

DESGASTE POR DESLIZAMENTO DO PEEK E PTFE CONTRA O AÇO AISI 4140¹

*Laís Vasconcelos Silva²
Isaac Vinícius do Nascimento²
Fillipe Oliveira Pinto Santos²
Ruthilene Catarina Lima da Silva³
João Telésforo Nóbrega de Medeiros⁴*

Resumo

Sistemas de vedação polímero-metal usados na produção de Petróleo são desafiadores. Os comportamentos do PEEK e do PTFE foram avaliados visando vedação em cavalos mecânicos (UBs). Ensaios de deslizamento a seco polímero-aço AISI 4140 foram executados na configuração plano-cilindro, carga normal 5 N, velocidade 1 m/s e 1 km de distância de deslizamento, com 14 repetições. A temperatura a 3,0 mm do contato foi registrada como uma medida indireta do atrito. A taxa de desgaste foi calculada a partir da perda mássica. Utilizou-se um acelerômetro e um medidor comercial de vibração na avaliação da velocidade global de vibração dos sistemas PEEK-aço e PTFE-aço, correlacionando-a com mecanismos e taxas de desgaste, temperatura de contato e morfologia do dano superficial. Uma Planilha para o cálculo de pressão de contato foi elaborada e aplicada aos tipos de contato PEEK-aço e PTFE-aço, que possibilitou determinar a forma do contato, a pressão máxima, a deformação e as dimensões da região de contato.

Palavras-chave: Vedação de petróleo; Tribologia; Desgaste; Atrito.

SLIDING WEAR FOR PEEK AND PTFE AGAINST STEEL AISI 4140

Abstract

Sealing systems polymer-metal used in the oil production are challenger. The behaviour of the PEEK and PTFE were evaluated aiming at sealing Pump Jack. The dry Sliding Tests of polymer-steel AISI 4140 were carried out in the flat - cylinder configuration, normal load 5.0 N, sliding velocity 1.0 m/s and sliding distance 1.0 km, with 14 repetitions. The temperature near to contact at 3.0 mm were registered and evaluated as indirect measure of the friction. The wear rate was calculated from mass loss. It was used an accelerometer and a commercial measurer of vibration in assessing of the overall velocity vibration from systems PEEK-steel and PTFE-steel, correlating it with mechanisms and wear rates, contact temperature and morphology of the surface damage. A spread sheet for the calculation of the contact pressure was elaborated and applied to the types of contact PEEK-steel and PTFE-steel, being possible to determine the form of the contact, the maximum pressure, the deformation and the dimensions of the region of contact through the spread sheet.

Key words: Oil sealing; Tribology; Wear; Friction.

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

² *Graduando em Engenharia Mecânica /UFRN;*

³ *Doutoranda em Engenharia Mecânica - PPGEM /UFRN;*

⁴ *Professor do Programa de Pós-Graduação - PPGEM /UFRN*

1 INTRODUÇÃO

Polímeros como PEEK e PTFE apresentam um vasto campo de aplicação na Indústria petrolífera por apresentarem propriedades de alto desempenho. Na Unidade de Bombeamento, o retentor, material utilizado para a vedação do fluido, é submetido ao contato de deslizamento alternado com uma haste metálica polida, necessitando de baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste, boa estabilidade térmica e impermeabilidade a fluidos.

O PEEK é um termoplástico semicristalino de alto desempenho. Sua estrutura rígida, originada pela presença de anéis aromáticos, fornece extraordinárias propriedades mecânicas e estabilidade às temperaturas elevadas.⁽¹⁾ O comportamento desse polímero ao atrito e ao desgaste vem sendo estudado por vários pesquisadores, dentre eles, Lu e Friedrich⁽¹⁾ que, ao investigarem a influência do fator-pV sobre o PEEK deslizando contra aço DIN 100Cr6, constataram que a velocidade tem maior efeito sobre o desgaste desse polímero que a pressão de contato, enquanto o coeficiente de atrito não apresentou alteração significativa com a variação do fator-pV. Unal e Mimaroglu,⁽²⁾ investigaram o PEEK deslizando contra aço AISI D2 e concluíram que a carga exerce pouca influência em sua taxa de desgaste.

O PTFE (politetrafluoretileno), um termoplástico semicristalino, é usado como plástico de engenharia devido à alta estabilidade térmica, boa resistência a solventes e baixo coeficiente de atrito.⁽³⁾ Esta última característica deve-se à sua cadeia de moléculas lineares, que tende a formar filmes de baixa resistência ao cisalhamento na superfície do contracorpo durante movimentos deslizantes. Entretanto, a formação e a destruição repetitiva desses filmes ocasionam uma alta taxa de desgaste.⁽⁴⁾

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o comportamento dos sistemas tribológicos PEEK – Aço AISI 4140 e PTFE – Aço AISI 4140 visando sua utilização em sistemas de vedação de UBs de petróleo (“cavalo mecânico”), relacionando parâmetros como velocidade de vibração Global e Pressão de Contato de Hertz com mecanismos de desgaste, temperatura de contato e morfologia do dano superficial.

2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1 Ensaios Tribológicos

Ensaios tribológicos de deslizamento foram efetuados em contatos polímero-metal. O método consistiu em realizar-se um conjunto de ensaios de deslizamento em uma bancada (tribômetro) (Figura 1), usando a configuração plano-cilindro, na condição a seco. Durante os ensaios, parâmetros como carga normal, velocidade e distância de deslizamento mantiveram-se constantes.

No desenvolvimento do ensaio de desgaste por deslizamento, Figura 1, o contra-corpo, um eixo cilíndrico bi-apoiado em mancais radiais que giravam a uma velocidade de 1.600 rpm ($v = 1,0$ m/s). Os corpos-de-prova planos, poliméricos, estacionários, eram colocados verticalmente em um braço provido de pivô e carregado contra o contracorpo metálico (carga normal de 5,0 N) por um peso morto, ocasionando uma pressão de contato p_c no par tribológico.

Um medidor de vibração portátil foi usado para medir a velocidade de vibração global do sistema. Ensaios contínuos foram realizados em distância de deslizamento de 1,0 km. Foram medidas temperaturas próximas ao contato

(a $3,0 \pm 0,5$ mm) e a temperatura ambiente, através de termopares conectados a um termômetro portátil marca INSTRUTERM, modelo TH- 60, dois canais, utilizando-se um sistema de aquisição de dados acoplado ao computador. Tais temperaturas eram registradas em intervalos de tempo de dois segundos.

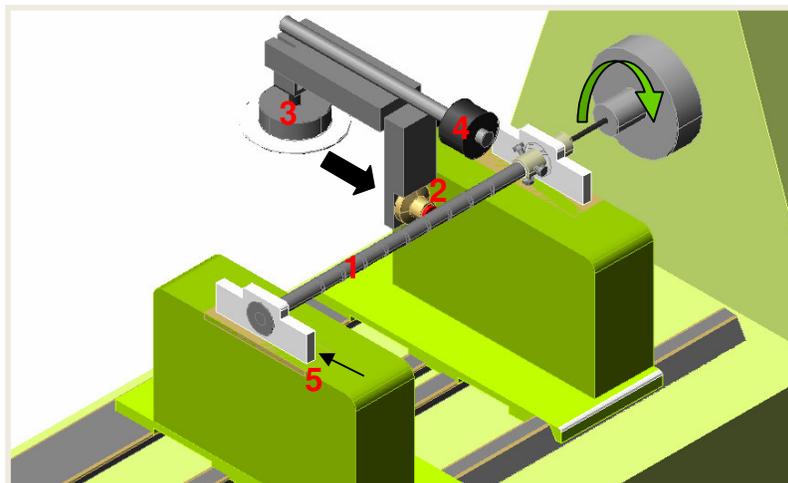


Figura 1. Diagrama esquemático da bancada de ensaios.

2.2 Caracterização do Atrito e do Desgaste

O atrito e desgaste foram relacionados com os seguintes parâmetros:

2.2.1 Superfícies desgastadas

As superfícies desgastadas foram analisadas após os ensaios através de uma lupa e um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Dessa forma, identificaram-se os mecanismos de desgaste ocorridos, podendo-se associá-los aos demais parâmetros estudados.

2.2.2 Temperatura

Em diversos casos, principalmente em polímeros, as propriedades mecânicas de um ou dos dois materiais em contato são alteradas devido à elevação da temperatura, portanto, o registro da temperatura durante os ensaios tribológicos para verificar se são atingidos valores críticos nas condições de operação do sistema se faz necessário.⁽⁵⁾ Neste trabalho, a temperatura é avaliada como uma medida indireta do atrito entre as superfícies em contato.

2.2.3 Vibração

Diversos autores, como Maru, Castillo e Padovese,⁽⁶⁾ têm buscado correlacionar o atrito e o desgaste à vibração. A resposta da velocidade de vibração global do sistema foi registrada durante os ensaios com o objetivo de investigar sua relação com o atrito e o desgaste dos polímeros.

2.2.4 Taxa de desgaste

Na equação do desgaste de Archard abordada por Hutchings,⁽⁵⁾ uma análise simples do desgaste entre duas superfícies em contato sob deslizamento é feita, levando em consideração propriedades do sistema, carga, W (N) e distância de

deslizamento, L (m) e propriedades dos materiais envolvidos, dureza, H e coeficiente de desgaste adimensional, K .

A equação de Archard define Q , o volume desgastado por distancia de deslizamento.

$$Q = K \frac{W}{H} \quad (\text{Eq. 1})$$

O desgaste de materiais pode ser quantificado baseado na Equação de Archard, no qual o volume desgastado Q pela distância de deslizamento $((\Delta m / \rho) / L)$ relacionado com a carga normal (W) resultam em um coeficiente de desgaste K_a que é exatamente o coeficiente de desgaste adimensional relacionado com a dureza (K/H), substituindo temos:

$$K_a = \frac{\Delta m / \rho}{LxW} \quad (\text{Eq. 2})$$

2.3 Caracterização do Contato *Polímero - Aço*

No contato entre dois cilindros paralelos A e B, ambos de comprimento L e de raios R_A e R_B , respectivamente, sob uma carga distribuída W ao longo do cilindro e o contato entre um cilindro de raio R_A e um plano (caso onde $R_B \rightarrow \infty$), a geometria do contato é limitada por um retângulo estreito de área $2aL$, onde a é a meia largura do contato retangular (a qual depende da geometria e das propriedades elásticas do material) e L é o comprimento em contato.

A Tabela 1 fornece as fórmulas de alguns parâmetros de contato entre dois cilindros paralelos com base na teoria da mecânica do contato de Hertz (1882) que foram utilizados no desenvolvimento da planilha para se obter os valores dos mesmos.

Tabela 1. Formulário para os parâmetros de contato entre dois cilindros paralelos⁽⁷⁾

Largura média de contato	Pressão Máxima de contato	Pressão média de contato	Máxima Tensão de Cisalhamento
$a = \left(\frac{8WR'}{\pi LE'} \right)^{1/2}$	$P_{máx} = \frac{2W}{\pi aL}$	$P_{méd} = \frac{W}{2aL}$	$\tau_{máx} = 0,304P_{máx}$ $p / z = 0,786a$

R' é o raio de curvatura equivalente do contato. Na configuração cilindro-plano, o raio do cilindro é R_A e, para o plano, considera-se $R_B \rightarrow \infty$ ou $R_B \gg R_A$. O raio de curvatura equivalente R' é dado por:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \rightarrow \frac{1}{R'} \approx \frac{1}{R_a} \quad (\text{Eq.3})$$

E é o módulo de Young equivalente dos materiais em contato. E' é o módulo de elasticidade para o material A e E'' , o módulo de elasticidade do material B; O módulo equivalente E é dado por:

$$E = (E' + E'')^{1/2} \quad (\text{Eq.4})$$

O Módulo de Elasticidade dos polímeros foi determinado através da Análise Dinâmica Mecânica (DMA), e seus módulos de armazenamento à temperatura ambiente de 30°C foram aplicados na Planilha; o coeficiente de Poisson dos materiais e o módulo de elasticidade do aço foram retirados da literatura.⁽⁸⁾

Pode-se observar que o polímero apresenta desgaste depois de alguns ciclos e o contato que antes era não-conforme passa a ser conforme, aumentando a área de contato e, conseqüentemente, diminuindo a pressão de contato do sistema.

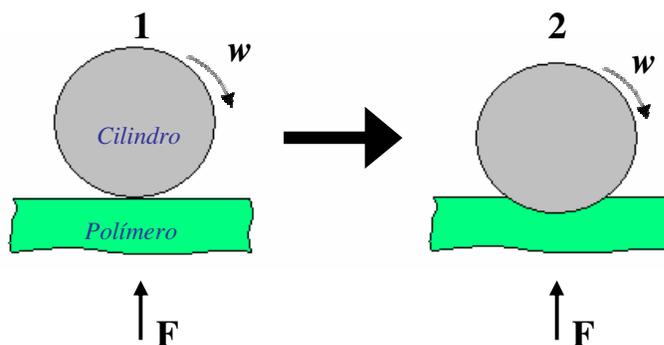


Figura 3. Evolução do contato não-conforme no estado inicial 1 para o contato conforme mostrado em 2 após n ciclos de deslizamento rotativo do contracorpo contra o corpo-de-prova

A pressão de contato de Hertz decresce continuamente no decorrer do ensaio devido ao desgaste observado no corpo-de-prova polimérico, com flutuações na pressão associadas à presença de terceiro corpo.

2.4 Materiais e Métodos

Estudou-se a Resistência Mecânica dos polímeros através de medidas de dureza Rockwell M (indentador $\phi 1/4''$, pré-carga de 10 kgf e carga de 100kgf) em um Durômetro de Marca *PANTEC*, onde se obtiveram valores de 91 ± 3 HRM para o PEEK e de 40 ± 2 HRM para PTFE, ambos obtidos comercialmente na forma de tarugos de 12 mm de comprimento e 13 mm de diâmetro, respectivamente. Para a caracterização desses polímeros, realizaram-se Análises Dinâmico-Mecânica (DMA de Marca *Tainstruments*, tipo Q800) no modo tração, carga de 10 mN, taxa de aquecimento de 2°C/minuto, de 30 até 200°C, à frequência de 1Hz; para avaliar e comparar o comportamento mecânico nessa faixa de temperatura.

A caracterização do aço AISI 4140, utilizado como contracorpo, foi feita através do ensaio de dureza Rockwell C utilizando *um Durômetro marca PANTEC modelo RASN-RS n°810-06*, com carga de 150 kgf, obtendo-se valores de 27 ± 1 HRC.

Os corpos-de-prova poliméricos foram confeccionados com formato cilíndrico, Figura 4, $\phi 12\text{mm} \times 13\text{mm}$, com superfície de ensaio plana. Antes dos ensaios, os corpos-de-prova foram lixados com lixas de SiC, granas #100, #180, #360, #600, limpos em banho ultrassônico (água destilada), com duração de 10 minutos e pesados em balança SARTORIUS, tipo BP210 S (0,1 mg).

Tarugos de aço AISI 4140 foram usinados para confecção dos contracorpos no formato de haste cilíndrica com oito segmentos de ensaio nas dimensões $\phi 12\text{mm} \times 18\text{mm}$, cada uma, Figura 4. Foram lixados com lixas de SiC, granas #100 a #280, configurando uma rugosidade média que satisfaz aos requisitos impostos pela norma API 11B (8 à $32 \mu\text{in} = 0,2$ à $0,8 \mu\text{m}$) às hastes polidas de unidades de

bombeio de petróleo. Após os ensaios, foram realizadas novas medidas de rugosidade para avaliar o desgaste das superfícies do aço (Rugosímetro Taylor Hobson Surtronic 25 e *cutt-off* de 0,8 μin).

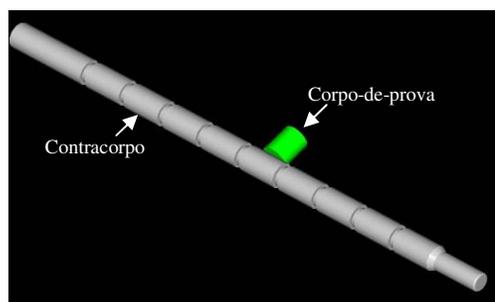


Figura 4. Esboço do contato entre o corpo-de-prova polimérico, estacionário e o contra-corpo metálico rotativo.

Na Figura 5, estão apresentadas as curvas relacionadas aos ensaios de DMA dos dois polímeros. Observa-se que a transição vítrea do PEEK apresentou-se entre as temperaturas de 160°C a 170°C. Seu coeficiente de perda, referente à curva em vermelho, apresentou valores de aproximadamente 0,04 à temperatura ambiente, caracterizando um baixo amortecimento.

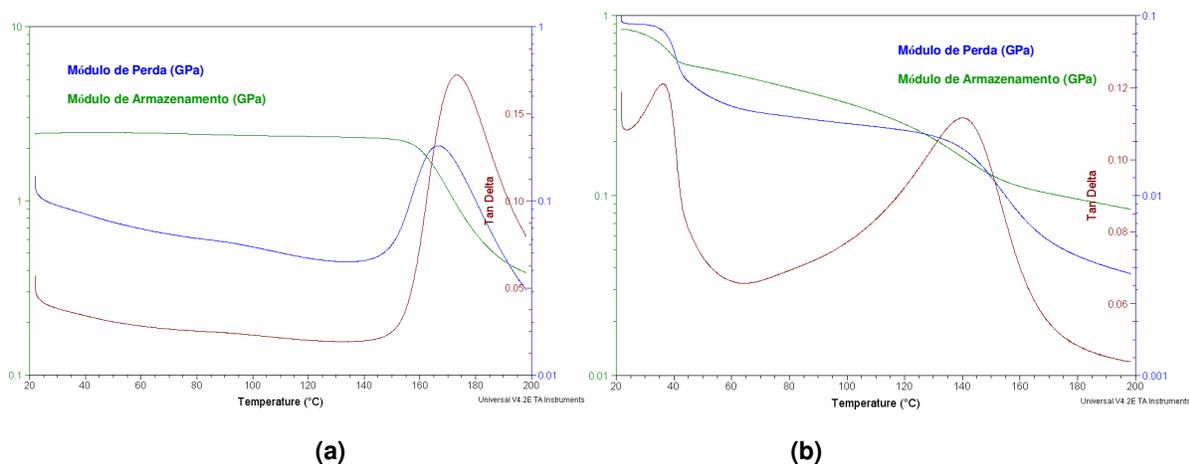


Figura 5. Curvas obtidas nos ensaios de DMA para o PEEK (a) e PTFE (b), variando-se a temperatura de 30°C a 200°C.

O módulo de armazenamento do PTFE encontra-se por volta de 0,8 GPa a temperatura ambiente. Dois picos são evidenciados na curva de $\text{Tan } \delta$, o mais intenso, a 140°C refere-se a T_g (transição vítrea) deste material, com valor de 0,11. A temperatura ambiente a $\text{Tan } \delta$ é de 0,115. Segundo Ludema⁽⁹⁾ muitos polímeros sólidos exibem mais de um pico de $\text{Tan } \delta$, onde o pico de maior intensidade é o mais significativo. Os picos secundários referem-se a movimentos de pequenos grupos de cadeias ainda no estado vítreo. Através destes gráficos caracteriza-se maior amortecimento deste material em relação ao PEEK.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta a planilha elaborada em laboratório com os parâmetros de Hertz da Mecânica do Contato para os dois tipos de contato.

Tabela 2. Planilha com alguns parâmetros de contato de Hertz para os sistemas PEEK – AÇO e PTFE – AÇO

MECÂNICA DO CONTATO DE HERTZ			
CONTATO CILÍNDRICO			
DADOS DE ENTRADA		DADOS DE SAÍDA	
Módulo de Young PEEK (E_1) (Pa)	2,45E+09	Módulo de Young PTFE (E_1) (Pa)	1,10E+09
Módulo de Young AISI 4140 (E_2) (Pa)	2,05E+11	Módulo de Young AISI 4140 (E_2) (Pa)	2,05E+11
Coefficiente de Poisson PEEK (ν_1)	0,4	Coefficiente de Poisson PTFE (ν_1)	0,46
Coefficiente de Poisson AISI 4140 (ν_2)	0,29	Coefficiente de Poisson AISI 4140 (ν_2)	0,29
Raio PEEK (R_1) (m)	1,00E+01	Raio PTFE (R_1) (m)	1,00E+01
Raio AISI 4140 (R_2) (m)	1,20E-02	Raio AISI 4140 (R_2) (m)	1,20E-02
Carga (F) (N)	5	Carga(F) (N)	5
Comprimento do Contato (L) (m)	1,20E-02	Comprimento do Contato (L) (m)	1,20E-02
DADOS DE SAÍDA		DADOS DE SAÍDA	
Média Pressão de Contato (P_{avg}) (Pa)	4,43E+06	Média Pressão de Contato (P_{avg}) (Pa)	3,08E+06
Máxima Pressão de Contato ($P_{máx}$) (Pa)	5,64E+06	Máxima Pressão de Contato ($P_{máx}$) (Pa)	3,92E+06
Deflexão (δ) (m)	1,84E-07	Deflexão (δ) (m)	3,83E-07
PARÂMETROS DE CONTATO		PARÂMETROS DE CONTATO	
Área de Contato (a) (m)	4,70E-05	Área de Contato (a) (m)	6,77E-05
Máxima Tensão de Cisalhamento ($\tau_{máx}$) (Pa)	1,72E+06	Máxima Tensão de Cisalhamento ($\tau_{máx}$) (Pa)	1,19E+06
z ($\tau_{máx}$) (m)	3,69E-05	z ($\tau_{máx}$) (m)	5,32E-05

Os resultados da planilha mostram que o contato PEEK – Aço obteve maior pressão de contato e menor área de contato, isso devido às propriedades elásticas do PEEK (o módulo de elasticidade do PEEK é maior do que o do PTFE).

Nos gráficos mostrados na Figura 6 são inseridas as distribuições de tensões estáticas iniciais para os dois materiais. Pode-se observar que o sistema PEEK- Aço apresentou também uma maior tensão de cisalhamento.

Na Figura 7, estão apresentadas imagens dos corpos-de-prova de PEEK após os ensaios a seco. Pode-se observar que o PEEK se desgastou por um mecanismo de abrasão causado pela passagem das asperezas do aço sobre a sua superfície do PEEK. Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) verificou-se a presença de várias partículas de FeO_2 (comprovado através das microanálises EDS) na zona de contato. A presença dessas partículas de óxido está associada ao desgaste do contracorpo metálico promovido pelo deslizamento contra o PEEK. O mecanismo de desgaste do aço está sendo investigado.

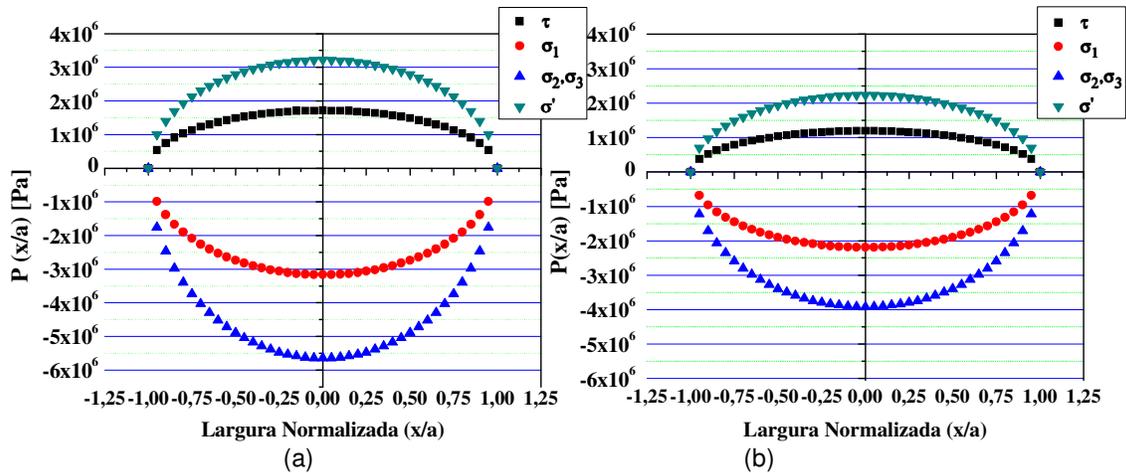


Figura 6. Distribuição das tensões estáticas (principais σ_1 , σ_2 e σ_3 , de Von Mises, σ' e de cisalhamento τ) para o contato **(a)** PEEK - Aço **(a)** e **(b)** PTFE – Aço

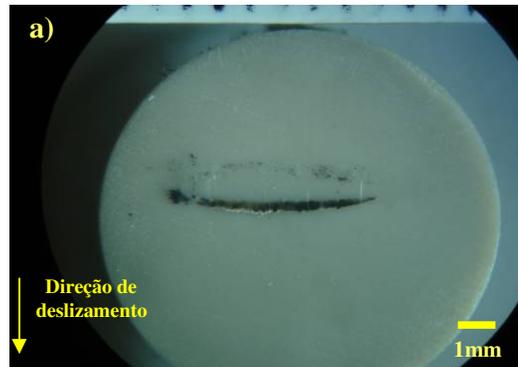


Figura 7. a) Imagem Óptica ampliada de um corpo-de-prova após os ensaios a seco de PEEK obtida com uma Lupa (aumento máximo de 40x).

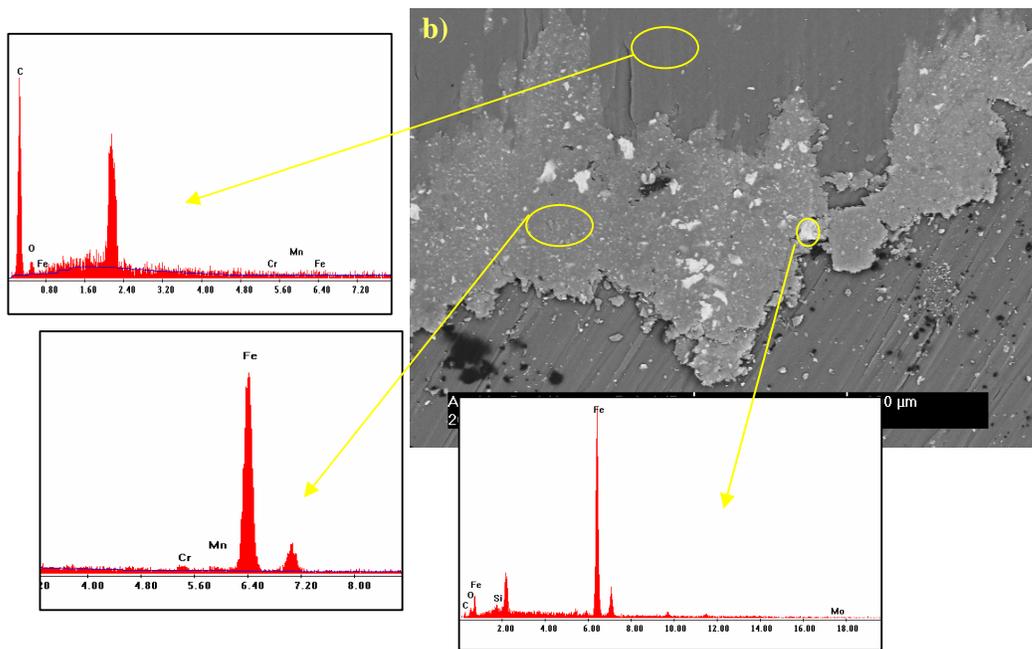


Figura 7. b) Imagem de um corpo-de-prova após os ensaios a seco de PEEK, e espectrogramas de microanálises obtidas através de EDS.

Uma visão geral da trilha de desgaste do PTFE é mostrada na Figura 8(a), em imagem obtida por lupa. A ocorrência de desgaste por delaminação foi constatada através do MEV (Figura 8b). Este mecanismo é característico deste material devido à sua estrutura molecular, que possui fracas interações entre as cadeias. Este mesmo fenômeno foi evidenciado por Silva, Silva e Medeiros⁽¹⁰⁾ estudando desgaste de PTFE deslizando contra diferentes aços.

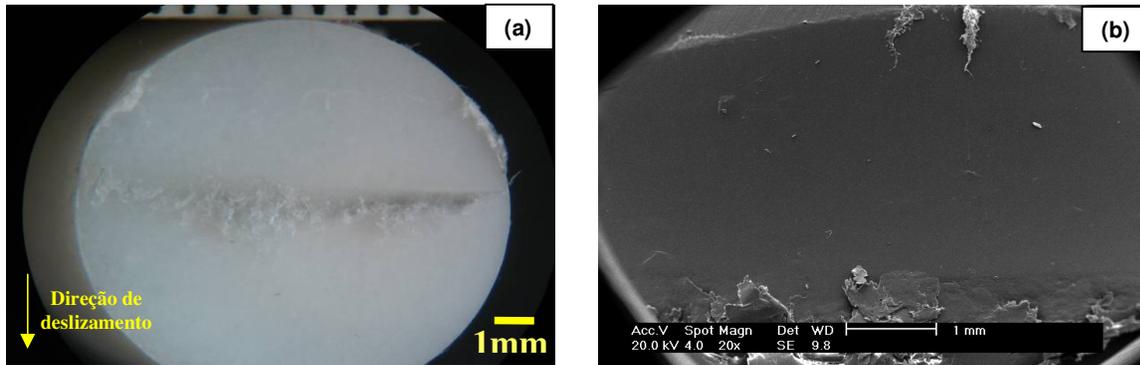


Figura 8. Imagens dos corpos-de-prova após os ensaios a seco de PTFE obtidas com uma Lupa (Aumento: 6,7x) (a) e através de MEV (b).

Comparando as áreas de contato desgastadas após os ensaios do PEEK e do PTFE, observa-se que a área desgastada do PTFE foi maior do que a do PEEK.

Na Figura 9, apresentam-se os resultados das temperaturas coletadas durante os ensaios (temperatura próxima ao contato menos a temperatura ambiente) em condições de ensaio a seco. Neste gráfico, uma curva refere-se ao ensaio *PEEK-aço* e a outra, ao *PTFE-aço*. Temperaturas mais elevadas foram atingidas durante o ensaio *PEEK-aço*, ratificando os valores mais elevados da tensão de cisalhamento inicial representados na Figura 6.

Tal comportamento se justifica pelo fato de ser o PTFE um lubrificante sólido. Burris e Sawyer⁽¹¹⁾ mencionaram que o coeficiente de atrito do PEEK deslizando a seco contra aço é $\geq 0,4$, enquanto o do PTFE é $\leq 0,1$, ratificando os valores mencionados por Ashby.⁽¹²⁾

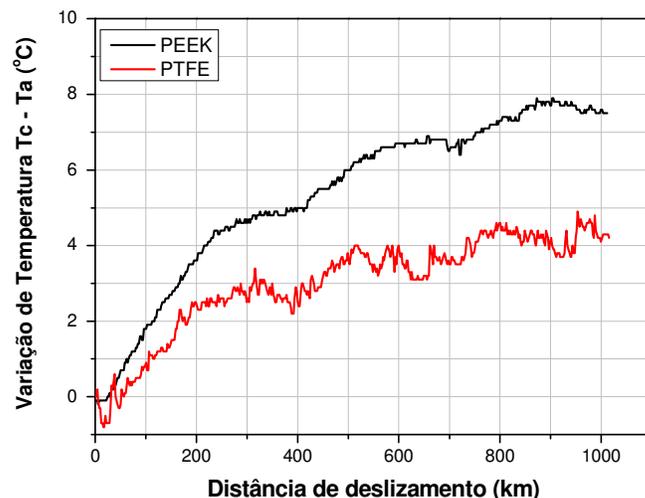


Figura 9. Gráfico das variações de temperatura em função da distância de deslizamento em condições de ensaio seco para PEEK e PTFE.

Na Figura 10, são apresentados os dados de velocidade de vibração global obtidos durante os ensaios. Maiores valores foram atingidos nos ensaios com PEEK em relação ao PTFE, ou seja, este absorve mais a vibração do sistema, tal evidência sugere a análise de uma possível relação com os valores calculados para as tensões de cisalhamento (Figura 6). Além disso, através das análises Dinâmico-Mecânica, o PTFE apresentou maior coeficiente de perda 0,115 (curva Tan δ Delta), à temperatura ambiente (30°C), indicando que este material amortece mais o sistema que o PEEK, cujo coeficiente de perda foi de 0,04.

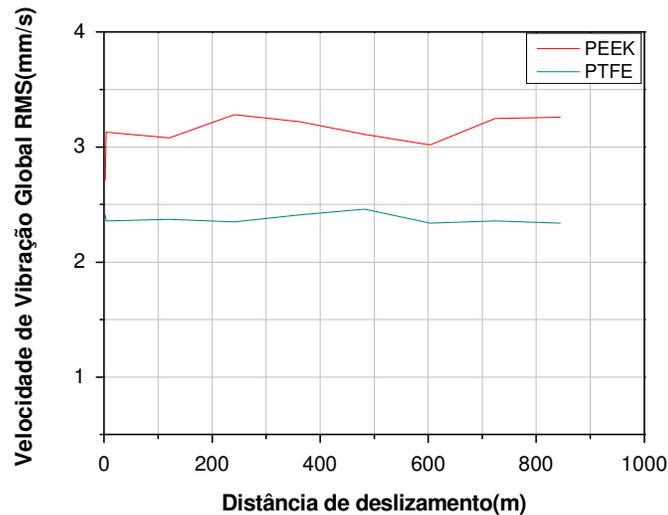


Figura 10. Gráfico dos dados de velocidade global de vibração versus distância de deslizamento em condições de ensaio seco para PEEK e PTFE.

Medidas de rugosidade Ra dos contracorpos metálicos antes e após os ensaios são apresentadas na Figura 11. É possível identificar-se um aumento na dispersão das medidas após os ensaios contra o PEEK. Isso pode ter ocorrido devido ao desgaste do contracorpo durante os ensaios com este polímero, como comprovado nas análises realizadas por MEV e EDS, indicando a presença de FeO_2 na zona de contato do PEEK. Já para os ensaios com o PTFE, a rugosidade do contracorpo foi reduzida, após os ensaios.

O PTFE tem um mecanismo de desgaste por delaminação, como evidenciado por MEV, onde ele produz filmes lubrificantes que promovem um polimento no aço, diminuindo suas asperezas.

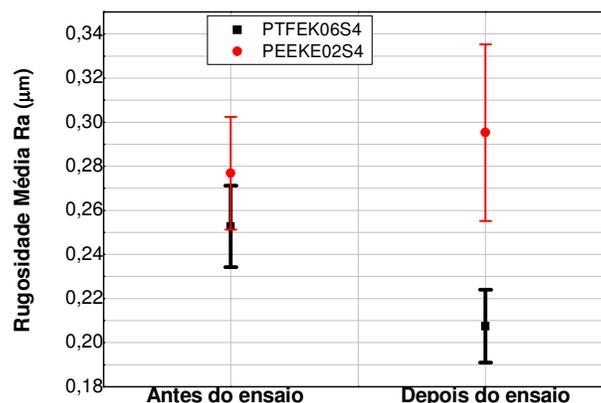


Figura 11. Rugosidade dos contracorpos antes e após os ensaios de PTFE e do PEEK.

Na Figura 12, apresentam-se as taxas de desgaste para o PEEK e o PTFE. Os valores obtidos para o ensaio com PTFE foram de aproximadamente $8 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$, caracterizando um desgaste com taxa uma ordem de grandeza acima daquela obtida para o PEEK ($5 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$). Essa maior taxa de desgaste do PTFE está relacionada ao mecanismo de delaminação, caracterizado pelo MEV (Figura 8b). As cadeias moleculares possuem fraca interação entre si, são facilmente quebradas e formam um filme de baixa resistência ao cisalhamento na superfície do contracorpo, que logo é destruído. O processo de formação e destruição de filme acontece continuamente, durante o deslizamento, fazendo com que a taxa de desgaste seja elevada.

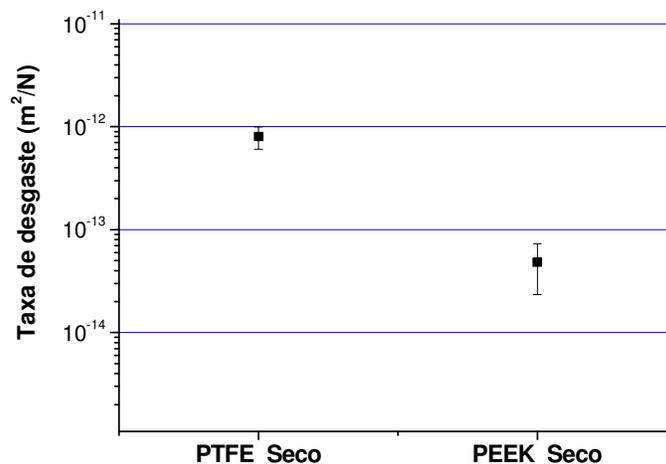


Figura 12. Taxas de desgaste do PTFE e do PEEK em condições de ensaio a seco.

6 CONCLUSÕES

Os mecanismos de desgaste, a morfologia dos danos, a rugosidade das superfícies dos contracorpos e a energia dissipada pelo contato entre as superfícies ensaiadas de PEEK e PTFE e o Aço, submetidas aos ensaios de deslizamento, associaram-se à pressão e tensões de cisalhamento atuantes na zona do contato, ao seu aquecimento e à vibração do sistema, confirmando a eficácia da metodologia utilizada.

Nos ensaios **PEEK-Aço**, onde a pressão de contato era maior, os valores das variações de temperatura e da velocidade de vibração global apresentados foram maiores que os equivalentes ao sistema PTFE-Aço. Comprovou-se o mecanismo de desgaste adesivo no contato PEEK – Aço através dos resultados de microanálise (EDS), onde as asperezas deformadas do aço, por deslizamento, aderiram à superfície desgastada do PEEK, o que não ocorreu com o PTFE.

Nos ensaios **PTFE-Aço**, o PTFE, com sua produção de filmes autolubrificantes, apresentou baixo atrito no contato, como sugerido pelos resultados da temperatura a 3 mm do contato polímero-metal e serviu de amortecimento ao sistema, minorando sua vibração, prevalecendo, em seu desgaste, o mecanismo da delaminação, como detectado pela microscopia de varredura.

Por outro lado, o coeficiente de perda do PTFE, 2,75 vezes maior que o do PEEK, (DMA), foi compatível com o dos ensaios, onde apresentou velocidades de vibração global cerca de 1,33 vezes menor que as do PEEK.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras UN-RNCE pelo apoio financeiro (projeto Cristal Petrobras Nº 20072121), aos integrantes do GET pela colaboração na pesquisa, aos Laboratórios do NTI pela disponibilidade dos equipamentos para análises e ao projeto CTPETRO/FINEP/INFRA I pela disponibilização para análises no MEV.

REFERÊNCIAS

- 1 LU, Z.P.; FRIEDRICH.K. On sliding friction and wear of PEEK. *Wear* 181-183 (1995) 624-631.
- 2 UNAL, H.; MIMAROGLU, A. Lubrication Friction and Wear Characteristics of PEEK and its Composite under Water *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2006; 25; 1659.
- 3 CHEN, W.X. e colaboradores. Tribological behavior of carbon-nanotube-filled PTFE composites. *Tribology Letters*, Vol. 15, No. 3, October 2003.
- 4 KHEDKAR, J.; NEGULESCU, I.; MELETIS, E.I. *Sliding wear behavior of PTFE composites. Wear* 252(2002)361-369.
- 5 HUTCHINGS, I.M. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, UK, 1992.273p.
- 6 MARU, M.M.; CASTILLO, R.S.; PADOVESE, L.R. Study of solid contamination in ball bearings through vibration and wear analyses. *Tribology International* 40 (2007) 433–440.
- 7 STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W. *Engineering Tribology*, 1996, p. 294
- 8 Fonte: www.Matweb.com (acessado em Janeiro de 2009)
- 9 LUDEMA, K.C. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. ISBN 0-8493-2685-0. (1996)
- 10 SILVA, R. C. L.; DA SILVA, J. B.; MEDEIROS, J. T. N. Wear rate fluctuation of a sliding system polymer-steel under the effect of fixed and free journal bearings. *Anais do 19th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2007*.
- 11 BURRIS, D. L.; SAWYER, W. G. A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite. *Wear* 261 (2006) 410–418
- 12 ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**, Ed Butterworth-Heinemann. 2ª edição, 2000, 502p.