

## DESGASTE POR DESLIZAMENTO DO AÇO ABNT 4140 NITRETADO PELO PROCESSO DE DESCARGAS ELÉTRICAS (NDE)<sup>1</sup>

*André Rezende de Figueiredo Oliveira<sup>2</sup>*

*Mário Martins de Oliveira Júnior<sup>3</sup>*

*Alberto Arnaldo Raslan<sup>4</sup>*

*José Daniel Biasoli de Mello<sup>5</sup>*

### Resumo

A utilização de descargas elétricas produzidas nos processos de usinagem por descargas elétricas (EDM - *Electrical Discharge Machining*) para enriquecer superfícies metálicas é uma técnica que se encontra em desenvolvimento. No que diz respeito à nitretação, resultados promissores foram obtidos em um aço ABNT 4140. O objetivo deste trabalho é explorar o potencial tribológico dessa técnica em aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas (NDE). Amostras deste aço foram submetidas a descargas elétricas produzidas por um equipamento EDM por penetração. Como eletrodo, foi utilizado cobre eletrolítico. Como fluido dielétrico, utilizou-se água deionizada com ureia diluída, sob circulação forçada (FJEDM – Fluid Jet EDM). Observou-se a formação de uma camada enriquecida com nitrogênio, com espessuras da ordem de 25 µm. Houve a formação de nitretos de ferro, provocando um endurecimento da superfície. A resistência ao desgaste por deslizamento foi avaliada em um tribômetro. A configuração utilizada foi a de contato esfera-plano em movimento alternado. Os resultados mostraram uma melhora na resistência ao desgaste com relação à matriz.

**Palavras-chave:** Nitretação; Desgaste por deslizamento; *Fluid Jet EDM*; Aço ABNT 4140.

### SLIDING WEAR OF ABNT 4140 STEEL NITRIDED BY ELECTRICAL DISCHARGES PROCESS

### Abstract

The use of electrical discharges produced in machining processes by electrical discharges (EDM - *Electrical Discharge Machining*) to enrich metal surfaces is a technique that is in development. With regard to nitriding, promising results were obtained in an ABNT 4140 steel. The objective of this study is to explore the tribological potential of this technique in ABNT 4140 steel nitrided by electrical discharges. These steel samples were subjected to electrical discharges produced by penetration EDM. As electrode, electrolytic copper was used. As dielectric fluid was used urea diluted with deionized water under forced circulation (FJEDM - Fluid Jet EDM). We observed the formation of a nitrogen-enriched layer with thickness of approximately 25 µm causing a hardening of the surface. The sliding wear resistance was evaluated by using a sphere-plane contact in reciprocation. The results showed an improvement in wear resistance.

**Keywords:** Nitriding; Sliding wear; Fluid Jet EDM; ABNT 4140 steel.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Mestre em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia*

<sup>3</sup> *Graduado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia*

<sup>4</sup> *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Uberlândia*

<sup>5</sup> *Doutor em Metalurgia, Programa Pós Graduação Eng. Mecânica da Univ. Federal de Uberlândia*

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de descargas elétricas produzidas durante o processo EDM (*Electrical Discharge Machining*) para enriquecer superfícies metálicas é uma técnica em desenvolvimento. Em 1988, McGeough<sup>(1)</sup> descreveu as descargas elétricas produzidas no processo de EDM convencional, como um estado plasmático com temperaturas superiores a 8.000°C que funde a superfície do material eletrodo-peça, como mostra a Figura 1.

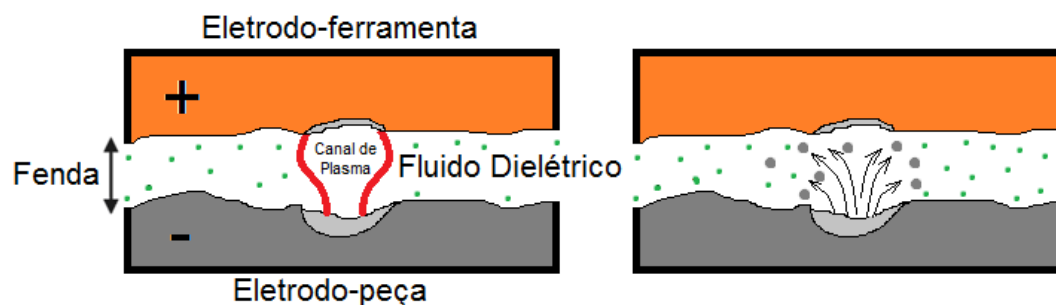


Figura 1. Esquematização da usinagem por descarga elétrica.

Yan, Tsai e Huang<sup>(2)</sup> realizaram tentativas no sentido de se utilizar a energia gerada na EDM para promover o enriquecimento de superfícies metálicas com nitrogênio. Em 2013, Santos<sup>(3)</sup> investigou o enriquecimento com nitrogênio de um aço ABNT 4140. Como fonte de nitrogênio foi utilizada ureia diluída em água deionizada na concentração de 10 g/l. Este trabalho registrou a formação de duas camadas com aproximadamente 10 µm cada, estas estruturas foram classificadas como: camada Refundida e Camada Intermediária. (Figura 2)

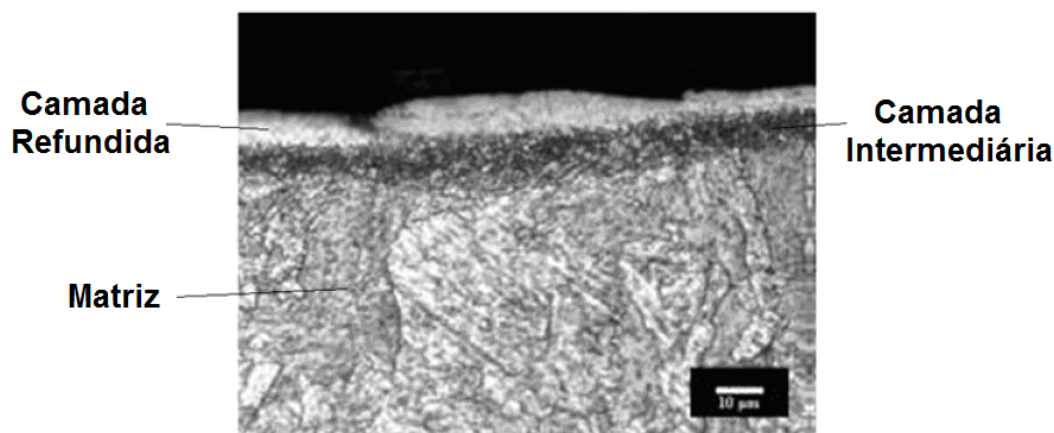


Figura 2. Micrografia da amostra de aço ABNT 4140 usinadas pelo processo EDM com adição de ureia. Nital 2%.<sup>(3)</sup>

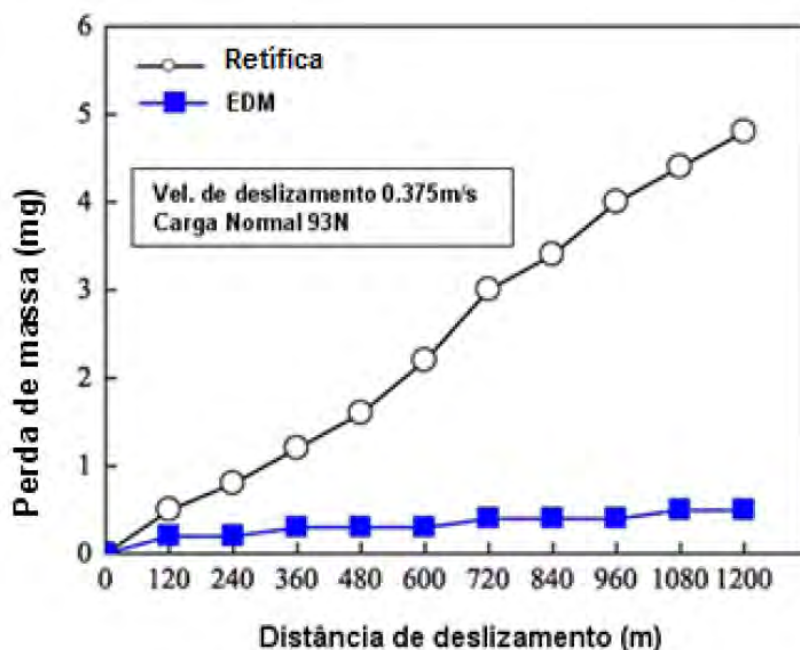
A presença de ureia no processo de EDM de um aço proporciona a formação de estruturas que não surgem no processo de EDM convencional. O modelo físico elaborado relaciona a presença da ureia durante o processo de usinagem por descargas elétricas com o enriquecimento superficial por nitrogênio da peça usinada.

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 ( $65 \times 10^{-12}$  m), é facilmente inserido na 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.

O enriquecimento de superfícies por nitrogênio em peças de  $Ti_6Al_4V$  foi estudado por Yan e colaboradores em 2005<sup>(2)</sup>, neste trabalho foram verificados os efeitos de solução de ureia dissolvida em água destilada no processo EDM por penetração. Os resultados experimentais indicaram que o nitrogênio decomposto no fluido dielétrico migrou para a superfície da peça formando camada endurecida de TiN, com espessura média de 60  $\mu$ m.

A Figura 3 mostra a perda de massa acumulada em teste de desgaste em função da distância de deslizamento. Este ensaio foi realizado para comparar a resistência ao desgaste da superfície de peças de titânio usinadas por retífica e por processo por EDM, usando solução de água destilada e ureia como fluido dielétrico. Nessa figura também são mostradas as condições do ensaio. Os resultados experimentais mostraram que a resistência ao desgaste obtido na superfície eletroerodida usando solução de água com ureia como fluido dielétrico é melhor que da superfície retificada. Segundo o autor, isso se deve à camada cerâmica de TiN formada.



**Figura 3.** Perda de massa acumulada da superfície retificada em relação à superfície usinada por descargas elétricas.<sup>(2)</sup>

Santos,<sup>(3)</sup> em seu trabalho de investigação sobre o enriquecimento com nitrogênio de um aço ABNT 4140 observou acréscimo de dureza em ambas as camadas formadas no processo (Figura 2). Este fato motivou a realização deste trabalho, ou seja, explorar o potencial tribológico do aço ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas (NDE).

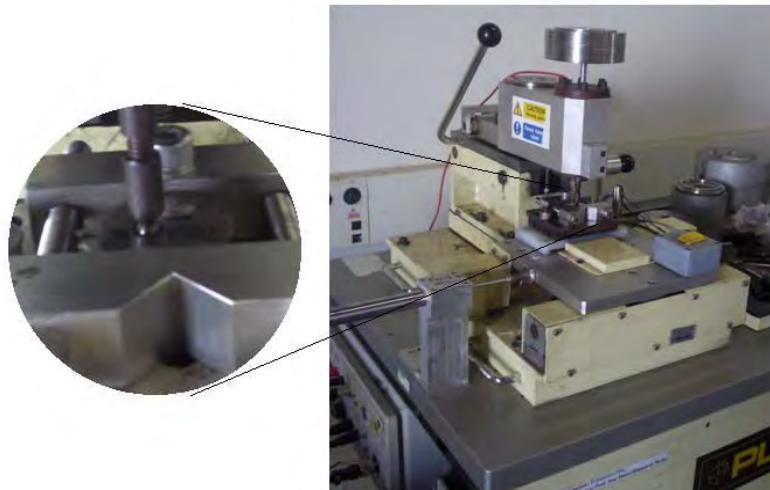
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras do aço ABNT 4140 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 na concentração de 10 g/l, sob pressão de 230 bar.

Foram realizados ensaios de desgaste nas amostras de aço ABNT 4140 (Matriz), ABNT 4140 temperado e ABNT 4140 nitretado por descargas elétricas.

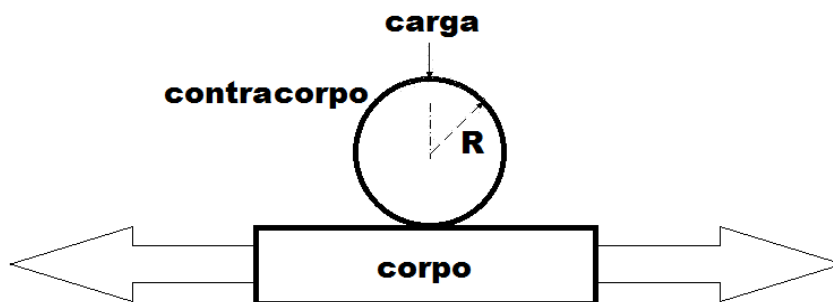
No processo NDE, há a formação de uma camada refundida, que contém concentradores de tensões, tais como microtrincas e bolhas, que diminuem a vida útil das peças. Assim, para a realização dos ensaios tribológicos dessas amostras, a camada refundida foi retirada por processos de polimento. Foi utilizada uma lixa de óxido de alumínio com granulometria 600 mesh.

Os ensaios de desgaste foram realizados em um tribometro Plint, modelo TE67. (Figura 4)



**Figura 4** – Tribometro Plint, modelo TE67, utilizado nos ensaios de desgastes por deslizamento, em destaque, contato esfera-plano.

Foi utilizado a configuração esfera-plano em movimento alternado com amplitude de 5 mm. Como contracorpo foram utilizadas esferas de aço ABNT 52100 com diâmetro de 5 mm (Figura 5).



**Figura 5.** Esquemática do ensaio de desgaste por deslizamento esfera-plano, movimento alternado.<sup>(4)</sup>

Para se avaliar o desgaste das amostras e dos contracorpos, realizou-se uma bateria de ensaios na configuração de carga constante (0,7 Kg). Os ensaios foram realizados com duração de 120 minutos com uma frequência de aquisição de dados de 400 Hz. Foram realizados três ensaios em cada amostra. A taxa de desgaste das amostras foi medida através do volume das trilhas de desgaste por meio de imagens obtidas por interferometria laser.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

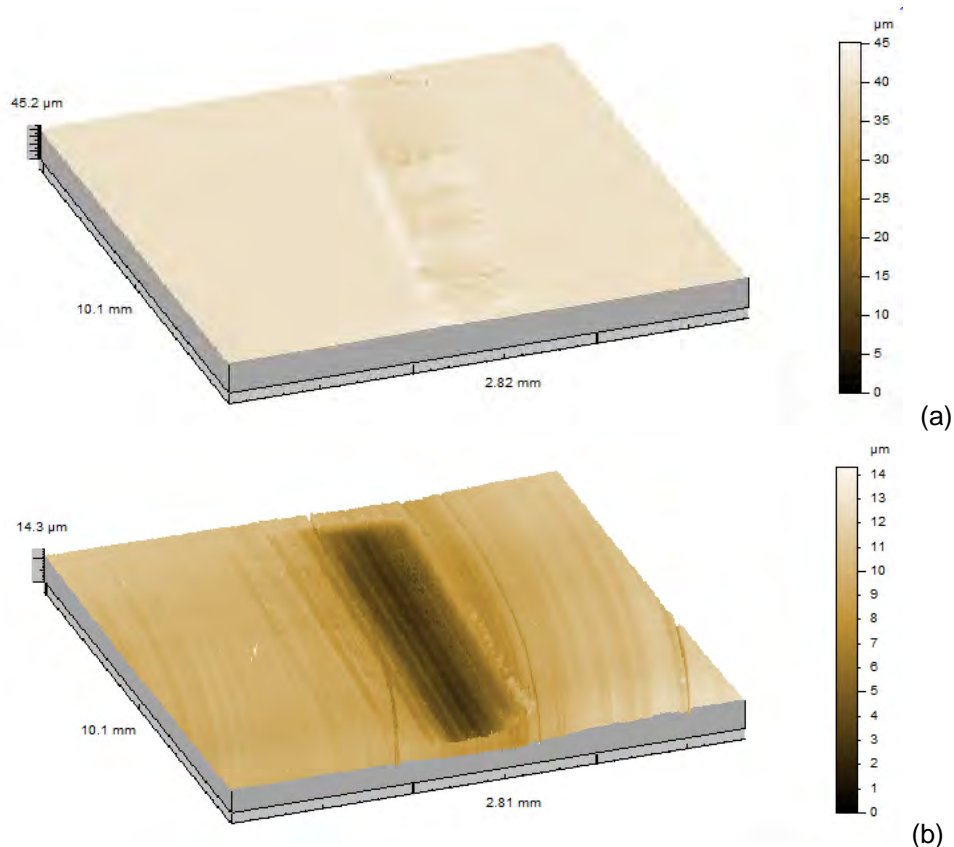
A Tabela 1 mostra os resultados da média com desvio padrão (DP) de microdureza Vickers. Para as amostras usinadas por EDM, foi verificada a dureza das duas camadas formadas no processo.

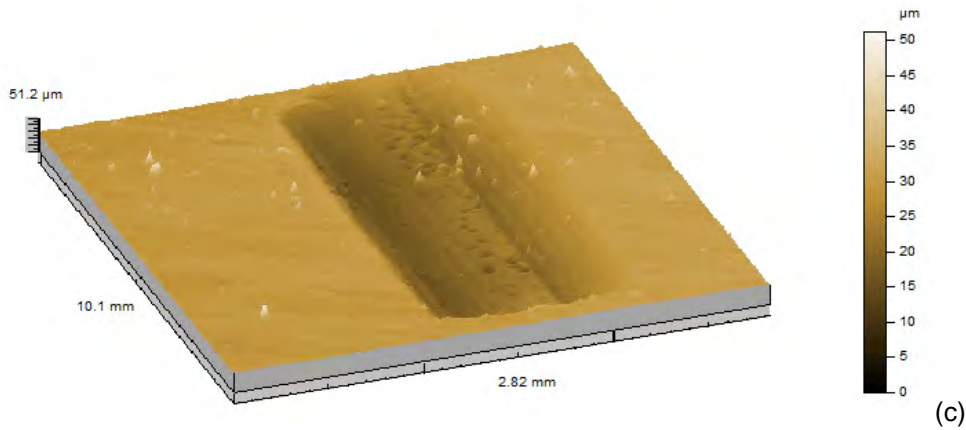
Tabela 1 – Ganho relativo de microdureza Vickers (10 gf, 10 s, 3 resultados)

	Média ± DP	Ganho Relativo à Matriz
Matriz Ferrítica/Perlítica	445 ± 54	---
Matriz Martensítica (Temperada)	534 ± 38	20 %
<b>EDM - Água Deionizada + Ureia, 10 g/l</b>		
Camada refundida	1235 ± 123	175 %
Camada Intermediária	964 ± 60	115 %

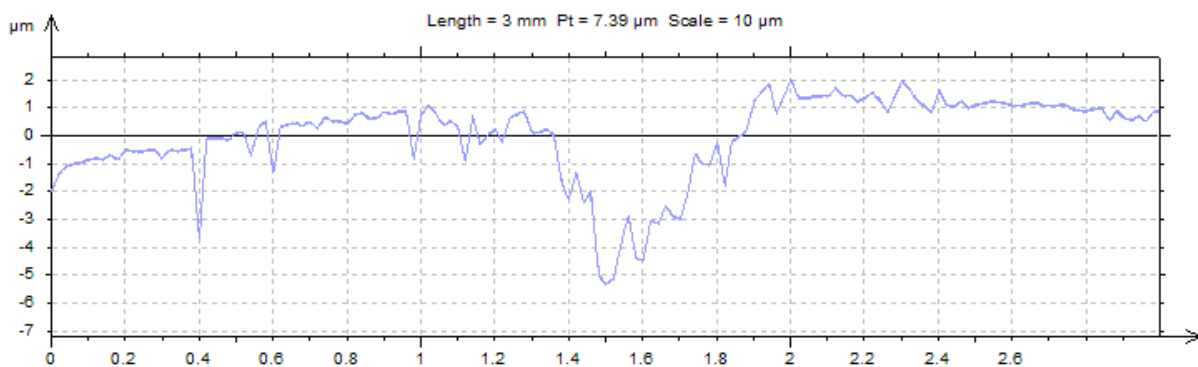
O valor de dureza desta camada intermediária (Nitretada por EDM) é expressivamente maior que os resultados obtidos para as amostras com matriz perlítica/ferrítica e matriz martensítica.

Foram, portanto, selecionadas amostras de aço ABNT 4140: Nitretado por descargas elétricas, matriz martensítica e matriz ferrítica/perlítica, para se realizar os ensaios de deslizamento. As imagens construídas por Interferometria Laser (Figura 6), mostram as trilhas de desgaste para os ensaios de deslizamento realizados.



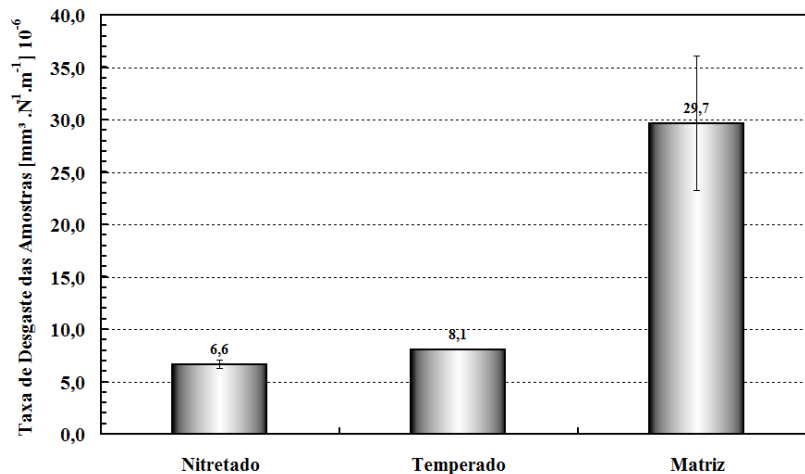


**Figura 6** – Superfície das amostras após ensaio de desgaste à carga constante. ABNT 4140: a) Nitretado; b) Temperado; c) Matriz.



**Figura 7.** Perfil da trilha de desgaste para a amostra nitretada.

A Figura 8 mostra os valores para a taxa de desgaste das amostras, estes revelam que o desgaste foi mais severo nas amostras de aço ABNT 4140 matriz.

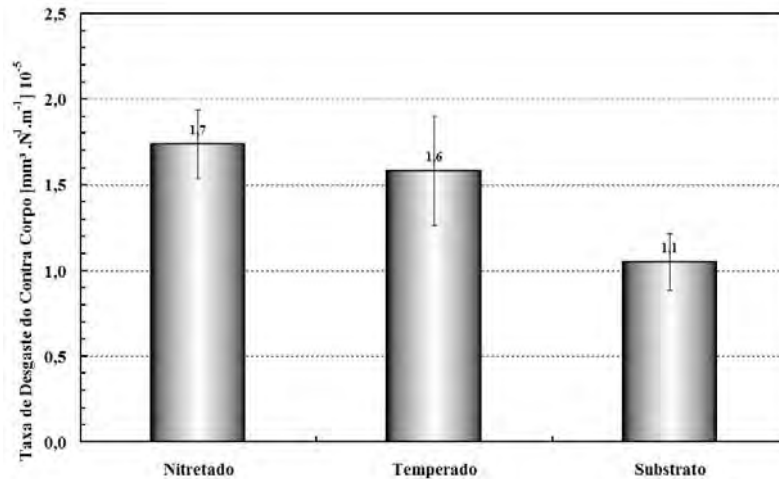


**Figura 8** - Taxa de desgaste das amostras ABNT 4140.

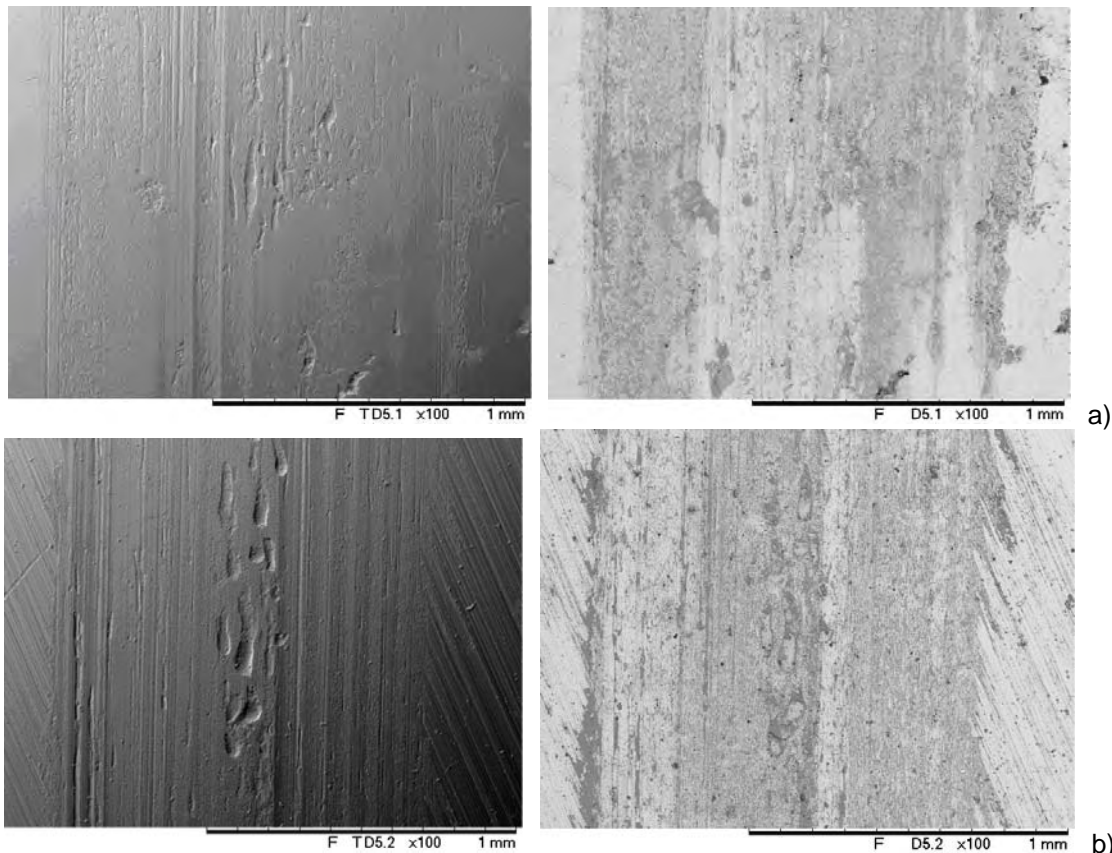
Observa-se que as taxas de desgaste para as amostras nitretada e temperada apresentaram valores três vezes menor que para a amostra matriz. Observa-se também que a amostra nitretada por EDM apresentou desgaste 18 % menor que a amostra temperada. É razoável supor que este ganho em desempenho pode ser associado à formação de nitretos de ferro nesta amostra.

A Figura 9 mostra que o desgaste dos contracorpos que agiram contra as amostras nitretada e temperada foi cerca de 40 % maior que o desgaste do contracorpo imposto ao aço ABNT 4140 matriz. O maior desgaste da esfera de aço ABNT 52100 atritada contra a amostra nitretada pode ser atribuído à maior dureza da amostra nitretada. (Tabela 1)

Para se compreender o mecanismo de desgaste envolvido nos ensaios, foram realizadas análises utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das amostras nitretada e matriz.



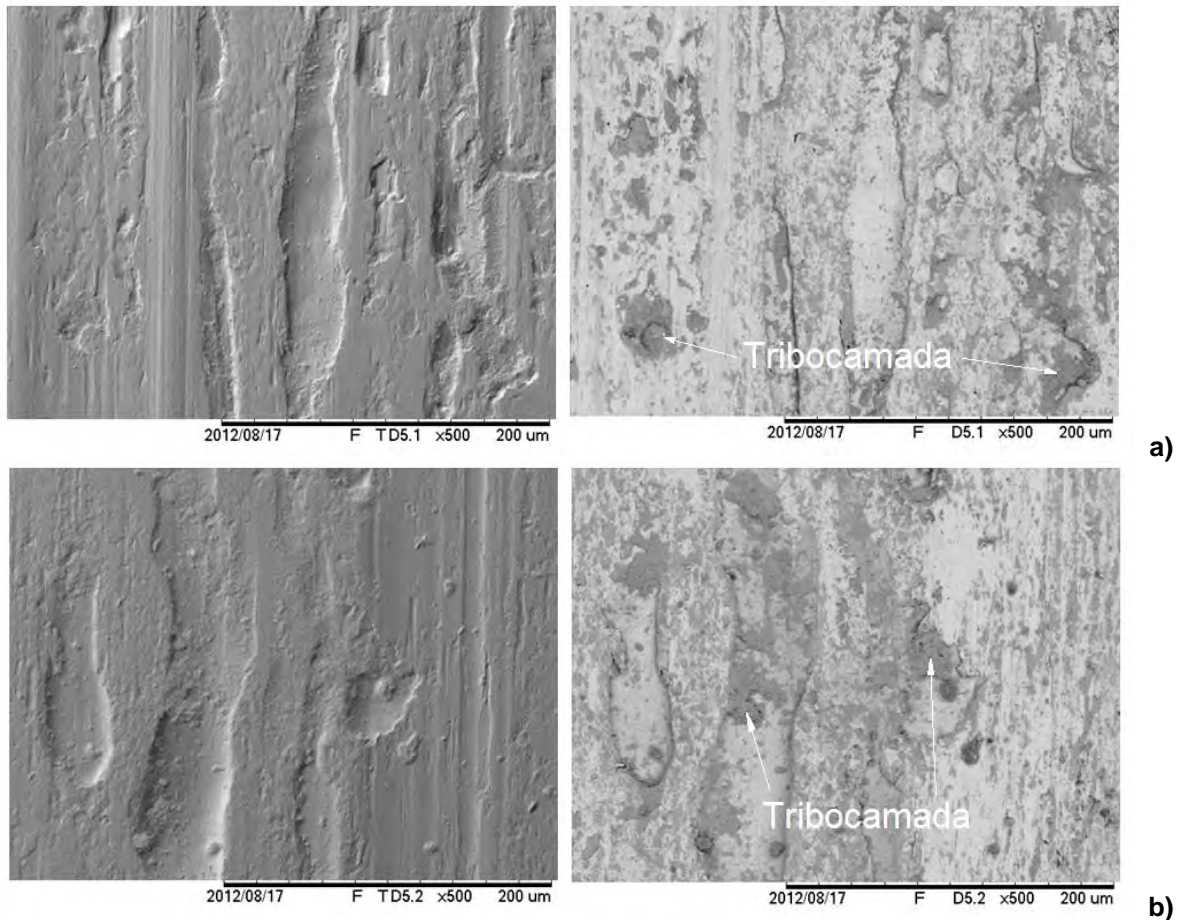
**Figura 9** – Taxa de desgaste dos contracorpos (Esfera de aço AISI 52100).



**Figura 10.** Imagens de MEV das trilhas de desgaste das amostras: a) Nitretada; b) Matriz. Imagens obtidas por elétrons secundários à esquerda e elétrons retroespalhados à direita.

Analisando as imagens MEV das amostras: nitretada e matriz (Figuras 10), observam-se mecanismos de desgastes semelhantes, porém estes foram mais severos na amostra matriz.

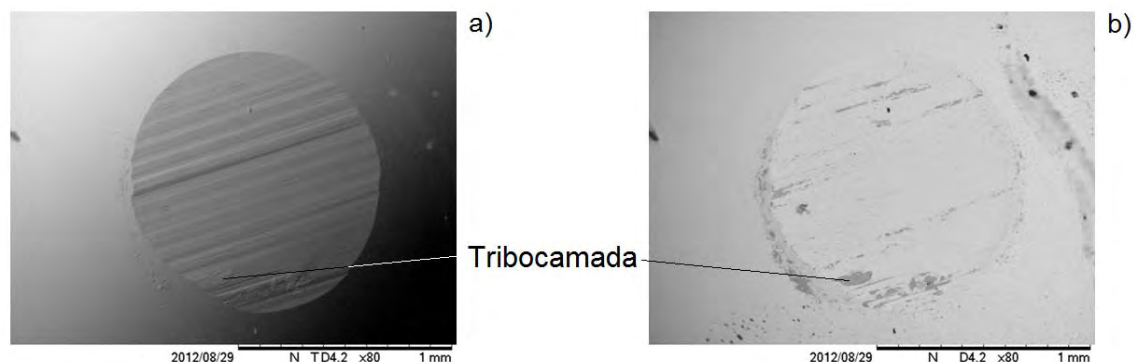
As imagens de elétrons retroespalhados da Figura 11 mostram contrastes diferentes no centro da marca de desgaste, indicando a presença de material com número atômico inferior ao do material de base, este fato sugere a formação de uma tribocamada durante o processo de deslizamento. Esta tribocamada pode ser formada *debris* de desgaste fortemente deformados e oxidados provenientes dos pares em contato.



**Figura 11.** Imagens de MEV do centro das trilhas de desgaste das amostras: a) Nitretada; b) Matriz. Imagens obtidas por elétrons secundários à esquerda e elétrons retroespalhados à direita.

A Figura 12 mostra a presença da tribocamada no contracorpo, formações semelhantes ocorreram em todos os contracorpos utilizados.





**Figura 12.** Imagens de MEV do contracorpo. A) Imagem obtida por elétrons secundários b) Imagem obtida por elétrons retroespalhados.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o processo de nitretação por EDM promove a formação de uma camada nitretada que eleva a resistência ao desgaste por deslizamento do aço ABNT 4140. Os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento esfera-plano (alternado) mostraram que a camada nitretada é mais resistente que o aço com matriz ferítica/perlítica e, também, com matriz martensítica. Foi possível estimar que a 7  $\mu\text{m}$  de profundidade ainda existe a presença de nitretos. Quanto ao mecanismo de desgaste, conclui-se que as amostras passam por processos de desgaste semelhantes, onde se constata a formação de uma tribocamada.

## 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. Aos Professores, Rogério Felício dos Santos e Ernane Rodrigues da Silva (Cefet/MG) pela disponibilização das amostras.

## REFERÊNCIAS

- 1 MCGEOUGH, J. A., Advanced Methods of Machining. London: Chapman and Hall, 1988. p. 128-152.
- 2 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.
- 3 SANTOS, R.F. Nitretação por EDM do Aço AISI 4140. Tese de Doutorado, UFU, 02/2013, 156 f.
- 4 Hutchings, I.M. - Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, Londres, 1992