

# ENSAIO DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE AÇOS USADOS EM HASTES DE UNIDADE DE BOMBEIO DE PETRÓLEO<sup>1</sup>

Ruthilene Catarina Lima da Silva<sup>2</sup>

Gelsoneide da Silva Gois<sup>3</sup>

Aline Cristina Mendes Farias<sup>4</sup>

João Telésforo Nóbrega Medeiros<sup>5</sup>

## Resumo

Estudou-se a resistência à abrasão de diferentes aços aplicados em hastes polidas de unidades de bombeamento de petróleo, as quais trabalham com movimento alternado em ambientes abrasivos e corrosivos. A haste é considerada polida de acordo com critérios da norma API 11B e, juntamente com um conjunto de selos elastoméricos, promove a vedação do fluido bombeado, evitando vazamento para o meio ambiente. O movimento alternado, o óleo e as partículas abrasivas presentes durante o processo de bombeamento podem levar ao desgaste da geratriz das hastes, comprometendo a sua vedação. Ensaios de deslizamento a seco e lubrificados com óleo contaminado por partículas de SiO<sub>2</sub> foram realizados em corpos-de-prova dos aços *AISI 316*, *AISI 4140*, *AISI 1045 revestido* e *AISI 4142 revestido*, extraídos de hastes polidas comerciais usadas em unidades de bombeio de petróleo. Contracorpos cilíndricos de geratriz angular de poliuretano deslizavam contra um corpo-de-prova metálico estacionário. A pressão de contato de Hertz inicial e a velocidade de deslizamento foram variadas em dois níveis, 0,09 e 0,18 MPa, 0,4 e 0,9 m/s, respectivamente. As taxas de desgaste foram calculadas através da variação de massa dos corpos. A morfologia do desgaste foi caracterizada por Microscopia Eletrônica de Varredura, onde se identificou o dano de abrasão.

**Palavras-chave:** Tribologia; Desgaste; Abrasão; Aços.

## SLIDING WEAR TESTING OF STEELS USED IN POLISHED-RODS OF OIL PUMP JACK

### Abstract

It was studied the abrasion resistance of different steels applied in polished rod of oil pump jack the which work in reciprocating motion and abrasive and corrosive environment. The rod is considerate polished according to standard API 11B and together with a seal package promote sealing of the oil pumped avoiding leakage to the environment. The reciprocating motion, the oil and abrasive particles presents during the process leads to surface wear of the rods compromising the system sealing. Sliding testing were carried out in *AISI 316*, *AISI 4140*, *AISI 1045 coated* e *AISI 4142 coated* steel specimens extracted from commercials polished rods used in pump jack, in the conditions dry and lubricated with oil contaminated by 10% of SiO<sub>2</sub>. Cylindrical counterbodies with angular generatrix of polyurethane slides against a stationary metallic body. The initial contact pressure and sliding velocity were varied at two levels, 0.09 and 0.18 MPa, 0.4 and 0.9 m/s, respectively. The wear rates were calculated through of the mass variation from specimens. The wear morphology was characterized by Optical and Scanning Electron Microscopy, where identified damages by abrasion.

**Key words:** Tribology; Wear; Abrasion; Steels.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutoranda em Engenharia Mecânica – PPGEM – UFRN - ruthilene@ufrnet.br*

<sup>3</sup> *Estudante de graduação de Engenharia de Materiais da UFRN - gelsoneidegg@yahoo.com.br*

<sup>4</sup> *Mestranda em Engenharia Mecânica - PPGEM – UFRN – alineastro@yahoo.com.br*

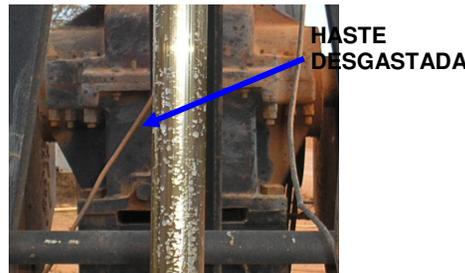
<sup>5</sup> *Professor do DEM-CT-UFRN e do PPGEM-UFRN – medeirosj2@asme.org*

# 1 INTRODUÇÃO

Em 2009, o Rio Grande do Norte possui cerca de cinco mil poços de petróleo em operação, cuja maioria utiliza bombas de fundo, acionadas por hastes de bombeio para desempenhar a função de prospecção de petróleo. As hastes polidas integram essas unidades de bombeio e, juntamente com um pacote de selos, garantem a vedação do sistema.

O bombeamento mecânico com hastes é o método de elevação artificial de óleo mais utilizado em todo o mundo. Utilizam-se diversos materiais na fabricação de hastes, sejam aços ou compósitos, sendo que as hastes de fibra de vidro são menos utilizadas em relação às de aço, por razões de custo de aquisição, sendo aplicadas em poços com maiores problemas de corrosão e cargas elevadas.<sup>(1)</sup>

Observa-se, em campo, que diversas hastes sofrem desgaste promovido pela presença de areia, detritos de rochas dos reservatórios ou partículas de desgaste das próprias hastes e retentores. Na Figura 1, apresenta-se um exemplo de haste polida desgastada, ainda em operação. Hastes com baixa resistência ao desgaste podem comprometer a vedação, causando danos ambientais e perdas de produção.



**Figura 1.** Haste polida desgastada em operação (2005) em Unidade de Bombeio de Petróleo.

Neste estudo, avaliou-se a resistência à abrasão de diferentes aços aplicados em hastes polidas através de ensaios de deslizamento na configuração cilindro de Aço – contra - cilindro de geratriz angular de Poliuretano, analisando-se a influência do par PV (pressão de contato-velocidade de deslizamento) e das condições de ensaio, a seco ou lubrificado com óleo contaminado por partículas de areia, aplicadas em laboratório.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

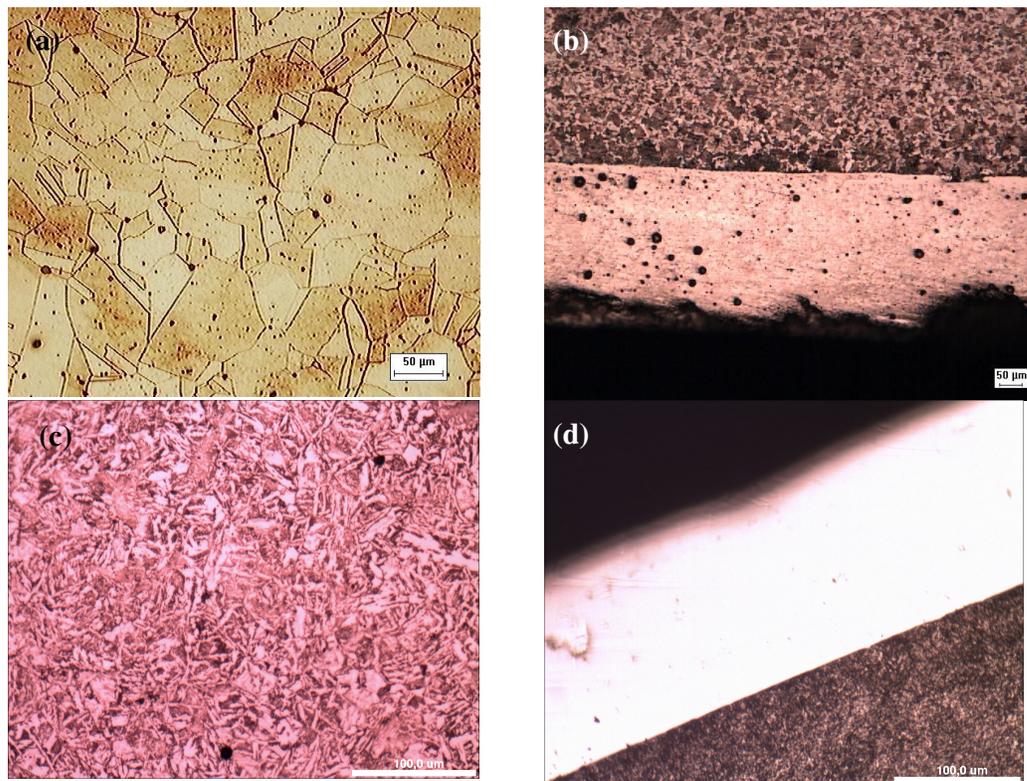
Quatro hastes polidas comerciais foram utilizadas no estudo e estão discriminadas na Tabela 1 juntamente com suas durezas, rugosidades e resistências à tração, caracterizadas em laboratório. O aço 316 é utilizado em tal aplicação devido, principalmente, à sua elevada resistência à corrosão – apesar da sua baixa resistência à abrasão. O aço AISI 1045 com revestimento à base de níquel e cromo, possui resistência à corrosão e à abrasão. Os elementos Cromo e Molibdênio presentes nos aços AISI 4140 e 4142 conferem boa resistência à tração e à tenacidade, mas os indícios da presença de óxidos superficiais no aço AISI 4140 são confirmados pela baixa dureza  $HV_{0,05}$ . O aço AISI 4142 usado possuía uma camada de revestimento de cromo duro, o que promove elevada resistência à abrasão.

**Tabela 1.** Caracterização dos aços das hastes polidas comerciais

| AÇO AISI                                         | DUREZA<br>HV <sub>0,05</sub> | RUGOSIDADE<br>R <sub>a</sub> (μm) | RESISTÊNCIA A<br>TRAÇÃO (MPa) |
|--------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 316                                              | 353±19                       | 0,26±0,08                         | 361±25                        |
| 1045 (com revestimento a base de níquel e cromo) | 892±12                       | 0,29±0,03                         | 364±31                        |
| 4140                                             | 226 <sup>[1]</sup> ±25       | 0,54±0,03                         | 940±19                        |
| 4142 (com revestimento à base de cromo duro)     | 1356±26                      | 0,32±0,01                         | 887±29                        |

<sup>[1]</sup>Dureza HV<sub>0,05</sub> obtida na geratriz cilíndrica da haste; na seção transversal, obteve-se HV<sub>0,05</sub> = 286±31

As microestruturas dos aços são apresentadas na Figura 2. Pode-se observar a presença de inclusões no aço AISI 316 (Figura 2a). Os revestimentos dos aços AISI 1045 e AISI 4142 tinham espessura média de 214 μm e 128 μm, respectivamente.



**Figura 2.** Microestrutura dos aços. (a) AISI 316 e (b) seção transversal de uma haste de aço AISI 1045 metalizado evidenciando a camada de revestimento de níquel e cromo, (c) AISI 4140, (d) seção transversal de uma haste de aço AISI 4142 revestido com camada de cromo duro.

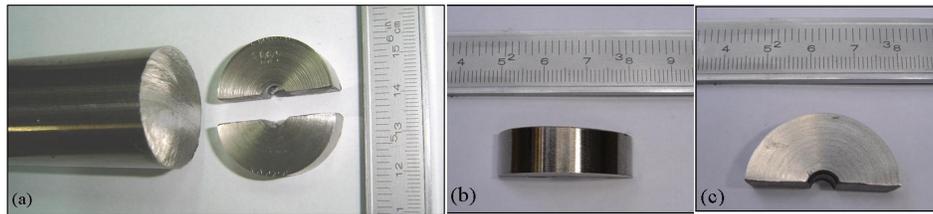
No revestimento do aço AISI 1045 (Figura 2b) encontram-se poros resultantes do processo de deposição. Isto não foi evidenciado no aço AISI 4142. Através do programa Micro Thickness (*Pseudo Color Method*) foi possível contabilizar os poros visualizados na Figura 2b, totalizando 329 poros, o que resultou, para o perímetro analisado, em 6,15% de porosidade. Segundo Gordonengland<sup>(2)</sup> esse valor de porosidade encontra-se na faixa normal aceitável, que é de 1% a 25%.

Os corpos-de-prova (CP) dos aços AISI 316, AISI 4140, AISI 1045 revestido e AISI 4142 revestido, foram obtidos através do seccionamento de hastes polidas comerciais de unidades de bombeio de petróleo. Os CP foram usinados na

configuração de disco bipartido (Figura 3), com 31,7 mm de diâmetro e 10,0 mm de espessura.

Um poliuretano elastômero termoplástico (TPU), adquirido comercialmente, foi utilizado como contracorpo, selecionado devido à sua característica de boa resistência à abrasão. Propriedades mecânicas deste poliuretano apresentados por Silva *et al.*<sup>(3)</sup> são mostradas na Tabela 2.

Figura



3.

Corpos-de-prova de aço (a) haste polida e seção transversal do disco bipartido (b) superfície de ensaio na seção circunferencial e (c) seção transversal do disco bipartido.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do Poliuretano utilizado nos ensaios experimentais.<sup>(3)</sup>

| Alongamento | Módulo de Young | Resistência a tração | Dureza    | Coefficiente de Poisson |
|-------------|-----------------|----------------------|-----------|-------------------------|
| 129± 26%    | 0,068 GPa       | 12 ± 0,7 MPa         | 84±1 Sh A | 0,35                    |

Os contracorpos de poliuretano comercial utilizados foram obtidos a partir de um tarugo de 60,0 mm de diâmetro, de onde foram extraídos, através do torneamento, cilindros com geratriz angular de 105° (objetivando intensificar a pressão de contato), com 14,0 mm de espessura, 36,0 mm e 9,0 mm de diâmetros externo e interno, respectivamente, conforme morfologia apresentada na Figura 4.

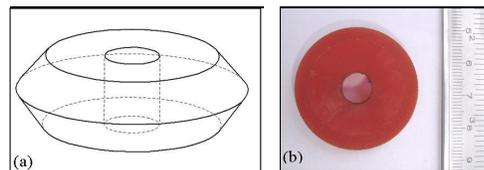


Figura 4. Contracorpo de poliuretano, (a) representação esquemática; (b) depois de torneado.

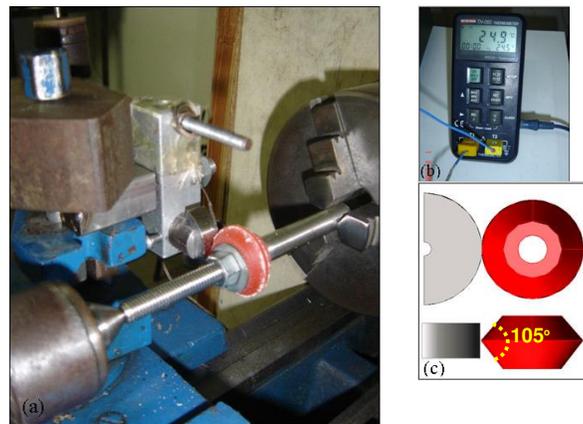
Os CP's de aço e de poliuretano foram limpos por ultra-som, secos e pesadas em balança analítica digital (resolução 0,1 mg) antes e após a realização dos ensaios.

O óleo de mamona foi utilizado nos ensaios como lubrificante, apresentando viscosidade absoluta de  $3,125 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s a 31 °C. A adição de 10% de contaminante abrasivo de areia (base SiO<sub>2</sub>), dimensão média de 282 μm, foi necessária para simular as condições reais de campo, já que a areia presente no fluido bombeado é um dos responsáveis pelo desgaste prematuro das hastes polidas.

## 2.2 Ensaio Tribológico Cilindro Contra Cilindro de Geratriz Angular

Ensaios de abrasão acelerados foram realizados utilizando uma bancada desenvolvida em laboratório, ilustrada na Figura 5(a). O termômetro digital utilizado para medir a temperatura ambiente e a temperatura próxima ao contato é mostrado na Figura 5(b), e na Figura 5(c) um esboço esquemático do par tribológico ensaiado.

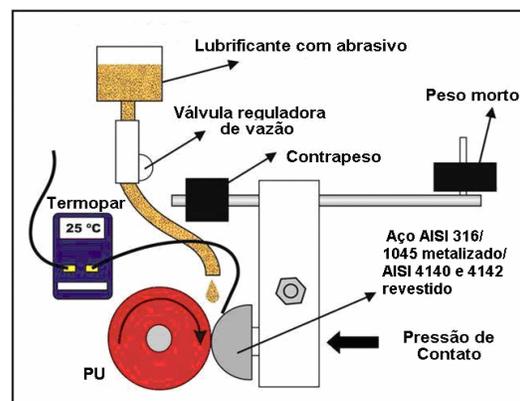
Todos os ensaios deste trabalho foram realizados utilizando esta configuração, com eixos das CPs paralelos entre si nas condições seca e lubrificada, como detalhado no esquema da Figura 5.



**Figura 5.** (a) Configuração do ensaio a seco; (b) Termômetro digital; (c) Esquema do contato aço-polímero.

Os contracorpos de PU deslizavam contra os corpos-de-prova de aços AISI 316, AISI 1045 revestido, AISI 4140 e AISI 4142 revestido, os quais permaneciam estacionários. A influência do par pV (pressão de contato - velocidade de deslizamento) foi investigada aplicando-se duas pressões de contato, 0,18 MPa (10,0 N) e 0,09 MPa (2,3 N) e duas velocidades de deslizamento: 0,4 m/s e 0,9 m/s. A distância de deslizamento foi constante e unidirecional de 12 km.

Para os ensaios lubrificados, utilizou-se um recipiente para o armazenamento do óleo com abrasivo, uma válvula reguladora de vazão do fluido, estabelecida em 0,033 mL/min, e um mangueira polimérica para direcionar o fluido lubrificante até a região de contato (Figura 6).



**Figura 6.** Representação esquemática do dispositivo de ensaio lubrificado.

As taxas de desgaste dos corpos-de-prova de aço foram calculadas através da equação de Archard,<sup>(4)</sup> onde o coeficiente de desgaste  $k_a$  [ $m^2/N$ ] é encontrado através da relação entre as equações (A) e (B):

$$Q = \frac{KW}{H} \quad (A)$$

Onde:  $Q = (V/d)$ , ou seja, volume desgastado por unidade de distância de deslizamento;  $K$  = coeficiente de desgaste adimensional e  $H$  = dureza;

Segundo Hutchings (1992), a equação (B), onde  $k_a$  é dimensional ( $m^2/N$ ) e igual a  $K/H$ , é mais utilizada na engenharia.

$$k_a = \frac{Q}{W} \quad (B)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

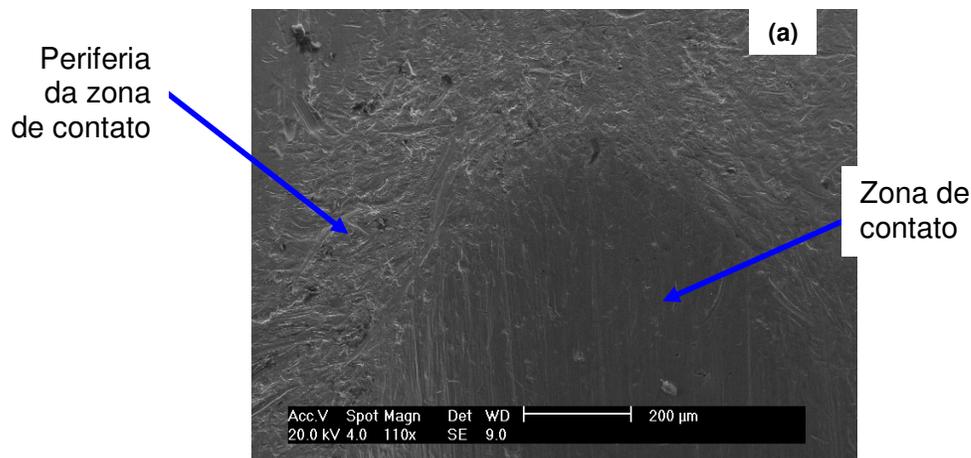
#### 3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

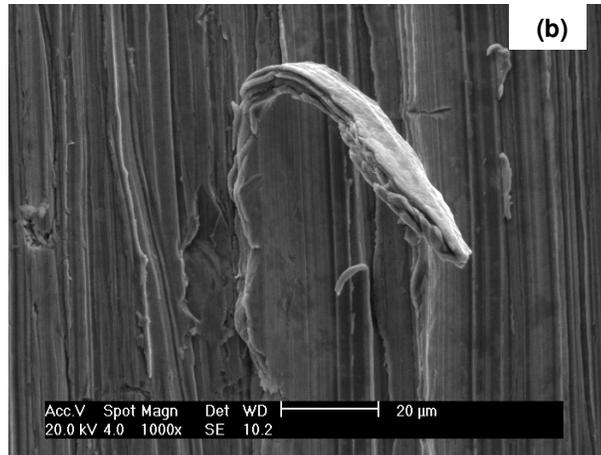
Imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas do aço AISI 316 após ensaiar na condição lubrificada (óleo+SiO<sub>2</sub>) com carga de 10 N são apresentadas na Figura 7.

Na zona de contato, como indicado na imagem da Figura 7(a), observam-se riscos abrasivos na direção do deslizamento. Já na periferia da zona de contato são identificados riscos em direção aleatória, além de indentações. Tais evidências indicam a ocorrência de abrasão a dois corpos e a três corpos, respectivamente.

Um “*debris*” foi encontrado na zona de contato da superfície desgastada do AISI 316 (Figura 7(b)), sendo removido na direção do deslizamento. Este fenômeno reafirma a baixa resistência à abrasão característica destes materiais.

Na Figura 8, apresenta-se a imagem MEV da superfície desgastada do aço AISI 1045 revestido na condição lubrificada (óleo+SiO<sub>2</sub>), carga de 10 N. Há presença de poros como identificada na análise metalográfica (Figura 2(b)).





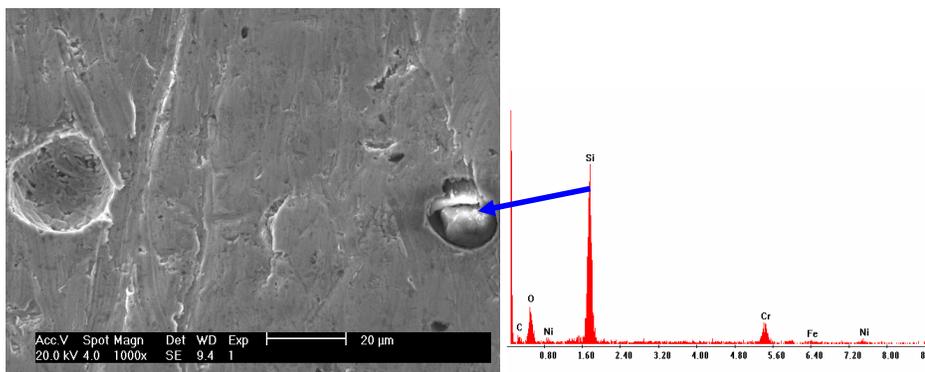
**Figura 7.** Imagens de MEV da superfície desgastada do aço AISI 316 após ensaio lubrificado (óleo+SiO<sub>2</sub>) com carga de 10N (a seta branca indica a direção e sentido do deslizamento).

Partícula de SiO<sub>2</sub> foi encontrada indentada na superfície do aço. Esta pode ser oriunda do processo de jateamento de areia realizado nas hastes antes da deposição do revestimento CrNi. Desta forma, a aderência do revestimento é comprometida.

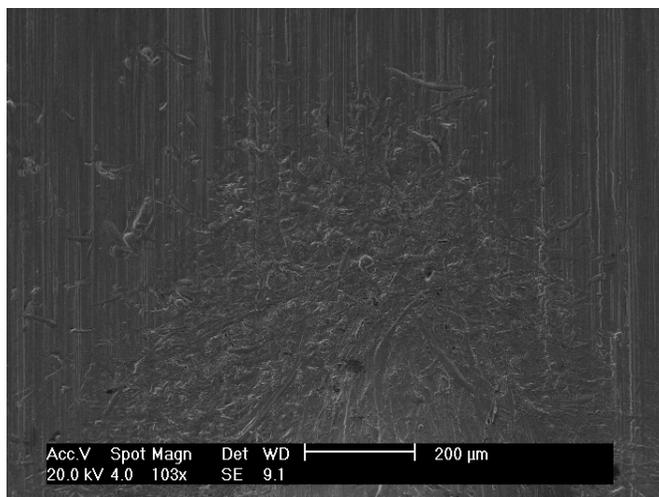
A imagem de MEV da superfície desgastada de AISI 4140 na condição lubrificada (óleo+SiO<sub>2</sub>) com carga de 10 N é mostrada na Figura 9. Os mesmos fenômenos de abrasão a dois e três corpos evidenciados no aço AISI 316 foram encontrados neste aço.

Na Figura 10 é apresentada a imagem de MEV da superfície desgastada do aço AISI 4142 revestido na condição lubrificada (óleo+SiO<sub>2</sub>), carga de 10 N.

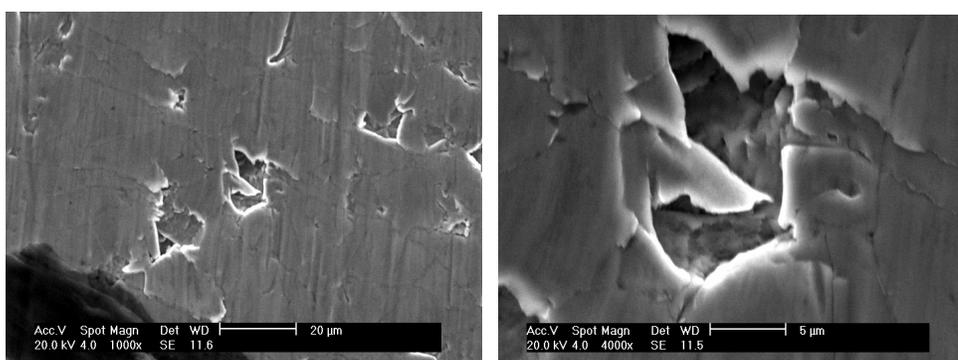
A fragilidade do revestimento do aço AISI 4142 decorrente da elevada dureza (1.356±26 HV<sub>0,05</sub>) pode ser evidenciada na imagem de MEV apresentada na Figura 10.



**Figura 8.** Imagens de MEV da superfície desgastada do aço AISI 1045 revestido após ensaio lubrificado (óleo+SiO<sub>2</sub>) com carga de 10 N.



**Figura 9.** Imagens de MEV da superfície desgastada do aço AISI 4140 após ensaio lubrificado (óleo+SiO<sub>2</sub>) com carga de 10 N.



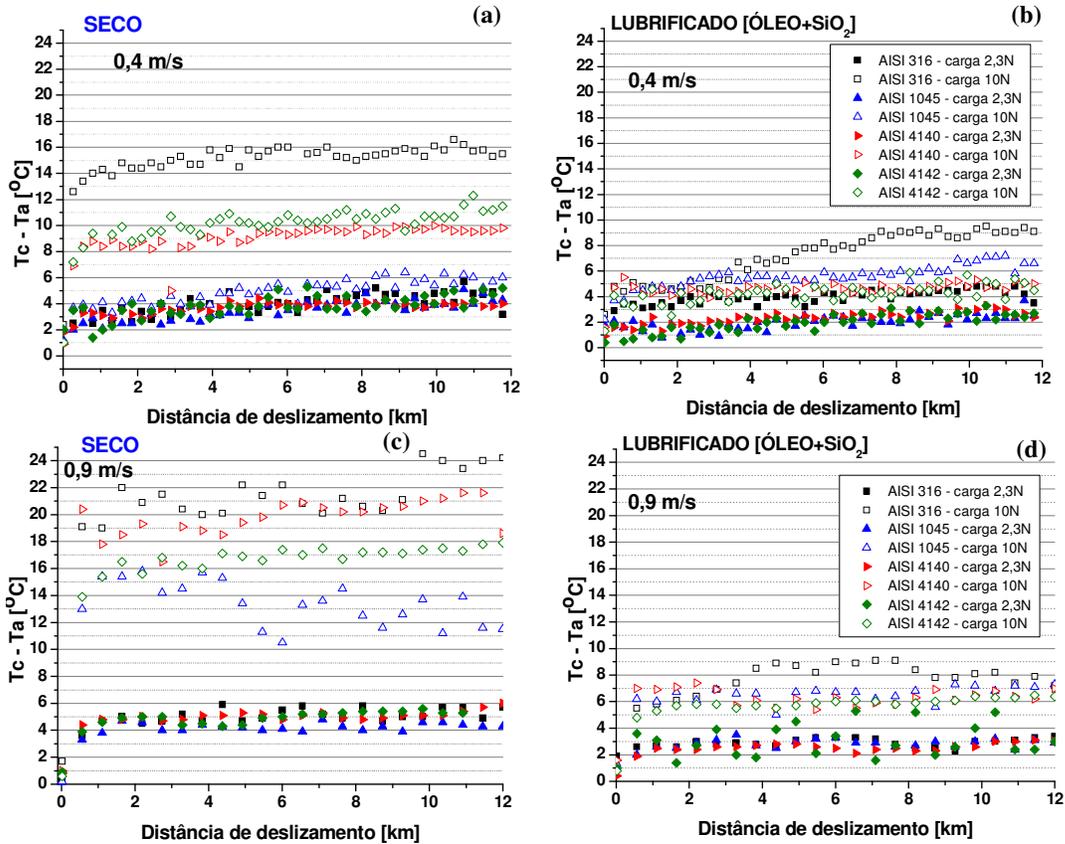
**Figura 10.** Imagens de MEV da superfície desgastada do aço AISI 4142 revestido após ensaio lubrificado (óleo+SiO<sub>2</sub>) com carga de 10 N.

### 3.2 Temperatura

Na Figura 11, apresentam-se as variações de temperatura próximas ao contato, menos a temperatura ambiente, em função da distância e velocidade de deslizamento e das condições de ensaio, a seco e lubrificado (óleo+SiO<sub>2</sub>). Essa diferença entre a temperatura  $T_c$  (a  $4,0 \pm 0,5$  mm do contato) e  $T_a$  (ambiente) é função do aquecimento local decorrente do atrito.

Há aumento de temperatura associado à maior pressão de contato (respostas do aquecimento do sistema às cargas normais de 10 N e de 2,3 N). Tal majoração na temperatura do contato é uma função do aumento no atrito entre os sólidos com movimento relativo entre si.

Nas duas condições de ensaio, a seco e lubrificado, nota-se que a condição de carregamento mais severa, 10 N (Pressão de contato inicial  $P_{ci}=184$  kPa), gera maior dissipação de calor. Na *condição a seco* e carga de 10 N, a variação de temperatura foi de 0°C a 22°C, enquanto que com carga de 2,3 N ( $P_{ci}=88$  kPa) foi de 0°C a 6,5°C, aproximadamente. Na *condição lubrificada* com carga de 10N a variação de temperatura foi de 0°C a 9°C (59% menor) enquanto que com carga de 2,3 N a variação foi de 0°C a 2,5°C (62% menor).



**Figura 11.** Variação de temperatura durante a realização dos ensaios de deslizamento nas condições a seco e lubrificada, para (a) e (b) 0,4 m/s e (c) e (d) 0,9 m/s.

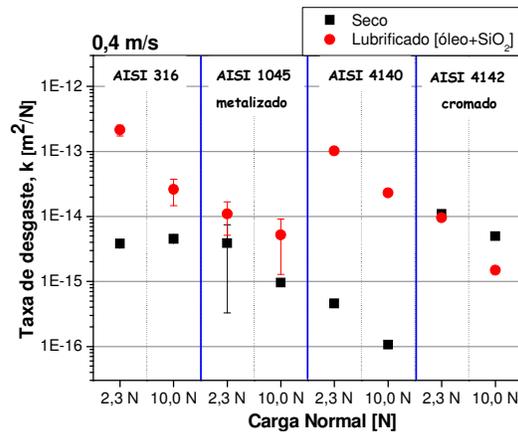
### 3.3 Taxas de Desgaste

As taxas de desgaste dos corpos-de-prova metálicos estão apresentadas na Figura 12 em função da carga normal aplicada (2,3 N e 10,0 N), da velocidade de deslizamento (0,4 m/s e 0,9 m/s) e das condições de ensaio, a seco e lubrificada.

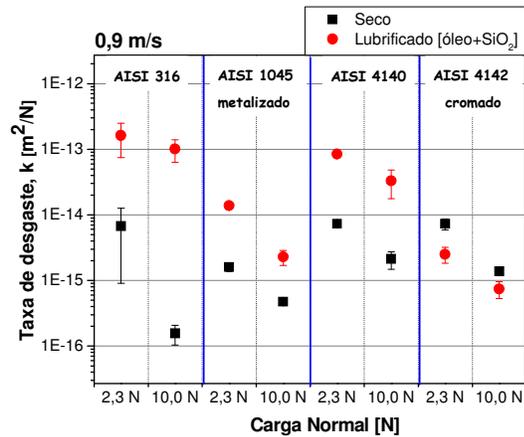
Observa-se que, para todos os materiais, a condição lubrificada com óleo contaminado resultou em maior taxa de desgaste, exceto para o AISI 4142 cromado. Hutchings<sup>(3)</sup> menciona que o lubrificante reduz o atrito entre as partículas e a superfície metálica, ampliando a faixa de ângulo de ataque das partículas, de forma que o modo de abrasão por corte ocorre, aumentando a eficiência na remoção de material.

A Figura 12 explicita duas tendências não triviais: (1) maiores cargas normais geraram menores taxas de desgaste, com exceção para o aço 316 e (2) os ensaios a seco promoveram menores taxas de desgaste em relação aos lubrificadas, exceto para o aço 4142 revestido, onde essa tendência se inverteu.

Velocidade de deslizamento: 0,4 m/s



Velocidade de deslizamento: 0,9 m/s



**Figura 12.** Taxas de desgaste dos aços AISI 316, AISI 1045 revestido, AISI 4140 e AISI 4142 revestido em função da carga normal aplicada e da velocidade de deslizamento para os ensaios a seco e lubrificado com presença de partículas abrasivas.

O aço AISI 316 apresentou maior taxa de desgaste na presença de lubrificante contaminado (óleo+SiO<sub>2</sub>), da ordem de 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/N, demonstrando a baixa resistência à abrasão desse aço inoxidável no contato com o PU em presença de um lubrificante contaminado com SiO<sub>2</sub>.

A taxa de desgaste do aço AISI 4142 revestido, nas duas condições, lubrificado (óleo+SiO<sub>2</sub>) e a seco, foi da ordem de 10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup>/N a 10<sup>-15</sup> m<sup>2</sup>/N, demonstrando sua boa estabilidade na resistência à abrasão.

## 4 CONCLUSÕES

Com base no método e materiais utilizados:

1. os aços revestidos com filmes finos (Aço AISI 1045 e 4142) apresentaram uma melhor resistência ao desgaste abrasivo em ensaios lubrificadas com óleo contaminado;
2. os aços AISI 1045 metalizado e AISI 316 demonstraram maior resistência ao desgaste na condição de ensaio sem lubrificante;
3. a condição lubrificada com óleo contaminado gerou desgaste mais severo que a condição a seco em todos os materiais e condições de ensaio, com exceção para o AISI 4142; e
4. na condição de menor carregamento foram obtidas maiores taxas de desgaste para os materiais estudados, exceto para o aço AISI 316.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Petrobras-UN-RNCE pelo apoio financeiro e ao projeto CTPETRO/FINEP/INFRA I pelas análises de MEV.

## REFERÊNCIAS

- 1 Thomas, J.E., 2001, "Fundamentos de Engenharia de Petróleo." Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- 2 GORDONENGLAND, 2007; <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>
- 3 Silva, R. C.L., Santana, J.S., Silva Jr., J.F., Silva, A.O., Medeiros, J.T.N., 2006, "Tribological study of the damage mechanics of polymer-metal contacts used in implants". Materials Science Forum, 514 (2006) 1099-1102.
- 4 Hutchings, I. M., 1992, "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials". Edward Arnold.