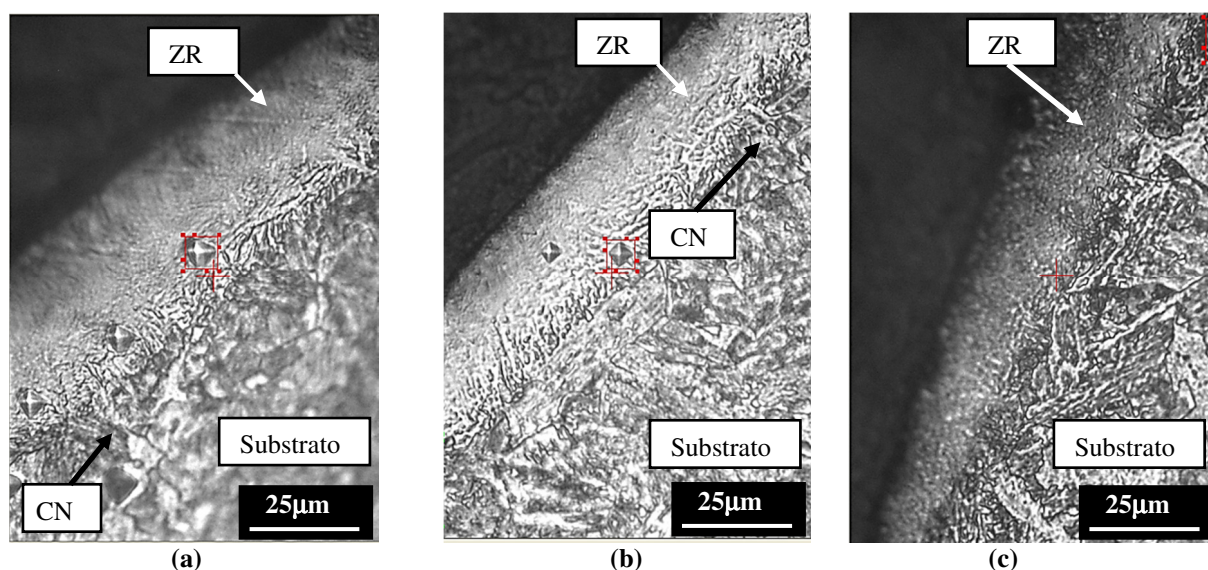


Figura 10. Imagens com endentações de microdureza Vickers, 10 gf, 20s. (a) Nitretada NDE (sem polir); (b) Nitretada NDE (polida); (c) EDM Água deionizada (sem polir). Nital 2%.

Nota-se, pelas imagens que a ZR e a região nitretada aparecem bem destacadas. A camada nitretada aparece definida em cor mais escura, enquanto a zona refundida ou camada branca aparece em cor mais clara. Essa diferença de tonalidade pode estar associada à mudança microestrutural no material.

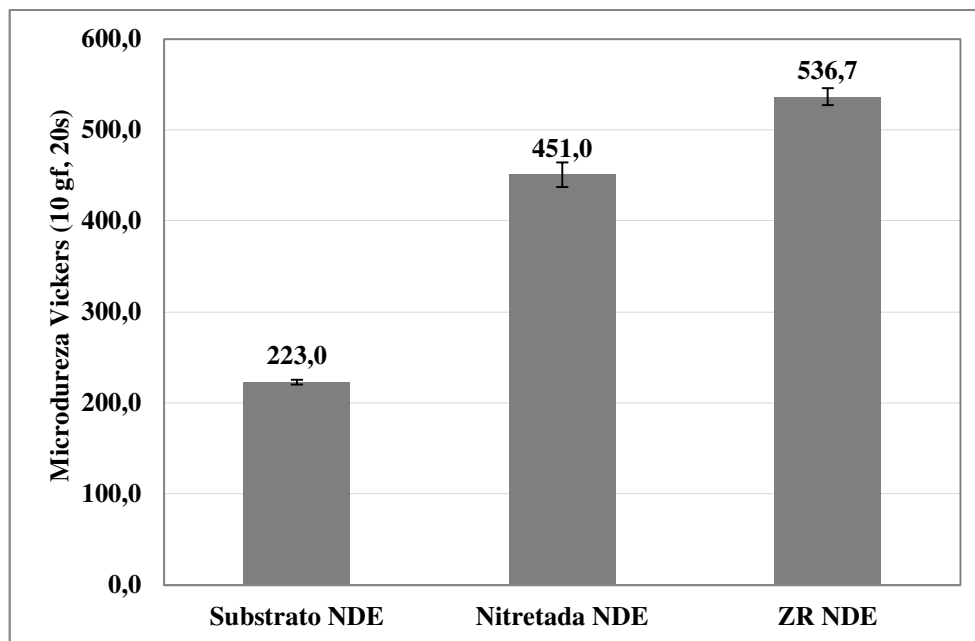
Observa-se por meio das imagens obtidas por MO evidências que mesmo após o polimento a camada refundida (ZR) permanece na superfície do corpo de prova.

A Tabela 4 apresenta os resultados da microdureza Vickers. A média foi obtida a partir de três medições de cada ensaio.

**Tabela 4. Microdureza Vickers (carga de 10 gf, tempo de 20 s).
Valores médios obtidos em três ensaios.**

Região	Dureza HV
Substrato ABNT 4140	223,0 ± 2,6
Camada nitretada (NDE)	451,0 ± 13,5
Zona refundida (NDE)	536,7 ± 9,2

A Figura 11 ilustra o gráfico com os valores de microdureza Vickers.



**Figura 11. Resultados de valores de microdureza Vickers (carga de 10 gf, tempo de 20 s).
Valores médios obtidos em três ensaios.**

Observa-se que, em média, a microdureza do substrato apresenta pequena variação de valores. Os resultados da microdureza da região nitretada (NDE) mostram um ganho de aproximadamente 202% em relação ao substrato, enquanto que o ganho da microdureza na zona refundida é cerca de 240%. Isso evidencia que houve o enriquecimento por nitretos, simultaneamente ao processo de usinagem por descargas elétricas, conforme pesquisado por Santos (2013).

4. CONCLUSÕES

Foi observado pelas análises metalográficas que a nitretação ocorre no corpo de prova de aço ABNT 4140.

Houve um aumento significativo da dureza das camadas ZR (240%) e nitretada (202 %) em relação ao substrato. Isso evidencia que o processo EDM modifica não somente a superfície da peça de trabalho, mas também a sub-superfície.

As espessuras médias das camadas ZR e nitretada com referência a coloração medem aproximadamente 25 µm.

Foi evidenciado que a nitretação pode ocorrer simultaneamente à usinagem por EDM, com a possibilidade de aplicação tecnológica do processo no meio industrial.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CEFET MG pelo apoio para participação no congresso para apresentação do trabalho.

A CAPES pelo auxílio financeiro ao pesquisador Sinval Pedrosa da Silva.

6. REFERÊNCIAS

- Amorim, F. L. and Weingaertner, W. L., 2007, "The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. XXIX, n. 4, Brazil, pp.366-371.
- ASTM E466-15, 2015, "Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials", ASTM International.
- Both, G. B.; Rocha, A. S.; Hirsch, T. K., 2010, "Modificações Microestruturais e Tribológicas nos Aços Ferramenta AISI H13 e DIN X100CrMoV 8-1-1 Produzidas por Nitretação a Plasma", *Estudos Tecnológicos*. V. 6, n. 3, pp. 149-161.
- Camargo, B. C.; Costa, H. L.; Raslan, A. A., 2009, "Endurecimento superficial de uma liga Ti₆Al₄V por meio de usinagem por descargas elétricas". In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 5, Belo Horizonte, MG.
- Kumar, S.; Singh, R.; Singh, T. P.; Sethi, B. L., 2009, "Surface Modification By Electrical Discharge Machining: a Review", *Journal of Materials Processing Technology*. V. 209, pp. 3675-3687.
- McGeough, J.A., 1988, "Advanced Methods of Machining", Chapman and Hall, London, pp. 128-152.
- Oliveira, A. R.; Santos, R. F.; Silva, E. R.; Raslan, A. A.; Murray, H. L. C., 2015, "Nitretação por descargas elétricas (NDE) do aço inoxidável AISI 304". In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 8, Salvador, BA.
- Raslan, A. A., 2015, "Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140". In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 8, Salvador, BA.
- Raslan, A. A.; Santos, R. F.; Silva, E. R., 2012, "Método de Nitretação através da Usinagem com Descargas - NDE. BR 10 2012 030523-2", FAPEMIG, Fundação de Ampara a Pesquisa de Minas Gerais; UFU, Universidade Federal de Uberlândia (MG).
- Santos, R. F., 2013, "Nitretação por EDM do aço AISI 4140". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 108 p.
- Servspark, 2014, "Manual de operação Eletroplus EDM-540/340", Servspark Indústria de Máquinas Ltda. São Paulo, SP.
- Silva, E. R., 2012, "Otimização e Avaliação dos Parâmetros de Influência do Processo AJEDM". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 112 f.
- Silva, E. R.; Santos, R. F.; Raslan, A. A., 2012 "Parameters Influencing the Process AJEDM". In: ABM INTERNATIONAL CONGRESS, 67, Rio de Janeiro, ISSN 1516-392X, p. 3828-3840.
- Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L., 2013, "Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC - princípios e aplicações". Artliber, 2ª edição, São Paulo, SP.
- Yan, B. H.; Tsai, H. C.; Huang, F. Y., 2005, "The Effect in EDM of a Dielectric of a Urea Solution in Water on Modifying the Surface of Titanium". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. N. 45, pp. 194-200.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ELECTRICAL DISCHARGE NITRIDING OF FATIGUE TESTING SPECIMEN IN ABNT 4140 STEEL WITH COPPER MATRIX

Abstract. *The conventional nitriding process makes it possible to increase fatigue resistance and service life of metal components, due to the induced compressive stresses in the surface. The Electrical Discharge Nitriding (EDN) process, consists of the Electrical Discharge Machining (EDM) using as dielectric fluid deionized water mixed with urea as a nitrogen source. The purpose of this work is the manufacturing of metal matrix made of electrolytic copper used as a tool electrode and investigates the possibility of applying this matrix in the EDN process. The die cavity was constructed using manufacturing technologies like Computer Aided Design-Drafting / Computer Aided Manufacturing / Computerized Numerical Control (CAD / CAM / CNC) and applied to the penetrated EDM process in order to machine and nitriding simultaneously. The EDN tests were carried out in a conventional penetration EDM machine with some adjustments. As workpiece it was used the ABNT 4140 steel. The characterization techniques used were the micrographic analysis by optical microscopy, Vickers micro hardness and morphological analysis via scanning electron microscope (SEM). The presence of the nitriding layer was observed by the optical microscopy and evidenced with the gain of hardness relative to the substrate.*

Keywords: ABNT 4140 steel, CAD / CAM / CNC, Matrix Cavity, EDM, Nitriding by Electrical Discharge