

Implementação de sistema de monitoramento de esforços nas estruturas de apoio de módulos de plantas de processo de plataformas flutuantes de produção de petróleo.

Wagner Mespaque¹, Vitor Frainer² & Paulo Roberto Teixeira³

¹*Mestrando do Curso de Engenharia.Oceânica – FURG, Rio Grande, RS –
wmespaque@petrobras.com.br*

²*Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – vitor@gefmat.eng.br*

³*Departamento de Materiais e Construção – FURG, Rio Grande, RS – teixeira@dmc.furg.br*

RESUMO: “*Stool*” é como é chamada a estrutura que compõe um dos apoios que suportam os módulos de algumas plataformas do tipo navio, a exemplo da P-53, a qual se encontra em fase final de construção em Rio Grande/RS. Estes módulos são apoiados em quatro *stools*, dois deslizantes (que não oferecem restrição a deslocamentos longitudinais) e dois fixos (com restrição em todas as direções). Acerca desta configuração de suportação de módulos existem algumas dúvidas, as quais se pretende esclarecer com a medição dos esforços e deslocamentos relativos sobre esses *stools*, para o qual foi implementado um sistema de monitoramento destas grandezas. Nestes foram instalados extensômetros para quantificar indiretamente os esforços atuantes que irão realimentar modelos numéricos para extrapolação dos resultados para toda estrutura. No total serão instalados na plataforma 69 sensores (extensômetros, lvdt’s e acelerômetros).

PALAVRAS-CHAVE: STOOL, FPSO, TOPSIDE INTERFACE

ABSTRACT: Stool is the structure that is part of the support system of process plant modules of some offshore platforms, such as Petrobras P-53, which is at the end of construction at Rio Grande/RS, Brazil. These modules are supported by four stools, two sliding (where the module pad is free to slide in the longitudinal direction), and two fixed (that restricts the displacement in all directions). About this type of support system there are some questions, which this work intends to answer with the measurement of some variable, like strain and relative displacement at these stools, for that it was designed a monitoring system. For this purpose it was installed strain gages to quantify indirectly the loads acting on the stool, which outputs will feed numeric models that will predict the behavior of all structure of the stool. It will be installed 69 sensors, among them strain gages, accelerometers and lvdt’s.

KEYWORDS: STOOL, FPSO, TOPSIDE INTERFACE

1. INTRODUÇÃO

Esta proposta de trabalho tem por objetivo fazer uma avaliação do sistema de suportação de módulos de produção e utilidades empregados em plataformas flutuantes do tipo navio e da sua metodologia de projeto, através da monitoração de esforços sobre as estruturas de apoio dos módulos sobre o convés (“*stools*”). Será objeto de estudo a plataforma de produção P-53 da PETROBRAS, hoje docada em Rio Grande, e que se encontra em fase final de construção. A mesma irá operar sob as condições ambientais da Bacia de Campos (Rio de Janeiro).

2. JUSTIFICATIVA

Estruturas flutuantes do tipo navio são comumente utilizadas para suportar a planta de processo ou outras facilidades de sistemas flutuantes de produção de petróleo (figura 1). Estes sistemas podem ser do tipo FPSO ou FSO (*Floating, Production, Storage and Offloading System* ou *Floating, Storage and Offloading System*), quando os tanques de carga do casco do navio são utilizados para armazenamento temporário do óleo produzido ou do tipo FPU (*Floating Production Unit*), caso da P-53, quando a única função do casco é ser o suporte flutuante da planta de processo.



Figura 1: FPSO P34 (Concepção similar à P-53).

Em algumas FPSO's ou FPU's com plantas modulares, a exemplo da P-53, os módulos são suportados em quatro pontos, dois fixos e dois deslizantes (figura 2). Estes últimos permitem deslocamentos somente na direção longitudinal do navio e têm essa configuração para minimizar a transferência de esforços horizontais devidos às deflexões do navio para as estruturas dos módulos (figura 3). Estas deflexões são devidas às condições de mar e aos carregamentos nos tanques de carga atuando na estrutura do navio (Krekel e Kaminski [1]). Porém, por diversas razões (pesos e coeficiente de atrito associados, ação das ondas sob as quais a embarcação se encontraria submetida, etc), há dúvidas quanto à ocorrência de deslocamentos relativos entre os módulos e seus suportes deslizantes. Estes deslocamentos,

quando restritos, acrescentam significativamente carga aos *stools*. Os módulos em operação podem alcançar mais de três mil toneladas, distribuídas em quatro pontos, como será mostrado adiante na tabela 1. Quando o comprimento de onda atinge valor igual ao comprimento da embarcação, tem-se o que se chama condição “*sagging*” (quando a posição das cristas coincide com as extremidades do navio ou plataforma) ou “*hogging*” (quando se tem uma crista à meia-nau) – Vide figura 4 (UKOOA [3]). Este efeito associado ao comprimento do vão entre os pés dos módulos tem forte influência sobre a carga em todos os *stools*. As figuras de 5 a 7 mostram detalhes dos *stools* fixos e deslizantes da P-53 (Petrobras [2]).

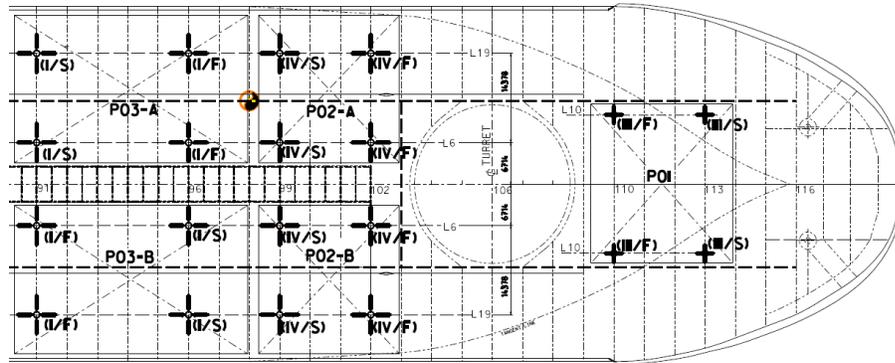


Figura 2: Arranjo dos *stools* sobre convés – meia-nau à proa (/S: deslizante; /F: fixo).



Figura 3: Módulo (Unidade Pré-Montada)

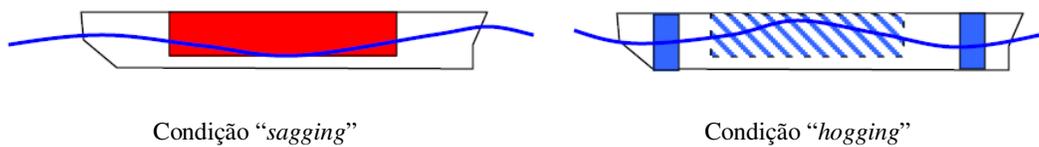


Figura 4: Deflexão da viga navio associada ao comprimento de onda.

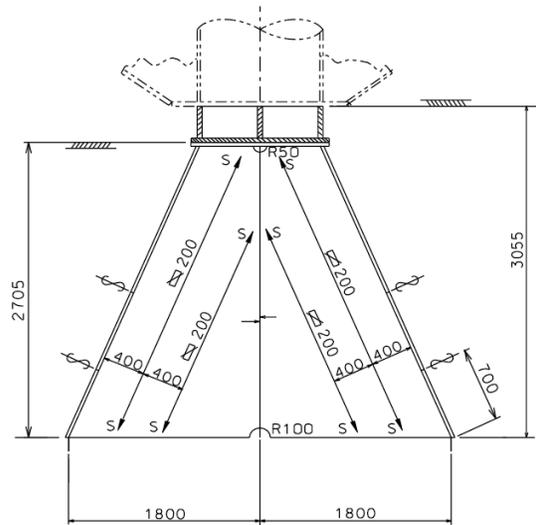


Figura 5: *Stool* (tipo fixo). Dimensões principais do *stool* da P-53.

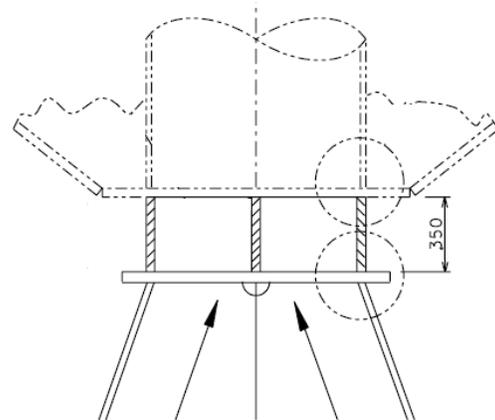


Figura 6: Detalhe do topo do *stool* do tipo fixo.

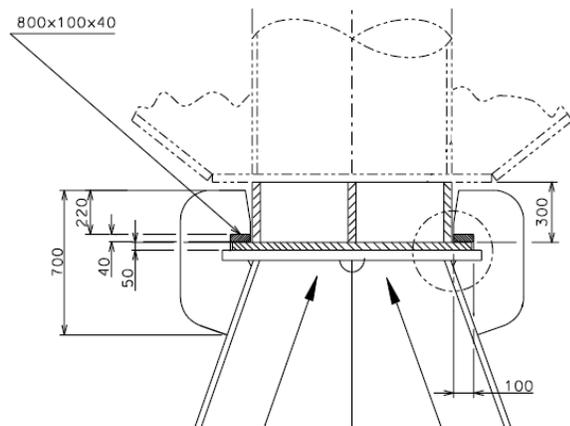


Figura 7: Detalhe do topo do *stool* do tipo deslizante.

Outro ponto de interesse está relacionado aos apoios fixos. Em princípio, a estrutura do módulo está livre para girar sobre o apoio após o seu içamento e antes da sua ligação por solda com o topo do *stool*. Sendo assim, nessa condição não ocorreria transferência de momentos devidos às cargas de içamento para o topo dos *stools*. Só haveria transferência de momentos devidos às cargas que aparecerão após a execução da ligação soldada, ou seja, as cargas de itens acrescentados aos módulos após a sua instalação, as devidas aos líquidos nos equipamentos e as devidas às acelerações do módulo em decorrência das ações ambientais sobre a embarcação. Vide esquema a seguir (figura 8), onde W_d é o peso seco do módulo e W_l o peso referido aos fluidos que será acrescido ao módulo somente após início da operação. Nele está resumido o modelo de cálculo adotado para o projeto da P-53 e a nova proposta que se pretende validar.

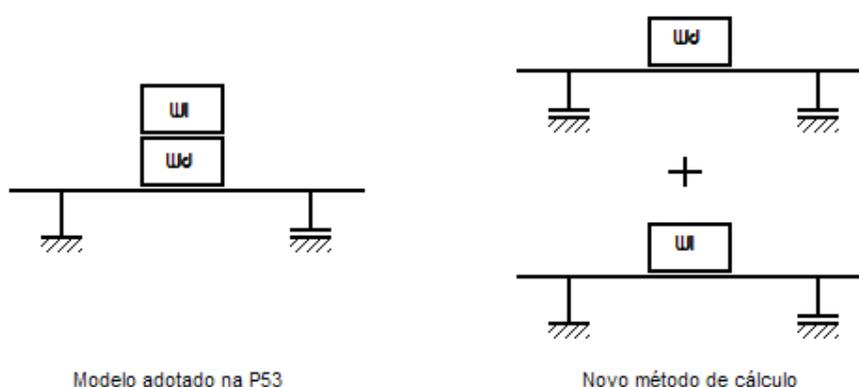


Figura 8: Comparação entre o método adotado para o projeto P-53 e a nova proposta.

As respostas às dúvidas apresentadas são de interesse do projeto estrutural dos módulos para validar o uso desta configuração para suportação de módulos e da metodologia de cálculo de esforços aplicada a eles, ou mesmo para propor uma revisão do uso desta em futuros projetos.

3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada tem as seguintes etapas:

1. Implementação de modelos para simulação: quantificação dos esforços e deslocamentos previstos, com os dados de projeto e a partir de modelos implementados, numérico e físico, dos *stools*;
2. Montagem do sistema de aquisição de dados: especificação dos requisitos que o sistema que deverá atender, testes de validação e, por fim, instalação na embarcação. Esta deverá ocorrer em duas fases: estática (após o assentamento dos módulos ainda no estaleiro), e dinâmica (em operação, sob as condições ambientais na Baía de Campos);

O estudo é restrito a alguns módulos da plataforma: P03A/B (Separação de óleo) e P06 (Utilidades) – em destaque na figura 9. No que diz respeito à análise de esforços nos *stools* fixos, estes são mais interessantes pois apresentam maior peso e maior relação entre peso em operação e peso seco – $(W_d + W_l)/W_d$ (aproximadamente 1,3 para o P06 e 1,5 para o P03), como mostra a tabela 1 (Petrobras [2]). No que se refere aos deslocamentos relativos entre módulo e *stools* deslizantes, os módulos escolhidos apresentam maior vão entre *stools* (30m para o P06 e 25m para o P03), como mostra a tabela 2 (Petrobras [2]). Apesar da expectativa da ocorrência dos maiores deslocamentos por unidade de comprimento à meia-nau, a previsão nos documentos de projeto da P-53 é de que o P06 apresente os maiores deslocamentos (aproximadamente 20mm), seguido do P03 (aproximadamente 18mm). Estes deslocamentos são estimados para comprimentos de onda iguais ao comprimento da embarcação (ondas com período de 15 segundos, correspondendo a comprimentos superiores a 350m).

Tabela 1: Pesos dos módulos da P-53 (*peso bruto, **não disponível).

Módulo	Peso Seco* (mt)	Peso em Operação* (mt)
P01	1315	1419
P02A	417	445
P02B	421	508
P03A	2139	3217
P03B	2092	3137
P04A	1500	**
P04B	1500	**
P05A	1520	**
P05B	1520	**
P06	1861	2517
P07	1326	1908
P08	1186	1188

Tabela 2: Comprimento de vão entre pés e deslocamentos previstos.

Módulo	Vão entre pés [m]	Deslocamento previsto [mm]	Deslocamento por unidade de comprimento [$\mu\text{m}/\text{m}$]
P03A/B	25	18,4	736
P04A/B	20	15,2	761
P06	30	20,5	666

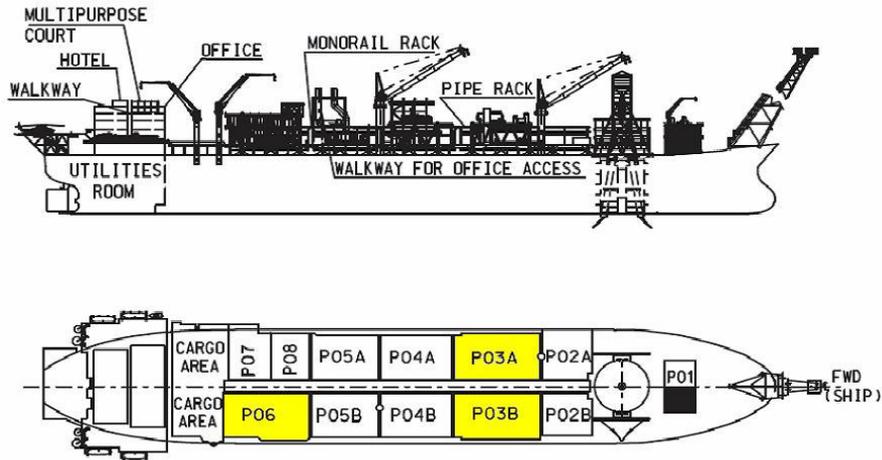


Figura 9: Arranjo geral dos módulos sobre o convés da P-53 (destaque para os módulos sob monitoramento).

4. PROJETO E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ESFORÇOS

Para estes módulos, foram instalados 4 extensômetros por *stool*, um por flange, totalizando 48 pontos de medição de deformação (16 por módulo) – Vide figura 10. Os pontos escolhidos não coincidem com aqueles apontados pela simulação numérica como os mais solicitados. Como esses pontos se “movem” em função da direção instantânea da resultante dos esforços, a localização desses é indefinida ao longo do tempo, o que foi verificado nas simulações.

Através das medições sob os pontos escolhidos pretende-se além de quantificar a tensão atuante na região sob o extensômetro, quantificar também os esforços atuantes (componentes ortogonais e direção da resultante) que irão realimentar os modelos numéricos para extrapolação dos resultados. O número de pontos também ficou restrito aos recursos materiais e número de canais do sistema de aquisição de dados disponíveis.

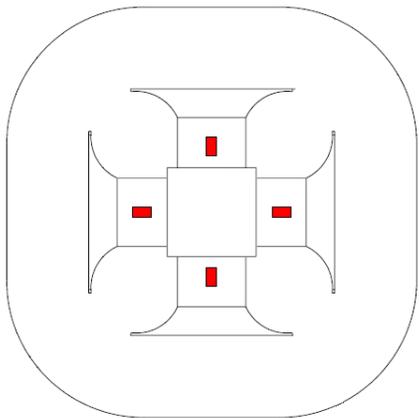


Figura 10: Vista de planta de um *stool*. Em destaque, a posição dos extensômetros.



Figura 11: Foto do *stool* com os extensômetros instalados.

4.1. Instalação dos extensômetros

Para a instalação dos extensômetros foram observados procedimentos dos fabricantes em especial no que diz respeito às condições ambientais para a colagem. A instalação dos extensômetros aconteceu nos meses de novembro e dezembro de 2007, antes do içamento dos módulos de interesse (P03A/B e P06).

4.2. Proteção dos extensômetros

Após a colagem, testes e calibração, os extensômetros (figura 7) receberam uma camada de isolante líquido, a qual conferiu às superfícies isolamento elétrico e impermeabilização. Para dar proteção mecânica foi aplicada uma camada de resina epóxi de secagem rápida (figura 8). A montagem toda foi coberta com caixa plástica (figura 9), de material resistente às condições ambientais e compatível com a cola que a fixou na superfície (pintada) do *stool*. Os espaços vazios entre o extensômetro e extremidade do cabo sob as camadas de isolante e resina epóxi e a caixa plástica foram preenchidas com espuma de poliuretano, que incrementou a fixação da própria caixa (pela sua propriedade adesiva), impermeabilização e proteção contra o acúmulo de poeira ou líquidos. Além disso, no entorno da caixa foi aplicada borracha de poliuretano fazendo a selagem da mesma.

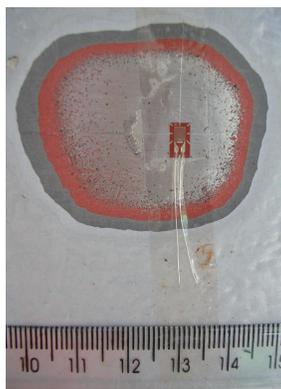


Fig. 7: Extensômetro de 5mm



Fig. 8: Isolação e proteção mecânica



Fig. 9: Proteção adicional e acabamento (caixa 80 x 80 mm)

4.3. Preservação

A preservação dos equipamentos já instalados é outro ponto de preocupação. O ambiente com plena atividade de montagem ameaça a integridade especialmente de cabos. Ações estão sendo implementadas no sentido de se evitar ou reduzir a probabilidade de ocorrência. Nas extremidades dos cabos, os conectores (machos) receberam um conector fêmea além de serem ensacados para incrementar a proteção contra oxidação e umidade. Os cabos enrolados e ensacados foram pendurados em ganchos colados na parte posterior dos flanges.

4.4. Realização das Medições

O período de içamento dos módulos de interesse compreendeu o final do mês de novembro e final do mês de dezembro de 2007. Os resultados que serão apresentados a seguir dizem respeito ao assentamento de uma de três partes do módulo P03A – Separador de Óleo. Este aconteceu em 28/11/2007 e o peso medido por uma empresa especializada foi de 1400ton.

Estas medições foram realizadas com o objetivo de observar o comportamento das estruturas dos *stools* sob o impacto dos módulos. Durante a realização das medições foram encontradas dificuldades com a qualidade do sinal, o qual apresentou grande quantidade de ruído que, somada às baixas amplitudes das deformações, prejudicaram a qualidade da informação. Os gráficos que são apresentados a seguir (figuras de 12 a 16), revelam o comportamento das estruturas dos *stools* do módulo P03A – Separação de Óleo, durante o seu assentamento. Observa-se a presença de ruído acentuado (chegando à saturação) e desvio em relação ao zero (tara). Embora os dados nessa condição (sem tratamento) não ofereçam exatidão, é possível concluir que as deformações sob os pontos analisados em nenhum deles superam $-100\mu\text{m/m}$.

A sistemática de identificação dos extensômetros (canais de aquisição) é mostrada a seguir na figura 10.

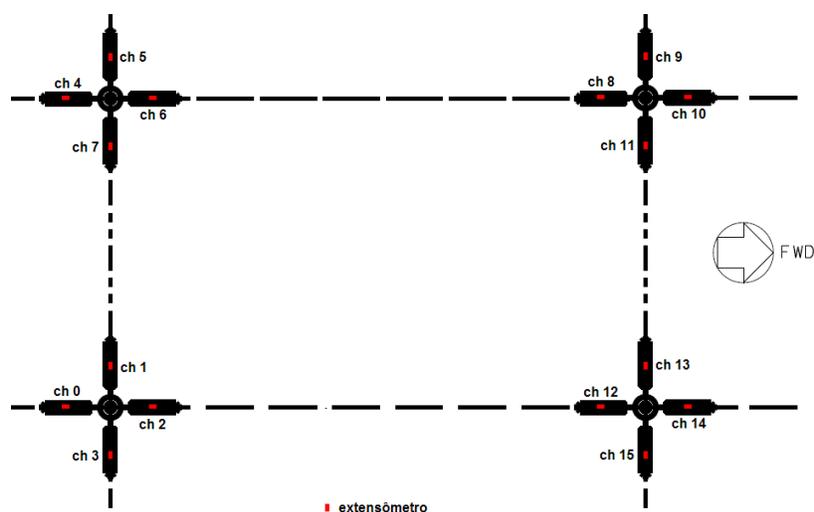


Figura 10: Sistemática de identificação dos extensômetros (canais de aquisição)

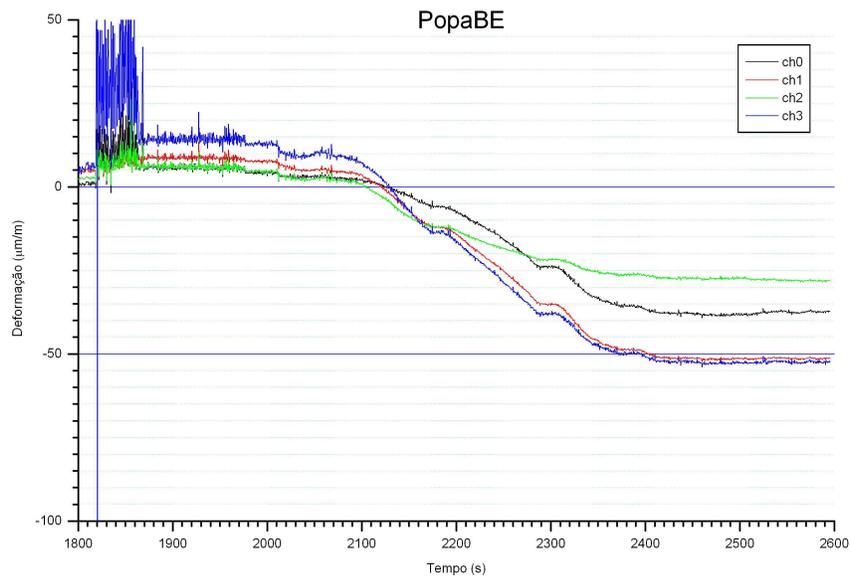


Figura 11: Extensômetros do P03A – *Stool* posição popa-boreste

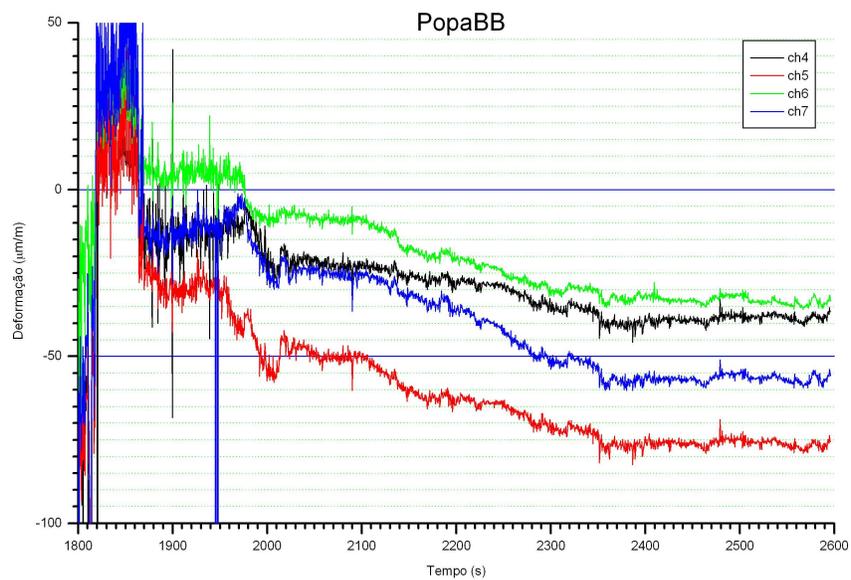


Figura 12: Extensômetros do P03A – *Stool* posição popa-bombordo

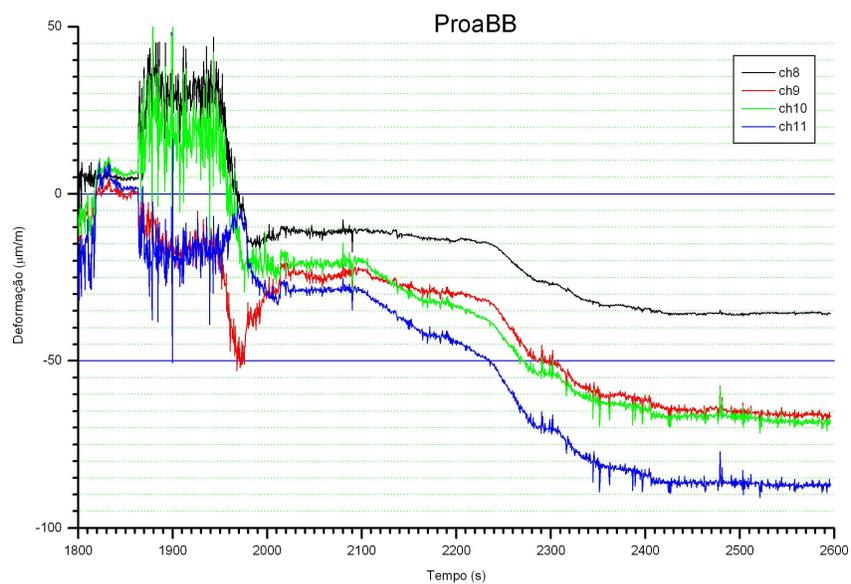


Figura 13: Extensômetros do P03A – *Stool* posição proa-bombordo

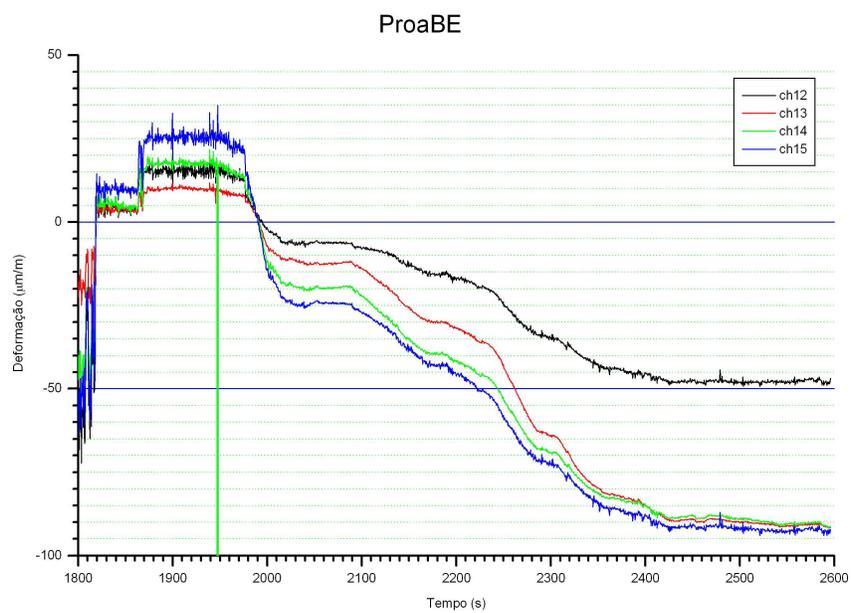


Figura 14: Extensômetros do P03A – *Stool* posição proa-boreste

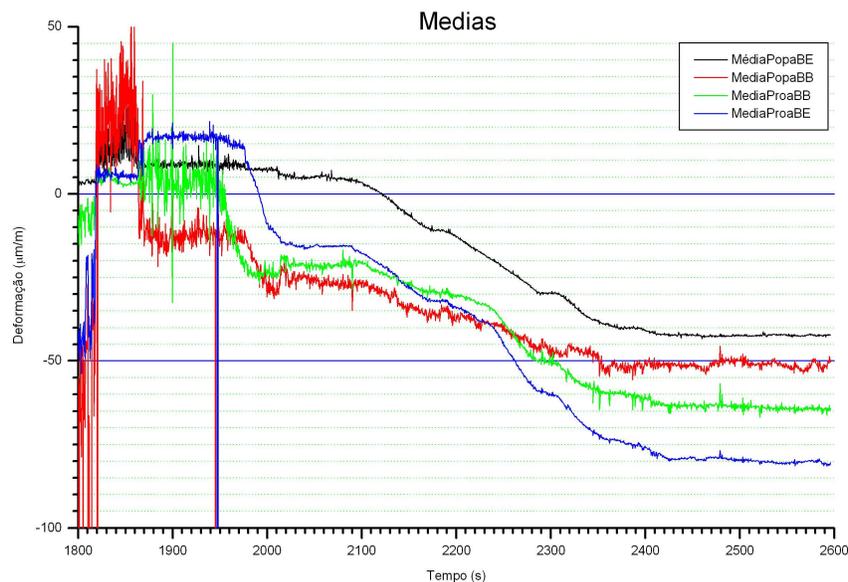


Figura 15: Médias das deformações por *stool* no módulo P03A

O nível de completção dos módulos no momento da medição foi estimado (entre 85 e 90%) com base nos relatórios de avanço da obra, sendo possível estimar o acréscimo de carga devido a equipamentos e tubulações a serem ainda instalados até o fim da construção. Os relatórios dimensionais e de pesagem disponíveis serão utilizados para analisar os resultados obtidos em cada um dos pontos de medição.

Do modo como se apresentam os dados, pouco pode se concluir além das deformações medidas sob os extensômetros, a partir das quais se pôde observar valores bastante baixos. Maiores conclusões só serão possíveis a partir da simulação numérica dos modelos com as correções implementadas e dos resultados a serem obtidos experimentalmente dos modelos físicos específicos de cada *stool* (total de 8).

Após o içamento das últimas partes dos módulos de interesse deste projeto, foram realizadas novas medições (estáticas) em todos eles. Nesta data as cargas também foram diferentes pois aos mesmos foram acrescentadas partes que não foram içadas na oportunidade da primeira medição (dinâmica). A medição estática teve por objetivo se conhecer o nível de carregamento antes das soldagens dos *stools* fixos.

5. CONCLUSÃO

O trabalho segue com a conclusão da fabricação dos modelos físicos e do dispositivo para ensaios dos mesmos (carga normal e transversal). Está em andamento também a especificação de seis sensores de deslocamento e do sistema de aquisição de dados que acompanhará a plataforma no mar, para otimização dos trabalhos a bordo (com possibilidade de monitoramento remoto), além de atender o aumento na demanda de canais, que deverá ser

acrescida por 9 acelerômetros (três por módulo) e mais extensômetros nas estruturas dos módulos (vigas longitudinais, 2 por módulo). Instalados até a data são 48 extensômetros e até a saída da plataforma serão mais 21 sensores (extensômetros, lvdts e acelerômetros), totalizando 69 canais de aquisição.

A preservação dos equipamentos já instalados é outro ponto de preocupação. Ações estão sendo implementadas no sentido de se evitar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de danos.

As medições dinâmicas, oportunidade na qual serão quantificados os efeitos associados ao acréscimo de peso devido à presença de líquidos nos equipamentos e às acelerações dos módulos em decorrência das ações ambientais sobre a embarcação, terão início após a ancoragem da plataforma no campo de Marlim Leste, na Bacia de Campos, na costa Rio de Janeiro.

REFERÊNCIAS

1. KREKEL, M.H.; KAMINSKI, M.L.: *“FPSO's: Design Considerations for the Structural Interface Hull and Topsides”*, Offshore Technology Conference – OTC 2002;
2. PETROBRAS: Documentação de Projeto P-53 (Acesso Restrito), 2007;
3. UNITED KINGDOM OFFSHORE OPERATORS ASSOCIATION – UKOOA: *“FPSO Design Guidance Notes for UKCS Service”*; março 2002.