

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS
RELATIVOS NAS ESTRUTURAS DE SUPORTE DE PLANTAS DE
PROCESSO MODULARES EM UNIDADES FLUTUANTES DE
PRODUÇÃO DE PETRÓLEO DO TIPO FPSO**

WAGNER MESPAQUE PINTO

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Paulo Roberto Teixeira, Dr;
Co-orientador: Vitor José Frainer, Dr.

Rio Grande, dezembro de 2010.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Vitor Frainer e Paulo Teixeira pela motivação, apoio e orientação aplicados no desenvolvimento deste trabalho;

Ao Eng. Edmilson Soares de Medeiros, na época Gerente de Construção e Montagem da P-53, pelo incentivo e todo suporte para o desenvolvimento desta pesquisa;

Aos bolsistas: Rubilar Gonzales, Douglas Grando, Fernando da Costa, Maurício Vieira, Antônio Marcos Santana Jr, Jeferson Souto, Cauê Ribeiro, Vagner Köhler, Michael Douglas e Fabiano Bárbara, pela dedicação nas atividades do projeto;

À PETROBRAS, pelo apoio financeiro e humano através dos diversos profissionais que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

RESUMO

Os projetos mais recentes de plataformas do tipo FPSO da PETROBRAS utilizam plantas modulares sobre cascos convertidos de mais de 300m de comprimento. Os módulos podem atingir 2.000t (peso seco) e mais de 3.000t em operação, sendo suportados em quatro pontos por estruturas chamadas *stools*. No projeto da P-53, para cada módulo há dois *stools* deslizantes (os quais permitem deslocamentos longitudinais, paralelos ao eixo da embarcação), e dois fixos (com restrição de movimentos em todas as direções), cada par em transversais distintas. Teoricamente, os *stools* deslizantes são empregados para evitar que os efeitos das deflexões do casco da plataforma induzam esforços nas estruturas dos módulos. As dúvidas a respeito da eficiência deste mecanismo para essa configuração de suportação de módulos motivaram a realização deste trabalho, cujo objetivo é analisar e compreender o comportamento estrutural dos apoios dos módulos (*stools*) da plataforma P-53. Para se obter estas respostas, foi desenvolvido um projeto de pesquisa na FURG com apoio da PETROBRAS, o qual mobilizou três pesquisadores e dez bolsistas, durante 3 anos e meio. Um sistema de aquisição de dados foi especialmente implementado, e através deste foram monitoradas deformações e deslocamentos relativos sobre esses *stools*. No total foram instalados na plataforma 75 sensores (entre extensômetros, transdutores de deslocamento e acelerômetros). Foram realizadas medições durante o assentamento dos módulos sobre a embarcação ainda no estaleiro, e na locação final, submetida às condições ambientais da Bacia de Campos. Nas condições em que foi realizado o monitoramento, não foram registrados deslocamentos relativos entre os *stools* deslizantes e os pés dos módulos durante todo o período de observação. A não ocorrência de deslizamento pode ser justificada pelo elevado peso dos módulos, alto coeficiente de atrito, e as características das ondas sob as quais a embarcação foi submetida. Nestas condições, a ocorrência de deslocamentos relativos é mais provável para módulos mais leves, e improvável, ou até impossível, para módulos mais pesados. Mesmo assim não foram registrados níveis de deformações que pudessem indicar um incremento relevante de carga sobre as estruturas dos *stools* e dos módulos.

Palavras-chave: FPSO, FPU, STOOL, INTERAÇÃO CASCO MÓDULOS

ABSTRACT

The most recent PETROBRAS FPSO projects used modular process plants on converted vessels with more than 300m length. The modules may reach 2,000t (dry) and more than 3,000t on operation, being supported by four points on structures called stools. In the P-53 design, there are two sliding stools (that allow longitudinal displacements, parallel to vessel axis), and two fixed stools (that restrict the displacement in all directions), each pair is at different transversal frames on the hull. In theory, the sliding stools are employed to avoid that the hull deflections induce deformation on the module's structures. The doubts about the efficiency of this apparatus for this support configuration of modules motivated the development of this research, which aim is analyze and understand the structural behavior of the module's supports. To get these answers, it was developed a research in FURG with support of PETROBRAS, which mobilized three researchers and ten students, during three and a half year. A data acquisition system was specially implemented to attend this goal, through that was monitored strain and relative displacements on these stools. A total of 75 sensors (among them strain gages, displacement transducer and accelerometers) was installed on the platform. It was taken measurements during the installation of the modules upon the hull at the shipyard, and at the final location, under the environmental conditions of Campos Basin. In these conditions where the monitoring was done, no relative displacement among the sliding stools and module's pads was recorded throughout the observation period. The non-occurrence of sliding can be justified by the high weight of the modules and high coefficient of friction, and by the environmental conditions under that the vessel was subjected. On these conditions, the occurrence of relative displacements is more probable to lighter modules, and improbable, even impossible to heavier ones. Despite that, it was not recorded strain levels that could indicate a relevant load increasing on the structures of modules or stools.

Keywords: FPSO, FPU, STOOL, HULL TOPSIDE INTERFACE.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SÍMBOLOS	15
LISTA DE ABREVIATURAS	16
1. INTRODUÇÃO	17
2. SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE	23
2.1. PLATAFORMAS FIXAS	23
2.2. PLATAFORMAS AUTO-ELEVÁVEIS	25
2.3. PLATAFORMAS SEMI-SUBMERSÍVEIS	25
2.4. PLATAFORMAS DE PERNAS ATIRANTADAS (<i>TENSION-LEG PLATAFORM – TLP</i>)	26
2.5. PLATAFORMAS SPAR	27
2.6. PLATAFORMAS FPSO	29
2.7. A PLATAFORMA P-53	32
3. CONFIGURAÇÕES PARA SUPORTAÇÃO DE PLANTAS DE PROCESSO EM PLATAFORMAS DO TIPO FPSO	35
3.1. SOLUÇÕES PARA SUPORTAÇÃO DE PLANTAS MODULARES	37
3.1.1. SUPORTES TRELIÇADOS	37
3.1.2. <i>STOOLS</i>	38
3.1.3. VIGA TRANSVERSAL	40
3.2. PROJETO DOS <i>STOOLS</i> DA P-53	41
4. ESFORÇOS SOBRE PLATAFORMAS DO TIPO FPSO	44
4.1. CLASSIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS	46
4.1.1. ESFORÇOS LONGITUDINAIS	46
4.1.1.1. ESFORÇOS LONGITUDINAIS DEVIDOS À AÇÃO DAS ONDAS ..	46
4.1.1.2. ESFORÇOS DEVIDOS À DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DE PESO ..	47

4.1.1.3. EMBARCAÇÃO PARCIALMENTE PRESA POR ENCALHE	48
4.1.2. ESFORÇOS TRANSVERSAIS	48
4.1.2.1. ESFORÇOS TRANSVERSAIS DEVIDOS À AÇÃO DAS ONDAS ...	48
4.1.2.2. ESFORÇOS POR EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA NOS COMPARTIMENTOS DA EMBARCAÇÃO	49
4.1.3. ESFORÇOS LOCAIS	50
4.2. INTERAÇÃO CASCO-MÓDULOS EM FPSO'S	50
5. METODOLOGIA	52
5.1. PROJETO E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS	54
5.1.1. INSTALAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS	54
5.1.2. INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO	57
5.1.3. INSTALAÇÃO DOS ACELERÔMETROS	57
5.1.4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	58
6. RESULTADOS	61
6.1. MEDIÇÕES DURANTE O ASSENTAMENTO DOS MÓDULOS	62
6.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	64
6.3. MEDIÇÕES DINÂMICAS NA LOCAÇÃO DEFINITIVA	66
7. CONCLUSÕES	80
ANEXO A: DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE	
DE ATRITO	83
A.1. OBJETIVO	83
A.2. METODOLOGIA	83
A.3. RESULTADOS	85
A.3.1. ENSAIO COM CHAPAS COM ACABAMENTO DE LAMINAÇÃO	86
A.3.2. ENSAIO COM CHAPAS COM ACABAMENTO LIXADO	87
A.4. CONCLUSÃO	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Evolução no tempo do número de unidades de produção de petróleo por tipo.....	18
Figura 1.2:	Distribuição da frota mundial de FPSO's.....	19
Figura 1.3:	Evolução do tamanho da planta de processo em FPSO's (P-34, P-35 e P-50).....	20
Figura 2.1:	Tipos de sistemas de produção <i>offshore</i>	23
Figura 2.2:	Plataforma fixa Pampo (Bacia de Campos).....	24
Figura 2.3:	Jaqueta (Plataforma de Mexilhão, Bacia de Santos)	24
Figura 2.4:	Plataforma auto-elevável P-6 (Litoral de Sergipe)	25
Figura 2.5:	Plataforma semi-submersível P-52 (Bacia de Campos)	26
Figura 2.6:	Esquema de ancoragem da TLP	27
Figura 2.7:	TLP Mars (Golfo do México).....	27
Figura 2.8:	Plataforma SPAR Gênesis (Golfo do México).....	28
Figura 2.9:	Estrutura de flutuação da plataforma SPAR (Gênesis).	28
Figura 2.10:	FPSO P-54 (Bacia de Campos).	29
Figura 2.11:	FPSO Girassol (Angola).....	30
Figura 2.12:	Operação de alívio da FPSO P-50 para navio petroleiro.....	30
Figura 2.13:	Ancoragem distribuída.	31
Figura 2.14:	Ancoragem em ponto único.....	31
Figura 2.15:	Navio Settebello	32
Figura 2.16:	Plataforma P-53	32
Figura 2.17:	Localização de operação da P-53	32
Figura 2.18:	Sistema de ancoragem da P-53.....	33
Figura 2.19:	Turret em corte.	33
Figura 2.20:	Arranjo submarino sob a P-53 e plano de escoamento.....	34
Figura 3.1:	Estrado metálico ou <i>pancake</i> (P-34).....	35

Figura 3.2:	Arranjo modularizado da planta de processo da P-53.	36
Figura 3.3:	Módulo (unidade pré-montada)	36
Figura 3.4:	Operação de içamento de um módulo (P-53)	37
Figura 3.5:	Suportes treliçados sob o módulo içado.	38
Figura 3.6:	<i>Stool</i> deslizante da plataforma P-54.	39
Figura 3.7:	Sistema de suportaço adotaado na FPSO-BR.	39
Figura 3.8:	Suportaço com viga transversal (Plataforma Aoka Mizu, Reino Unido)	40
Figura 3.9:	Comportamento do sistema de suportaço do tipo viga transversal sob deflexão da viga navio.	40
Figura 3.10:	Detalhe do topo do <i>stool</i> do tipo fixo da plataforma P-53.....	41
Figura 3.11:	Detalhe do topo do <i>stool</i> do tipo deslizante da plataforma P-53	41
Figura 3.12:	Identificação dos elementos estruturais dos <i>stools</i> da P-53.....	42
Figura 3.13:	<i>Stool</i> deslizante da plataforma P-53	42
Figura 4.1:	Ação do empuxo sobre o casco de uma embarcação.....	44
Figura 4.2:	Viga navio entre duas cristas de onda (condição chamada tosamento ou “ <i>sagging</i> ”)	45
Figura 4.3:	Viga navio com crista de onda à meia nau (condição chamada alquebramento ou “ <i>hogging</i> ”).....	45
Figura 4.4:	Deformação longitudinal da viga navio: $(L_1-L_0)/L_0$	45
Figura 4.5:	Esforços devidos à distribuição desigual de peso.....	47
Figura 4.6:	Viga navio (seção transversal) sob ação de ondas na direção transversal.....	49
Figura 4.7:	Efeitos devidos à má distribuição de carga nos compartimentos estruturais.	49
Figura 4.8:	Embarcação em seco.	50
Figura 5.1:	Vista de planta de um <i>stool</i> , com destaque para a posição dos extensômetros.....	55
Figura 5.2:	Foto de um <i>stool</i> com extensômetros instalados	55
Figura 5.3(a):	Instalação e proteção dos extensômetros: Extensômetro de 5mm	55
Figura 5.3(b):	Instalação e proteção dos extensômetros: Isolação e proteção mecânica.....	55
Figura 5.3(c):	Instalação e proteção dos extensômetros: Proteção adicional e acabamento	55
Figura 5.4:	Sistemática de identificação dos extensômetros.....	56
Figura 5.5:	Transdutor de deslocamento tipo LVDT	57
Figura 5.6:	Instalação do LVDT em um <i>stool</i> deslizante.....	57

Figura 5.7:	Instalação dos acelerômetros	58
Figura 5.8:	Configuração da rede de transmissão de sinais até o sistema de aquisição de dados	59
Figura 5.9:	Localização da caixa de interligação dos sensores (amplificadores).....	59
Figura 5.10:	Instalação dos amplificadores / condicionadores de sinais	59
Figura 5.11:	Instalação do sistema de aquisição de dados na sala de painéis	60
Figura 5.12:	Sistema de aquisição de dados e supervisão.....	60
Figura 6.1:	Deformações nos flanges do <i>stool</i> posição popa-boreste (P03A)	62
Figura 6.2:	Deformações nos flanges do <i>stool</i> posição popa-bombordo (P03A)	62
Figura 6.3:	Deformações nos flanges do <i>stool</i> posição proa-bombordo (P03A)	63
Figura 6.4:	Deformações nos flanges do <i>stool</i> posição proa-boreste (P03A)	63
Figura 6.5:	Médias das deformações por <i>stool</i> no módulo P03A	64
Figura 6.6:	Distribuição de tensões equivalentes para uma carga normal centrada de 12.600kN.	65
Figura 6.7:	Distribuição de deformações na linha transversal ao flange passando pela posição do extensômetro.	65
Figura 6.8:	Posição da plataforma P-53 em relação a outras unidades na Baía de Campos.	67
Figura 6.9:	Dados de altura significativa (H_s) e período (P) de ondas, nas locações de P-43 e P-50.....	68
Figura 6.10:	Deformações nos canais ch1 (danificado) e ch3 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).	70
Figura 6.11:	Deformações nos canais ch2 e ch4 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).	70
Figura 6.12:	Deformações nos canais ch5 e ch7 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).	70
Figura 6.13:	Deformações nos canais ch6 e ch8 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).	71
Figura 6.14:	Deformações nos canais ch9 e ch11 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).	71
Figura 6.15:	Deformações nos canais ch10 e ch12 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).	71

Figura 6.16:	Deformações nos canais ch13 e ch15 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).....	72
Figura 6.17:	Deformações nos canais ch14 (danificado) e ch16 do P03B (amostragem 258, de 25/9, 17h).....	72
Figura 6.18:	Deformações nos extensômetros das vigas longitudinais do módulo P03B - ch21 e ch22 (amostragem 258, de 25/9, 17h).....	72
Figura 6.19:	Modo de deformação do convés sob o módulo P03B e esforço axial sobre as vigas longitudinais do módulo (referido ao instante 1.055s da amostragem 258)	73
Figura 6.20:	Variação do sinal de saída dos acelerômetros (<i>pitch</i> e <i>roll</i>) - amostragem 258.....	74
Figura 6.21:	Deformações nos canais ch1 (danificado) e ch3 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	75
Figura 6.22:	Deformações nos canais ch2 e ch4 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	75
Figura 6.23:	Deformações nos canais ch5 e ch7 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	75
Figura 6.24:	Deformações nos canais ch6 e ch8 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	76
Figura 6.25:	Deformações nos canais ch9 e ch11 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	76
Figura 6.26:	Deformações nos canais ch10 e ch12 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	76
Figura 6.27:	Deformações nos canais ch13 e ch15 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	77
Figura 6.28:	Deformações nos canais ch14 (danificado) e ch16 do P03B (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	77
Figura 6.29:	Deformações nos extensômetros das vigas longitudinais do módulo P03B - ch21 e ch22 (amostragem 410, de 01/10, 1h).....	77
Figura 6.30:	Modo de deformação nos <i>stools</i> da transversal FR96, do P03B (referido ao instante 1.125s da amostragem 410).....	78
Figura 6.31:	Variação do sinal de saída dos acelerômetros (<i>pitch</i> e <i>roll</i>) - amostragem 410.....	79

Figura A.1:	Diagrama do corpo livre para o dispositivo de ensaio.....	84
Figura A.2:	Célula de carga.	85
Figura A.3:	Posicionamento da chapa móvel sobre uma das superfícies fixas.....	85
Figura A.4:	Fechamento das superfícies a serem atritadas.	85
Figura A.5:	Dispositivo fechado e em funcionamento em uma prensa hidráulica.	85
Figura A.6:	Aspecto das chapas na condição como laminada (levemente oxidadas).....	86
Figura A.7:	Gráfico referente ao ensaio sobre as chapas na condição como laminada.	86
Figura A.8:	Aspecto das chapas com acabamento de lixamento.(grosseiro).....	87
Figura A.9:	Gráfico referente ao 1º ensaio sobre as chapas na condição lixada.....	88
Figura A.10:	Gráfico referente ao 2º ensaio sobre as chapas na condição lixada.....	88
Figura A.11:	Gráfico referente ao 3º ensaio sobre as chapas na condição lixada.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1:	Espessuras dos elementos estruturais dos <i>stools</i> do módulo P03A/B	43
Tabela 5.1:	Massa de alguns módulos da P-53.....	52
Tabela 5.2:	Comprimento de vão entre pés e deslocamentos previstos	53

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>bpd</i>	Barris por dia	33
<i>ch1</i>	Canal de aquisição de dados nº 1	56
<i>FR91</i>	Caverna (frame, estrutura transversal do casco) nº 91.....	56
<i>L6</i>	Longitudinal nº 6	56
<i>Hs</i>	Altura significativa (da onda)	68
<i>P</i>	Período (da onda).....	68
<i>F_p</i>	Força aplicada pela prensa <i>Z</i> ₁	84
<i>F_a</i>	Força de atrito	84
<i>F_n</i>	Força normal à superfície	84
<i>μ</i>	Coeficiente de atrito.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS

FPSO	<i>Floating Production, Storage and Offloading System</i>	17
FSO	<i>Floating Storage and Offloading System</i>	17
FPU	<i>Floating Production Unit</i>	17
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.....	17
UN-RIO	Unidade de Negócio de Exploração do Rio de Janeiro.....	19
ST	Suporte Técnico	19
EISA	Engenharia de Instalações de Superfície e Automação	19
FURG	Universidade Federal do Rio Grande.....	21
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>	26
UKOOA	<i>United Kingdom Offshore Operators Association</i>	38
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello	52
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>	57
BE	Boreste	62
BB	Bombordo	62
OCEANOP	Serviço de Monitoramento Oceanográfico da PETROBRAS	67

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo analisar e compreender o comportamento das estruturas de suporte de plantas de processo sobre plataformas de produção de petróleo do tipo navio. Esta análise diz respeito especificamente à configuração de suportação de módulos em quatro pontos sobre colunas às quais dá-se o nome de *stools* (“banqueta”, em inglês). A plataforma na qual se desenvolveu este estudo é a P-53, da PETROBRAS, que hoje opera na Bacia de Campos, costa do Rio de Janeiro.

Estruturas flutuantes do tipo navio são comumente utilizadas para suportar a planta de processo ou outras facilidades de sistemas flutuantes de produção de petróleo. Estes sistemas podem ser do tipo FPSO (Sistema Flutuante de Produção, Armazenamento e Descarregamento, sigla do inglês *Floating, Production, Storage and Offloading System*); ou FSO (Sistema Flutuante de Armazenamento e Descarregamento, do inglês *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 (Unidade Flutuante de Produção, do inglês *Floating Production Unit*), quando a única função do casco é ser o suporte flutuante das facilidades de produção.

Estas unidades têm como principais vantagens:

- grande área de convés;
- custo pouco sensível à variação de profundidade;
- ideal para regiões sem infra-estrutura como oleodutos ou unidades flutuantes de armazenamento e alívio;
- possibilidade de remoção e realocação.

Por essas razões este tipo de unidade é especialmente atraente para os campos de produção brasileiros. Segundo o Anuário Estatístico da ANP publicado em 2009, as reservas provadas de petróleo somam aproximadamente 12,8 bilhões de barris, e deram ao País a 16ª posição no ranking mundial de reservas em 2008. Das reservas provadas nacionais, 93% se

localizam em mar, com destaque para o Rio de Janeiro (que detém 80,7% das reservas provadas *offshore*).

Das quase 260 unidades flutuantes de produção de petróleo operando no mundo entre todos os tipos, 166 (64%) são do tipo FPSO, das quais 33 unidades operam em campos nacionais, sendo o Brasil o país que concentra o maior número delas. Da frota mundial de FPSO's, 63% são plataformas construídas a partir de navios convertidos, sendo os demais 37% projetos especialmente executados para esse fim (*Offshore Magazine*, 2009).

A Figura 1.1 ilustra o crescimento e projeção do número de unidades flutuantes de produção de petróleo entre todos os tipos, onde se percebe a ampla preferência por unidades do tipo FPSO. A Figura 1.2 apresenta a distribuição da frota mundial destas unidades.

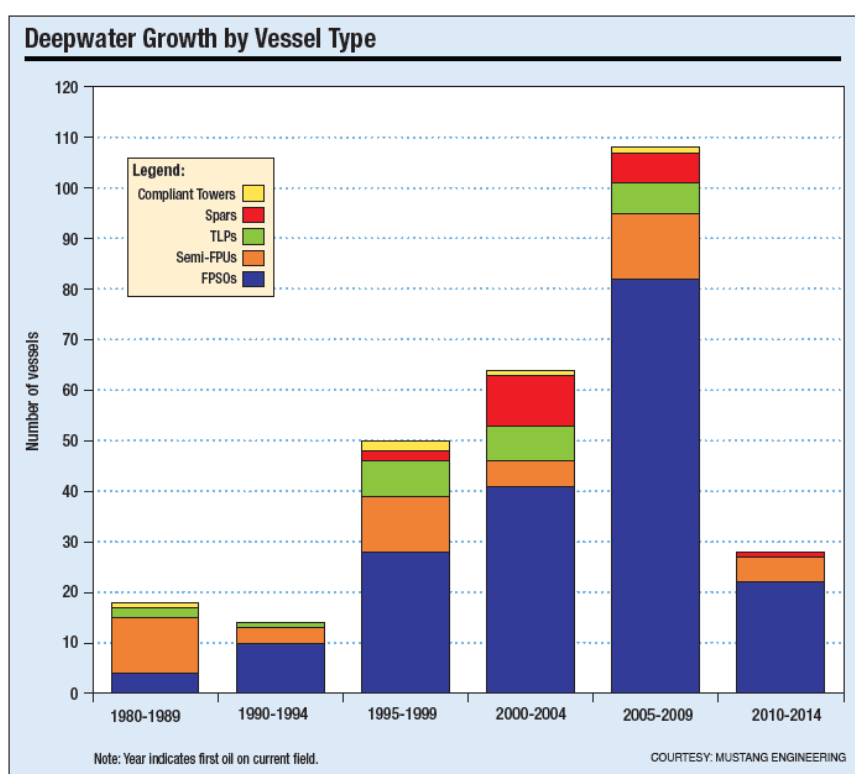


Figura 1.1 – Evolução no tempo do número de unidades de produção de petróleo por tipo

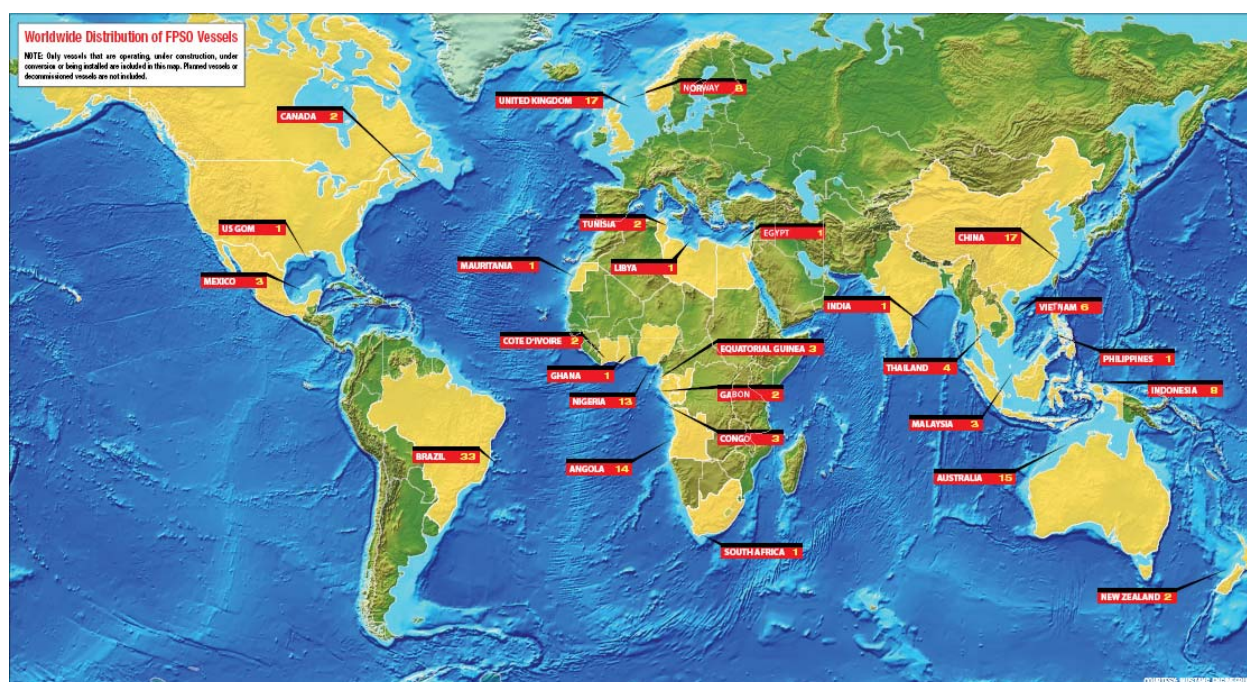


Figura 1.2 – Distribuição da frota mundial de FPSO's

A PETROBRAS iniciou o uso de plataformas tipo navio para produção *offshore* em 1979, com a plataforma Presidente Prudente de Moraes (posteriormente reformada e renomeada como P-34), com uma capacidade nominal de 60.000 barris por dia (Henriques e Brandão, 2007). Nos primeiros projetos a planta de processo era edificada diretamente sobre estrados metálicos, suportados sobre o convés da embarcação por 16 ou 20 apoios, caso da P-34. Com a extensão do uso de FPSO's não mais apenas como plataformas de produção antecipada (empregadas no desenvolvimento inicial de campos de produção de petróleo), veio o crescimento do tamanho das plantas de processo.

A partir daí passou a ser experimentado o conceito de modularização, o qual permitiria a divisão de toda a construção por diferentes contratadas, trabalhando em paralelo em diferentes estaleiros, diminuindo o prazo de conclusão. Com esse conceito foi também implementada uma nova solução para suportação dos módulos através de colunas (cuja forma lembra uma pirâmide) chamadas *stools*. Na gera o de FPSO's, representada pelos projetos P-37 (2000), P-43 e P-48 (2004), cada módulo era suportado por 6 *stools* (PETROBRAS/UN-RIO/ST/EISA, 2005). Projetos mais recentes como P-50 (2006), P-54 (2007) e P-53 (2008), os módulos dessas plataformas de capacidade nominal de 180.000 barris por dia (o triplo da P.P.Moraes de 1979), utilizam 4 apoios apenas, com objetivo de diminuir a obstru o no convés com vistas aos sistemas de segurança.

Os maiores FPSO's do mundo têm capacidade nominal de mais de 200.000 barris por dia (*Offshore Magazine*, 2009), e a planta de processo pode exceder 25.000 toneladas (Terpstra e MacMillan, 2001). Com o crescimento das plantas também cresceram em tamanho os módulos. Os módulos mais pesados da P-37 não chegavam a 800 toneladas enquanto o módulo mais pesado da P-53 ultrapassa 2.000 toneladas (peso seco). A Figura 1.3 ilustra o crescimento da planta de processo, comparando P-50, P-35 e P-34.

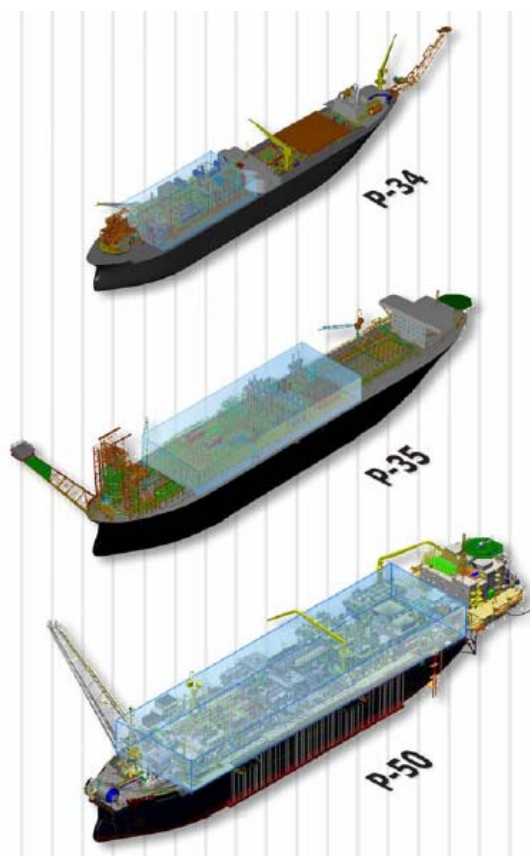


Figura 1.3 – Evolução do tamanho da planta de processo em FPSO's (P-34, P-35 e P-50)

Com a evolução dos projetos de FPSO's, motivados pela percepção das vantagens do uso deste tipo de unidade de produção de petróleo, e ainda pela experiência adquirida ao longo de vários projetos, algumas dúvidas foram levantadas pela equipe de engenharia básica da PETROBRAS. Daí a motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Em 2007, o casco da P-53 se encontrava a caminho de Rio Grande, vindo de Cingapura para a fase de integração, o que finalmente aconteceu em 20 de setembro de 2007. Com essa expectativa, teve-se a iniciativa de aproveitar a oportunidade para instalar um

sistema de instrumentação, que pudesse revelar o comportamento das estruturas de apoio dos módulos durante a instalação dos mesmos e posteriormente, sob as condições ambientais da Bacia de Campos no Rio de Janeiro, locação onde a Unidade iria futuramente operar.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Escola de Engenharia da FURG, sob coordenação dos professores Vitor Frainer e Paulo Roberto Teixeira e mais uma equipe de 10 bolsistas, além dos funcionários da Oficina Mecânica da FURG e do próprio Laboratório. O trabalho começou em meados de 2007, com a implementação do projeto do sistema de aquisição de dados e especificação dos seus componentes, além de testes e simulações físicas e computacionais no Laboratório. A instalação dos primeiros sensores sobre a plataforma e a realização das primeiras medições, com o monitoramento da instalação dos módulos compreendeu os meses de novembro e dezembro do mesmo ano. A partir daí até a partida da P-53 para a Bacia de Campos o trabalho foi de preservação destes sensores e cabos em meio à intensa atividade de construção e montagem, o que durou quase um ano.

Após a partida da plataforma em 03 de outubro de 2008 e, devido às limitações de embarque de pessoas e em função das atividades para partida dos sistemas de produção, quase outro ano se passou até que foi possível o embarque de dois bolsistas em 10 de agosto de 2009, para instalação do sistema de aquisição de dados, o qual funcionaria ininterruptamente realizando aquisições periódicas de deformação, deslocamento e aceleração. O fim do monitoramento na fase *offshore* foi em 27 de dezembro de 2009.

Na seqüência será apresentada uma revisão sobre os tipos de unidades de produção de petróleo *offshore*, entre as quais as FPSO's e a própria P-53. Em seguida é apresentado um breve histórico sobre as alternativas utilizadas para suportação de plantas de processo sobre plataformas do tipo navio e em detalhes é apresentado o projeto utilizado na P-53. Um capítulo sobre esforços a serem considerados no projeto destas estruturas e sobre a interação entre planta de processo e casco também foi incluído, com o intuito de nivelar o leitor sobre as variáveis que afetam as deformações sobre a embarcação bem como suas fontes de geração. O referido sistema de instrumentação implementado neste trabalho é descrito em detalhes no capítulo 5.

As respostas trazidas por este trabalho são de interesse do projeto estrutural de plataformas 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. O escopo do trabalho é restrito à análise das estruturas como projetadas e construídas, sem qualquer interferência no projeto básico destas estruturas. Não faz parte deste estudo a análise de resistência das estruturas dos *stools*, módulos e casco da plataforma P-53.

2. SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE

Existem vários sistemas de produção em operação no mundo todo, cada qual mais interessante, dependendo das características da região onde é instalado. A crescente demanda de novas unidades e a necessidade de superar desafios à exploração e produção de petróleo no mar em profundidades de até 2.000m, fazem com que surjam cada vez mais variações destas soluções entre um projeto e outro, proporcionando a evolução destes sistemas. A seguir serão apresentados os tipos básicos de sistemas de produção de petróleo no mar (*offshore*), cujas morfologias são resumidas na Figura 2.1. Será dada maior atenção para as unidades do tipo FPSO, para as quais se destina este trabalho. Em seguida são descritas as características da plataforma P-53, unidade na qual se desenvolveu esta pesquisa.

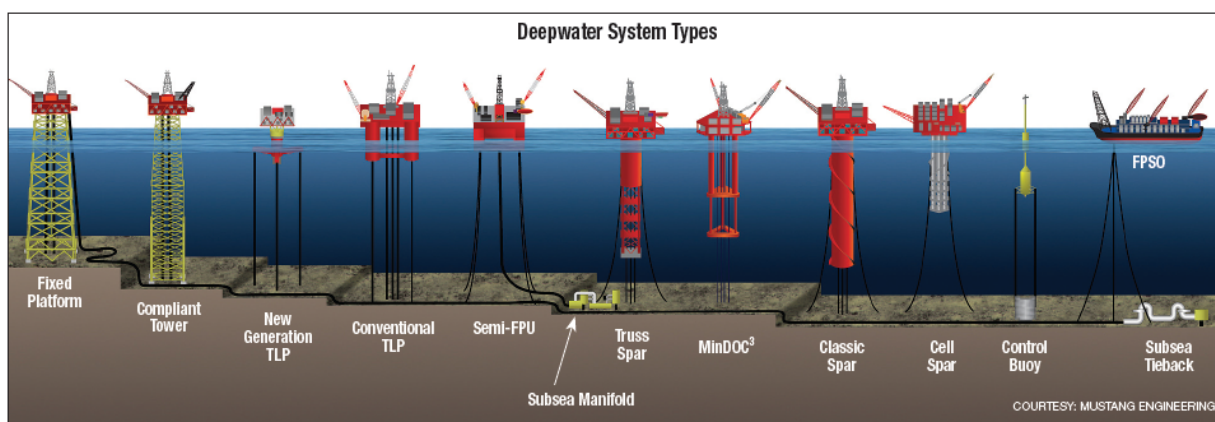


Figura 2.1 – Tipos de sistemas de produção *offshore*

2.1. PLATAFORMAS FIXAS

Têm sido as preferidas nos campos localizados em lâminas d'água de até 300m, podendo chegar em projetos especiais a mais de 500m (torres complacentes ou, em inglês, *compliant tower*). As plataformas fixas (ou *fixed platforms*, em inglês – Figura 2.2) são constituídas de estruturas modulares de aço (chamadas jaquetas – Figura 2.3), instaladas no local de operação com estacas cravadas no fundo do mar. As plataformas fixas são projetadas

para receber todos os equipamentos de perfuração, armazenamento de materiais, alojamento de pessoal, bem como todas as instalações necessárias para a produção dos poços. A completção dos poços nesse tipo de plataforma é do tipo seca, ou seja, o conjunto de válvulas para manobra sobre o poço (chamada “árvore de Natal”) fica no convés da plataforma e não no fundo do mar, tornando esse equipamento menos robusto (e mais barato), além tornar viável a interligação entre poço e árvore de natal com uso de linhas rígidas ao invés das flexíveis. Porém, como desvantagem, oferece pequena possibilidade de alterações no desenvolvimento do campo. Estas plataformas não armazenam petróleo.



Figura 2.2 – Plataforma fixa Pampo (Bacia de Campos)



Figura 2.3 – Jaqueta (plataforma de Mexilhão, Bacia de Santos)

2.2. PLATAFORMAS AUTO-ELEVÁVEIS

São constituídas basicamente de uma balsa equipada com estrutura de apoio ou pernas que, acionadas mecânica ou hidraulicamente, movimentam-se para baixo até atingirem o fundo do mar (Figura 2.4). Em seguida, inicia-se a elevação da plataforma acima do nível d'água, a uma altura segura e fora da ação das ondas. Essas plataformas são móveis, sendo transportadas por rebocadores ou por propulsão própria. Destinam-se à perfuração de poços exploratórios na plataforma continental, em lâmina d'água que varia de 5 a 130m.



Figura 2.4 – Plataforma auto-elevável P-6 (Litoral de Sergipe)

2.3. PLATAFORMAS SEMI-SUBMERSÍVEIS

As plataformas semi-submersíveis são compostas por uma estrutura de um ou mais conveses, apoiada por colunas em flutuadores submersos (Figura 2.5). Este tipo de unidade sofre movimentações devido à ação das ondas, correntes e ventos, com possibilidade de danificar os equipamentos a serem descidos no poço. Por isso, torna-se necessário que ela fique posicionada na superfície do mar, dentro de um círculo com raio de tolerância ditado pelos equipamentos de subsuperfície. Dois tipos de sistema são responsáveis pelo posicionamento dessas unidades: o sistema de ancoragem e o sistema de posicionamento dinâmico. O sistema de ancoragem é constituído de 8 a 12 âncoras e cabos, atuando como molas que produzem esforços capazes de restaurar a posição da plataforma quando esta é

modificada pela ação das ondas, ventos e correntes. No sistema de posicionamento dinâmico, não existe ligação física da plataforma com o fundo do mar, exceto a dos equipamentos de subsuperfície. Sensores determinam o desvio em relação à posição de referência, e propulsores no casco acionados por computador restauram a posição da plataforma.

As plataformas semi-submersíveis podem ou não ter propulsão própria. De qualquer forma, apresentam grande mobilidade, sendo as preferidas para a perfuração de poços exploratórios. Como plataformas de produção, estas plataformas não armazenam petróleo.



Figura 2.5 – Plataforma semi-submersível P-52 (Bacia de Campos)

2.4. PLATAFORMA DE PERNAS ATIRANTADAS (*TENSION-LEG PLATAFORM – TLP*)

Sua estrutura é bastante semelhante à da plataforma semi-submersível, porém sua ancoragem ao fundo mar é diferente. As TLP's (figuras 2.6 e 2.7) são mantidas na posição por tendões verticais (constituídos por estruturas tubulares), que por sua vez, estão presos no fundo do mar por estacas. Estes tendões são mantidos tracionados pelo excesso de flutuação (empuxo) da plataforma, o que reduz severamente os movimentos da mesma. Desta forma, as operações de perfuração e de completação de poços são iguais às das plataformas fixas. Tal como as semi-submersíveis, estas plataformas não armazenam petróleo.

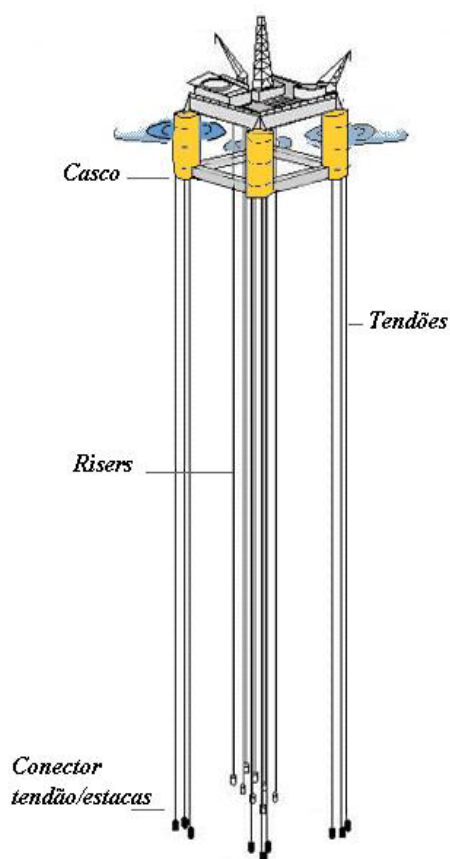


Figura 2.6 – Esquema de ancoragem da TLP



Figura 2.7 – TLP Mars (Golfo do México)

2.5. PLATAFORMAS SPAR

Assim como a TLP, a SPAR (Figura 2.8) é uma outra derivação do conceito de plataformas semi-submersíveis, sendo que a diferença desta vez está na sua estrutura de

flutuação, constituída por uma única coluna, de grande diâmetro que opera com calado de cerca de 200m (Figura 2.9). Apresenta pequenos movimentos verticais, o que permite a completação seca, tal como em uma plataforma fixa. Uma das principais desvantagens é a necessidade de instalação do convés (*topside*) na locação final, exigindo utilização de embarcações de içamento de grande capacidade e de pouca disponibilidade, o que torna a operação de custo elevado. A ancoragem é feita da mesma maneira que nas semi-submersíveis. Esta plataforma pode armazenar petróleo, porém existem restrições que limitam a sua utilização para essa função.



Figura 2.8 – Plataforma SPAR Gênesis (Golfo do México)



Figura 2.9 – Estrutura de flutuação da plataforma SPAR (Gênesis)

2.6. PLATAFORMAS FPSO

As plataformas flutuantes de produção, armazenamento e alívio (descarregamento), as FPSO's (do inglês: *Floating, Production, Storage and Offloading*), são navios com capacidade para processar e armazenar o petróleo e prover a transferência do petróleo e/ou gás natural. No convés da embarcação, é instalada a planta de processo para separar e tratar os fluidos produzidos pelos poços (Figura 2.10). O petróleo é armazenado nos tanques da própria embarcação (a qual é estacionária), sendo transferido de tempos em tempos para um navio chamado aliviador. É a única a oferecer esta vantagem sem maiores restrições.



Figura 2.10 – FPSO P-54 (Bacia de Campos)

FPSO's podem ser construídas a partir de cascos de navios tanque convertidos para receberem uma planta de processo (caso da plataforma da Figura 2.10), ou a partir de cascos especialmente projetados para este fim, cuja forma se aproxima de um paralelepípedo (construção nova, Figura 2.11). Na maioria dos casos, a opção pela conversão é mais econômica e com menor tempo de entrega.



Figura 2.11 – FPSO Girassol (Angola)

O navio aliviador é um petroleiro que atraca na popa da FPSO para receber petróleo que foi armazenado em seus tanques e transportá-lo para terra (Figura 2.12). O calado pode variar entre as condições antes e depois do descarregamento até 15m. O gás comprimido é enviado para terra através de gasodutos e/ou re-injetado no reservatório. Os maiores FPSOs têm sua capacidade de processamento de óleo superior a 200 mil barris por dia, com produção associada de gás chegando a 6 milhões de metros cúbicos por dia.



Figura 2.12 – Operação de alívio da FPSO P-50 para navio petroleiro

Existem dois sistemas de ancoragem aplicados a este tipo de plataforma: ancoragem distribuída (em inglês *spread mooring* – Figura 2.13) ou em ponto único (em inglês *single point mooring* – Figura 2.14). A primeira utiliza cabos amarrados à popa e à proa da embarcação, mantendo aproamento constante da unidade. A segunda opção é um sistema de amarração em que a embarcação fica conectada ao fundo do mar em um único ponto. Neste sistema a plataforma pode mudar seu aproamento em função da resultante dos esforços ambientais através de uma estrutura de rolamento, permitindo que a unidade gire em torno das linhas sem que haja enroscamento das mesmas e minimizando as forças sobre o casco e no próprio sistema de ancoragem.

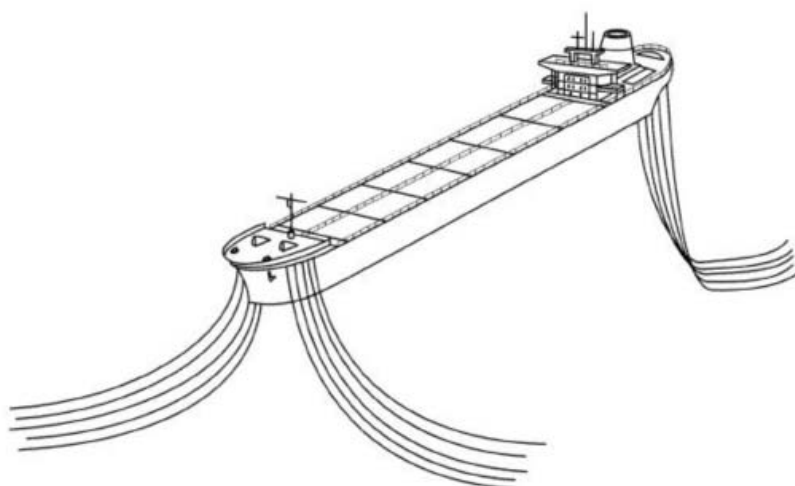


Figura 2.13 – Ancoragem distribuída

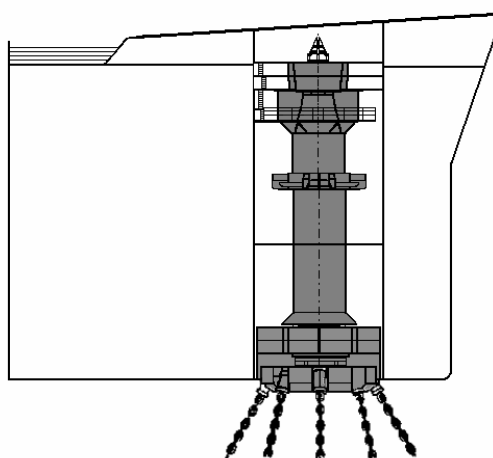


Figura 2.14 – Ancoragem em ponto único

2.7. A PLATAFORMA P-53

A plataforma P-53 (Figura 2.16) é uma plataforma que foi construída a partir da conversão de um grande navio chamado Settebello (Figura 2.15), destinada a operar no campo de Marlim Leste na Bacia de Campos, costa do Rio de Janeiro, a 120km do continente (Figura 2.17). Embora seja uma plataforma construída a partir de um navio convertido, a P-53 recebe a denominação de FPU (*Floating Production Unit* ou Unidade Flutuante de Produção), porque não armazena o petróleo produzido, sendo que a única função do casco é a de ser o suporte flutuante da planta de processo. À exceção dessa característica, sua construção se assemelha muito com a de uma FPSO.



Figura 2.15 – Navio Settebello



Figura 2.16 – Plataforma P-53

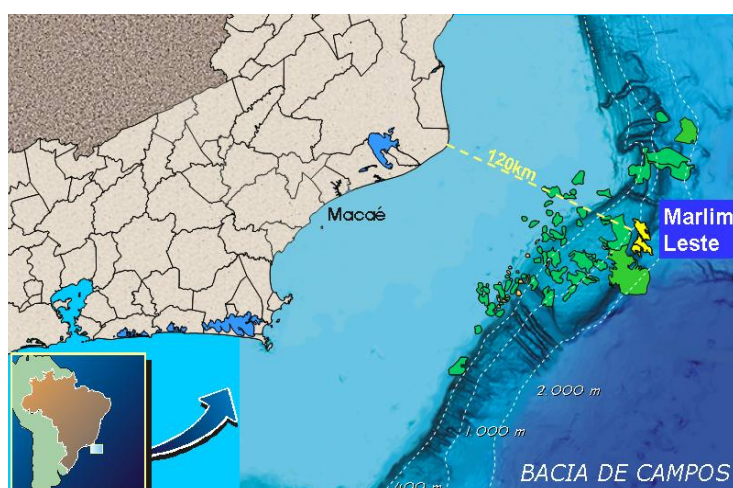


Figura 2.17 – Localização de operação da P-53

Os números que seguem fornecem uma dimensão do tamanho da embarcação:

- comprimento de 346m;
- lâmina d'água de operação de 1.080m;
- capacidade instalada para produção de petróleo de 180.000 bpd;
- capacidade de injeção de 39.000 m³/dia de água;
- capacidade compressão de 6 milhões de m³/dia de gás;
- capacidade de geração de energia 92 MW de potência.

Outra peculiaridade da P-53 é o seu sistema de ancoragem em ponto único através de uma estrutura/equipamento chamada *Turret* (figuras 2.18 e 2.19), ao qual são conectadas todas as linhas de ancoragem e de transferência de fluidos (*risers*). O *turret* permite que a embarcação gire em torno das linhas sem que haja enroscamento das mesmas, em função das condições ambientais predominantes (resultante da ação de vento, corrente e ondas). O *turret* da P-53 é constituído por uma grande estrutura de rolamento com 26m de diâmetro, sendo este o maior do mundo.

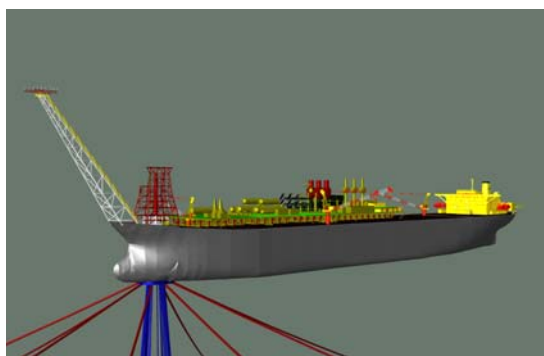


Figura 2.18 – Sistema de ancoragem da P-53

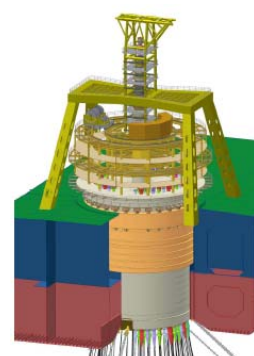


Figura 2.19 – Turret em corte

A transferência de fluidos entre poços e a plataforma é realizada por intermédio de uniões rotativas (estruturas toroidais com selagem adequada), cada uma delas chamada *swivel*, às quais são conectadas as linhas flexíveis, constituindo a única parte fixa da embarcação em relação aos poços. Ao *turret* da P-53 são conectadas as linhas de ancoragem e 75 linhas flexíveis (*risers*), através dos quais são interligados 21 poços submarinos (14 produtores e 7 injetores) à FPU, situados a uma distância média de 4,5 km. Também são conectados ao *turret* os chamados umbilicais de controle, através dos quais são enviados e recebidos sinais de controle (elétricos e hidráulicos) para monitoramento e manobra nas cabeças dos poços. Como antes mencionado, esta unidade não armazena o petróleo produzido. O petróleo sofre

um tratamento primário que se constitui basicamente de separação de gás, água e areia do óleo elevado que é em seguida é exportado para a plataforma de rebombeio autônomo PRA-1 através de um oleoduto de 12". O gás produzido é tratado e escoado em alta pressão por um gasoduto de 10" até a plataforma P-26. A Figura 2.22 ilustra resumidamente o arranjo submarino sob a P-53 e o plano de escoamento da produção.

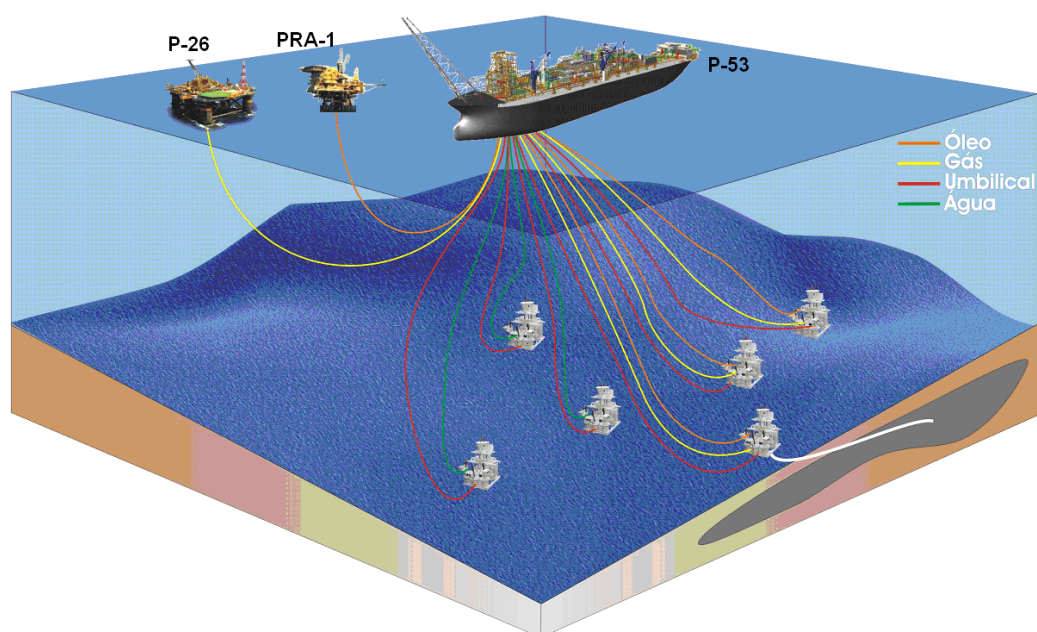


Figura 2.20 – Arranjo submarino sob a P-53 e plano de escoamento

3. CONFIGURAÇÕES PARA SUPORTAÇÃO PLANTAS DE PROCESSO EM PLATAFORMAS DO TIPO FPSO

Existem dois tipos de configuração para plantas de processo de FPSO's comumente adotadas: Estrado Metálico (em inglês *Grillage Deck* ou *Pancake*) e Plantas Modulares (Krekel e Kaminski, 2002). Na primeira, a planta é montada a partir de conjuntos menores de equipamentos (chamados *skids*), e são edificadas sobre estrados metálicos (Figura 3.1) acima do convés principal e, no local definitivo, recebem as tubulações, conexões elétricas e de instrumentação. Estes estrados podem ter entre 16 e 20 apoios, conferindo a essa configuração uma melhor distribuição de carga sobre o convés, não havendo maior ônus para a estrutura do casco. Este fato faz esta opção especialmente interessante no caso de navios convertidos por demandar poucos reforços na estrutura originalmente existente. Essa alternativa também requer um nível mínimo de completação mecânica do casco para sua construção ser iniciada. Dessa forma, é uma condicionante que casco e planta de processo sejam construídos no mesmo estaleiro.



Figura 3.1 – Estrado metálico ou *pancake* (P-34)

A configuração modular (Figura 3.2) permite que a planta de processo seja construída a partir de sub-conjuntos pré-montados (módulos, Figura 3.3), os quais são içados para o

convés do casco devidamente preparado. A diferença é que dessa forma o início da construção da planta de processo pode ser antecipada, pois passa a não depender mais da construção do casco para ter seu início, podendo estas atividades ser feitas em paralelo e em canteiros diferentes. A limitação fica somente a cargo da capacidade de içamento dos guindastes (Figura 3.4), sendo os mesmos poucos disponíveis e caros. Cada módulo pode alcançar até 2.000 toneladas (peso seco).

No projeto das plantas modulares, os efeitos da deflexão da viga navio tornam-se mais significativos quanto maiores o peso e o comprimento do vão dos módulos (como será visto com detalhes no Capítulo 4).

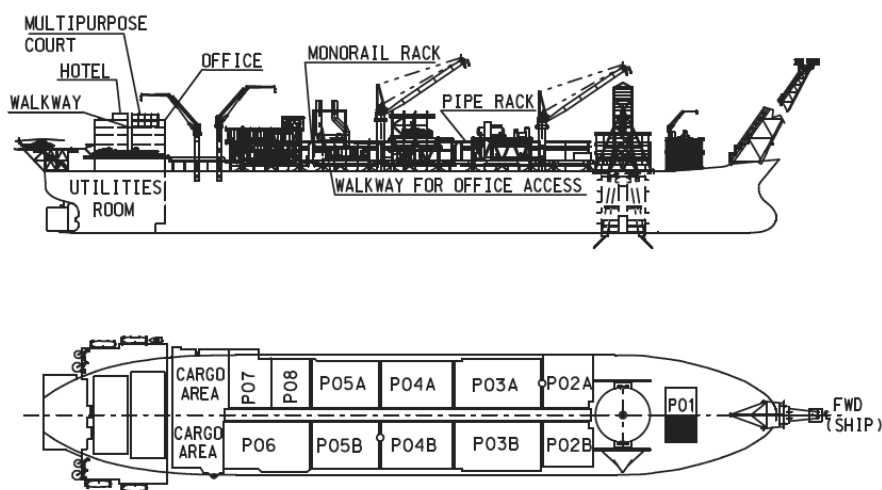


Figura 3.2 – Arranjo modularizado da planta de processo da P-53



Figura 3.3 – Módulo (unidade pré-montada)



Figura 3.4 – Operação de içamento de um módulo (P-53)

A seguir serão apresentadas as variações dos sistemas de suporta  o de plantas modulares, caso da P-53, foco deste trabalho.

3.1. SOLUÇÕES PARA SUPORTAÇÃO DE PLANTAS MODULARES

3.1.1. SUPORTES TRELIÇADOS

Alternativa aplicada tanto para suportação de módulos como estrados metálicos, consiste no emprego de várias treliças montadas e alinhadas sobre as estruturas transversais do casco (cavernas). Proporcionando múltiplos pontos de apoio sobre o convés, esta solução possibilita uma melhor distribuição de peso diminuindo concentrações de carga sobre a estrutura do casco, o que a torna a opção mais atrativa quando se trata de cascos convertidos por diminuir a necessidade de refor    os adicionais à estrutura do casco (Krekel e Kaminski, 2002). Alinhadas na seção transversal, estas estruturas têm tambm oferecem como vantagem flexibilidade na direção longitudinal, preservando a estrutura do módulo sobre elas dos efeitos de flex    o da viga navio. A Figura 3.5 ilustra este tipo de sistema de suportação.

Por se tratar de múltiplos apoios (estrutura estaticamente indeterminada), deve-se prover margens adicionais de seguran    a para os esfor    os de reação, os quais ainda devem prever os efeitos de eventuais desvios dimensionais (“p  s mancos”), o que pode agravar o problema de distribuição de cargas entre estas estruturas.



Figura 3.5 – Suportes treliçados sob o módulo içado

3.1.2. STOOLS

“*Stool*” (ou “banqueta” em inglês) é um tipo de suporte especialmente aplicável à plantas modulares (UKOOA, 2002). O apoio em poucos pontos cria concentradores de carga, tendo por essa razão estas estruturas a característica de grande capacidade de suportação. Estes suportes podem receber unidades pré-montadas de mais de 3.000 toneladas (em operação), fato favorável   modularização da planta.

Esta solução para suporta  o de módulos é mais vantajosa quando se trata de cascos especialmente construídos para servir de plataformas de produção, uma vez que cascos convertidos requerem modificações para se adaptar à nova aplicação, distante daquela para os quais foram projetados para atender originalmente.

A depender do comprimento dos módulos, torna-se recomendável a previsão de apoios deslizantes. Esta medida visa permitir ocorrência de deslocamentos relativos (entre *stool* e o p  do módulo) na direção longitudinal da embarcação, com objetivo de minimizar a transferência de esforços horizontais, devidos às deflexões do casco, para as estruturas dos módulos. Também merece especial atenção o controle dimensional destas estruturas, no sentido de se evitar “p s mancos” e provocar sobrecarga nos demais apoios. A Figura 3.6 mostra um *stool* deslizante utilizado na plataforma P-54 da PETROBRAS.



Figura 3.6 – Stool deslizante da plataforma P-54

Para suprimir a transferência de momentos devido ao engastamento gerado na soldagem nos *stools* fixos, alguns projetos prevêem a utilização de um aparelho de apoio polimérico (Figura 3.7; Henriques e Brandão, 2007), a exemplo do projeto FPSO-BR da PETROBRAS (inicialmente previsto para ser aplicado na plataforma P-57, mas que não foi implantado pois a mesma foi construída a partir de um casco convertido e não mais uma construção nova). Não há ligação soldada, sendo a fixação do módulo feita através de batentes instalados após o assentamento do mesmo. O *stool* passa a ter menos de 2m, sendo a planta elevada em relação ao convés principal através da extensão das colunas do módulo.

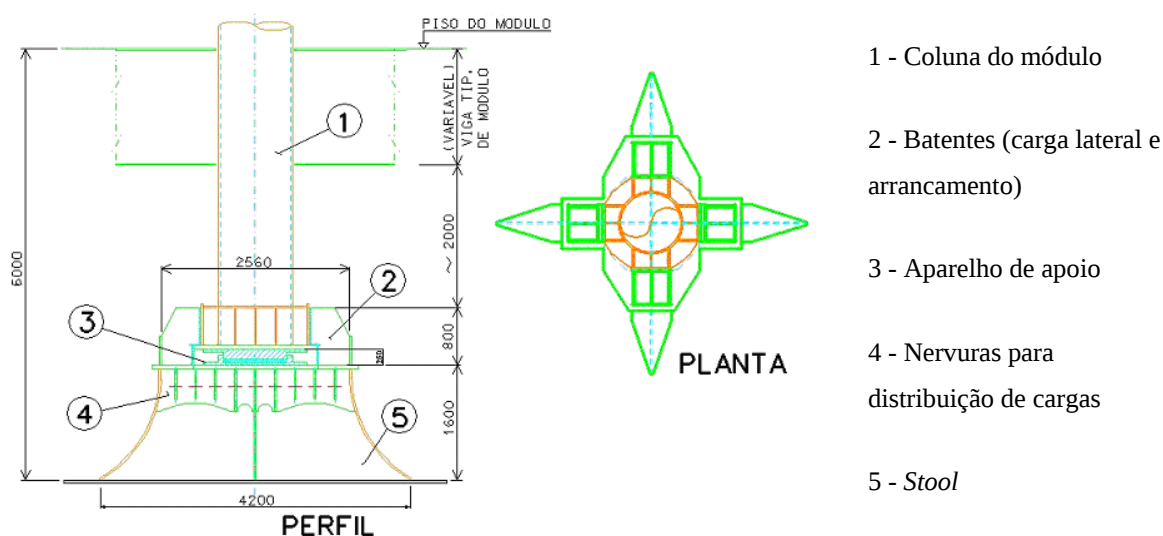


Figura 3.7 – Sistema de suporta  o adotado na FPSO-BR

3.1.3. VIGA TRANSVERSAL

A alternativa a seguir, que utiliza vigas transversais (Figura 3.8), é interessante tanto para cascos convertidos ou novas construções (Krekel e Kaminski, 2002). Esta solução associa as vantagens das duas primeiras: grande capacidade de carga e melhor distribuição de peso sobre o convés. Alternando entre vigas rígidas e flexíveis, esta solução confere menor vulnerabilidade aos efeitos de flexão da viga navio. A Figura 3.9 ilustra o funcionamento deste sistema de suportação, mostrando como o efeito da deflexão da viga navio   amenizado. Além de ser uma solução mais pesada, como desvantagem esta opção ainda gera congestionamento da área no convés, trazendo implicações sérias no que diz respeito   segurança da instalação.



Figura 3.8 – Suporta  o com viga transversal (Plataforma Aoka Mizu, Reino Unido)

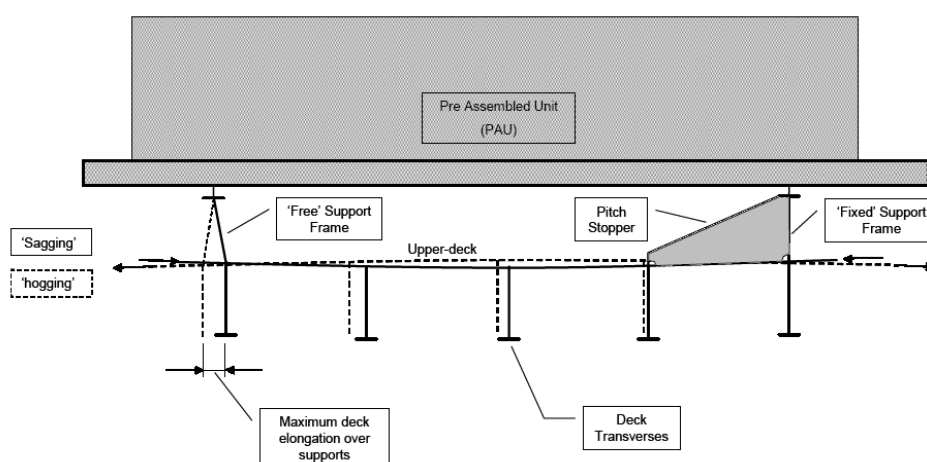


Figura 3.9 – Comportamento do sistema de suporta  o do tipo viga transversal
sob deflexão da viga navio

3.2. PROJETO DOS STOOLS DA P-53

Os módulos da P-53 são suportados em quatro pontos cada um, dois fixos e dois deslizantes. As figuras 3.10 e 3.11 mostram o detalhe do topo dos *stools* e interligação com o pé do módulo, fixo e deslizante, respectivamente (CENPES, Projeto Básico, 2007). Estes últimos permitem deslocamentos somente na direção longitudinal da embarcação e têm essa configuração para minimizar a transferência de esforços horizontais devidos às deflexões do casco para as estruturas dos módulos.

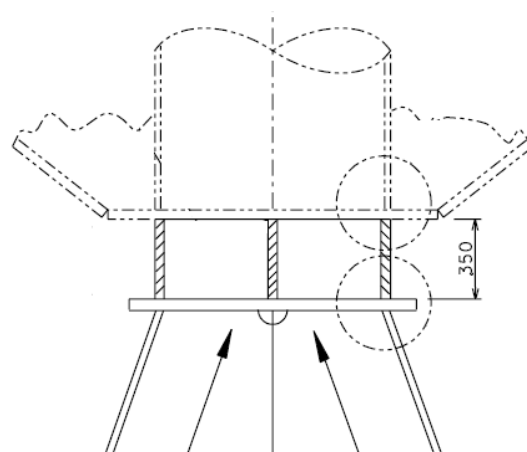


Figura 3.10 – Detalhe do topo do *stool* do tipo fixo da plataforma P-53

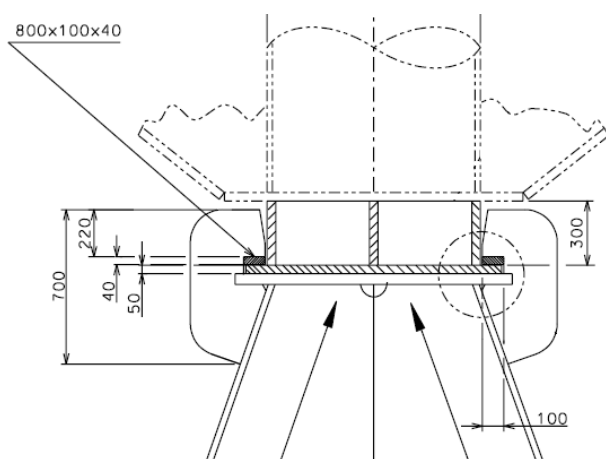


Figura 3.11 – Detalhe do topo do *stool* do tipo deslizante da plataforma P-53

Porém, por diversas razões (pesos e coeficiente de atrito associados, características das ondas sob as quais a embarcação se encontraria submetida, etc), existem dúvidas quanto à ocorrência de deslocamentos relativos entre os módulos e seus suportes deslizantes. A expectativa é de que estes deslocamentos, caso restritos, acrescentariam significativamente

carga aos *stools* e às estruturas dos módulos sobre eles apoiados. Os módulos em operação podem alcançar mais de três mil toneladas distribuídas em quatro pontos.

A Figura 3.12 apresenta identificação dos elementos que compõe a estrutura dos *stools* da P-53, tal como serão referidos ao longo do texto. A Figura 3.13 mostra uma foto de um *stool* deslizante da P-53.

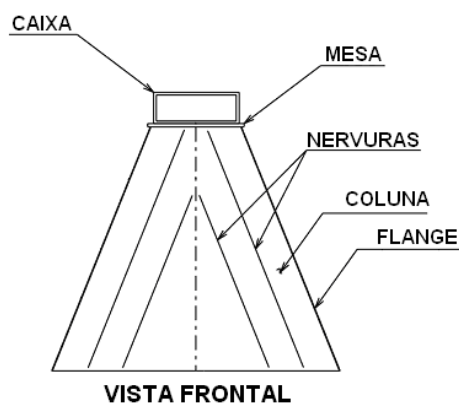


Figura 3.12 – Identificação dos elementos estruturais dos *stools* da P-53

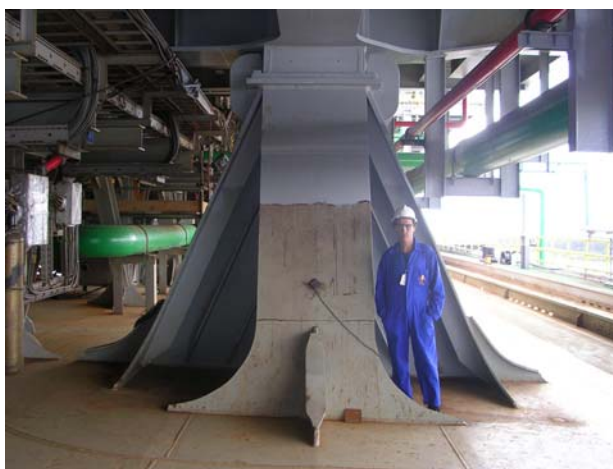


Figura 3.13 – *Stool* deslizante da plataforma P-53

Estas estruturas têm cerca de três metros de altura do convés até a mesa. Os flanges são constituídos por chapas com espessura variável. As espessuras dos elementos que compõe a estrutura do *stool* do P03A/B (cuja posição sobre a embarcação é indicada na Figura 3.2), são mostradas na Tabela 3.1. Os flanges têm espessura variável (maior espessura próxima ao topo).

Tabela 3.1 – Espessuras dos elementos estruturais dos *stools* do módulo P03A/B (mm)

Tipo	Elemento				
	Caixa	Mesa	Colunas	Flanges	Nervuras
Deslizante	35	50	25	44/25/25	19
Fixo	60	35	25	60/44/35	19

4. ESFORÇOS SOBRE PLATAFORMAS DO TIPO FPSO

Uma embarcação que flutua em águas calmas está sujeita, em cada ponto de sua superfície imersa, à ação de duas espécies de força, que agem em sentidos opostos. Ele permanece em equilíbrio porque estas forças têm como resultantes duas forças iguais e contrárias, isto é, o peso total do navio e sua carga, aplicado ao centro de gravidade, e o empuxo devido à água onde flutua, aplicado ao centro de gravidade do volume da água deslocada (Fonseca, 2002).

Cada uma dessas forças, sobrepondo-se uma à outra em um ponto qualquer da parte submersa do casco, tende a fazer deformar a estrutura do mesmo porque o peso exerce uma pressão de dentro para fora, e o empuxo, de fora para dentro (Figura 4.1). Estas tendências à deformação podem se acentuar, especialmente no que se refere a unidades estacionárias, por ação principal das ondas às quais a embarcação encontra-se submetida.

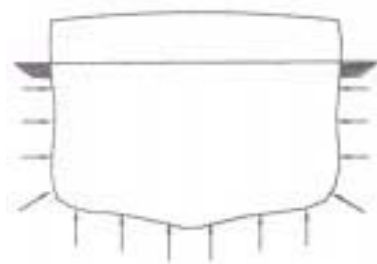


Figura 4.1 – Ação do empuxo sobre o casco de uma embarcação

Para o estudo de sua estrutura, o navio pode ser considerado uma viga, uma caixa ou peça composta de muitas pequenas vigas reunidas, de modo que sua resistência como um todo dependa da eficiência de todas as suas peças elementares.

Um navio flutuando é freqüentemente submetido a esforços semelhantes, não apenas pela carga distribuída a bordo, mas com maior intensidade quando estiver em alto-mar, por efeito das ondas. Considerando o navio uma viga em forma de caixa, a aba superior desta viga

será o convés resistente (que na maioria dos navios é o convés principal), e a aba inferior será o fundo. Quando o navio estiver na condição da Figura 4.2, o convés sofre esforço de compressão e o fundo esforço de tração. Essa condição é chamada tosamento (*sagging*, em inglês). Nos costados, o esforço de compressão será máximo na fiada superior junto ao convés, diminuindo para baixo, e anulando-se na altura do eixo neutro. Abaixo deste eixo, o esforço é o de tração, aumentando do eixo neutro para o fundo. Para a condição da Figura 4.3, a distribuição dos esforços é semelhante, havendo compressão onde existia tração e vice-versa. Essa condição é chamada alquebramento (*hogging*, em inglês). As fiadas de chapa do costado na altura do convés e do fundo, tem chapas mais robustas que as demais, pois são elas que resistem aos esforços nos costados, e representam, portanto, peças importantíssimas na estrutura do casco do navio. Os duplos-fundos são considerados também um reforço estrutural dos cascos, na região que constitui a aba inferior da viga. A Figura 4.4 mostra como se quantificam as deformações longitudinais decorrentes da ação das ondas sobre a viga navio.

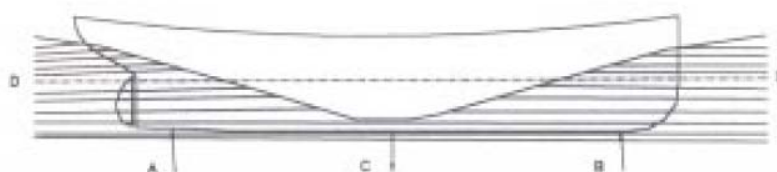


Figura 4.2 – Viga navio entre duas cristas de onda
(condição chamada tosamento ou “*sagging*”)

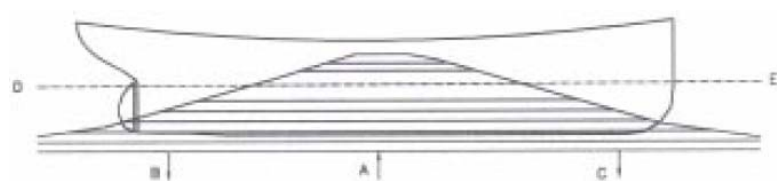


Figura 4.3 – Viga navio com crista de onda à meia nau
(condição chamada alquebramento ou “*hogging*”)

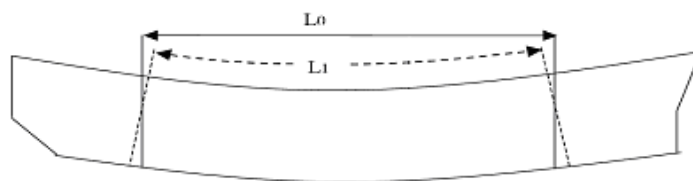


Figura 4.4 – Deformação longitudinal da viga navio: $(L_1 - L_0)/L_0$

4.1. CLASSIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS

Os esforços a que são submetidos os cascos dos navios podem ser classificados do seguinte modo: esforços longitudinais, esforços transversais, esforços devidos à propulsão (os quais não são de interesse para unidades estacionárias, caso da P-53), e esforços locais propriamente ditos (Fonseca, 2002).

4.1.1. ESFORÇOS LONGITUDINAIS

São os esforços de flexão no sentido do comprimento e que tendem a estabelecer no casco as deformações de tosamento e alquebramento. Um navio é solicitado em cada ponto pelo peso e pelo empuxo, e pode haver em uma grande extensão no sentido do comprimento, variação entre o peso e o empuxo em cada seção da embarcação. Esta variação pode ser causada pela variação do empuxo no sentido longitudinal devido ao estado do mar; por uma desigual distribuição do peso do navio no sentido do comprimento; por variações no perfil transversal ao longo do comprimento da embarcação; ou ainda, acidentalmente, por estar o navio parcialmente preso por encalhe.

4.1.1.1. ESFORÇOS LONGITUDINAIS DEVIDOS À AÇÃO DAS ONDAS

Supondo simplifadamente que as ondas do mar incidem na direção longitudinal do navio, a pior condição que o mesmo poderá encontrar será ficar apoiado por duas cristas de onda nas extremidades, estando a parte central sobre a cava da onda. Nesta ocasião, a ação do empuxo será maior nas extremidades e menor na parte central do que se o navio estivesse flutuando em águas calmas. Estas diferenças serão tanto maiores quanto maior for a altura da onda e quanto mais o seu comprimento se aproximar do comprimento do navio. A Figura 4.2 representa o navio nesta situação. Tal como numa viga, a parte superior do casco está sob compressão e a parte inferior sob tração, havendo um plano neutro entre elas. Se o casco do navio não fosse construído para resistir a estes esforços, ele curvar-se-ia para baixo na parte central, isto é, sofreria uma deformação de tosamento (*sagging*). No caso inverso (Figura 4.3), o navio fica apoiado a meio sobre a crista de uma onda; há um excesso de peso nas extremidades B e C, e o casco sofre os esforços de tração na parte superior e compressão na

parte inferior. Se o casco não fosse bastante resistente, ele curvar-se-ia para o alto, assumindo a formação para a qual se dá o nome de alquebramento (*hogging*). Este esforço é agravado pelo movimento de arfagem (*pitch*, em inglês, refere-se ao movimento de rotação segundo o eixo transversal da embarcação), e pela força de aceleração que este movimento oscilatório produz.

4.1.1.2. ESFORÇOS DEVIDOS À DISTRIBUIÇÃO DESIGUAL DO PESO

Na Figura 4.5 se pretende representar um navio dividido em compartimentos estanques, alguns dos quais estão vazios e outros cheios de carga (considera-se além do peso da estrutura, o de tudo o que ela contém: carga, máquinas, lastro etc.).

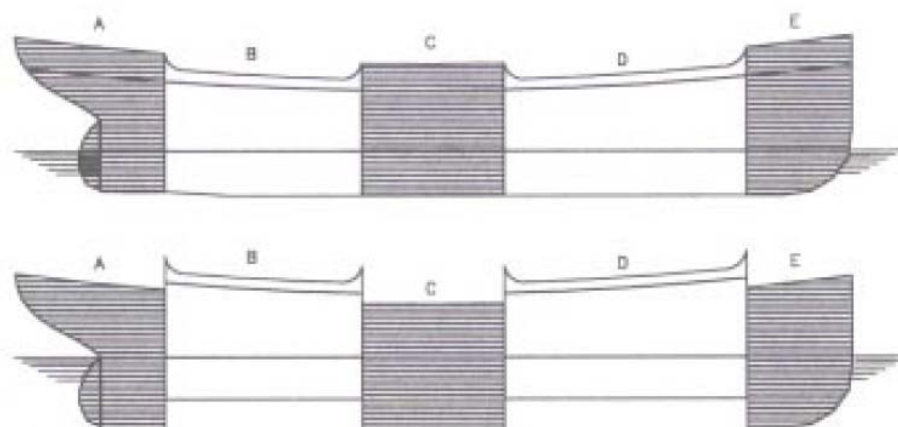


Figura 4.5 – Esforços devidos à distribuição desigual de peso

Supondo que fosse possível separar os diversos compartimentos e que cada um tivesse uma suficiente capacidade para flutuar com estabilidade, os compartimentos carregados A, C e E iriam ter um calado maior que o calado médio, e os compartimentos vazios B e D flutuariam em um calado menor que o calado médio, o que é representado pela própria Figura 4.5. Supondo agora o navio dividido em um grande número de zonas muito estreitas, as deformações do casco apareceriam em continuidade, isto é, manifestar-se-iam do mesmo modo que uma viga que estivesse apoiada em dois pontos nos compartimentos B e D, e fosse solicitada para baixo por três forças, uma central e duas nas extremidades. Os esforços no sentido longitudinal são os mais importantes a considerar neste estudo e por causa deles é que

a estrutura do casco tem de ser especialmente reforçada e mais robusta ao longo do comprimento e na altura das duas regiões mais afastadas do plano neutro. Estas duas regiões são a do convés resistente e a região do fundo do casco.

4.1.1.3. EMBARCAÇÃO PARCIALMENTE PRESA POR ENCALHE

Este é um caso accidental, em que o navio fica preso numa parte e na outra fica sujeito ao desequilíbrio entre o peso e o empuxo, o qual se altera em função das variações da altura da maré no local. As consequências são fáceis de imaginar, pois se trata de uma viga que é sujeita a grande flexão por estar presa em um ponto e submetida em outro ponto a uma força que pode ser dirigida para cima ou para baixo.

4.1.2. ESFORÇOS TRANSVERSAIS

Foi apresentada a ação deformante dos esforços longitudinais devido à incidência das ondas na direção longitudinal do navio e, conseqüentemente, à variação do empuxo nesta direção. No caso dos esforços dirigidos na direção transversal, entretanto, os efeitos mais importantes são os que provêm da ação dos movimentos oscilatórios transversais em consequência das ondas, ou da ação dos pesos desigualmente distribuídos em uma seção transversal.

4.1.2.1. ESFORÇOS TRANSVERSAIS DEVIDOS À AÇÃO DAS ONDAS

Nota-se que o navio pode ser considerado uma viga em forma de caixa. É fácil compreender então que o efeito principal do balanço, devido à incidência de ondas na direção transversal, é uma tendência à deformação por distorção nos cantos do navio (Figura 4.6).



Figura 4.6 – Viga navio (seção transversal) sob ação de ondas na direção transversal

De fato, nas oscilações transversais, a massa em movimento devido à inércia tende a se mover continuamente no sentido do movimento sob a ação do seu peso; mas em um ponto determinado, o navio passa a se mover no sentido oposto sob a ação oscilatória das ondas, contrariando portanto aquela ação da inércia. A consequência disto é que o ângulo formado entre as vigas transversais e o costado num bordo do casco tende a tornar-se obtuso, e no bordo oposto tende a ficar agudo. A oscilação completa fará com que aqueles ângulos tendam alternadamente a se tornar agudos e obtusos, e cada seção transversal em todo o casco passará a tomar a forma pontilhada em cada meio balanço.

4.1.2.2. ESFORÇOS TRANSVERSAIS POR EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS NOS COMPARTIMENTOS DA EMBARCAÇÃO

A colocação de um peso excessivo no porão do navio introduz um esforço que tende a unir os costados, o que é evitado pelas vigas transversais na altura do convés, que trabalham então em compressão. Efeito análogo ocorre devido ao perfil hidrostático de pressões gerado em tanques estruturais, tal como acontece em tanques de lastro ou de armazenamento de óleo no caso de FPSO's. Caso haja muito peso concentrado no convés (Figura 4.7), ou se o navio estiver em seco (Figura 4.8), haverá o efeito contrário, isto é, os costados tendem a se afastar.

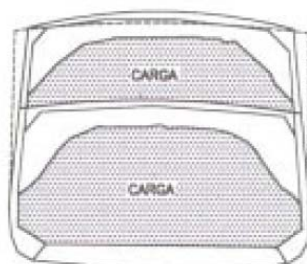


Figura 4.7 – Efeitos devidos à má distribuição de carga nos compartimentos estruturais

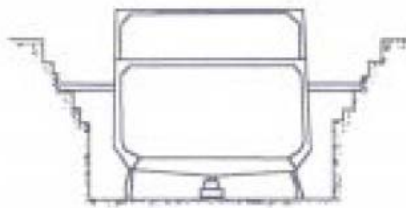


Figura 4.8 – Embarcação em seco

Quando o navio se encontra sobre a carreira, pronto para o lançamento, ou quando está em um dique colocado sobre os picadeiros, ou ainda em seco numa maré baixa, desaparece o efeito equilibrador do empuxo devido à água deslocada. Isto se faz sentir no navio porque a ação do peso se torna maior, estabelecendo um esforço que tende a empurrar para fora os costados. Por isto é que, às vezes, há necessidade de serem colocadas escoras nos costados para ajudar a estrutura a conservar a sua forma, evitando que o esforço de tração possa alongar ou fraturar a estrutura do navio.

4.1.3. ESFORÇOS LOCAIS

Os esforços locais, propriamente ditos, são os esforços que tendem a deformar uma parte qualquer da estrutura do casco. São exemplos pertinentes a plataformas de produção de petróleo esforços devidos ao peso de módulos distribuídos em pontos específicos sobre o convés.

4.2. INTERAÇÃO CASCO-MÓDULOS EM FPSO'S

As estruturas sobre o convés de uma plataforma FPSO são sujeitas também a esforços devidos às deflexões da viga navio, as quais se devem como anteriormente mencionado, principalmente ao efeito de flexão em águas calmas e à ação das ondas. Estes efeitos são transferidos à planta de processo através das suas estruturas de suporte (Henriksen et al, 2008). O gradiente de pressão que atua sobre as anteparas longitudinais ou transversais, o que depende do nível dos tanques de lastro, também produzem deflexões as quais também são transferidas às estruturas da planta de processo através de seus suportes. A estrutura da viga

navio é reciprocamente afetada pela massa dos módulos, estática e dinamicamente, influenciando sobre a resultante do esforço de flexão e cisalhamento sobre ela própria. Além disso a distribuição de massa dos módulos pode causar efeitos estáticos e dinâmicos localmente diferenciados sobre o convés. Devido ainda à resistência dos suportes dos módulos, as cargas induzidas pelas deflexões da viga navio introduzem esforços sobre a estrutura dos módulos da planta de processo, produzindo reações locais sobre o convés através das suas estruturas de suporte. O emprego de conexões deslizantes entre convés e módulos pode reduzir esse efeito de um sobre o outro, não havendo restrições ao movimento quando a força de atrito é superada pela força horizontal.

5. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho segue basicamente as seguintes fases:

- Implementação de modelos para simulação: quantificação dos esforços e deslocamentos, com os dados de projeto e a partir de modelos numéricos e físicos (reduzidos) dos *stools*;
- Implementação de um sistema de aquisição de dados: a aquisição dos dados ocorreu em duas fases: estática (logo após o assentamento dos módulos, ainda no estaleiro), e dinâmica (em operação, sob as condições ambientais na Bacia de Campos).

O estudo é restrito aos módulos P03A/B (Separação de óleo) – vide localização destes na Figura 3.2. Considerando o critério de magnitude de carregamento, estes são mais interessantes pois apresentam maior peso e maior relação entre peso em operação e peso seco (aproximadamente 1,5 para o P03A/B), como mostra a Tabela 5.1. No que se refere aos deslocamentos relativos entre módulo e *stools* deslizantes, os módulos escolhidos apresentam o segundo maior vão entre apoios (25m para o P03A/B, 30m para o P06), como mostra a Tabela 5.2. Apesar da expectativa da ocorrência dos maiores deslocamentos por unidade de comprimento sejam à meia-nau (caso dos módulos P04A/B), a previsão nos documentos de projeto da P-53 é que, sob as condições neles especificadas, o módulo P06 apresente os maiores deslocamentos com aproximadamente 20mm, seguido do P03A/B com cerca de 18mm (PETROBRAS/CENPES, 2007).

Tabela 5.1 – Massa de alguns módulos da P-53

Módulo	Massa Seco (x1.000kg)	Massa em Operação (x1.000kg)
P03A	2.139	3.217
P03B	2.092	3.137
P06	1.861	2.517

Tabela 5.2 – 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

A ocorrência de deslocamentos nos *stools* deslizantes é uma possibilidade somente, não garantida devido ao elevado peso dos módulos. O coeficiente de atrito estimado experimentalmente em laboratório ficou entre 0,35 e 0,79 (ambas superfícies em aço), dependendo do acabamento superficial (ver Anexo A: *Determinação Experimental do Coeficiente de Atrito*). A massa do módulo em questão (P03A/B) pode atingir 3.000 toneladas. Assumindo distribuição homogênea de peso entre suportes, a força normal à superfície do *stool* é aproximadamente 7.500kN. Logo, para a faixa de valores de coeficiente de atrito, a força de atrito pode variar de 2.625 a 5.925kN.

Admitindo que a condição considerada no projeto aconteça e que o deslocamento previsto encontre total restrição, a deformação da viga longitudinal do módulo poderia atingir $736\mu\text{m}/\text{m}$, correspondendo ao efeito de uma tensão de cerca de 153MPa (segundo a Lei de Hooke). Adotando o último valor como tensão média, para fins de cálculo, multiplicando a área da seção transversal da viga (perfil “I”, com 21.850mm^2), a força tangencial sobre o *stool* poderia alcançar 3.340kN.

Logo se percebe que a ocorrência de deslocamentos é fortemente dependente do peso do módulo e das condições da superfície. Neste cenário, uma vez que a força tangencial à mesa do *stool* tem valor dentro da faixa de estimada para a força de atrito, a ocorrência do deslocamento relativo é mais provável para módulos mais leves, e improvável ou até impossível para módulos mais pesados.

5.1. PROJETO E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES E DESLOCAMENTOS

5.1.1. INSTALAÇÃO DOS EXTENSÔMETROS

Para a medição de deformações foram utilizados extensômetros (*strain gauges*) do tipo resistivo. A opção por este sensor se deu pela conhecida qualidade de resposta, vasta variedade de soluções comerciais disponíveis para condicionamento e transmissão de sinais, facilidade de instalação e tecnologia dominada com larga experiência da equipe do Laboratório de Ensaios Mecânicos da FURG. Para sua instalação foram realizados testes de validação em laboratório (em modelos físicos) e na locação final, observadas as condições ambientais próprias para instalação.

Nos módulos de interesse deste estudo, foram instalados 4 extensômetros por *stool*, um por flange, totalizando 16 pontos de medição de deformação por módulo. Os pontos escolhidos têm a mesma altura em relação ao convés para se poder avaliar os efeitos de flexão nos planos ortogonais do *stool*. No sentido de se captar maiores níveis de sinal de deformação, os mesmos foram instalados o mais próximo possível do convés, e em posição suficientemente afastada de concentradores de tensões (transições de espessura, nervuras, etc.).

Os pontos escolhidos não coincidem com aqueles apontados pela simulação numérica como os mais solicitados. Como esses pontos mudam de posição em função da direção instantânea da resultante dos esforços, a localização desses não é constante ao longo do tempo, o que foi verificado através das simulações. As figuras 5.1 e 5.2 mostram a disposição dos extensômetros e a instalação deles em um *stool*.

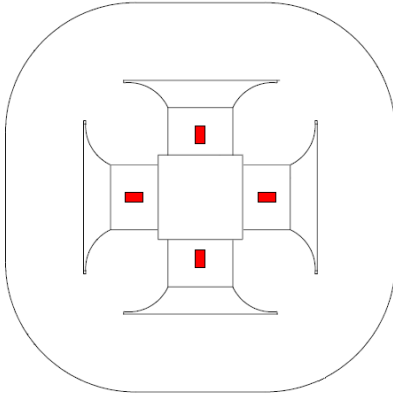
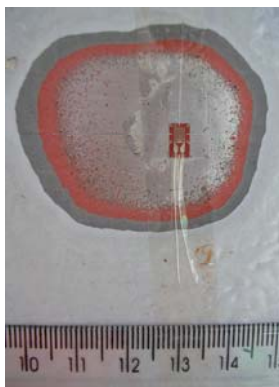


Figura 5.1 – Vista de planta de um *stool*, com destaque para a posição dos extensômetros



Figura 5.2 – Foto de um *stool* com extensômetros instalados

Após a colagem, testes e calibração, os extensômetros (Figura 5.3a) receberam uma camada de isolante líquido, a qual conferiu às superfícies isolação elétrica e impermeabilização. Para dar proteção mecânica foi aplicada uma camada de resina epóxi de secagem rápida (Figura 5.3b). A montagem toda foi coberta com caixa plástica (Figura 5.3c), de material resistente às condições ambientais e compatível com a cola que a fixou na superfície (pintada) do *stool*. O espaço vazio entre o extensômetro (sob a camada de 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, foi aplicada borracha de poliuretano no entorno da caixa, fazendo a selagem da mesma.



(a) Extensômetro de 5mm



(b) Isolação e proteção mecânica



(c) Proteção adicional e acabamento (caixa 80 x 80 mm)

Figura 5.3 – Instalação e proteção dos extensômetros

A preservação dos sensores instalados foi outro ponto de preocupação. O ambiente em plena atividade de construção montagem (fase final da obra), ameaçava a integridade extensômetros e cabos. Ações foram implementadas no sentido de evitar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de danos. Mesmo assim muitos sensores foram danificados e cabos foram rompidos ou danificados.

A sistemática de identificação dos extensômetros (canais de aquisição) é mostrada a seguir na Figura 5.4. A seqüência de identificação extensômetros dos flanges (canais do ch1 ao ch16) segue a orientação horária, visto o *stool* de topo, e prossegue para o *stool* mais próximo segundo mesmo sentido no módulo também visto de topo.

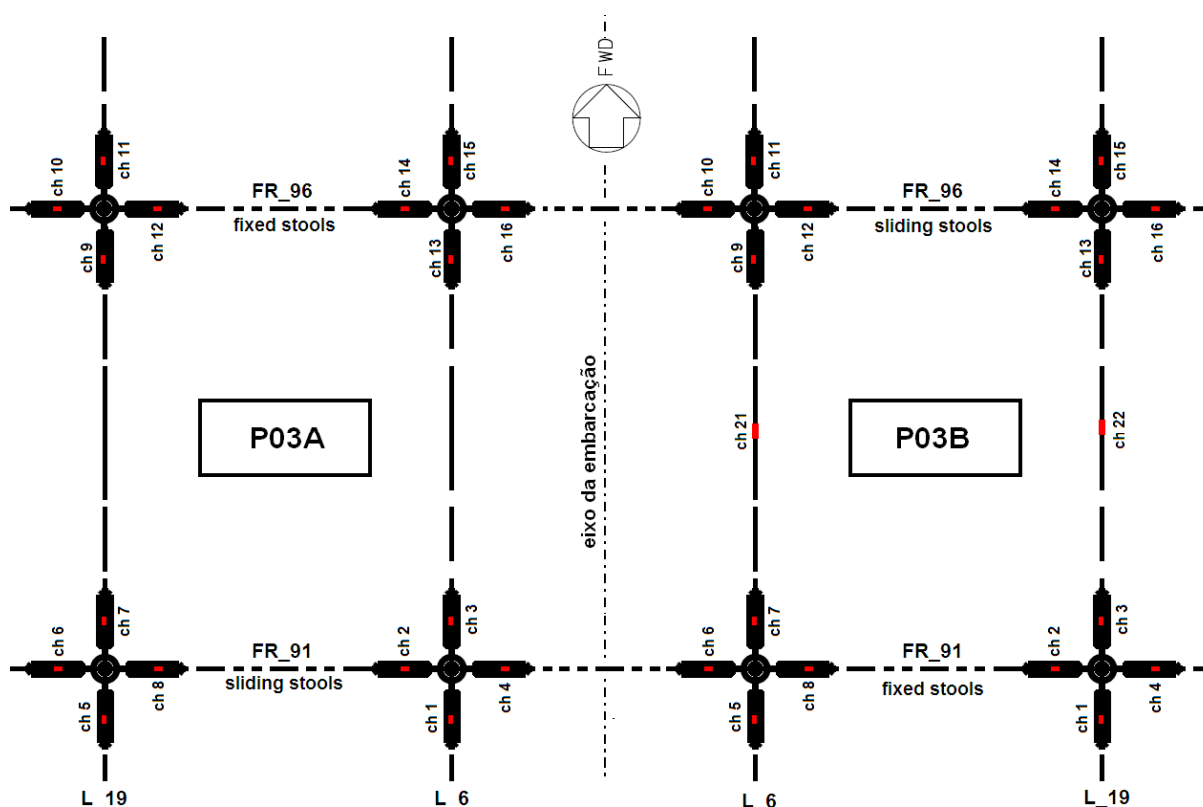


Figura 5.4 – Sistemática de identificação dos extensômetros

Os canais ch21 e ch22 não foram instalados no módulo P03A. Estes só foram instalados no P03B, após o seu assentamento, com o objetivo de se monitorar componente dinâmica das deformações nas vigas longitudinais do módulo. Os módulos P03A e P03B ficam um ao lado do outro na embarcação (ver Figura 3.2), o primeiro à bombordo e o segundo à boreste. Os *stools* de ambos se localizam sobre as mesmas estruturas transversais

(cavernas) FR91 e FR96. No módulo P03A os *stools* deslizantes estão sobre a caverna FR91, oposto do que acontece no P03B, no qual os *stools* deslizantes estão sobre a caverna FR96. Para ambos módulos a linha L_6 se refere a longitudinal mais próxima do eixo da embarcação e a L_19 se refere à longitudinal mais próxima do bordo.

5.1.2. INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO

Para monitoramento dos deslocamentos relativos nos *stools* deslizantes foram instalados transdutores de deslocamento do tipo LVDT – *Linear Variable Differential Transformer* ou Transformador Diferencial Linear Variável (Figura 5.5). A Figura 5.6 mostra em detalhe o aparelho de deslizamento e a instalação do transdutor. A opção por este tipo de transdutor se deu pela qualidade do sinal de saída como alta amplitude, linearidade e estabilidade. Assim como no caso dos extensômetros, a disponibilidade de soluções para condicionamento e transmissão de sinais também foi considerada.



Figura 5.5 – Transdutor de deslocamento tipo LVDT



Figura 5.6 – Instalação do LVDT em um *stool* deslizante

5.1.3. INSTALAÇÃO DOS ACELERÔMETROS

Com objetivo de avaliar qualitativamente os movimentos do navio, em especial aqueles segundo os eixos longitudinal e transversal (*pitch* e *roll*, respectivamente), foram instalados três acelerômetros uniaxiais dispostos ortogonalmente entre si, cada qual alinhado com os eixos da embarcação, assumindo como superfície de referência uma viga transversal do módulo P03B. Suas saídas em tensão (cujo intensidade é proporcional à aceleração

segundo seus respectivos eixos), forneceram uma idéia dos movimentos predominantes e de sua intensidade, o que mais tarde fora confirmado pelas deformações registradas. De fácil instalação e utilização (sem necessidade de amplificação e demais condicionamentos posteriores do sinal de saída), estes sensores acrescentaram importantes informações que foram utilizadas na análise das deformações registradas. A Figura 5.7 mostra a instalação dos três acelerômetros (em caixa própria) em uma viga transversal sob o módulo P03B.



Figura 5.7 – Instalação dos acelerômetros

5.1.4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para atender a demanda de varredura e registro de dezenas de canais de dados, foi especificado um equipamento próprio para o serviço. Este, em associação a um computador portátil, possibilitou o registro das informações com boa frequência de aquisição a qual foi limitada apenas por restrições no tamanho dos arquivos. Os canais de sinais analógicos foram conduzidos a um painel no qual convergiram para amplificadores multiplexadores (com uma única saída digital cujo valor alternava ciclicamente entre as múltiplas entradas analógicas). Alimentados por 24V, estes amplificadores tiveram a função de fornecer alimentação aos sensores, condicionar o sinal oriundo destes e transmitir o mesmo sinal de forma digital por meio de um único cabo até o sistema de aquisição de dados, localizado em sala segura e relativamente distante do local das medições. A Figura 5.8 ilustra a estrutura da rede de transmissão digital de sinais.

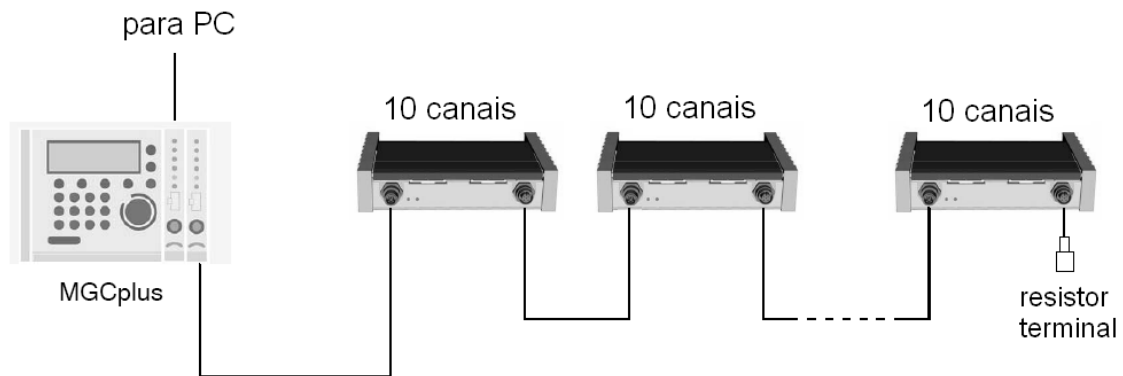


Figura 5.8 – Configuração da rede de transmissão de sinais até o sistema de aquisição de dados

Por se tratar de área não classificada (convés principal, sem risco de presença de gás) e considerando as baixíssimas potências envolvidas, a segurança da instalação não foi ameaçada. A agressividade do ambiente contra a preservação dos equipamentos foi levada em conta na especificação do grau de proteção de caixas de instalação, prensa-cabos e selagem de partes móveis (caso das hastes dos LVDT's). As figuras 5.9 e 5.10 mostram a instalação da caixa de amplificadores/condicionadores de sinais, para a qual convergiram todos os cabos de sinal analógico oriundos dos diversos sensores instalados.



Figura 5.9 – Localização da caixa de interligação dos sensores (amplificadores)



Figura 5.10 – Instalação dos amplificadores / condicionadores de sinais

Em uma sala de painéis elétricos afastada do P03A/B foi provida alimentação, por meio de uma tomada de uso geral devidamente protegida, para o computador, sistema de aquisição de dados e fonte de alimentação para o painel de amplificadores. Sendo assim, não houve risco contra a continuidade operacional da planta de processo e/ou riscos de acidentes contra integridade de equipamentos e pessoas. Passagens de cabos através do piso da sala de painéis foram feitas através de passagens previstas com selagem apropriada. As figuras 5.11 e 5.12 mostram a instalação do sistema de aquisição na sala de painéis (área segura).



Figura 5.11 – Instalação do sistema de aquisição de dados na sala de painéis



Figura 5.12 – Sistema de aquisição de dados e supervisão

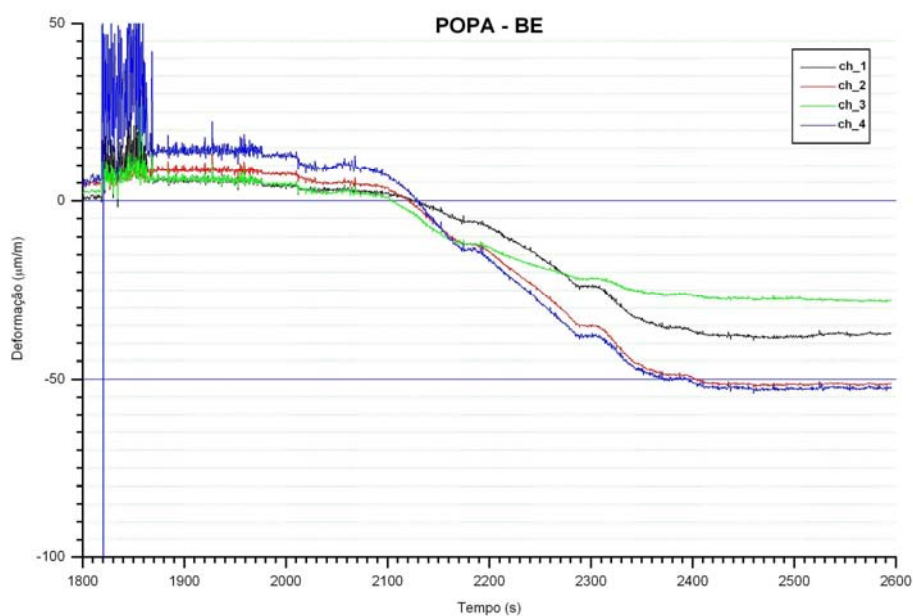
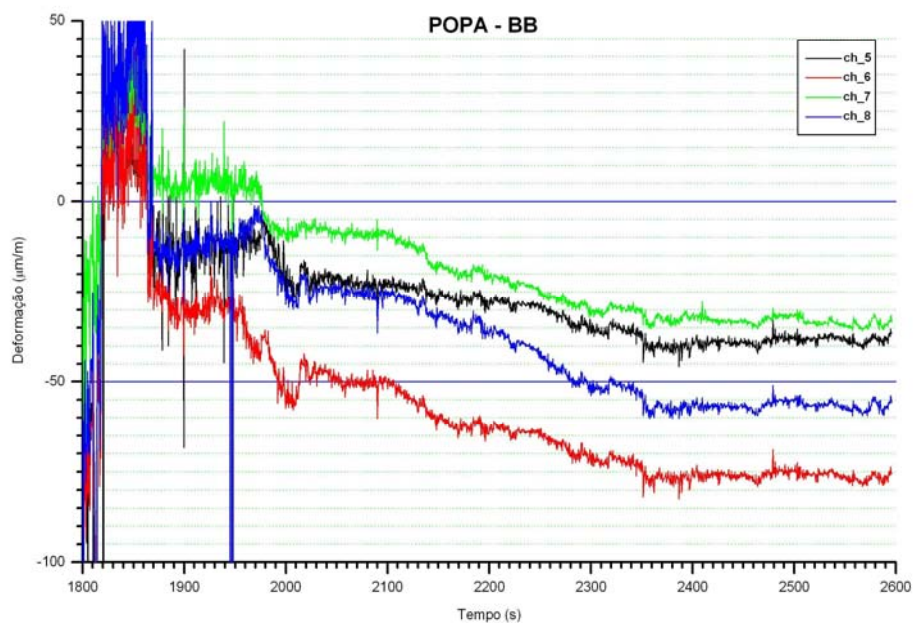
6. RESULTADOS

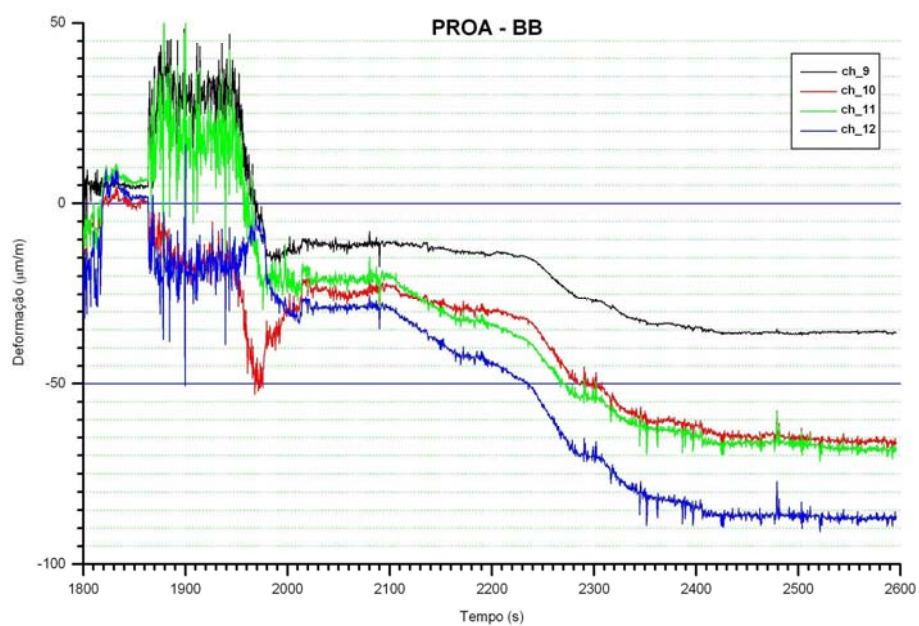
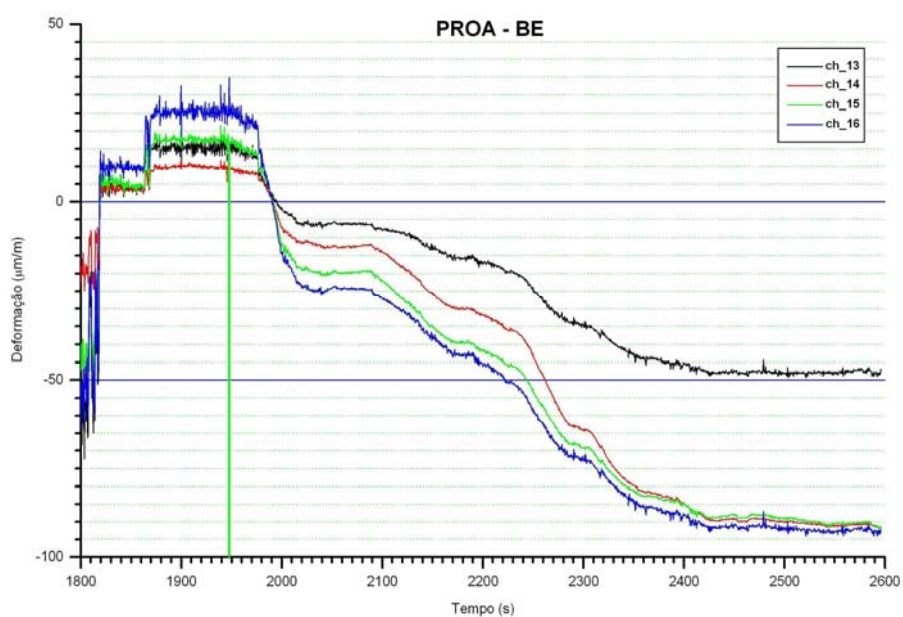
6.1. MEDIÇÕES DURANTE A INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS

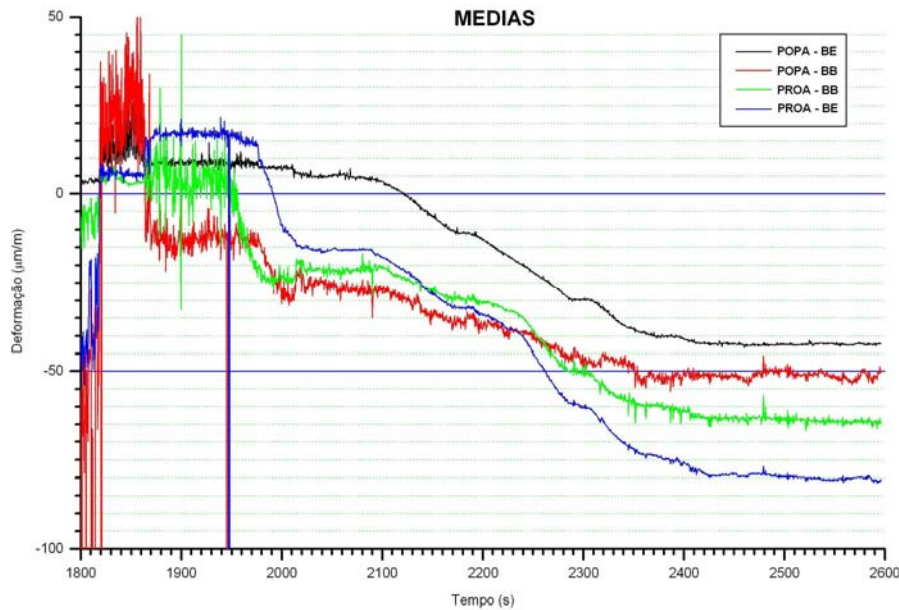
Estas medições foram realizadas com o objetivo de observar as deformações nas estruturas dos *stools* durante e depois da instalação dos módulos, para aquela condição dos tanques de lastro (variável que afeta o momento fletor na viga navio). Durante a realização das medições foram encontradas dificuldades com a qualidade do sinal (especialmente durante a aproximação da embarcação de içamento). O sinal apresentou grande quantidade de ruído que, somada às baixas amplitudes das deformações, prejudicaram um pouco a qualidade da informação. Os gráficos que serão apresentados a seguir (figuras 6.1 a 6.5), revelam o comportamento das estruturas dos *stools* do módulo P03A, durante a instalação de uma de três partes desse módulo (Separação de Óleo). Por conveniência da operação e limitações de carga dos guindastes, outras duas partes do mesmo módulo (Tratamento de Água Produzida e Trocadores de Calor) foram instaladas posteriormente. Este evento aconteceu em 28/11/2007 e o peso medido por uma empresa especializada foi de 1.400 toneladas. O calado da embarcação no estaleiro era na ocasião de aproximadamente 8m, metade do operacional igual a 16m.

Embora os dados nessa condição não ofereçam maior precisão, é possível concluir que as deformações médias sob os pontos analisados em nenhum deles superam $-100\mu\text{m/m}$. Com relação ao módulo P03B, apesar de tomadas precauções, não foi possível filtrar o ruído captado pelo sistema de aquisição de dados, o que não aconteceu com mesma magnitude na oportunidade da instalação do módulo P03A.

A sistemática de identificação dos canais referentes aos extensômetros é ilustrada na Figura 5.4.

Figura 6.1 – Deformações nos flanges do *stool* posição popa-boreste (P03A)Figura 6.2 – Deformações nos flanges do *stool* posição popa-bombordo (P03A)

Figura 6.3 – Deformações nos flanges do *stool* posição proa-bombordo (P03A)Figura 6.4 – Deformações nos flanges do *stool* posição proa-boreste (P03A)

Figura 6.5 – Médias das deformações por *stool* no módulo P03A

6.2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA – VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Para validação dos dados foram realizadas simulações numéricas dos *stools*. No modelo foram usados elementos tetraédricos quadriláteros com tamanho médio de 50mm. Foi imposta a condição de contorno de deslocamento nulo na base. A carga vertical é aplicada em forma de pressão uniforme sobre a placa de topo do *stool*. A Figura 6.6 a seguir ilustra a distribuição de tensões (equivalentes, segundo o critério de von Mises) no *stool* fixo do módulo P03A/B (sobre a longitudinal L6), submetido a uma carga centrada de 12.600kN. A carga empregada na simulação consta nos documentos de projeto (PETROBRAS/CENPES, 2007) como carga normal máxima. A Figura 6.7 mostra a distribuição de deformações na linha transversal ao flange que passa pelo ponto onde foi instalado o extensômetro (Maurício Vieira, 2009).

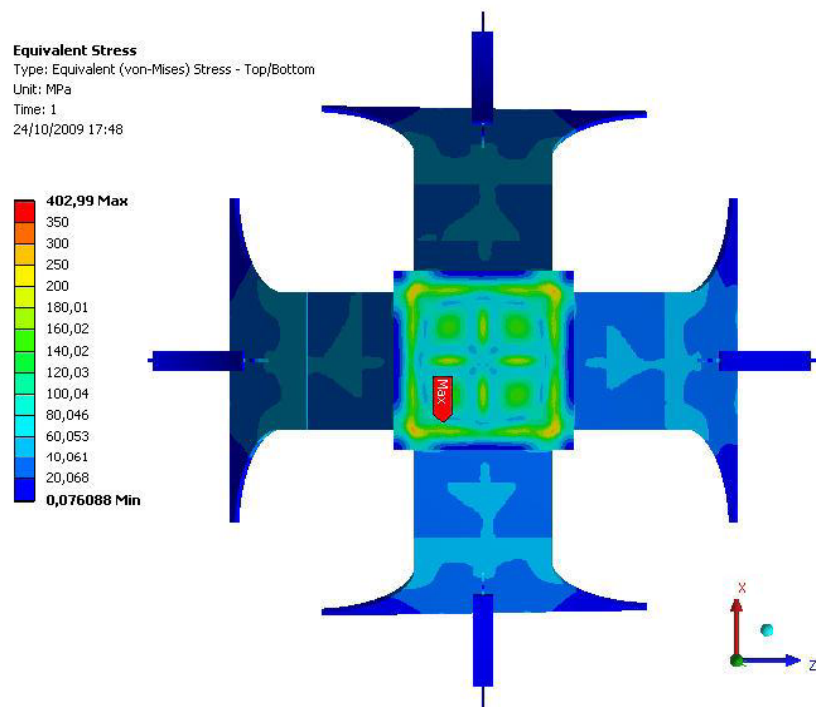


Figura 6.6 – Distribuição de tensões equivalentes para uma carga normal centrada de 12.600kN (+x: proa, +z: boreste)

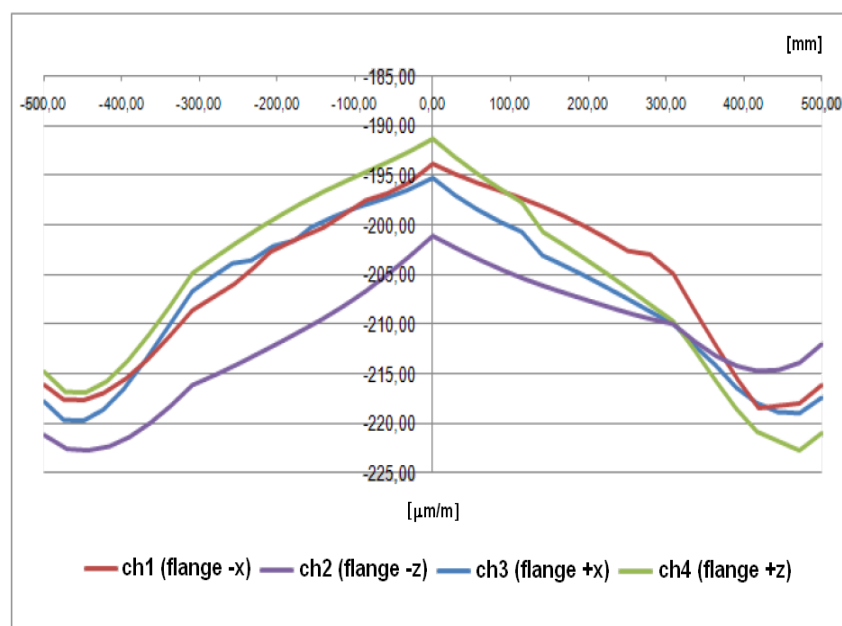


Figura 6.7 – Distribuição de deformações na linha transversal ao flange passando pela posição do extensômetro

Considerando linear a relação entre carga e deformação (faixa elástica), percebe-se que há razoável coerência entre os resultados numéricos e experimentais. Na simulação se

observa na posição do extensômetro sobre o flange uma deformação média de $196\mu\text{m/m}$ (192 a $202\mu\text{m/m}$), correspondente a aplicação de uma carga normal de 12.620kN . O *stool* fixo do módulo P03A sobre a longitudinal L6, está representado na Figura 6.4 pelos canais ch13 a ch16. Na Figura 6.6 a média de deformação para o referido *stool* está representada pela legenda PROA-BE. A média da deformação medida entre estes quatro canais é de aproximadamente $80\mu\text{m/m}$ ($-92,5\mu\text{m/m}$, $-92,5\mu\text{m/m}$, $-92,5\mu\text{m/m}$, $-47,5\mu\text{m/m}$). Admitindo uma distribuição homogênea de massa, tem-se 1.400 toneladas divididas por quatro pontos, 350 toneladas por *stool* (3.400kN), correspondendo a 27% do carregamento aplicado na simulação numérica (12.600kN). Considerando a mesma proporção entre a carga aplicada estimada e a carga empregada na simulação, agora referindo às deformações, a expectativa da deformação simulada ficaria em torno de $53\mu\text{m/m}$ ($0,27 \times 196\mu\text{m/m}$).

O desvio (de 53 para $80\mu\text{m/m}$) pode ser atribuído a alguns fatores: a posição do centro de gravidade, que afeta a distribuição de carga entre os *stools* (lembrando que os dados medidos se referem à instalação de uma de três partes que compõe o módulo P03A); desvios dimensionais (que podem induzir excentricidade de carga); influência de acidentes de forma; e as condições de contorno aplicadas ao modelo que não considera a transferência de esforços com origem no casco para o *stool* (engaste indeformável sob o *stool*).

6.3. MEDIÇÕES DINÂMICAS NA LOCAÇÃO DEFINITIVA

Como não se dispunha dos dados oceanográficos referentes à locação da P-53, para caracterização das condições ambientais sob as quais foram realizadas as medições de deformação, deslocamento e aceleração, foram utilizados dados medidos no mesmo período nas locações das plataformas P-50 (1.230m de lâmina d'água; 39,7 km de P-53), e P-43 (800m de lâmina d'água; 34,1 km de P-53). A Figura 6.8 mostra a posição da P-53 em relação a outras unidades da Bacia de Campos, entre elas P-43 e P-50. Por se tratar de águas profundas, a expectativa é de que os valores sejam aproximadamente os mesmos para a locação da P-53. Uma vez que o sistema de ancoragem utiliza *turret*, ela se alinha à resultante das condições ambientais (vento, onda, corrente), não mantendo aproamento constante ao longo do tempo. Não dispondo também de registros de aproamento da P-53, não foram utilizadas as informações de direção das ondas por não ser possível a determinação do ângulo de incidência delas sobre a embarcação. Pela instalação de acelerômetros, os quais permitiram

avaliar pelos movimentos da plataforma (*pitch* e *roll*), pode-se observar qualitativamente os efeitos das ondas, ora predominantemente atuantes na direção transversal, ora na longitudinal ao navio, fato que também ficou perceptível nas leituras de deformação nos *stools*.

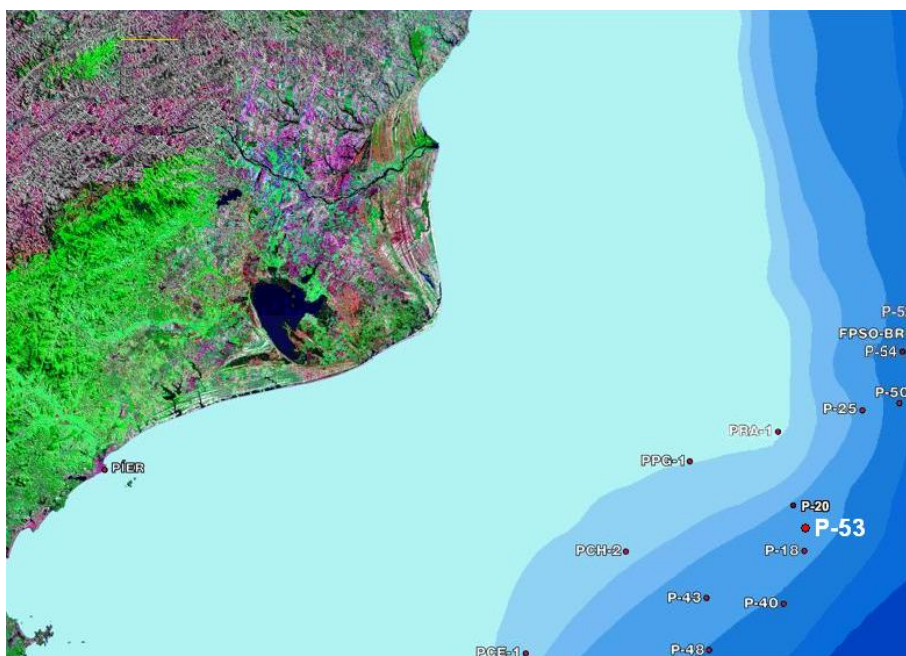


Figura 6.8 – Posição da plataforma P-53 em relação a outras unidades na Bacia de Campos

O gráfico a seguir (Figura 6.9) foi gerado a partir dos dados oceanográficos fornecidos pelo serviço de monitoramento oceanográfico OCEANOP da PETROBRAS. Foram anotadas uma vez por hora a altura significativa e período de onda, de 16/9 a 27/12/2009. A partir dele é possível visualizar que a plataforma experimentou a ação de ondas de altura superior a 3,5m, e períodos máximos entre 13 e 14s. Na janela entre as amostras 220 e 450 foram identificadas as condições de mar mais severas (concomitantemente os maiores períodos e alturas de onda), as quais coincidem com as maiores deformações registradas.

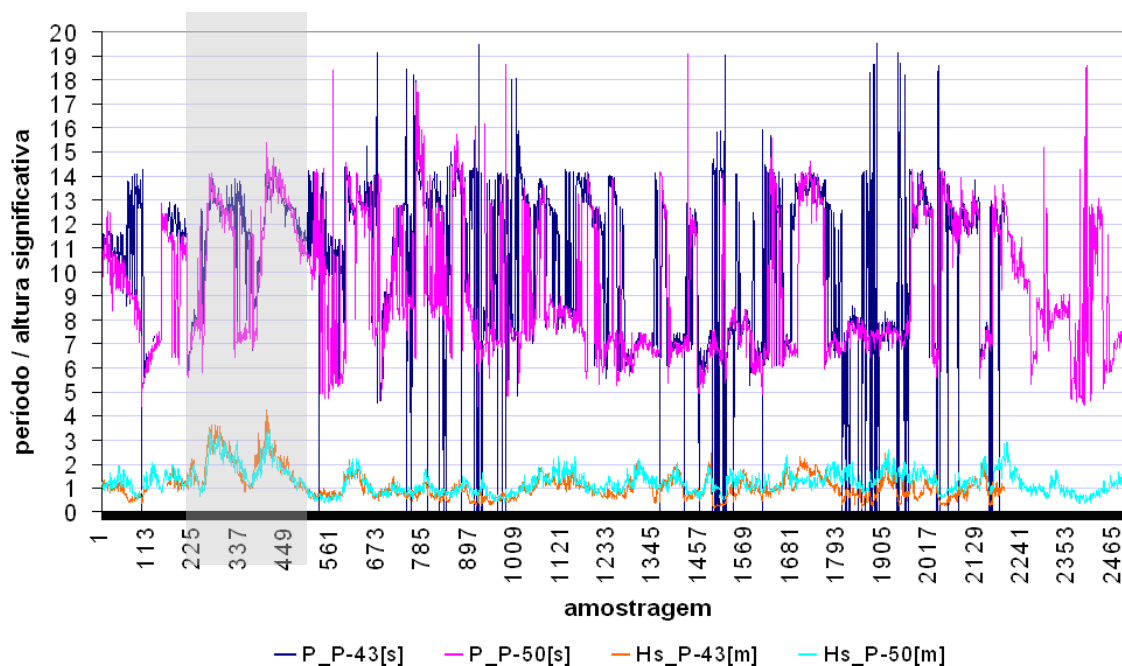


Figura 6.9 – Dados de altura significativa (H_s) e período (P) de ondas nas locações de P-43 e P-50

Mesmo sendo um período relativamente curto de observação, as condições mais críticas observadas cobrem boa parte do histórico de ocorrências na Bacia de Campos. Ondas com altura superior a 3,5m correspondem a pouco menos de 1% dos registros, assim como períodos superiores à 12s somam pouco mais de 2%, conforme especificação técnica utilizada no projeto da plataforma (CENPES, *Metoccean Data*, 2003). Ondas com alturas iguais ou maiores a 3m e períodos iguais ou superiores a 12s correspondem a menos que 0,3% das ocorrências.

A aquisição de dados de deslocamentos e deformações na locação final foi realizada entre 16/9/2009 e 27/12/2009. A frequência de amostragem utilizada foi de 2 amostras por segundo, sendo gravados dados durante 30min a cada quatro horas. Os dados apresentados em seguida correspondem apenas à parcela dinâmica das deformações (valor absoluto subtraído a média no intervalo amostral). As medições foram feitas com a planta em operação e a embarcação com calado operacional constante de 16m.

Durante todo o período de monitoramento não foram observados deslocamentos relativos nos *stools* deslizantes. A seguir são apresentadas duas ocorrências, identificadas como as mais críticas entre todos os eventos registrados. Para melhor ilustração foram

apresentados intervalos de 60s, dentro dos quais foram observadas as maiores amplitudes de deformações. Em cada gráfico, são apresentadas deformações de dois canais do mesmo *stool*, referentes aos extensômetros sobre a mesma direção em flanges opostos.

O caso a seguir (amostragem 258, de 25/9, 17h) ilustra o efeito da incidência de ondas com direção predominantemente paralela à embarcação. Para aquele intervalo de amostragem, a altura significativa da onda variou entre 2,3 e 3m e seu período ficou em torno de 12s (segundo os dados oceanográficos fornecidos). Analisando os gráficos (figuras 6.10 a 6.18), podem ser feitas as seguintes observações:

- Deformações nos flanges em posições opostas no mesmo *stool* têm aproximadamente mesma amplitude e defasagem de 180° (quando um sofre compressão, o outro sofre tração aproximadamente com mesma intensidade);
- Deformações nos flanges de mesma posição relativa, em *stools* diferentes e sobre mesma longitudinal, estão defasados de 180° . Os flanges internos ao módulo têm mesmo sinal e contrários aos externos, indicando flexão da viga navio (vide ilustração da Figura 6.19);
- Deformações indicadas pelos canais ímpares (instalados sobre as longitudinais da embarcação) são significativamente superiores àsquelas indicadas pelos canais pares (instalados sobre as transversais da embarcação);
- O maior registro de deformação (dinâmica) foi aproximadamente $125\mu\text{m/m}$ no canal ch15 (Figura 6.16);
- Na Figura 6.18 são mostradas as deformações nas duas vigas longitudinais do módulo, solicitadas de forma alternada em tração e compressão. As duas estão em fase e com igual amplitude, de aproximadamente $30\mu\text{m/m}$.

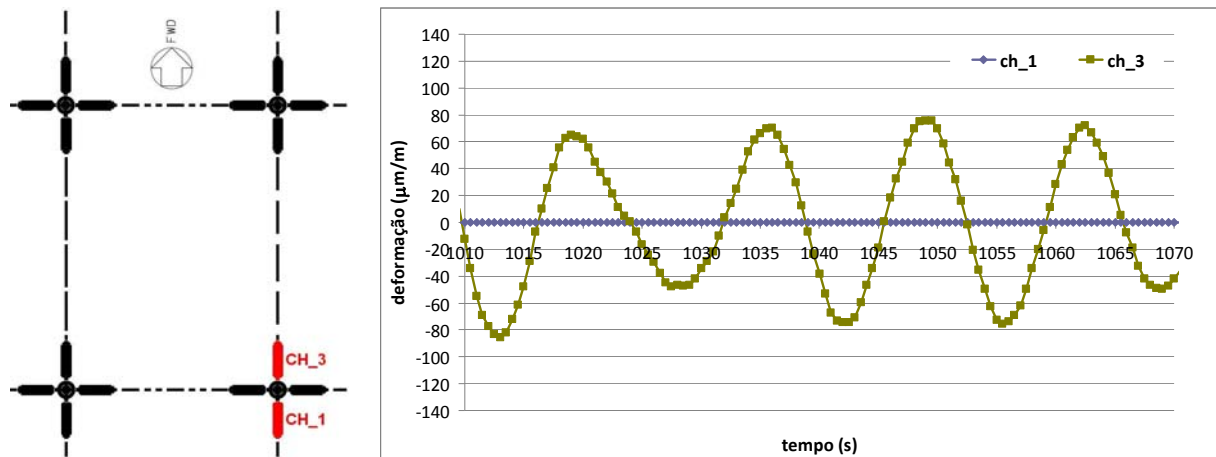


Figura 6.10 – Deformações nos canais ch1 (danificado) e ch3 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h)

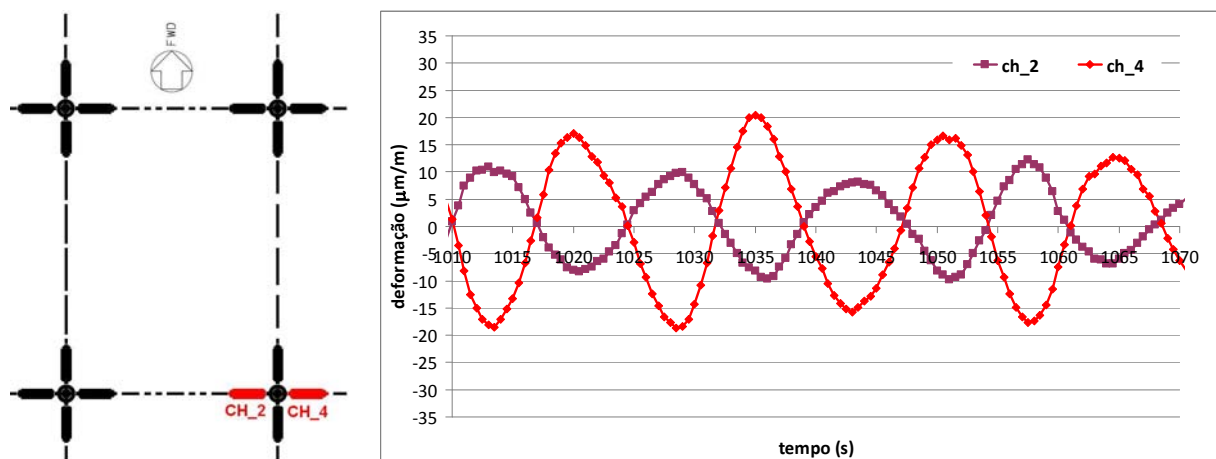


Figura 6.11 – Deformações nos canais ch2 e ch4 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h)

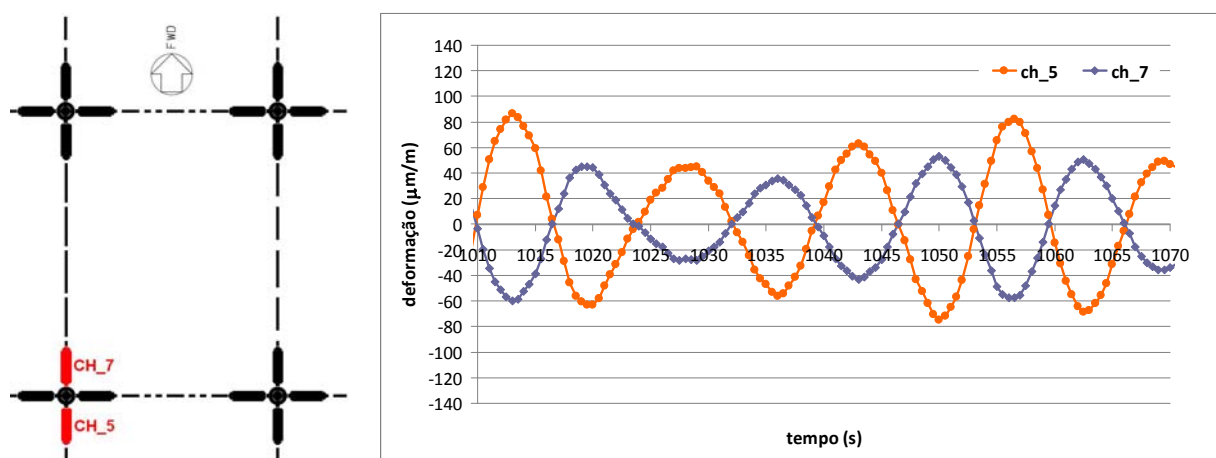


Figura 6.12 – Deformações nos canais ch5 e ch7 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h)

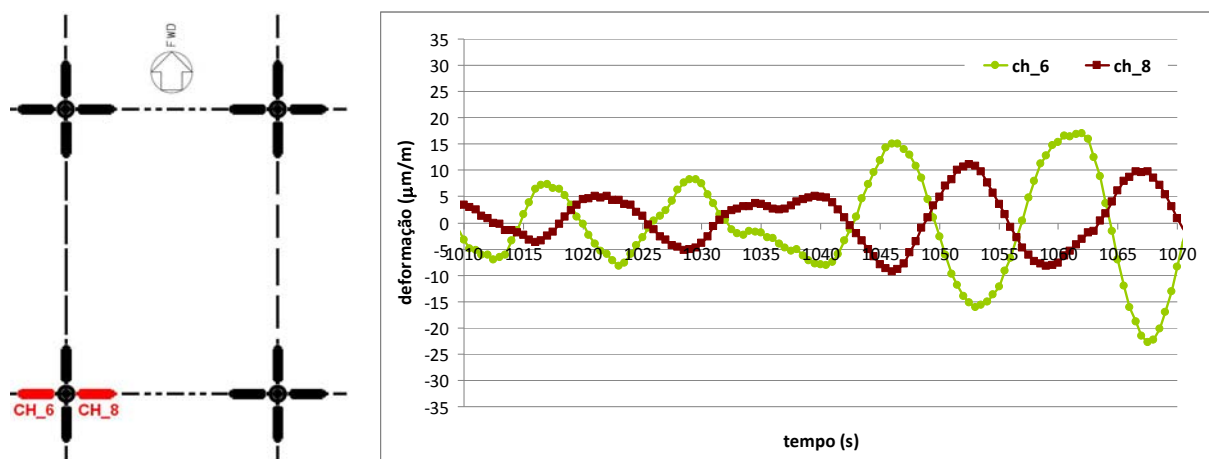


Figura 6.13 – Deformações nos canais ch6 e ch8 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h).

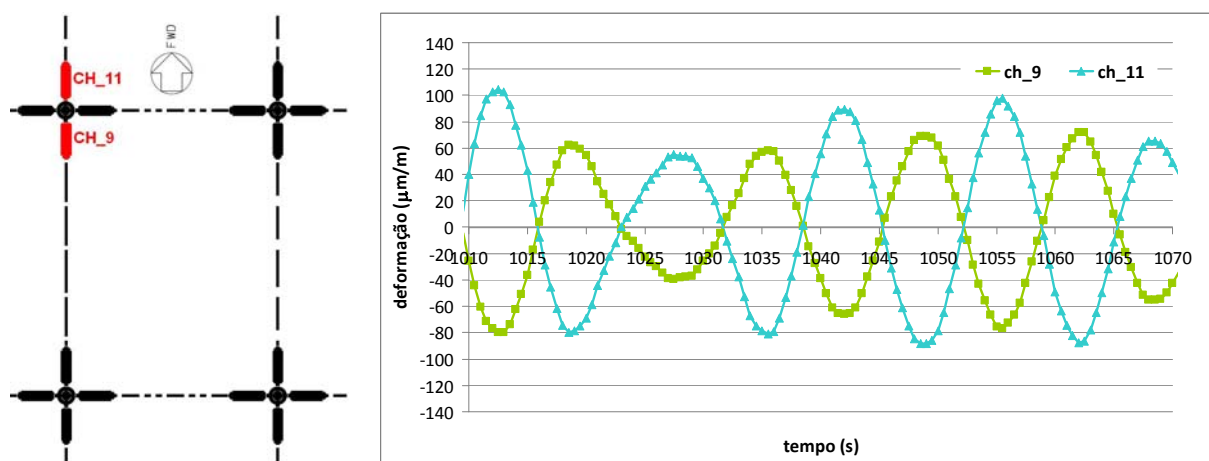


Figura 6.14 – Deformações nos canais ch9 e ch11 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h).

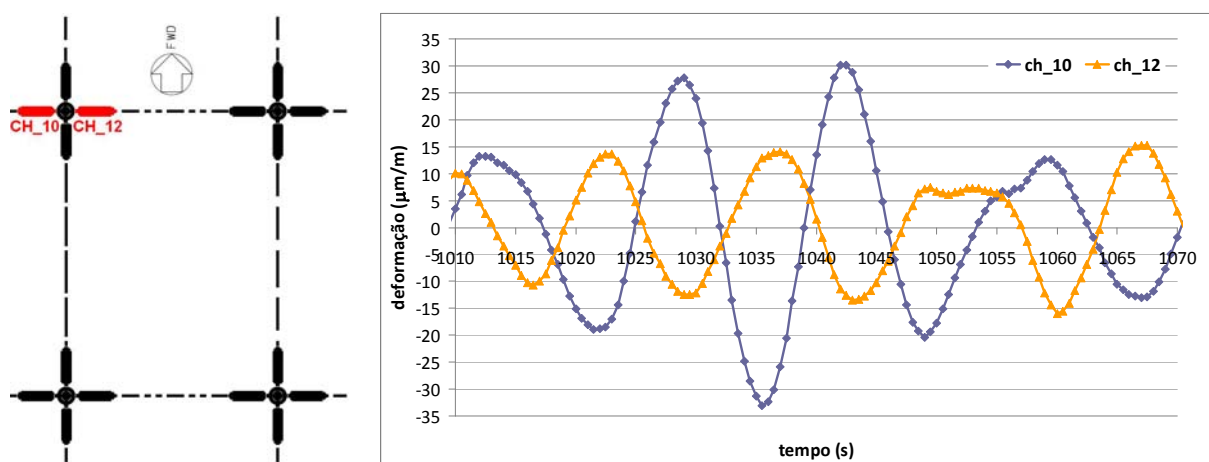


Figura 6.15 – Deformações nos canais ch10 e ch12 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h).

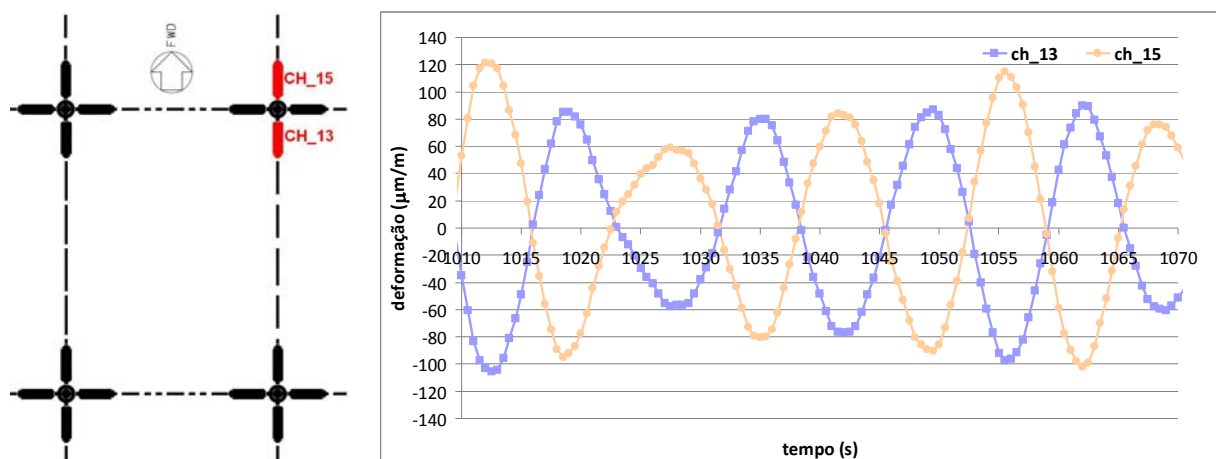


Figura 6.16 – Deformações nos canais ch13 e ch15 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h)

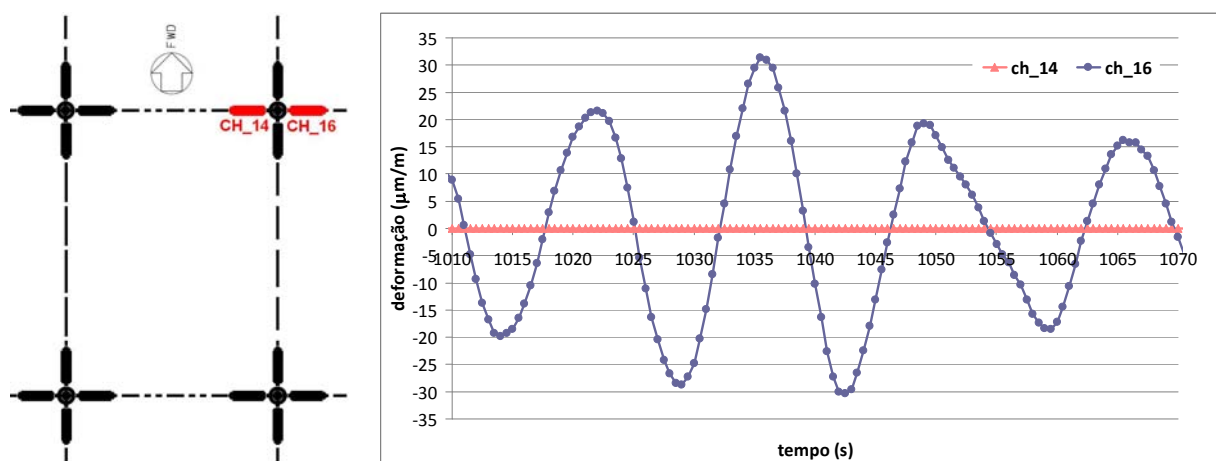


Figura 6.17 – Deformações nos canais ch14 (danificado) e ch16 do P03B
(amostragem 258, de 25/9, 17h)

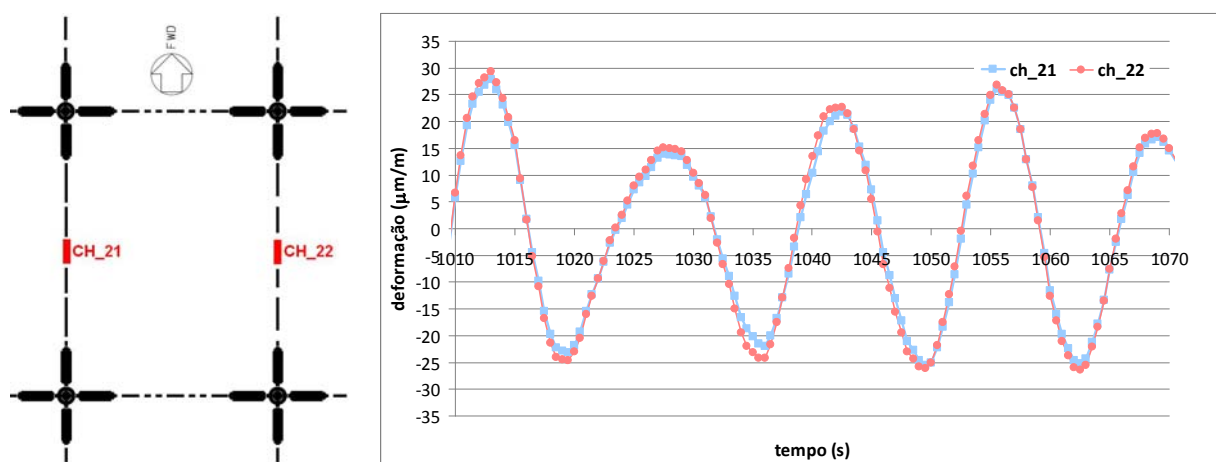


Figura 6.18 – Deformações nos extensômetros das vigas longitudinais do módulo P03B -
ch21 e ch22 (amostragem 258, de 25/9, 17h)

O período de oscilação do sinal está coordenado com o período da onda, podendo se atribuir a ela a fonte de excitação para os esforços observados (aproximadamente 13s). A Figura 6.19 ilustra o modo de deformação do convés sob o P03B e a transferência de esforços axiais às vigas longitudinais do módulo, com base nas deformações dos flanges nas posições sobre as longitudinais da embarcação. Neste caso, há a sobreposição dos efeitos de flexão do navio e das forças de inércia (devido à influência do efeito da aceleração de *pitch*).

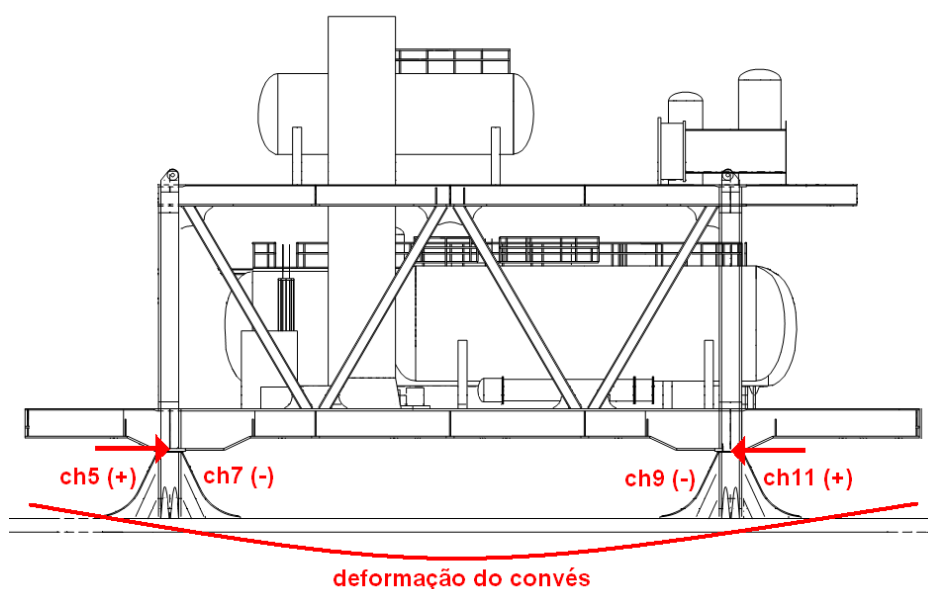


Figura 6.19 – Modo de deformação do convés sob o módulo P03B e esforço axial sobre as vigas longitudinais do módulo (referido ao instante 1.055s da amostragem 258)

A Figura 6.20 mostra uma comparação entre as amplitudes de aceleração de *pitch* e *roll*. O gráfico representa a variação dos sinais de saída dos acelerômetros em volts, proporcionais à aceleração segundo seus respectivos eixos. A partir dos gráficos de deformações (figuras 6.10 a 6.18), percebe-se que na direção longitudinal as deformações foram significativamente mais altas que na transversal à embarcação. Mesmo que aparentemente as acelerações de *roll* e *pitch* tenham alcançado magnitudes próximas uma da outra, o efeito da deflexão da viga navio teve maior contribuição sobre as deformações.

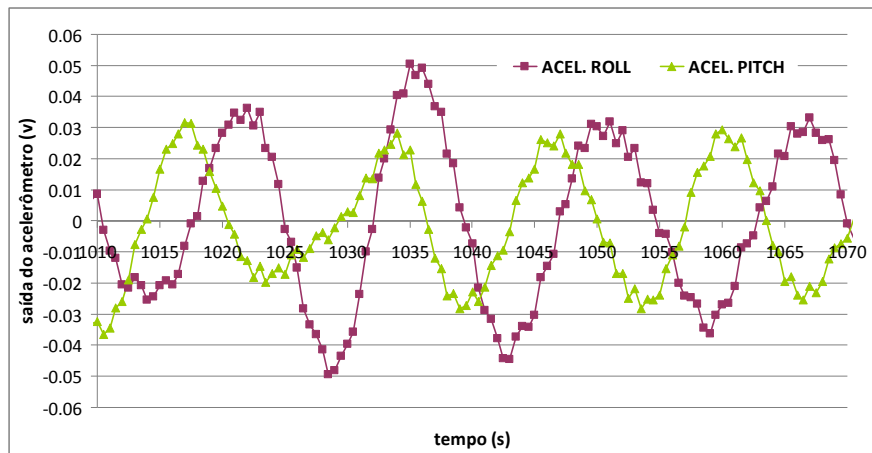


Figura 6.20 – Variação do sinal de saída dos acelerômetros (*pitch* e *roll*) - amostragem 258

O caso a seguir (amostragem 410, de 01/10, 1h) ilustra o efeito da incidência das ondas na direção predominantemente transversal à embarcação. Para aquele intervalo de amostragem, a altura significativa da onda variou entre 2,75 e 3m e seu período ficou em torno de 14s (segundo os dados oceanográficos fornecidos). Analisando os gráficos (figuras 6.21 a 6.29), podem ser feitas as seguintes observações:

- Deformações nos flanges opostos no mesmo *stool* têm aproximadamente mesma amplitude e defasagem de 180° (quando um sofre compressão, o outro sofre tração aproximadamente na mesma intensidade);
- Deformações nos flanges de mesma posição relativa em *stools* diferentes sobre a mesma transversal (caverna) estão em fase (vide ilustração da Figura 6.30);
- Deformações indicadas pelos canais pares (instalados sobre as transversais da embarcação) são significativamente superiores àquelas indicadas pelos canais ímpares (instalados sobre as longitudinais da embarcação);
- O maior registro de deformação foi de aproximadamente $130\mu\text{m/m}$ no canal ch16 (Figura 6.28);
- As deformações nas vigas longitudinais do módulo não superam $8\mu\text{m/m}$ (Figura 6.29).

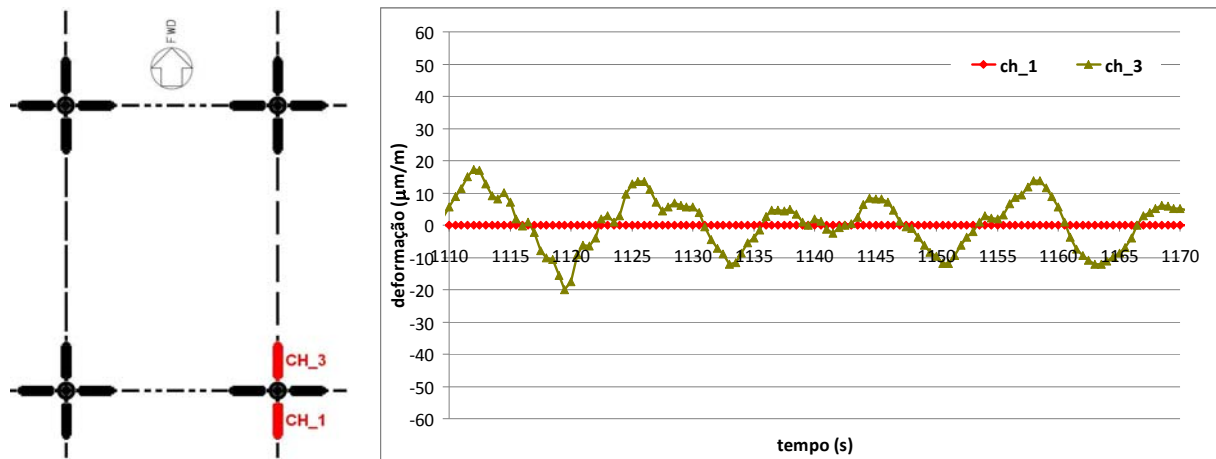


Figura 6.21 – Deformações nos canais ch1 (danificado) e ch3 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

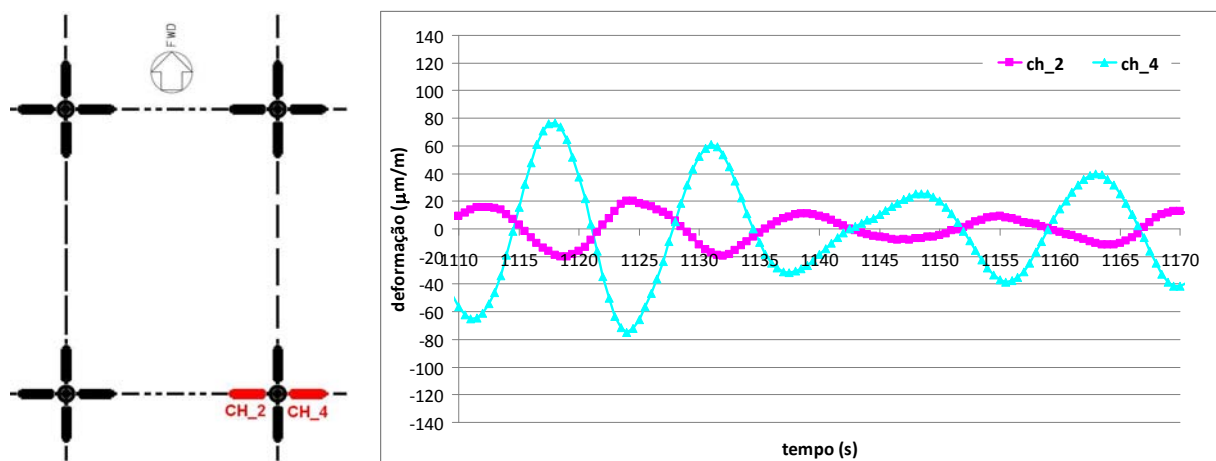


Figura 6.22 – Deformações nos canais ch2 e ch4 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

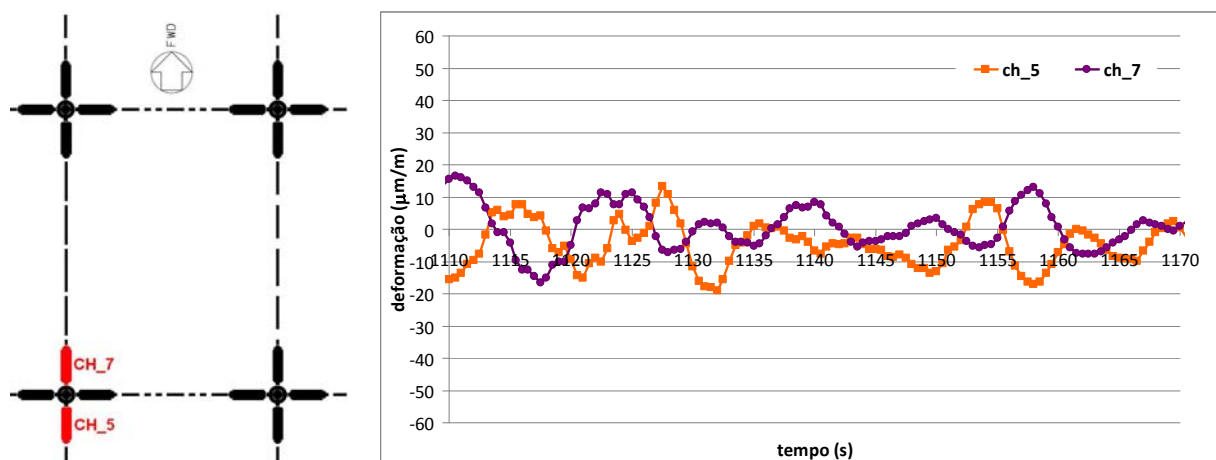


Figura 6.23 – Deformações nos canais ch5 e ch7 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

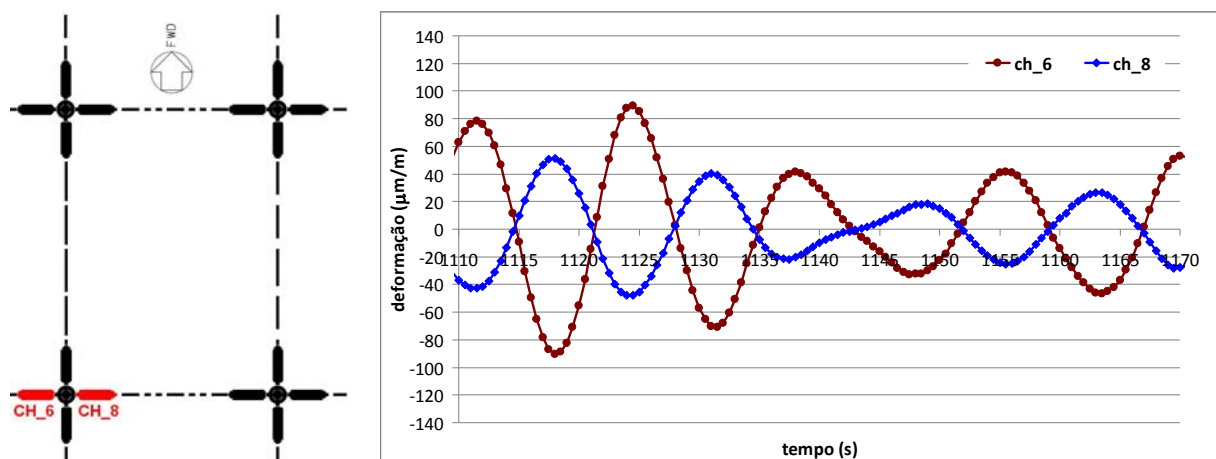


Figura 6.24 – Deformações nos canais ch6 e ch8 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

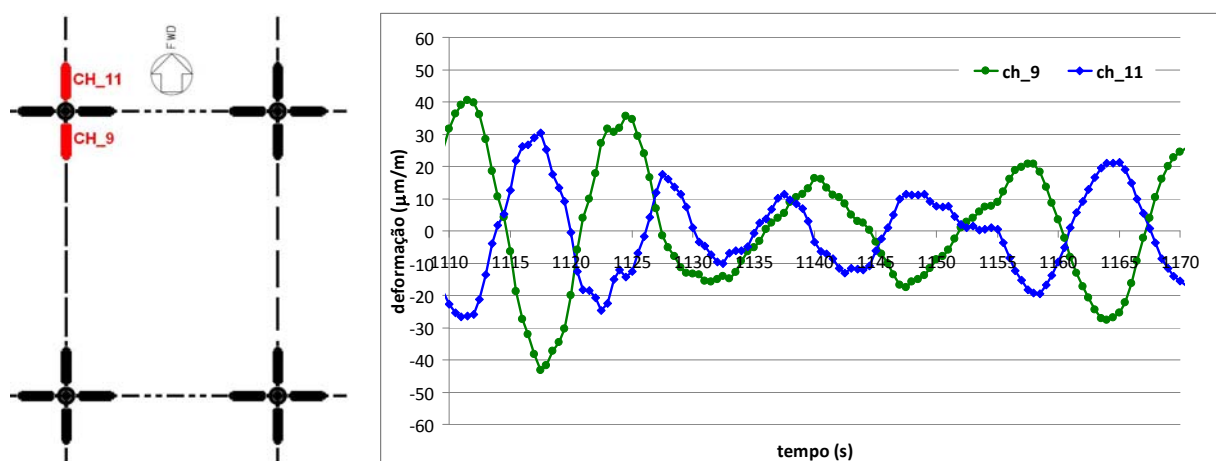


Figura 6.25 – Deformações nos canais ch9 e ch11 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

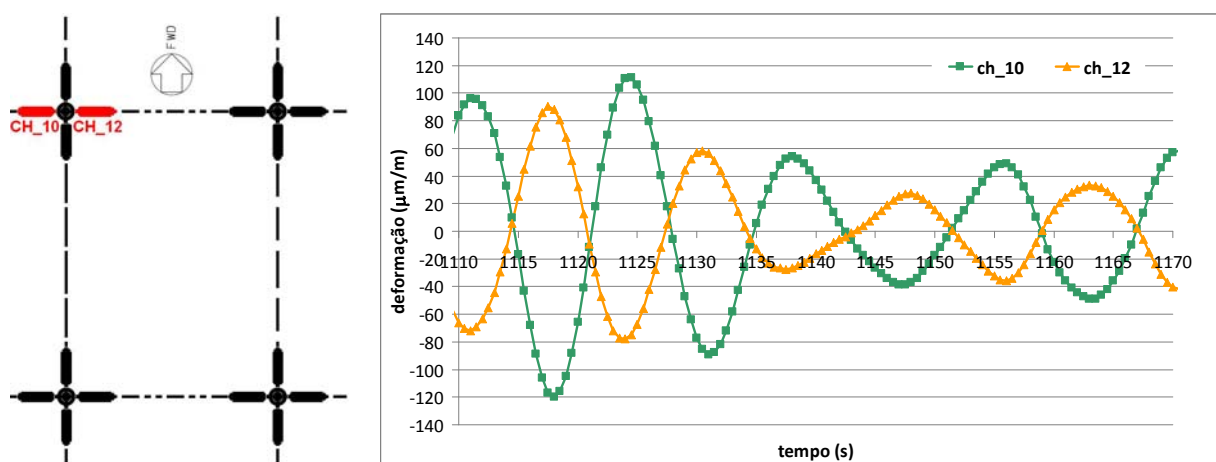


Figura 6.26 – Deformações nos canais ch10 e ch12 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

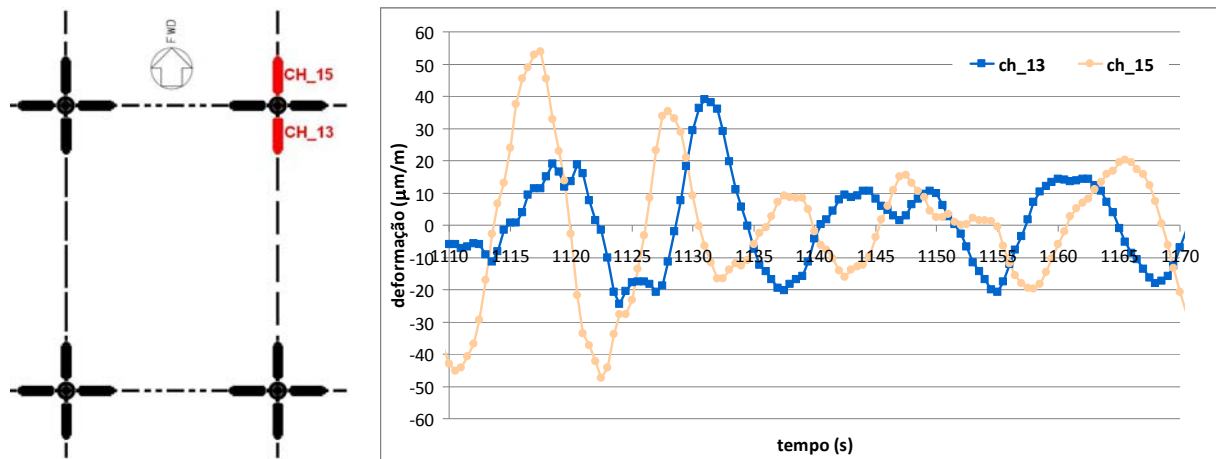


Figura 6.27 – Deformações nos canais ch13 e ch15 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

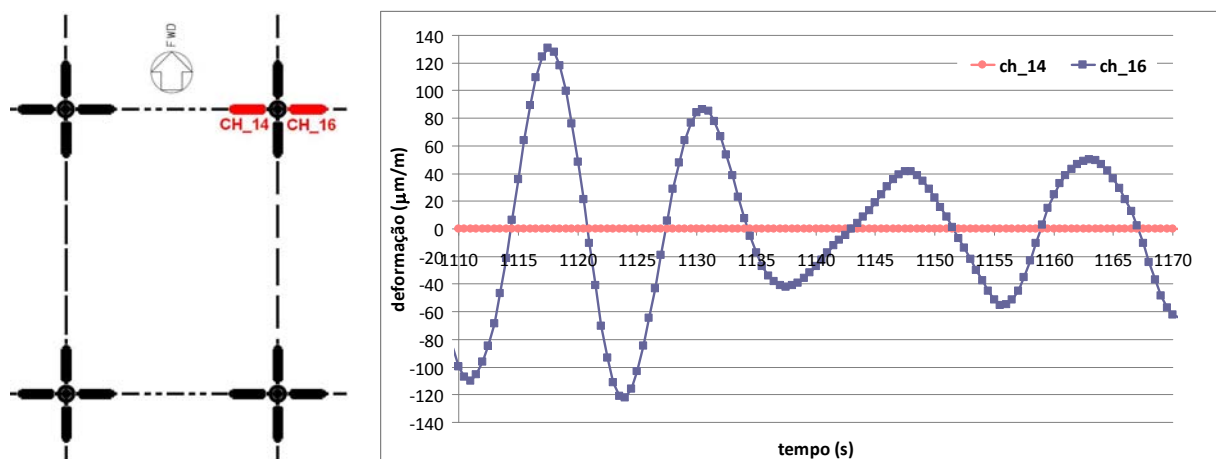


Figura 6.28 – Deformações nos canais ch14 (danificado) e ch16 do P03B
(amostragem 410, de 01/10, 1h)

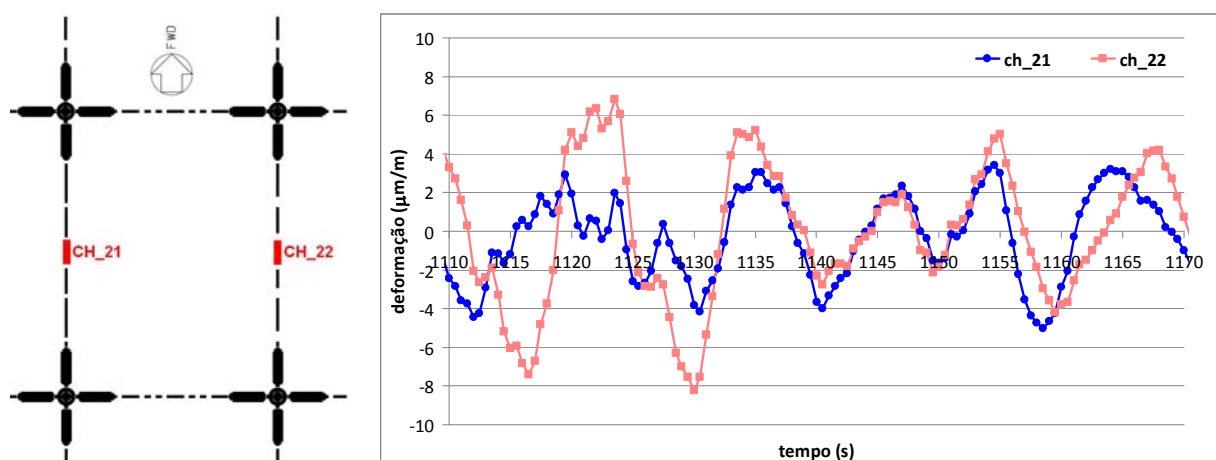


Figura 6.29 – Deformações nos extensômetros das vigas longitudinais do módulo P03B -
ch21 e ch22 (amostragem 410, de 01/10, 1h)

Assim como no caso anterior, o período de oscilação do sinal está coordenado com o período da onda, podendo se atribuir a ela como fonte de excitação para os esforços observados (aproximadamente 13,5s). A Figura 6.31 a seguir, ilustra o modo de deformação dos *stools* no plano transversal à embarcação, com base nos sinais das deformações nos flanges nas posições sobre a mesma transversal (caverna). Neste caso, predomina a influência de forças de inércia devido ao efeito da aceleração de *roll*. Nessa mesma amostragem, as maiores deformações nos flanges sobre as longitudinais não passaram de 50% da maior deformação registrada, e nas vigas longitudinais do módulo alcançaram somente 8 μ m/m.

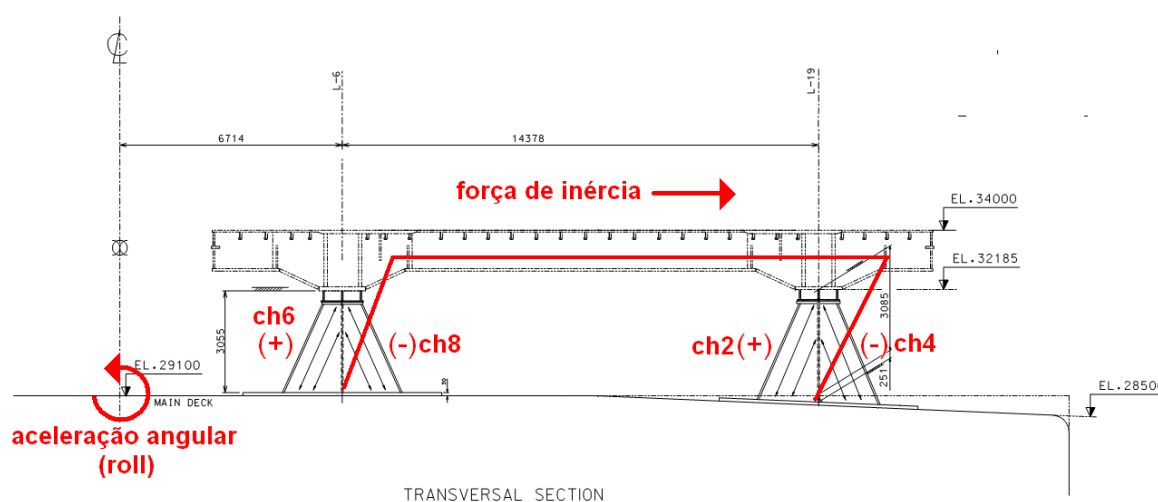


Figura 6.30 – Modo de deformação nos *stools* da transversal FR96, do P03B (referido ao instante 1.125s da amostragem 410)

Através da Figura 6.31 é possível constatar que a aceleração de *roll* foi predominante pela diferença de amplitudes entre as saídas dos acelerômetros. A direção da onda em relação ao navio foi predominantemente transversal.

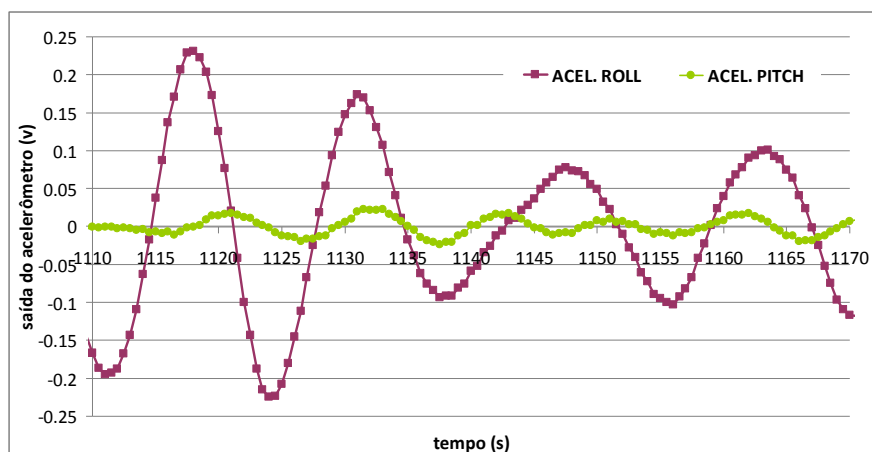


Figura 6.31 – Variação do sinal de saída dos acelerômetros (*pitch* e *roll*) - amostragem 410

A não ocorrência de deslocamentos relativos pode ser justificada, como já anteriormente mencionado, pelo elevado peso e alto coeficiente de atrito, e as características das ondas às quais a embarcação foi submetida. Os casos discutidos anteriormente foram identificados como as condições mais severas registradas durante todo período no qual foi realizado o monitoramento. Tomando como referência a Figura 6.18, que mostra que a deformação nas vigas longitudinais não excede a $30\mu\text{m/m}$, a força axial correspondente, usando a mesma hipótese apresentada no capítulo 5, não supera 140kN. Este valor é muito menor do que a força tangencial estimada sobre a mesa do *stool* sob as condições consideradas no projeto (3.340 kN), ou mesmo a força mínima estimada para força de atrito nas condições mais favoráveis ao deslizamento (2.625kN). Com base nestas informações, pode-se concluir que, nas condições em que foi realizado o monitoramento, para os módulos sob análise, a não ocorrência de deslizamento não implicou em um incremento significativo na deformação das vigas longitudinais dos módulos.

7. CONCLUSÃO

O escopo deste trabalho é restrito à análise das estruturas de apoio dos módulos da planta de processo da plataforma P-53, tal como projetadas e construídas, sem qualquer interferência no projeto básico destas estruturas. A referida análise se deu através da determinação experimental das deformações e deslocamentos nos *stools* da P-53. Para tal foi implementado um sistema de aquisição de dados para o qual foram instalados 75 sensores entre extensômetros, transdutores de deslocamento e acelerômetros. Para o desenvolvimento deste trabalho foram mobilizados recursos do Laboratório de Ensaios Mecânicos da FURG com o apoio da PETROBRAS. A equipe de trabalho ainda foi composta por 10 bolsistas do curso de graduação em Engenharia Mecânica da FURG.

Como foi evidenciado no curso deste trabalho, pode-se perceber os baixos níveis de deformação medidos tanto sobre os flanges dos *stools* como nas vigas longitudinais dos módulos sobre eles instalados. Não foram registrados deslocamentos relativos durante todo o período de monitoramento. As leituras de deformações confirmaram o comportamento da viga navio sob flexão induzida pelas condições de mar, porém, mesmo não havendo deslocamentos relativos nos *stools* deslizantes, as deformações registradas ficaram muito distantes das deformações esperadas, tomando como referência as condições consideradas no projeto básico. A plataforma também experimentou a ação de ondas incidindo na sua transversal. Nesta ocasião foram registradas deformações nessa direção da mesma ordem de grandeza daquelas medidas segundo a direção longitudinal da embarcação. Estas últimas provavelmente associadas a forças de inércia induzidas pela aceleração de *roll*. Os casos acima citados foram identificados como as condições mais severas registradas.

A não ocorrência de deslizamento pode ser justificada pelo elevado peso dos módulos e alto coeficiente de atrito associados, e a baixa magnitude dos esforços estimados nas condições ambientais em que se deu o monitoramento. Considerando o peso dos módulos e o coeficiente de atrito (determinado experimentalmente neste trabalho), e a força tangencial máxima sobre a mesa do *stool*, estimada a partir dos deslocamentos previstos no projeto

básico caso restritos, pode-se concluir que, nestas condições, a ocorrência de deslocamentos relativos é mais provável para módulos mais leves, e improvável, ou até impossível, para módulos mais pesados.

Embora haja uma grande quantidade de variáveis influenciando sobre a estrutura da embarcação e os módulos sobre ela, este pequeno monitoramento ajudou na compreensão do comportamento destas estruturas e suas fontes de geração. É importante lembrar que as condições previstas em projeto não foram experimentadas. Por essa razão não é possível comparar os resultados medidos com aqueles disponibilizados pelo projeto básico, que por sua vez considerou condições diferentes daquelas nas quais ocorreram os registros. Também não fez parte do escopo deste trabalho a análise de resistência destas estruturas. Fica como sugestão para um trabalho futuro a simulação numérica do comportamento destas estruturas nas condições ambientais e operacionais em que foram realizados estes registros, com o objetivo de incrementar a credibilidade das informações aqui apresentadas.

Devido ao fato da P-53 não armazenar óleo, não foi possível avaliar a influência da variação do nível de carregamento dos tanques de carga da embarcação nas estruturas dos *stools* e dos módulos por eles suportados. Outra sugestão para novos trabalhos é a realização de medições de deformação e deslocamentos relativos, tal como conduzido neste trabalho, em unidades do tipo FPSO, com o intuito de se analisar os efeitos sobre estas estruturas devido aos ciclos de carga e descarga dos tanques da plataforma.

Apesar das dificuldades de se desenvolver uma pesquisa que concorre com uma obra de construção e montagem de uma plataforma de produção de petróleo, boa parte das expectativas foi atendida. A urgência para instalação dos extensômetros antes do assentamento dos módulos sobre a plataforma (quando o início do projeto tinha pouco menos de dois meses); a preservação da instalação seriamente prejudicada pela obra em plena atividade; a janela de 18 meses entre as primeiras medições no canteiro e a instalação dos equipamentos faltantes para o início das medições dinâmicas na locação final; as dificuldades para embarque dos bolsistas para conclusão da instalação do sistema de aquisição de dados (que acabou sendo parcial), tendo em vista as atividades de completação mecânica e testes da plataforma em operação e com todas as restrições do trabalho *offshore*; foram as principais limitantes do trabalho.

Convém lembrar que os resultados apresentados dizem respeito ao projeto estrutural

aplicado à plataforma P-53. Mesmo com bastantes restrições no que se refere à grande quantidade de variáveis de influência, das quais grande parte fora impossível serem avaliadas, espera-se que as informações produzidas nesta pesquisa auxiliem bastante os projetistas, na revisão de conceitos de projeto e qualitativamente quando da tomada de decisões. Vale ressaltar que os resultados tem importância para o projeto de FPU's baseados em cascos tipo navio ou balsão, onde não são previstas deformações induzidas por variação de carregamento dos tanques de carga da embarcação. Para a análise de fadiga, na qual não são tomadas como referência as condições ambientais extremas e sim as condições médias, a comprovação do não ocorrência de deslocamentos relativos nos *stools* deslizantes é uma informação importante para a análise de fadiga, uma vez que para os fins desse tipo análise, os apoios deslizantes podem ser considerados como fixos. A partir destas observações também, os dispositivos de deslizamento podem ser melhorados ou até suprimidos, desde que implementadas as modificações necessárias. Em uma atividade cuja demanda por novas unidades de produção *offshore* está muito estimulada, especialmente devido às recentes descobertas de campos gigantes no Brasil, tais informações podem ser de grande valor para os numerosos futuros empreendimentos.

ANEXO A: DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE ATRITO

A.1. OBJETIVO

O objetivo deste experimento foi a determinação do coeficiente de atrito, considerando duas superfícies de aço sob diferentes condições de acabamento superficial, descritas qualitativamente. Há o interesse em se estimar os limites máximo e mínimo para aplicação na análise do funcionamento dos aparelhos de deslizamento dos *stools* deslizantes, empregados no sistema de suportes de módulos da planta de processo da plataforma P-53.

A.2. METODOLOGIA

Para atender o objetivo do experimento, foi implementado um dispositivo para ensaio em laboratório. O mesmo se constitui por um equipamento que pressiona duas chapas de aço (fixas), entre as quais uma terceira (móvel) é empurrada por uma prensa hidráulica. A força normal às chapas é determinada pelo aperto de parafusos e medida por meio de uma célula de carga. Conhecida a força que faz com que a chapa móvel deslize, é estimada a força de atrito e, através da razão entre esta e a força normal (previamente conhecida), se obtém o valor do coeficiente de atrito. No sentido de se estabelecer uma faixa entre as condições mais e menos favoráveis ao deslizamento, foram utilizadas chapas de aço com diferentes graus de acabamento superficial: lixada e como laminada (levemente oxidada). Não foi testada uma condição de oxidação severa pois não havia disponibilidade de chapas nessa condição e a reprodução dessa condição demandaria tempo ou recursos suficientes para aceleração da corrosão.

A Figura A.1 a seguir ilustra o diagrama do corpo livre para o dispositivo de ensaio, através do qual é determinado o valor da força de atrito (equações A.1 e A.2).

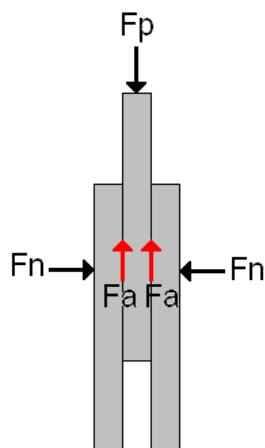


Figura A.1 – Diagrama do corpo livre para o dispositivo de ensaio

$$F_a = \frac{F_p}{2} \quad (\text{A.1})$$

$$\mu = \frac{F_a}{F_n} \quad (\text{A.2})$$

Onde: F_p – força aplicada pela prensa (kgf);

F_a – força de atrito (kgf)

F_n – força normal à superfície das chapas (kgf);

μ – coeficiente de atrito.

Discriminação dos componentes empregados:

- Duas chapas de aço de 3/8” (chapas externas, que constituem apenas a estrutura do dispositivo não participando das superfícies de atrito ensaiadas);
- Uma chapa de “preenchimento” (para fazer a pressão na célula de carga);
- Uma célula de carga;
- Duas chapas de aço de 3/4” (chapas fixas que serão atritadas por uma terceira móvel);
- Uma chapa de aço de 3/8” (chapa móvel);
- Duas chapas auxiliares para compressão;
- Quatro parafusos de 3/4”, com arruelas de pressão e porcas.

Através das figuras de A.2 a A.5, é apresentada a seqüência de montagem do referido dispositivo e sua aplicação no ensaio.



Figura A.2 - Célula de carga



Figura A.3 - Posicionamento da chapa móvel sobre uma das superfícies fixas



Figura A.4 - Fechamento das superfícies a serem atritadas.



Figura A.5 – Dispositivo fechado e em funcionamento em uma prensa hidráulica

A.3. RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos em função do acabamento superficial das chapas utilizadas no teste.

A.3.1. ENSAIO COM CHAPAS COM ACABAMENTO DE LAMINAÇÃO

A Figura A.6 mostra o aspecto visual das chapas empregadas nesse primeiro ensaio.



Figura A.6 – Aspecto das chapas na condição como laminada (levemente oxidadas)

A Figura A.7 apresenta o gráfico referente ao teste com a utilização de chapas na condição de acabamento de laminação. O valor considerado para fim de cálculo da força de atrito foi determinado pelo patamar médio formado pelos picos inferiores (instante no qual a máquina é descarregada, indicando a ocorrência do deslizamento), obtido após a aparente estabilização das condições de atrito (indicada pela repetição de medidas consecutivas).

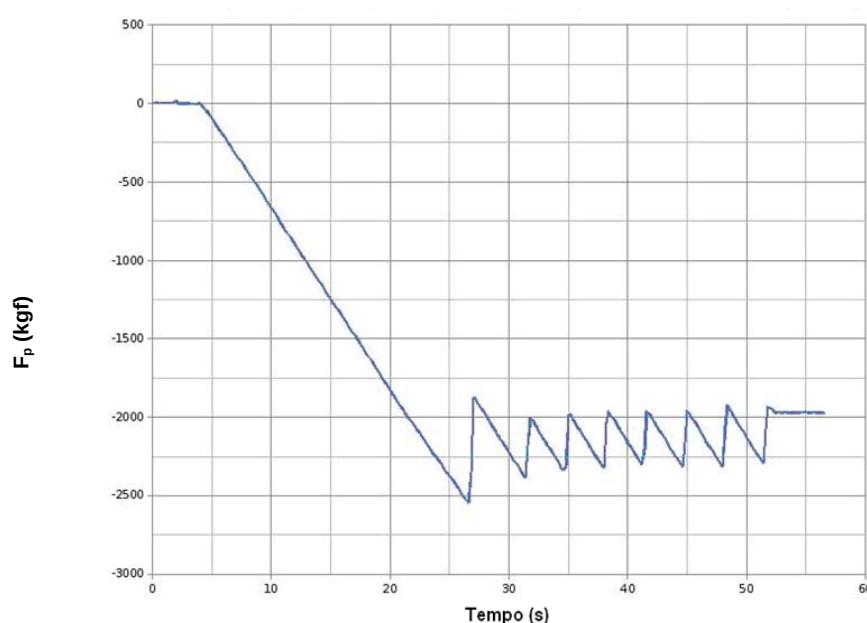


Figura A.7 – Gráfico referente ao ensaio sobre as chapas na condição como laminada

Determinação do coeficiente de atrito (μ):

- Força normal (F_n): Força aplicada na célula de carga (através do aperto dos parafusos): 3.291,5 kgf.
- Força da prensa, (F_p): Força mínima aplicada pela prensa necessária para fazer a placa entrar em movimento: 2.340 kgf.

A partir do valor de F_p , a força de atrito é calculada conforme equação A.1, como segue:

$$F_a = \frac{F_p}{2} = 1.170 \text{ kgf}$$

Logo, o coeficiente de atrito para esta condição, conforme equação A.2 vale:

$$\mu = \frac{F_a}{F_n} = 0,35$$

A.3.2. ENSAIO COM CHAPAS COM ACABAMENTO LIXADO

A Figura A.8 mostra o aspecto visual das chapas na condição lixada.



Figura A.8 – Aspecto das chapas com acabamento de lixamento (grosseiro)

As figuras A.9, A.10 e A.11 apresentam os gráficos referentes aos testes com a utilização de chapas na condição de acabamento de lixamento (grosseiro). O valor considerado para fim de cálculo da força de atrito foi aquele obtido após a aparente estabilização das condições de atrito (indicada pela repetição de medidas consecutivas). Em função da falta de maior repetibilidade dos resultados, este ensaio nestas condições foi repetido três vezes.

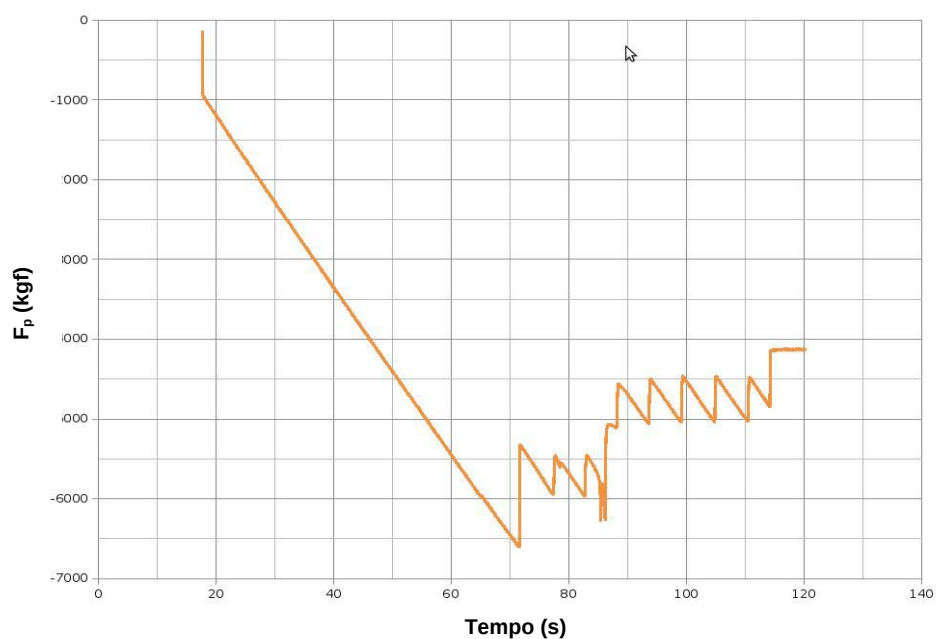


Figura A.9 – Gráfico referente ao 1º ensaio sobre as chapas na condição lixada

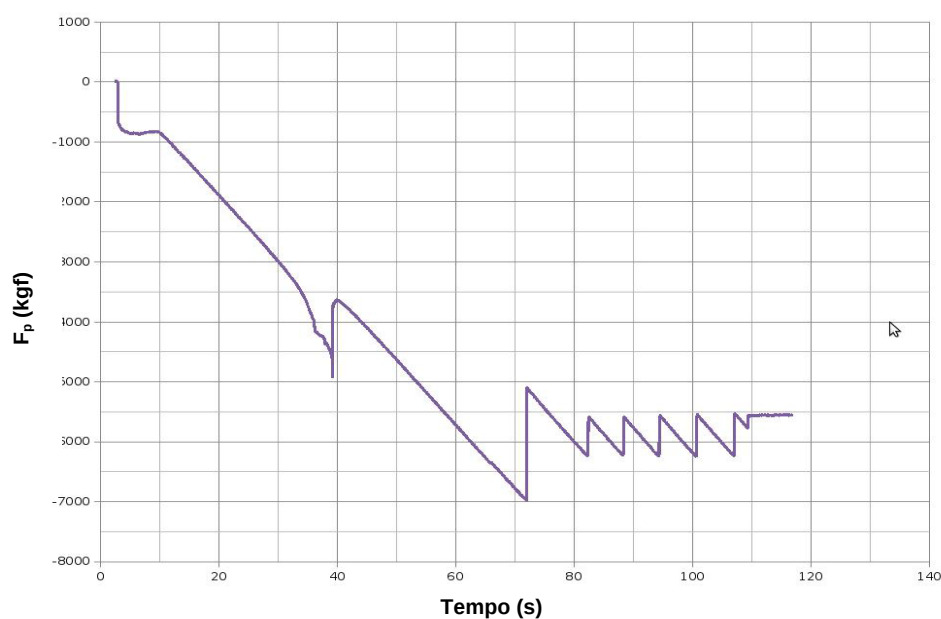


Figura A.10 – Gráfico referente ao 2º ensaio sobre as chapas na condição lixada

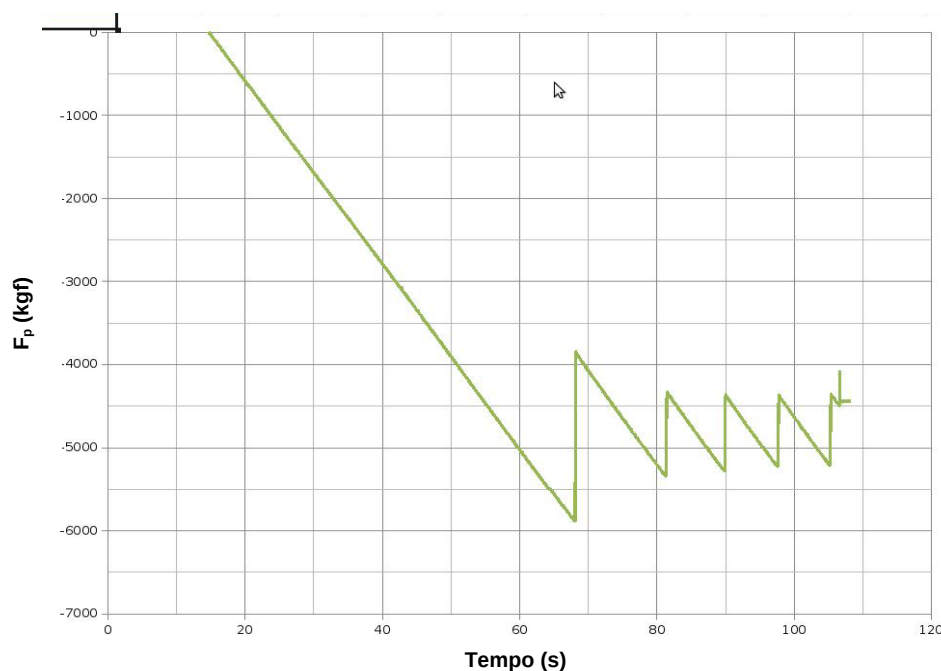


Figura A.11 – Gráfico referente ao 3º ensaio sobre as chapas na condição lixada

Determinação do coeficiente de atrito (μ):

- Força normal (F_n): Força aplicada na célula de carga (através do aperto dos parafusos): 3.529,5kgf.
- Força da prensa (F_p): Força mínima aplicada pela prensa necessária para fazer o placa entrar em movimento:

1º ensaio: 5.061,6 kgf;

2º ensaio: 6.228,0 kgf;

3º ensaio: 5.284,8 kgf;

média: 5560 kgf.

A partir do valor médio de F_p , a força de atrito é calculada conforme equação A.1, como segue:

$$F_a = \frac{F_p}{2} = 2.870kgf$$

Logo, o coeficiente de atrito para esta condição, conforme equação A.2 vale:

$$\mu = \frac{F_a}{F_n} = 0,79$$

A.4. CONCLUSÃO

Nas condições nas quais foi realizado o ensaio, o coeficiente de atrito variou de 0,35 a 0,79. Percebe-se a forte influência do acabamento superficial, o que justifica uma variação de mais de 100%. Aparentemente, a presença de oxidação (no caso do acabamento de laminação) favorece o deslizamento, sendo razoável inferir que numa condição mais avançada de oxidação da superfície o coeficiente de atrito possa não passar muito de 0,35.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2009. ISSN 1983-5884.

FONSECA, Maurílio M. Arte Naval. 6ª Edição. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2002. ISBN 85-7047-051-7.

HENRIKSEN, Lars O.; WILLIAMS, Boyden D.; WANG, Xiaozhi.; LIU, Donald. Structural Design and Analysis of FPSO Topside Module Supports. In: SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS – SNAME 2008 ANNUAL MEETING AND EXPO. Houston/TX, 2008.

HENRIQUES, C.C.D, BRANDÃO, F.N., From P-34 to P-50: FPSO Evolution. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE – OTC 2007, Houston, Texas, EUA, 2007.

KREKEL, M.H.; KAMINSKI, M.L. FPSO's: Design Considerations for the Structural Interface Hull and Topsides. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE – OTC 2002, Houston, Texas, EUA, 2002.

Offshore Magazine Online (www.offshore-mag.com). 2009 Worldwide Survey of Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) Units. 2009.

PETROBRAS/CENPES. Metocean Data (Acesso Restrito). Rio de Janeiro, 2003.

PETROBRAS/CENPES. Projeto Básico da P-53 (Acesso Restrito). Rio de Janeiro, 2007.

PETROBRAS/UN-RIO/ST/EISA. Relatório: Diagnóstico e Recomendações de Projetos de Stools de FPSO's (Acesso Restrito). Rio de Janeiro, 2005.

TERPSTRA, T.; MACMILLAN, A.A., FPSO Design and Conversion: A Designer's Approach. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE – OTC 2001, Houston, Texas, EUA, 2001.

UNITED KINGDOM OFFSHORE OPERATORS ASSOCIATION – UKOOA. FPSO Design Guidance Notes for UKCS Service. Reino Unido, 2002.

VIEIRA, Maurício. Simulação Numérica das Estruturas de Apoio dos Módulos da Plataforma P-53. Rio Grande, 2009. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, FURG – Fundação Universidade Federal do Rio Grande.