

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE BANCADA DE TESTE PARA VALIDAÇÃO DE MODELOS DE DANOS SOB CORROSÃO-FADIGA EM DUTOS E ESTRUTURAS “OFFSHORE”

José Alisson Sousa e Silva¹, Antônio Almeida Silva², Marconi de Andrade Farias³

¹ UFCG/DEM, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, e-mail: jalissonss@yahoo.com.br

² UFCG/DEM, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, e-mail: almeida@dem.ufcg.edu.br

³ UFCG/DEM, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, e-mail: marconi@dem.ufcg.edu.br

Resumo – O processo de corrosão aliada à fadiga, decorrente, em ambiente agressivo, de esforços repetitivos de várias naturezas, é o principal responsável pelo fraturamento de estruturas “offshore” que acabam por trazer prejuízos financeiros e ambientais. Este fenômeno conhecido como corrosão-fadiga, porém, é bastante complexo, e apresenta um quadro com mais dúvidas que explicações, principalmente, no que diz respeito à forma como este se desenvolve na estrutura. Por outro lado, as máquinas de ensaios mecânicos convencionais que ensaiam somente um corpo-de-prova por vez (servo-hidráulicas), geralmente requerem longo tempo para simular os carregamentos encontrados na natureza (ex.: correntes marinhas), o que suscitou o desenvolvimento de uma máquina especial que permitisse testar vários corpos-de-prova simultaneamente. Baseado num modelo anteriormente existente, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de nova concepção e otimização de uma máquina que realize ensaios simultâneos, sob corrosão-fadiga, em diversos corpos-de-prova, provenientes de dutos e estruturas “offshore”, para validação de modelos de danos, simulados computacionalmente, no intuito de se obter parâmetros sobre a vida útil sob condições controladas. Pretende-se testar o desempenho da máquina, a partir de ensaios com corpos-de-prova obtendo-se as curvas S-N sob condições de carregamentos cíclicos em baixas e médias frequências.

Palavras-Chave: máquina, ensaio, corrosão-fadiga, corpos-de-prova.

Abstract – The corrosion process allied to the fatigue, originating, in aggressive environment, from cyclic loading of several natures, is the main responsible for cracking of offshore structures that bring several financial and environmental damages. This phenomenon is known as corrosion-fatigue, however, is very complex, and has more doubts than explanations, mainly about the form how it grows in the structure. Ever so, the machines of conventional mechanical rehearsals, that test specimens subjects to these conditions usually request long time to simulate the loading found in the nature (for ex.: marine currents), what caused the development of a special machine that allowed to test several specimens simultaneously. Based on a model previously existent, this work propose the development of new conception and machine optimization that makes simultaneous tests, under corrosion-fatigue, in several specimens, from pipes and offshore structures, to damages models, simulated through computer, to obtain parameters about the safe life of these components, under controlled conditions. Intends to test the performance of the machine, starting from preliminary tests with standardized specimens to obtain the S-N curves under conditions of cyclical loading in low and medium frequencies.

Keywords: machine, corrosion-fatigue, specimens.

1. Introdução

A demanda por dutos para o transporte de petróleo, derivados e gás natural deverá aumentar significativamente nos próximos anos, devido a um grande crescimento observado em seu consumo no Brasil, o que aumenta a necessidade de se prever falhas estruturais com mais precisão a fim de evitar prejuízos econômicos e ambientais. Atualmente, vários grupos de pesquisa desenvolvem novas metodologias que permitirão avaliar o impacto de defeitos sobre a segurança de dutos, planejar os reparos necessários e estender a vida útil destas instalações (Bernardes, 2002). Segundo Cláudio Ruggieri, que vem coordenando alguns estudos na USP (<http://xareu.naval.ep.usp.br/~ruggieri/>), o contato dos dutos com óleo, gás e substâncias corrosivas dispersas, provoca pequenas falhas em sua estrutura. "O processo corrosivo em si não é o maior problema, mas sim defeitos, na forma de trincas, originados a partir da corrosão que eventualmente provocarão a ruptura do material".

Do ponto de vista estrutural, o projeto de aplicações "offshore" é abrangente e envolve diversas áreas do conhecimento. Uma das preocupações é a escolha de materiais, associado aos minuciosos processos da fabricação. Isto tem uma implicação direta para o desenvolvimento de novos aços e/ou ligas que apresentem melhores propriedades físico-químicas e metalúrgicas no meio (corrosão, corrosão sob tensão, corrosão-fadiga, suscetibilidade a ação de hidrogênio, etc.) além de propriedades mecânicas, como: resistência, tenacidade, soldabilidade, etc.

Em termos de solicitações mecânicas, elementos estruturais do tipo "offshore" estão submetidos à relativa complexidade de esforços, mas há a tendência de que alguns se sobrepujem. Os parâmetros da corrosão-fadiga têm se revelado como dos mais importantes para a manutenção e o prolongamento da vida útil destas estruturas.

Estes tipos de estruturas normalmente estão sujeitas a carregamentos cíclicos durante sua utilização, e nesse caso, mesmo se defeitos significativos não estejam presentes no início da utilização, o que é extremamente improvável, trincas podem surgir em consequência dessa forma de carregamento, já numa fase bastante inicial de uso dessas estruturas e equipamentos. Nesse caso, praticamente a totalidade da vida em fadiga é ocupada na propagação de trincas por fadiga. Como consequência, o projeto deve se basear nas propriedades de propagação de trincas por fadiga nos materiais envolvidos.

Segundo Suresh (1991), no caso de não haver trinca inicial, um componente sob solicitações de fadiga será considerado insensível ao fenômeno, quando não apresentar danos, ou não propagá-los, até 10^7 ciclos de carregamento, como mostra a Figura 1a – curvas SN para dois tipos de aço e uma liga de alumínio.

Segundo Bastian et al. (1987), a presença de agentes corrosivos normalmente tem o efeito de acelerar a taxa de propagação da trinca de fadiga, e que a intensidade desse aumento é uma função da frequência de carregamento, de forma que o aumento da taxa de propagação da trinca se dá com a diminuição da frequência (Figura 1b). Já no ar, a frequência não tem efeito sobre a taxa de crescimento de trinca em fadiga. Outro detalhe importante é que o ataque pelos agentes corrosivos só ocorre durante a porção do carregamento em tração. Assim, no caso de corrosão-fadiga, a frequência de carregamento é uma variável importantíssima, onde qualquer aceleração dos ensaios pode inferir grandes erros nos resultados.

Em estruturas "offshore", as solicitações mais significativas são da ordem de 0,2 e 0,5 Hz (12 a 30 rpm), e estão relacionadas com a constância e repetibilidade das correntes marinhas. Na situação mais severa (0,2 Hz) e usual nos ensaios, trabalhando 24 horas por dia, levariam cerca de 590 dias para alcançar a marca dos 10^7 ciclos. A importância da frequência de carregamento sobre o processo de corrosão-fadiga fica mais clara no gráfico da Figura 1b, que mostra a taxa de crescimento de trinca (da/dn) em função fator de intensidade de tensão (ΔK).

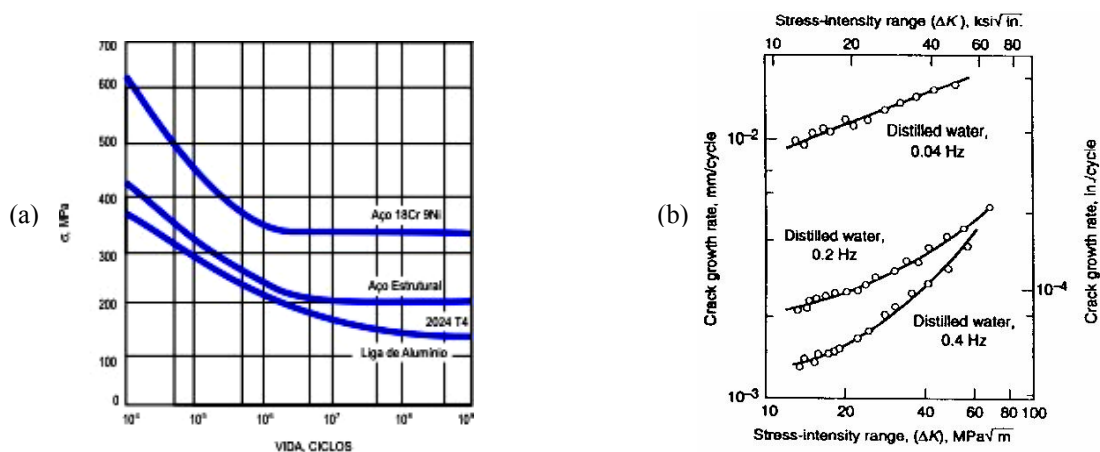


Figura 1: (a) Curvas S-N para Dois Aços e Uma Liga de Alumínio (Fonte: Branco); (b) Efeito da Frequência de Carregamento nos Processos de Corrosão-Fadiga (Fonte: Farias & Strohaecker, 2000).

O processo convencional de ensaios de fadiga geralmente utiliza máquinas servo-hidráulicas MTS que ensaiam somente um corpo-de-prova por vez. Para ensaios de corrosão-fadiga seriam necessárias várias máquinas deste tipo para

se obter uma massa crítica de resultados, o que resultaria em altos custos com a aquisição destas e/ou o longo tempo de realização dos ensaios.

Portanto, a idéia é desenvolver uma concepção de máquina otimizada que realize ensaios de fadiga em doze corpos-de-prova simultaneamente, com possibilidade de sofrerem a ação de um meio específico (marinho) através das células-de-corrosão, a fim de, mais rapidamente, obter resultados consistentes e menos sujeitos aos erros de dispersão.

2. Características da Máquina

As principais características desta máquina, além de ensaiar vários corpos-de-prova, são: robustez e confiabilidade, simplicidade de operação, baixos custos de operação, baixos custos de confecção e manutenção, aproveitamento de componentes industrializados, e controle individual de cada corpo-de-prova (carga, número de ciclos, trocas, etc.). O princípio de funcionamento desta máquina é o seguinte (Silva, Silva & Farias, 2005):

- *A aplicação da carga:* é feita através de um eixo com seis seguimentos excêntricos – cames associados às buchas, também excêntricas, que possibilitam um controle de deslocamento do came, que por sua vez, controlará o carregamento $\Delta\sigma$ - imposto ao corpo-de-prova;
- *O atuador:* é um rolamento montado sobre a bucha excêntrica no próprio eixo, que comandará dois corpos-de-prova por segmento;
- *O corpo-de-prova:* é retirado de tubulações, conforme mostra a figura 2a, e é fixado a uma torre, que promoverá a situação de “viga em balanço”, conforme mostra a figura 2b, sobre o qual atuará o came. As propriedades mecânicas do material do corpo-de-prova são apresentadas na Tabela 1;

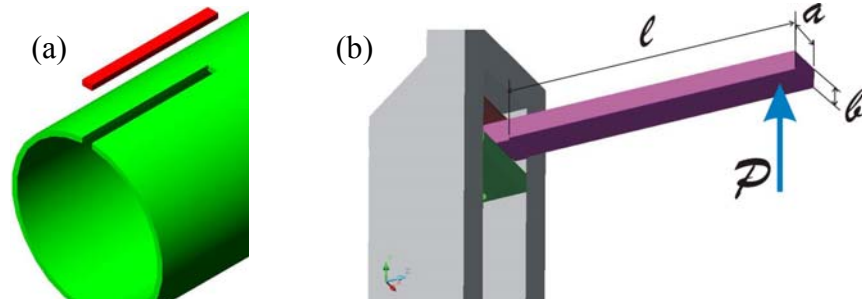


Figura 2: Corpo-de-Prova Retirado da Parede de Dutos e em Condição de Carregamento.
Dimensões: $a = 20$ mm; $b = 10$ mm; $l = 128$ mm.

Tabela 1: Principais Características Mecânicas Materiais dos Corpos-de-Prova Utilizados.

Material	Aço ARBL
Tensão Admissível (σ_{adm})	400 MPa
Módulo de Elasticidade (E)	210 GPa

- *As torres:* suportam os corpos-de-prova. Existem doze torres, das quais seis são chamadas *maiores* e seis são *menores*. As maiores são responsáveis pela fixação dos corpos-de-prova que ficarão em contato com a parte superior dos rolamentos, e as menores pela fixação dos corpos-de-prova que ficarão em contato com a parte inferior, o que implica em carregamentos opostos desencontrados, que possibilita menor esforço ao conjunto. As torres são dispostas longitudinalmente ao eixo, de forma que as maiores fiquem de um lado e as menores do outro;
- *Carregamento individualizado:* com a combinação da excentricidade de três segmentos de eixo e seis buchas, têm-se excentricidades variáveis em cada torre, isto é, para cada par de corpos-de-prova. Porém, as torres oferecem fixação e pré-carga individualizada para cada corpo-de-prova, o que cria condições diferenciadas em cada um dos doze corpos-de-prova (se assim for necessário);
- *Controle de carregamento:* o eixo é dividido em três segmentos de excentricidades diferentes, como mostra a Figura 3. Ao eixo, são fixadas as buchas com furos que permitem o ajuste da excentricidade, que pode variar de zero até 8 mm, dependendo da situação de carregamento desejada – além de proporcionar que somente um corpo-de-prova seja carregado por vez, o que resulta num alívio do carregamento sobre o eixo.
- *Células de corrosão:* são dispostas na região de maior nível de tensões (próximo à extremidade fixa dos corpos-de-prova), conforme Fig. 5. Em conjunto com uma bomba de pequeno porte, são responsáveis pela circulação da água salgada (ou marinha) na região de maior probabilidade de falha do corpo-de-prova.
- *Ajuste de frequência de carregamento:* é feito através de inversor de frequência ligado ao motor;

- **Capacidade de Carga:** baseada na capacidade máxima que o eixo excêntrico, construído com aço SAE 4340 temperado, resiste sem problemas: $P_{\max} = 11,47 \text{ KN}$, conforme cálculos a seguir.

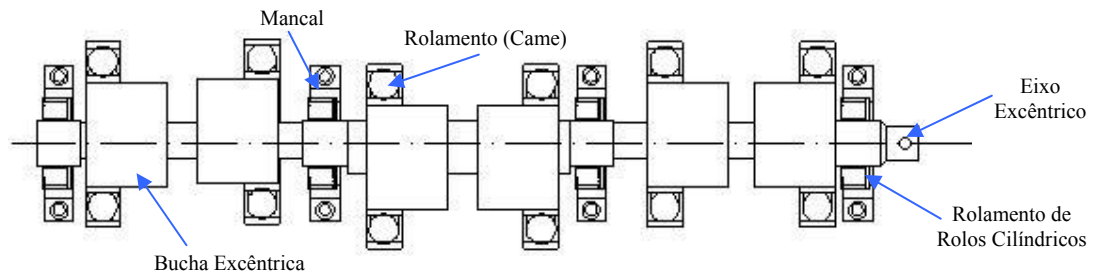


Figura 3: Detalhes do Eixo Excêntrico da Máquina.

Cálculo da Carga Máxima Admitida pelo Eixo

Dados:

Dimensões do segmento de eixo: $a = 40 \text{ mm}$; $b = 120 \text{ mm}$; $l = 160 \text{ mm}$; $d = 24 \text{ mm}$ (conforme esquema abaixo);

Tensão limite de escoamento do aço SAE 4340 LQ: $\sigma_e = 475,41 \text{ MPa}$.

Fator de segurança: $FS = 2,5$.

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3}, \text{ mas } M = \frac{Pab^2}{l^2}$$

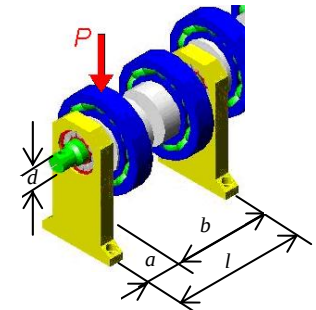
$$\text{Substituindo: } P_{\max} = \frac{\sigma_e l^2 \pi d^3}{32 \cdot FS \cdot a \cdot b^2} \Rightarrow [P_{\max} = 11470,42 \text{ N}] \text{ ou } [P_{\max} = 11,47 \text{ KN}]$$

onde:

M = momento fletor na seção crítica;

$P_{\max}$ = carga máxima admissível pelo eixo;

σ_x = tensão devida ao momento fletor;



3. Máquina Anterior e Modificações Realizadas

A máquina anterior apresentava seis torres com dois corpos-de-prova cada uma. Estes corpos-de-prova ficavam dispostos, na torre, um sobre o outro, conforme mostra a Figura 4a. Este inconveniente dificultava a substituição do elemento inferior – só feita com a retirada do elemento superior, e também dificultava os ajustes de carregamento, tudo devido ao pouco espaço disponível ao manuseio de ferramentas.

Para que se resolvesse este problema, iniciou-se o projeto de uma nova concepção, apresentando, agora, dois conjuntos de torres – cada conjunto com seis torres e cada torre comportando apenas um corpo-de-prova, porém a idéia de corpos-de-prova em contatos opostos com o rolamento foi mantida, como mostra a Figura 4b.

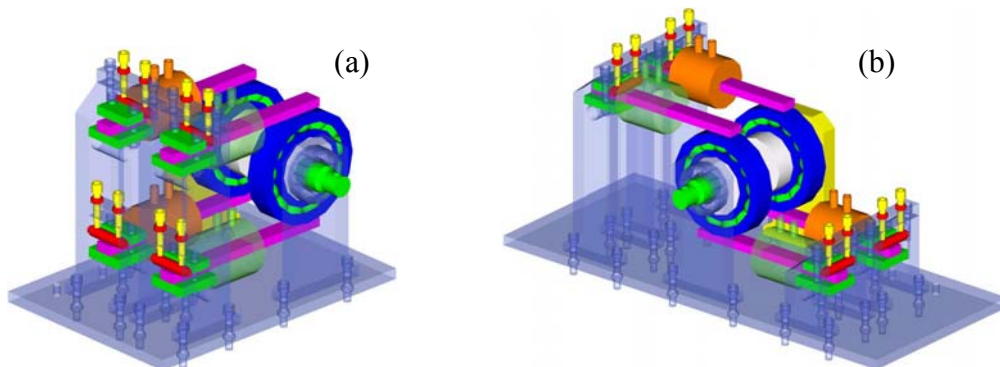


Figura 4: Comparativo da Distribuição dos Corpos-de-Prova: (a) Máquina Anterior; (b) Nova Concepção.

Outra modificação estudada foi com relação à vedação das células-de-corrosão (Figura 5a), que na máquina antiga era feita com silicone na interface acrílico/corpo-de-prova. Devido ao deslocamento do came, a flexão sofrida

pelos corpos-de-prova gerava um movimento relativo entre estes e a célula-de-corrosão, que resultava em uma pequena folga, e conseqüentemente, em vazamento de água salina, por capilaridade, sobre o corpo da máquina. O material, do qual consiste a máquina, sofre desgaste corrosivo ao ataque desse meio salino.

Para que esse problema fosse minimizado, foi providenciada a substituição das tampas de acrílico das células-de-corrosão por tampas de borracha, de forma que o contato do corpo-de-prova com a tampa seja feito por interferência e a pressão da borracha sobre o metal impeça o vazamento, tal como mostra a Figura 5b.

Devido à utilização de novo conjunto de torres, a remoção do redutor, e transferência do motor para a parte inferior, a área da base de sustentação sofreu reduções dimensionais, de 305×1200 mm (máquina antiga) para 555×610 mm (máquina nova).

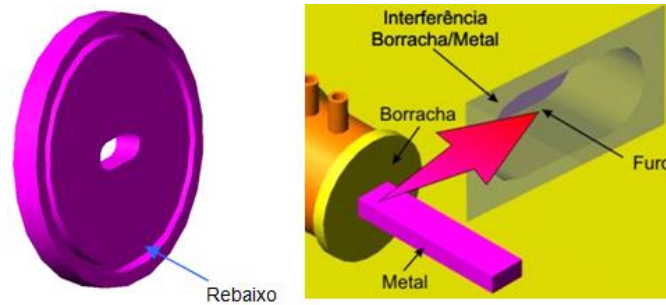


Figura 5: Células-de-Corrosão com Tampas de Borracha e Detalhe da Interferência entre a Tampa e o Corpo-de-Prova.

Visando melhorar o aspecto ergonômico da máquina, que antes ficava posicionada praticamente à altura do solo, uma base de cantoneiras de aço foi construída para suportar a mesa com o conjunto rotativo. Também se optou pela localização do motor na parte inferior da mesa. O tensionamento das correias pode ser ajustada através de uma articulação na base do motor, por meio de parafusos com porca e contra-porca, como mostra detalhes da Figura 6.

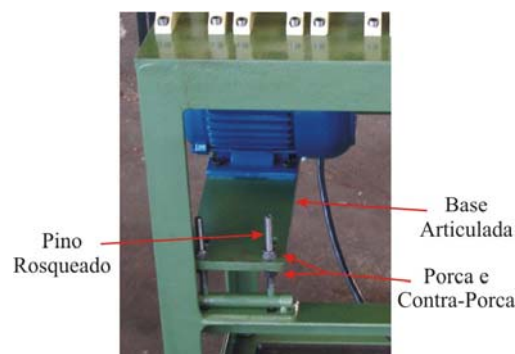


Figura 6: Detalhe do Sistema de Ajuste de Correias e Travamento da Base do Motor na Nova Máquina.

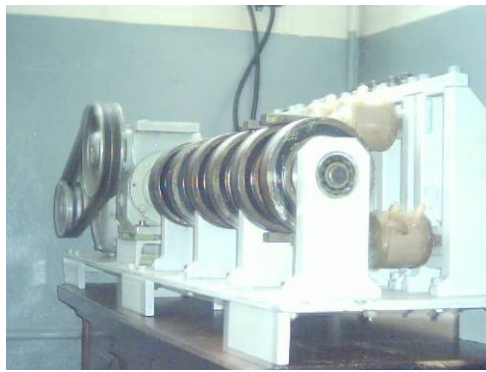
A parte rotativa da máquina antiga – incluindo rolamentos, cames, suportes e as torres maiores de fixação, foi reaproveitada por fins de economia, e para permitir alguns testes preliminares, porém se pretende construir novos conjuntos com eventuais modificações.

Devido a possíveis condições de vibração na máquina, em situações de carregamento mais elevadas, foram providenciados quatro “vibra-stops” de borracha dispostos na base.

Por fim, as Figuras 7a e 7b apresentam, respectivamente, a antiga versão de máquina de ensaio de corrosão-fadiga em múltiplos corpos-de-prova e a nova concepção (em fase de conclusão e testes). Na nova versão, pode-se notar que foi aplicada uma pintura adequada com cores-padrão, visando seguir algumas recomendações de segurança:

- partes móveis (Polias) – laranja;
- parte elétrica (Motor) – Azul;
- parte estrutural (Base) – Verde Martelado.

A nova concepção de máquina de ensaio de corrosão-fadiga, com possibilidade de testar doze corpos-de-prova, foi projetada na UFCG e construída pelo SENAI/CITI – Centro de Inovação e Tecnologia Industrial. Para fins de análise do desempenho da nova concepção pretende-se realizar numa primeira fase, testes com corpos-de-prova sem células de corrosão, visando apenas testar a capacidade da máquina quanto ao carregamento e duração de testes sob ambiente normal. Numa segunda fase, após os ajustes necessários, pretende-se testar a máquina em condições mais próximas de situações reais com simulação do ambiente marinho através das células de corrosão, inclusive considerando carregamentos típicos do ambiente sujeito a estruturas “offshore”.



(a)



(b)

Figura 7: Fotografias da Máquina: (a) Antiga; (b) Nova Concepção.

4. Conclusões

Considerando os objetivos propostos de otimização da versão anterior da máquina, e a partir de testes preliminares com o conjunto rotativo em funcionamento, percebe-se que a nova versão possui muitas vantagens:

- Posição de trabalho mais adequada (ergonomia) e proteção das partes rotativas do conjunto de polias e correias (ainda em fase de fabricação);
- Facilidade nos processos de manuseio, manutenção e ajuste dos corpos-de-prova, sem ter de desmontar toda a torre;
- Melhoria no sistema de vedação das células de corrosão, com material mais resistente e durável;
- Custos de fabricação relativamente baixos, se comparado ao preço de uma máquina de ensaio do tipo servo-hidráulica de mesma capacidade.

Embora não se disponha ainda de resultados experimentais em condições de testes reais que permitam avaliar com maior precisão o desempenho da nova concepção, avaliando apenas as soluções de projeto apresentadas em termos de melhorias introduzidas, já se garante uma expectativa bastante positiva da nova concepção em relação a versão antiga da máquina.

5. Agradecimentos

À UFCG, ao PRH/ANP, ao PRH-25, à FINEP, ao CTPetro e ao CTBRASIL.

6. Referências

- BASTIAN, F. L.; CAMINHA, H. M. Jr.; MORAIS, M. M. *Mecânica da Fratura*, IBQN – Instituto Brasileiro de Qualidade Nuclear – 1987.
- BEER, F. P., JOHNSTON, E. R. Jr., *Resistência dos Materiais*; Tradução e revisão técnica de Celso Pinto Moraes Pereira. – 3ª ed. – São Paulo: Editora Makrom Books, 1995.
- BERNARDES, J., *Nova Metodologia Torna Previsão de Falha em Dutos de Petróleo e Gás mais Precisa* <http://xareu.naval.ep.usp.br/~ruggieri/>, visitado em 2002.
- BRANCO, C. M.; *Fadiga em Estruturas Soldadas*, Capítulo 2 – Introdução ao Estudo da Fadiga.
- FARIAS, M. A.; STROHAECKER, T. R. *Desenvolvimento, Concepção, Viabilização e Construção de uma Máquina de Ensaio para Múltiplos Corpos de Prova em Fadiga Assistida pelo Meio Ambiente – Água do Mar*, Anais do COBEM 2000, Natal – RN, 2000.
- SILVA, J. A. S.; SILVA, A. A.; FARIAS, M. A. *Desenvolvimento e Construção de Bancada de Testes para Validação de Modelos de Danos sob Corrosão-Fadiga em Dutos e Estruturas “Offshore”*, Relatório N° 3, ANP/PRH-25, UFCG, Campina Grande-PB, 2005.
- SHIGLEY, J. E., *Elementos de Máquinas. Vol. 1*; Tradução de Edival Ponciano de Carvalho. – Rio de Janeiro: LTC Editora, 1984.
- STROHAECKER, T. R. *Aplicação da Mecânica da Fratura*, UFRGS, Porto Alegre – RS, 1994.
- SURESH, S., *“Fatigue of Materials”*. Cambridge University Press, pp 126–131, 1991.