



## ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO INERCIAL E DE AMORTECIMENTO DE LINHAS DE ANCORAGEM NO MOVIMENTO DE MONOBOIAS

**Ricardo N. Souza**

**Adolfo E. C. López**

**Miguel A. C. Ibarra**

**Aaron A. Matala**

**Fabrcio N. Corrêa**

**Breno P. Jacob**

riconsouza@coc.ufrj.br

adolfo.correa@lamcso.coppe.ufrj.br

miguelibarra@coc.ufrj.br

aaron@coc.ufrj.br

fabricao@lamcso.coppe.ufrj.br

breno@lamcso.coppe.ufrj.br

COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia,  
PEC – Programa de Engenharia Civil, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Avenida Pedro  
Calmon, S/N, CEP 21941-596, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

**Abstract:** *In offshore oil production activities, monobuoys comprise oceanic terminals used by offloading ships to control the oil transference to the coast. They are relatively small structures, with accentuated dynamic responses when submitted to wave forces. Due to their lower inertia when compared with other types of floating systems, their mooring lines and risers lines may contribute directly with its static and dynamic behavior, evidencing a structural and hydrodynamic coupling between monobuoy and lines. In the search of an*

*analysis methodology that may take advantage on both coupled and uncoupled formulations, this work presents procedures to evaluate, based on coupled simulations, the inertial and damping contribution of the mooring lines and risers into the monobuoy's responses. These values may be inserted as input parameters into a calibrated uncoupled simulation to obtain dynamic responses with higher accuracy and lower computational cost. This work will present a case study of a standard monobuoy, with 9 mooring lines, located into a 90 meter water depth, comparing the motions provided by coupled and uncoupled simulations, with and without the proposed calibration procedure, and assessing the computational costs.*

**Keywords:** *Monobuoys, coupled analysis, uncoupled analysis, semi-coupled analysis, hydrodynamic calibration.*

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas flutuantes baseados em monoboias ancoradas são frequentemente empregados em atividades *offshore* de produção de petróleo. Compõem terminais oceânicos que controlam o escoamento da produção de plataformas do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), sendo responsável por transferi-la para dutos submarinos a partir dos quais são levados até a costa.

De maneira geral, existem duas formulações de análise global que são amplamente empregadas em projetos de sistemas flutuantes *offshore*: formulação **desacoplada** e **acoplada**. Na primeira, a participação das linhas de ancoragem e dos *risers* na resposta de movimento é representada de forma simplificada, através de escalares ou da equação da catenária, que se limita a representar seus efeitos elásticos sobre o movimento do corpo flutuante. Na segunda formulação, as linhas são modeladas pelo método de elementos finitos, incorporando, além do efeito elástico não-linear, a participação inercial e de amortecimento das linhas, representando de forma mais rigorosa o acoplamento físico do sistema.

Os resultados fornecidos pela análise acoplada são mais precisos do que aqueles gerados através de análises desacopladas, porém seu custo computacional é muito mais elevado. Corrêa, (2013) apresentou uma formulação semi-acoplada que se vale das formulações acoplada e desacoplada, sendo mais rigorosa do que esta última, mas que ainda contempla apenas a contribuição elástica das linhas, conforme detalhado na Seção 2. Devido ao porte do casco das monoboias é relevante considerar a interação dinâmica e não-linear entre seus movimentos e o comportamento estrutural das linhas de ancoragem e *risers*. Assim, na procura por uma metodologia de análise computacionalmente eficiente, este trabalho apresenta procedimentos para quantificar, a partir de simulações acopladas, a contribuição inercial e de amortecimento das linhas de ancoragem na resposta de movimentos de unidades flutuantes. Estas contribuições deverão ser inseridas como parâmetros de entrada da formulação desacoplada para se obter respostas dinâmicas mais precisas e de baixo custo computacional.

Neste trabalho serão apresentadas as etapas do procedimento de calibração de parâmetros estruturais e hidrodinâmicos com intuito de aferi-los adequadamente. Este procedimento, apresentado com detalhes na seção 3, será aplicado como estudo de caso num sistema de monoboia de alívio com nove linhas de ancoragem.

### 1.1 Formulação acoplada

A maneira mais apropriada de estudar a interação entre os componentes de sistemas flutuantes *offshore* (casco, linhas de ancoragem e *risers*) consiste em utilizar ferramentas de análise baseadas em formulações acopladas que geram simultaneamente os movimentos no casco, expressos em seis graus de liberdade, como ilustrado na Figura 1, e as respostas estruturais das linhas, considerando todas as não linearidades envolvidas na resposta dinâmica da plataforma.

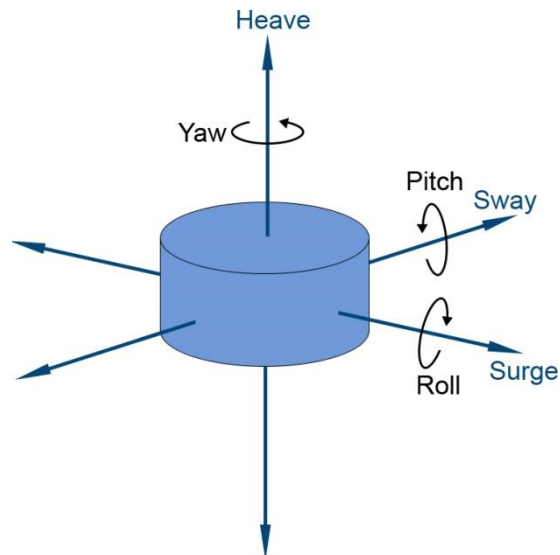


Figura 1. Graus de liberdade de uma monoboias

Há dois tipos de formulações acopladas, referidas com “Fracamente Acoplada” (FrA) e “Fortemente Acoplada” (FoA). A FrA é focada na partição de domínio do casco e das linhas: o acoplamento entre o modelo hidrodinâmico do casco e o modelo de elementos finitos das linhas é feita através de forças que atuam sobre o lado direito das equações do casco. Na FoA o casco é tratado como um “nó” da malha de elementos finitos, única que agrupa todas as linhas de ancoragem e *risers* do modelo. Embora seja conceitualmente menos rigorosa, a formulação FrA tem se mostrado adequada para análises de sistemas *offshore*.

Em relação à formulação desacoplada, ambas as formulações acopladas possuem elevado custo computacional, principalmente quando envolve a solução de linhas de ancoragem e *risers* modelados com malhas muito refinadas de elementos finitos. Estas malhas podem atingir milhares de graus de liberdade, inviabilizando suas aplicações em análises de projeto com um grande número de casos de carregamento.

## 1.2 Formulação semi-acoplada

Com o objetivo de obter simulações mais rápidas do que as geradas pelas formulações acopladas e com melhores resultados do que aqueles fornecidos pelas formulações desacopladas, Corrêa, (2013) desenvolveu a simulação semi-acoplada. Nesta formulação são executadas simulações acopladas estáticas seguidas da determinação automática da matriz global de rigidez das linhas sobre os seis graus de liberdade do casco. Uma vez aferida esta matriz na posição de equilíbrio estático, as linhas de elementos finitos são retiradas da simulação dinâmica e a matriz passa a ser incorporada na matriz de rigidez da equação de movimento do casco. Além disso, a força estática (força média) que as linhas de elementos finitos exercem sobre o casco passa a ser tratada como uma constante do lado direito daquela equação.

A metodologia considera adequadamente a contribuição da rigidez das linhas e, ao mesmo tempo, os efeitos da parcela estática das condições ambientais de corrente atuando sobre elas. Entretanto, em sua forma original a formulação semi-acoplada não considera os efeitos de amortecimento e inércia das linhas.

### 1.3 Contribuição Inercial e de Amortecimento das Linhas

Neste trabalho será apresentado um estudo mostrando que as simulações semi-acopladas e/ou desacopladas podem ser calibradas para representar adequadamente a contribuição inercial e de amortecimento das linhas. Para tal, utilizam-se as simulações acopladas que permitem a obtenção de respostas dinâmicas precisas e com baixo custo computacional.

## 2 PROCEDIMENTO DA FORMULAÇÃO SEMI-ACOPLADA

Conforme mencionado na seção 1.2, a formulação semi-acoplada é baseada em uma sequência de análises acopladas e desacopladas, implementadas automaticamente em um único programa. Primeiramente, é realizada uma simulação estática não linear envolvendo a formulação acoplada; depois são executadas simulações estáticas para avaliação da matriz de rigidez das linhas; e, em seguida, uma simulação dinâmica do casco baseada na formulação desacoplada. De maneira geral, a análise semi-acoplada consiste em três passos, descritos a seguir.

### 2.1 Simulação Estática

Nesta etapa, as linhas são representadas usando o Método de Elementos Finitos (FEM) e o casco como corpo rígido. Para cada carregamento ambiental (uma combinação de onda, vento e/ou corrente) aplicado no sistema, a posição de equilíbrio e as reações nas linhas são solucionadas a partir de uma simulação estática acoplada.

### 2.2 Cálculo da Matriz de Rigidez

A partir da posição média determinada na etapa anterior, a matriz de rigidez das linhas é determinada.

A matriz de rigidez ( $k_{j,i}$ ) (Rao, 1995) pode ser obtida medindo a força resultante ( $P$ ) na direção ( $j$ ), causada por um pequeno deslocamento ou rotação do casco ( $d$ ) na direção ( $i$ ).

$$k_{j,i} = \frac{P_j}{d_i} \quad i=1,\dots,6; \quad j=1,\dots,6 \quad (1)$$

A partir da posição de equilíbrio do casco mencionada na etapa 2.1, são realizadas 6 simulações estáticas acopladas (uma para cada grau de liberdade) para calcular a matriz de rigidez linear equivalente das linhas nos 6 graus de liberdade do casco. Esta matriz representa a influência elástica das linhas sob o comportamento dinâmico do casco.

$$k_{\text{cada linha de ancoragem}} = \begin{pmatrix} \frac{P_1}{d_1} & \dots & \frac{P_6}{d_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{P_1}{d_6} & \dots & \frac{P_6}{d_6} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Num processo similar, podem ser calculadas as matrizes de rigidez linear equivalente isolada para cada linha, que representa o esforço no topo o em qualquer outro ponto ao longo

dela devido a um deslocamento unitário em cada um dos seis graus de liberdade do casco. Estas matrizes podem ser utilizadas para reportar de forma aproximada o esforço elástico das linhas.

## **2.3 Simulação dinâmica simplificada**

Finalmente, no último passo da formulação semi-acoplada, é realizada a simulação dinâmica do casco, incluindo em sua equação a rigidez e a força estática das linhas conforme mencionado anteriormente. Para efetuar esta simulação, é somada a contribuição da matriz equivalente das linhas na matriz de rigidez hidrostática do casco, ao passo que é desabilitado do programa a malha de elementos finitos das linhas.

Cabe recordar que este procedimento, em sua formulação original, não é capaz de capturar efeitos de amortecimento e inercial das linhas; no entanto, estas parcelas podem ser calibradas separadamente, conforme apresentado a seguir.

## **3 PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO**

Usualmente, procedimentos de calibração de coeficientes hidrodinâmicos de sistemas *offshore* são aferidos a partir de ensaios de decaimento em tanques de prova. Neste trabalho, de forma análoga, a contribuição das linhas será aferida a partir de simulações de decaimento utilizando a formulação acoplada, que implicitamente já contempla a parcela inercial e de amortecimento das linhas, e a formulação desacoplada, que considera apenas a parcela inercial do casco.

### **3.1 Coeficientes de amortecimento linear e quadrático ( $C_L$ e $C_Q$ )**

Da mecânica geral (Rao, 1995), a equação da dinâmica de corpos rígidos clássica é dada por:

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) \quad (3)$$

onde:  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$  e  $x(t)$  são, respectivamente, a aceleração, velocidade e deslocamento do corpo; e,  $m$ ,  $c$  e  $k$  são, respectivamente, a massa total, o amortecimento e o coeficiente de restauração/rigidez do sistema.

A equação de movimento desacoplada de um corpo flutuante em oscilação livre amortecida (teste de decaimento) pode ser reescrita de forma simplificada considerando os coeficientes de amortecimento linear ( $C_L$ ) e quadrático ( $C_Q$ ), e a massa total do sistema como sendo a soma da massa do casco ( $m_c$ ), da massa adicionada do fluido ( $m_a$ ) e da massa das linhas ( $m_l$ ):

$$(m_c + m_a + m_l)\ddot{x}(t) + C_L\dot{x}(t) + C_Q\dot{x}(t)|\dot{x}(t)| + k_x x(t) = 0 \quad (4)$$

Onde:  $k_x$  é a rigidez na direção x.

Finalmente os coeficientes de amortecimento linear e quadrático podem ser obtidos como:

$$c_L = 2b \frac{(m_c + m_a + m_l)}{T} \quad (5)$$

$$c_Q = \frac{3}{8} a(m_c + m_a + m_l) \quad (6)$$

Onde os parâmetros  $a$  (parte linear) e  $b$  (parte quadrática) são obtidos a partir da regressão linear do gráfico das amplitudes de movimento do teste de decaimento utilizando, por exemplo, o método de mínimos quadrados:

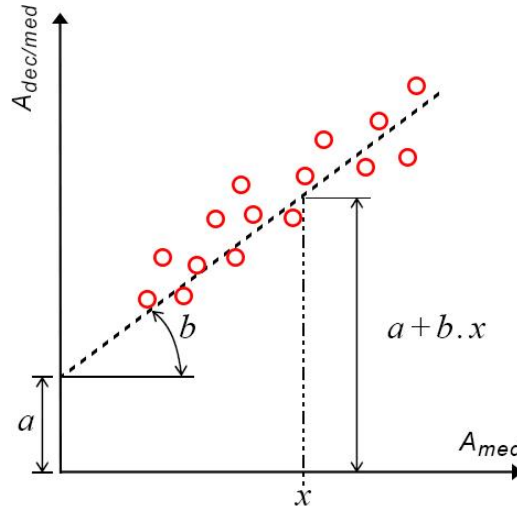


Figura 2. Regressão Linear para cálculo dos parâmetros  $a$  e  $b$

No gráfico da Figura 2, o eixo vertical corresponde ao decrescimento da amplitude dividido pela amplitude média da série; e o eixo horizontal à amplitude média de cada ciclo:

$$A_{dec/med} = \frac{X_i - X_{i+1}}{(X_i + X_{i+1})/2} \quad (7)$$

O valor de  $X_i$  corresponde à amplitude simples do ciclo  $i$  da resposta dinâmica de decaimento do casco em algum grau de liberdade como mostra a Figura 3. Recomenda-se determinar  $X_i$  pela diferença entre o pico máximo e mínimo do ciclo  $i$ ; isto para evitar efeitos de flutuação da média do histórico do decaimento:

$$X_i = \frac{x^{máx}_i - x^{mín}_i}{2} \quad (8)$$

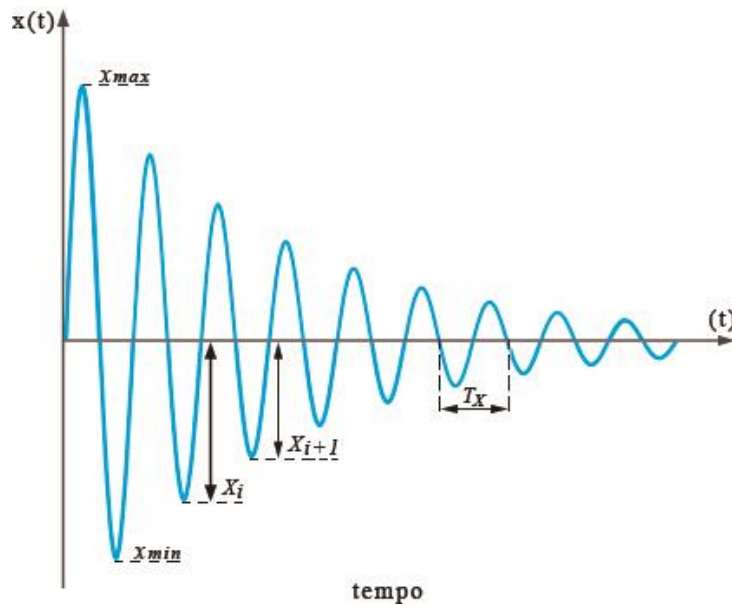


Figura 3. Série de decaimento do movimento de translação do casco

Através de duas simulações acopladas (com e sem amortecimento das linhas) obtêm-se os coeficientes  $a$  e  $b$  da reta de cada simulação ( $a_a, b_a$  – com amortecimento das linhas;  $a_b, b_b$  – sem amortecimento das linhas). O coeficiente linear ( $a_{linhas}$ ) e angular ( $b_{linhas}$ ) da reta que define a participação do amortecimento das linhas na resposta do sistema deve ser obtida a partir da subtração dos coeficientes das duas simulações acopladas ( $a_{linhas}=a_a-a_b$ ;  $b_{linhas}=b_a-b_b$ ), como apresentado na Figura 4.

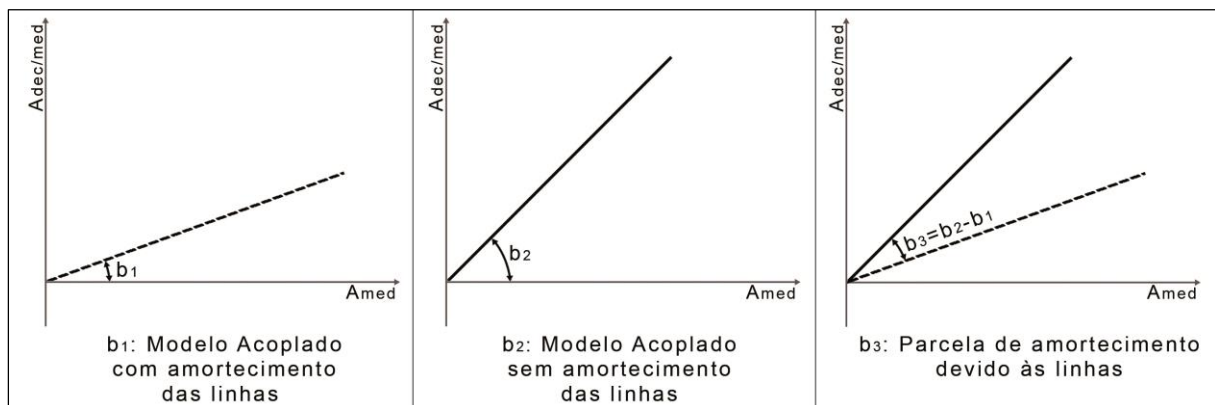


Figura 4. Regressão linear indicando a participação de amortecimento  $a$  e  $b$  das linhas

### 3.2 Determinação da Participação Inercial das Linhas no Período Natural do Sistema

Pode-se determinar a contribuição inercial das linhas no período natural de decaimento do sistema a partir destas duas formulações da seguinte maneira: primeiramente, assumindo que as matrizes de massa e rigidez do sistema são lineares e diagonalmente dominantes, é identificado o período natural ( $T_n$ ) da simulação acoplada e semi-acoplada/desacoplada através da diferença entre picos consecutivos do gráfico de decaimento, como mostra a Figura 2.



Recordando que a formulação acoplada considera a contribuição inercial do casco e das linhas e que a formulação semi-acoplada leva em consideração apenas a parcela inercial do casco, a vibração livre do sistema sem amortecimento ( $c=0$ ) está determinada pela equação diferencial (9):

$$F(t) = m\ddot{x}(t) = -kx(t) \quad (9)$$

Para ela, uma solução é dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{2\pi}{T_n} \quad (10)$$

Onde  $\omega_n$  é a frequência natural de vibração do sistema.

Em seguida, a participação das massas do modelo analisado por cada formulação é determinada pelos seus períodos de vibração:

$$m_{acoplado} = k \left( \frac{T_{acoplado}}{2\pi} \right)^2 \quad (11)$$

$$m_{semiacoplado} = k \left( \frac{T_{semiacoplado}}{2\pi} \right)^2 \quad (12)$$

Consequentemente, a participação inercial das linhas pode ser calculada pela diferença entre as massas do sistema acoplado e semi-acoplado:

$$\Delta m = m_{acoplado} - m_{semiacoplado} = m_{linhas} \quad (13)$$

## 4 ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão aplicadas as etapas necessárias do procedimento de calibração dos parâmetros estruturais-hidrodinâmicos das linhas de ancoragem de uma monoboia com intuito de aferi-los adequadamente para serem utilizados em uma simulação semi-acoplada.

### 4.1 Modelo

O modelo consiste numa monoboia cilíndrica com as seguintes características:

**Tabela 1. Propriedades da monoboia estudada**

Diâmetro	18,00 m
Altura	7,00 m
Calado	4,50 m
Aproamento com X global	225°
Linhas de ancoragem	9 linhas (3 grupos de 3 linhas cada uma)
Lamina d'água	90,00 m

A modelagem foi feita utilizando o programa SITUA/PROSIM (JACOB B.P, 2006) como mostra a Figura 5. No estudo, o procedimento de calibração foi aplicado apenas no deslocamento da monoboia na direção de *surge* (ver Figuras 1 e 6).

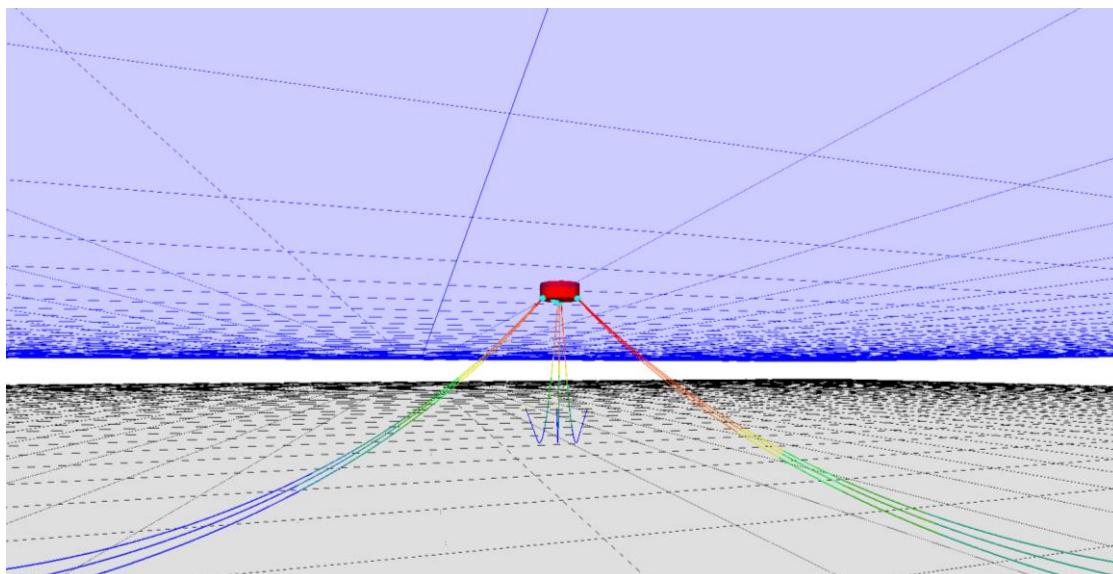


Figura 5. Modelo de monoboia ancorada

O corpo foi submetido a uma condição inicial de um deslocamento de 1.00 m na direção de *surge* para o casco começar a oscilar livremente. O tempo de cada simulação foi de 1000 segundos e não foram considerados carregamentos ambientais.

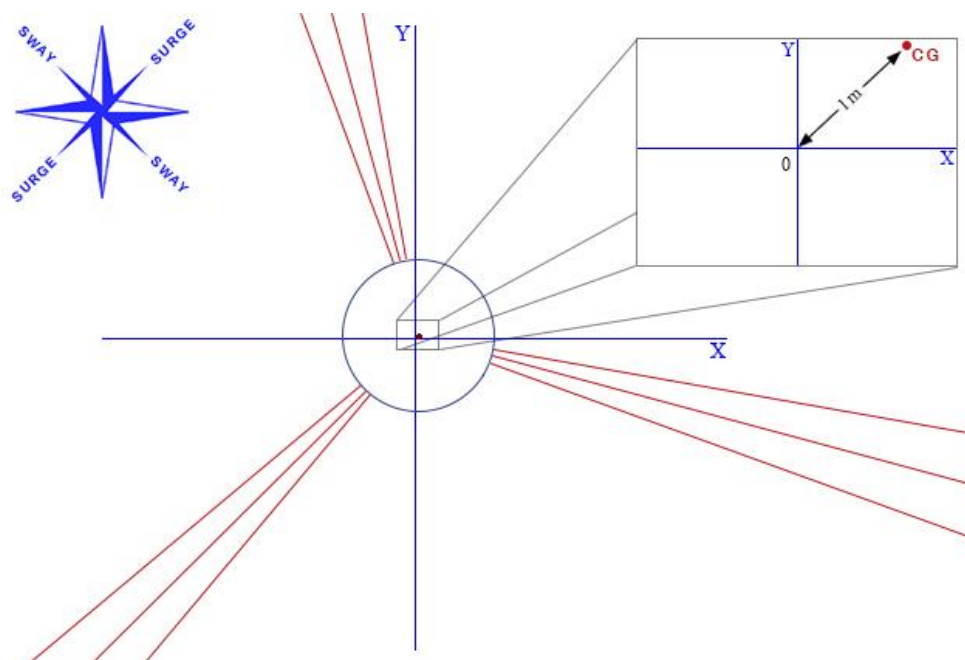
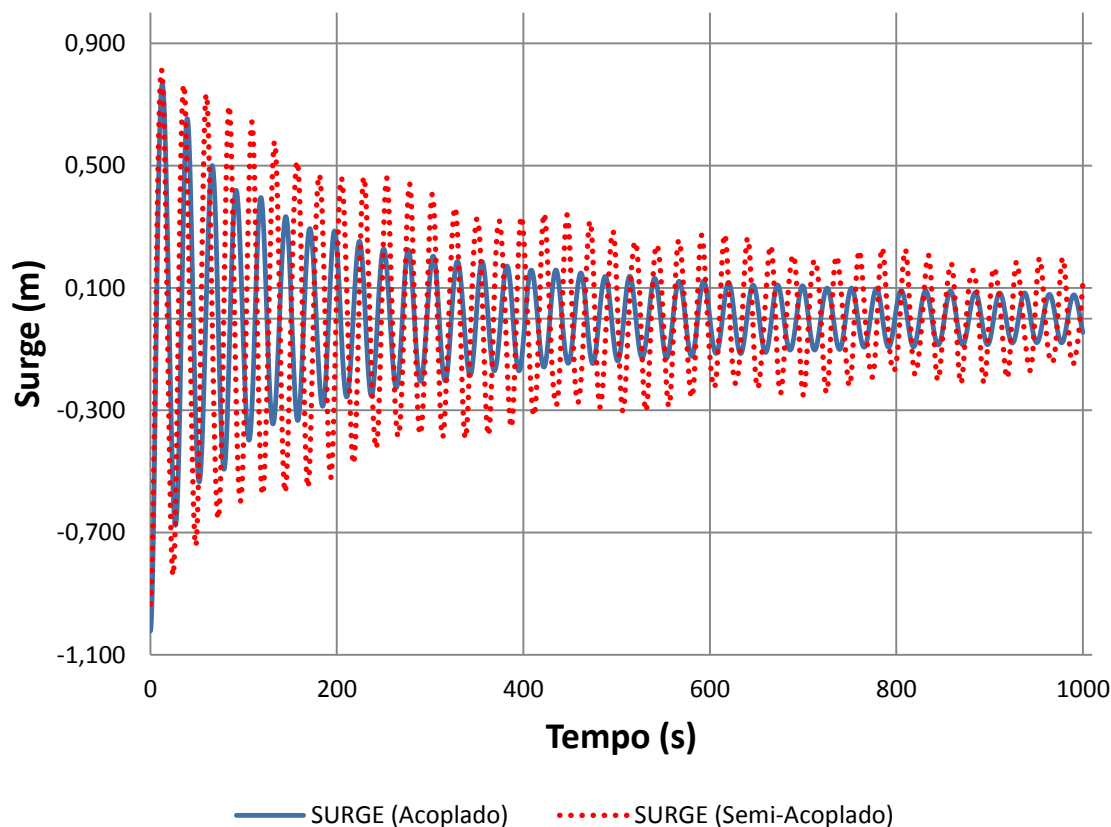


Figura 6. Condição inicial do casco

## 4.2 Obtenção dos coeficientes de amortecimento linear e quadrático

Como resposta da condição inicial aplicada obteve-se a serie temporal na direção de *surge*.



**Gráfico 1: Resposta do sistema na direção SURGE**

A partir da resposta do Gráfico 1 pode-se medir o período natural ( $T$ ) de oscilação nesta direção.

$$T_{surge} = 26,42 \text{ s}$$

A massa das linhas foi calculada através das equações (11) e (12):

$$m_{semiacoplado} = \frac{k_{acoplado}}{4\pi^2} (T_{acoplado}^2 - T_{semiacoplado}^2) \quad (14)$$

Deste modo, para avaliar a massa do sistema, deve-se conhecer primeiramente a rigidez das linhas de ancoragem na direção de *surge* do modelo numérico acoplado ( $k_{acoplado}$ ). Esta rigidez pode ser facilmente calculada aplicando offsets estáticos incrementais no modelo numérico na direção de *surge*, a partir da posição neutra, registrando a reação horizontal que as linhas exercem sobre o casco. A Tabela 2 apresenta a relação deslocamento vs força que as linhas exercem sobre a monoboia estudada nesta mesma direção:

Tabela 2. Cálculo da rigidez do sistema da direção *Surge*

Deslocamento (m)	Força (kN)
0,5	63,391
<b>1,0</b>	<b>128,728</b>
1,5	195,752
2,0	265,331
2,5	337,878

$$k_{surge} = 128,7 \text{ kN/m}$$

Tabela 3. Cálculo da massa das linhas

Análise	Período (s)	Rigidez (kN/m)	Massa (kg)
Acoplado	26,7	128,7	2 476,07
Semi-Acoplado	23,9	128,7	1 984,56

$$\text{Massa das Linhas} = 491,52 \text{ kg}$$

Como apresentado na Figura 4, um dos objetivos do procedimento Semi-acoplado Calibrado (SaC) é calcular a participação das linhas de ancoragem no amortecimento do sistema. Para isso, foram obtidas respostas desconsiderando as forças de arrasto do casco, ou seja, foi zerado o coeficiente de arrasto transversal da monoboia (*Drag Coefficient*)  $CD=0$ .

As respostas oscilatórias de cada uma das análises foram tratadas igualmente e, a partir disto, foram calculados os coeficientes de amortecimento linear e quadrático  $C_L$  e  $C_Q$  usando as equações (5) e (6):

Tabela 4. Coeficientes de amortecimento linear e quadrático na direção SURGE

Análise	Parte linear $a$ (adimensional)	Parte quadrática $b$ (1/m)	Coef. Linear $C_L$ (kg/s)	Coef. Quadrático $C_Q$ (kg/m)
Acoplado	-0,0096	0,37	-2 150	418 050
Acoplado $CD=0$	-0,0117	0,27	-2 630	304 810
<b>Contribuição das Linhas</b>			$\cong 0$	$\cong 114$

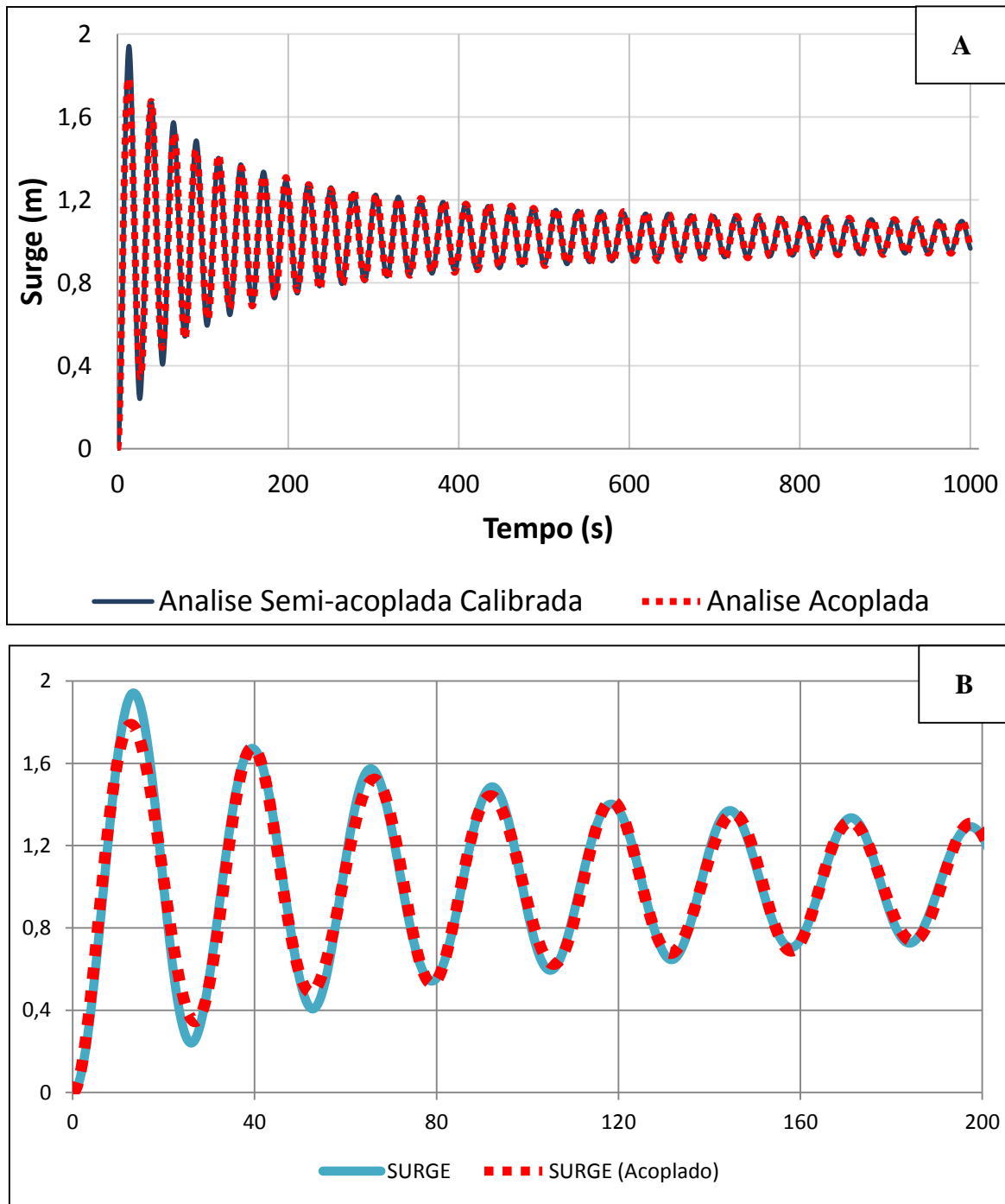
Como a principal fonte de amortecimento do sistema obedece à equação de Morison, como esperado, os coeficientes lineares de amortecimento ( $C_L$ ) deram resultados muito próximos de zero.

### 4.3 Aplicação dos Coeficientes no Modelo Semi-Acoplado

Uma vez determinada a participação inercial e de amortecimento das linhas, os escalares obtidos foram inseridos no modelo semi-acoplado do programa SITUA-Prosim.

O Gráfico 2 apresenta os resultados de um teste de decaimento do modelo simulado com a formulação acoplada e semi-acoplada após a calibração dos coeficientes de massa e amortecimento quadrático.

Como pode ser observado no teste de decaimento, o procedimento de calibração sugerido neste artigo, que aferiu a parcela inercial e de amortecimento das linhas de elementos finitos da monoboia para utilizá-los como coeficientes escalares no modelo semi-acoplado, foi adequado para fazer com que a formulação semi-acoplada fosse capaz de gerar resultados muito próximos da formulação acoplada.



**Gráfico 2. (A) Resposta da análise acoplada vs Semi-acoplada Calibrada e (B) Detalhe da resposta da análise acoplada vs. Semi-acoplada Calibrada onde é possível notar a grande similaridade entre os dados**

## 4.4 Eficiência Computacional

A Tabela 5 apresenta a comparação do tempo de simulação obtido nos testes de decaimento realizados com a monoboia com nove linhas de ancoragem. Observou-se que a formulação semi-acoplada foi 85 vezes mais rápida que a formulação acoplada para o modelo em questão. Cabe observar que as simulações acopladas envolveram a modelagem das linhas por malhas de elementos finitos com 102 elementos para cada linha, totalizando 918 elementos, acrescentando ao procedimento de solução 2781 graus de liberdade, além dos seis graus de liberdade da monoboia. Em contrapartida, as simulações dinâmicas do método semi-acoplado (Corrêa, 2013) envolveram apenas os seis graus de liberdade do caso (Figura 1).

Tabela 5. Comparação dos recursos gastos nas simulações

Simulação	Acoplada	Semi-acoplada calibrada (SaC)	Economia (%)
Tempo de simulação (s)	108,90	1,28	98,82

## 5 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta as etapas necessárias para o procedimento de aferição dos coeficientes hidrodinâmicos obtidos a partir de simulações acopladas, que consideram a participação estrutural e hidrodinâmica das linhas na resposta de movimento do casco. A aferição é realizada para que os coeficientes obtidos possam ser utilizados como dados de entrada em simulações desacopladas ou semi-acopladas.

O objetivo principal desta aferição é permitir que simulações desacopladas ou semi-acopladas, de baixo custo computacional, tornem-se mais precisas e, quando comparadas com simulações acopladas, forneçam resultados aproximados. Estas simulações simplificadas são recomendadas apenas para as fases preliminares do projeto e permitem que combinações ambientais críticas possam ser identificadas com baixo custo computacional.

Ressalta-se que na intenção de propor uma solução rápida alguns *softwares* desprezam as contribuições inerciais e de amortecimento das linhas, contudo este tipo de aproximação é aceitável apenas para grandes estruturas, como FPSOs ou semi-submersíveis, com um grande número de linhas. Esta aproximação não é recomendável para pequenas estruturas, como a monoboia estudada neste trabalho, por isso a simulação realizada levou em consideração tanto a contribuição da rigidez das linhas quanto a contribuição inercial e de amortecimento das mesmas, parâmetros bastante relevantes quando comparados com a contribuição do casco.

Os procedimentos adotados no estudo de caso mostram a proximidade das repostas dinâmicas entre a simulação acoplada tradicional e a simulação semi-acoplada calibrada proposta. Quando comparada com a simulação acoplada, a simulação semi-acoplada sugerida apresentou uma redução superior a 98% no tempo de execução e manteve a qualidade dos resultados.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1.] CORRÊA, F.N., JACOB, B.P., “Semi-Coupled Scheme for the Analysis of Floating Production Systems”. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), Nantes, France, 2013.
- [2.] RAO, S.S. “Mechanical Vibrations”, Prentice Hall, 3th Edition, 1995.
- [3.] CORRÊA, F.N. “Ferramentas computacionais para análise acoplada de sistemas offshore.” Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008.
- [4.] GIRÓN, A.R.C. “Projeto Integrado de Sistemas de Ancoragem e Risers em Plataformas Flutuantes de Produção de Petróleo”. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro: 2013.
- [5.] ROCHA, S.D. “Estudo de comportamento de monoboias na exploração de petróleo offshore”. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro: 2000.
- [6.] JACOB B.P., “PROSIM: Simulação numérica do comportamento de Sistemas Offshore para exploração de petróleo”. CENPES/PETROBRAS e LAMCSO/UFRJ. Manual teórico. 2006.