

DESENVOLVIMENTO DE INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO EM DUTOS FLEXÍVEIS¹

Marcelo Torres Piza Paes²
Francisco Francelino Ramos Neto²
Raphael Rezende Pires³
Denis Soares Freitas⁴
Guênia Mara V. Ladeira⁵
Vera Lúcia D.S. Franco⁶
Sinésio D. Franco⁶

Resumo

Dutos flexíveis (*risers*) são usados largamente na área de óleo e gás. Para evitar uma solitação excessiva da região de transição entre o duto e o seu conector, são empregados enrijecedores, também conhecidos como *bend stiffeners*. Estes são posicionados a cerca de 30 m abaixo do nível do mar. A movimentação das plataformas, combinada com as alterações de carga sobre os dutos flexíveis, levam a um movimento relativo entre estes e a superfície dos enrijecedores. Nesse trabalho são apresentados os resultados do desenvolvimento de uma infraestrutura capaz de reproduzir em escala real condições de campo. O equipamento em questão pode trabalhar com dutos de até nove polegadas de diâmetro interno e cargas de acionamento de 1,0 MN. Os parâmetros controlados e monitorados são: força normal ao duto, deslocamento, velocidade de deslizamento. Adicionalmente são monitoradas vibrações e a temperatura da água de teste. A metodologia de teste desenvolvida é apresentada e os resultados do ensaio de um *riser* de quatro polegadas discutidos. Nesse caso, o transitório inicial do ensaio foi de cerca de 30 minutos, que reaparece sempre que o ensaio é reiniciado. O coeficiente de atrito medido no regime permanente foi de aproximadamente 0,12.

Palavras-chave: Desgaste por deslizamento; Metodologia de teste; Dutos flexíveis.

DEVELOPMENT OF A TRIBOMETER FOR TESTING THE CONTACT BETWEEN FLEXIBLE RISER PIPES AND BEND STIFFENERS

Abstract

To prevent an excessive bending at the connector region of flexible riser pipes, bend stiffeners are used in the oil and gas industry. Platforms present small relative movements that cause a sliding contact between the riser and the bend stiffener. The development of a large scale test infrastructure for this system is presented. The apparatus is able test pipes of four, six and nine inches of internal diameter, with loads of up to 1.0 MN. Load, stroke and sliding velocity are controlled and monitored. Additionally, vibration and water temperature were monitored. The procedures to evaluate the friction coefficient are presented. Test rig performance was evaluated using a four inch pipe. The results showed a running-in of about 30 minutes, that reoccur as the test is restarted. After it, the friction coefficient remains nearly constant at about 0.12.

Key words: Sliding wear; Test procedures; Riser pipes.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestre Engenheiro, Centro de Pesquisa (CENPES), Petrobras, Brasil.

³ Mestre Eng., Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), Faculdade de Eng. Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Brasil.

⁴ Engenheiro, LTAD, FEMEC, UFU, Brasil.

⁵ Mestre engenheira, FEMEC, UFU, Brasil.

⁶ Prof. Dr., LTAD, FEMEC, UFU, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Dutos flexíveis são amplamente empregados na exploração e produção de petróleo *offshore*, sejam em águas profundas ou ultraprofundas. Estes dutos ligam os poços de exploração à plataforma, sendo denominados de *risers* aqueles posicionados verticalmente. Os posicionados no leito marinho são conhecidos como *flow line*. Esses dutos são constituídos de camadas poliméricas intercaladas com camadas metálicas.

Para evitar o excessivo dobramento dos dutos junto às conexões na plataforma, são utilizados enrijecedores, que limitam a movimentação da linha. Todavia, os dutos são livres para oscilar longitudinalmente em relação ao enrijecedor. Assim, as correntes marinhas e as movimentações das plataformas acabam por impor um deslizamento entre a capa externa do duto e a superfície interna do enrijecedor.

Como resultado dessa movimentação, a capa polimérica externa dos *risers* é desgastada, podendo levar à exposição da malha metálica, e, conseqüentemente, à necessidade de substituição do duto.

A simulação dessa configuração tribológica em laboratório pode ser efetuada em escala reduzida. Todavia, nesses casos, cuidados devem ser tomados na transposição de resultados para as condições de campo.⁽¹⁾ Para que essa transposição logre êxito, antes de qualquer coisa, as condições de campo devem ser reproduzidas o mais próximo possível no laboratório. Além disso, é imperativo que os mecanismos de degradação sejam reproduzidos.

Em equipamentos de grandes dimensões, dificuldades têm sido relatadas na literatura no que se refere à simulação de tribocontatos.⁽²⁻⁴⁾ Os comportamentos de materiais quando testados em escala reduzida são muito diferentes dos encontrados em escala real.⁽³⁾ Além disso, há se destacar que no caso de materiais poliméricos, essa transposição de resultados é consideravelmente dificultada pelo efeito de borda, resultante de deformações elásticas importantes que ocorrem em elastômetros. Outros fatores, tais como: velocidade de deslizamento, rugosidade, facilidade de remoção de fragmentos de desgaste na camada interfacial, dentre outros, são determinantes no desempenho do tribossistema.⁽⁵⁻⁷⁾ Somado a isso, destaca-se que o dimensionamento de dutos flexíveis requer a identificação de taxas de desgaste, de tal forma que a vida do equipamento possa ser estimada/determinada. Assim, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver, projetar construir e validar um tribômetro capaz de realizar ensaios de desgaste por deslizamento em amostras de *risers* em escala real.

2 DESENVOLVIMENTO DE INFRAESTRUTURA E METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE DESGASTE EM DUTOS FLEXÍVEIS

2.1 Concepção e Parâmetros de Teste

A Figura 1 apresenta de forma esquemática o tribossistema adotado para simular o contato entre o *riser* e enrijecedor. No caso, duas amostras do material do enrijecedor podem ser testadas simultaneamente.

Na fase de desenvolvimento foram estabelecidas as seguintes premissas, baseadas em parâmetros e condições observados em campo:

- Configuração de teste: deslizamento alternado, vertical;
- Amplitude máxima de deslizamento: 200 mm;
- Velocidade máxima de deslizamento: 10 mm/s;

- Força normal máxima, perpendicular ao *riser*: 1,0 MN;
- Força vertical máxima, força de atrito: 1,0 MN;
- Ensaios submersos com controle de temperatura: temperatura típica de teste: 16°C;
- Parâmetros adquiridos: coeficiente de atrito, temperatura da água e velocidade de deslizamento;
- Parâmetros controlados: velocidade de deslizamento, força normal e temperatura da água de teste;
- *Risers* de teste: 4, 6 e 9 polegadas (diâmetro interno);
- Capacidade de realizar ensaios de longa duração (centenas de milhares de ciclos).

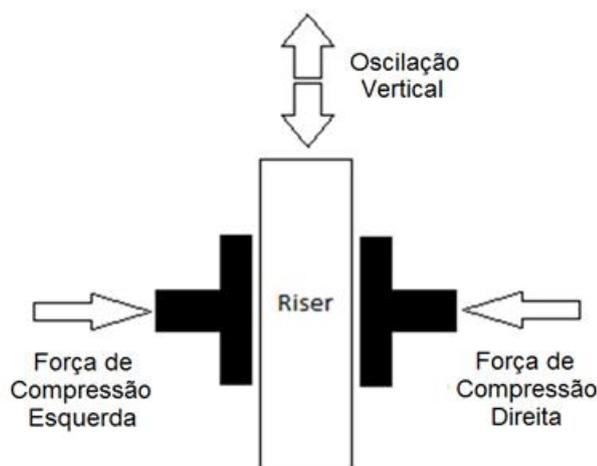


Figura 1. Representação esquemática do tribossistema adotado para simular o contato entre *riser* e enrijecedor.

2.2 Equipamento Desenvolvido

A Figura 2 apresenta o equipamento desenvolvido, projetado e construído no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia.

Basicamente, o equipamento é constituído de quatro cilindros hidráulicos, sendo os dois verticais (7) responsáveis pela reprodução do movimento alternando vertical do riser e os dois horizontais (1) fazem a aplicação dos esforços normais à linha. A posição desses cilindros hidráulicos é monitorada e controlada através de sensores do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*) (6).

Todo o sistema foi montado em uma estrutura metálica (2) bastante rígida, projetada para gerar mínimas deformações em ensaios com carga normal máxima (1 MN).

Essas forças são monitoradas através de células de carga (3), montadas na direção de cada uma das forças verticais e horizontais. Tanto as amostras do material do enrijecedor (5), quanto as do *riser* (8) são submergidas em um tanque (9), cuja temperatura é monitorada e controlada, de tal forma a reproduzir condições de campo.

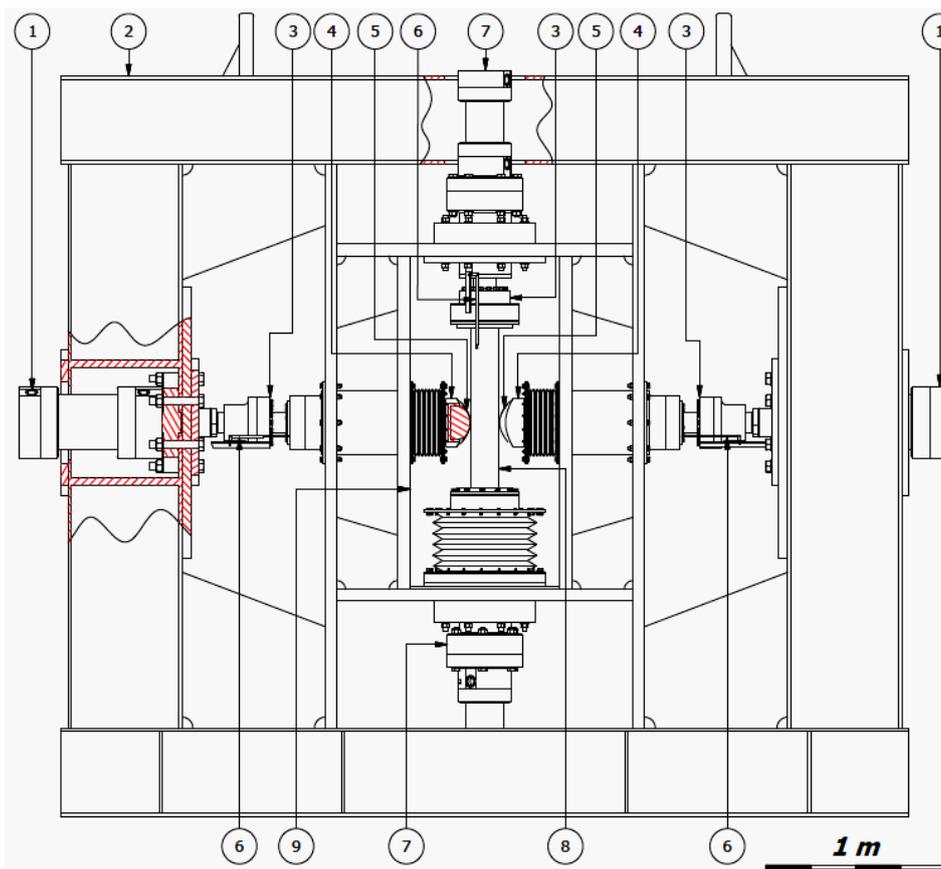


Figura 2. Representação esquemática do tribômetro construído. (1) cilindro hidráulico horizontal, (2) estrutura em aço, (3) célula de carga para medição da força normal, (4) porta-amostra, (5), amostra do enrijecedor, (6) sensor de posição do tipo LVDT, (7) cilindro hidráulico vertical, (8) amostra do *riser* e (9) reservatório de água.

A geometria das amostras do enrijecedor foi desenvolvida de tal forma a se obter uma distribuição de tensões o mais homogênea possível na área de contato.

2.3 Instrumentação do Tribômetro

A instrumentação e controle do equipamento foram desenvolvidos de tal forma que os ensaios pudessem ser realizados de forma contínua e sem a intervenção do operador. A Figura 3 apresenta a arquitetura do fluxo de dados e informações entre os diversos sensores e componentes do tribômetro desenvolvido. Para monitorar e controlar os parâmetros do ensaio, foi desenvolvido um programa supervisor, utilizando-se os recursos do software LabView[®], que permite ao operador acompanhar em tempo real o comportamento dos parâmetros avaliados (Figura 4). Tanto a velocidade de deslizamento, quanto a força normal aplicada sobre o *riser* foram dotadas de controle do tipo PID (Proporcional – Integral – Derivativo), usando um controlador lógico programável (CLP). O ajuste dos parâmetros PID foi realizado usando algoritmos genéticos e lógica *fuzzy*. A eficácia desses ajustes é mostrada através da Figura 5, que apresenta a evolução da velocidade e da força normal antes e após o controle PID.

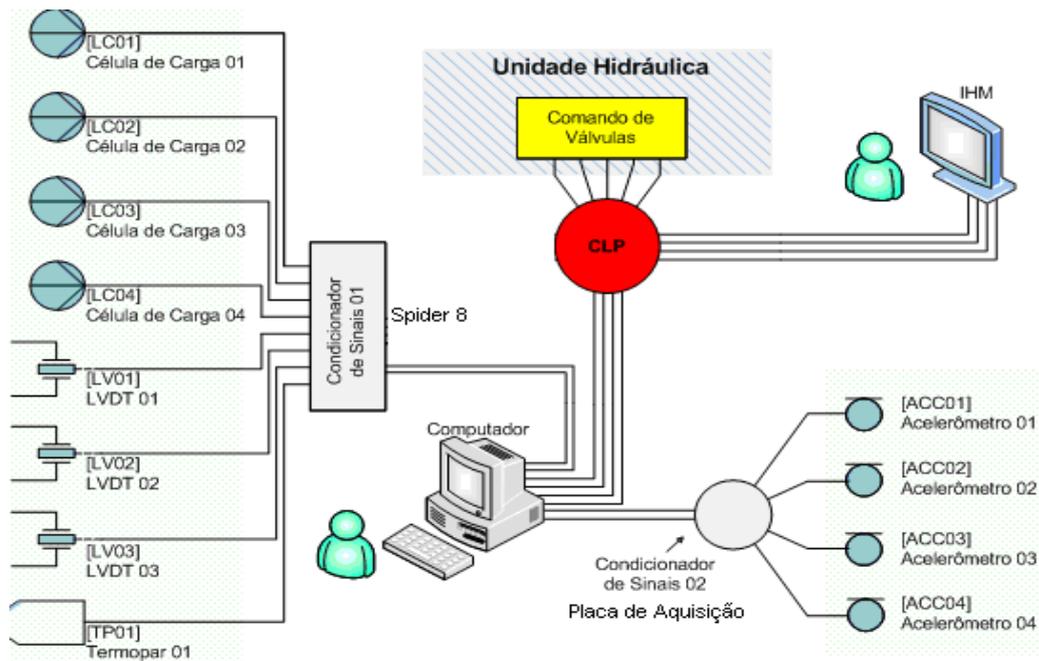


Figura 3. Fluxo de dados e informações entre os diversos constituintes do tribômetro.

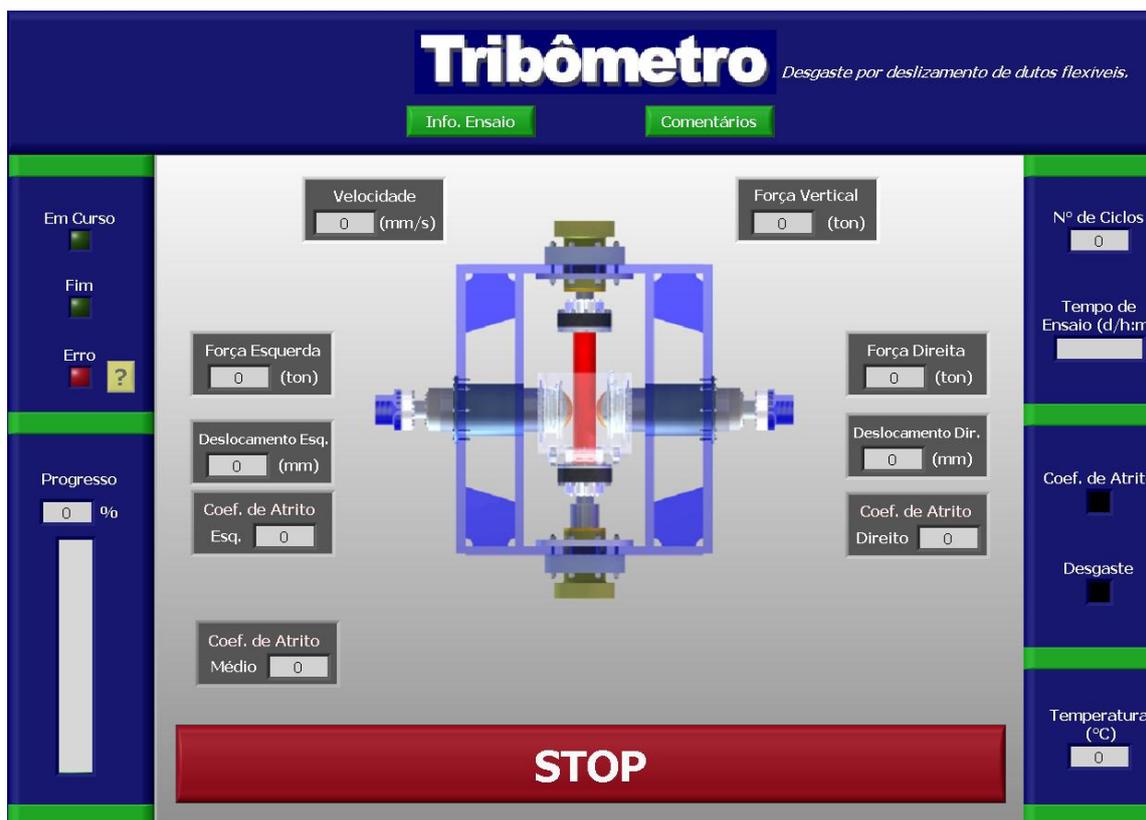


Figura 4. Tela principal do programa de controle e aquisição de dados.

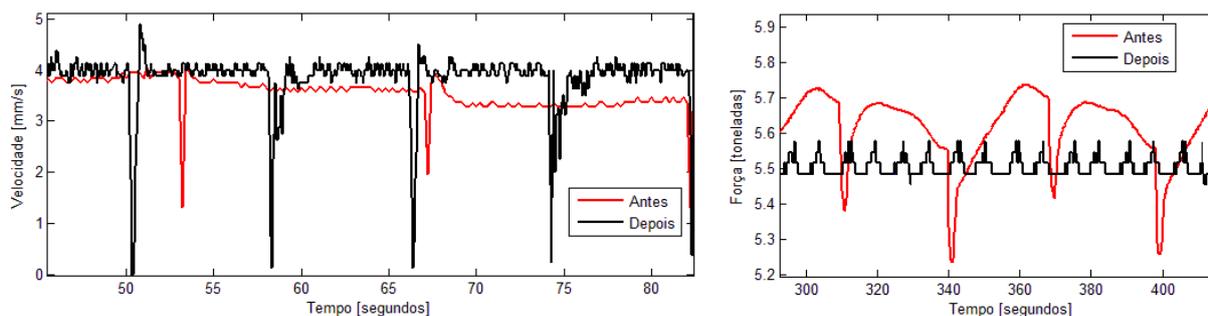


Figura 5. Perfis da a) velocidade de deslizamento e b) da força normal antes e depois da implementação do controlador PID.

2.4 Medição do Coeficiente de Atrito

O coeficiente de atrito, juntamente com a taxa de desgaste representam os principais resultados desse ensaio. A seguir descreve-se a metodologia adotada na medição do coeficiente de atrito.

Para a presente configuração, o coeficiente de atrito durante o movimento de subida pode ser determinado conforme a Equação 1.

$$\mu = \frac{F_U - F_{TU}}{F_{CD} + F_{CE}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde F_U representa a força na subida, F_{TU} a tara na subida, F_{CD} a força de compressão do lado direito e F_{CE} a força de compressão atuante no lado esquerdo.

Na descida, o coeficiente de atrito é determinado pela Equação 2. O módulo foi introduzido devido à reversão do movimento.

$$\mu = \left| \frac{F_D + F_{TD}}{F_{CD} + F_{CE}} \right| \quad \text{Equação (2)}$$

Onde F_D representa a força vertical na descida e F_{TD} a tara durante o movimento de descida.

Em função de singularidades nos valores de força no momento da reversão do movimento, adotou-se como taxa de aquisição 50 Hz, de tal forma que esses transientes pudessem ser perfeitamente identificados e removidos com segurança no pós-processamento. A Figura 6 apresenta um exemplo da evolução do coeficiente de atrito adquirido com essa taxa.

Visando uma melhor apresentação e significância dos resultados relativos ao coeficiente de atrito, foi desenvolvido um procedimento de pós-processamento destes resultados. Neste procedimento, os resultados podem ser somados para gerar um único documento (arquivo). Isso é especialmente importante nos casos em que os ensaios são conduzidos com interrupções para manutenção ou em ensaios conduzidos apenas nos horários comerciais (início pela manhã e encerramento no final do expediente de trabalho).

No processamento, os instantes correspondentes ao início e término do ensaio, bem como nas interrupções, são desprezados mediante comparação entre os valores de força lidos nas células de carga e o valor de referência dessa força para o teste. Além disso, é retirada a parte dos dados onde o cilindro vertical muda o sentido durante a oscilação, pois nesse ponto a velocidade é nula. Para tal, sabe-se que no momento em que a velocidade de oscilação muda de sentido uma permutação ocorre no seu sinal. Deste modo, analisando-se o sinal da velocidade, identifica-se o ponto de mudança no sentido de movimento. Analisando a curva de velocidade para

o tribossistema foi identificado um tempo de aproximadamente 0,2 s para a desaceleração até um valor nulo da velocidade e um tempo de 1,5 s para a aceleração. Assim, por segurança, adotou-se como procedimento o corte dados correspondentes a três segundos, sendo 0,5 s para a desaceleração e 2,5 s para aceleração, como mostrado na Figura 7. Por fim, calcula-se a média do coeficiente de atrito e caso haja algum ponto abaixo de 70% da média, ele é eliminado. Essas modificações não refletem em mudanças nos tempos, pois os dados que não são importantes são apenas eliminados, sendo que cada conjunto de dados se mantém com o seu respectivo valor de tempo.

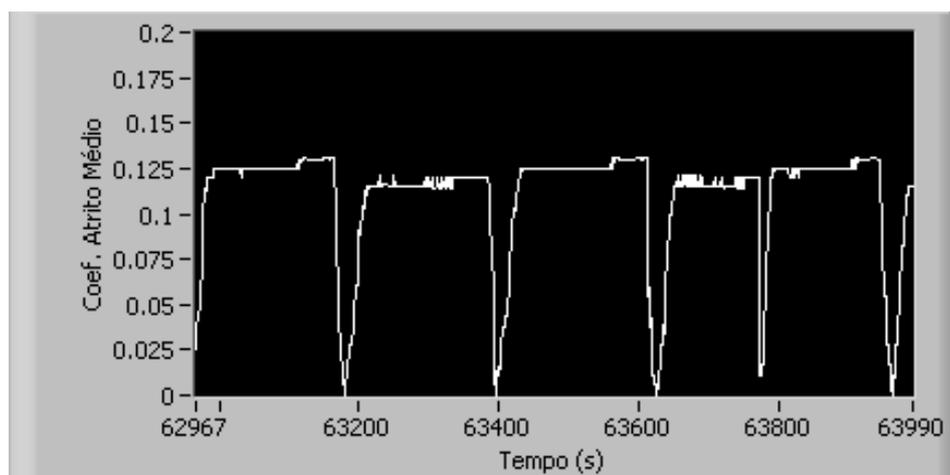


Figura 6. Evolução do gráfico do coeficiente de atrito em função do tempo, apresentado em tempo real durante a realização dos ensaios.

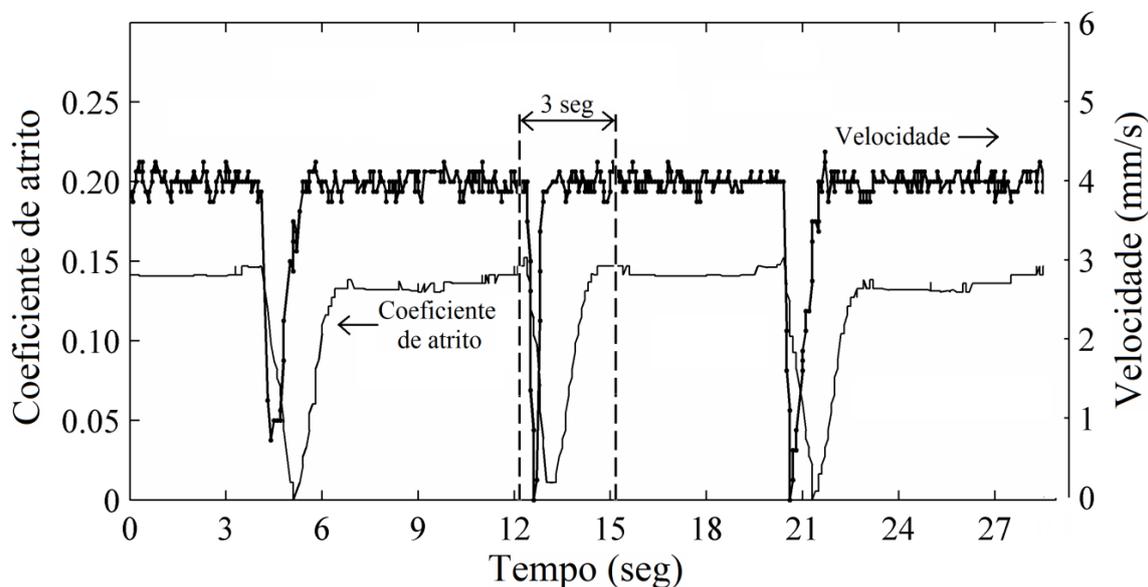


Figura 7. Gráfico ilustrativo da metodologia adotada no cálculo do coeficiente de atrito dos ensaios desgaste de *risers*.

Além dos procedimentos descritos no paragrafo anterior para a remoção do transiente na reversão do movimento, foram introduzidos no processamento rotinas para se eliminar, pelo menos em parte, o transitório relativo ao *running-in*.

A Figura 8 mostra que no reinício do ensaio ou após interrupções (parada do ensaio no final do dia), o coeficiente de atrito é aproximadamente 0,2 e rapidamente esse valor é reduzido para aproximadamente 0,12. Assim, no processamento do

coeficiente de atrito, tendo em vista a obtenção do gráfico de progresso geral do ensaio, adotou-se a remoção desse transitório inicial (*running-in*), cortando os primeiros 30 min de ensaio. A partir de então é feita uma média para cada 20 min de ensaio, ou seja, na plotagem do gráfico final é utilizado um valor de coeficiente de atrito para cada 20 min.

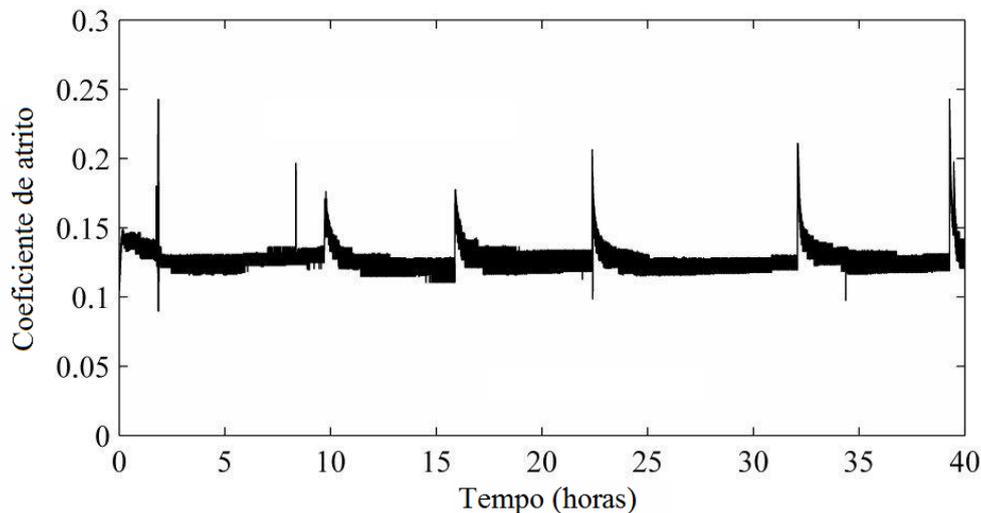


Figura 8. Evolução do coeficiente de atrito mostrando transitórios (*running-in*) devidos a paradas no ensaio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Linhas de quatro polegadas são frequentes na indústria de óleo e gás. A seguir apresentam-se resultados parciais relativos a um ensaio com uma linha de quatro polegadas.

A tensão selecionada para o ensaio foi de 3,0 MPa, o que corresponde a uma força horizontal de compressão igual a 55,5 kN. A Figura 9 apresenta a evolução do coeficiente de atrito nas primeiras 400 horas de teste. Nota-se, que o coeficiente de atrito permaneceu praticamente constante e é aproximadamente igual a 0,12. Os picos observados nesse intervalo correspondem a resquícios dos transitórios iniciais (*running-in*), que ocorrem sempre que o ensaio é interrompido e reiniciado.

A maioria dos valores de coeficiente de atrito encontrados na literatura, envolvendo polímeros, foi obtida mediante deslizamento contra superfícies metálicas.^(8,9) Os valores relativos a pares polímero/polímero utilizados em mancais de deslizamento, sem lubrificação, encontram-se na faixa de 0,05 a 0,35.^(8,9) Apesar dos valores obtidos nos ensaios de deslizamento do *riser* contra o material do *bend stiffener* estarem dentro dessa faixa, uma comparação direta não é recomendável, pois os do presente trabalho foram realizados em água à temperatura de 16°C.

Em função da baixa velocidade de remoção de material, nesses ensaios são necessários centenas de milhares de ciclos para que se possa inferir com segurança sobre o desempenho do par testado. Por isso, para o ensaio em questão foram programadas cerca de 1.100 horas de teste (cerca de 250.000 ciclos de deslizamento). Ao final do teste poder-se-á determinar a taxa de desgaste ou perda de espessura máxima do *riser*, mediante avaliação do volume de material removido na trilha de desgaste. Nesse caso, podem ser empregadas máquinas de medir por coordenadas (MMCs) com ou sem contato na medição, ou ainda através do corte e

avaliação da espessura final da capa polimérica do *riser*. As amostras do material de enrijecedor poderão ser avaliadas da mesma forma.

Assim, pode-se inferir que uma infraestrutura específica para ensaios de desgaste por deslizamento entre *risers* e materiais empregados em *bend stiffeners* foi construída e validada, facilitando, dessa forma, a tomada de decisão na especificação e seleção de soluções para o referido par.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi concebida, projetada, construída e validada uma infraestrutura para a realização de ensaios de desgaste por deslizamento alternado, tendo como par tribológico segmentos de dutos flexíveis e amostras de materiais usados na fabricação de enrijecedores. O equipamento construído reproduz condições de campo no que se refere à pressão de contato, velocidade de deslizamento, meio interfacial, posição do corpo e contra-corpo e temperatura de teste. A referida infraestrutura foi totalmente automatizada, permitindo uma avaliação segura do coeficiente de atrito.

Num ensaio de um *riser* de quatro polegadas de diâmetro interno, o transitório inicial do ensaio foi de cerca de 30 minutos (*running-in*). Esse transitório reaparece sempre que o ensaio é reiniciado. O coeficiente de atrito medido no regime permanente foi de aproximadamente 0,12.

Os resultados de desgaste devem ser avaliados através de máquinas de medir por coordenadas e/ou medição direta da redução de espessura mediante dissecamento da amostra.

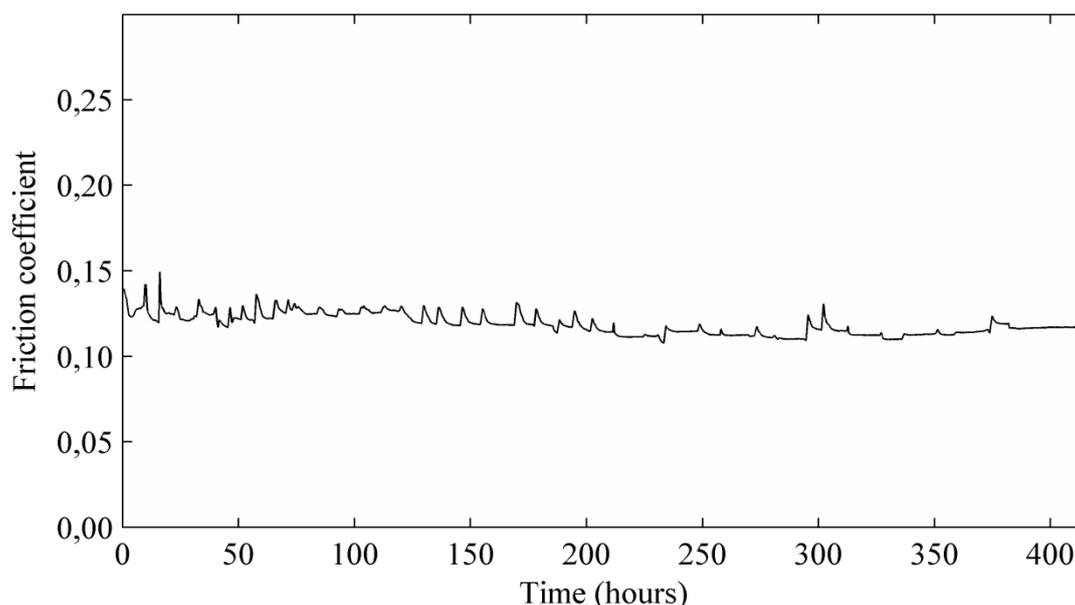


Figura 9. Evolução do coeficiente de atrito nas primeiras 400 horas de teste em um *riser* de quatro polegadas, após a remoção dos transitórios que ocorrem nas paradas, bem como os transitórios relativos à inversão do movimento no deslizamento alternado.

Agradecimentos

Os autores agradem à Petrobras pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 Lancaster, J.K., Accelerated wear testing as an aid to failure diagnosis and materials selection, *Tribology International*, Volume 15, Issue 6, Dec. 1982, 323-329.
- 2 Samyn, P., de Baets, P., Schoukens, G., van Peteghem, A.P., Large-scale tests on friction and wear of engineering polymers for material selection in highly loaded sliding systems, *Materials & Design*, 27(2006) 535–555.
- 3 Samyn, P., de Baets, P., Schoukens, G., van Driessche, I., Friction, wear and transfer of pure and internally lubricated cast polyamides at various testing scales, *Wear*, 262(2007) 1433–1449.
- 4 Vermeulen, M., Wear research on large-scale test specimen, *Wear*, 132(1989), 287–302.
- 5 Dickens, P.M., Sullivan, J.L. and Lancaster, J.K., Speed effects on the dry and lubricated wear of polymers, *Wear*, 112 (1986) 273 – 289.
- 6 Franklin, S.E. and de Kraker, A., Investigation of counterface surface topography effects on the wear and transfer behaviour of a POM–20% PTFE composite, *Wear*, 255 (2003) 766–773.
- 7 Zalisz, Z., Vroegop, P.H. and Bosma, R., Running-in model for the reciprocating sliding of nylon 6.6 against stainless steel, *Wear*, 121 (1988) 71- 93.
- 8 Zum Gahr, K.H., *Microstructure and wear of materials*, Amsterdam, Elsevier, 1987.
- 9 Uetz, H., Wiedemeyer, J., *Tribologie der Polymere: Grundlagen, und Anwendungen in der Technik; Reibung-Verschleiss-Schmierung*, Carl Hansen Verlag, Muenchen, 1984 (em alemão).