

Projeto conceitual – FPSOBR

Fernando Gomes da Silva Torres
Engenheiro Naval
PETROBRAS – CENPES
E-mail: ftorres@petrobras.com.br

Marcos Donato Auler da Silva Ferreira
Engenheiro Naval
PETROBRAS – CENPES
E-mail: marcos.donato@petrobras.com.br

Daniel Cueva
Engenheiro Naval
Universidade de São Paulo
E-mail: daniel.cueva@poli.usp.br

Gerson Machado
Engenheiro Naval
Sólido Engenharia
E-mail: gmachado@solido.com.br

SINOPSE

A PETROBRAS pesquisa e extrai óleo em águas cada vez mais profundas chegando em lâminas d'água de até 3000m. Muitas vezes o óleo encontrado nestas regiões é pesado, o que dificulta seu escoamento através de linhas submersas. Para estes casos, existe a necessidade de unidades flutuantes estacionárias, com grande capacidade de processamento e estocagem. O projeto conceitual FPSOBR, desenvolvido pelo CENPES (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) em parceria com universidades brasileiras, visa atender a esta necessidade. O casco foi projetado de forma a minimizar seus movimentos devido à ação de ondas. Com pequenas amplitudes de roll, a carga nas linhas pode ser reduzida. O projeto estrutural da região do bojo viabilizou a utilização do raio zero, isto é, bojo quinado, permitindo um aumento do amortecimento viscoso em roll do casco. O posicionamento dos risers em um bordo só permitiu uma operação segura das embarcações de apoio ao longo de sua vida em operação.

INTRODUÇÃO

Para o início da utilização de navios do tipo FPSOs na exploração de campos de petróleo

pela Petrobras, adotou-se a premissa de conversão de navios já existentes. Na época, havia muita oferta de petroleiros do tipo VLCCs da década de 70.

O primeiro sistema de conversão foi chamado de “as new”. Nesta conversão, todos os componentes originais do navio, que seriam reutilizados no projeto do FPSO, eram inspecionados, reparados, e se fosse o caso, substituídos. Este tipo de conversão foi utilizado nas plataformas P31, P32, P33, P34 e P35.

A conversão “as new” apresentou alguns problemas: dificuldade de conversão dos sistemas projetados na década de 70 em sistemas para operar em FPSO's no século XXI; dificuldade de desmontagem de equipamentos e sistemas originais do navio para inspeção e reparo, devido à necessidade de sua reinstalação.

O segundo conceito de conversão adotado foi o “all new”, onde se adotou a substituição de todos os sistemas, equipamentos e outros componentes do navio, por novos sistemas, equipamentos e outros componentes, todos projetados para a nova operação como FPSO.

Este novo conceito se mostrou muito oneroso em termos de prazo de obra, devido à necessidade de se instalar todos os novos sistemas em um casco já existente, o que gerou grandes problemas de acesso, movimentação de peças e de montagem. Esse problema se mostrou mais crítico nas áreas de casa de bombas, praça de máquinas e de tanques de carga.

O uso de navios de mercado para conversão levou à surpresas desagradáveis no reparo estrutural. A vantagem teórica de se ter um casco pronto, no fim se mostrou falsa, pois foi necessário efetuar-se muito trabalho na estrutura do casco. Enquanto a média de substituição de aço nos projetos entre a P-31 e a P-35, onde se utilizaram navios da PETROBRAS, esteve em 500 tons, na P-37 foram substituídas 2200 tons. Essa tendência foi confirmada posteriormente nos reparos da P-47 (1700 tons), da P-38 (5000 tons), P-43 (1600 tons) e P-48 (cerca de 700 tons).

O projeto do FPSOBR faz parte de um novo conceito de projeto, chamado de “new building”. Neste, o dimensionamento do casco, dos sistemas de carga e lastro, e o projeto estrutural são voltados para atender os requisitos de uma unidade estacionária de produção de petróleo, com objetivo de ficar locada em sua região de operação por 20 anos, sem ter de ser docada para realização de algum reparo. Este conceito elimina todos os problemas encontrados anteriormente, consequência da adaptação de cascos que possuíam outra finalidade, totalmente diferente de uma plataforma de petróleo.

PREMISSAS PARA O PROJETO

O projeto do FPSOBR teve que cumprir com algumas premissas exigidas para o conceito de um novo FPSO:

- Casco duplo;
- 7º graus de movimento máximo de roll;

- 3º graus de movimento máximo de pitch;
- 7m de borda livre mínima;
- atender aos critérios da Petrobras de momento fletor e força cortante máxima;
- atender aos critérios de estabilidade da MODU/IMO;
- 2m de mínima altura metacêntrica;
- 1.800.000 barris de óleo de capacidade de estocagem;
- não se fazer necessária a utilização de lastro na operação;
- calado máximo de 6m para condição de carregamento 0%;
- casco com geometria simples;
- chegada dos risers em um só bordo do casco;

Todas estas premissas levam o casco a possuir algumas características, como:

- fácil construção e operação;
- fim das áreas de exclusão ao redor do casco, já que um bordo será utilizado apenas para aproximação das embarcações de apoio;
- estrutura dimensionada para suportar a fadiga operacional, evitando uma possível parada de produção, que implicaria em elevados custos;
- tanques dimensionados de acordo com a necessidade de uma unidade estacionária de produção;
- o casco não precisa ser dimensionado para reduzir sua resistência ao avanço, pois este é estacionário;
- boa resposta em ondas, minimizando o carregamento nos risers e linhas de produção, melhorando o conforto dos tripulantes, e reduzindo os custos associados a equipamentos do convés.

DIMENSIONAMENTO DO CASCO

Para se obter o formato atual do casco FPSOBR, efetuou-se algumas análises. Nestas foram estudados possíveis formatos e também

a introdução de uma bolina estruturada na linha de bojo.

Uma das maiores preocupações hoje para os cascos FPSOs é a amplitude de movimento de roll. Devido à incidência do swell na Bacia de Campos, caracterizado por longas ondas, vindas de Sudoeste e Sudeste, as plataformas comumente são excitadas em roll, em períodos próximos da região de ressonância. A solução encontrada para o FPSOBR foi a mudança da relação entre o pontal e a boca (P/B). Com o aumento desta relação, foi possível obter um maior valor para o período natural de roll em todas as condições de carregamento. A Figura 1, mostra a influência desta relação a relação de P/B sobre o período de roll.

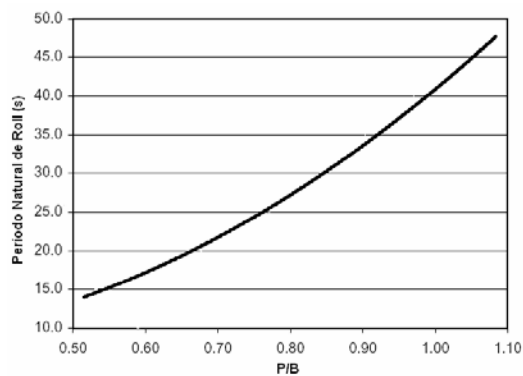


Figura 1 – Tn roll vs P/B

Análises Hidrodinâmicas

Para estas análises, utilizou-se do software Wamit[1], que calcula as forças de onda no casco e seus movimentos. Este software usa da teoria linear de ondas, considerando o fluido incompressível, invíscido e irrotacional. Todos os resultados obtidos são em relação ao CG (centro de gravidade) da plataforma. Para análise espectral do movimento, utilizou-se o espectro de ondas JONSWAP. Foram escolhidos mares com período de retorno de 100 anos. O casco utilizado na primeira e segunda análise é apresentado na Figura 2.

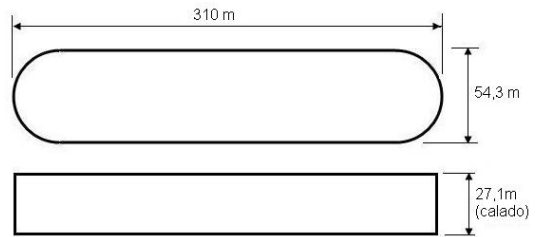


Figura 2 – Desenho ilustrativo

Na primeira análise, estudou-se a inclusão de um ângulo na proa e popa do casco. Os ângulos analisados estão compreendidos entre 90 a 30 graus.

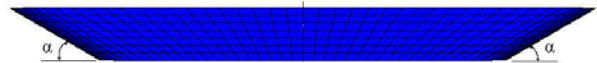


Figura 3 – Ângulo de inclinação na proa e popa

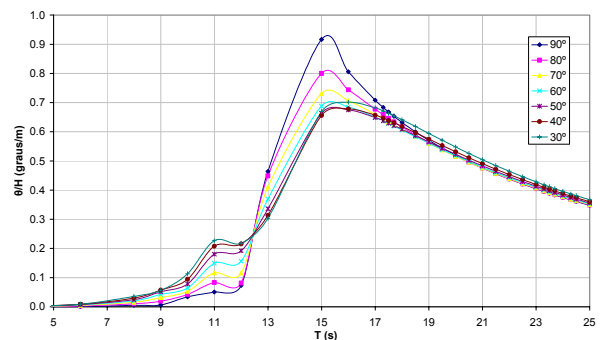


Figura 4 – Resposta de RAO de pitch

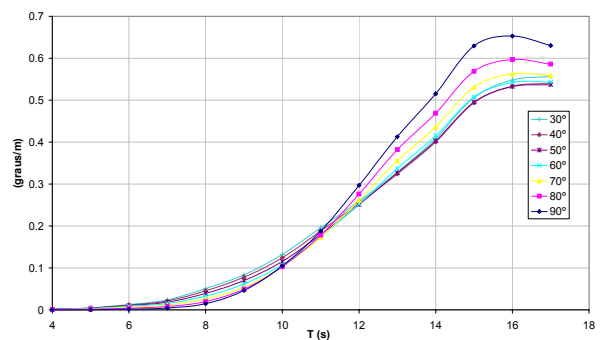


Figura 5 – Resposta para o cruzamento espectral

A introdução de um ângulo de proa e popa traz mudanças significativas no movimento em pitch do casco para períodos maiores que 11 segundos.

Na segunda análise, estudou-se a inclusão de uma bolina estruturada na linha de bojo. O formato do bojo utilizado para todas as análises foi o quinado, pois esta possibilidade foi estudada e validada para este projeto, como veremos no próximo item. O bojo quinado possui o mais alto coeficiente de amortecimento viscoso, como foi apresentado por Tanaka[2].

Esta análise avaliou qual a influência do comprimento da bolina na inércia adicional de roll. Foram analisadas as relações $L_B/L_C=1, 2/3$ e $1/3$, onde L_B é o comprimento da bolina e L_C é o comprimento do corpo paralelo do casco. A bolina possuía altura de 2m e largura de 3m.

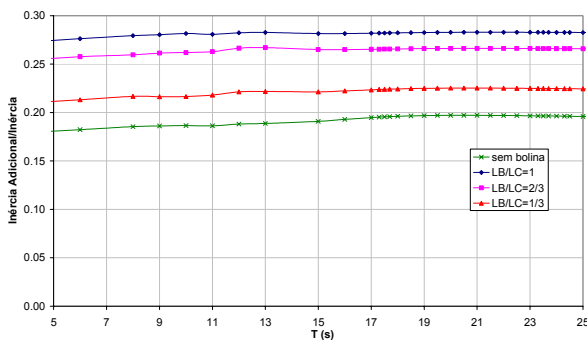


Figura 6 – Coeficiente de inércia adicional de roll

Para esta geometria de bolina, obteve-se um ganho de até 1s no período de natural de roll para a relação $L_B/L_C=1$.

Como uma das premissas do projeto era obter uma geometria simplificada, e dado que o casco por ser uma unidade estacionária não precisava ser otimizado hidrodinamicamente para diminuir sua resistência ao avanço, realizou-se uma terceira análise para avaliar como seria seus movimentos com a proa e popa com seções quadradas. Para efeito de comparação, os ângulos de inclinação estudados foram o mesmo da primeira análise. Na Figura 7, é apresentada a geometria estudada.

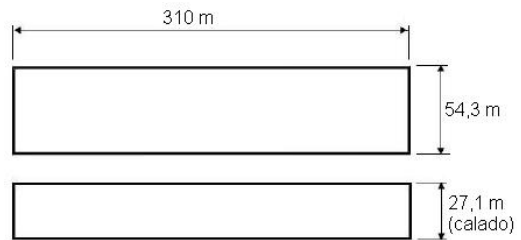


Figura 7 – Desenho ilustrativo

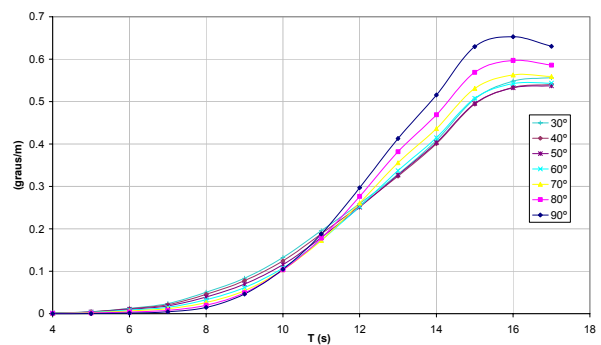


Figura 8 – Resposta para o cruzamento espectral

Quando comparadas as curvas apresentadas na Figura 5 e Figura 8, conclui-se que não há alteração no comportamento do corpo para o movimento de pitch, o qual poderia sofrer uma mudança mais significativa.

A plataforma FPSOBR não necessita mais da tradicional casa de máquinas, pois ela não possuirá sistema de propulsão. Com a ausência de peso na região de popa da embarcação, foi-se necessário estudar possíveis combinações de ângulo de proa e popa para obter o equilíbrio entre peso e empuxo. Dessa forma, o momento fletor e força cortante atuante no casco não iriam ultrapassar os limites impostos pelo critério Petrobras. Na Tabela 1, são apresentadas as combinações avaliadas. Todas estas combinações passaram no critério de momento e força cortante. Logo, foi feito um estudo para avaliar qual apresentava melhor curva de resposta à incidência de ondas.

Tabela 1 – Ângulos de corte

	Ang. Proa	Ang. Popa
A	50°	40°
B	60°	40°
C	70°	40°
D	62°	50°
E	66°	50°
F	70°	50°

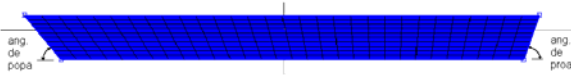


Figura 9 – Imagem da malha utilizada

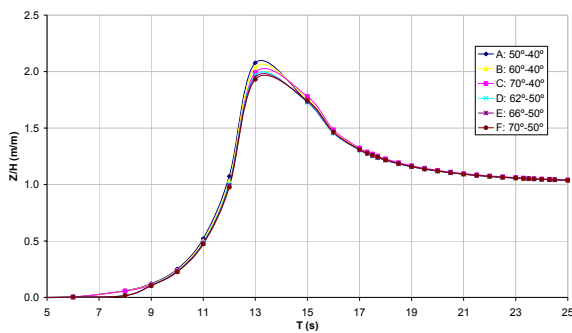


Figura 10 – Resposta de RAO de heave 90°

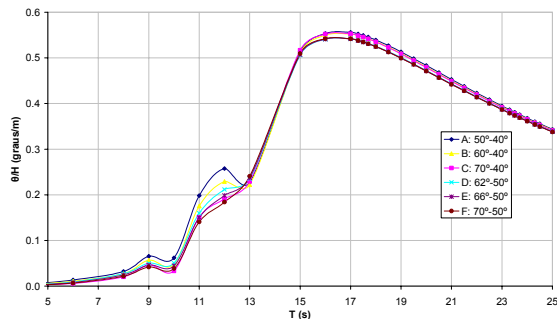


Figura 11 – Resposta de RAO de pitch 0°

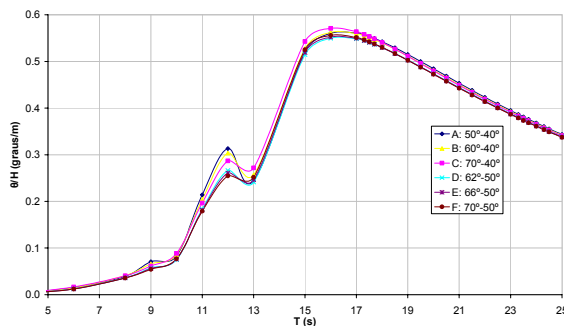


Figura 12 – Resposta de RAO de pitch 180°

A combinação F, ângulo de proa 70° e ângulo de popa 50°, foi a que apresentou melhor resposta na faixa compreendida entre 5 a 13 segundos.

Novos chanfros foram introduzidos na região de popa e proa para compensar ainda mais o desequilíbrio de forças que havia entre o empuxo e o peso concentrado nestas regiões. Os cortes criados tinham como premissa ser de geometria simplificada, facilitando o processo de construção. Na Figura 13, é apresentada uma opção de corte estudada, a qual não se mostrou uma boa opção, pois aumentou a forças de excitação em roll. Na Figura 14, segue o desenho com o formato obtido ao fim das análises.

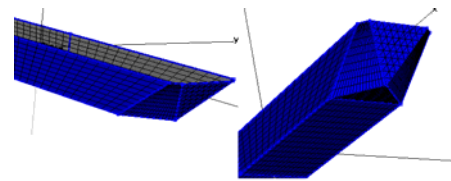


Figura 13 – Opção de corte descartada

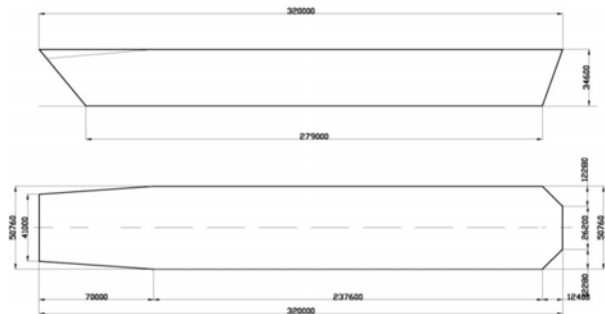


Figura 14 – Casco Final

Análise Estrutural do Bojo Quinado

A avaliação estrutural do bojo quinado foi efetuada no software numérico Nastran, ferramenta que utiliza método de elementos finitos. Os valores de momento fletor e cortante aplicado ao casco foram obtidos no software da Petrobras SSTAB. O comprimento do corpo paralelo do casco utilizado para a análise foi de 95 m. Analisou-se a região onde foi observada a maior tensão primária.

Foram aplicadas 3 categorias de carga: fixas, operacionais e ambientais. A onda, principal parcela do carregamento ambiental, foi considerada como uma senóide, com o comprimento de 320m e amplitude de onda de 7,8m, que corresponde à altura significativa máxima de uma onda na Bacia de Campos, em condição centenária. Neste caso não existe contribuição significativa da parcela hidrodinâmica, uma vez que o período natural de pitch da embarcação (em torno de 20s) se encontra distante do período da onda de comprimento igual ao casco (em torno de 14s). A única contribuição importante está relacionada à elevação da superfície livre devido à passagem da onda.

Foram analisadas três condições de carregamentos para o modelo construído, sendo uma estática e duas ambientais:

1) Caso a: condição Estática, de águas tranqüilas, com a unidade toda carregada de óleo, 100% de carregamento. O momento fletor máximo obtido foi de 800281m.tf e cortante equivalente nos extremos de 7000 tf. Foram estimados os esforços solicitantes agindo nas extremidades do modelo a ser avaliado. Os esforços solicitantes foram impostados nas extremidades do modelo por meio de um binário de forças distribuídas aplicadas nos nós das chapas longitudinais: convés, costado, parede do tanque, parede do duplo costado e fundo;

2) Caso b: condição Ambiental, de aquebramento da viga-navio submetida a uma onda senoidal de 7,8m de amplitude, com a condição de carga de óleo a 22,5% (a pior condição encontrada, com fletor máximo de 2580000 m.tf e cortante equivalente nos extremos de 19000 tf);

3) Caso c: condição Ambiental, de tosamento da viga-navio, com a mesma onda senoidal e mesma carga de óleo do Caso a (com fletor

máximo de 2826641 m.tf e cortante equivalente nos extremos de 23000 tf);.

Para as análises efetuadas, obtiveram-se valores aceitáveis de tensão na região específica do bojo quinado, validando esta opção para utilização no casco FPSOBR. Na Figura 15, é apresentada a malha do bojo quinado utilizada na análise no Nastran.

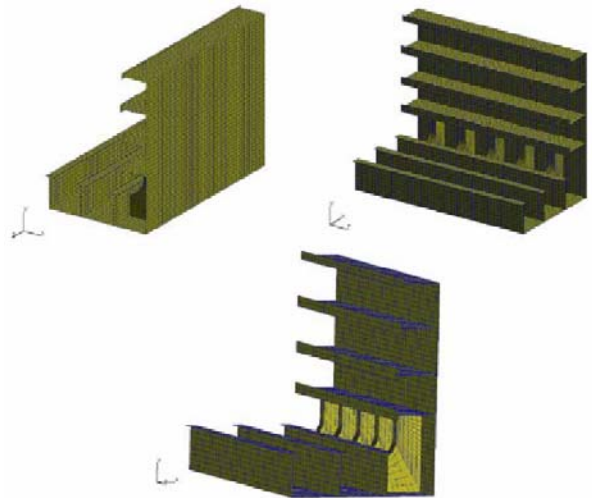


Figura 15 – Malha utilizada no Nastran

ANÁLISE EXPERIMENTAL

Ao fim do dimensionamento do casco, foi construído um modelo em escala reduzida de 1:90 em fibra de vidro. Os ensaios foram realizados no Tanque de Provas do IPT, em São Paulo. O tanque tem um comprimento total de 280 m, largura de 6,6m e profundidade de 4m.

Tabela 2 – Dimensões do modelo em escala reduzida

Calado (m)	GM (m)	Deslocamento (kg)	Ixx (m)	Iyy (m)	Izz (m)	LCG (m)	KG (m)
0.121	0.08	209.87	11.53	122.22	138.69	0.05	0.19
0.198	0.06	348.87	16.92	290.82	307.27	0.07	0.17
0.239	0.05	422.87	20.23	336.87	355.05	0.06	0.18
0.3	0.03	534.47	25.47	429.91	444.75	0.11	0.2

Tabela 3– Dimensões do casco

Calado (m)	GM (m)	Deslocamento (kg)	Ixx (m)	Iyy (m)	Izz (m)	LCG (m)	KG (m)
10.85	7.47	153000000	6.81E+10	7.22E+11	8.19E+11	4.32	17.41
17.85	5.22	254000000	9.99E+10	1.72E+12	1.81E+12	6.03	15.55
21.5	4.5	308000000	1.19E+11	1.99E+12	2.1E+12	4.95	16.16
25	3.12	390000000	1.5E+11	2.54E+12	2.63E+12	10.08	18.3



Figura 16 – Modelo em escala 1:90

A seguir, são apresentadas as curvas experimentais obtidas nos ensaios realizados com modelo em onda regulares e transientes. O modelo estava aproado a 90°. Este foi ensaiado para o carregamento de 20%, 66% e 90%. Os resultados são comparados com as curvas numéricas obtidas da análise já com acoplamento do amortecimento externo estimado.

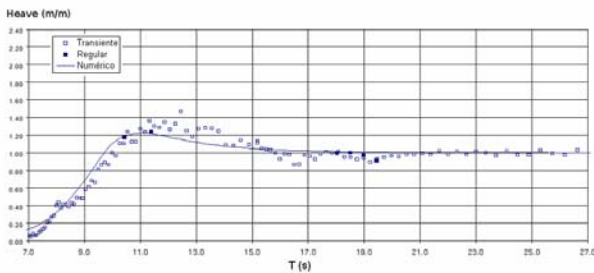


Figura 17 – Heave, aproamento 90°, calado 10.5m(20%)

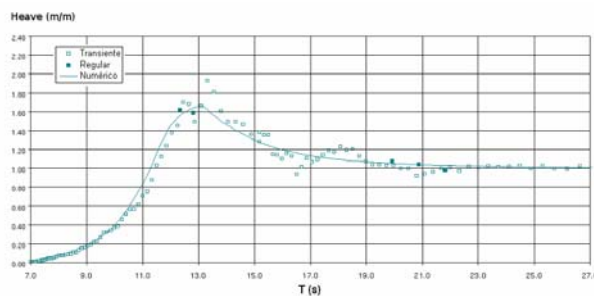


Figura 18 – Heave, aproamento 90°, calado 21.5m(66%)

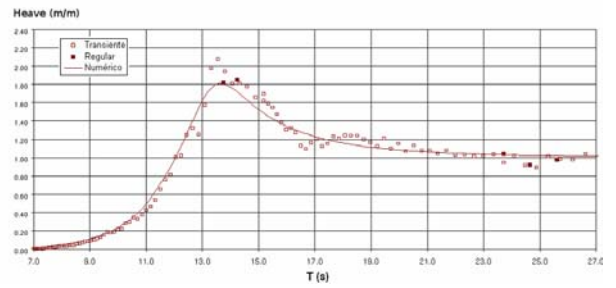


Figura 19 - Heave, aproamento 90°, calado 27m(90%)

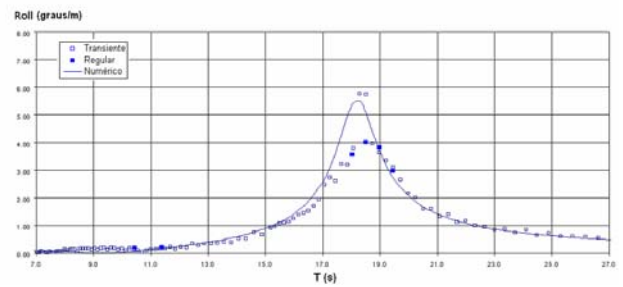


Figura 20 - Roll, aproamento 90°, calado 10.5m(20%)

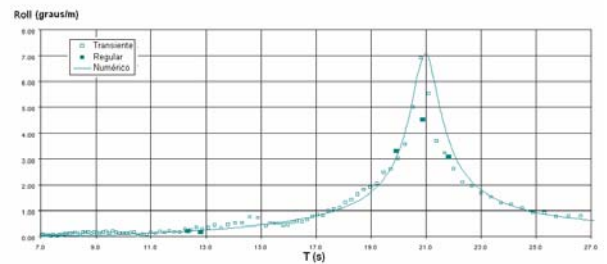


Figura 21 - Roll, aproamento 90°, calado 21.5m(66%)

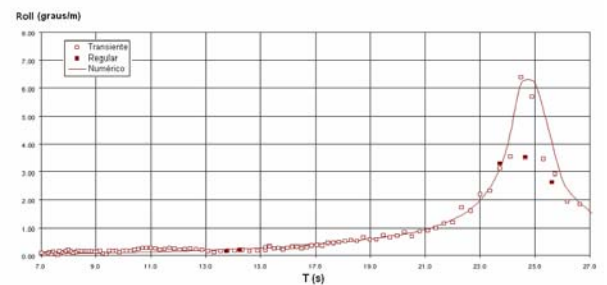


Figura 22 - Roll, aproamento 90°, calado 27m(90%)

CONCLUSÕES

Com os períodos naturais de roll compreendidos entre 18 a 25 segundos, houve uma redução significativa para o movimento angular de roll. O movimento de heave para os diversos carregamentos mostrou-se dentro de uma faixa aceitável. O dimensionamento do casco FPSOBR mostrou que é possível criar um casco otimizado para operar como unidade flutuante de produção de Petróleo, e este se difere em muito dos atuais FPSOs em operação.

REFERÊNCIAS

- [1] Lee, C-H and Newman, J.N., “WAMIT 6.2 USER’S MANUAL”, Boston, USA, 2004
- [2] Tanaka, A Study on The Bilge Keels (Part 4. On the Eddy-making Resistance to the Rolling of a Ship hull), 1960