

CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA DO AÇO ABNT 4340 NITRETADO POR DESCARGAS ELÉTRICAS

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹
Marcelo Araujo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹
Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

Resumo: O ABNT 4340 é um aço de construção mecânica, destinado à fabricação de eixos, bielas, virabrequins, engrenagens; aplicados na indústria automobilística; aeroespacial; máquinas e equipamentos; entre outras. Este aço possui propriedades como alta resistência, tenacidade e potencial para nitretação. O tratamento termoquímico de nitretação possibilita melhorar as propriedades mecânicas, tais como dureza, resistência ao desgaste e fadiga. O objetivo deste trabalho foi nitretar o aço ABNT 4340, pelo processo de Nitretação por Descargas Elétricas (NDE) e investigar as modificações superficiais resultantes do processo. Uma máquina de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) por penetração foi utilizada no processo NDE. Como fluido dielétrico e fonte de nitrogênio, utilizou-se uma solução aquosa de ureia em água deionizada. Cobre eletrolítico e grafita foram utilizados como materiais dos eletrodos-ferramenta. A formação de nitretos na superfície foi avaliada por meio da técnica de difração de raios-X. Ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados em tribômetro pino sobre disco com discos de aço ABNT 4340 sem nitretar (substrato) e nitretados por NDE com eletrodos de cobre e grafita, deslizando a seco contra esfera de metal duro (WC/Co). Para caracterizar a camada nitretada foram realizadas microscopia óptica e medição de microdureza. Os resultados obtidos por meio de difração de raios-X mostraram a formação de uma camada enriquecida com a presença de nitretos na superfície da peça usinada por EDM e nitretada simultaneamente por NDE. Os ensaios de microdureza apresentaram um ganho nos valores de dureza desta camada, que podem ser atribuídos à presença dos nitretos.

Palavras-chave: Aço ABNT 4340, EDM, Microdureza, Nitretação por Descargas Elétricas (NDE), Nitretos.

1. INTRODUÇÃO

A nitretação ou formação de nitretos, conforme Chiaverini (2012) é um tratamento termoquímico de endurecimento superficial em que se introduz superficialmente no aço, até certa profundidade, nitrogênio, sob a ação de ambiente nitrogenoso, sob determinada temperatura. Os objetivos principais de realizar a nitretação são: obtenção de elevada dureza superficial; aumento da resistência ao desgaste e à escoriação; aumento da resistência à fadiga; melhorar a resistência à corrosão. Temperatura do processo de nitretação na faixa de 500 a 575 °C (inferior à temperatura crítica). Esta faixa relativamente baixa de temperatura aliado a não necessidade de qualquer tratamento térmico posterior, reduz ao mínimo a probabilidade de empenamento ou distorção das peças, resultando em grande vantagem da nitretação sobre outros processos termoquímicos de endurecimento superficial. Callister Jr. e Rethwisch (2012) afirmam que essa camada superficial endurecida possui profundidade da ordem de um (1) mm e, é mais dura que o núcleo do material.

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 geométricas 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). Neste processo de usinagem deve-se construir um eletrodo ferramenta, de cobre ou grafita, com a forma geométrica a ser usinada.

Segundo McGeough (1988), as principais propriedades que influenciam o desempenho dos materiais para eletrodo ferramenta são o ponto de fusão elevado (grafita) e alta condutibilidade elétrica (cobre). O autor afirma que o 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. Klocke *et al.* (2016), afirma que a energia de descarga pode ser dividida em pulso de corrente e pulso de tempo, assumindo tensão de descarga constante. Determinando assim, o efeito principal sobre a profundidade de penetração ou espessuras das

camadas zona refundida (ZR) e zona afetada pelo calor (ZAC). A relação entre espessura ZAC e tempo de pulso é diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o tempo de pulso, maior a espessura da ZAC.

Yan, Tsai, Huang (2005) e Camargo, Costa, Ralan (2009) investigaram o uso de EDM com solução de água deionizada e ureia como fluido dielétrico para avaliar as modificações superficiais ocorridas durante a usinagem de titânio. Seus resultados evidenciaram a formação de nitreto de titânio (TiN), com modificações superficiais nos corpos de prova, refletidas, principalmente, na melhoria da resistência ao desgaste, atrito e aumento de microdureza superficial e subsuperficial. O (TiN) foi sintetizado na superfície usinada pelas reações químicas que envolviam elementos obtidos da peça de trabalho e do fluido dielétrico (solução de ureia) durante o processo EDM, concluiu os autores.

Esta técnica de enriquecer superfícies com nitretos por meio de descargas elétricas foi pesquisada também por Raslan, Santos e Silva (2012); Silva (2012); Santos (2013), Raslan (2015), Pedroso *et al.* (2016), Pedroso (2016) onde se destaca a relevância tecnológica da pesquisa, pelo pedido de depósito de patente feito por Raslan, Santos e Silva (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*).

De acordo com Zum Gahr (1987) tribologia é definida como “a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e das práticas relacionadas”. Foi introduzida pelo comitê de lubrificação presidida por H. Peter Jost na Inglaterra em 1966. A palavra Tribologia “é derivada da palavra grega “Tribos”, que significa esfregar”. Tribologia engloba a investigação científica de todos os tipos de atrito, lubrificação e desgaste e também a aplicação técnica de conhecimento tribológico. Tribologia é uma ciência multidisciplinar na qual engenheiros, mecânicos, físicos, químicos, metalúrgicos, matemáticos e outros estão envolvidos, sendo, portanto, discutida a partir de diferentes pontos de vista.

Um dos métodos mais estudados para testes de atrito e desgaste em laboratório é o teste pino sobre disco (Hutchings, 1992; Blau, 2009). A técnica pino sobre disco utiliza um tribômetro com movimento relativo entre dois corpos, sendo o pino geralmente o contra corpo e o disco a superfície da amostra ensaiada. Neste ensaio somente um dos corpos possui movimento rotacional, que geralmente é realizado pelo disco. A norma ASTM G99-5 define o método de teste padrão para ensaios de desgaste com equipamento pino sobre disco e especifica que os resultados de desgaste são relatados como perda de volume em milímetros cúbicos para o pino e o disco separadamente.

Conforme Chiaverini (2012), o ABNT 4340 é um aço ligado ao cromo-molibdênio-níquel (% em peso médio: C 0,40; Mn 0,70; Si 0,30; Cr 0,80; Ni 1,85; Mo 0,25). O carbono confere ao aço não só temperabilidade como também suporte adequado à camada nitretada dura e fina. O cromo forma prontamente nitretos; quanto maior o teor desse elemento dissolvido na ferrita, tanto mais fácil a difusão do nitrogênio e tanto mais espessa a camada nitretada para um tempo de nitretação determinado. O molibdênio aumenta a dureza, enquanto o níquel em conjunto com o cromo aumenta a resistência à corrosão. Este aço é considerado de alta resistência e baixa liga (ARBL) possui vasta aplicação nas indústrias de construção mecânica e automotiva, sendo apropriado para a fabricação de engrenagens, bielas, virabrequins, eixos e pinos.

O objetivo deste trabalho foi nitretar o aço ABNT 4340 pelo processo de Nitretação por Descargas Elétricas, utilizando fluido dielétrico e fonte de nitrogênio uma solução de água deionizada e ureia e, cobre eletrolítico e grafita como materiais de eletrodos ferramenta, além de investigar as modificações superficiais resultantes do processo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Fig. (1) apresenta um diagrama de fluxo esquemático do trabalho experimental realizado nessa pesquisa.

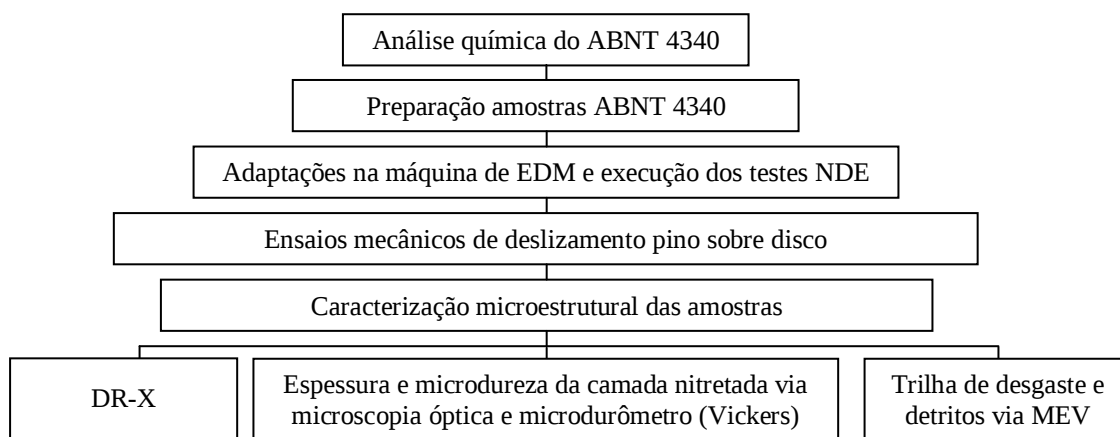


Figura 1. Diagrama de fluxo do trabalho realizado.

2.1. Análise química do aço ABNT 4340

A análise química do aço ABNT 4340 (material conforme recebido) foi realizada no Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET-MG (Campus I), usando-se analisador Foundry Master Xpert, tipo espectrômetro de emissão óptica (OES) de fabricação Oxford Instruments.

2.2. Preparação das Amostras

Inicialmente foi realizado corte primário de uma barra cilíndrica de aço ABNT 4340, material no estado laminado (conforme recebido), com seção transversal circular de 19,05 mm (3/4"). Corte realizado por meio de máquina serra de fita Franho FM 1600, obtendo amostras com comprimento de 14 mm, as quais foram faceadas nas extremidades com o uso de torno universal, resultando em amostras com 12 mm de comprimento e diâmetro 19,05 mm.

A Tab. (1) apresenta a relação de amostras que foram preparadas, sendo: #R1 e #R0 (amostras ABNT 4340 referência - não nitretadas). As amostras NDE Cu #2, #4 e #5 foram nitretadas por descargas elétricas (NDE) utilizando eletrodos de cobre eletrolítico e, amostras NDE Grafita #6, #9 e #10 foram nitretadas por NDE com eletrodos de grafita.

Tabela 1. Amostras ABNT 4340 utilizadas no procedimento experimental.

Amostras ABNT 4340	Grupo 1: análise química	Grupo 2: pino sobre disco	Grupo 3: MEV Trilha / detritos	Grupo 4: DR-X	Grupo 5: HV (10 gf, 20 s)
#R1 (não NDE)	X			X	
#R0 (não NDE)		X	X		
NDE Cu #2		X	X		
NDE Grafita #6		X	X		
NDE Cu #4				X	
NDE Grafita #9				X	
NDE Cu #5					X
NDE Grafita #10					X
Substrato #5 e 10					X

O cobre eletrolítico e a grafita foram selecionados como materiais dos eletrodos ferramenta para os processos de usinagem e nitretação por NDE das amostras de aço ABNT 4340 utilizadas nesta pesquisa. Estes eletrodos foram definidos a partir de barras de cobre eletrolítico e de grafita com seção transversal circular diâmetro 7/8" (22,22 mm), materiais conforme recebido. Inicialmente foi retirado, por meio de corte com máquina serra de fita Franho FM 1600, amostras com comprimento de 27 mm. Por meio da operação de torneamento convencional, foi realizada a usinagem e esquadreamento das faces de cada amostra, resultando em comprimento final de 25 mm e diâmetro de 22,22 mm.

2.3. Testes de Usinagem e Nitretação por Descargas Elétricas

Os testes de usinagem e nitretação por descargas elétricas foram realizados em máquina EDM convencional por penetração, modelo Servspark Eletroplus EDM-540, corrente elétrica nominal máxima de 40 Amperes. Este equipamento possui bandeja de trabalho, também denominada de cuba principal, com aberturas lateral e frontal, e foi adaptado para operar com fluidos aquosos. A adaptação consiste na utilização de uma cuba fabricada em aço inoxidável austenítico 304, instalada dentro da cuba principal da máquina EDM, conforme ilustrado na Fig. (2). Esta adaptação foi utilizada para que não ocorra contaminação do fluido dielétrico do próprio equipamento, que no caso são hidrocarbonetos de origem mineral. Além disso, a adaptação inclui uma bomba de recirculação do fluido dielétrico, para propiciar a lavagem ou limpeza da fenda de trabalho no processo EDM e NDE. O processo de limpeza empregado foi por jato lateral, do mesmo fluido dielétrico (solução de água deionizada e ureia), direcionado na região entre o eletrodo ferramenta e a peça, garantindo assim uma abrangência da superfície de trabalho. A corrente elétrica nominal empregada nesta pesquisa foi 40 Amperes. A ureia utilizada é do tipo farmacológica adquirida no mercado nacional e destinada à fabricação de cosméticos, perfumes e produtos de higiene.

A Fig. (2) apresenta a cuba auxiliar instalada dentro da cuba principal da máquina EDM. Enquanto a Fig. (3) apresenta os eletrodos ferramenta de cobre eletrolítico e de grafita, assim como os eletrodos peça (amostras) em aço ABNT 4340 instalados dentro da cuba auxiliar.

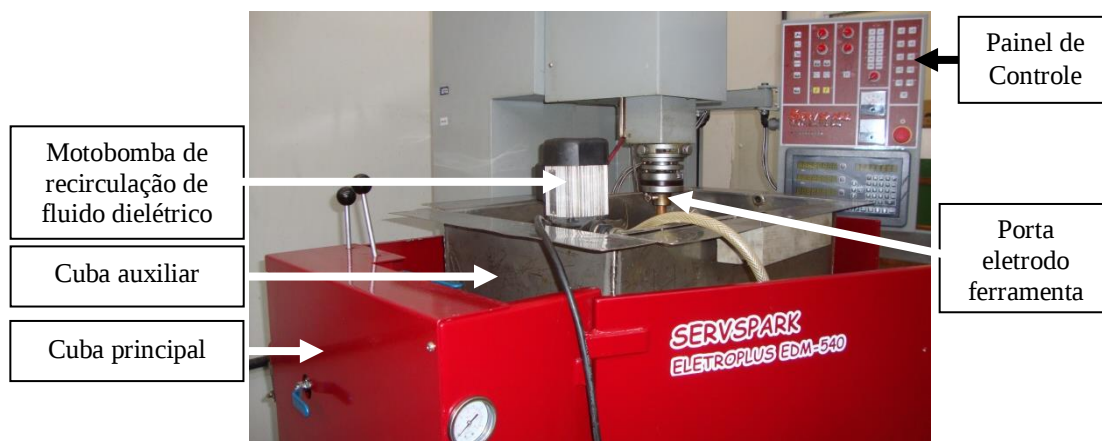


Figura 2. Cuba auxiliar instalada dentro da cuba principal da máquina EDM.

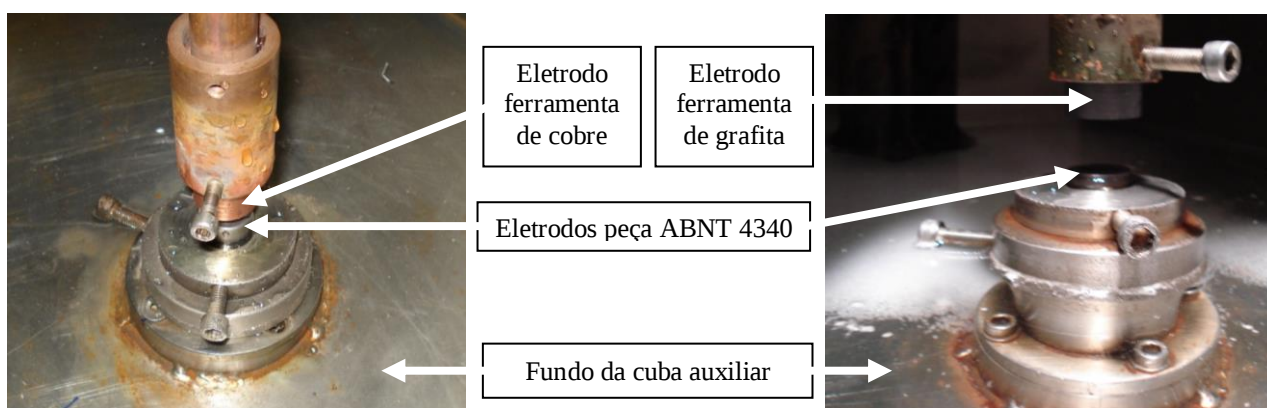


Figura 3. Amostras e eletrodos ferramenta posicionados no interior da cuba auxiliar.

A Tab. (2) apresenta os dados principais e parâmetros operacionais selecionados, que possibilitaram a aplicação do processo NDE na máquina Servspark EDM-540.

Tabela 2. Dados principais e parâmetros operacionais utilizados no processo NDE.

Parâmetro	Seleção
Concentração de ureia	30 [g/L]
Tempo de teste (cada amostra)	10 [min.]
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva [+]
Tensão de trabalho, “erodindo”	~50 [V]
Corrente nominal de trabalho	40 [A]
Controle da fenda de trabalho (<i>gap</i>)	A1 = 1*
Controle de velocidade do servomecanismo, cabeçote	A2 = 4*
Tempo de afastamento periódico da ferramenta	A3 = 2*
Tempo de erosão	A4 = 4*
Tempo de duração do pulso, T _{ON}	A5 = 100 [µs]
Tempo de intervalo do pulso, T _{OFF}	A6 = 1,5*

* Esses parâmetros foram ajustados diretamente no painel de controle da Servspark EDM-540.

2.4. Ensaios de desgaste por deslizamento pino sobre disco

Os ensaios de desgaste por deslizamento foram realizados no laboratório de desgaste e tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da UFMG (DEMEC), em tribômetro pino sobre disco (PSD) Microtest modelo MT/60/NI, com discos de aço ABNT 4340 nitretados e sem nitretar, deslizando a seco contra esfera de metal duro (WC/Co), ou seja, sem lubrificantes, em temperatura ambiente controlada de 18 a 20 °C e atmosfera ar

ambiente. Para a aquisição de dados foi utilizado o sistema NANOVEA. Na elaboração das curvas de coeficiente de atrito por distância percorrida foi utilizado filtro 20 no software para ajuste da curva.

As amostras do grupo 2 e as esferas de metal duro (WC/Co) foram pesadas antes e após os testes PSD em balança digital Shimadzu modelo AX200 com resolução de 0,0001 g, para cálculo do volume de desgaste conforme Eq. (1).

Os ensaios de deslizamento foram realizados com carregamento normal e força de 15 N para avaliar a evolução do desgaste no processo NDE com eletrodos de cobre e de grafita. Para efeito comparativo foi realizado também um ensaio em amostra ABNT 4340 (conforme recebido). Ambos os ensaios realizados com distância percorrida de 800 metros.

A Fig. (4) apresenta (à esquerda) o tribômetro e os parâmetros operacionais utilizados nos ensaios PSD, assim como mostra (à direita) desenho esquemático do sistema de testes pino sobre disco.

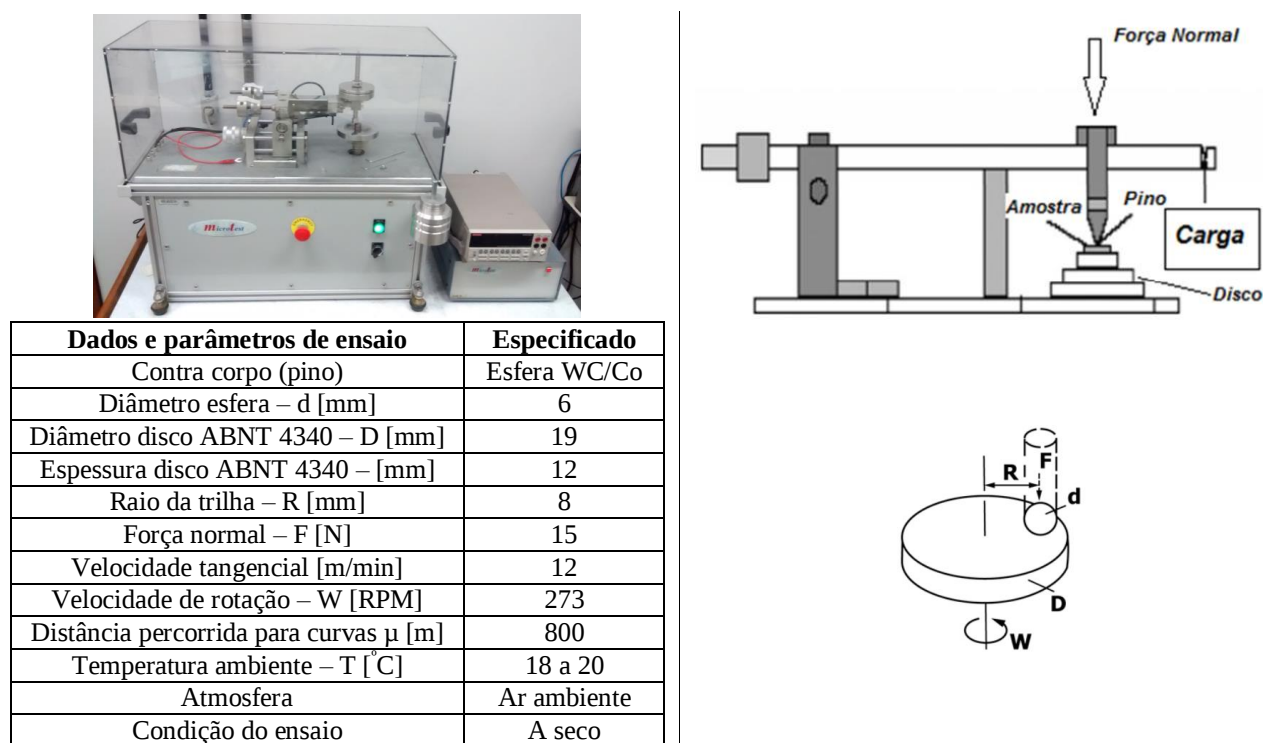


Figura 4. Tribômetro pino sobre disco e parâmetros operacionais utilizados na pesquisa (à esquerda); representação esquemática da configuração de testes pino sobre disco (à direita).

A Eq. (1) apresenta a forma de cálculo adotada para a variação de volume do disco e pino (ASTM G99-05).

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} * 1000 \quad (1)$$

Onde se tem que ΔV é a variação de volume em milímetros cúbicos, Δm é a variação de massa em gramas (mi-mf) e, ρ a massa específica do material em gramas por centímetro cúbico.

2.5. Caracterização microestrutural das amostras

Para a caracterização inicial do aço ABNT 4340, material conforme recebido, foram realizadas medições de dureza no substrato além de análise química por meio de analisador Foundry Master Xpert, tipo espectrômetro de emissão óptica (OES) de fabricação Oxford Instruments.

Após a produção das superfícies usinadas e nitretadas por NDE, as amostras foram embutidas e preparadas por técnicas metalográficas, sendo utilizado embutimento com resina epóxi termo-endurecível, carregada com minerais, de baixa contração e boa aderência. A caracterização das amostras de aço ABNT 4340 consistiu na utilização de diversas técnicas e equipamentos, tais como: DR-X para avaliar diferenças de fase; MEV JEOL modelo JSM-IT300 para avaliar desgaste da trilha e detritos gerados resultantes do ensaio pino sobre disco; microscopia óptica incorporada em microdurômetro Shimadzu modelo HMV-2T E para avaliar a microestrutura das amostras; microanálises por meio de espectrômetro de raios-X por dispersão de energia (EDS) modelo AZtec Oxford Instruments acoplado ao MEV JSM-IT300. Os ensaios de microdureza foram realizados no laboratório de materiais da PUC Minas em Contagem, por meio

de microdurômetro automático Shimadzu modelo HMV-2T E, com software Easy Test HMV-AD versão 3.10 para obtenção de imagens capturadas por meio de câmara digital incorporada ao microdurômetro. Carga de 10 gf (98,07 mN) e tempo de 20 segundos foram utilizados para obtenção da impressão de dureza.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da análise química realizada em três amostras do aço ABNT 4340 estão apresentados na Tab. (3).

Tabela 3. Análise química (% em peso) do aço ABNT 4340

Elemento Químico	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
C	0,528	0,486	0,493	0,502	0,023
Mn	0,752	0,728	0,732	0,737	0,013
P	0,038	0,044	0,045	0,042	0,004
S	0,022	0,032	0,028	0,027	0,005
Si	0,251	0,246	0,239	0,245	0,006
Cr	0,890	0,859	0,864	0,871	0,017
Mo	0,256	0,275	0,278	0,270	0,012
Fe	95,300	95,200	95,200	95,233	0,058

Nota-se a presença de elementos químicos como Cr, Mo os quais favorecem a nitretação. Os resultados apresentados na Tab. (3) corroboram com a literatura (SAE J404, 2000; Chiaverini, 2012).

Para caracterizar a camada nitretada foram realizadas microscopia óptica e medição de microdureza.

A Fig. (5) apresenta seção transversal de amostra ABNT 4340, nitretada por descargas elétricas com eletrodo de grafita, com indentações de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) realizadas na superfície em direção ao núcleo da amostra. Ataque químico com reagente Nital 2%.

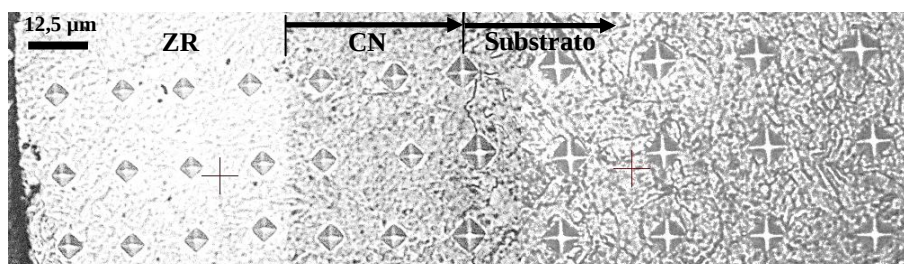


Figura 2. Micrografia de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em amostra ABNT 4340 NDE Grafita #6.

A Fig. (6) apresenta o respectivo perfil médio de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) realizado nesta amostra.

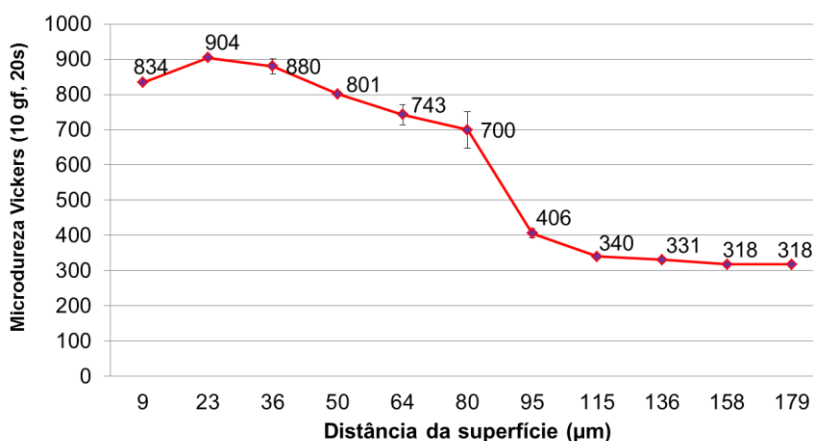


Figura 3. Perfil médio de microdureza Vickers (10 gf, 20 s) em amostra ABNT 4340 NDE Grafita #6.

A Fig. (4) apresenta difratograma das superfícies das amostras ABNT 4340 nitretadas por descargas elétricas com eletrodos de cobre e grafita além de amostra de referência (substrato não NDE).

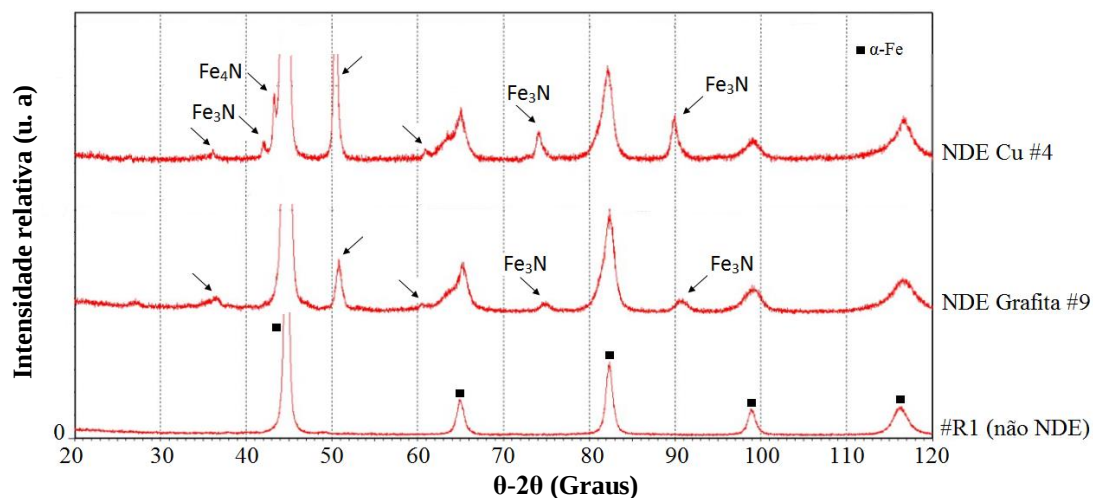
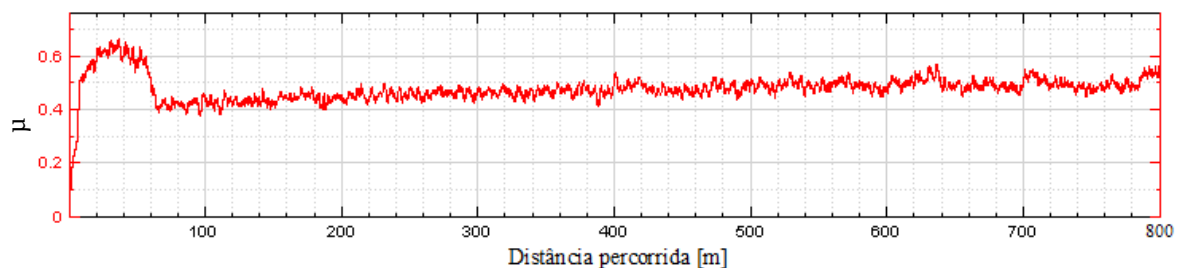


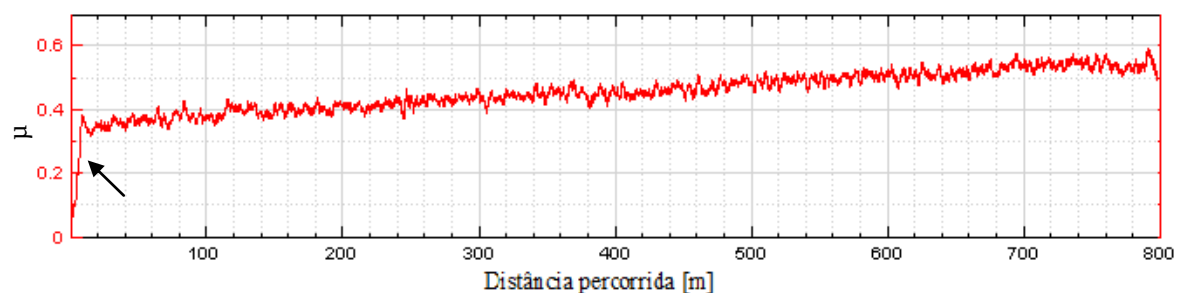
Figura 4. Difratograma das superfícies 4340 NDE com eletrodos de cobre (#4), grafita (#9) e não NDE (#R1).

Notas-se o surgimento de alguns picos com θ -2 θ entre 35° a 37°, 43° a 44°, 51°, 61°, 74° a 75° e 90° a 91° para as amostras nitretadas por descargas elétricas com eletrodos de cobre eletrolítico e grafita.

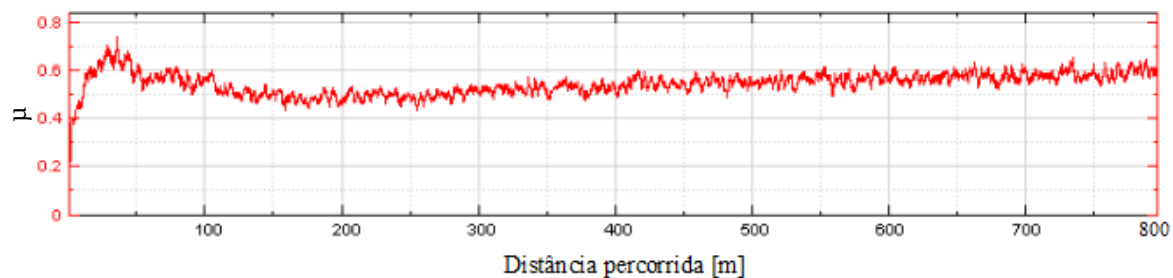
A Fig. (5) apresenta evolução do coeficiente de atrito para as amostras ABNT 4340 pesquisadas – filtro 20.



(a) Amostra ABNT 4340 #R0 (não NDE)



(b) Amostra ABNT 4340 NDE Cu #2



(c) Amostra ABNT 4340 NDE Grafita #6

Figura 5. Evolução do coeficiente de atrito em amostras 4340: (a) #R0; (b) NDE Cu #2; (c) NDE Grafita #6.

Nota-se nos três casos mudança no formato das curvas de coeficiente de atrito, principalmente na fase inicial, atingindo posteriormente estado estabilizado. Esta estabilização é justificada segundo Blau (2009), em que as várias influências sobre o atrito atingiram um equilíbrio, pelo menos temporariamente. As mudanças ocorridas entre o início do processo de deslizamento até atingir o estado de estabilização, é denominado de *running-in*. Implica em mudanças na forma e rugosidade entre as condições iniciais e o estado de estabilização, por exemplo, atingindo conformidade geométrica. Esta região inicial *running-in* é normalmente desprezada para análises do coeficiente de atrito.

As curvas de coeficiente de atrito *versus* distância percorrida (a) e (c) apresentam formato de curva com aspecto indicando ocorrência em metais com lubrificação limítrofe, e possível causa de superfícies com taxa de desgaste inicial alto até asperezas mais agudas serem deformadas e a superfície tornar-se suavizada (Blau, 2009). Pode-se inferir que detritos na superfície podem ter contribuído para aumento gradual do coeficiente de atrito (μ), evidenciado entre distância percorrida de 100 até 800 metros para curva (a) e 250 até 800 metros para curva (c), sendo mais acentuado para amostras NDE Cu #2 e NDE Grafita #6, o que justifica tendo em vista a zona refundida que é frágil e dura.

Já a curva (b) indica, na fase inicial, estágio onde a curva sofre maior inclinação, podendo atribuir a passagem da camada oxidada e da zona refundida para a matriz do material. Além disso, o formato da curva possui aspecto típico indicando ocorrência em superfícies contaminadas com possível causa da existência de filme fino de contaminante lubrificante (óxido) na parte externa das superfícies de deslizamento (Blau, 2009). Assim como na curva (a), pode-se inferir que detritos contribuíram para aumento gradual do coeficiente de atrito (μ), evidenciado entre 200 até 880 metros de distância percorrida.

A Fig. (6) apresenta imagens MEV das trilhas formadas nas amostras ABNT 4340 #R0 (não NDE), NDE Cu #2 e NDE Grafita #6 após ensaios pino sobre disco. Ampliação de 500x.

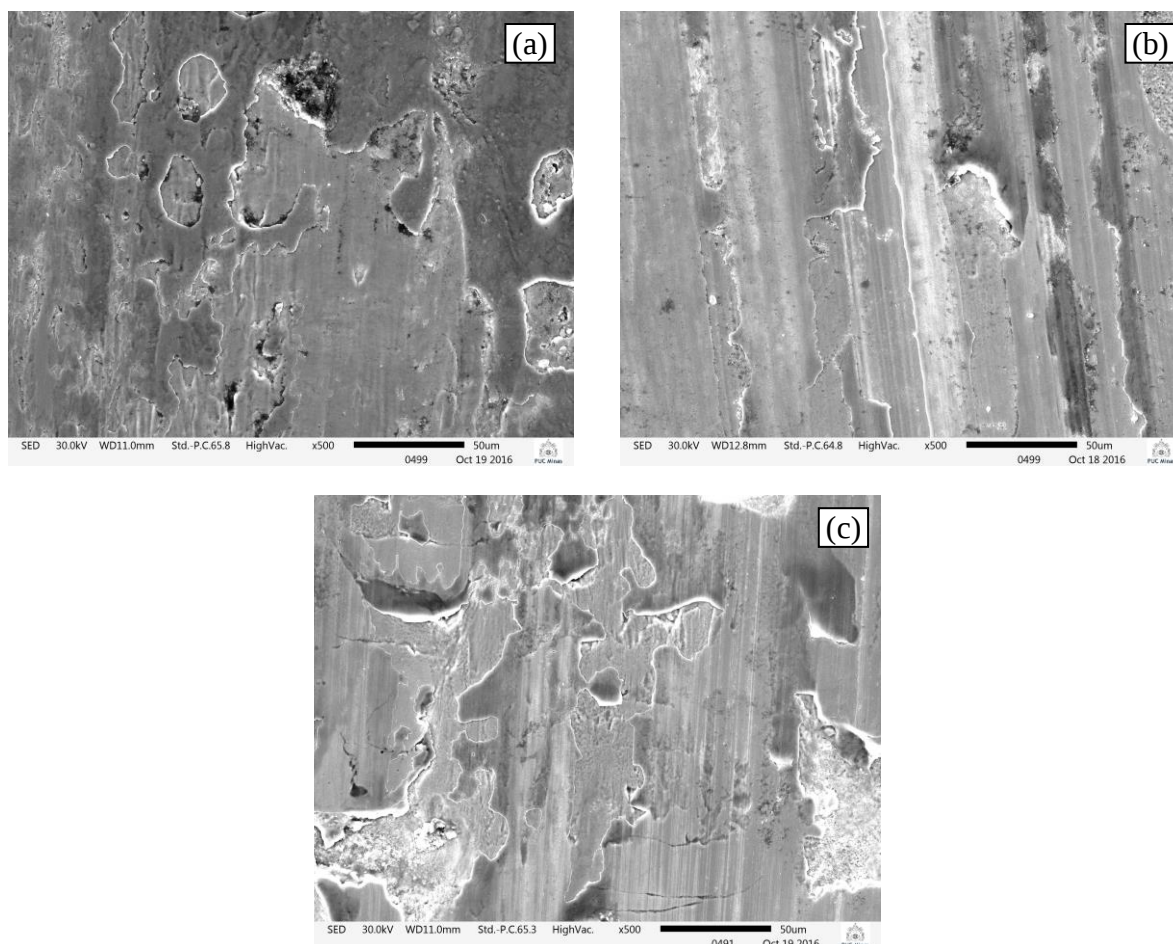


Figura 6. Trilha das superfícies de desgaste (MEV) das amostras após ensaios pino sobre disco: (a) ABNT 4340 #R0 (não NDE); (b) NDE Cu #2; (c) NDE Grafita #6. Ampliação de 500x.

Nota-se que ocorreu deformação plástica na trilha da amostra #R0 não nitretada Fig. (6) (a), a qual apresentou aspecto deformado, podendo inferir que houve deformação das asperezas durante o processo de deslizamento pino sobre disco. Observa-se que ocorreu desgaste abrasivo (microsulcamento) nas trilhas das amostras NDE Cu #2 e NDE Grafita #6, conforme observado nas Fig. (6) (b) e (6) (c), o qual se pode inferir aos detritos gerados no processo de deslizamento.

A Fig. (7) apresenta perda de volume em amostras de aço ABNT 4340 #R0 (não NDE), NDE Cu #2 e NDE Grafita #6, assim como nas esferas de WC/Co utilizadas nos ensaios de deslizamento das amostras conforme indicadas.

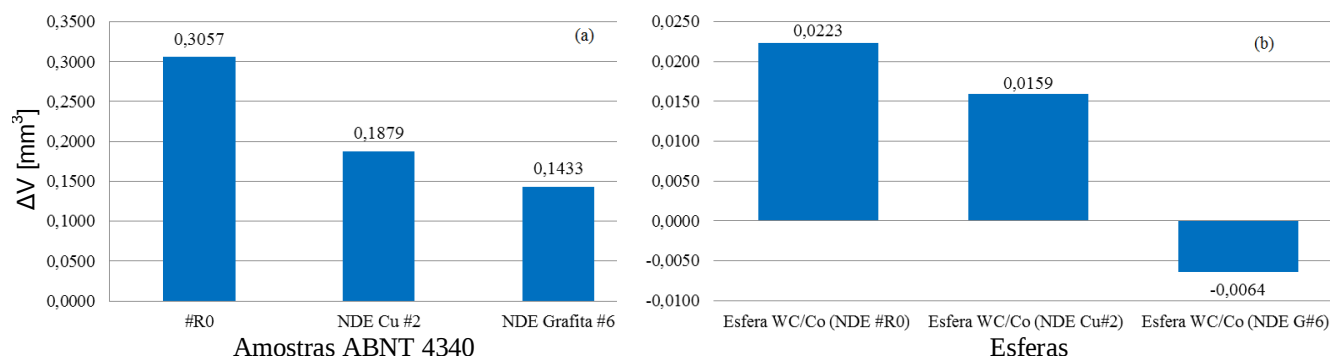


Figura 7. Perda de volume (mm³) em: (a) amostras de aço ABNT 4340; e, (b) esferas de WC/Co por amostra.

Nota-se que as amostras nitretadas por descargas elétricas NDE Cu #2 e NDE Grafita #6 perderam menos material em relação à amostra de referência #R0 não nitretada (Fig. 7(a)). Já os pinos, neste trabalho considerado as esferas de WC/Co, houve perda de massa para as esferas utilizadas nos ensaios de deslizamento das amostras NDE #R0 e NDE Cu #2, podendo ser atribuído a desgaste abrasivo. Sendo a esfera WC/Co utilizada para deslizamento da amostra NDE Grafita #6, houve ganho de massa, podendo ser atribuído à adesão de material proveniente da referida amostra.

4. CONCLUSÕES

- ✓ Os ensaios de microdureza evidenciaram ganho nos valores de dureza das camadas ZR e nitretada, que pode ser atribuído à presença dos nitretos.
- ✓ Foi evidenciado por meio de difração de raios-X, diferença de fases e formação de nitretos de ferro nas amostras ABNT 4340 nitretadas com eletrodos de cobre (#2) e grafita (#6);
- ✓ Detritos gerados no processo de deslizamento e depositados sobre a superfície das amostras #R0 não nitretada, NDE Cu #2 e NDE Grafita #6 contribuíram para aumento do coeficiente de atrito (μ) ao longo do tempo, podendo ser atribuído, para as amostras nitretadas, principalmente à zona refundida que é frágil e dura;
- ✓ Ocorreu deformação plástica na trilha da amostra #R0 não nitretada, a qual apresentou aspecto deformado;
- ✓ Ocorreu desgaste abrasivo (microsulcamento) nas trilhas das amostras NDE #2 e #6.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo uso dos Laboratórios de Fundição para realização de análises químicas e de Usinagem para testes EDM e NDE; ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pela permissão do uso dos equipamentos MEV e microdurômetro. Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG pela disponibilização do laboratório de tribologia para realização dos ensaios de deslizamento pino sobre disco.

6. REFERÊNCIAS

- Annual Book of ASTM Standards, 2016, American Society for Testing and Material, ASTM G99-05 (2016): Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus, 5p., West Conshohocken, PA.
- Blau, P.J., 2009, Friction science and technology: from concepts to applications, CRC Press: Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2.ed., ISBN 978-1-4200-5404-0.
- Hutchings, I.M., 1992, Tribology: friction and wear of engineering materials, Edward Arnold, London, 273p.
- Callister, W. D., Rethwisch, D.G., 2012, Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8.ed., Rio de Janeiro, LTC.
- 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.
- Chiaverini, V., 2012, Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed. ampliada e revista. - São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM), 599p.

- Klocke, F.; Schneider, S; Ehle, L; Meyer, H; Hensgen, L; Klink, A., 2016. Investigations on surface integrity of heat treated 42CrMo4 (AISI 4140) processed by sinking EDM. Science Direct. In: 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII). Procedia CIRP 42. p. 580–585.
- McGeough, J.A., 1988, Advanced Methods of Machining, Chapman and Hall, London, pp. 128-152.
- Pedroso, S., Freitas Filho, A., Eduardo, C., Nicesio, I.C., Santos, I.B., Carneiro, J.R.G., Silva, E.R., 2016, Nitretação por descargas elétricas de corpo de prova para ensaio de fadiga em aço ABNT 4140 com matriz de cobre, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM, Fortaleza, CE, Brasil.
- Pedroso, S., 2016, Avaliação da resistência à fadiga axial do aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET, Belo Horizonte, MG.
- 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.
- Society of Automotive Engineers. SAE J404: chemical compositions of SAE alloy steels – SAE International. Warrendale, 2000.
- Santos, R. F., 2013, “Nitretação por EDM do aço AISI 4140”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 108 p.
- 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.
- 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.
- Zum Gahr, K.H., 1987, Microstructure and wear of materials. Elsevier, Tribology series, 10.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

TRIBOLOGICAL CHARACTERIZATION OF ABNT 4340 STEEL NITRATED BY ELECTRICAL DISCHARGE NITRIDING

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹
Marcelo Araujo Câmara, marcelocamara@demec.ufmg.br¹
Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Universitário, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

Abstract. The ABNT 4340 is a mechanical construction steel, destined to the manufacture of axles, cranks, crankshafts, gears; Applied in the automobile industry; Aerospace; machines and equipment; among others. This steel has properties such as high strength, toughness and potential for nitriding. The thermochemical treatment of nitriding makes it possible to improve the mechanical properties, such as hardness, wear resistance and fatigue. The main purpose of this work was to nitrite the ABNT 4340 steel by the Electric Discharge Nitriding (EDN) process and investigates the surface modifications resulting of the process. The EDN tests were performed on sinking EDM, with some adjustments. As a dielectric fluid and nitrogen source, an aqueous solution of urea in deionized water was used. Electrolytic copper and graphite were used as electrode tool materials. Surface nitrides formation was evaluated by the X-ray diffraction technique. Sliding wear tests were carried out on a pin-on-disc tribometer with ABNT 4340 steel discs without nitriding (substrate) and nitrided by EDN with copper and graphite electrodes, sliding dry against hard metal ball (WC / Co). To characterize the nitrided layer were performed optical microscopy and micro hardness measurement. The results obtained by means of X-ray diffraction showed the formation of a layer enriched with the presence of nitrides on the surface of the specimen machined by EDM and simultaneously nitrided by EDN. The micro hardness tests presented a gain in the hardness values of this layer, which can be attributed to the presence of nitrides.

Keywords: ABNT 4340 steel, EDM, Micro hardness, Electrical Discharge Nitriding (EDN), Nitrides