

Análise Experimental do Comportamento Hidrodinâmico de uma Mono-coluna (MONOBR)

SH Sphaier
COPPE/UFRJ

R Barreira
COPPE/UFRJ

IQ Masetti
CENPES-Petrobras

AP Costa
CENPES-Petrobras

C Levi
COPPE/UFRJ

IPEN - Julho de 2005

Resumo

O trabalho descreve uma série de testes realizados com uma estrutura mono-coluna. Apresenta um modelo matemático desenvolvido de forma heurística, capaz de indicar o tipo de comportamento esperado para os resultados experimentais.

Os testes envolvem uma série de medições de deslocamento vertical da coluna d'água para a estrutura mantida fixa em ondas transientes, medições dos movimentos da estrutura livre e da coluna d'água interna em ondas transientes e em mar irregular.

Os testes realizados no LabOceano, aqui apresentados, se concentraram em definir uma área de abertura que possa acarretar uma minimização do movimento vertical da estrutura na faixa de atuação das ondas do mar.

1 Introdução

MONOBR é o nome de uma concepção de mono-coluna dotada de um moonpool desenvolvida pela Petrobrás em conjunto com a Universidade de São Paulo. Após a definição de suas dimensões principais, foi realizado uma série de testes no LabOceano da COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro, cujo objetivo era explorar o moonpool para minimizar os movimentos verticais.

O estudo se concentrou na determinação de uma

abertura circular na base do moonpool, mantendo-se o diâmetro interno, que provoque uma minimização do movimento vertical da estrutura. O diâmetro externo, o diâmetro interno, a massa da estrutura e sua forma geométrica estavam pre-estabelecidas.

Na literatura, encontramos vários trabalhos sobre o tema destacando-se os trabalhos de Albers (1987) e Fukuda (1977). Devemos citar também o trabalho de Nishimoto e outros (2001) que foi desenvolvido no âmbito do estudo desta concepção.

2 Modelação Matemática do Problema

Seguimos aqui a modelação matemática do problema apresentada por Barreira e outros (2005), que nos permite, entender o comportamento dos resultados experimentais.

Utilizaremos aqui um sistema de coordenadas com eixos Ox e Oy no plano da superfície livre em repouso e eixo Oz voltado para cima.

2.1 Modelo Simplificado de uma Coluna d'água

Consideremos inicialmente uma coluna vertical circular vazada no fundo (tronco de cilindro) parcialmente imersa na água, isto é, atravessando a superfície livre e consideremos que a coluna d'água

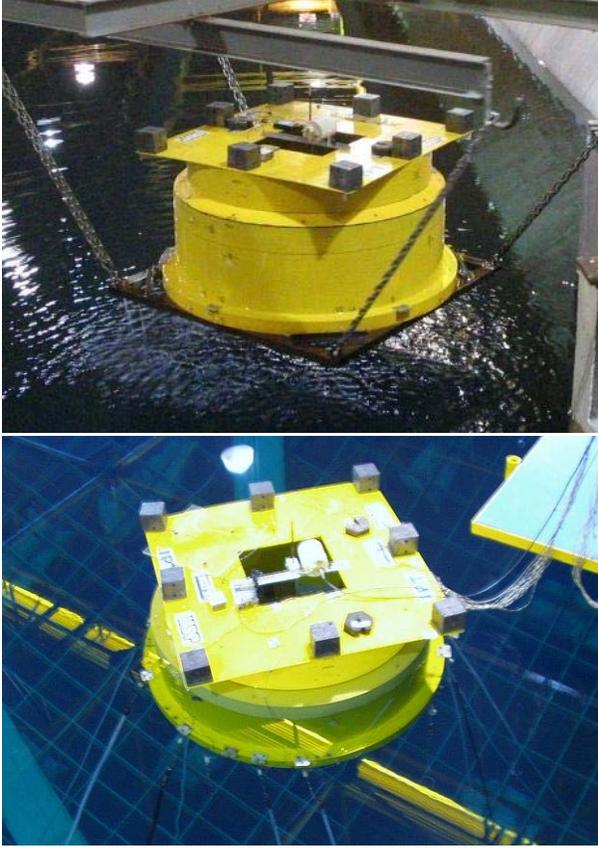


Figura 1: MonoBr durante Ensaios no LabOceano

é igual a h . Se a coluna d'água é deslocada da posição de equilíbrio ela desenvolve um movimento oscilatório com o tempo. Supondo que o movimento da coluna é pequeno, que os efeitos viscosos são desprezíveis, a equação do movimento vertical é dada por:

$$\frac{1}{2}\rho Ah\dot{\zeta}^2 + \frac{1}{2}\rho gA\zeta^2 = C \quad (1)$$

onde: ρ - massa específica, A - área interna da superfície livre da coluna, g - aceleração da gravidade, ζ e $\dot{\zeta}$ - deslocamento e velocidade vertical da coluna d'água.

Nesta forma de modelar o problema assumimos que não há influência da entrada da coluna no escoamento e que todo o fluido se move com a mesma velocidade. A coluna d'água executa um movi-

mento oscilatório cuja frequência ω_0 é dada por:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (2)$$

Podemos definir uma função potencial de velocidades

$$\Phi = (h + z)\dot{\zeta}$$

e, utilizando a forma integral da equação de Euler

$$p + \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \rho g z = 0 \quad (3)$$

temos que, na superfície livre vale

$$0 + \rho \frac{\partial \Phi(z=0)}{\partial t} + \rho g \zeta = 0 \quad (4)$$

Assim, obtemos como equação de movimento do fluido

$$\rho h \ddot{\zeta} + \rho g \zeta = 0 \rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (5)$$

Resultado similar é obtido a partir da equação 1.

Consideremos agora que o tubo está localizado em ondas de pequenas amplitudes e que a onda é longa em relação ao diâmetro do tubo. Assim, pode-se assumir que a pressão na base da coluna se distribui uniformemente. Podemos também supor que a massa fluida vai se deslocar em bloco e a equação de movimento é dada por:

$$\rho Ah \ddot{\zeta} + \rho g A \zeta = F_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

O movimento vertical é dado por:

$$\zeta = \bar{\zeta} e^{i\omega t} = \zeta_0 e^{i\omega t + \delta}$$

onde: ζ_0 - amplitude do movimento vertical; δ - ângulo de fase; F_0 - força induzida pela onda; ω - frequência da onda; t - tempo; i - unidade imaginária.

O movimento vertical, na forma adimensional $\zeta^* = \rho g A \bar{\zeta} / F_0$ é dado por:

$$\zeta^* = \frac{1}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \quad (7)$$

Trata-se de um clássico sistema massa mola com excitação periódica.

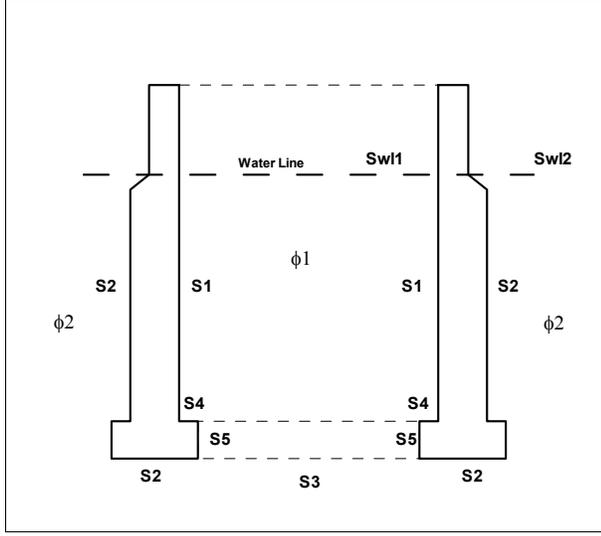


Figura 2: Desenho esquemático da mono-coluna com o moonpool

Este modelo, entretanto, não considera os efeitos viscosos na entrada da coluna d'água. Mesmo admitindo pequenos movimentos há efeitos que impõem correção no modelo acima. Além disto, não podemos deixar de considerar os efeitos viscosos que vão introduzir um termo de amortecimento na equação de movimento. Introduzindo um fator de forma C_1 e o coeficiente de amortecimento C_2 a equação de movimento é reescrita na forma:

$$C_1 \rho A h \ddot{\zeta} + C_2 \dot{\zeta} + \rho g A \zeta = F_0 e^{i\omega t} \quad (8)$$

Ambos os coeficientes, C_1 e C_2 , podem ser obtidos de testes de decaimento do movimento da coluna, bem como de resposta em ondas transientes.

2.2 Modelo Potencial Simplificado

Inicialmente observemos a figura 2. Ela mostra um esquema da mono-coluna com o moonpool e sua abertura no fundo, cuja abertura pode variar. As dimensões principais desta estrutura são: diâmetro externo = 95 m, diâmetro interno = 69 m, calado = 38 m, e borda livre = 12 m.

O domínio fluido é subdividido em duas partes, uma interna e outra externa, nas quais os potenciais de velocidade Φ_1 e Φ_2 são respectivamente definidos.

As superfícies de contato que delimitam as regiões estão indicadas na figura. As superfícies S_1 , S_4 , S_5 , S_3 e Swl_1 delimitam a região interna e S_2 , S_3 , Swl_2 e S_∞ delimitam a região externa. A superfície S_∞ representa o limite longe da estrutura, no infinito, e não está indicada na figura.

É simples mostrar, a partir da teoria hidrodinâmica de escoamentos com superfície livre com ondas de pequenas amplitudes, que os potenciais são soluções dos seguintes problemas de valor de contorno:

$$\text{no domínio fluido interno } \nabla^2 \Phi_1 = 0 \quad (9)$$

$$\text{sobre o corpo } \frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = \dot{\eta}_n \quad (10)$$

$$\text{na superfície livre } \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial t^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$\text{no domínio fluido externo } \nabla^2 \Phi_2 = 0 \quad (12)$$

$$\text{sobre o corpo } \frac{\partial \Phi_2}{\partial n} = \dot{\eta}_n \quad (13)$$

$$\text{na superfície livre } \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial t^2} + \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

Além disto, sobre a superfície S_3 :

$$\Phi_1 = \Phi_2 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} \quad (16)$$

Uma questão fundamental no problema tratado é a influência dos efeitos viscosos na entrada do moonpool. O problema potencial acima colocado não leva em consideração esses efeitos e, por conseguinte, não pode gerar campos de pressão e então forças que retratem o problema real. Entretanto, se abandonarmos as condições de contorno (16) e impusermos em S_3

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial z} = U \quad (17)$$

em que U equivale á velocidade média do escoamento real, temos dois problemas de valor de contorno para resolver porém criamos uma descontinuidade no potencial, pois **não mais podemos garantir** que em S_3

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

A solução deste problema pode ser escrita na forma:

$$\Phi_1 = \varphi_{1a} \dot{\eta} + \varphi_{1b} U = \bar{\varphi}_{1a} \dot{\eta} + \bar{\varphi}_{1b} \dot{\zeta} \quad (18)$$

$$\Phi_2 = \varphi_{2a} \dot{\eta} + \varphi_{2b} U = \bar{\varphi}_{2a} \dot{\eta} + \bar{\varphi}_{2b} \dot{\zeta} \quad (19)$$

e pela equação da continuidade:

$$U S_3 + \dot{\eta} S_4 = \dot{\zeta} S w l_1 \quad (20)$$

O movimento interno no moonpool depende do diâmetro da restrição. Quanto menor o diâmetro da abertura, maior a influência do movimento do corpo. O movimento vertical induz forças hidrodinâmicas na massa d'água interna. Por outro lado se a estrutura estiver parada e ondas excitarem movimento da massa d'água interna, esta induzirá forças sobre a estrutura.

A equação (8) pode ser aprimorada considerando as forças hidrodinâmicas induzidas na estrutura. De uma forma heurística, baseados na dinâmica de corpos flutuantes podemos escrever:

$$\rho A h \ddot{\eta} + C_1 \rho A h \ddot{\zeta}_{rel} + C_2 \dot{\zeta}_{rel} + \rho g A (\eta + \zeta_{rel}) = F_{\zeta 0} e^{i\omega t} + F_{\zeta \eta} \quad (21)$$

com

$$F_{\zeta \eta} = m_{\zeta \eta} \ddot{\eta} + n_{\zeta \eta} \dot{\eta}$$

onde: $m_{\zeta \eta}$ e $n_{\zeta \eta}$ são coeficientes similares à massa adicional e ao coeficiente de amortecimento e $F_{\zeta 0}$ é a força de onda vertical atuante no volume d'água.

A equação de movimento vertical da estrutura é dada por:

$$(m + m_{\eta \eta}) \ddot{\eta} + n_{\eta \eta} \dot{\eta} + \rho g S \eta = F_{\eta 0} e^{i\omega t} + F_{\eta \zeta} \quad (22)$$

com

$$F_{\eta \zeta} = m_{\eta \zeta} \ddot{\zeta}_{rel} + n_{\eta \zeta} \dot{\zeta}_{rel}$$

onde: $m_{\eta \zeta}$ and $n_{\eta \zeta}$ são coeficientes similares aos coeficientes cruzados de massa adicional e amortecimento; $F_{\eta 0}$ é a amplitude complexa da força vertical atuando sobre o corpo; S - área de linha d'água da estrutura.

As equações (21) e (22) correspondem a um sistema massa-mola-amortecimento com dois graus de liberdade acopladas com termo de excitação oscilatório. O sistema tem duas frequências naturais correspondentes a cada grau de liberdade, cujos valores são alterados pelo acoplamento.

Podemos dizer que, se a área S_3 diminui, a força de excitação devida às ondas diminui, aumentando a força exercida sobre o fluido pelo corpo. O movimento relativo diminui. O movimento do fluido no interior aproxima-se do movimento do corpo η . Nestas condições, a soma das equações (21) e (22) nos leva a uma equação de um grau de liberdade:

$$(m + \rho A h + m_{\eta \eta}) \ddot{\eta} + n_{\eta \eta} \dot{\eta} + \rho g (S + A) \eta = F_{\eta 0} e^{i\omega t} \quad (23)$$

Assim, pode-se esperar que os experimentos nos indiquem que, na falta de restrição na entrada do moonpool, o movimento vertical da estrutura indicará duas frequências naturais, uma próxima à frequência natural do movimento da coluna d'água no moonpool e a outra próxima à frequência natural da estrutura sem considerar o efeito do moonpool.

Deve-se observar que é possível detectar experimentalmente a frequência natural do moonpool em um teste de decaimento da coluna d'água, ou excitando o sistema através de ondas transientes ou regulares, mantendo-se a estrutura fixa. Já a frequência natural isolada da estrutura não pode ser observada.

Além disto, o sistema se comporta como um corpo rígido a medida que o diâmetro diminui. A massa do sistema fica igual a soma das massas da estrutura e a massa d'água contida no interior do moonpool. A área de linha d'água torna-se a soma das áreas de linha d'água $S + A$.

3 Resultados Experimentais

O objetivo principal do trabalho é o de se determinar uma abertura de moonpool que leve a uma amplificação mínima do movimento vertical da estrutura em ondas.

A mono-coluna foi testada com sete diferentes aberturas do moonpool na base. O diâmetro interno total tem 69 metros. Este é o caso do moonpool sem restrição alguma. A partir deste caso foram colocadas restrições na abertura, placas de pequena espessura com furos circulares com diâmetros menores. Foram utilizados diâmetros iguais a 64, 58, 47, 33 e 23 metros. O caso diâmetro 0, também foi utilizado e corresponde à inexistência de moonpool. Os testes foram realizados com um sistema de ancoragem horizontal para simplesmente manter a estrutura estacionária.

A técnica de ondas transientes foi utilizada, seguindo um padrão estabelecido pelo LabOceano, conforme apresentado por Matos e outros (2005).

Foram realizadas as seguintes medições:

1. movimentos da coluna d'água dentro do moonpool com a estrutura fixa,
2. movimentos da coluna d'água dentro do moonpool com a estrutura livre oscilando em ondas,
3. movimentos da estrutura.

No caso dos movimentos da estrutura foram medidos os movimentos de deslocamentos lineares e angulares. Nos concentraremos aqui somente nos movimentos verticais.

A figura 3 mostra a amplificação do movimento vertical da coluna d'água dentro do moonpool para diferentes frequências para as diversas aberturas do moonpool. Vemos que no caso da abertura não ter restrição o período natural está em torno de 15,5 segundos. Ao se impor uma pequena restrição, abertura com diâmetro de 64 metros, há uma drástica queda da amplificação e o período natural aumenta um pouco. A medida que se diminui a abertura, isto é, se aumenta a restrição a amplificação diminui, o período natural aumenta e

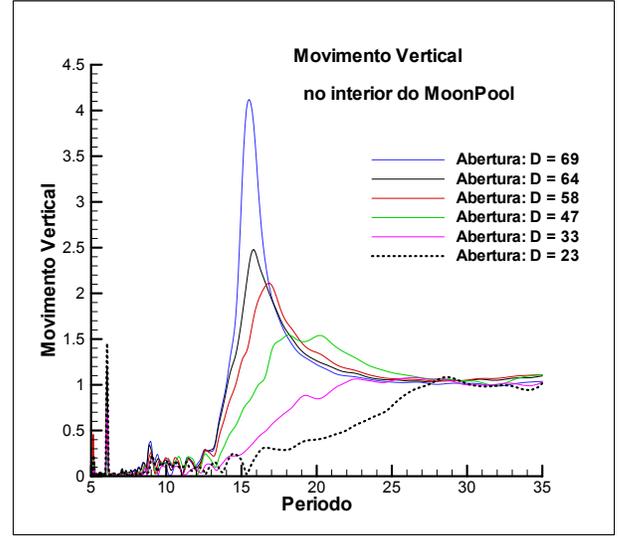


Figura 3: Movimento Vertical da Coluna d'Água Interna

evolui-se para o caso de um sistema com amortecimento supercrítico. Dos resultados pode-se estimar aproximadamente: período de 15,7 segundos para a abertura com diâmetro igual a 64 metros e período de 16,8 segundos para o diâmetro igual a 58 metros. Para a abertura com diâmetro igual a 47 metros, o período natural está entre 18,0 e 20,0 segundos, não se podendo precisar o ponto de ressonância. Observe-se que para as menores aberturas, diâmetros iguais a 33 e a 23 metros, não há amplificação destacada e portanto não se pode estimar o período natural. Com o aumento do período a amplificação do movimento interno aumenta até se tornar igual a 1, isto é, a amplitude do movimento vertical se torna igual a da onda externa.

Deve ser observado que com esses testes podemos determinar o fator C_1 a partir da frequência natural, a ser utilizado na equação (8), para os casos em que o amortecimento é pequeno:

$$C_1 = \frac{g}{h \omega_0^2} \quad (24)$$

Pode-se também ajustar o coeficiente de amortecimento C_2 de acordo com a amplificação

na frequência natural. De forma mais geral, pode-se determinar o par C_1 e C_2 ajustando a solução da equação (8) aos testes.

A figura 4 mostra a amplificação do movimento vertical para diferentes períodos para os casos extremos em que a estrutura não tem restrição na entrada do moonpool e no caso em que há restrição total. Observamos nesta figura que a estrutura com o moonpool, porém sem restrição em sua abertura, mostra dois períodos ressonantes. Uma deles corresponde ao efeito do moonpool, em torno de 15,1 segundos e o outro em torno 21,6 segundos correspondente ao modo da estrutura. Já a estrutura totalmente fechada tem modo natural em torno de 19,3 segundos. Há um acoplamento, que influencia o período do modo do moonpool. Não se pode avaliar o grau de influência no modo da estrutura, pois não é possível isolar o fenômeno neutralizando o efeito do moonpool. Outra questão a se observar é que o período do ponto de cancelamento do movimento da estrutura sem moonpool está muito próximo do período natural do moonpool.

Observe-se que o moonpool isolado tem período natural igual a 15,5 segundos. O sistema acoplado tende a reduzir o período, como neste caso para 15,1 segundos. No caso do modo da estrutura, o acoplamento tende a elevar o período. Mas como já frisamos não é possível isolar o movimento da estrutura, para se analisar o comportamento do sistema.

A figura 5 mostra a amplificação do movimento vertical para diferentes períodos para o caso em que a estrutura tem uma pequena restrição na entrada do moonpool: o diâmetro da abertura é igual a 64 metros. O resultado é plotado junto com os resultados para os casos acima descritos, sem restrição e com restrição total. Observamos que a restrição afeta fortemente a amplificação do movimento no período ressonante do modo do moonpool. O que era de se esperar, haja visto os resultados da amplificação apresentados na figura 3, com redução devida à restrição. Há uma pequena queda na amplificação correspondente ao modo da estrutura. O período natural do modo do moonpool, comparado com o caso sem restrição é pouco afetado, uma vez

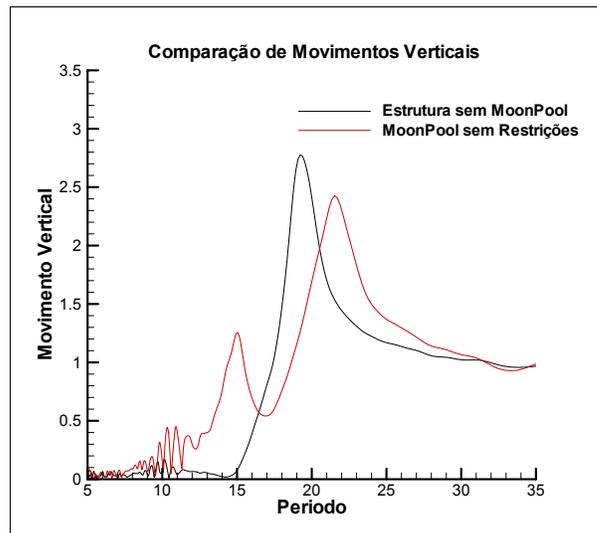


Figura 4: Movimento Vertical da Estrutura com e sem MoonPool

que o modo isolado do moonpool tem um período mais alto, porém o acoplamento tende a reduzi-lo. Observa-se que com a restrição o período do modo da estrutura têm uma elevação.

Na figura 6 está mostrada a amplificação do movimento vertical para diferentes períodos para o caso em que a abertura é igual a 58 metros. A amplificação em torno do modo do moonpool diminui ainda mais, comparada ao caso anterior (figura 5). A amplificação também diminui no modo da estrutura e o período ressonante aumenta um pouco mais. Aparentemente, o período ressonante devido ao moonpool varia muito pouco.

A figura 7 apresenta a amplificação do movimento vertical para diferentes períodos para a abertura igual a 47 metros. A amplificação em torno de 15 a 16 segundos diminui ainda mais, comparada aos casos anteriores (figuras 6 e 5). Também diminui no modo da estrutura e o período ressonante aumenta um pouco mais. O ponto de amplificação mínima, entre os dois períodos ressonantes tende a se tornar um ponto de cancelamento. Para períodos acima deste valor observa-se uma ondulação com dois máximos, ocorrendo próximo ao

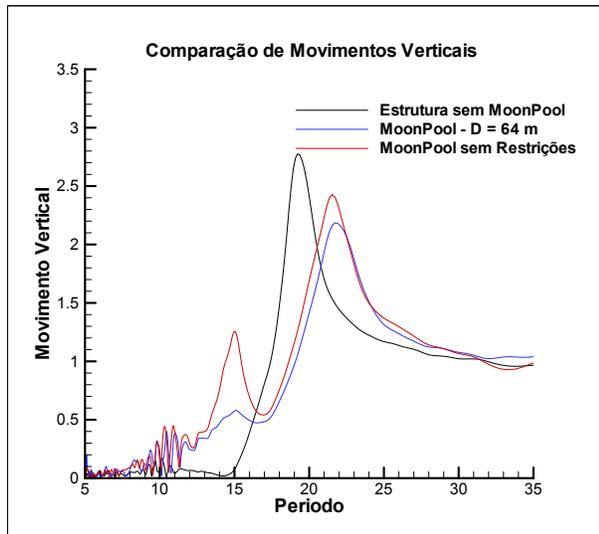


Figura 5: Movimento Vertical da Estrutura com Restrição na Abertura do MoonPool: $D = 64$ m

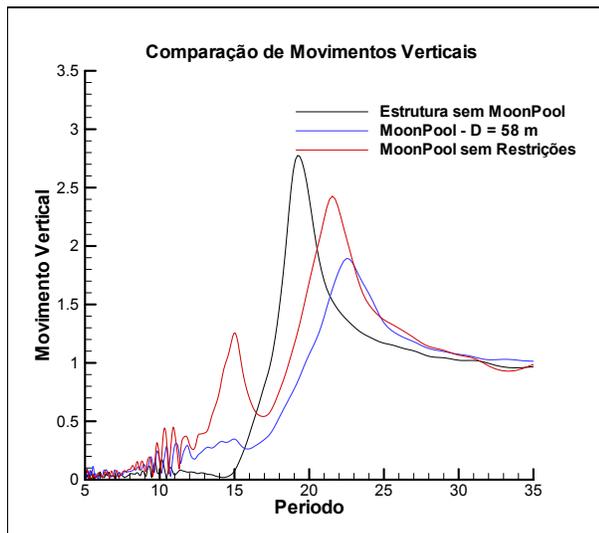


Figura 6: Movimento Vertical da Estrutura com Restrição na Abertura do MoonPool: $D = 58$ m

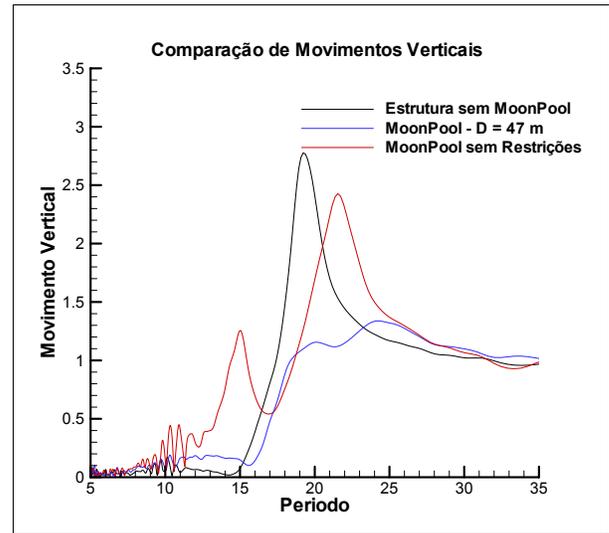


Figura 7: Movimento Vertical da Estrutura com Restrição na Abertura do MoonPool: $D = 47$ m

período do moonpool (ver figura 3 e comentários acima), porém modificado pelo acoplamento. Isto acarreta uma queda na amplificação na faixa de períodos de 15 a 20 segundos, ao se comparar com os casos anteriores.

Diminui-se ainda mais a abertura do moonpool, diâmetros de 33 e 23 metros e observa-se um único período ressonante, figuras 8 e 9. Isto é esperado, haja visto que para esses casos o comportamento do moonpool se assemelha ao de um sistema com amortecimento supercrítico.

A figura 10 reúne todos os casos para auxiliar a comparação entre os vários casos testados.

4 Conclusões

O trabalho apresentou resultados experimentais do comportamento de uma estrutura do tipo mono-coluna provida de um moonpool, desenvolvida pela Petrobras, para a qual explorou-se interferir na abertura circular da parte inferior do moonpool para se minimizar o movimento vertical.

Foram feitas medições do movimento da col-

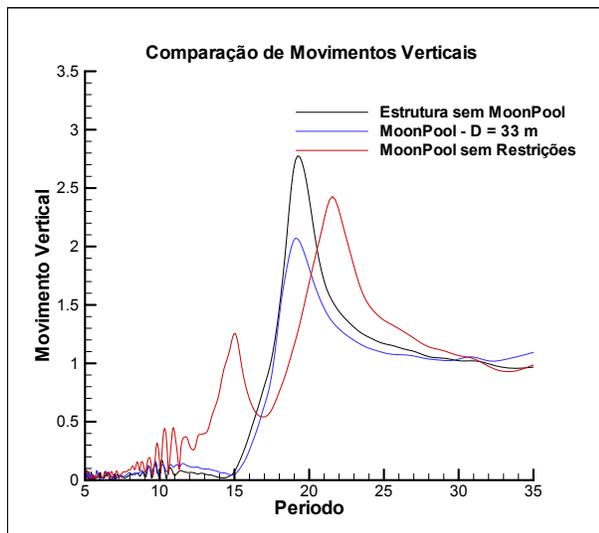


Figura 8: Movimento Vertical da Estrutura com Restrição na Abertura do MoonPool: $D = 33$ m

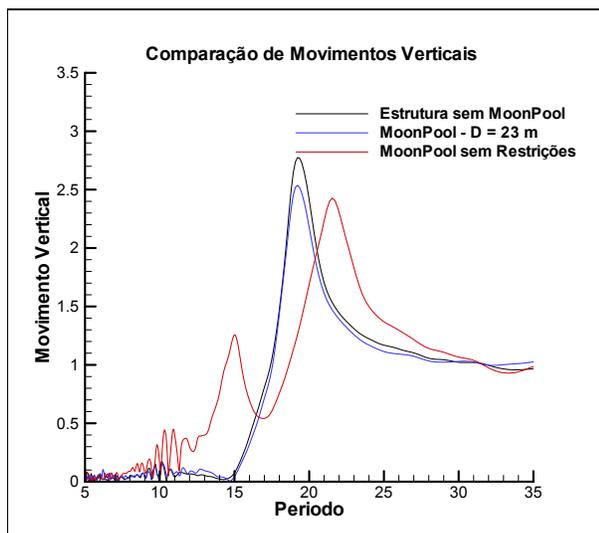


Figura 9: Movimento Vertical da Estrutura com Restrição na Abertura do MoonPool: $D = 23$ m

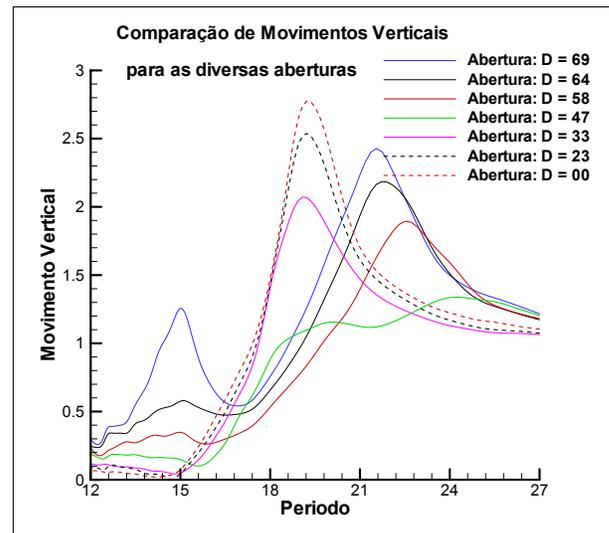


Figura 10: Movimento Vertical da Estrutura; Todos os casos

uma d'água no moonpool para a estrutura fixa. Através desses resultados pode-se observar efeitos do amortecimento e alteração no período ressonante, chegando-se até a um regime supercrítico. Esses comportamento é explorado pois interfere fortemente com os movimentos da estrutura.

Os resultados do fator de amplificação de resposta, RAO (response amplitude operator), do movimento vertical da estrutura mostram que é possível determinar-se uma abertura que minimize o movimento. Modificações na entrada permitem variar sensivelmente o fator de amplificação, obtendo-se, para uma abertura de 47 metros, talvez a melhor solução. Convém testar futuramente aberturas com diâmetros entre 47 e 58 metros.

Objetiva-se como próximo passo, desenvolver um programa de testes que permita determinar os coeficientes C_1 and C_2 e então utilizá-los na otimização do uso de moonpool como dispositivo de minimização de movimentos. Pretende-se assim, através de métodos semi-analíticos, determinar uma configuração bem otimizada que possa guiar a definição de programas experimentais posteriores para minimização de movimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras, a ANP (Agência Nacional de Petróleo) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo suporte dado ao presente trabalho.

Referências

Alberts, AB (1984) The Water Motions in a Moonpool. *Ocean Engineering*.

Barreira, R, Sphaier, SH, Masetti, IQ, Costa, AP e Levi, C, (2005) Behavior of a Mono-Column Structure (MONOBR) in Waves - OMAE67512 *International Conference on Offshore, Mechanical and Arctic Engineering* OMAE 2005, Haikidiki, Greece

Fukuda, K,(1977) Behavior of water in vertical well with bottom Opening of Ship, and its effects on Ship-Motion. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, vol 141.

Matos, V, Sales Jr, JS e Sphaier, SH,(2005) Seakeeping Tests with Gaussian Wave Packets - OMAE05-67259 *International Conference on Offshore, Mechanical and Arctic Engineering* OMAE-2005, Haikidiki, Greece.

Nishimoto, K, Videiros, PM, Fucatu, CH, Matos, V, Cueva, DR and Cueva, MS, (2001) A Study of Motion Minimization Devices of FPDSOs. *International Conference on Offshore, Mechanical and Arctic Engineering*, OMAE 2001, Rio de Janeiro, Brazil.

Torres, FGS, Cueva, M, Nishimoto, K and Malta, EB(2004) Projeto Hidrodinâmico de uma Plataforma MonoColuna - MonoBr, Sobena 2005, Rio de Janeiro, Brazil.