



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES HIDRODINÂMICAS EM CILINDRO VERTICAL PARCIALMENTE SUBMERSO

Walter Jesus Paucar Casas, walter.paucar.casas@ufrgs.br¹
Wilques Wanderson Ferreira Pinheiro, wilquespinheiro@hotmail.com¹
Emanuel Moutinho Cesconeto, emanuelemc@hotmail.com¹
Amanda Pereira Peres, amandaperes09@hotmail.com¹
Guilherme Missio Parizotto, guilherme.parizotto@ufrgs.br¹
Waldir Terra Pinto, waldir.pinto@gmail.com²
Jairo Fernando de Lima Coelho, jairocoelho@gmail.com²
Bruno Quaresma Leonardo, bqcorry@gmail.com²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 521, Porto Alegre, RS, 90050-170

²Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, 96203-900

Resumo: Este trabalho visa a determinação numérico-experimental de propriedades hidrodinâmicas em um cilindro de seção circular parcialmente submerso. A solução numérica do problema foi desenvolvida através do método dos painéis, o qual foi programado no pacote MATLAB®, sendo que o modelo do cilindro é excitado segundo os parâmetros de onda registrados a partir do ensaio de oscilação forçada do cilindro, possibilitando a determinação da massa adicional e amortecimento hidrodinâmico. O desenvolvimento experimental foi efetivado através de ensaios em tanque de testes, com o uso de um carro de arrasto. Nos ensaios, o conjunto de sensores no sistema detectou as variáveis de aceleração e carregamento na haste de sustentação do cilindro, deslocamento do carro e altura de onda. Os ensaios possibilitaram a obtenção dos parâmetros necessários à solução numérica. O desenvolvimento da solução numérica hidrodinâmica via simulação em programa comercial foi realizado no pacote ANSYS® AQWA™, onde o cilindro foi modelado parcialmente submerso, sendo excitado pela frequência e velocidade de onda, os quais foram obtidos nos ensaios experimentais. Os resultados numéricos da programação e da simulação mostraram boa correspondência.

Palavras-chave: : Método dos painéis, estrutura offshore, teoria da difração, oscilação forçada

1. INTRODUÇÃO

A interação fluido-sólido, apresenta em seu contexto a ação do movimento do fluido sobre o sólido, estando este ancorado ou não ancorado. Olson e Bathe (1985) enumeram algumas estruturas permanentemente sujeitas à ação do fluido sobre o sólido e do sólido sobre o fluido, como plataformas de petróleo, barcos de uma maneira geral e mais recentemente os túneis submersos flutuantes (*Submerged Floating Tunnel*).

O objetivo geral do trabalho é a determinação propriedades hidrodinâmicas de um cilindro rígido vertical parcialmente submerso, através de ferramentas numérico-experimentais, que abrangem os objetivos específicos seguintes: Implementar um programa computacional que utilize o método dos painéis, desenvolver uma arquitetura de sensores para mensurar carga, aceleração do cilindro, deslocamento do carro e amplitude de onda, fornecendo os parâmetros pertinentes ao cálculo de massa adicional, desenvolver uma metodologia de ensaio capaz de executar as manobras de oscilação longitudinal forçada do cilindro, usando um sistema PIV (*Particle Image Velocimetry*) para mapear a não ocorrência da formação de vórtices na superfície submersa do cilindro, implementar um modelo do cilindro, com dimensões semelhantes ao modelo experimental para simulação no programa de elementos de contorno ANSYS® AQWA™ e comparar os resultados obtidos na programação no pacote MATLAB® e da simulação no programa ANSYS® AQWA™ com os dados experimentais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A finalidade deste capítulo é apresentar os conceitos básicos para avaliar o comportamento dinâmico de estruturas, assim como a descrição dos processos associados à teoria de ondas.

2.1. Equações de movimento de um corpo parcialmente submerso

Estruturas flutuantes sobre a água possuem seis graus de liberdade de movimento. Para uma plataforma flutuante que está sob a ação de água, é necessário empregar linhas de ancoragem extremamente fortes, para limitar os movimentos. Os seis modos de movimento conforme Fig. 1 não ocorrem independentemente e são excitados de uma forma acoplada.

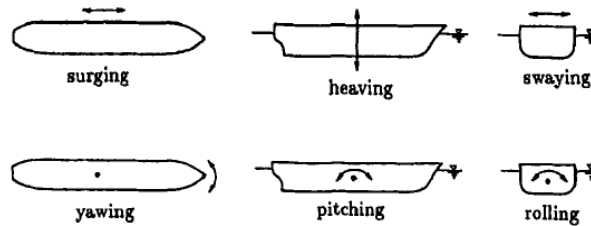


Figura 1. Seis modos de movimento.

Fonte: Adaptado de Goda (2010)

O movimento de um corpo rígido, quando sob o ataque das ondas, do vento e outras fontes pode ser expresso pela equação de movimento, Eq. (1), para os seis modos acoplados de movimento, Goda (2010):

$$\sum_{j=1}^6 \{(\mathbf{M}_{kj} + \mathbf{m}_{kj})\ddot{x}_j + \mathbf{N}_{kj}\dot{x}_j + \mathbf{C}_{kj}\dot{x}_j|\dot{x}_j| + \mathbf{B}_{kj}x_j + \mathbf{R}_{kj}(x_j)\} = \mathbf{X}_k(t) \quad (1)$$

onde,

k : 1~6 , corresponde aos seis modos de movimento respectivamente.

j : refere-se ao modo de movimento acoplado com o modo k .

x_j : é o deslocamento ou rotação do movimento acoplado no modo j .

$\mathbf{M}_{kj}$: termos da matriz de inércia, a qual representa a massa ou momento de inércia do corpo na direção de k quando o corpo realiza movimento no modo j .

$\mathbf{m}_{kj}$: massa adicional, a qual representa o coeficiente do componente da resistência do fluido, proporcional à aceleração na direção de k , quando o corpo gera ondas devido ao movimento no modo j .

$\mathbf{N}_{kj}$: coeficiente de amortecimento da onda, que é o coeficiente da componente da resistência do fluido, proporcional à velocidade.

$\mathbf{C}_{kj}$: coeficiente da força de amortecimento não linear, tal como a força de arrasto.

$\mathbf{B}_{kj}$: coeficiente da força restauradora devido à flutuabilidade do corpo que é proporcional ao deslocamento (rotação) do corpo.

$\mathbf{R}_{kj}(x_j)$: força de reação do sistema de ancoragem função de x_j , pode ser não linear com o deslocamento x_j .

$\mathbf{X}_k(t)$: forças externas, por exemplo, ondas, vento e carregamento das correntes marinhas agindo na direção k .

A solução do sistema de equações diferenciais, Eq. (1), pode ser efetuada no domínio tempo, recorrendo a funções de resposta a impulso, ou no domínio frequência, através da aplicação da transformada de Fourier a ambos os membros da equação.

O movimento de um corpo é determinado, através do resultado do equacionamento das forças externas $\mathbf{X}_k(t)$ com a inércia e a resistência do fluido, as quais estão definidas no lado esquerdo da equação ,Eq. (1). Quando o movimento do corpo é completamente restrito, ($x_j=0$), a força externa representará somente a força de reação da ancoragem $\mathbf{R}_k$.

A única componente das forças externas $\mathbf{X}_k(t)$, inerente ao corpo é a força de impulso da onda ou forças de arraste do corpo. Esta força provoca o movimento do corpo na direção de propagação das ondas.

Quando o trem de ondas é aleatório, o valor médio da força resultante das ondas é desenvolvido através do valor médio quadrado da altura, ou valor RMS da altura da onda, H_{RMS} .

2.2 Carregamento em Corpo Parcialmente Submerso

A relação entre o movimento do fluido e a resposta do corpo é descrita por parâmetros físicos; é através da interação destes parâmetros que se torna possível a implementação da modelagem do carregamento. Um exemplo desta interação é entre o coeficiente de inércia, C_M , e a força por unidade de comprimento, $\bar{q}_l$, que é o coeficiente de restrição

ao movimento do corpo, Fig. (2). O coeficiente C_M relaciona $\bar{q}_I$ com o parâmetro de aceleração constante do fluido, $\dot{u}$, conforme Wilson (2003):

$$\bar{q}_I = C_M \rho \pi \frac{D^2}{4} \dot{u} \quad (2)$$

onde,

ρ : densidade do fluido.

D : diâmetro do cilindro.

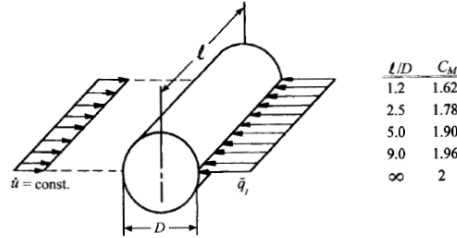


Figura 2. Cilindro rígido sobre um fluido com aceleração constante.

Fonte: Adaptado de Wilson (2003)

Uma segunda interação considera o comprimento (l) e o diâmetro (D) do cilindro, Fig. (2), onde se tem a relação l/D vs C_M , reportado por Wendel (1956) apud Blevins (2001). Esta relação está baseada em valores teóricos de outro parâmetro não dimensional, o coeficiente de massa adicional C_A , Eq. (3). A Fig. (2) mostra que aumentando o comprimento do cilindro, o valor de C_M aproxima-se do limite igual a 2, e o valor de C_A tende à unidade:

$$C_A = C_M - 1 \quad (3)$$

Na terceira interação entre parâmetros, um cilindro rígido, imerso em um fluido, possui uma massa por unidade de comprimento igual a $\bar{m}_0$, possui um deslocamento absoluto de translação $v = v(t)$, e o fluido está em repouso, Figura. (3). Com base na segunda lei de Newton de movimento e na teoria hidrodinâmica, a força por unidade de comprimento $\bar{q}_I$, requerida, segundo Wilson, 2003, para atingir uma aceleração de $\ddot{v}$ para o cilindro é:

$$\bar{q}_I = \left(\bar{m}_0 + C_A \rho \pi \frac{D^2}{4} \right) \ddot{v} = \bar{m} \ddot{v} \quad (4)$$

A Eq. (4) apresenta a massa virtual do cilindro por unidade de comprimento, $\bar{m}$, igual à soma de $\bar{m}_0$ no vácuo com a massa adicional ou massa aparente por unidade de comprimento, dada por $C_A \rho \pi \frac{D^2}{4}$. Esta massa adicional é resultado do arrasto das partículas do fluido pelo movimento do corpo cilíndrico.

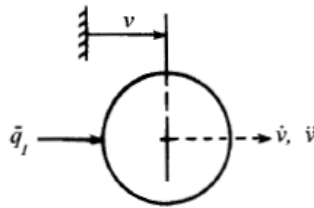


Figura 3. Cilindro rígido acelerado imerso em fluido ideal.

Fonte: Adaptado de Wilson, (2003)

A quarta interação é o coeficiente viscoso ou coeficiente de arrasto C_D , responsável pela interação da força por unidade de comprimento $\bar{q}_D$ e a velocidade do escoamento do fluido u , perpendicular ao eixo longitudinal. Nestes termos, as medições realizadas mostram que vale a relação apresentada na Eq. (5) onde é necessário o uso do valor absoluto em sinal sobre o valor da velocidade u . Esta condição garante que a velocidade seja sempre oposta à direção de $\bar{q}_D$, como se vê na Fig. 4. Para este caso de escoamento, a relação experimental de C_D a dois parâmetros adimensionais, a rugosidade do cilindro e o número de Reynolds, pode ser considerada através da Eq. (6) onde μ é a viscosidade absoluta do fluido, D é a característica dimensional do corpo e ρ a densidade do fluido.

$$\bar{q}_D = C_D \rho \frac{D}{2} |u| u \quad (5)$$

$$R_e = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (6)$$

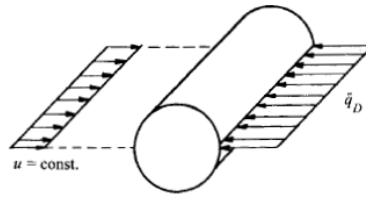


Figura 4. Arrasto viscoso sobre cilindro rígido e estacionário.

Fonte: Adaptado de Wilson (2003)

No caso de cilindros de superfície lisa, alvos de um escoamento uniforme, o valor do coeficiente de arrasto C_D é próximo da unidade, nos casos em que o valor do número de Reynolds está dentro da faixa de 1000 até 200000.

3. ANÁLISE DO CARREGAMENTO DAS ONDAS E DOS MOVIMENTOS DO CORPO

O comportamento hidrodinâmico de um corpo é o resultado da interação da superfície molhada do corpo parcialmente submerso e o fluido. Assim, o fluido está exercendo forças dinâmicas sobre a superfície do corpo, devido ao constante movimento de oscilação do fluido. Outros fatores que influenciam no comportamento hidrodinâmico é a distribuição de massa do corpo e a sua geometria. A análise deste comportamento é realizada neste trabalho através do método de painéis, que divide a superfície submersa do corpo em vários elementos e considera, por aproximação, que o potencial de velocidades sobre cada painel é constante em sua superfície.

3.1. Modelagem dos Sistemas Físico e Hidrodinâmico

As análises feitas neste trabalho são no domínio da frequência, portanto os resultados calculados para os potenciais, velocidades e forças são complexos. Também se adota a teoria de ondas lineares, portanto a correspondência tempo $\leftrightarrow$ frequência se dá através do termo $e^{i\omega t}$.

O corpo é modelado como um corpo rígido, pois não existe interesse em seus esforços, e gira ao redor de seu ponto de rotação (que pode ou não coincidir com seu centro de gravidade).

O sistema hidrodinâmico é considerado invíscido, incompressível e possui profundidade infinita, para simplificação dos cálculos. As ondas são compostas por várias ondas lineares, senoidais e de única frequência cada, se obtendo a resposta do corpo submetido a ondas randômicas a partir da superposição de várias respostas lineares. A velocidade entre o corpo flutuante e o mar é considerada zero, o interesse é na análise de estruturas não submetidas a correntes significativas.

A modelagem do fluido é feita com um potencial de velocidades complexas Φ , multiplicado pelo exponencial $e^{i\omega t}$.

O movimento do fluido é irrotacional. O potencial de velocidades Φ , neste caso, pode ser usado para descrever o vetor velocidade do fluido no ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)$ e tempo t , $\mathbf{U}(x, y, z, t)$, conforme a equação Eq. (7).

$$\mathbf{U} = \nabla\Phi = \mathbf{i} \frac{\partial\Phi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial\Phi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad (7)$$

onde $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ e $\mathbf{k}$ são os vetores unitários ao longo dos eixos x , y e z , respectivamente. O potencial de velocidades é introduzido na análise matemática do movimento irrotacional de fluidos. A totalidade do problema matemático para encontrar o potencial de velocidades do fluido consiste em satisfazer a equação de Laplace, segundo Chakrabarti (1987).

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

com condições de contorno sobre o fluido, dentre as quais se consideram as condições de contorno cinemáticas e as de superfície livre dinâmica.

Com base nestas hipóteses, temos as seguintes condições de contorno para o potencial de velocidades que descreve o domínio fluido, Faltinsen (2000):

- $g \frac{\partial\Phi}{\partial z} = \omega^2\Phi$ para $z = 0$ (superfície livre)
- $\frac{\partial\Phi}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}$ na superfície submersa do corpo flutuante, onde $\mathbf{V}$ é a velocidade do corpo ($V_i = i\omega\zeta_i$) e $\mathbf{n}$ o vetor normal à sua superfície, positivo para dentro.
- $\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0$ em $z = \infty$

Adicionalmente, a condição $\nabla^2 \Phi = 0$ de fluido incompressível deve ser respeitada em todo o domínio fluido.

3.2 Equações de Movimento do Corpo

O corpo flutuante, sendo considerado um corpo rígido com resposta linear, obedece a equação de movimento de sistemas massa-mola-amortecedor. Há, no entanto, uma diferença no termo da massa: uma embarcação flutuando desloca não apenas a sua massa, mas também um volume de água que fica ao seu redor. Esta massa de água deslocada é chamada de massa adicional. A equação é então,

$$(\mathbb{M} + \mathbb{A})\ddot{\zeta}_T + \mathbb{B}\dot{\zeta}_T + \mathbb{C}\zeta_T = \mathbf{F}_T \quad (9)$$

onde:

$\mathbb{M}$ é a matriz de massa

$\mathbb{A}$ é a matriz de massa adicional

$\mathbb{B}$ é a matriz de amortecimento

$\mathbb{C}$ é a matriz de restauração

$\mathbf{F}_T$ é o vetor de forças devido ao potencial incidente

ζ_T é o vetor de deslocamento do corpo

Como $\zeta_T = e^{i\omega t}\zeta$ e $\mathbf{F}_T = e^{i\omega t}\mathbf{F}$, a equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$-\omega^2(\mathbb{M} + \mathbb{A})\zeta + i\omega\mathbb{B}\zeta + \mathbb{C}\zeta = \mathbf{F} \quad (10)$$

Substituindo $\mathbf{F}$ por $\mathbf{F}' + \mathbf{F}'' = \omega^2\zeta\mathbb{F}^R - i\omega\zeta\mathbb{F}^I + \mathbf{F}''$ é possível ver que a massa adicional e o amortecimento são, de fato, as matrizes $\mathbb{F}^R$ e $\mathbb{F}^I$. Assim, tem-se que,

$\mathbb{A}$ é composta por coeficientes $a_{j,k} = -\rho(\sum_i A_i \text{REAL}(\Phi_{i,j})n_{i,k})$,

$\mathbb{B}$ é composta por coeficientes $b_{j,k} = \omega\rho(\sum_i A_i \text{IMAG}(\Phi_{i,j})n_{i,k})$.

Junto com o vetor $\mathbf{F}''$, é possível então calcular as amplitudes dos deslocamentos do corpo nos 6 GDLs estudados.

Para um corpo flutuante com simetria sobre o plano X-Z e centro de massa em X igual ao centro de rotação em X, as matrizes de massa e restauração são compostas, segundo Faltinsen (1990) por,

$$\mathbb{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}\mathbf{Z}_g & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} & \mathbf{0} & -\mathbf{M}\mathbf{Z}_g & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{M}\mathbf{Z}_g & \mathbf{0} & \mathbf{I}_4 & \mathbf{0} & -\mathbf{I}_{46} \\ \mathbf{M}\mathbf{Z}_g & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_5 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I}_{46} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_6 \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde $\mathbf{M}$ é a massa do corpo flutuante, $\mathbf{I}_4$, $\mathbf{I}_5$ e $\mathbf{I}_6$ são os momentos de inércia ao redor dos eixos X, Y e Z respectivamente, $\mathbf{Z}_g$ é o centro de gravidade em Z e igual a $\mathbf{Z}_c - \mathbf{Z}_R$, $\mathbf{Z}_c$ sendo o centro de massa e $\mathbf{Z}_R$ o centro de rotação, e $\mathbf{I}_{46}$ é o produto de inércia com respeito a X, Z.

$$\mathbb{C} = \rho\mathbf{g} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{wp} & \mathbf{0} & -\iint_{A_{wp}} \mathbf{x} d\mathbf{S} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{V}\overline{\mathbf{GM}}_T & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\iint_{A_{wp}} \mathbf{x} d\mathbf{S} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{V}\overline{\mathbf{GM}}_L & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

onde $\mathbf{A}_{wp}$ é a área da superfície de água deslocada pelo corpo (*waterplane*) e $\mathbf{V}$ é o volume de água deslocado. $\overline{\mathbf{GM}}_T$ é a altura metacêntrica transversal e $\overline{\mathbf{GM}}_L$ é a altura metacêntrica longitudinal, tal que,

$$\overline{\mathbf{GM}}_T = \mathbf{Z}_B - \mathbf{Z}_g + \frac{\int_{A_{wp}} \mathbf{y}^2 d\mathbf{S}}{\mathbf{V}} \text{ e } \overline{\mathbf{GM}}_L = \mathbf{Z}_B - \mathbf{Z}_g + \frac{\int_{A_{wp}} \mathbf{x}^2 d\mathbf{S}}{\mathbf{V}} \quad (13)$$

onde $\mathbf{Z}_B$ é o centro de flutuação.

4. MODELO DESENVOLVIDO NO PROGRAMA MATLAB®

A finalidade desta seção é apresentar o procedimento de parametrização do programa desenvolvido na plataforma MATLAB® para obter a matriz de massa adicional e a matriz de amortecimento. Os resultados nesta seção deverão ser comparados com resultados obtidos através da simulação desenvolvida no programa ANSYS® AQWA™.

4.1 Método dos Painéis

O método dos painéis é baseado na aplicação da identidade de Green, para obter a equação integral para o potencial de velocidade, sobre o corpo. Existem diferentes caminhos para a abordagem do método dos painéis. O primeiro deles é distribuir as fontes e as porções submersas, sobre a superfície do corpo molhado. Outro caminho é a distribuição da “mixagem” ou mistura das fontes, porções submersas e dipolos normais, sobre a superfície molhada do corpo.

Como resultado da programação, são disponibilizados ao final, a matriz de massa adicional A_{jk} e a matriz de amortecimento B_{jk} . O programa usa dois tipos de elementos finitos para a discretização do corpo flutuante, elementos triangulares e elementos quadrangulares. O programa é composto por três rotinas. A primeira rotina decide a simplificação numérica da função de Green a ser usada, em acordo com a distância entre os pontos considerados e a superfície livre. A segunda calcula a integral da parte de Rankine da função de Green. Finalmente, a terceira rotina realiza a função de integração por quadratura de Gauss e valores principais de Cauchy.

4.2.1 Parâmetros de Entrada e Saída

Para dar início à execução do programa, é necessário inserir os parâmetros de entrada, os principais dos quais são descritos da seguinte forma:

- Matriz *vértices*: contém os pontos dos vértices da malha discretizada do corpo flutuante
- Matriz *geometry*: contém os elementos da malha, onde cada linha contém os vértices de um elemento
- κ : ângulo das ondas incidentes sobre o corpo flutuante (rad)
- ω : frequência das ondas incidentes (rad/s)
- λ : comprimento de onda adotado (m)
- wave amplitude: amplitude adotada para as ondas incidentes (m)
- Pr: ponto onde está situado o centro de rotação adotado

Uma sub-rotina foi criada para gerar a malha, recebe os dados de entrada e devolve as matrizes *vértices* e *geometry* que são passadas ao programa principal. Os dados de entrada para a geração de uma malha para o cilindro são:

- altura: altura do cilindro
- raio: raio do cilindro
- horele: número de elementos na horizontal, presentes na superfície do cilindro
- verele: número de elementos na vertical, presentes na superfície do cilindro
- tamele: número de elementos concêntricos, presentes na tampa do cilindro

Os parâmetros de saída disponibilizados após a execução do programa são,

- S: matriz de influência de fontes
- D: matriz de influência de dipolo
- Φ : vetor de potência
- Fi: vetor de amplitude de forças e momentos devido aos potenciais de incidência e difração
- A_{jk} : matriz de massa adicional
- B_{jk} : matriz de amortecimento

4.2.2 Dimensões do Modelo de Corpo Flutuante

Toma-se como forma base uma geometria cilíndrica de seção circular na posição vertical, submersa em água. O modelo possui uma altura submersa igual a 0,33 m e um diâmetro de 0,21 m.

4.3 Condições do Fluido

O modelo numérico é aplicado para simular uma condição do domínio fluido com um cilindro submerso na posição vertical, a uma distância infinita do leito. Os parâmetros referentes à onda considerada foram: frequência 4,0019 rad/s, altura de onda 0,0038 m e número de onda 7,69 ciclos/m.

No domínio fluido, a relação entre a amplitude de oscilação do fluido e do corpo flutuante é relativamente pequena, considerando as dimensões da seção transversal do corpo, e o efeito da separação do fluido é desprezado. O método dos painéis pode avaliar as matrizes de massa adicional e de amortecimento devido à radiação das ondas de superfície.

4.4 Resultados de Matriz de Massa Adicional (Ajk)

Nesta seção mostram-se os parâmetros de entrada para o caso do cilindro na posição vertical, assim como os resultados da massa adicional, obtidos através da execução do programa.

% Parâmetros de entrada

-Altura=0.330; %m (profundidade)

-Raio=0.105; %m

- $\kappa=1.57$; %rad (ângulo das ondas incidentes).

- $\omega=4.0019$; %rad/s (frequência)

- $\lambda=0.13$; %m (comprimento de onda).

-Horele=4; % Numero de elementos na horizontal na superfície do cilindro.

-Verele=3; % Numero de elementos na vertical na superfície do cilindro.

-Tamele=1; % Numero de elementos concêntricos na tampa do cilindro.

-Wave_amplitude=0.0038; %m

-Pr=[0 0 -0.119]; %centro de rotação

Os resultados de massa adicional para cinco frequências de interesse são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Frequência da onda e resultados de massa adicional.

Frequência, Hz	Massa adicional, kg
0,405	9,63
0,505	9,83
0,515	9,85
0,560	9,89
0,629	10,23

5. MODELO DESENVOLVIDO NO PROGRAMA ANSYS® AQWA™

A finalidade deste capítulo é implementar um cilindro, parcialmente submerso em água e sujeito a ondas incidentes, utilizando o programa ANSYS® AQWA™, com velocidade, ângulo de incidência e frequência conhecidos, resultando na determinação da matriz de massa adicional.

5.1 Modelo do Cilindro Desenvolvido no Programa ANSYS®

A modelagem no ANSYS® Workbench adota o sistema de coordenadas (x,y,z) posicionado no centro do cilindro, junto à superfície livre, Fig. 6.

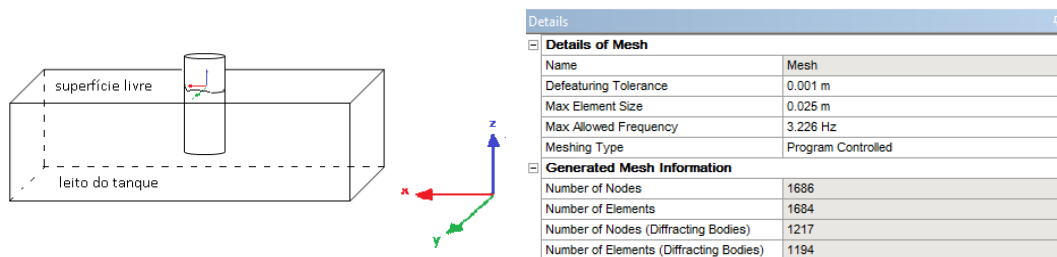


Figura 6. Cilindro de seção circular com tamanho máximo de elemento adotado

Propriedades e parâmetros dimensionais:

- Tanque e fluido

Comprimento do tanque: 16 m

Largura do tanque: 0,710 m

Altura útil do tanque: 0,79 m

Altura total da lamina de água: 0,490 m

Densidade da água: 1025 kg/m³

- Corpo rígido (cilindro)

Densidade (homogeneizada): 1.275 e-05 kg/mm³

Módulo de Young: 2e+5 MPa

Módulo de Poisson: 0,3

Limite máximo de resistência à ruptura: 250 MPa

Resistência à tração: 250 MPa
 Altura total do cilindro: 0,422 m
 Diâmetro: 0,210 m
 Centro de gravidade: (0 0 -0,119)

Os recursos para a modelagem do cilindro são:

- *Thin Surface (espessura=0)*: O recurso de superfície fina permite implementar a modelagem de sólidos finos e cascas simplificadas.
- *Freeze*: Esse recurso é um método alternativo para a modelagem e montagens utilizando várias partes. Também permite o corte *slice* de um volume, em diversos sub-volumes.
- *Slice*: O recurso disponibiliza ao ANSYS DesignModeler uma ferramenta para malhas tipo hexagonal, o que viabiliza diferentes seções transversais em linha, através do corpo modelado.

A medição experimental da massa total do cilindro é 11,28 kg, porém para a modelagem no *toolbox Static Structural* do ANSYS® e durante a simulação no sistema hidrodinâmico AQWA™, utilizou-se uma massa pontual no interior do cilindro no valor de 6,89 kg, a restante foi distribuída no corpo do cilindro através da alteração da densidade, resultando num valor total para a massa de 11,29 kg.

No programa ANSYS® AQWA™, assume-se que o carregamento é na forma de onda incidente com velocidade e frequência definidas. A análise preliminar indica que a resposta varia lentamente ao longo do período de simulação.

A matriz de inércia da geometria foi calculada através do *toolbox Static Structural* do ANSYS®, utilizando as propriedades descritas anteriormente. Os resultados calculados no *toolbox Static Structural* ANSYS® foram utilizados para determinar a matriz de massa adicional no *solver* AQWA™.

5.1.1. Modelo de Elementos Finitos do Programa ANSYS® AQWA™

Na modelagem é utilizado o elemento finito tetraédrico quadrilateral QPPL *Quadrilateral Pressure Plate Element* com interpolação linear. Adicionalmente, o elemento PMAS *Point Mass Element* foi utilizado para a modelagem do ponto de massa concentrada no interior do cilindro.

Cada elemento PMAS e QPPL possui propriedades específicas de geometria e material. No caso do ponto de massa concentrada do cilindro, este trabalho utiliza o elemento PMAS, onde o número de nos é igual a 1, o grupo do material contém a massa como uma atribuição ao elemento, e o grupo da geometria estabelece as propriedades de inércia do elemento, contudo o elemento não representa o carregamento do fluido. O elemento QPPL, definido como *diffraction plate*, é do tipo *pressure plate*, possui o número de nos igual a 4, não apresenta grupo de material e não contém massa atribuída. Este elemento é utilizado para modelar a superfície, através de elementos de placa de pressão para a determinação do carregamento. Foram utilizados 1685 elementos distribuídos na seguinte forma, um elemento tipo PMAS e total de 1684 elementos tipo QPPL.

5.1.2 Parâmetros de Onda Incidente Sobre o Modelo do Cilindro no Solver AQWA™

O procedimento experimental do movimento oscilatório do cilindro (de altura total de 0,422 m) gera um trem de ondas, com amplitude determinada através dos *wave probes*. Para fins de simulação no *solver* AQWA™, admite-se que este trem de onda avança numa lâmina de água com profundidade $H=0,33+0,16=0,49$ m (soma da altura molhada do cilindro com a altura da base do cilindro ao leito), até encontrar a superfície do cilindro. O cálculo da amplitude de onda, para diversos valores de frequência da onda, é fundamentado nos valores obtidos experimentalmente através do ensaio de arraste em oscilação forçada, e são apresentados na Tab. 4. A frequência de onda incidente é determinada através de algoritmo no pacote MATLAB®.

Tabela 4. Frequência de onda e amplitude de onda.

Frequência da onda, Hz	0,4048	0,5050	0,5154	0,4950	0,63698
Amplitude de onda, cm	0,0769	0,1249	0,2842	0,3864	0,5731

A força desenvolvida durante a irradiação é definida de duas formas; a primeira é proporcional à aceleração do corpo, gerando uma matriz de massa adicional, a segunda é proporcional à velocidade do corpo. Considerando os comprimentos de onda experimentais, as velocidades de onda são apresentadas na Tab. 5.

Tabela 5. Comprimento e velocidade de onda.

Frequência da onda, Hz	0,4048	0,5050	0,5154	0,4950	0,63698
Comprimento de onda, m	0,13	0,13	0,15	0,16	0,13
Velocidade de onda, mm/s	57	68	80	81	82

5.2 Massa Adicional Segundo o Solver AQWA™

O cálculo da massa adicional do cilindro é realizado através do *solver* AQWA™, com a implementação dos intervalos de frequência da onda. O centro de flutuação da geometria do cilindro é $BX=-1,198\text{e-}10\text{ m}$, $BY=1,098\text{e-}10\text{ m}$ e $BZ=-0,165\text{ m}$, e os resultados de massa adicional são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Frequência de onda e para massa adicional

Frequência da onda, Hz	Massa adicional no ANSYS® AQWA™, kg
0,4048	10,51
0,5050	10,69
0,5154	10,72
0,4950	10,75
0,63698	11,02

6. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Objetivo do capítulo é apresentar os parâmetros dos ensaios realizados no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura – LIFE, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande. O ensaio trata do movimento oscilatório de um cilíndrico, fixado a um carro de arraste, em movimento de oscilação forçada.

6.1 Fixação do Cilindro no Tanque de Arraste

No desenvolvimento experimental, o cilindro é construído em PVC, com raio de $a = 0,105\text{ m}$ e altura total de $h=0,422\text{ m}$, para um comprimento submerso de $L = 0,330\text{ m}$. A massa adicional teórica do cilindro é calculada com a equação $m_a = 998 \pi (0,105)^2 0,330 = 11,40\text{ kg}$. No interior do cilindro, foi adicionada uma massa de lastro, cujo valor é de $6,85\text{ kg}$. Assim, a massa total medida para o sistema (cilindro) é de $11,28\text{ kg}$.

O tanque de arrasto tem comprimento útil de ensaio de $9,60\text{ m}$ e comprimento total de 16 m .

6.2 Movimento de Oscilação do Cilindro

O cilindro é arrastado pelo carro, em movimento de oscilação forçada, programado através do pacote MATLAB® e controlado via sensor *laser* e pacote LabView.

A variação de amplitude do movimento do cilindro define-se entre -7 cm e 7 cm ou -9 cm e 9 cm , conforme apresentado na Fig. 7. A marca em verde significa que o carro está na posição zero e aguarda o comando para iniciar o arraste. A marca em vermelho significa que o carro atingiu o deslocamento máximo para a esquerda de -9 cm , a partir da marca verde. A marca em azul significa que o carro atingiu o deslocamento máximo de 9 cm , a partir da marca verde. O eixo longitudinal do cilindro é normal à superfície livre do fluido, não existindo movimento de rotação ou de *heave* do cilindro.

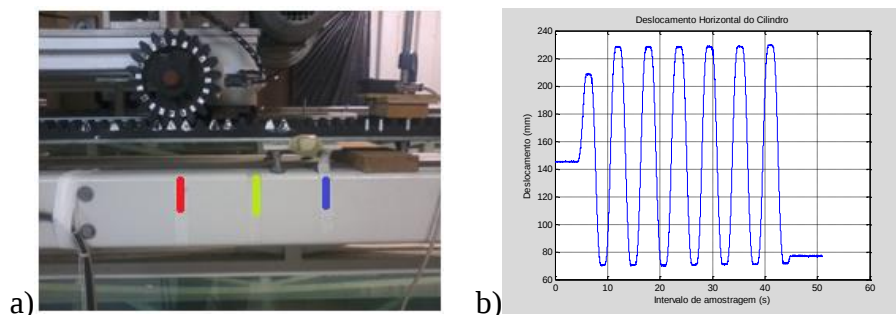


Figura 7. Deslocamento do carro de arrasto; a) limites, b) trajetória

Dois sensores do tipo *wave probes* são utilizados para determinar o nível da superfície livre da água, instalados a uma distância de $1,1\text{ m}$ de distância do centro do cilindro, em ambos os lados. O registro da aceleração é realizado através de dois acelerômetros, um deles junto ao carro de arraste e outro interno ao cilindro.

7. CONCLUSÕES

O arrasto do cilindro provoca o deslocamento da água e a formação de ondas irradiadas a partir do cilindro, com amplitude de onda registrada pelos sensores *wave probe*. Para o cálculo da massa adicional nos programas MATLAB® e ANSYS® AQWA™ faz-se necessário determinar a amplitude da onda via *wave probes*, tendo sido utilizada filtragem na Transformada de Fourier para a determinação do sinal de amplitude de onda no domínio da frequência, e após a Transformada Inversa de Fourier para ter os registros no domínio do tempo.

A comparação dos resultados computacionais de massa adicional obtidos via programação no pacote MATLAB[®] e simulação no pacote ANSYS[®] AQWA[™] apresentam uma boa correspondência entre eles, para as diversas frequências das ondas, e próximo do valor analítico de 8,55 kg.

8. REFERÊNCIAS

- Blevins, R.D., 2001, "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", Krieger Publishers Company, 506 p.
- Chakrabarti, S.K., 1987, "Hydrodynamics of Offshore Structures: Mathematical Theory and its Applications in Structures".
- Faltinsen, O.M., 2000, "Hydroelastic Slamming", Journal of Marine Science and Technology, Vol. 5, pp. 49-65.
- Goda, Y., 2010, "Random Seas and Design of Maritime Structures, Advanced Series on Ocean Engineering", 732 p.
- Olson, L.G. and Bathe, K.J., 1985, "Analysis of Fluid-Structure Interactions. A Direct Symmetric Coupled Formulation Based on the Fluid Velocity Potential", Computational Structures, Vol. 21, pp. 21-32.
- Wendel, K., 1956, "Hydrodynamic Masses and Hydrodynamic Moments of Inertia", Technical Report.
- Wilson, J.F., 2003, "Dynamic of Offshore Structures", John Wiley & Sons Inc., New Jersey, USA, 344 p.

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF HYDRODINAMIC PROPERTIES IN VERTICAL CYLINDER PARTIALLY SUBMERGED

Walter Jesus Paucar Casas, walter.paucar.casas@ufrgs.br¹
Wilques Wanderson Ferreira Pinheiro, wilquespinheiro@hotmail.com¹
Emanuel Moutinho Cesconeto, emanuelemc@hotmail.com¹
Amanda Pereira Peres, amandaperes09@hotmail.com¹
Guilherme Missio Parizotto, guilherme.parizotto@ufrgs.br¹
Waldir Terra Pinto, waldir.pinto@gmail.com²
Jairo Fernando de Lima Coelho, jairocoelho@gmail.com²
Bruno Quaresma Leonardo, bqcory@gmail.com²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 521, Porto Alegre, RS, 90050-170

²Universidade Federal do Rio Grande, Av. Itália, Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, 96203-900

Abstract: This study involves the experimental and numerical determination of the hydrodynamic properties of a partially submerged cylinder. The numerical solution to the problem was developed using the panel method, which was programmed in the MATLAB[®] package, and the cylinder model was excited according to the wave parameters recorded during the cylinder drag test, enabling the determination of added mass and hydrodynamic damping. The experimental part of this study involved using a drag car in a test tank. In the tests, the system's sensor array detected the variables of acceleration and loading on the cylinder support rod, the car's displacement and wave height. The experimental tests made it possible to determine the parameters required for the numerical solution. The development of the numerical solution of the hydrodynamic problem via simulation with commercial software was performed using the ANSYS[®] AQWA[™] package, in which the modeled cylinder was partially submerged and was excited by the wave frequency and velocity that were determined in the experimental tests. The numerical results of the programming and simulation showed a good correspondence.

Palavras-chave: Panel method, offshore structure, diffraction theory, forced oscillation