

PROPOSIÇÃO DE UMA NOVA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À ABRASÃO DE CALHAS PROTETORAS DE LINHAS FLEXÍVEIS

Juliano Oséias de Moraes

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais,
Campos Santa Mônica - Uberlândia / MG
j_oseias@yahoo.com

Adriano Alves Pereira

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Laboratório de Engenharia Biomédica e
Automática, Campos Santa Mônica – Uberlândia / MG

Marcelo Torres Paes Piza

Petrobras, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello, CENPES, Rio de Janeiro / RJ

Sinésio Domingues Franco

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laboratório de Tribologia e Materiais,
Campos Santa Mônica - Uberlândia / MG

Resumo: *Uma das formas de extração do petróleo em águas profundas é através de plataformas móveis, que são conectadas aos poços através de linhas flexíveis, também chamadas risers. Esses componentes são constituídos por um complexo sistema de camadas concêntricas, que intercalam variados materiais com funções distintas, sendo os revestimentos (interno e externo) confeccionados em materiais de natureza polimérica. Constatou-se recentemente, que as linhas flexíveis, ao tocarem o fundo do mar, experimentam um progressivo desgaste por abrasão. Esse desgaste é mais acentuado no ponto de início do contato da tubulação com o fundo do mar (Touch Down Point - TDP). Para reduzir esse problema, as linhas flexíveis vêm sendo revestidas externamente com materiais poliméricos na forma de luvas bipartidas em poliuretano. Atualmente, a avaliação do desempenho destes materiais vem sendo feita em duas abordagens: através de ensaios de desgaste abrasivo normatizados pela DIN 53.516 à temperatura de 4°C e de ensaios de esclerometria pendular, também a 4°C. A nova metodologia proposta neste trabalho baseia-se no princípio da esclerometria (penetradores riscando a superfície da amostra). Para tanto, foi desenvolvido, projetado e construído um equipamento que permitisse adicionar o caráter múltiplo dos eventos de riscamento, facilitando, assim, a avaliação das propriedades tribológicas desses componentes. 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. Sobre esse conjunto é aplicada uma carga através de um braço rotulado e peso morto. A disposição destes penetradores promove, com a movimentação relativa, um desgaste uniforme numa região com largura de cerca 60 mm. O equipamento dispõe de uma cuba e o ensaio pode ser realizado de forma submersa em água, controlando-se assim a temperatura. Ensaios preliminares realizados em componentes utilizados atualmente reproduziram satisfatoriamente os micromecanismos de desgaste observados na prática, tornando correlacionáveis os resultados de laboratório e campo.*

Palavras-chave: *Abrasão, linhas flexíveis, polímeros, metodologia.*

1. INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo em águas profundas vem sendo objeto de estudo nas últimas duas décadas. Atualmente, cerca de 41% da produção de petróleo brasileira provém de poços que se encontram em profundidade maiores que 400 metros, e as previsões é que este número chegue a 85% até o ano de 2005. Para alcançar estes resultados, a Petrobras vem empreendendo grandes esforços no sentido descobrir novas reservas em águas profundas, bem como, viabilizar a exploração das mesmas. As maiores reservas brasileiras de petróleo encontram-se fora do continente (“offshore”), das quais 23% encontram-se na faixa de lâmina d'água entre os 1.000 e 2.000 m, sendo a previsão de que 50% das reservas a serem descobertas estejam situadas em águas ultraprofundas, isto é, acima de 3000 metros. (<http://www.Petrobras.com.br>, julho/2003.)

Uma das formas de extração do petróleo nestas condições é através de plataformas móveis que são conectadas aos poços através de linhas flexíveis, também chamadas *risers*. Esses componentes são constituídos por um intrincado sistema de camadas concêntricas que intercalam variados materiais com funções distintas. Como exemplo, entre outras, há armaduras que conferem a resistência aos esforços axiais, constituídas por tramas metálicas, e revestimentos (interno e externo) confeccionados em materiais de natureza polimérica, Figura 1.



Figura 1: Detalhe da armação de um riser. Fonte: Veja-Petrobras/Edição 2002.

Constatou-se recentemente, que as linhas flexíveis ao tocarem o fundo do mar experimentam um progressivo desgaste por abrasão. Esse desgaste é mais acentuado no ponto de início do contato da tubulação com o fundo do mar (*Touch Down Point* - TDP), figura 2a. Isso se deve basicamente à movimentação da plataforma e às correntes marinhas, que determinam uma movimentação do duto em relação ao relevo marinho (Kayser Jr., 2003). Para reduzir esse problema, as linhas flexíveis vêm sendo revestidas externamente com materiais poliméricos na forma de luvas bipartidas, figura 2b.

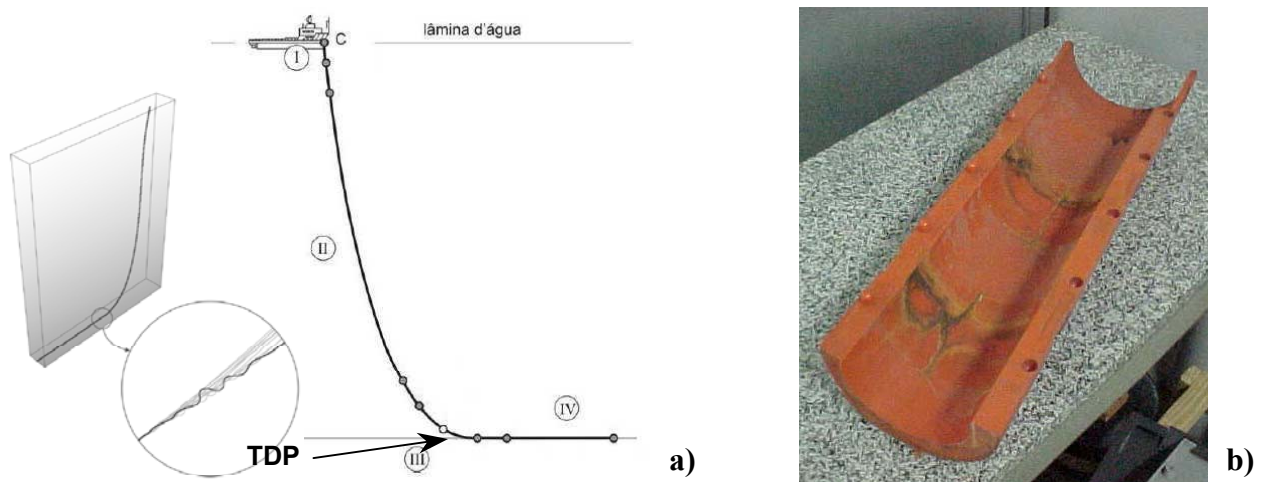


Figura 2: a) Representação esquemática de uma linha flexível (Kayser Jr., 2003) b) Calha protetora para risers em poliuretano.

Como material da capa externa das linhas flexíveis, a Petrobras tem utilizado Nylon 11 (PA), Polietileno (PE) e Poliuretano (PU) com diferentes valores de dureza. Estes materiais têm sido estudado e demonstram um bom desempenho em situações de abrasão (Thorp, 1982; Mano, 1991; Vilar, 2002; Budinski, 1997), além de serem resistentes à corrosão. Suas propriedades de desgaste são dependentes de fatores como: estrutura química (Archondouli and Kalfoglou, 2001; Larsen-Basse and Tadjvar, 1988), quantidade de ligações cruzadas (Beck and Truss, 1998), peso molecular (Falkner et al., 1983), resistência ao impacto (Briscoe, 1981) e outros. Além disso, outros fatores como a hidrólise, oxidação e degradação por microorganismos podem influenciar diretamente seu desempenho (Falkner et al., 1983; Briscoe, 1981; Mota, 2002). 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 (Petróleo Brasileiro S.A., 2003; Franco, 2001).

Atualmente, a avaliação do desempenho destes materiais nessa aplicação vem sendo feita em duas abordagens: através de ensaios de desgaste abrasivo normatizados pela DIN 53.516 à temperatura de 4 °C (Ramos Neto, 2003) 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, figura 3. A comparação dos resultados desses ensaios com amostras de material utilizado em campo revelam semelhança entre os mecanismos de desgaste (Franco, 2001).



Figura 3: Equipamentos utilizados atualmente para avaliação do desgaste abrasivo em linhas flexíveis: a) Esclerômetro pendular e b) Abrasômetro DIN 53.516

Desta forma, pôde-se determinar os parâmetros de teste que reproduzem os mecanismos de desgaste abrasivo em águas profundas (Franco, 2002; Franco et al., 2002). Porém, em ambos os ensaios, existem limitações que tornam execução, análise e ou a transposição de resultados dificultada. Apesar dos ensaios de esclerometria pendular e abrasometria DIN 53.516 reproduzirem os mecanismos de desgaste das capas de proteção de linhas flexíveis, eles requerem a retirada de amostras com geometrias e topografias específicas, e, no caso da esclerometria, os baixos valores de perda de massa inerentes ao ensaio tornam sua análise delicada, uma vez que as amostras têm que ser levadas a uma estufa para a total retirada da água. Isso eleva o tempo de duração dos ensaios. Para esclerometria pendular, esse tempo pode chegar a três dias nas borrachas já testadas. Foi observado, também, que existe um comportamento diferenciado relacionado ao tamanho do evento do risco (profundidade de penetração) e energia necessária para remoção de matéria em alguns materiais (Franco, 2002).

Dada a importância econômica e ambiental que o assunto representa para a exploração de petróleo em águas profundas (Petróleo Brasileiro S.A., 2003; Franco, 2001), justifica-se a construção de um equipamento com base nos resultados obtidos (Franco, 2002; Franco et al., 2002), que seja capaz de reproduzir os mecanismos de desgaste, em um tempo relativamente curto e de forma confiável. Pretende-se ainda, que esse equipamento permita a quantificação da resistência ao desgaste de calhas poliméricas na escala 1:1, ou seja, sem a necessidade de remoção de amostras.

2. MÉTODO PROPOSTO

A nova metodologia proposta baseia-se no princípio da esclerometria (penetradores riscando a superfície da amostra). Para tanto, é proposto um novo equipamento que permite adicionar uma característica de multiplicidade dos eventos de riscamento, e assim, aumentar a quantidade de material removido em cada ensaio. Isso será obtido através da realização de ensaios alternados de riscamento. O ensaio proposto consiste em fixar uma amostra de calha em tamanho comercial sobre um cilindro que trabalha em movimento alternativo de rotação. Sobre a amostra está um conjunto de penetradores com geometria conhecida. Sobre esse conjunto é 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. O ensaio deverá ser realizado de forma submersa em uma cuba com água refrigerada a 4°C.

2.1. Projeto e Desenvolvimento do equipamento

Para simular o desgaste abrasivo que as proteções das linhas flexíveis experimentam, foi desenvolvido um equipamento de esclerometria múltipla (SIMMC – Simulador de Interações Mecânico-Marítimas em Calhas).

A figura 4 apresenta o equipamento desenvolvido, projetado e construído que é constituído basicamente das seguintes unidades:

- Cuba de teste;
- Sistema de refrigeração;
- Sistema de acionamento do cilindro porta-amostra;
- Sistema de movimentação do porta-penetradores;
- Sistema de controle.

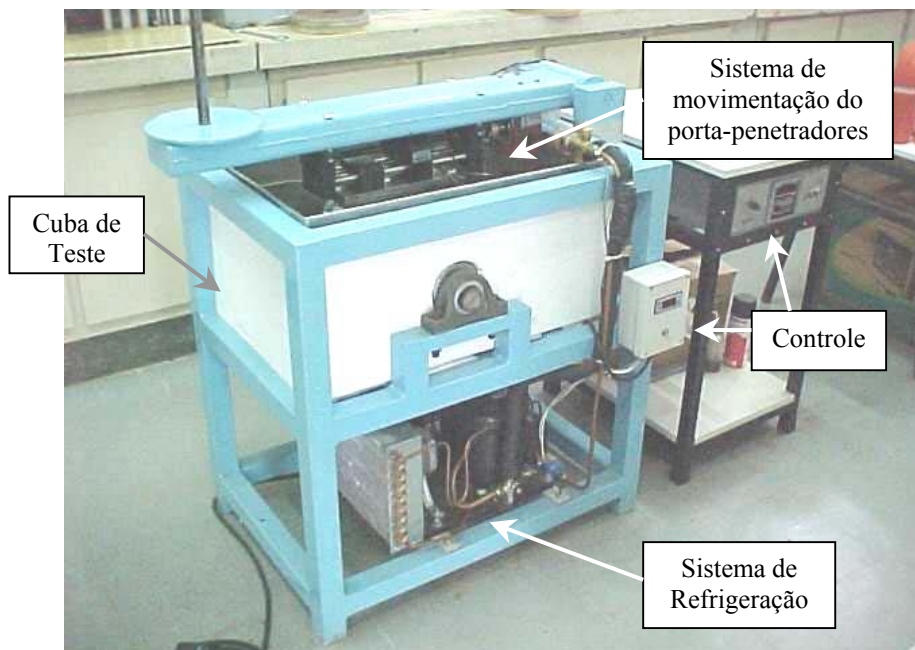


Figura 4: Equipamento de esclerometria múltipla desenvolvido, projetado e construído no LTM. SIMMC

2.1.1. Cuba de Teste

A montagem da cuba foi feita de forma a proporcionar que os mancais do eixo ficassem fora dela. Sua função é acomodar o fluido (água) responsável pelo acondicionamento térmico da

amostra. A vedação é feita através de retentores entre a cuba e o eixo do cilindro. Um isolamento térmico foi incorporado para minimizar as trocas de calor com o ambiente, aumentando a eficiência do processo de resfriamento. Como material construtivo foi selecionado o aço inoxidável austenítico AISI 304. A cuba tem capacidade de 80 litros e a quantidade de água a ser colocada é o suficiente para que a toda amostra seja submersa, figura 5.

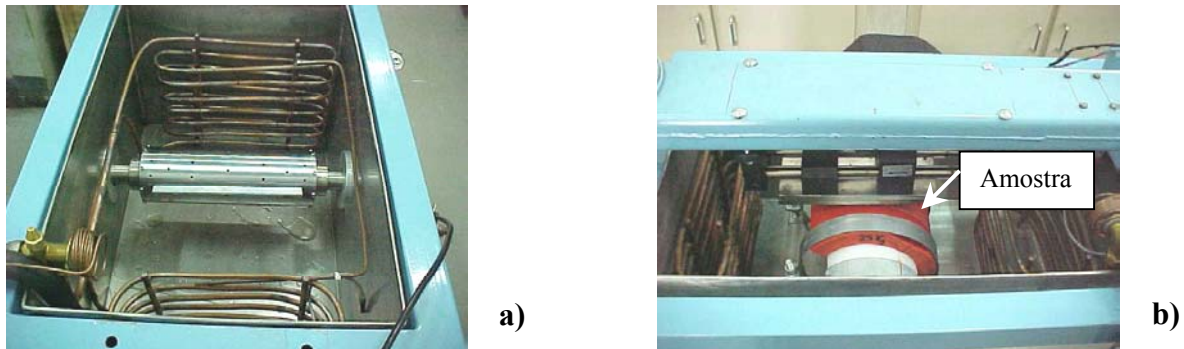


Figura 5: Cuba de teste. a) Detalhe do evaporador; b) Detalhe da fixação da amostra.

2.1.2. Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração tem como finalidade o controle da temperatura dentro da cuba durante o ensaio. Dessa forma, pode-se realizar ensaios fixando uma temperatura abaixo da temperatura ambiente numa faixa de temperatura. Esse sistema é constituído de um ciclo de refrigeração com R22, com capacidade de variar a temperatura de ambiente até -15°C . O controle é feito através de um sistema termostatzado com mostrador digital, mantendo a temperatura em $\pm 1^{\circ}\text{C}$ da selecionada, figura 6.

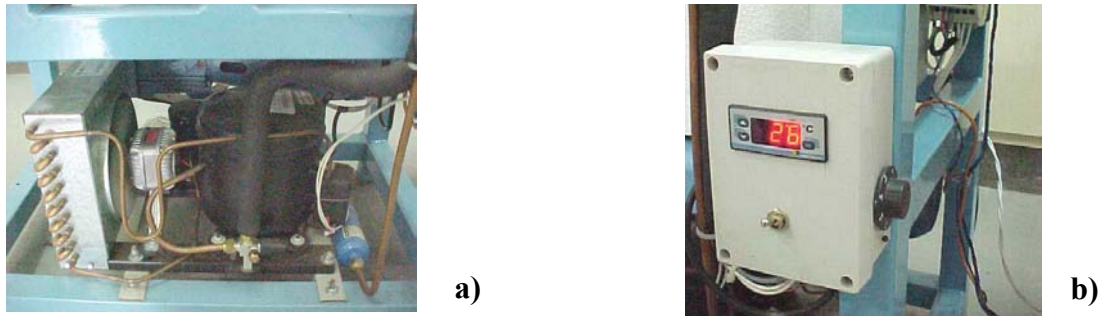


Figura 6: Sistema de Refrigeração: a) Compressor hermeticamente fechado e condensador; b) Controle e mostrador digital.

2.1.3. Sistema de movimentação relativa

O sistema de movimentação relativa entre a amostra e os penetradores pode ser separado em dois movimentos. O primeiro responsável por promover efetivamente o riscamento (figura 7) e um segundo, de caráter secundário, que tem como finalidade promover o revezamento dos penetradores, figura 8.

O primeiro sistema foi projetado para baixas velocidades relativas, estimadas através de estudos das marés. Ele é composto de um motor de indução de 1CV e um redutor pinhão-coroa de 1/40. Seu acionamento é feito através de um inversor de frequência. Assim, a velocidade média do motor pode ser variada de forma contínua desde valores próximos a zero até cerca de 43 RPM, Figura 7. O movimento experimentado pela amostra é um movimento alternativo de rotação, podendo ser em um arco de 90° ou 40° . Esse movimento é proporcionado por um sistema de quatro barras biela-manivela, figura 9.

O segundo sistema é responsável por promover um desgaste uniforme na região de ensaio. Também foi configurado de maneira que sua velocidade fosse baixa, porém partindo do ponto que esse movimento não deveria afetar a velocidade relativa do ensaio. É constituído de um motor de passo, um redutor de engrenagens helicoidais de 1/15 e uma mesa X. O acionamento deste sistema é feito através de um “drive” de potência e duas chaves fim-de-curso, figura 8.

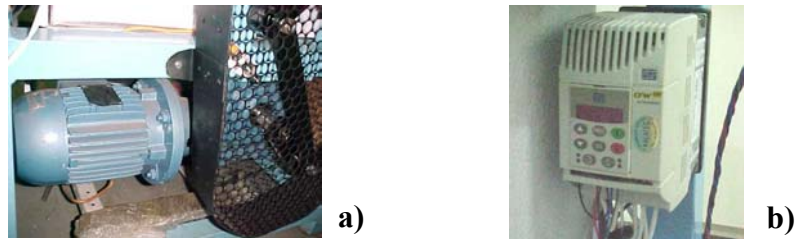


Figura 7: Sistema de movimentação do cilindro porta amostras.
a) Moto-redutor; b) Inversor de frequência.

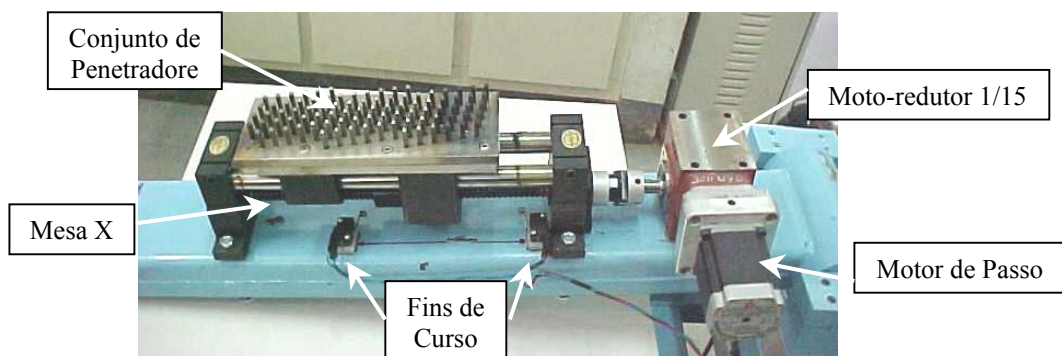


Figura 8: Sistema de revezamento dos penetradores.



Figura 9: Vista mostrando motor de acionamento do cilindro porta-amostra.

2.1.4. Sistema de Controle

Para controle e sincronização da partida e parada dos dois movimentos foi desenvolvido um sistema a partir de um conta-ciclos e um PIC (Circuito Integrado Programável). O esquema representativo desse controle é mostrado na figura 10. Onde:

C1: circuito que aciona, simultaneamente, os sistemas 01 e 02 através de chave mecânica e os interrompe no final do ensaio ao receber um sinal do conta-ciclos.

C2: circuito capaz de:

- Injetar um pulso que determine a frequência de chaveamento do “driver” (rotação do motor);
- Inverter a rotação através de duas chaves fim de curso;
- Parar o motor eletronicamente ao receber um sinal de C1.

Sistema 01: sistema composto de um “driver” não programável controlado por C2 para acionamento de um motor de passo.

Sistema 02: sistema composto de um inversor de frequência com porta lógica on/off e um motorreductor (motor de indução).

Sistema 03: sistema composto de um conta-ciclos programável com porta de entrada que recebe sinal de um sensor (indutivo como pulso de ciclos) e porta de saída analógica que envia sinal para C1.

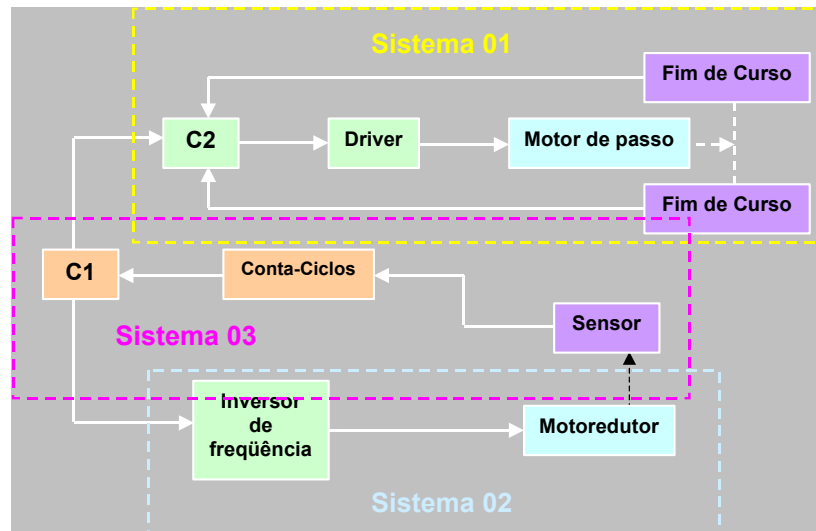


Figura 10: Diagrama de bloco do sistema eletrônico de acionamento.

O equipamento foi projetado de maneira que se conseguisse uma reprodução do movimento relativo e carregamentos do ensaio de esclerometria já realizado e estudado.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

3.1. Operacionalização do SIMMC

Após o desenvolvimento, projeto e construção do equipamento de desgaste abrasivo, foram realizadas a montagem e operacionalização dos vários sistemas constituintes.

O surgimento de comportamentos não previstos no projeto, como vibração excessiva, direcionou esforços no sentido de otimizar parâmetros de teste. Um deles foi a velocidade de translação da mesa. O trabalho com baixas velocidades através do “drive” controlador diminuiu de modo comprometedor o torque fornecido pelo motor. A solução para esse problema foi a aquisição de um redutor que permitisse que o sistema trabalhasse em baixa velocidade de translação, porém, com o motor de passo girando numa rotação que fornece um torque suficiente.

Outro problema encontrado foi a vibração do sistema de aplicação de carga durante o ensaio. A velocidade de oscilação do cilindro, acoplada com o atrito do par de materiais excitava o sistema em frequências muito próximas da frequência natural, convergindo assim, em ressonância, o que levava a grandes amplitudes de vibração. Essa problemática foi solucionada diminuindo a velocidade de giro do motor de indução através do controle do inversor. Uma consequência dessa atitude foi perder torque no movimento do cilindro, limitando assim a carga máxima do ensaio.

Um terceiro problema foi a interferência do funcionamento do inversor de frequência no sistema de controle. O bloco responsável direto pelo fornecimento da forma de onda PWM de saída, através do chaveamento dos circuitos IGBT's, injeta harmônicos na rede que comprometem o funcionamento perfeito dos circuitos controladores e do “drive”. Desta forma, fez-se necessário a utilização de um filtro a base de capacitores cerâmicos na entrada da alimentação do circuito controlador.

3.2. Levantamento da Metodologia

A metodologia de teste tem como objetivo verificar faixas de operação do equipamento, bem como, selecionar parâmetros ótimos de carga e número de ciclos capazes de gerar os mecanismos de desgastes observados na prática com repetibilidade e confiabilidade.

Para isso foram realizados ensaios preliminares fixando alguns parâmetros e variando outros.

A frequência utilizada no inversor foi de 15Hz, selecionada de maneira a atender a questão de vibração citada anteriormente. O material das calhas utilizadas nos primeiros ensaios é um poliuretano de dureza 85 Shore A. Esta calha é comercial e atualmente utilizada nessa aplicação. Seu diâmetro interno e externo é de 155mm e 215mm, respectivamente.

Assim, fixando uma velocidade e um número de ciclos, variou-se a carga no contato em 250N e 350N. O número de ciclos fixado foi de 1500 levando a um tempo de ensaio de duas horas e vinte e cinco minutos. Esses ensaios geraram perdas de massa total na ordem de 7g e 10g, respectivamente, figura 11a.

Em outra abordagem fixou-se a carga e variou-se a quantidade de ciclos, figura 11b.

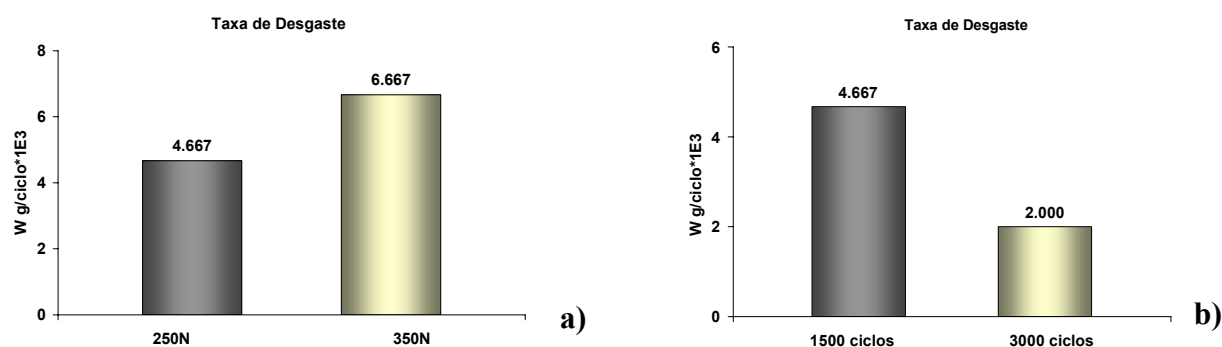


Figura 11: a) Taxa de desgaste após 1500 ciclos para duas cargas. b) Taxa de desgaste em função do número de ciclos carga de 250N.

4. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

1. Finalizar a otimização da faixa e parâmetros de operação. Para isso, faz-se necessário também, o estudo do “running”, ou dinâmica da perda de massa no teste. Serão realizados ensaios intermitentes para avaliar o comportamento da taxa de desgaste ao longo do ensaio.
2. Determinada a melhor faixa de operação, pretende-se avaliar vários materiais que são candidatos a esta aplicação, bem como, procurar relacionar o desempenho destes materiais com suas propriedades mecânicas.
3. Elaborar uma especificação técnica para calhas de proteção de linhas flexíveis tendo como subsídio os resultados encontrados.

5. AGRADECIMENTOS

À Petrobras e ao Sistema CAPES pelo financiamento do projeto, ao Eng. Teófilo Ferreira Barbosa Neto pela participação enquanto aluno de IC.

6. REFERÊNCIAS

- Archondouli, P. S and Kalfoglou, N. K. (2001), “Compatibilization and properties of PBT/PU polymeric alloys”, *Polymer*, v 42, pp 3489-3502.
- Beck, R.A. and Truss, R.W. (1998), “Effect of chemical structure on the wear behaviour of Polyurethane-urea elastomers”, *Wear*, v 218, pp 145-152.
- Briscoe, B. J. (1981), *Tribology International*, v 14, pp 231-243.

- Budinski, K. G.(1997), “Resistance to particle abrasion of select plastics”.
- Falkner, D. L., Wysgoski, M. G. e Myers, M. E. (1983), “Polyurethane Aging in Water and Methanol Environments”, pp173-191.
- Franco, S.D., 2001, “Desgaste Abrasivo da Capa Polimérica Externa de Linhas Flexíveis”, Uberlândia, relatório interno, 60 pgs.
- Franco, S.D., 2002, “Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Elastômeros – Parte II”, Uberlândia, relatório interno, 54 pgs.
- Franco, S. D., Moraes, J. M., Mota, A. M. R, Paes, M. T. P.,Filho, L. L. L. (2002), “Evaluation of Abrasive Wear of Polymeric Materials Using Single-Pass Pendulum Scratching”, OMAE’02, 6 pgs.
- <http://www.Petrobras.com.Br/portugue/deep/index.htm>, julho/2003.
- Kayser Jr, D.L. (2003), “Análise Dinâmica de Linhas Flexíveis com Elemento de Pórtico não Linear Geométrico Híbrido”, Dissertação de Mestrado Eng. Civil UFRJ, 275 pgs.
- Larsen-Basse, J. and Tadjvar, A. (1988), “Slurry Abrasion of Polymers Under Simulated Submarine Conditions*”, Wear, v 122, pp 135-149.
- Mano, E. B. (1991), “Polímeros como Materiais de Engenharia” 3a. edição 198 pgs.
- Mota, L. A. C. (2002), “Durabilidade dos Polímeros”, 71pgs, disponível em: <http://pcc2339.pcc.usp.br/arquivos2003/Durabilidade%20de%20polímeros.pdf>, agt. 2003.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A., *PROCAP 3000 a Próxima Fronteira*. Disponível em: http://www2.petrobras.com.br/minisite/aguas_profundas/procap/SistRisesflex.stm,Jul. 2003.
- 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.
- Thorp, J.M. (1982), “Abrasive wear of some commercial polymers”, Tribology international, v 0301, pp 59-67.
- Vilar, D. W. (2002), “Química e Tecnologia dos Poliuretanos” 3a. edição atualizada 400 pgs.

PROPOSAL OF A NEW METHODOLOGY FOR EVALUATION OF THE RESISTANCE TO THE ABRASION OF PROTECTIVE GUTTERS OF FLEXIBLE LINES

Juliano Oséias de Moraes

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Laboratory of Tribologia and Materials, Campos Santa Monica - Uberlândia / MG
J_oseias@yahoo.com

Adriano Alves Pereira

Federal University of Uberlândia, School of Electrical Engineering, Laboratory of Biomedical and Automation Engineering, Campos Santa Mônica – Uberlândia / MG

Marcelo Torres Paes Piza

Petrobras, Research and Development Center, Leopoldo Américo M. de Mello, CENPES, Rio de Janeiro / RJ

Sinésio Domingues Franco

Federal University of Uberlândia, School of Mechanical Engineering, Laboratory of Tribologia e Materials, Campos Santa Monica - Uberlândia / MG

Abstract: *Floating platforms are important systems to oil exploration in offshore places. They are connected to the wells through flexible lines (risers). These complex components are made of plastic end steel multilayers. The external polymeric layer that is made of polyamide has been experienced abrasive wear on the touchdown point (TDP). One suggested solution to this problem was to cover the critical region of the riser with a wear resistance polymer. Currently, there are two methods to evaluation of the performance of these materials: through tests of abrasive wear by DIN 53,516 to the temperature of 4°C and tests of pendulum scratching, also 4°C. The new methodology proposal in this work is based on the principle of the scratching (indenter scratching out the surface of the sample). For this, an equipment was developed, projected and constructed to add the multiple character of the scratching events, facilitating, thus, the evaluation of the tribological properties of these components. The considered test consists of fixing a sample of gutter in commercial size on a cylinder that develops in alternating movement of rotation. On the sample it is a set of indenters with known geometry. On this set it is applied a load through a friction arm and free weight. The disposal of these indenters promotes, with the relative movement, a consuming uniform in a region with width of about 60 mm. A recipient was annexed in the equipment and the test can be executed inside water, in temperature controlled. The preliminary tests in components used currently satisfactorily reproduced the observed wear micro mechanisms in the practical. This becomes possible to correlate the results of laboratory and field.*

Keywords: *abrasion, flexible lines, polymers, methodology.*