

DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA SIMULAÇÃO DO DESGASTE DE PROTEÇÕES DE *RISERS* FLEXÍVEIS¹

Marcelo Torres Piza Paes²
Antônio Marcos Rego da Motta²
Ricardo Reppold Marinho²
Leonardo Resende Alves³
Juliano Oséias de Moraes⁴
Sinésio Domingues Franco⁵

Resumo

Na região de contato de linhas flexíveis, utilizadas na extração de petróleo, com o solo marinho observa-se um acentuado desgaste abrasivo. Esse trabalho tem o objetivo de desenvolver, projetar e construir um equipamento para ensaio abrasivo capaz de facilitar a seleção e classificação de materiais para essa aplicação, simulando as condições de temperatura e lubrificação e os mecanismos de desgastes existentes no fundo do mar. A partir de estudos do desgaste abrasivo de amostras de linhas flexíveis e de amostras provenientes de ensaios de esclerometria pendular, foi desenvolvido um equipamento para ensaio de desgaste abrasivo, tendo em vista a seleção e de classificação de materiais para essa aplicação. As condições cinemáticas e dinâmicas e de baixa temperatura existentes no fundo do mar foram simuladas reproduzindo satisfatoriamente os micromecanismos de desgaste observados na prática. Os micromecanismos de desgaste foram avaliados através de microscopia eletrônica de varredura e alguns parâmetros, como carga e velocidade, foram investigadas para otimização do ensaio. O equipamento desenvolvido reproduz de forma satisfatória os mecanismos de desgaste observados em linhas utilizadas na extração de petróleo. Parâmetros de teste como velocidade, carga e número de ciclos foram determinados de forma a se obter uma metodologia capaz de selecionar materiais quanto ao desgaste abrasivo na região do TDP (*Touch Down Point*).

Palavras-chave: Desgaste; *Risers*; Metodologia.

DEVELOPMENT, PROJECT AND CONSTRUCTION OF AN EQUIPMENT FOR SIMULATION OF THE WEAR OF FLEXIBLE RISERS PROTECTIONS

Abstract

Oil and gas can be extracted by Jacket type and semi-submersible platforms, which are connected to the wells through flexible risers. On inspection of these risers, scratches and a significant reduction of the riser protection layer were observed. In this work has developed, projected and constructed an test abrasive equipment for to facilitate the election and classification of materials for this application. The conditions and the wear mechanisms had been simulated. Smples of flexible lines and pendular esclerometria results had been used for this analysis. The existing conditions of consuming in deep of the sea and the temperature had been simulated reproducing satisfactorily the observed micromechanisms of consuming in the practical one. The wear micromechanisms had been evaluated through electronic microscopy of scannings and some parameters, as load and speed, had been investigated for set up. The developed equipment reproduces of satisfactory form the wear conditions and wear mecanisms observed in deep of the sea. Parameters of test as speed, load and number of cycles had been determined and a select materials methodology to abrasive wear in the region of TDP (*Touch Down Point*) was established.

Key words: Wear; *Risers*; Methodology.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Eng. Pleno, Petrobras/CENPES, Rio de Janeiro/RJ.

³ Graduando da Faculdade de Eng. Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia.

⁴ Eng. M.Sc. Faculdade de Eng. Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia.

⁵ Prof. Dr.-Ing. Adjunto da Faculdade de Eng. Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia.

1 INTRODUÇÃO

Para a extração do petróleo em águas profundas, a Petrobras adotou o conceito de produção flutuante, em que plataformas móveis são conectadas aos poços através de linhas rígidas ou flexíveis (LF), também chamadas de *risers*. As linhas flexíveis são dutos fabricados em grandes extensões, constituídos por várias camadas.

Devido a um processo de desgaste por abrasão que as LF experimentam ao tocarem o fundo do mar elas vêm sendo revestidas externamente com materiais poliméricos na forma de luvas bipartidas. Esse desgaste é mais acentuado no ponto de início do contato da tubulação com o fundo do mar (*Touch Down Point – TDP*).

A troca desses componentes de exploração de petróleo é um processo demorado, complexo e oneroso. Por isso a escolha de materiais mais resistentes ao desgaste melhora o aspecto de manutenção para companhias de exploração de petróleo.

Materiais como o Poliuretano (PU) já vêm sendo usados pela Petrobras e estudos em situações onde predomina a abrasão mostram um bom desempenho.⁽¹⁻⁴⁾ Seu desempenho com relação ao desgaste é dependentes de fatores como: estrutura química,^(5,6) quantidade de ligações cruzadas,⁽⁷⁾ peso molecular,⁽⁸⁾ resistência ao impacto,⁽⁹⁾ e outros. Além disso, outros fatores como hidrólise, oxidação e degradação por microorganismos podem influenciar diretamente seu desempenho.⁽¹⁰⁾ Portanto, é necessário explorar as condições ótimas de fabricação, bem como outros materiais, como algumas borrachas desenvolvidas por fabricantes nacionais que também apresentam potencial de aplicação nesse tribosistema.^(11,12)

Anteriormente, a avaliação do desempenho destes materiais vinha sendo feita em duas abordagens: através de ensaios de desgaste abrasivo normatizados pela DIN 53.516 à temperatura de 4°C⁽¹³⁾ e com ensaios de esclerometria pendular também a 4°C, ambos com o propósito de simular os eventos de desgaste que ocorrem no fundo do mar.⁽¹²⁾ A comparação dos resultados desses ensaios com amostras de material utilizado em campo revelam semelhança entre os mecanismos de desgaste.

Foi observado, também, que existe um comportamento diferenciado relacionado ao tamanho do evento do risco (profundidade de penetração) e energia específica necessária para remoção de matéria em alguns materiais. Paes *et al.* em 2002⁽¹⁴⁾ e o autor deste trabalho constataram em ensaios de esclerometria pendular em polímeros, que a quantidade de energia por volume necessária para remover pequenos volumes de matéria é maior que para grandes volumes. Os ensaios de esclerometria realizados por Franco em 2002,⁽¹⁵⁾ com cinco ângulos de ataque diferentes (40°, 52,5°, 60°, 75° e 95°), mostraram que, os mecanismos de desgaste passam de microtrincas para microcorte quando se aumenta o ângulo de ataque, para o poliuretano usado nessas calhas.

A partir daí, pôde-se determinar os parâmetros de teste que reproduzem os mecanismos de desgaste abrasivo em águas profundas.^(14,15)

Dada a importância econômica e ambiental que o assunto representa para a exploração de petróleo em águas profundas, justifica-se um trabalho que venha gerar conhecimento nesse assunto, bem como contribuir com o projeto da Petrobras.

Assim, esse trabalho tem como objetivo geral estudar o comportamento tribológico de calhas de alguns tipos de Poliuretano, utilizadas na proteção de *risers*. Nessa direção, pretende-se desenvolver, projetar e construir um equipamento com base nos resultados obtidos anteriormente por Franco,⁽¹⁵⁾ e Paes *et al.*,⁽¹⁴⁾ capaz de reproduzir os mecanismos de desgaste, em um tempo relativamente curto e de forma confiável.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia adotada inclui, numa primeira etapa, um estudo de caso complementar ao já realizado em trabalhos passados, com objetivo de compreender os fenômenos, bem como verificar quais são os mecanismos de desgaste atuantes e predominantes no sistema tribológico em questão.

A próxima etapa refere-se à investigação e seleção de configurações laboratoriais que reproduzam os mecanismos de desgaste encontrados. Foram analisados trabalhos de esclerometria efetuados com penetradores em WC-Co com vários ângulos de ataque em amostras de Poliamida e PU, realizados pelos autores deste trabalho em Paes *et al.*⁽¹⁴⁾ A partir desses resultados foi selecionada uma geometria de penetrador capaz de reproduzir aqueles mecanismos.

Determinada a geometria do elemento riscante, passou-se, então, para uma etapa de projeto, onde foi desenvolvido um sistema que pudesse simular as interações mecânicas experimentadas pelo componente em estudo. Esse sistema foi denominado SIMMC (Simulador de Interações Marítimo Mecânicas em Calhas).

Em uma outra etapa foram produzidas amostras de quatro tipos de poliuretano que, paralelamente, seriam estudadas como possíveis materiais para esta aplicação, juntamente com um material que já é empregado atualmente em proteções de LF, que foi denominado PU-Ref.

Esses materiais também foram caracterizados através de ensaios de abrasometria DIN 53.516 para uma comparação entre os ensaios de desgaste. Para esses ensaios duas condições foram utilizadas: uma a seco com carga de 10N e outra, submersa em água doce com carga de 15N.

Na etapa de parametrização do ensaio SIMMC, variou-se, de forma sistemática, cargas e quantidades de ciclos, procurando observar o comportamento do ensaio. A partir desses resultados, foi possível determinar uma faixa ótima de operação do equipamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados obtidos na análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de calhas protetoras de LF após 44 meses de uso, que experimentaram desgaste abrasivo no fundo do mar, revelam desgaste por mecanismos com fratura frágil. O material dessas proteções é o PU-Ref e o resultado da análise via MEV pode ser observado na Figura 1. A seta na Figuras 1a indica a direção de movimentação da linha, causada pela ação das correntes marítimas. Notam-se alguns riscos e trincas que adentram o material. Observa-se, que trincas importantes são formadas em um plano aparentemente perpendicular à direção de riscamento e caminham nos dois sentidos. Apesar de se observar microcorte em algumas regiões, o mecanismo predominante é o de fratura frágil, onde há formação de fragmentos de desgaste pela propagação de trincas (Figura 1a) ou ruptura de regiões em forma de “lingüetas” formadas entre trincas, como mostrado na Figura 1b.

Paes *et al.*⁽¹⁴⁾ e os autores desse trabalho observaram os mesmos mecanismos de desgaste para esses componentes. Uma análise das imagens conduziu à realização de ensaios de esclerometria pendular, com objetivo de investigar qual ângulo de ataque reproduziria em laboratório os mecanismos predominantes.

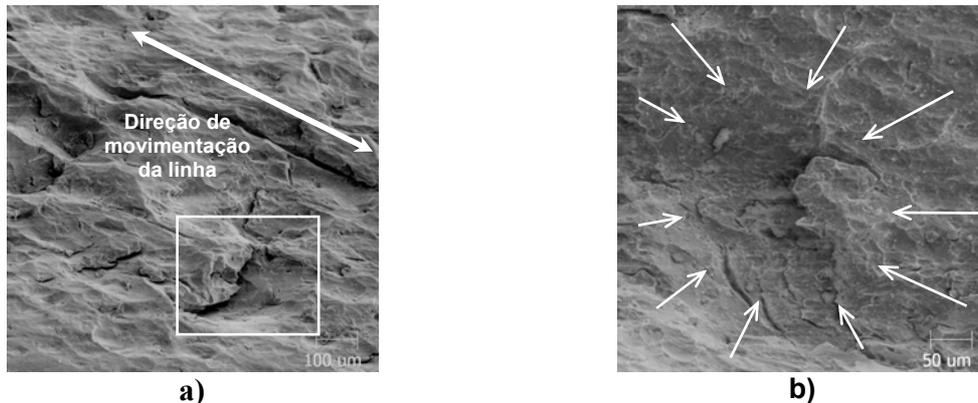


Figura 1. Fotos de MEV mostrando a superfície de calhas expostas em campo: a) detalhe de ruptura de uma “lingüeta” formada pela propagação de uma trinca e b) região onde houve o destacamento de um fragmento de desgaste, MEV.

A nova metodologia baseia-se no princípio da esclerometria (penetradores riscando a superfície da amostra). O novo equipamento permite ainda adicionar uma característica de multiplicidade dos eventos de riscamento, e assim, aumentar a quantidade de material removido em cada ensaio. Isso foi obtido através da realização de ensaios alternados de riscamento. Uma foto do equipamento pode ser vista na Figura 2.

O ensaio proposto consiste em fixar uma amostra de calha em tamanho comercial sobre um cilindro que trabalha em movimento alternado de rotação. Sobre a amostra está um conjunto de penetradores com geometria conhecida, Figura 3a. Sobre esse conjunto será aplicada uma carga através de um braço rotulado e peso morto. A disposição destes penetradores promoverá, com a movimentação relativa, um desgaste uniforme numa região com largura de 60 mm, ver Figura 3b. O ensaio deverá ser realizado de forma submersa em uma cuba com água refrigerada a 4°C, ver detalhes na Figura 4.

Foram realizados testes variando carga, velocidade e número de ciclos com o objetivo de obter-se, durante o ensaio, perdas de massa mensuráveis, mantendo-se os mecanismos de desgaste. Três cargas (500N, 650N e 800N) e três velocidades médias de deslocamento (63 m/s, 83 mm/s e 123 m/s) foram testadas com ensaios intermitentes durante 3000 ciclos e a partir desses resultados foram encontrados parâmetros que otimizam a execução do ensaio.

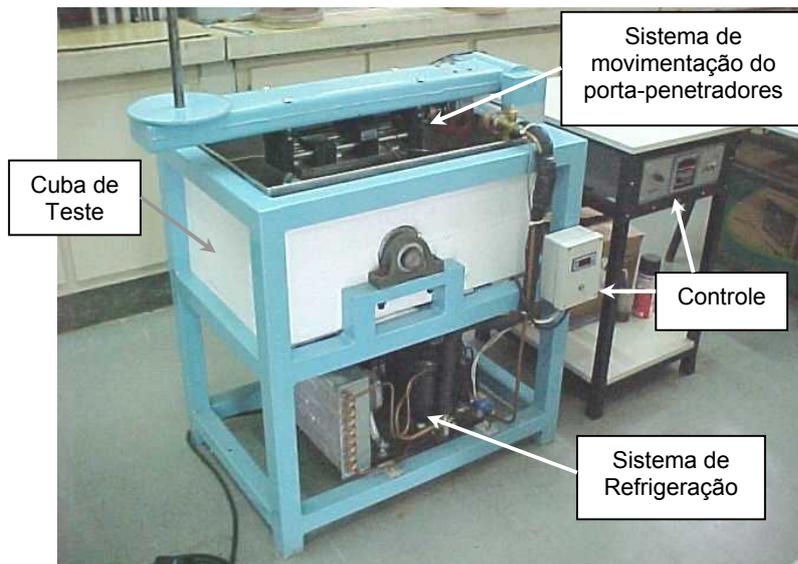


Figura 2. Equipamento de esclerometria múltipla, desenvolvido, projetado e construído no LTM – Laboratório de Tribologia e Materiais.

Assim, a velocidade média de deslocamento para o ensaio foi 83 mm/s a carga que manteve o mecanismo de desgaste a de 500N e o número de ciclos fixado em 1000, sendo realizado antes do ensaio 1000 ciclos para fase de amaciamento.

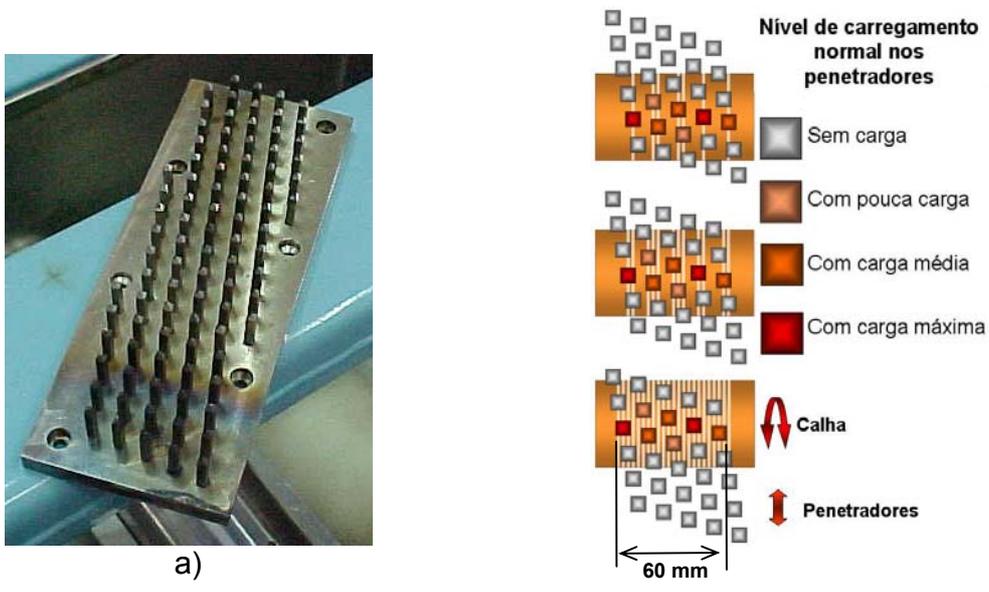


Figura 3. Base de penetradores. a) Foto da disposição dos penetradores. b) Movimento relativo para distribuição da região de desgaste.

Em toda etapa de caracterização tribológica, a microscopia eletrônica de varredura foi intensamente utilizada na caracterização dos micromecanismos de desgaste atuantes.

A análise MEV das amostras testadas no SIMMC podem ser vistas na Figura 5 e mostram a semelhança dos mecanismos de desgaste encontrado com aqueles observados na prática.

Os ensaios realizados no SIMMC tiveram a configuração de carga e velocidade indicada por ensaios de parametrização, a saber: carga 500N, velocidade média de deslocamento 83 mm/s e temperatura 4°C. Como pré-teste, foi realizado um ensaio com 1000 ciclos de duração, com objetivo de levar o tribosistema a condição de regime permanente de desgaste. Logo após, as amostras foram pesadas, e realizados mais 1000 ciclos. A diferença de massa medida nesses últimos 1000 ciclos foi utilizada para o cálculo da taxa de desgaste.



Essa taxa foi calculada através da divisão do volume retirado durante o ensaio (perda de massa [g] dividido pela densidade [g/mm^3]) pelo comprimento total deslizado. Optou-se por esse cálculo para que o valor da taxa de desgaste seja específico e não esteja ligado diretamente ao diâmetro da calha. Esses valores estão expressos na Figura 6.

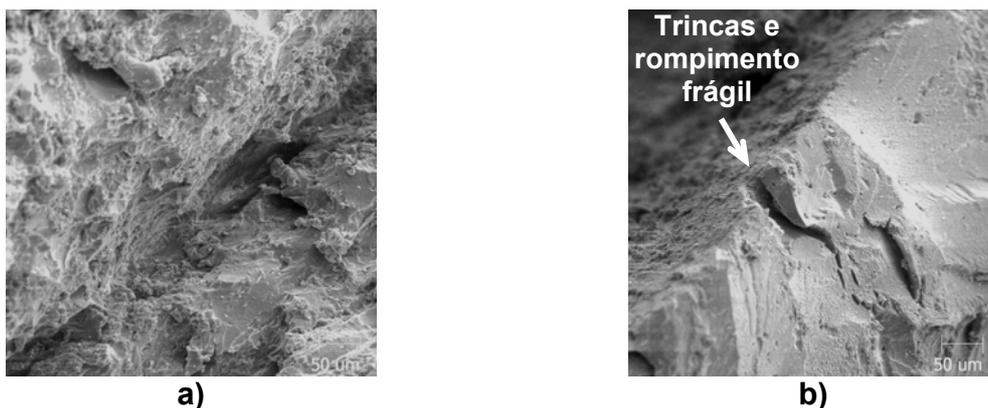


Figura 5. Aspecto da superfície desgastada durante um ensaio no SIMMC; amostra de PU-Ref. 250N, velocidade média de deslocamento 125 mm/s. a) aspecto típico da superfície após a remoção de material e b) pico de desgaste com formação de trincas, MEV.

O material E-595A1 teve o pior desempenho, enquanto o material E-585A1 foi o melhor no desempenho. Os materiais E-575A1, E-590A1 e PU-Ref tiveram praticamente o mesmo desempenho, considerando os desvios-padrão.

Paralelamente foram realizados ensaios de abrasão DIN 53.516. Esses resultados estão expressos na Figura 7. Observa-se, que o desgaste é significativamente afetado com a variação do valor da carga e do abrasivo. No ensaio com carga de 10 N, a lixa utilizada é de um óxido de Alumínio, enquanto o realizado com carga de 15 N, utilizou-se uma lixa de carboneto de Silício. Sabe-se da literatura, que abrasivos a base de Silício são mais pontiagudos, enquanto os a base de óxido de Alumínio são mais arredondados. Essa diferença geométrica pode levar a redução nas perdas de massa ou volume na abrasão, da ordem de até 3 a 4 vezes, como mostrado por Larsen-Basse *et. al.*, em 1988.⁽¹⁶⁾

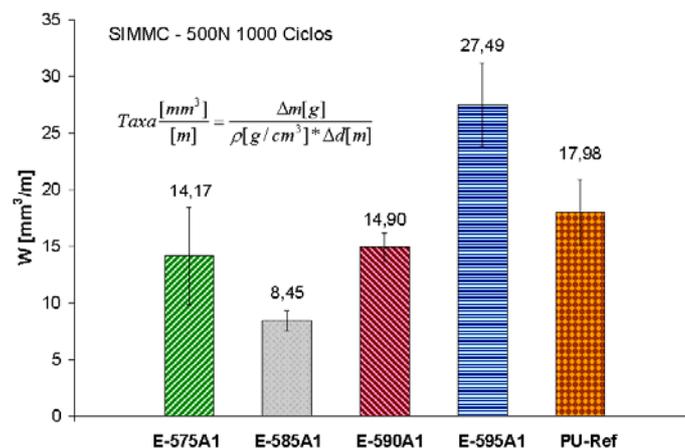


Figura 6. Taxa de desgaste para os vários materiais testados. Ensaio SIMMC, 500N, velocidade média de deslocamento 83 mm/s, 1000 ciclos.

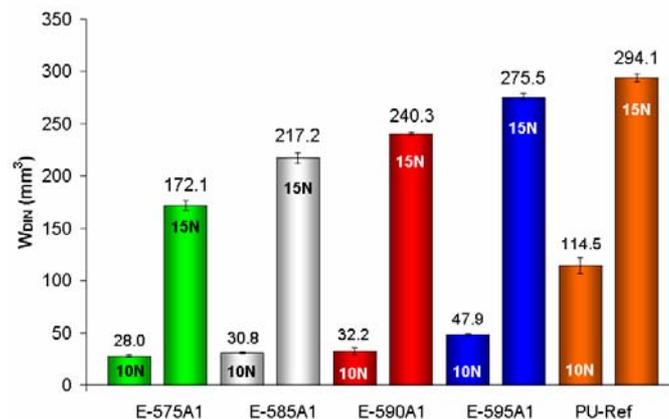


Figura 7. Perda de volume médio nos ensaios de desgaste abrasivo segundo a norma DIN 53.516, com carga de 10 N, a seco, abrasivo 60 mesh, Al₂O₃ e com carga de 15N, submerso em água a 25°C. Desvio padrão para quatro amostras, SiC, 60 mesh.

Pode-se observar que a classificação segundo a resistência ao desgaste é um pouco diferente daquela observada no ensaio de desgaste DIN 53.516. Para compreender melhor essa diferença é necessária uma investigação mais profunda dos mecanismos de desgaste e das propriedades que estão envolvidas nessas solicitações.

As microscopias das amostras testadas pela norma DIN 53.516 podem ser observadas na Figura 8, e nelas pode-se observar o predomínio de mecanismos de corte e microsulcamento.

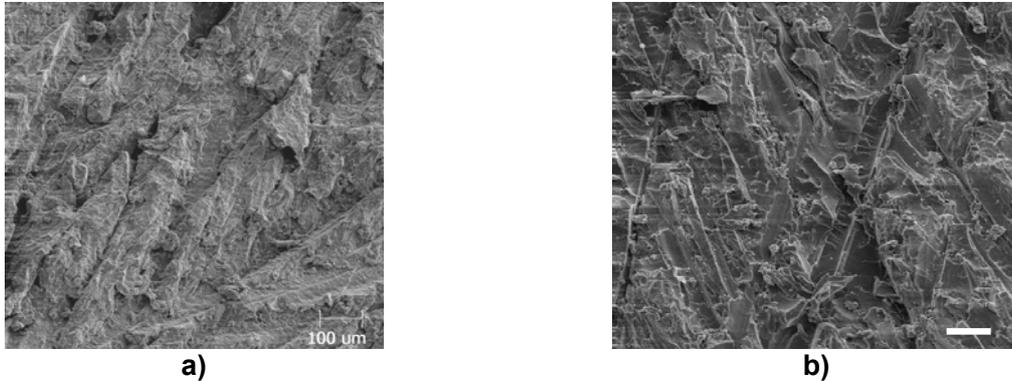


Figura 8. MEV da superfície desgastada no ensaio DIN 53.516 carga 15N/submerso em água. a) E-575A1 e b) PU-Ref.

Pode-se observar, comparando as amostras ensaiadas à abrasão pelos métodos DIN 53.516 e SIMMC, que existem diferenças entre os micromecanismos de desgaste atuantes. Enquanto o ensaio DIN 53.516 predominantemente corta a superfície da amostra devido a angulosidade dos abrasivos contidos na lixa o ensaio SIMMC promove uma retirada de material por propagação de trincas. Isso leva a um entendimento que os mecanismos de desgaste são fundamentais para uma abordagem onde se procura classificar materiais quanto à abrasão.

4 CONCLUSÕES

Resultados de análise de mecanismos de falha em proteções de LF e ensaios esclerométricos com variações de ângulos de ataque indicaram uma geometria capaz de representar o elemento que promove o evento de desgaste abrasivo na região do TDP.

Para simular esses eventos numa condição laboratorial, foi desenvolvido, projetado e construído um equipamento que permitisse a reprodução de condições de movimento, temperatura, e também reproduzisse os mecanismos de desgaste em seções nesses componentes. Esse equipamento foi denominado Simulador de Interações Marítimo Mecânicas em Calhas (SIMMC), que reproduziu satisfatoriamente os mecanismos nas calhas atualmente utilizadas na proteção de linhas flexíveis.

Ensaio com a nova metodologia comparados com ensaios de abrasão DIN 53.516 indicam que existe uma diferença entre os mecanismos de desgaste gerado em cada um, sendo suficiente para mudar a classificação quanto ao desgaste dos materiais testados.

Observa-se que os mecanismos de desgaste gerado nos ensaios DIN 53.516 são basicamente, microcorte e microsulcamento, diferente daqueles observados no ensaio SIMMC, que são microtrincas com rompimento por fratura frágil.

Em condições de corte, materiais que se alongam mais durante o rasgo têm um melhor desempenho vinculado a uma boa resistência ao rasgamento. No ensaio DIN 53.516 o material E-575A1 teve o melhor desempenho, enquanto o material de referência, PU – Ref teve o pior desempenho;

Para o ensaio SIMMC o material E-585A1 teve o melhor desempenho, enquanto o material E-595A1 teve o pior desempenho.

Agradecimentos

A PETROBRAS pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 THORP, J.M., 1982, "Abrasive wear of some commercial polymers", *Tribology international*, v 0301, pp 59-67.
- 2 MANO, E. B. ,1991, "Polímeros como Materiais de Engenharia" 3ª edição 198 pgs.
- 3 VILAR, D. W., 2002, "Química e Tecnologia dos Poliuretanos" 3a. edição atualizada 400 pg.
- 4 BUDINSKI, K. G.1997, "Resistance to particle abrasion of select plastics", *Wear*, v.203-204, pp302-309.
- 5 ARCHONDOULI, P. S and KALFOGLOU, N. K., 2001, "Compatibilization and properties of PBT/PU polymeric alloys", *Polymer*, v 42, pp 3489-3502.
- 6 LARSEN-BASSE, J. and TADJVAR, A., 1988, "Slurry Abrasion of Polymers Under Simulated Submarine Conditions*", *Wear*, v 122, pp 135-149.
- 7 BECK, R.A. and TRUSS, R.W., 1998, "Effect of chemical estrutura on the wear behaviour of Polyurethane-urea elastomers", *Wear*, v 218, pp 145-152.
- 8 FALKNER, D. L., WYSGOSKI, M. G. and MYERS, M. E. (1983), "Polyurethane Aging in Water and Methanol Environments", pp173-191.
- 9 BRISCOE, B. J., 1981, "Wear of polymers - an essay on fundamental-aspects", *Tribology International*, v 14, pp 231-243.
- 10 MOTA, L. A. C., 2002, "Durabilidade dos Polímeros", Monografia (Trabalho de Disciplina) - PCC 5726: Princípios da Ciência dos Materiais Aplicados aos Materiais de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São, São Paulo, 71pgs, disponível em: <http://pcc2339.pcc.usp.br/A08Plasticos.htm>.
- 11 PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., PROCAP 3000 a Próxima Fronteira. Disponível em:
- 12 http://www2.petrobras.com.br/minisite/aguas_profundas/procap/SistRisesflex.stm, Jul . 2003.
- 13 FRANCO, S.D., 2001, "Desgaste Abrasivo da Capa Polimérica Externa de Linhas Flexíveis", Uberlândia, relatório interno, 60 pgs.
- 14 RAMOS NETO, F. F., 2003, "Desgaste Abrasivo em Materiais Poliméricos Utilizados na Proteção de Linhas Flexíveis de Condução de Petróleo", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 175 pg.
- 15 PAES, M. T. P., FRANCO, S. D., MORAES, J. M., MOTA, A. M. R, LONTRA FILHO, L. L. (2002), "Evaluation of Abrasive Wear of Polymeric Materials Using Single-Pass Pendulum Scratching", OMAE'02, 6 pgs.
- 16 FRANCO, S.D., 2002, "Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Elastômeros – Parte II", Uberlândia, relatório interno, 54 pgs.
- 17 LARSEN-BASSE, J. and TADJVAR, A., 1988, "Slurry Abrasion of Polymers Under Simulated Submarine Conditions*", *Wear*, v 122, pp 135-149.