

# DESGASTE ABRASIVO EM MATERIAIS POLIMÉRICOS UTILIZADOS NA PROTEÇÃO DE LINHAS FLEXÍVEIS DE CONDUÇÃO DE PETRÓLEO<sup>1</sup>

*Francisco Francelino Ramos Neto*<sup>2</sup>

*Luiz Antônio Sulino de Negreiros*<sup>2</sup>

*Antônio Marcos Rego Motta*<sup>4</sup>

*Lauro Lemos Lontra Filho*<sup>4</sup>

*Marcelo Torres Piza Paes*<sup>4</sup>

*Sinésio Domingues Franco*<sup>5</sup>

## **Resumo**

Na condução de petróleo em águas profundas são utilizadas linhas flexíveis que, pelo fato de estarem inseridas em um ambiente corrosivo, têm seus elementos metálicos protegidos por materiais poliméricos. Estes revestimentos são caracterizados por sua alta inércia química, além de ter função estrutural sem prejudicar a flexibilidade necessária à linha. No entanto, na região de início do contato da linha com o solo marinho (*Touch Down Point*), a movimentação relativa provocada por correntes marinhas e/ou deslocamentos da plataforma podem levar a um acentuado processo de desgaste abrasivo desses revestimentos poliméricos. Com o intuito de se reduzir os problemas decorrentes deste desgaste, este trabalho propõe-se a avaliar o desempenho, tanto de materiais atualmente aplicados, como de outros com potenciais de aplicação para este fim. Para realização de ensaios de abrasão foi desenvolvido um equipamento do tipo pino-sobre-cilindro, cujas características principais atendem à norma DIN 53.516. Os ensaios foram realizados em ambiente submerso (água) nas temperaturas de 4, 25 e 40°C e utilizando-se cargas de 5, 10 e 15 N. Foram testados seis materiais sendo uma poliamida, um polietileno, duas borrachas e dois poliuretanos. A avaliação do desgaste foi feita através do método gravimétrico interrompido, sendo a medição de massa realizada em uma balança de 10<sup>-5</sup> g de resolução. Os mecanismos de desgaste foram caracterizados através de análises no MEV. Os resultados mostraram que os poliuretanos testados possuem uma resistência ao desgaste abrasivo notavelmente superior aos outros materiais, e que, sob as condições de carga usadas, a temperatura possui pouca influência na taxa de desgaste. Além disso, os resultados de dureza, não mostraram nenhuma correlação clara com os resultados de desgaste para todos os materiais testados.

**Palavras-chave:** Desgaste abrasivo; Polímeros; Linhas flexíveis.

<sup>1</sup> Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual da ABM/Internacional, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte - MG - Brasil.

<sup>2</sup> Doutorando na Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

<sup>3</sup> Graduando na Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

<sup>4</sup> Engenheiro da Petrobras, CENPES - RJ.

<sup>5</sup> Prof. Adjunto na Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

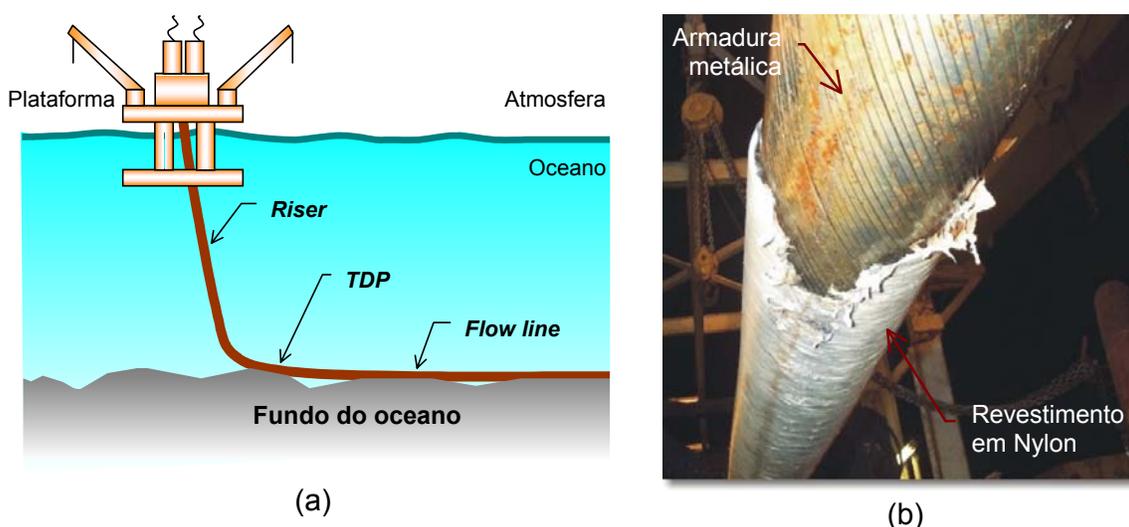
## 2 1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos sistemas de produção de petróleo a utilização de linhas flexíveis é de interesse bastante expressivo devido, entre outros aspectos, os custos de instalação e manutenção destes elementos. Todavia, foi recentemente constatado que estas linhas em contato dinâmico com o fundo do mar experimentam um processo de degradação via desgaste.

Esse desgaste é mais acentuado na região de TDP (*Touch Down Point* - Figura 1-(a)) e isso se deve basicamente aos carregamentos dinâmicos externos sofridos pela linha levando a uma movimentação do duto em relação à superfície do fundo do mar. Assim, a camada mais externa da linha passa a ter uma nova função, que é a de resistir ao desgaste nestas condições já bastante críticas (Ramos Neto, 2003).

A vida útil observada dos revestimentos está sendo bem menor do que a prevista e, quando o revestimento está completamente desgastado, a tubulação fica diretamente em contato com o solo marinho, expondo a estrutura a níveis de degradação não previstos em projeto (Figura 1-(b)). Conseqüentemente, o risco de falha aumenta, podendo haver vazamentos, parada de produção e graves danos ambientais.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de materiais com vistas à aplicação em revestimentos antidesgaste de linhas flexíveis de condução de petróleo. Para tanto foi desenvolvida uma infra-estrutura que permitisse a reprodução, em laboratório, dos mecanismos de degradação observados em campo e, a partir daí, gerar subsídios para as vias de seleção de materiais adequados à aplicação.



**Figura 1.** (a) localização das diversas regiões características das linhas flexíveis usadas em um sistema de produção flutuante e (b) degradação das linhas flexíveis

## 2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para simular os eventos de desgastes observados nos revestimentos, foram escolhidos materiais que são atualmente aplicados, ou com potencial aplicação em revestimentos das linhas flexíveis para realização de ensaios laboratoriais. No total, foram testados seis materiais dois tipos de borracha, uma poliamida, um polietileno e dois tipos de poliuretano. Estes materiais são apresentados na Tabela 1 onde

também está representada a codificação adotada para as amostras bem como algumas de suas características gerais.

**Tabela 1.** Identificação dos materiais usados nos ensaios

<b>Amostras</b>	<b>Descrição dos materiais</b>
BO-06	Elastômero de borracha nitrílica carboxilada + fibras de aramida e cargas
BO-04	Elastômero de borracha natural + fibras de aramida e cargas
PA-01	Poliamida-11
PE-01	Polietileno de baixa densidade
PU-05	Elastômero de poliuretano
PU-03	Elastômero de poliuretano

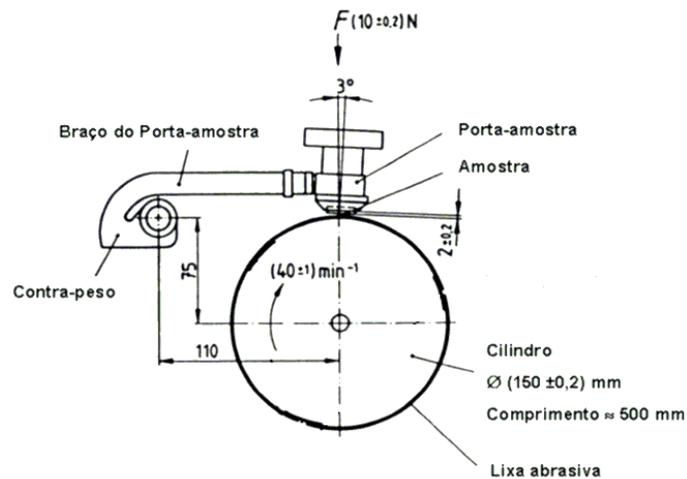
O desempenho dos materiais poliméricos foi avaliado através de ensaios de desgaste realizados em um abrasômetro do tipo pino-sobre-cilindro. O equipamento normatizado pela DIN 53.516 foi especialmente desenvolvido e construído no Laboratório de Tribologia e Materiais para este fim (**Figura 2**). Assim, considerando que as propriedades dos polímeros são fortemente influenciadas pela temperatura de trabalho (Thorp, 1982; Uchiyama *et al.*, 1993; Crane *et al.*, 1997) e que a temperatura no fundo do mar é de cerca de 4°C, o equipamento desenvolvido é capaz de realizar ensaios segundo a norma com adicional habilidade de variação da temperatura de teste em ambientes submersos.

O aparato consiste-se de um cilindro que gira com uma velocidade constante sobre o qual é aplicada uma lixa abrasiva. Durante o ensaio, a amostra é pressionada contra essa lixa e movimentada por um determinado percurso.

A quantificação do desgaste no ensaio foi realizada pelo método gravimétrico interrompido, sendo a medição de massa dada por balança digital com resolução de  $10E^{-5}$  g. Os resultados são apresentados sob a forma de taxa de desgaste (perda de volume/tempo de duração do ensaio). O tempo de duração de todos os ensaios foi de 2,43 min.



(a)



(b)

**Figura 2.** Abrasômetro DIN 53.516 utilizado nos ensaios: (a) vista geral e (b) detalhes do sistema de aplicação de carga e posicionamento da lixa abrasiva (Norma DIN 53.516, 1987)

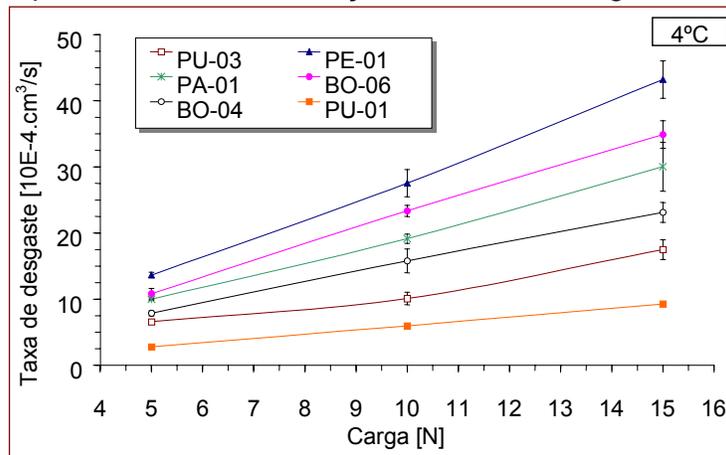
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Avaliação da Influência da Carga e da Temperatura de Teste

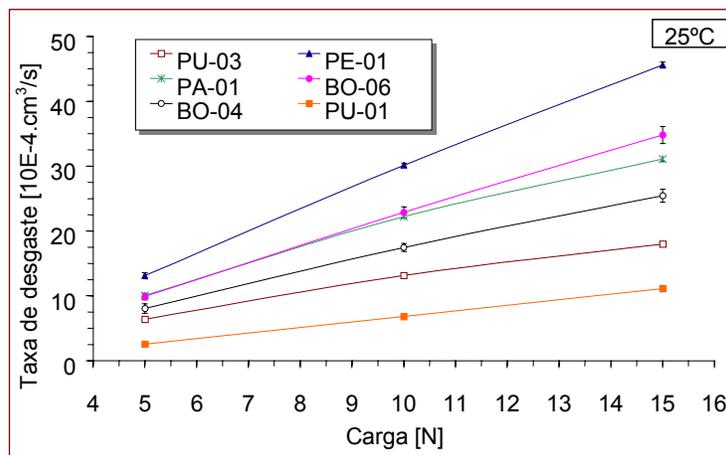
Os resultados de verificação do efeito da carga de testes no desempenho dos materiais testados são apresentados na **Figura 3** são dados pela taxa de desgaste dos materiais. Para todas as condições de temperatura, sempre há um aumento da taxa de desgaste com o aumento da carga de teste para todos os materiais. Nota-se ainda que este comportamento, para a faixa de carga avaliada obedece a uma relação aproximadamente linear semelhante aos resultados de Harsha *et al.* (2002). Destes ensaios desgaste em função da carga de teste, nota-se ainda um desempenho da amostra de BO-04 superior aos das amostras de PE-01, de PA-01 e BO-06. Todavia, os poliuretanos PU-01 e PU-03 apresentam-se como materiais superiores à BO-04. A superioridade do PU-01 é ainda maior à medida que se aumenta a carga de teste. Este comportamento pode, ainda, ser observado em todas as condições de temperatura ensaiadas.

Excetuando-se em algum caso, em que em determinados trechos do gráfico, a borracha (BO-06) e a poliamida (PA-01) se confundem, de forma geral, pode-se dizer que a classificação dos materiais é sempre mantida. Assim, a ordem decrescente de resistência ao desgaste é dada por: PU-01 > PU-03 > BO-04 > PA-01 > BO-06 > PE-01. Neste sentido, no que tange à resistência ao desgaste abrasivo por deslizamento, a utilização do PU-01 na confecção de revestimentos de proteção de linhas flexíveis, é concludentemente recomendada.

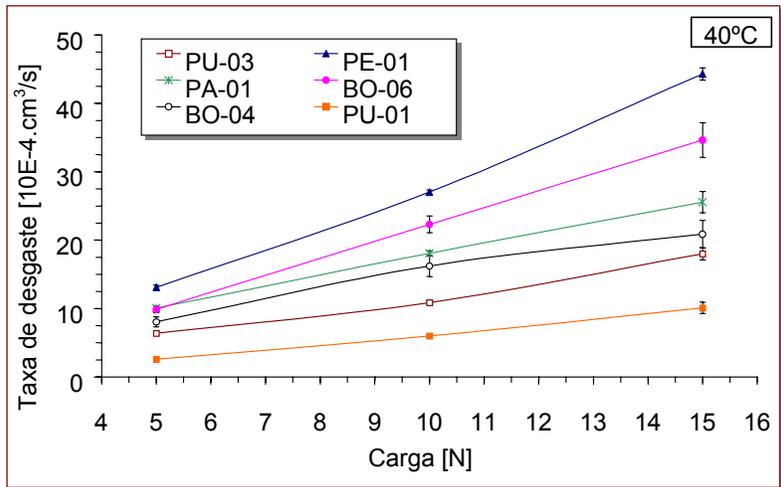
A influência da temperatura nos resultados de desgaste é apresentada na **Figura 4**. A partir destes resultados pode-se dizer que, para as condições usadas no ensaio, não há uma evidente influência da temperatura na taxa de desgaste. Além disso, é observado que a classificação dos diversos materiais se mantém para todas as condições como pôde ser visto na avaliação do efeito da carga de teste.



(a)

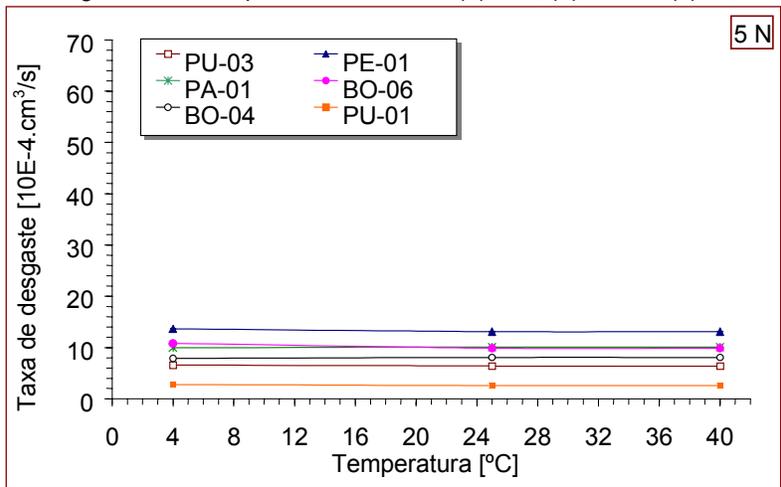


(b)

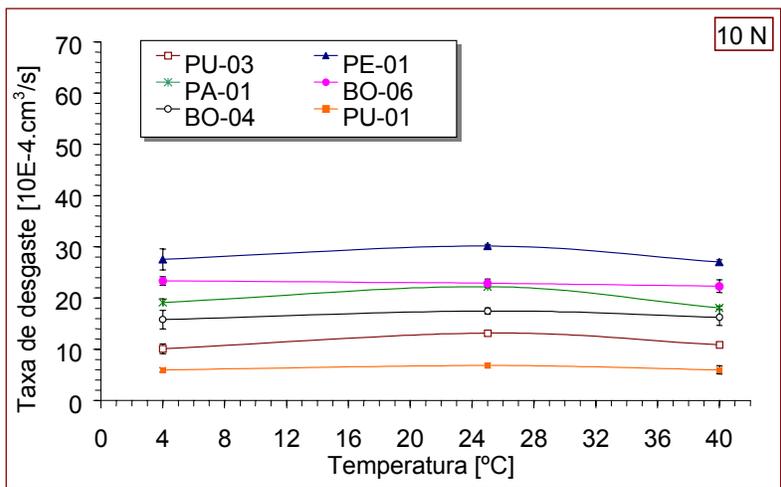


(c)

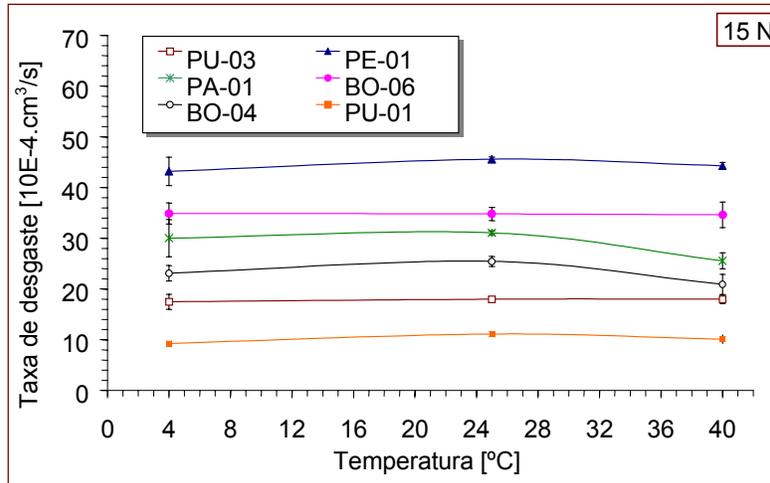
Figura 3. Efeito da carga de teste na perda volumétrica: (a) 4°C, (b) 25°C e (c) 40°C



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Efeito da temperatura na taxa de desgaste: (a) 5 N, (b) 10 N e (c) 15 N

### 3.2 Correlação dos Resultados de Desgaste com Propriedades Mecânicas dos Polímeros

De forma geral, os resultados obtidos no abrasômetro DIN 53.516 (Figura 5) nas diversas temperaturas de ensaio e cargas, não apresentam uma correlação direta com os resultados de dureza. Os poucos trabalhos existentes na literatura envolvendo desgaste abrasivo de materiais poliméricos mostram uma baixa, ou nenhuma correlação entre abrasão e propriedades mecânicas de tração, dureza e dureza ao risco (Yabuki *et al.*, 2000; Lasen-Basse *et al.*, 1988). Assim, na tentativa de melhor investigar os resultados obtidos no presente trabalho as amostras ensaiadas no abrasômetro DIN 53.516 foram analisadas no que tange aos respectivos mecanismos de desgaste através de análises realizadas em microscópio eletrônico de varredura.

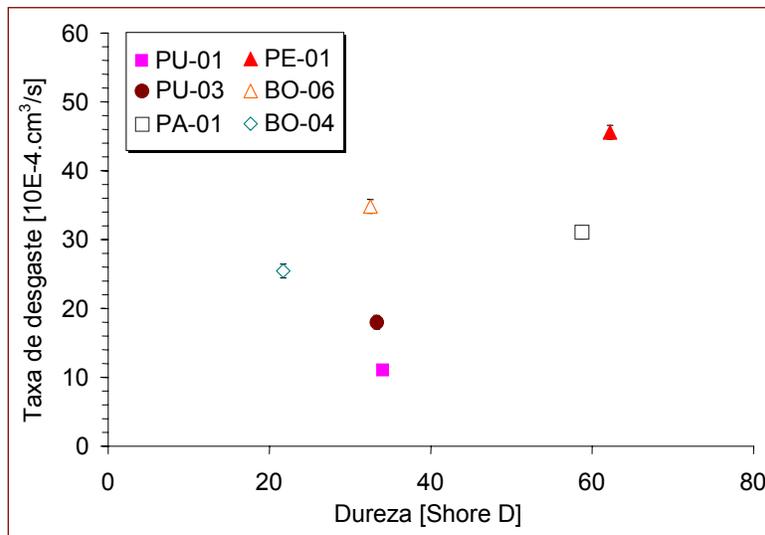


Figura 5. Efeito da temperatura na dureza Shore-D dos polímeros testados.

### 3.3 Análise dos Mecanismos de Desgaste

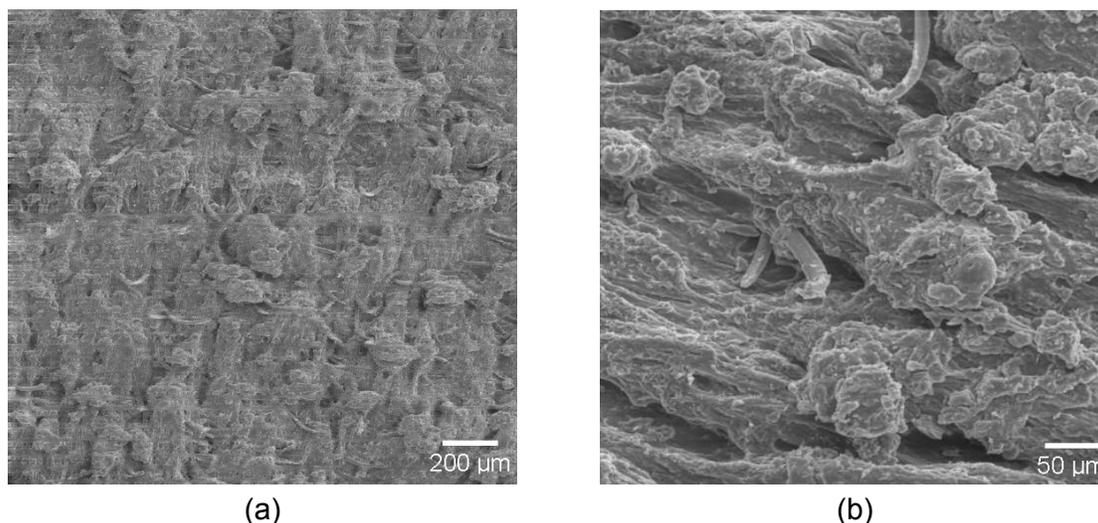
A partir da **Figura 6** até a **Figura 11** são apresentadas as microscopias das superfícies ensaiadas de cada material com carga de 15 N e temperatura de 4°C. Os mecanismos de desgaste de desgaste podem ser inferidos das respectivas figuras, embora isso não seja muito evidente devido à complexidade do processo.

Estes resultados mostram que a BO-04, apresenta poucas evidências de riscos (ver **Figura 6**). A BO-06 apresenta, entretanto, alguns riscos, onde, freqüentemente, nota-se a presença de fibras, que são rompidas durante a ação das partículas abrasivas (**Figura 7**). Pode-se notar ainda a remoção dessas fibras do material durante o desgaste devido à baixa adesão das fibras no substrato. Neste caso, acredita-se que o destacamento das fibras possa levar ao corte prematuro da borracha, fato esse que pode contribuir significativamente para a redução da resistência ao desgaste.

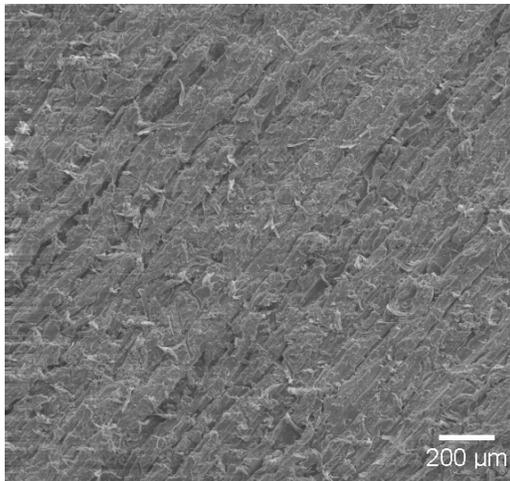
O PE-01 e a PA-01 apresentam mecanismos de desgaste caracterizados por microcorte e microsulcamento profundos. Neste caso há grande formação de fragmentos na lateral do sulco. Esses fragmentos permanecem em boa parte aderidos à superfície (ver Figuras 8 e 9) mas a ação continuada das partículas abrasivas leva a rápida remoção de grande quantidade de material da superfície.

Já no PU-03 os mecanismos de desgaste são caracterizados por microcorte e microtrincamento (**Figura 10**). Esse comportamento sugere, que, neste ensaio, ângulos de ataque das partículas abrasivas da lixa, próximos, ou superior a 75°, devem estar presentes, pois, como apresentado nos ensaios de esclerometria pendular (Franco *et al.*, 2002), esse ângulo gera, basicamente, o mecanismo de corte no PU-03. Para este material, a grande diferença observada com relação aos demais, é a escala com que são observados os eventos de desgaste. Assim, a dimensão dos eventos de desgaste é muito menor que nos outros materiais. Este comportamento certamente deve estar associado ao arranjo molecular deste material. A presença concomitante de segmentos rígidos e flexíveis neste atende alguns requisitos da alta resistência ao desgaste, aliando tanto boa resistência mecânica a uma razoável capacidade de deformação elástica.

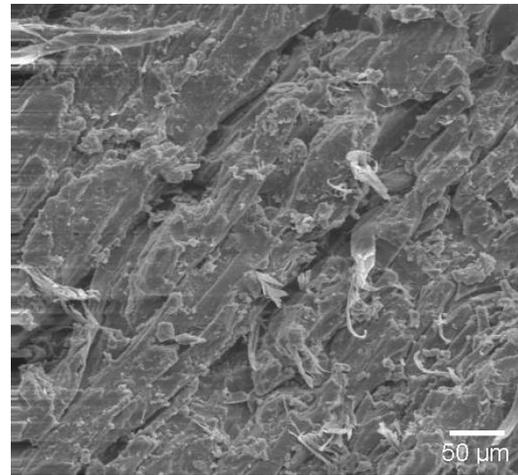
No PU-01, poliuretano muito semelhante ao PU-03, são observados os mesmos mecanismos básicos de desgaste deste. Neste caso, a escala destes eventos é ainda menor que nos demais materiais e isso tem reflexo direto no seu melhor desempenho.



**Figura 6.** Amostra de BO-04, 15 N e 4°C: (a) vista geral (50X) e (b) detalhe (200X).

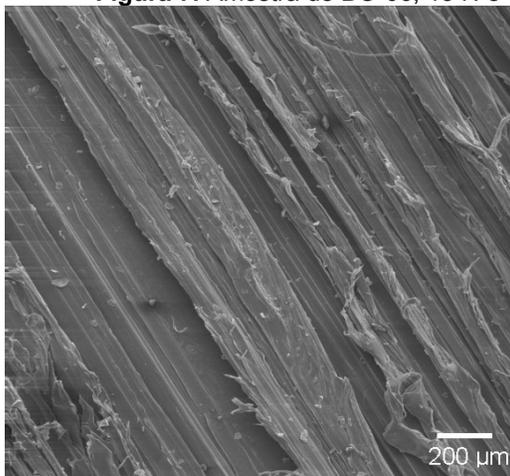


(a)

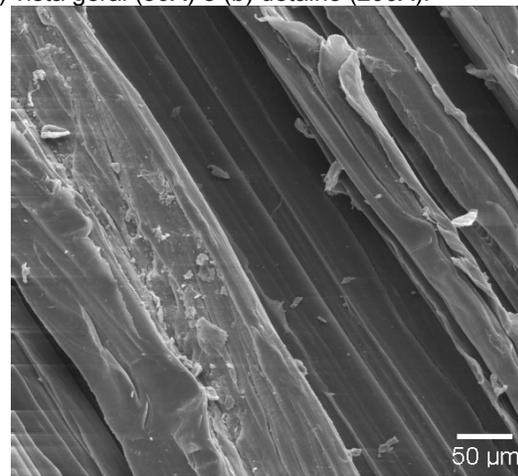


(b)

**Figura 7.** Amostra de BO-06, 15 N e 4°C: (a) vista geral (50X) e (b) detalhe (200X).

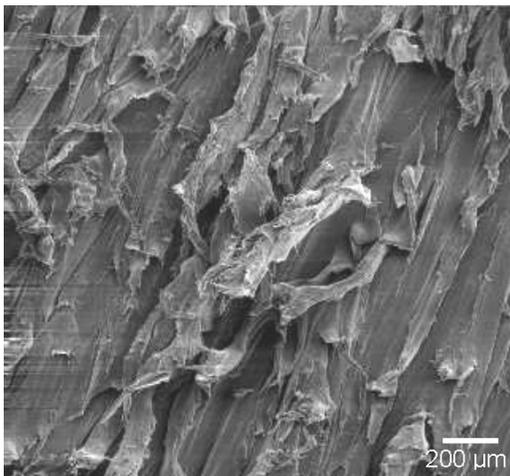


(a)

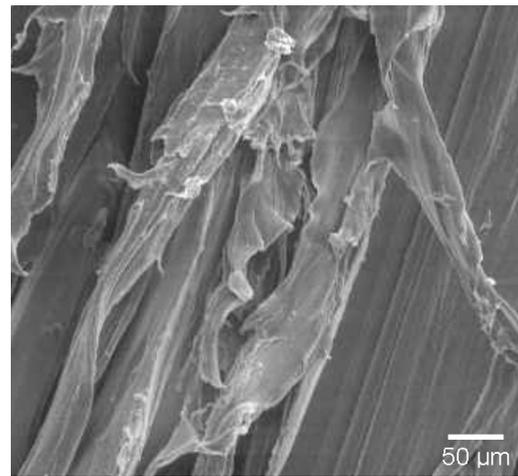


(b)

**Figura 8.** Amostra de PE-01, 15 N e 4°C: (a) vista geral (50X) e (b) detalhe (200X)

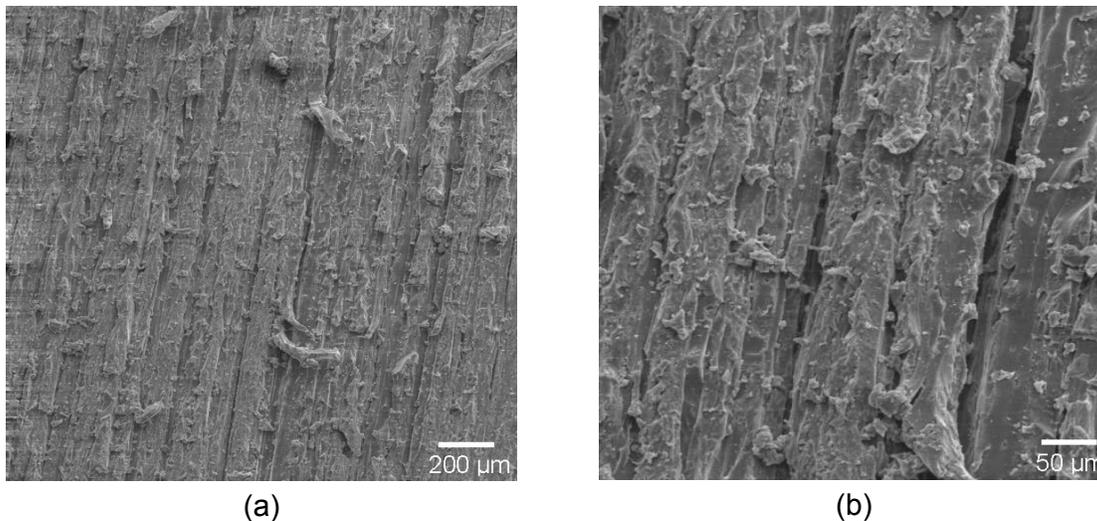


(a)

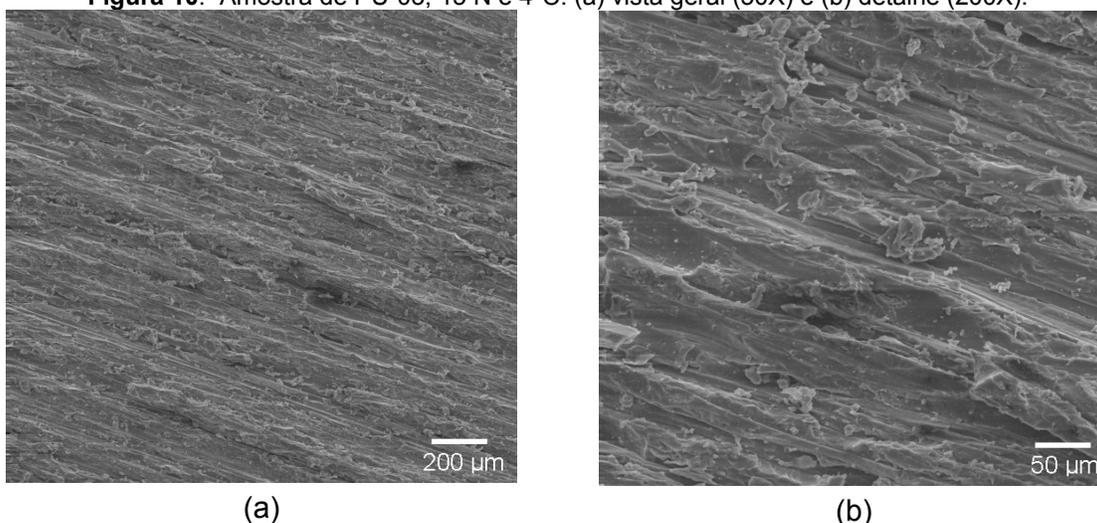


(b)

**Figura 9.** Amostra de PA-01, 15 N e 4°C: (a) vista geral (50X) e (b) detalhe (200X)



**Figura 10.** Amostra de PU-03, 15 N e 4°C: (a) vista geral (50X) e (b) detalhe (200X).



**Figura 11.** Amostra de PU-01, 15 N e 4°C: (a) vista geral (50X) e (b) detalhe (200X).

#### 4 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos com a abrasometria DIN 53.516, conclui-se que o aumento a taxa de desgaste aumenta na medida em que se aumenta a carga de teste e que este efeito é mais pronunciado nos materiais menos resistentes ao desgaste.

Para as condições de testes usadas, observou-se que a temperatura praticamente não tem efeito na taxa de desgaste dos materiais testados. Além disso, não existe uma correlação clara entre os ensaios de dureza e os de desgaste abrasivo.

O polietileno (PE-01), a borracha (BO-06) e a poliamida (PA-01) diferentemente dos elastômeros BO-04, PU-03 e PU-01, não apresentaram bons desempenhos e isso pôde ser associado à susceptibilidade daqueles à ação das partículas abrasivas.

Dada à sua razoável capacidade de deformação elástica e, por conseguinte, melhor desempenho ao desgaste, os elastômeros testados tornam-se potencialmente aplicáveis na proteção de linhas flexíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Crane, F. A. A., Charles, J. A. and Furness, J. A. G., "Selection and Use of Engineering Materials", Butterworth/Heinemann, 3th edition, Oxford, 1997.
- 2 Franco, S. D., et al, "Evaluation of Abrasive Wear of Polymeric Materials Using Single-Pass Pendulum Scratching", Proceedings of OMAE '02 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering June 23–28, Oslo, Norway, 2002.
- 3 Harsha, A. P. and Tewari, U. S., "Two-body and three body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites", Polymer Testing 22 (2002) 403-418, 2002.
- 4 Larsen-Basse, J. and Tadjvar, A., "Slurry Abrasion of Polymers under Simulated Submarine Conditions", Wear 122, 135-149, 1988.
- 5 Norma DIN 53.516, "Testing of rubber and elastomers: Determination of abrasion resistance", 1987.
- 6 Ramos Neto, F. F., "Desgaste Abrasivo em Materiais Poliméricos Utilizados na Proteção de Linhas Flexíveis de Condução de Petróleo", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2003.
- 7 Thorp, J. M., "Abrasive wear of some commercial polymers", Trib. Int., 59-68, 1982.
- 8 Uchiyama, Y., Uezi, Y., Kudo, A. and Kimura, T., "Effect of temperature on the wear of unfilled and filled liquid crystal polymers", Wear, 162-164, 656-661, 1993.
- 9 Yabuki, A., Sugita, K., Matsumura, M., Hirashima, M. and Tsunaga, M., "The anti-slurry erosion properties of polyethylene for sewerage pipe use", Wear 240, 52-58, 2000.

# ABRASIVE WEAR OF POLYMERS USED AS PROTECTION LAYERS IN OIL FLOWLINES

*Francisco Francelino Ramos Neto  
Luiz Antônio Sulino de Negreiros  
Sinésio Domingues Franco  
Antônio Marcos Rego Motta  
Lauro Lemos Lontra Filho  
Marcelo Torres Piza Paes*

## **Abstract**

Abrasion due to rubbing of flexible risers against sediment layer is an important degradation mechanism in deep-water oil and gas production. Polymeric materials are usually selected to protect such flexible risers due to their excellent corrosion resistance to seawater, maintaining at the same time, the structural integrity and enough flexibility. However, at the touch down point region (TDP), the relative movement caused by the sea streams and/or displacements of the platform can lead to excessive abrasive wear of these polymeric layers.

To evaluate the performance, as much of materials currently applied, as of others with potential application for this end, it had carried out abrasive laboratory tests (DIN 53,516). The submerged wear tests carried out in water, in the temperatures of 4, 25 and 40°C and using the normal loads of 5, 10 and 15 N had shown that the tested elastomeric polyurethanes possess the best performances, mainly in the most severe conditions.

**Key-words:** Abrasive wear; Polymers; Oil flowlines.