

COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO AÇO ABNT 4140 NITRETADO POR PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS.

André Rezende de Figueiredo Oliveira, andre.uberlandia@ig.com.br

Mário Martins de Oliveira Júnior, mariomartjr@gmail.com

Rogério Felício dos Santos, rogeriodemariana@yahoo.com.br

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com

Henara Lilian Costa, ltm-henara@ufu.br

Alberto Arnaldo Raslan, ltm-raslan@ufu.br

Resumo: A utilização de descargas elétricas produzidas durante o processo EDM (Electrical Discharge Machining) para enriquecer superfícies metálicas é uma técnica em desenvolvimento. No que diz respeito à nitretação, resultados promissores foram obtidos em uma liga Ti_6Al_4V . O objetivo deste trabalho é o de explorar o potencial tribológico dessa técnica em aço ABNT 4140 nitretado por este processo. Amostras deste aço foram submetidas a descargas elétricas produzidas por um equipamento EDM por penetração. Como eletrodo, foi utilizado cobre. Como fluido dielétrico, utilizou-se água deionizada com ureia diluída, sob pressão (FJEDM – Fluid Jet EDM). Observou-se a formação de duas camadas enriquecidas com nitrogênio, com espessuras da ordem de 10 μm cada uma. Análise por ensaios de desgaste por deslizamento esfera-plano alternativo revelaram uma melhora nas propriedades mecânicas do material com relação ao desgaste.

Palavras-chave: Nitretação, Enriquecimento superficial, Desgaste por deslizamento, FJEDM, Aço ABNT 4140.

1. INTRODUÇÃO

O aço ABNT 4140 é amplamente usado na fabricação de eixos, pinos, engrenagens, entre outros. Apresentando uma estrutura adequada para processos de nitretação. O objetivo deste trabalho é atestar a melhora da resistência mecânica ao desgaste pelo processo de endurecimento superficial em amostras deste aço, através do processo de usinagem por descargas elétricas, com assistência de jato de fluido dielétrico - FJEDM, utilizando solução de água deionizada e ureia.

Os ensaios foram executados em máquina de EDM (Electrical Discharge Machining) por penetração, cujo esquema é mostrado na Figura 1, com uma hidrojetadora adaptada, com a função de aplicar o fluido dielétrico com pressão de 230 bar durante a usinagem. O processo passa a ser, então, FJEDM.

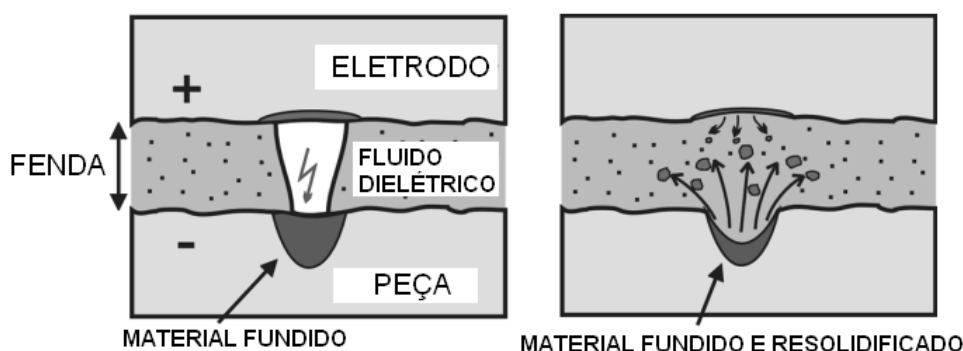


Figura 1 – Esquemática da usinagem por descarga elétrica. (ARANTES, 2007)

As descargas elétricas produzidas nos processos de usinagem geram um estado plasmático com temperaturas superiores a 8.000°C que fundem a superfície do material eletrodo-peça (MCGEOUGH, 1988).

Algumas tentativas têm sido feitas no sentido de se utilizar a energia gerada na EDM para promover o enriquecimento por liga de superfícies metálicas com nitrogênio (YAN et al., 2005, CAMARGO et al., 2006).

Raslan e colaboradores (2010), investigaram o enriquecimento com nitrogênio de uma liga aço ABNT 4140. Como fonte de nitrogênio usaram ureia diluída em água deionizada e registraram a formação de duas camadas: uma camada

refundida com cerca de 10 μm e outra intermediária, também com cerca de 10 μm . Foi observado acréscimo de dureza em ambas as camadas formadas no processo. (Figura 2)

A presença de ureia no processo de FJEDM de um aço proporciona a formação de duas camadas: uma zona refundida e a camada intermediária. Pode-se afirmar que a camada se forma em decorrência da presença de ureia, uma vez que ela não surge no processo de EDM sem adição de ureia. A ureia é um composto orgânico, cristalino, incolor, de fórmula $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, com um ponto de fusão de 132,7 °C. Com o aquecimento gerado pela EDM, a ureia se decompõe e libera nitrogênio. O nitrogênio é ionizado e, pelo seu pequeno raio atômico ($65 \times 10^{-12} \text{ m}$), é facilmente inserido a rede cristalina do aço. O nitrogênio fica aprisionado no canal de plasma na forma iônica. Ao ocorrer descarga elétrica o íon com elevada energia cinética, difunde-se através da superfície do material.

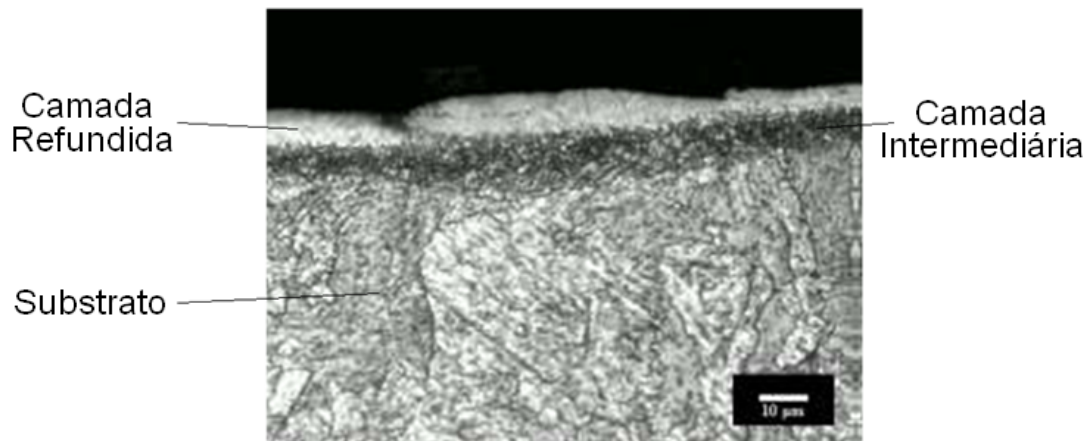


Figura 2: Micrografias das amostras de aço ABNT 4140 usinadas pelo processo FJEDM com adição de ureia. Nital 2%. (Raslan et al., 2010)

Neste processo, há a formação de uma camada refundida, que contém concentradores de tensões, tais como microtrincas e bolhas, que diminuem a vida útil das peças. Assim, para a realização dos ensaios tribológicos dessas amostras, a camada refundida foi retirada por processos de polimento. Foi utilizada uma lixa de óxido de alumínio com faixa granulométrica de 600 *mesh*.

As profundidades de nitretação alcançadas pelo processo de descarga elétrica utilizando a FJEDM são compatíveis com as obtidas nos processos de nitretação iônica convencional. A nitretação através deste processo possui simplicidade operacional, maior velocidade de execução e mais baixo custo com relação aos tradicionais processos de nitretação gasosa e iônica.

Segundo Raslan e colaboradores (2010) os nitretos provocam um endurecimento das camadas, sendo maior na zona refundida. O presente trabalho tem como objetivo, investigar as características tribológicas destas amostras nitretadas por processo de FJEDM. As técnicas de caracterização usadas foram: ensaios de desgaste por deslizamento esfera-plano alternativo e análise por interferometria laser.

2. METODOLOGIA

Os primeiros testes realizados nas amostras de aço ABNT 4140 (Substrato e Nitretado) foram ensaios de desgaste por deslizamento esfera-plano, em movimento alternativo de amplitude de 5 mm, com carga variável de 700, 1400, 2100 e 2800 g, trocadas com um intervalo de 10 minutos. (Figura 3)

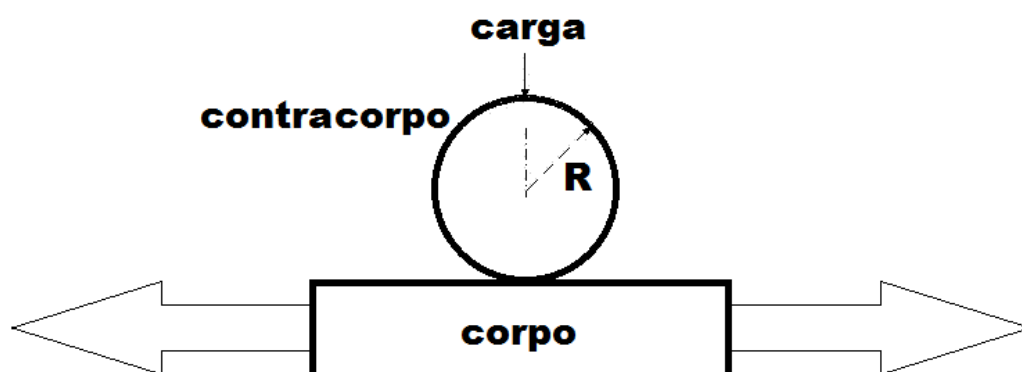


Figura 3 – Esquematização do ensaio de desgaste por deslizamento esfera-plano alternativo.

Os ensaios foram realizados em um equipamento PLINT, pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais de Faculdade de Engenharia Mecânica – UFU (Figura 4).

Como contrakorpos foram utilizadas esferas de aço AISI 52100 com diâmetro de 5 mm.

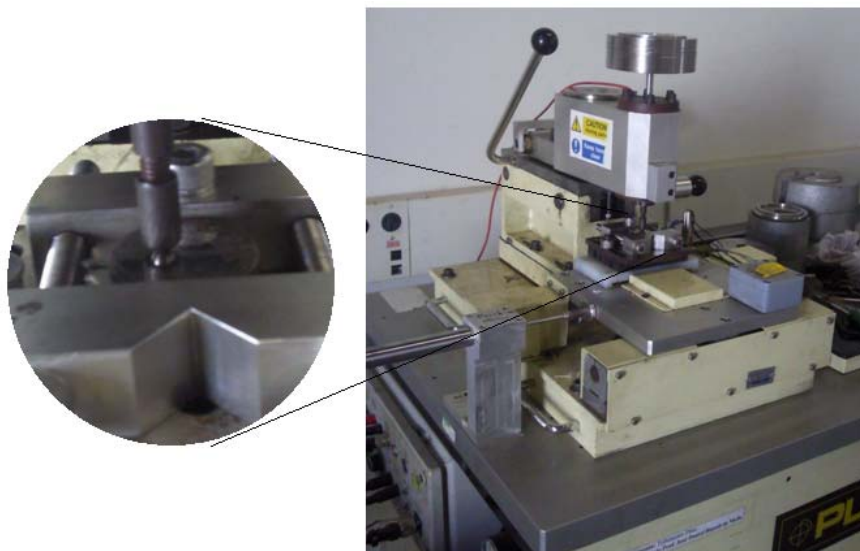


Figura 4 – Equipamento para ensaio de desgaste por deslizamento esfera-plano alternativo.

A Figura 5 mostra a força normal do ensaio com relação ao deslocamento da esfera sobre o plano em um percurso total de 80 m. O ensaio foi realizado com duração de 40 minutos com uma frequência de aquisição de dados de 397,367 Hz.

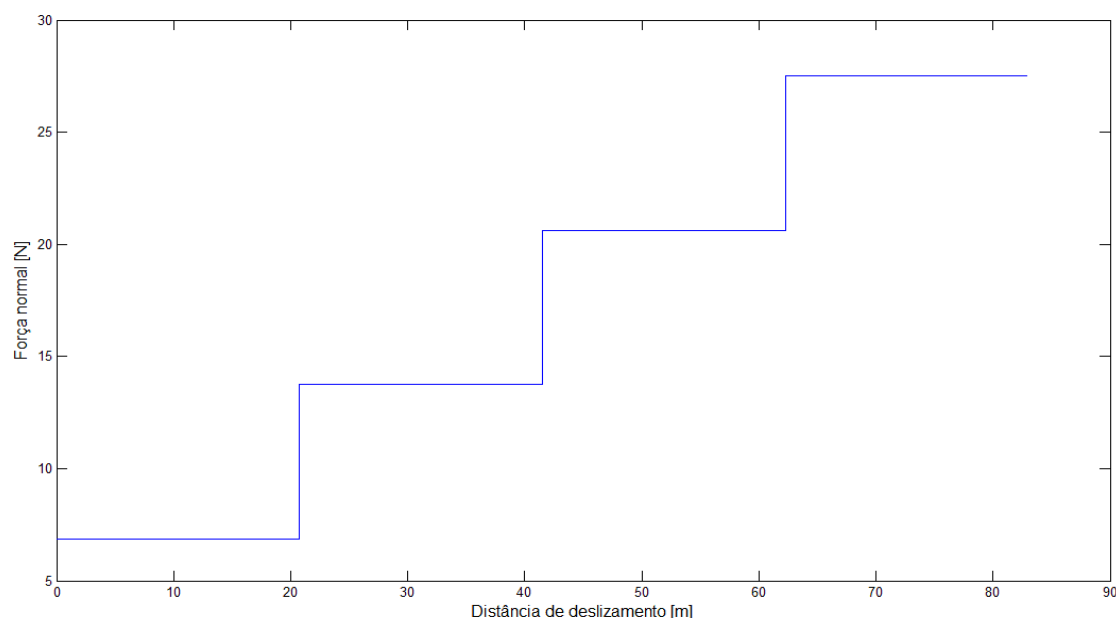


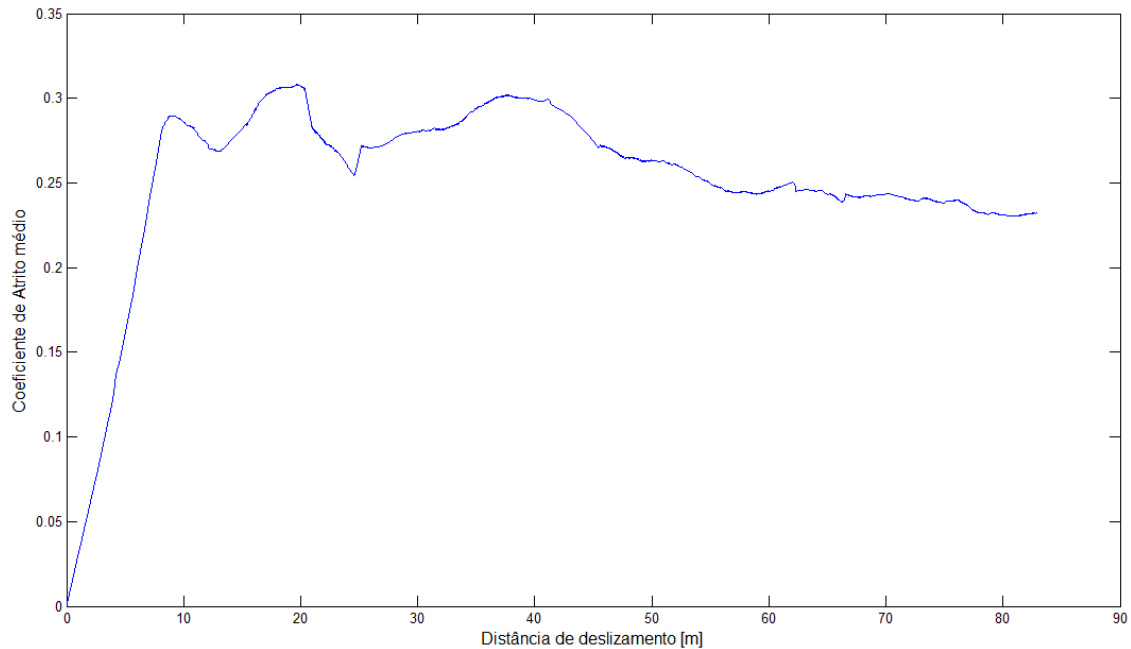
Figura 5 – Gráfico da força normal pela distancia de deslocamento nos ensaios com aço ABNT 4140 e ABNT 4140 nitretado.

A segunda bateria de ensaios foi realizada na configuração de carga constante (700 g) em um intervalo de tempo de 120 minutos.

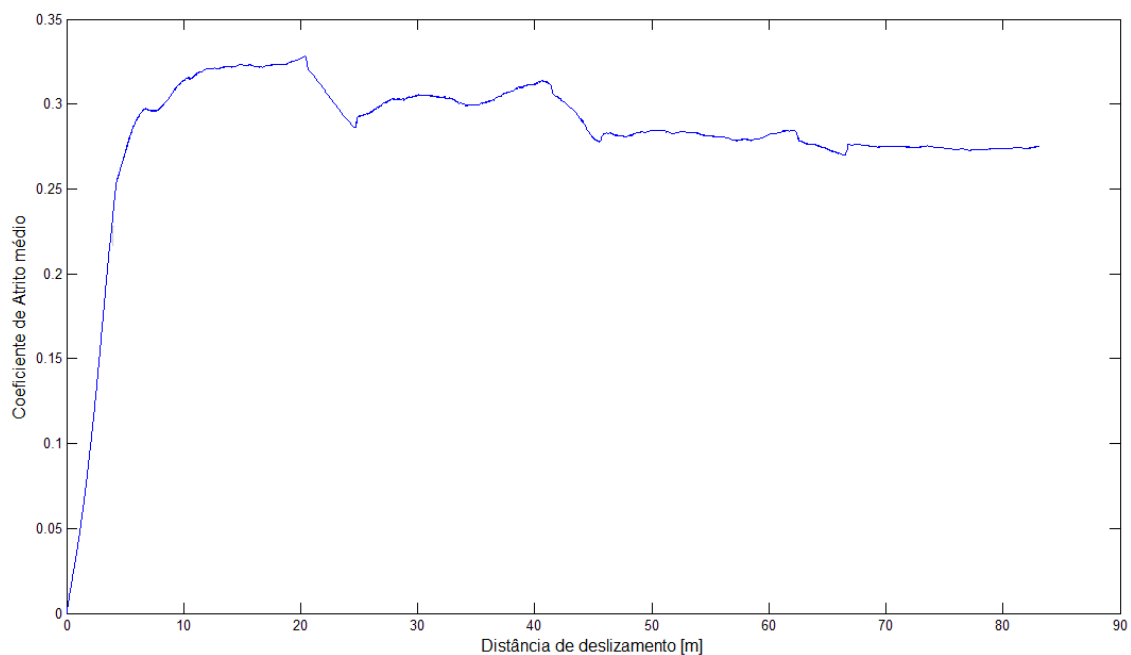
3. RESULTADOS

Pela Figura 6 observa-se que o coeficiente de atrito se manteve constante após atingir valores próximos a 0,30. Esta observação se aplicada às amostras de ABNT 4140 e também as amostras de ABNT 4140 nitretadas.

Estes resultados mostram que o processo de nitretação não interferiu no coeficiente de atrito, pois os resultados para ambas as amostras demonstram uma pequena queda neste coeficiente de atrito médio. O coeficiente de atrito se mostrou constante em 0,25 após inserção da carga de 2100 g, ou seja, aos 20 minutos de ensaio e 40 m de percurso do ensaio de carga variável.



- a -



- b -

Figura 6 – Coeficiente de atrito pela distancia de deslizamento, ensaio de carga variável em amostras de aço ABNT 4140 (a) e aço ABNT 4140 nitretado (b).

A Figura 7 mostra a variação do potencial de contato com relação ao deslocamento no ensaio de carga variável. Pela Figura 7.a observa-se uma variação em pontos máximos e mínimos em uma representação cíclica, que coincide com o acréscimo de carga no sistema. Na amostra de aço ABNT 4140 não nitretada ocorre o aumento de potencial de contato quando há formação de óxidos de ferro na superfície dos corpos em contato pelo efeito do aumento da temperatura.

Ao se inserir uma nova carga, mais 700 g, ocorre deformação plástica do substrato e, conseqüentemente, a quebra da camada de óxido formada anteriormente. Após o encruamento da camada superficial ocorre uma quebra na camada

de óxidos, diminuindo a resistividade elétrica. Com o ajuste de uma nova carga, a camada de óxido forma-se novamente na interface metal-metal e o potencial de contato volta a aumentar. (Figura 7)

Para a amostra de aço ABNT 4140 nitretada este fenômeno é observado somente nos primeiros 25 metros de ensaio, ou seja, após 15 minutos de ensaio e durante a aplicação da carga de 1400 g. A partir deste momento, o potencial de contato tende à zero. Esta é uma indicação do aumento do contato entre corpo e contracorpo. Esta condição se mantém constante durante todo o restante do ensaio, mesmo ao se inserir as cargas de 2100 e 2800 g. (Figura 8)

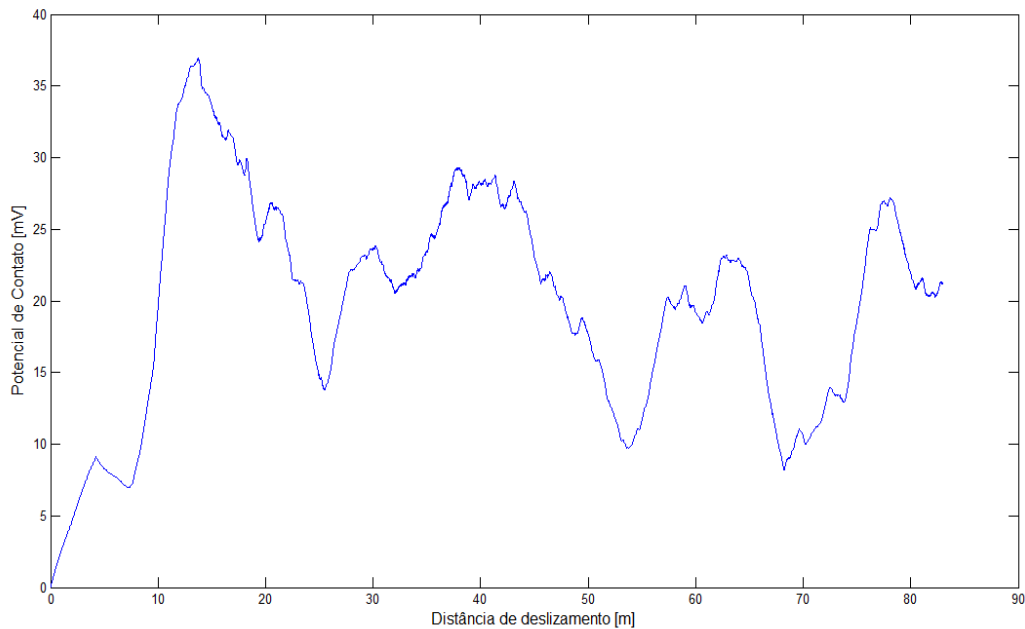


Figura 7 – Potencial de contato pela distancia de deslizamento, ensaio com amostra de aço ABNT 4140 não nitretado.

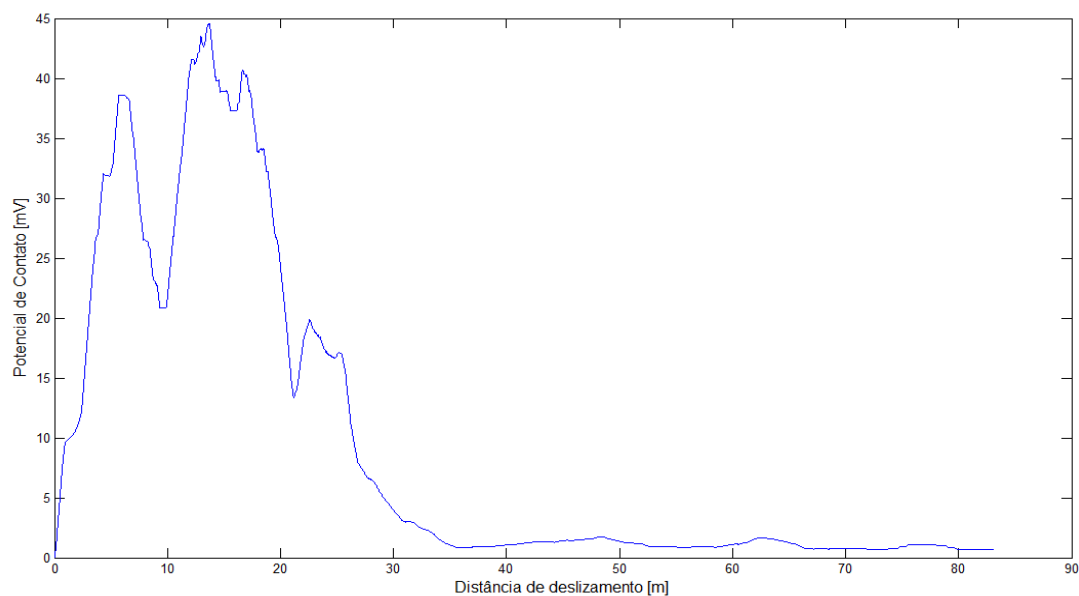


Figura 8 - Potencial de contato pela distancia de deslizamento, ensaio com amostra de aço ABNT 4140 nitretado.

Com intenção de se investigar esta queda de potencial registrada no ensaio de deslizamento para a amostra ABNT 4140 nitretado, uma segunda bateria de ensaios foi realizada na configuração esfera-plano à carga constante (700 g) em um intervalo de tempo de 120 minutos.

As imagens construídas por Interferometria Laser (Figura 9 e 10), mostram que as marcas de desgaste para os ensaios realizados na amostra de aço ABNT 4140 não nitretado possuem profundidade da trilha de desgaste máximo de 15 μm . Para a amostra nitretada, a profundidade média das trilhas de desgaste é de aproximadamente 7 μm . (Figuras 11).

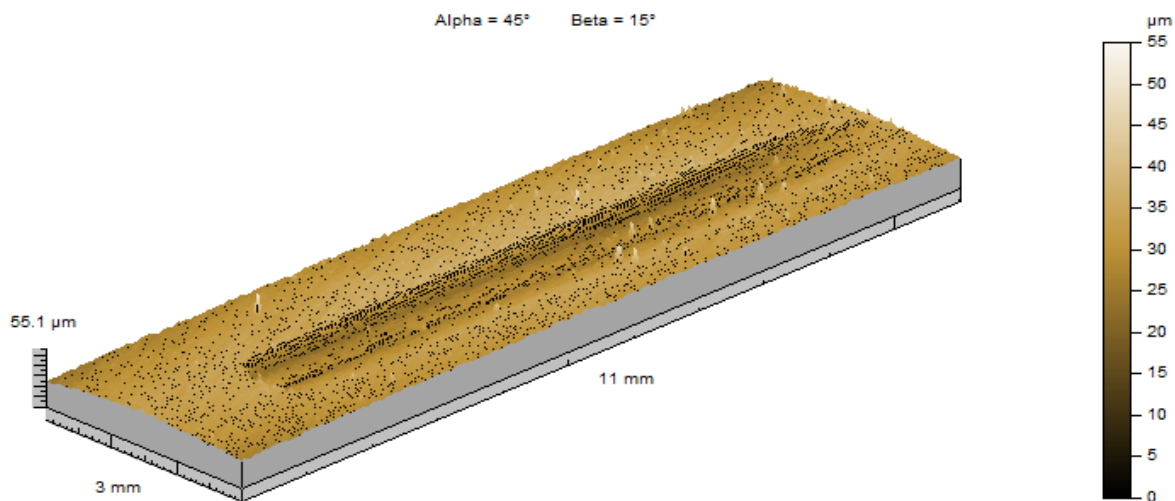


Figura 9 – Superfície ABNT 4140 após ensaio de desgaste à carga constante.

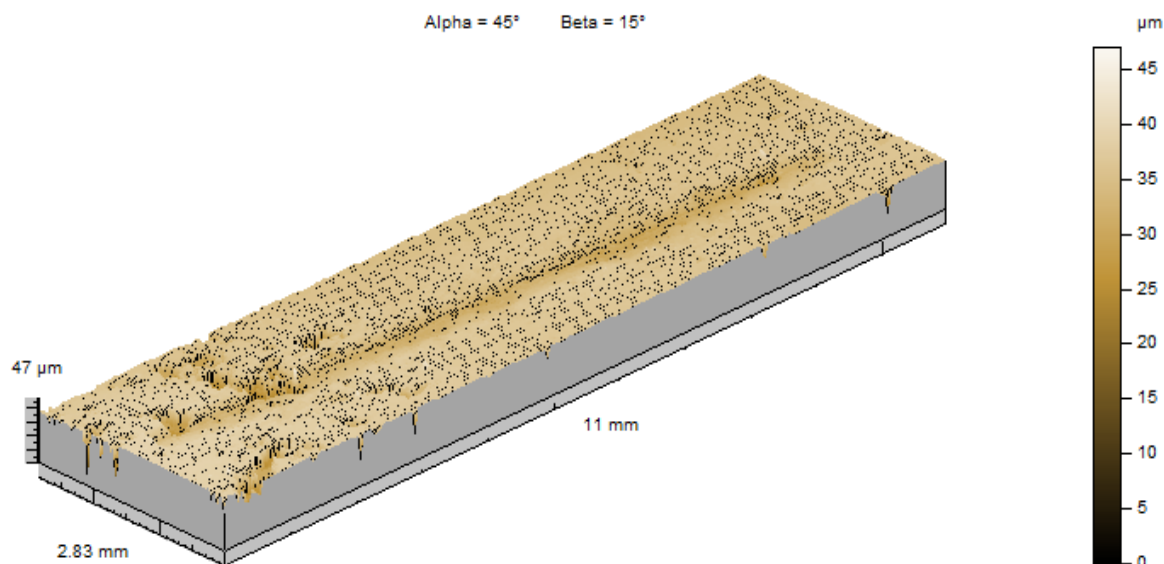


Figura 10 – Superfície ABNT 4140 nitretado após ensaio de desgaste à carga constante.

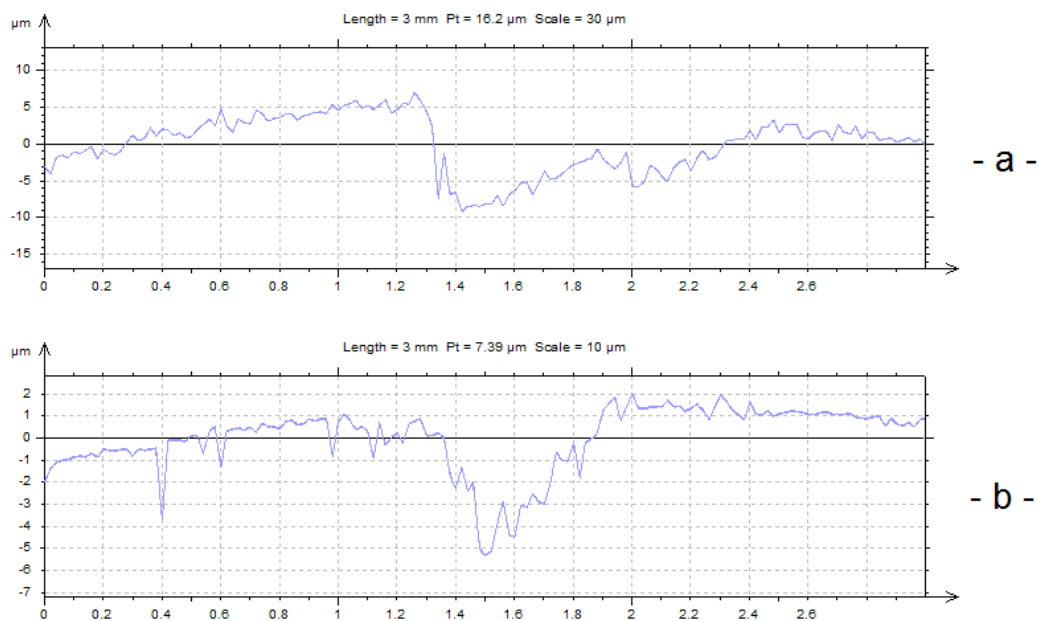


Figura 11 – Perfil da trilha de desgaste para o substrato (a) e para o material nitretado (b).

As Figuras 12 e 13 mostram os valores para as trilhas de desgaste em área e volume, os valores revelam que o desgaste foi mais severo nas amostras de aço ABNT 4140 não nitretadas do que nas amostras de aço ABNT 4140 nitretadas.

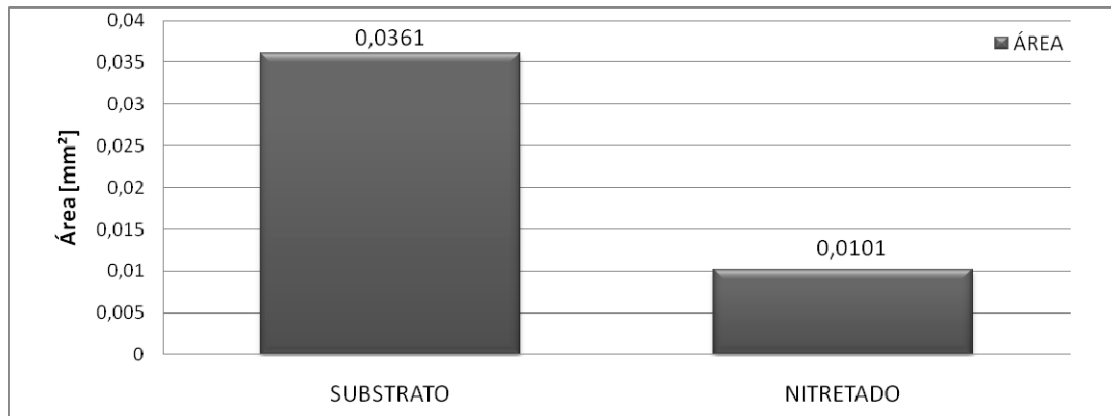


Figura 12 – O Gráfico da área das trilhas de desgaste para amostras de aço ABNT 4140 e aço ABNT 4140 nitretado.

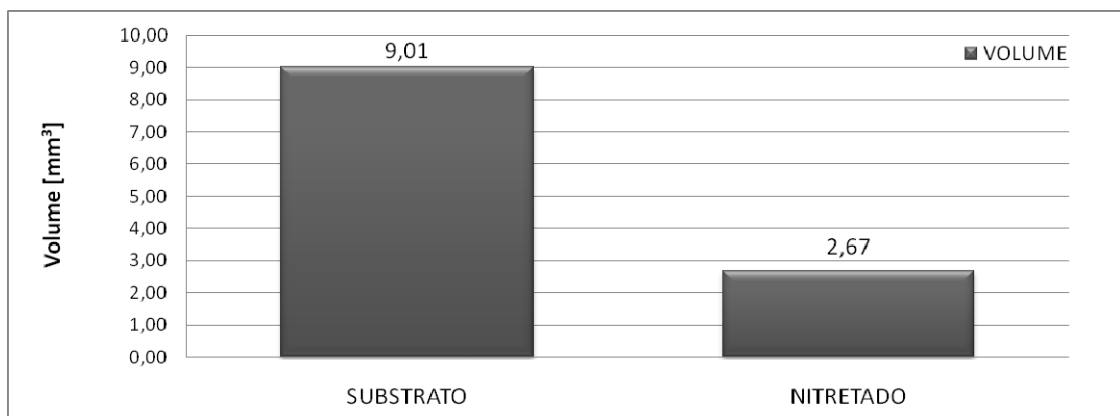


Figura 13 – O Gráfico do volume das trilhas de desgaste para amostras de aço ABNT 4140 e aço ABNT 4140 nitretado.

Observa-se, pelas trilhas de desgaste formadas, que tanto em área como em volume a amostra nitretada apresentou valores de desgaste da ordem de três vezes menor que para a amostra não nitretada.

O desgaste do contracorpo que agiu contra a amostra nitretada foi cerca de 30% maior que o desgaste do contracorpo imposto ao aço ABNT 4140 não nitretado. Este maior desgaste do contracorpo provocou uma maior área de contato entre os corpos. Isto explica a queda de potencial nos ensaios com carga variável. (Figura 12)

O maior desgaste da esfera de aço AISI 52100 atritada contra a amostra nitretada pode ser atribuído à sua maior dureza. (Tabela 1)

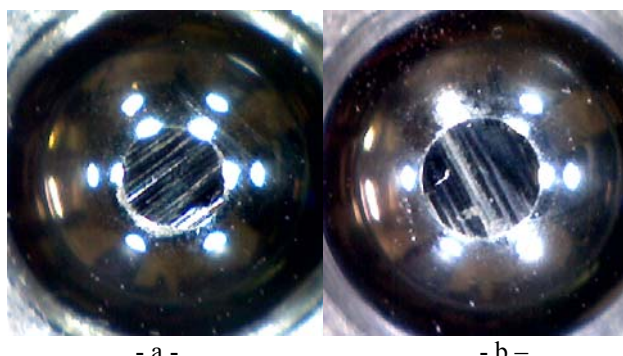


Figura 12 – Imagens dos contracorpos esféricos após ensaios contra: ABNT 4140 (a) e ABNT 4140 nitretado (b).

A Tabela 1 mostra os volumes das esferas (contracorpo) que foram desbastadas ao interagir no contato, onde o volume foi determinado pela eq. (1):

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (3a^2 + h^2) \quad (1)$$

onde:

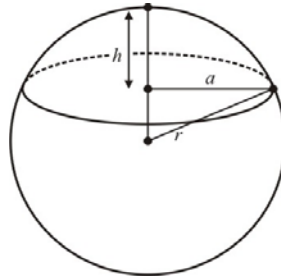


Tabela 1 – Diâmetros e volumes da calota de desgaste do contracorpo.

Contracorpo do par:	Diâmetro (mm)	Volume (mm ³)
Substrato	1,384 ± 0,010	0,679 ± 0,005
Camada Nitretada	1,776 ± 0,023	1,465 ± 0,011

A Figura 12 mostra que as esferas passaram por processo de desgaste abrasivo. Os abrasivos são provenientes do desgaste dos próprios corpos. Os *debris* de desgaste da esfera e da trilha passam a prevalecer na interface dos materiais que, por sua vez, aceleram o processo de desgaste dos corpos e contracorpos.

A Figura 13 mostra o decaimento do desgaste com a nitretação do aço ABNT 4140 (corpo) e correspondente aumento de desgaste da esfera de aço AISI 52100 (contracorpo).

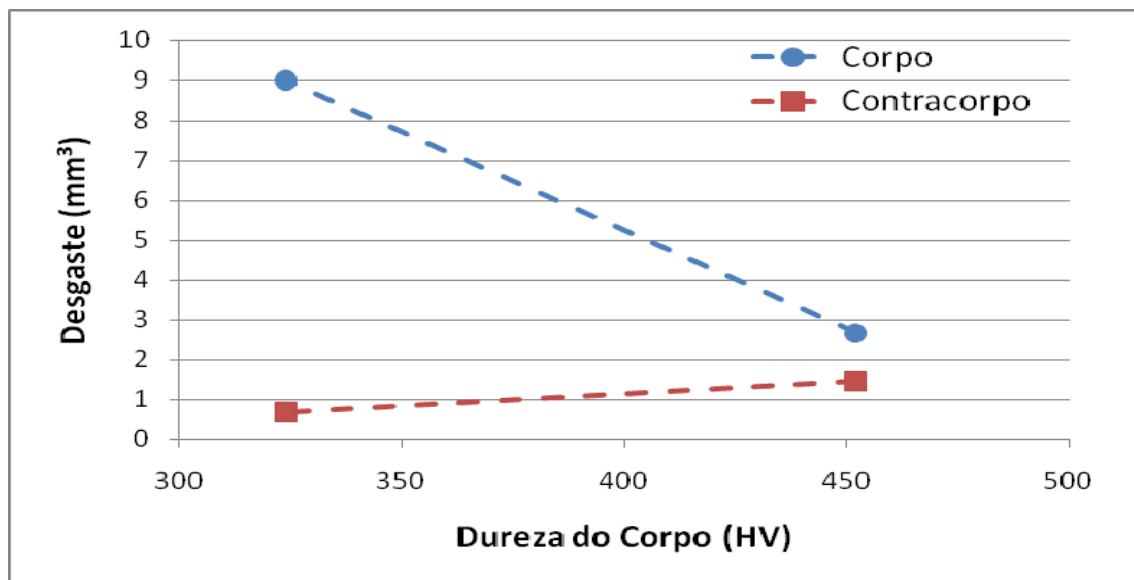


Figura 13 - Desgaste com relação à dureza para corpo e contracorpo.

4. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o processo de nitretação por FJEDM promove a formação de uma camada uniforme que eleva a resistência ao desgaste mecânico do aço ABNT 4140. Foi possível estimar que a 7 µm de profundidade ainda existe a presença nitretos. Os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento esfera-plano alternativo mostraram que esta camada intermediária é mais resistente que a matriz.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (TEC APQ 01481/09), a CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

6. REFERÊNCIAS

ARANTES, L. J. **Desenvolvimento e avaliação do processo híbrido de usinagem por descargas elétricas e jato de água abrasivo (AJEDM)**, 2007. 125f. Tese de doutorado. UFU, Uberlândia.

CAMARGO, B. C., COSTA, H. L., RASLAN, A. A. **Endurecimento superficial de uma liga Ti₆Al₄V através de usinagem por descargas elétricas**.16° POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

MCGEOUGH, J. A., **Advanced Methods of Machining**. London: Chapman and Hall, 1988. p. 128-152.

RASLAN, A. A.; ARANTES, L. J. **Método de Usinagem Híbrida Combinando Descargas Elétricas e Erosão Abrasiva**. FAPEMIG, Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais;Universidade Federal de Uberlândia. BR n. PI0703468-7, 06 set. 2007, 24 mar. 2009.

RASLAN, A. A., COSTA, H. L., SANTOS, R. F., SILVA, E. R., TELES, V. C., **Enriquecimento de superfícies através da usinagem por descargas elétricas com jato de fluido dielétrico – FJEDM**; Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - POSMEC20 – Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

YAN, B. H., TSAI, H. C., HUANG, F. Y., **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, 194-200, 2005.