

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO DE DUTOS FLEXÍVEIS¹

Sinésio Domingues Franco²

Rosenda Valdés Arencibia³

Monique Alves Franco de Moraes⁴

Marcelo Torres Piza Paes⁵

Francisco Francelino Ramos Neto⁵

Resumo

Os dutos flexíveis (*risers*), utilizados na exploração de petróleo em alto-mar, podem sofrer desgaste na região do enrijecedor (*bend-stiffener*), devido ao movimento alternado da plataforma em função de correntes marítimas, às condições operacionais e ao clima. Visto isso, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para quantificar a taxa do desgaste simulado em amostras de *risers*, possibilitando obter o desempenho do componente dentro de uma expectativa de vida projetada. Para tanto, amostras do par tribológico *riser/bend-stiffener* foram testadas durante 1.280 horas em um tribômetro capaz de realizar ensaios de desgaste por deslizamento em escala real. E, após o ensaio, a redução de espessura do revestimento de poliamida (PA) da amostra de *riser* foi quantificada, utilizando-se uma máquina de medir por coordenadas (MMC), da Carl Zeiss, modelo Contura G2 RDS, com auxílio do seu *software* Calypso®. Constatou-se que a metodologia desenvolvida, que tem como base a perda de espessura, é uma técnica eficiente para avaliar a taxa de desgaste linear de amostras de *riser*.

Palavras-chave: Linhas flexíveis; Taxa de desgaste; MMC.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY TO EVALUATE SLIDING WEAR ON FLEXIBLE RISER PIPES

Abstract

Flexible riser pipes, used in oil offshore exploration, may be worn out on bend stiffener region due to the platform reciprocating movement arising from water currents, operating and weather conditions. This paper presents the development of a methodology to evaluate the wear rate of riser samples, enabling to get the performance of the component within a projected life expectancy. For this purpose, samples of the tribological pair riser/bend stiffener were tested during 1,280 hours in a tribometer capable to perform large-scale sliding wear tests. After the test, the thickness reduction of the polyamide (PA) protection layer riser sample was quantified in a Contura G2 RDS Carl Zeiss coordinate measuring machine (CMM) using Calypso® software. The developed methodology, which is based on the thickness loss, is an efficient technique to evaluate the linear wear rate of those riser samples.

Key words: Flexible pipes; Wear Rate; CMM.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Prof. Dr., Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), Universidade Federal de Uberlândia (UFU), MG, Brasil.

³ Prof. Dr., FEMEC, UFU, MG, Brasil.

⁴ Mestranda Engenheira, LTAD, FEMEC, UFU, MG, Brasil.

⁵ Mestre Engenheiro, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), Petrobras, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Dutos flexíveis são amplamente empregados na exploração e produção de petróleo *offshore*, ligando os poços de exploração à plataforma. No Brasil, são dutos comumente considerados nos projetos devido a, principalmente, sua versatilidade de aplicação e recolhimento o que contribui no desembaraço logístico das operações. A Petrobras vem utilizando dutos flexíveis em seus projetos desde 1978, no campo de Garoupa na Bacia de Campos-RJ.⁽¹⁾

Os dutos flexíveis são constituídos por camadas de materiais poliméricos com diferentes geometrias e materiais, intercalados com fitas de aço enroladas helicoidalmente, as armaduras, formando, assim, um equipamento composto que alia a alta resistência à corrosão dos polímeros com a resistência mecânica e a flexibilidade de movimentação das armaduras.⁽²⁾

Com o intuito de evitar a flexão exagerada destes dutos na porção *riser*, trecho vertical,⁽³⁾ em virtude dos movimentos causados por ondas e correntes marítimas, são utilizados enrijecedores (ou *bend-stiffeners*), os quais são instalados aproximadamente a 30 m abaixo da conexão com a plataforma.⁽²⁾

Entretanto, os dutos são livres para oscilar longitudinalmente em relação ao enrijecedor. Assim, ocorre um deslizamento entre a capa externa do duto e a superfície interna do enrijecedor.⁽³⁾

Como resultado dessa movimentação, a capa polimérica externa dos *risers* é desgastada, podendo levar à exposição da malha metálica, e, conseqüentemente, à necessidade de reterminação da linha ou até mesmo a substituição do duto.⁽³⁾ Estas manobras, além do custo direto da sua execução e manutenção, têm impacto direto na produção do petróleo.

Devido ao contato destas superfícies em movimento relativo, surge, então, a necessidade de quantificar o desgaste dos materiais envolvidos e, conseqüentemente, avaliar o seu desempenho através de uma previsão confiável de vida útil nas condições de aplicação.

Neste contexto, com o intuito de simular o desgaste por deslizamento que ocorre no par tribológico *riser/enrijecedor*, o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em parceria com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) da Petrobras, concebeu, projetou e construiu um tribômetro capaz de reproduzir em escala real condições semelhantes às aquelas que ocorrem em campo. Isto é, os ensaios de desgaste são realizados sob a ação de esforços, movimentos e condições do ambiente similares às condições reais de aplicação.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver e aplicar uma metodologia para quantificar o desgaste em amostras de *risers* testadas no tribômetro. Destaca-se que, com a estimativa da taxa de desgaste, será possível determinar o tempo de duração em campo do revestimento do duto flexível, bem como dimensionar os dutos flexíveis de tal forma que tenham um tempo de vida pré-estimado.

2 DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO DESGASTE EM DUTOS FLEXÍVEIS

2.1 Descrição do Tribossistema e do Equipamento de Ensaio

A Figura 1 mostra esquematicamente o tribossistema adotado para simular o contato entre o *riser* e o enrijecedor. No caso, duas amostras do material do enrijecedor foram testadas simultaneamente.

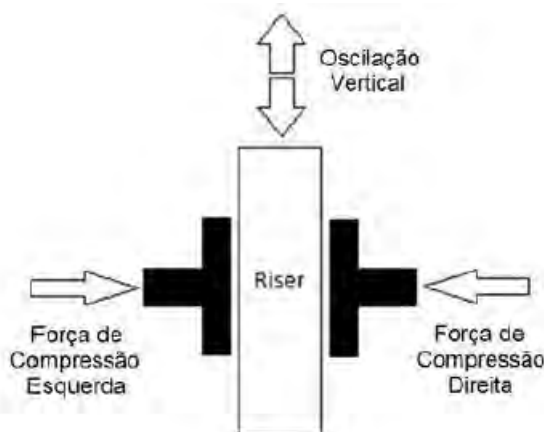


Figura 1. Representação esquemática do tribossistema adotado para simular o contato entre *riser* e enrijecedor.⁽³⁾

A Figura 2 apresenta o equipamento desenvolvido para simular o tribossistema da Figura 1. Ele é constituído de quatro cilindros hidráulicos, sendo os dois verticais (7) responsáveis pela reprodução do movimento alternado 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 a amostra do *riser* (8) são submersas em um tanque (9), cuja temperatura é monitorada e controlada, de tal forma a reproduzir as condições de campo.⁽³⁾

O número de ciclos, correspondendo cada um ao movimento de subida e descida dos cilindros verticais, é o que determina o tempo de execução dos ensaios de desgaste no tribômetro. Durante este período, a camada externa da amostra de *riser* sofre desgaste por deslizamento devido ao movimento relativo e ao contato com as amostras de *bend-stiffeners*. Depois de atingido o número determinado de ciclos, será avaliado o desgaste nestas amostras.

As Figuras 3 e 4 representam, respectivamente, amostras de duto flexível e de enrijecedor, após testadas durante 1.280 horas, que correspondem a 296 mil ciclos. Os parâmetros de ensaio foram: velocidade de deslizamento de 4 mm/s e pressão de contato de 3 MPa. Ambas as amostras foram submersas em um reservatório de água a 16°C. O curso de deslizamento foi de 30 mm.

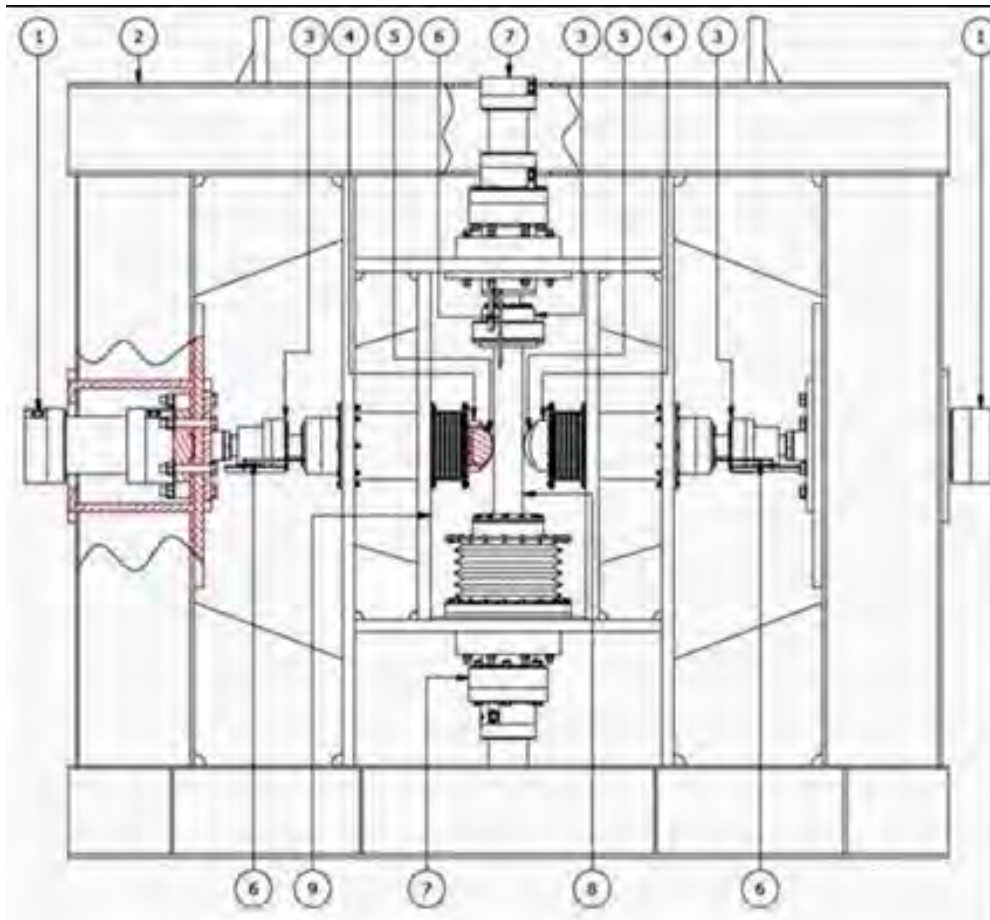


Figura 2. Representação esquemática do tribômetro construído. (1) cilindro hidráulico horizontal, (2) estrutura em aço, (3) célula de carga para medição da força normal, (4) porta-amostra, (5) amostra do enrijecedor, (6) sensor de posição do tipo LVDT, (7) cilindro hidráulico vertical, (8) amostra do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



Figura 3. Amostra de um riser de 4 in (101,6 mm) de diâmetro interno desgastada no lado esquerdo, após 296 mil ciclos de ensaio. A capa polimérica é de poliamida (PA).



Figura 4. Amostra de um enrijecedor de 240 mm de diâmetro externo, feita de poliuretano (PU), desgastada no lado esquerdo, após 296 mil ciclos de ensaio.

2.2 Medição da Espessura da Amostra de *Riser* utilizando uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC)

A perda de espessura da amostra de *riser* testada, juntamente com a taxa de desgaste, representam os principais resultados obtidos a partir do ensaio de desgaste executado.

A técnica utilizada, neste trabalho, para a avaliação do desgaste da amostra de *riser* foi empregada em detrimento da técnica que utiliza uma balança para estimar a perda de massa, a partir da pesagem da amostra antes e depois do ensaio de desgaste. Os seguintes aspectos justificam a inviabilidade da aplicação do método gravimétrico na avaliação do desgaste em *risers*:

- A variação da massa pode ser muito pequena, menor que a resolução da balança utilizada. Desta forma, há dificuldade de se encontrar uma balança com uma resolução adequada para a exatidão requerida durante a medição. Segundo Bills, Blunt e Jiang,⁽⁴⁾ é difícil acessar pequenas variações de massa, mesmo usando balanças de alta resolução, da ordem de 0,005 mg;
- A perda de massa, em grande parte das ocasiões, não reflete o verdadeiro desgaste. Pois, o teste é feito com as amostras submersas em água e, após o ensaio, a secagem da amostra de *riser* não é facilmente garantida. Isto porque, os polímeros constituintes do *riser* absorvem água e ainda há de se considerar que o *riser* contém internamente inúmeras cavidades, dificultando a sua secagem.
- A quantificação da perda mássica não fornece informações sobre a superfície desgastada.⁽⁵⁾ Desta forma, não é possível saber como o desgaste evoluiu ou foi distribuído ao longo da superfície desgastada.

Em virtude disso, optou-se pela avaliação do desgaste a partir da utilização de uma MMC, cuja aplicação esteve presente nos trabalhos desenvolvidos por Bills., Blunt e Jiang⁽⁴⁾ e Bills et al.⁽⁶⁾

Então, a redução de espessura da camada de proteção do *riser* de PA foi estimada no final do ensaio utilizando uma MMC, fabricada pela Carl Zeiss, modelo Contura

G2 RDS/XXT (Figura 5). Ela é equipada com um cabeçote articulado e com um sensor de posição capaz de realizar, com alta exatidão, o controle dimensional e geométrico de peças. Para tanto, esta máquina determina e armazena as coordenadas X, Y, Z de pontos únicos apalpados na superfície da peça de maneira individual ou no modo de varredura. Em seguida, com ajuda do *software* Calypso[®], são determinados os valores do mensurando de interesse.

Esta máquina tem resolução de 0,2 μm e faixa nominal de 1000 mm, 1200 mm e 600 mm para os eixos X, Y e Z, respectivamente. De acordo com o certificado de calibração (n. 046/2012), a MMC tem uma incerteza expandida linear de $0,7 + L/278$ μm para um fator de abrangência $k = 2,00$ e 95% de nível de abrangência para os três eixos, onde L é a distância medida em mm. O erro de apalpação é de 0,2 μm .



Figura 5. MMC, fabricada pela Carl Zeiss, modelo Contura G2 RDS/XXT.

As medições foram realizadas em uma sala com controle de temperatura ambiente ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) e umidade (entre 45 e 65%). Um termohigrômetro digital, com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ para a temperatura e 0,1% para a umidade relativa, e com faixa de medição de -40 a 70°C e de 0 a 100%, foi utilizado para monitorar a temperatura e a umidade do ambiente. Este instrumento tem uma incerteza expandida de $0,3^\circ\text{C}$ para a temperatura e de 3% para a umidade relativa, assumindo um fator de abrangência $k= 2,0$ e 95% de probabilidade de abrangência.

O apalpador utilizado nas medições é uma ponta única com esfera de rubi de 3 mm de diâmetro e haste de fibra de carbono, com 50 mm de comprimento. E a força de medição utilizada foi de 200 mN.

A avaliação do desgaste, baseada na redução de espessura, foi efetuada em uma seção longitudinal da amostra do duto flexível. Esta seção foi dividida no centro da trilha de desgaste, formando duas partes, denominadas de amostra 1 e amostra 2. A Figura 6 mostra uma destas amostras. A amostra a ser medida foi fixada e alinhada (Figura 7) utilizando o *software* Calypso[®].



Figura 6. Regiões analisadas: de RI (referência inicial) a 0, região não desgastada superior; de 0 a 1 e de 2 a 3, as regiões desgastadas expostas à água durante o teste; de 1 a 2, região desgastada central; de 3 a RF (referência final), região não desgastada inferior.

As regiões avaliadas incluíram as regiões desgastadas e não desgastadas. 196 pontos de medição foram distribuídos ao longo da trilha de desgaste na face externa, com espaçamento de 1,4 mm entre eles, totalizando um comprimento de avaliação de 273 mm, entre RI e RF (Figura 6). A face interna foi medida de forma similar, garantindo-se que os pontos apalpados externa e internamente fossem opostos. Cada amostra foi medida três vezes em ambas as faces (Figuras 7a e 7b). Durante estas medições, o *software* Calypso® forneceu os valores das coordenadas X, Y e Z de cada ponto apalpado. Assim, a espessura foi determinada como sendo a diferença entre as coordenadas Y do ponto interno e de seu ponto externo oposto. Posteriormente, a perda de espessura, devido ao desgaste, foi obtida subtraindo a espessura da região desgastada e a da região não desgastada.

A taxa de desgaste foi calculada dividindo a perda de espessura pelo número de ciclos do ensaio de desgaste por deslizamento.

Por fim, a incerteza de medição foi determinada utilizando a metodologia proposta pela ISO,⁽⁷⁾ considerando as seguintes variáveis de influência: a) variabilidade das leituras; b) resolução, incerteza de apalpação e incerteza da calibração da MMC; c) afastamento da temperatura com relação a 20°C; d) variação da temperatura durante a medição e e) coeficiente de expansão térmica linear do material da peça.

O coeficiente de expansão térmica linear do material constituinte das escalas da MMC, o zerodur®, não foi considerado como fonte de incerteza, já que é aproximadamente zero.

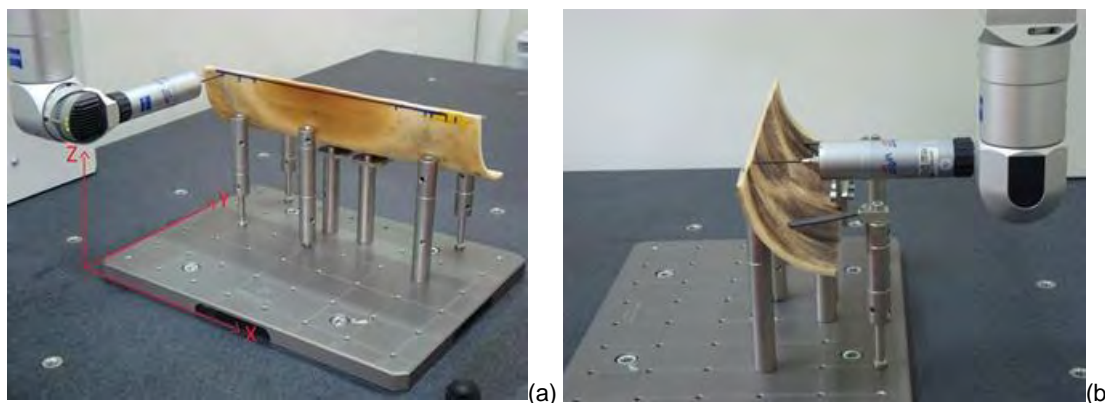


Figura 7. Fixação e alinhamento da amostra 1, a) superfície externa e b) interna.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta a redução de espessura média nas regiões desgastadas e suas incertezas associadas, para a amostra 1 e 2. Em todos os casos, o nível de abrangência foi de 95%.

Tabela 1. Redução de espessura e incertezas associadas

| Região | Redução de espessura [μm] | Fator de abrangência, k | Grau de liberdade efetivo, v_{eff} | Incerteza expandida [μm] |
|-----------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Amostra 1 | | | | |
| 0 - 1 | 124,5 | 4,30 | 2,55 | 5,6 |
| 1 - 2 | 366,8 | 2,10 | 18,44 | 1,1 |
| 2 - 3 | 183,3 | 2,02 | 41,56 | 1,0 |
| Amostra 2 | | | | |
| 0 - 1 | 116,6 | 4,30 | 2,84 | 4,7 |
| 1 - 2 | 400,1 | 2,45 | 6,11 | 1,6 |
| 2 - 3 | 193,5 | 4,30 | 2,55 | 5,5 |

Uma similar redução de espessura foi observada em ambas as amostras (Tabela 1), o que era esperado, haja vista que constituem partes do mesmo material e da mesma seção da amostra de *riser* analisada. A variabilidade observada pode ser atribuída principalmente ao acabamento superficial da amostra, que era relativamente rugoso na face interna.

A incerteza expandida mostrou valores máximos de 5,5 μm e 5,6 μm na região 2-3 da amostra 2 e na região 0-1 da amostra 1, respectivamente. Entretanto, estas incertezas podem ser consideradas adequadas, já que elas representam 2,84% e 4,50% da perda de espessura, respectivamente.

A Figura 8 mostra a taxa de desgaste ao longo da trilha de desgaste para as amostras 1 e 2. As taxas de desgaste nas regiões desgastadas 0-1 e 2-3 são inferiores àquelas obtidas na região intermediária.

Este comportamento pode ser devido ao fato de que a região intermediária da amostra do *riser* está constantemente em contato com a parte interna da amostra de enrijecedor. Desta forma, as partículas de desgaste nesta região têm mais dificuldade de escapar do que aquelas formadas nas regiões que ora estão em contato com a amostra de enrijecedor e ora estão expostas à água.

Uma interface repleta de partículas de desgaste implica em um maior coeficiente de atrito e taxas de desgastes maiores, quando comparada a uma interface sem essas partículas.⁽⁸⁾

Os resultados mostram, portanto, que a região intermediária, a qual estava menos exposta à água, teve as maiores taxas de desgaste. Nesta região, a média das taxas para a amostra 1 foi de $1,2 \times 10^{-3}$ μm/ciclo, considerando uma perda de espessura de 366,8 μm, após 296 mil ciclos, com incerteza expandida de 1,1 μm para $k=2,10$. Já a média das taxas de desgaste para a amostra 2 foi de $1,3 \times 10^{-3}$ μm/ciclo, considerando uma perda de espessura de 400,1 μm com incerteza expandida de 1,6 μm para $k=2,45$. Em todos os casos, a probabilidade de abrangência foi de 95%.

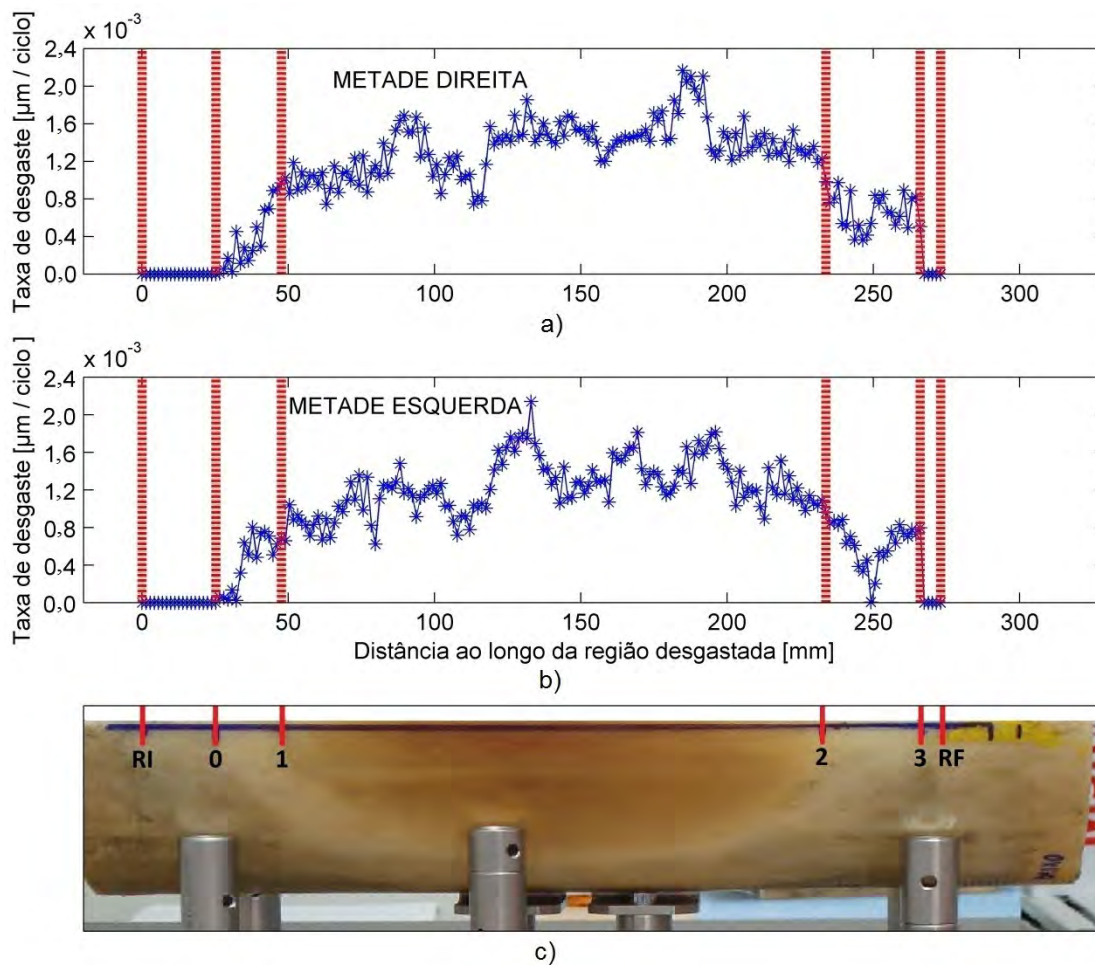


Figura 8. Taxas de desgaste calculadas, a) amostra 2 (metade direita de uma seção da amostra de riser), b) amostra 1 (metade esquerda) e c) localização das regiões analisadas nas amostras 1 e 2.

Então, os valores da taxa de desgaste da região intermediária podem ser considerados para estimar o tempo de vida do material da camada do revestimento do duto flexível.

4 CONCLUSÕES

Constatou-se que a metodologia desenvolvida, que tem como base a quantificação da perda de espessura com a utilização de uma MMC, é uma técnica viável que permite avaliar o desgaste de amostras de risers de forma eficiente.

Os valores das taxas de desgaste da região central do riser podem, então, ser considerados na estimativa do tempo de vida dos dutos flexíveis em campo, bem como no dimensionamento dos dutos de tal forma que tenham uma expectativa de vida pré-estimada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 PADILHA, JOSÉ AUGUSTO PINTO, “Análise Estrutural de Riser Flexível com Armaduras de Tração em Titânio”, Rio de Janeiro: Dissertação – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2009.
- 2 LADEIRA, G. M. V. *Instrumentação de um tribômetro para ensaios de deslizamento em dutos flexíveis*. 2011. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.
- 3 PAES, M. T. P.; RAMOS NETO, F. F.; PIRES, R. R.; FREITAS, D. S.; LADEIRA, G. M. V.; FRANCO, V. L. D. S.; FRANCO, S. D. Desenvolvimento de infraestrutura e metodologia para ensaios de desgaste por deslizamento em dutos flexíveis. In: 67^o Congresso ABM – Internacional, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Congresso.
- 4 BILLS, P.J.; BLUNT, L.; JIANG, X., *Development of a technique for accurately determining clinical wear in explanted total hip replacements*. *Wear* (2007), doi:10.1016/j.wear.2007.01.054
- 5 CARMIGNATO, S.; SPINELLI, M.; AFFATATO, S.; SAVIO, E. *Uncertainty evaluation of volumetric wear assessment from coordinate measurements of ceramic hip joint prostheses*. *Wear* 270 (2011) 584-590.
- 6 BILLS, P.J.; RACASAN, R.; UNDERWOOD, R.J.; CANN, P.; SKINNER, J.; HART, A. J.; JIANG, X.; BLUNT, L., *Volumetric wear assessment of retrieved metal-on-metal hip prostheses and the impact of measurement uncertainty*. *Wear* (2011), doi:10.1016/j.wear.2011.08.030
- 7 ISO/TAG 4/WG 3, 2008, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, Geneva Switzerland, 131p.
- 8 H.M. HAWTHORNE, On the role of interfacial debris morphology in a conforming contact tribosystem, *Wear* 149 (1991) 169.