

Study of modal analysis based on fluid-structure interaction

Estudo da análise modal baseado no acoplamento fluido-estrutura

M. PEGORARO ^a
mauriciopegoraro85@gmail.com.br

F. A. A. GOMES ^a
franciscogomes@utfpr.edu.br

P. R. NOVAK ^a
novak@utfpr.edu.br

Abstract

In this work, a coupled fluid-structure problem is approached, comparing the result with the modal analysis of a structure. The objective of this work is to analyze the physical phenomenon of fluid-structure interaction of a flexible structure. For this, the coupled problem solved using an Arbitrary Lagrangean-Eulerian (ALE) approach. As support for solving the mathematical equations of coupled problem, ANSYS® physical analysis software was used. An experimental modal analysis, using the Rational Fractional Polynomial method was developed for a small scale steel structure, and the result of this was compared with the result obtained from the model simulated in the software. Their vibration modes and natural frequencies obtained by numerical modeling were validated experimentally. When the numerical modeling of the modal analysis of a structure experimentally validated, attempted to analyze the dynamic behavior of the structure when it is subjected to a load due to a fluid-flow through a coupled fluid-structure problem. The results presented in this work show that the structure subjected to loads due to the fluid-flow, moves according to its vibration modes.

Keywords: modal analysis, fluid-structure interaction.

Resumo

Neste trabalho é abordado um problema acoplado fluido-estrutura, sendo comparados os resultados com a análise modal de uma estrutura. O objetivo do trabalho consiste em analisar o fenômeno físico da interação fluido-estrutura de uma estrutura flexível. Para tal, o problema acoplado é resolvido utilizando uma abordagem Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE). Como apoio para resolução das equações matemáticas do problema acoplado, foi utilizado o "software" de análises físicas ANSYS®. Uma análise modal experimental, utilizando o método "Rational Fractional Polynomial", foi desenvolvida para uma estrutura de aço em escala reduzida, e o resultado desta foi comparado com o resultado obtido no modelo simulado no "software". Seus modos de vibração e frequências naturais obtidos na modelagem numérica foram validados experimentalmente. Com a modelagem numérica da análise modal de uma estrutura validada experimentalmente, buscou-se analisar o comportamento dinâmico da estrutura quando ela está sujeita a uma carga devido a um escoamento, através de um problema acoplado fluido-estrutura. Os resultados presentes neste trabalho mostram que a estrutura sujeita a cargas devido ao escoamento, movimenta-se conforme seus modos de vibração.

Palavras-chave: análise modal, problema acoplado fluido-estrutura.

^a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, Brasil.

1. Introdução

Problemas acoplados fluido-estrutura possuem papel fundamental no desenvolvimento de várias áreas da engenharia. Na engenharia civil, destacam-se barragens, reservatórios de água, tanques de combustíveis, plataformas marinhas, turbinas, sistemas de tubulações e também em estruturas em geral. Além disso, também se utiliza essa abordagem para se resolver problemas de biomedicina, como a circulação sanguínea no corpo humano.

Em casos em que a presença de um fluido em movimento, quando em contato com uma estrutura, faz com que se altere o comportamento dinâmico desta, deve-se investir no problema com uma abordagem fluido-estrutura. Neste tipo de abordagem, as formulações descrevem e modelam o problema de maneira integrada, onde a solução para os domínios da estrutura e do fluido são acopladas.

Os problemas acoplados fluido-estrutura podem ser classificados de diversas formas, conforme algumas referências, por exemplo, Souza Jr. [1] e Gilbert [2]. Mas, de acordo com Zienkiewicz e Taylor [3], têm-se duas grandes classes de problemas acoplados: a classe I contém os problemas em que, por uma imposição da condição de contorno na região da interface fluido-estrutura, é nesta em que o acoplamento ocorre, sendo utilizadas diferentes discretizações nos domínios, por se tratarem de situações físicas diferentes; enquanto que a classe II contém os problemas onde vários domínios se sobrepõem total ou parcialmente uns sobre os outros e, apesar das equações descreverem diferentes fenômenos físicos, o acoplamento ocorre através de equações diferenciais.

Inicialmente desenvolvido para aplicação em estruturas aquáticas, as análises de problemas acoplados fluido-estrutura iniciaram-se assim que a tragédia do Titanic aconteceu, em 1912. Junger [4] mostra o projeto de submarinos por estudos com esse método durante a Primeira Guerra Mundial. Na área de engenharia mecânica, Tabarrok [5] expandiu os estudos para problemas de vibração acústico-estrutural, contribuindo também para a engenharia aeroespacial.

Em relação às estruturas de edificações convencionais, as pesquisas podem trazer benefícios, principalmente em relação ao desenvolvimento de projetos mais seguros, com novos materiais e que propiciem um menor custo destas estruturas. De acordo com Leitão [6], as normas de cálculo estrutural abordam de forma simplificada os efeitos de segunda ordem nas estruturas, o que pode causar grandes deslocamentos nas mesmas e consequentemente o seu colapso iminente. Estes efeitos de segunda ordem muitas vezes podem ser causados por uma rajada de vento, principalmente em estruturas de aço, que são leves e pouco rígidas.

Nas últimas décadas, através do método de elementos finitos (MEF) e do método de volumes finitos (MVF), os problemas acoplados fluido-estrutura vêm sendo resolvidos de diversas formas e com boa precisão nos resultados. Apesar disso, existem diversas técnicas numéricas diferentes entre si para resolução desse tipo de problema. O que mais influencia na maneira como é abordado o problema é a forma como é modelado o domínio do fluido. A variável fluido está associada a diversas grandezas, como pressão, deslocamento, velocidade potencial $e/$ ou o deslocamento potencial, enquanto que a incógnita para o sólido é o campo de deslocamentos, (Everstine, [7]). Dependendo da variável escolhida para o domínio do fluido, o problema pode não ser solucionado, ou seja, cada uma das variáveis possíveis para o fluido apresenta aplicações restritas a certo tipo de problema.

Usualmente, modela-se a estrutura pelo método de elementos finitos, para qualquer tipo de estrutura, como vigas, placas, sólidos ou corpos mais complexos, como cascas ou corpos rombudos, estes últimos estudados por Gomes [8]. Em relação ao domínio do fluido, geralmente, discretiza-se o escoamento utilizando o método de volumes finitos. Soares Jr. [9] combinou diversas técnicas numéricas, aplicando o método de elementos finitos para a estrutura e o método de elementos de contorno (MEC) para o escoamento, contemplando desta forma o problema de interação fluido-estrutura. Bazilevs *et. al.* [10] se inspiraram nas soluções analíticas e desenvolveram um belo trabalho, consistindo no desenvolvimento das equações governantes do fenômeno, além de apresentarem métodos e aplicações utilizando a mecânica computacional.

Segundo Zienkiewicz e Bettess [11], existem duas formas clássicas de abordagem de um problema acoplado fluido-estrutura, Lagrangeana e Euleriana. Segundo estes autores, a formulação Euleriana é caracterizada por utilizar como incógnitas para o domínio do fluido uma das seguintes grandezas: pressão ou o potencial de deslocamentos, o que gera matrizes assimétricas para resolução. Já a formulação Lagrangeana considera o deslocamento como variável para ambos os domínios, fluido e estrutura, sendo o fluido considerado como um sólido elástico e sem módulo de cisalhamento. A desvantagem para a abordagem Lagrangeana é exatamente o fato de o fluido ser considerado sem módulo de cisalhamento, podendo gerar resultados ilegítimos, em decorrência do grande número de graus de liberdade gerados por esta hipótese.

A maioria dos métodos estudados pelos cientistas que abordam problemas acoplados fluido-estrutura possui algumas limitações para os sólidos, tais como a consideração de comportamento elástico linear, com elasticidade constante e constituídos de um material homogêneo, isotrópico e submetido a pequenos deslocamentos. Para o fluido, este deve ser incompressível, sem viscosidade e que o processo seja adiabático.

Para problemas onde o sólido apresenta grandes deslocamentos, como por exemplo, uma estrutura sendo excitada numa frequência próxima da sua frequência natural ou uma estrutura flexível, e onde o fluido seja Newtoniano, podendo apresentar viscosidade, Wall e Ramm [12] trazem um método baseado na abordagem Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE). Dettmer e Peric [13] e Teixeira e Awruch [14] também possuem pesquisas relacionadas a essa abordagem que valem destaque.

Uma consideração arbitrária incluindo as duas abordagens, ou seja, a abordagem Lagrangeana-Euleriana Arbitrária (ALE), é usada para explicar a deformação do domínio do fluido que resulta do deslocamento da estrutura flexível.

Essas técnicas apresentadas requerem a execução de uma sequência especificada de componentes de resolução, com uma comunicação entre dados nas fronteiras, transferindo os dados da estrutura para o fluido e vice-versa (Dettmer e Peric, [13]). Frequentemente, esses métodos não possuem muita precisão, a não ser que se imponha uma restrição para os intervalos de tempo, os quais devem ser pequenos o suficiente para que a transferência de dados ocorra de forma eficaz (Wall e Ramm, [12]).

Estas diversas técnicas de resolução de problemas acoplados fluido-estrutura tem como foco o desenvolvimento dos métodos numéricos, os quais estão sendo incorporados pelos diversos "software" de análises multi-físicas.

A metodologia numérica adotada nesse trabalho utiliza diferentes discretizações entre os domínios, sendo o método de elementos finitos utilizado na discretização da estrutura e o método de volumes finitos utilizado na discretização do escoamento. A abordagem utilizada é a abordagem Lagrangeana Euleriana Arbitrária (ALE), onde o acoplamento é feito na região de interface fluido-estrutura através da imposição das condições de contorno pertinentes.

Nas próximas seções deste trabalho será mostrado que esta metodologia numérica traz resultados satisfatórios, comparando-se a resolução de um problema de análise modal experimental e de dinâmica das estruturas, com o comportamento desta estrutura quando submetida a oscilações do coeficiente de sustentação devido ao escoamento incidida em seu exterior. Um foco específico deste trabalho é mostrar qual o procedimento de solução é o mais adequado para resolver o acoplamento de uma estrutura flexível com um fluido newtoniano. Para auxílio na resolução das formulações matemáticas foi utilizado o “software” Ansys®, tanto para a análise modal da estrutura em estudo quanto para a resolução do problema acoplado fluido-estrutura.

2. Equações governantes

2.1 Fluido incompressível newtoniano com um domínio móvel

As equações de Navier-Stokes que representam o fluido Newtoniano incompressível são escritas em termos das equações da continuidade e da quantidade de movimento. Essas equações podem ser escritas como:

$$\rho(\dot{\mathbf{u}} + (\nabla_{\hat{\mathbf{x}}}\mathbf{u})(\mathbf{u} - \hat{\mathbf{v}}) - \mathbf{F}) - \nabla_{\hat{\mathbf{x}}} \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Omega \times D \quad (1)$$

$$\nabla_{\hat{\mathbf{x}}} \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Omega \times D \quad (2)$$

onde ρ representa a densidade do fluido, \mathbf{F} o vetor de força de volume, $\boldsymbol{\sigma}$ o tensor de Cauchy. O intervalo de tempo de interesse é denotado por $D = [0, t]$.

Uma característica essencial dos problemas que são abordados neste artigo é o movimento da fronteira do fluido em contato com o sólido flexível. A geometria do domínio do fluido pode se alterar significativamente durante o domínio de tempo de interesse. Portanto, é conveniente formular o problema na abordagem ALE, onde as leis de conservação são expressas considerando esse movimento da fronteira. Assim, a derivada no tempo da velocidade \mathbf{u} é descrita da forma:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \nabla_{\hat{\mathbf{x}}}\mathbf{u}(\mathbf{u} - \hat{\mathbf{v}}) + \dot{\mathbf{u}} \quad (3)$$

onde $\hat{\mathbf{v}} = \partial\hat{\mathbf{x}}/\partial t$ é a velocidade no referido ponto de iteração fluido-estrutura.

O operador $\nabla_{\hat{\mathbf{x}}}(\circ)$ denota as derivadas em relação ao referencial de coordenadas $\hat{\mathbf{x}}$ atual. A expressão $\dot{\mathbf{u}}$ corresponde à alteração de velocidades das partículas, observado por um observador que viaja com um ponto no sistema de referência. A diferença de velocidades $\mathbf{u} - \hat{\mathbf{v}}$ é chamada de velocidade relativa.

2.1.1 Condições de contorno para o fluido

As fronteiras Γ de Ω podem ser divididas em subconjuntos Γ_q, Γ_g

e Γ_{f-s} , onde os índices q, g representam, respectivamente, a fronteira na entrada e na saída do domínio do fluido. O índice $f - s$ representa a fronteira do fluido em contato com a estrutura. As condições de contorno podem ser prescritas nesses subconjuntos, como segue:

$$\mathbf{u} = \mathbf{q} \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_q \times D \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{g} \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_g \times D \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{d} \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_{f-s} \times D \quad (6)$$

$$(\mathbf{u} - \hat{\mathbf{v}}) \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0 \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_{f-s} \times D \quad (7)$$

$$\mathbf{p}_f + \mathbf{p}_s = \boldsymbol{\sigma}\hat{\mathbf{n}} + \mathbf{p}_s = 0 \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_{f-s} \times D \quad (8)$$

Os valores de q e g são prescritos e representam, respectivamente, a velocidade do fluido na entrada e a pressão do fluido na saída do domínio pela respectiva fronteira. A condição de contorno na interface fluido estrutura Γ_{f-s} é mostrada na equação (6), e significa que ali há uma condição de não escorregamento. Ainda na fronteira Γ_{f-s} há a necessidade de se satisfazer a condição prescrita em (7), o que representa que a fronteira Γ_{f-s} do fluido com a estrutura deve ser coincidente com o contorno da estrutura deformada, para cada passo de tempo. O equilíbrio de pressão ao longo da interface fluido-estrutura é expresso pela relação (8), onde os valores p_s e p_f representam os vetores de pressão exercida pelo fluido na interface com a estrutura flexível.

2.2 Dinâmica das estruturas

A conservação de energia em um sólido contínuo pode ser expressa na sua condição espacial como segue:

$$\rho(\mathbf{d} - \mathbf{F}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (9)$$

onde ρ é a densidade do sólido deformado, o vetor “ \mathbf{d} ” representa o deslocamento da estrutura, enquanto que as forças de corpo são dadas pelo vetor \mathbf{F} . O tensor de Cauchy aqui também é representado pelo $\boldsymbol{\sigma}$. Para simplificação, este trabalho trata de uma estrutura com comportamento elástico linear.

Assim como na fronteira do domínio do fluido, o contorno da estrutura pode ser subdividido em três subconjuntos Γ_q, Γ_g e Γ_{f-s} , sendo suas condições de contorno as que seguem:

$$\mathbf{d} = \mathbf{q} \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_q \times D \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\sigma}\mathbf{n} = \mathbf{g} \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_g \times D \quad (11)$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{u} \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_q \times D \quad (12)$$

$$\mathbf{p}_f + \mathbf{p}_s = \boldsymbol{\sigma}\hat{\mathbf{n}} + \mathbf{p}_s = 0 \quad \forall(\hat{\mathbf{x}}, t) \in \Gamma_{f-s} \times D \quad (13)$$

onde os valores q, g e n são prescritos e significam, respectivamente, o deslocamento, o vetor de tração e o vetor unitário normal à superfície do contorno da estrutura. As condições (12) e (13), claramente vêm de acordo com as condições (6) e (8) do fluido, respectivamente.

Inicialmente, a configuração da estrutura é conhecida como $\mathbf{d} = 0$ e $\mathbf{d}' = 0 \quad \forall x \in \Omega$ em $t = 0$

2.3 Análise modal – método RFP

A análise modal é uma forma de análise dos parâmetros de vibração de uma estrutura através de métodos experimentais (Ewins, [15]). O método RFP (“Ractional Fractional Polynomial method”) está servindo como padrão de análise modal no domínio da frequência. Schwarz e Richardson [16] afirmam que este método trata-se de uma técnica de ajuste de curva aplicada no domínio da frequência, e é fácil aplicá-lo em qualquer gama de frequência.

A modelagem numérica do método RFP é dada por:

$$H(\omega) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k (j\omega)^k}{\sum_{k=0}^{2 \cdot \text{modos}} a_k (j\omega)^k}, \quad (14)$$

onde $H(\omega)$ é a função resposta frequência (FRF), ω é a frequência natural, a_k e K iniciam-se em zero e finalizam-se em um valor igual ao dobro de modos. Já para o numerador, b_k e K iniciam-se em zero e terminam em N .

$$H(\omega) = \frac{\prod_{k=0}^N (j\omega - z_k)^K}{\prod_{k=0}^{2 \cdot \text{modos}} (j\omega - P_k)^K}, \quad (15)$$

aqui, os parâmetros P_k e K tomam valores entre um e o dobro de modos de vibração. No numerador tem-se o intervalo de zero até N para as variáveis z_k e K .

Para os resíduos, utiliza-se:

$$H(\omega) = \sum_{k=1}^{\text{modos}} ((R_k/j\omega - P_k) + (R_k^*/j\omega - P_k^*)) \quad (16)$$

onde os intervalos de P_k , R_k e K iniciam em um e terminam em um valor igual à quantidade de modos.

3. Metodologia

Com o objetivo de analisar o fenômeno físico envolvido na interação fluido-estrutura, não serão aqui discutidos os métodos numéricos utilizados na resolução do problema, e sim, será demonstrado qual o modelo que se adequa melhor nesta análise.

O esquema de resolução do problema acoplado fluido-estrutura, utilizando uma abordagem Lagrangeana Euleriana Arbitrária (ALE),

é mostrado na figura 1, e pode ser designado como “two-way method”, por serem resolvidos os dois domínios separadamente.

A variável adotada para a resolução do domínio do fluido é a pressão. Em uma primeira etapa, são resolvidas as equações governantes para o fluido, para na sequência ser transferido o valor da pressão na interface fluido-sólido. Essa pressão gera certo deslocamento na estrutura, que é a variável escolhida para o domínio da estrutura. Na sequência, as equações de dinâmica das estruturas são resolvidas para o sólido, e o deslocamento é transferido para a interface sólido-fluido. A partir daí, o primeiro passo de tempo está finalizado, e os próximos seguem a mesma lógica. Para cada passo de tempo, as equações são resolvidas até que a resposta tenha convergido para o parâmetro escolhido ou um número máximo de iterações pré-determinado tenha sido atingido. Neste trabalho, estudou-se a influência da oscilação de vórtices gerados no escoamento do fluido no comportamento de uma estrutura flexível, com módulo de elasticidade linear constante. Para tal, o domínio do fluido é relativamente grande em relação à estrutura, tentando simular uma estrutura em um ambiente aberto. Tendo em vista que apenas a região próxima da interface entre os dois domínios é influenciada pelo deslocamento da estrutura, o domínio do fluido pode ser dividido em duas partes. Na região afastada da estrutura, utiliza-se uma abordagem Euleriana para resolução das equações de Navier-Stokes, enquanto que na região próxima à estrutura, utiliza-se uma abordagem Lagrangeana, ou seja, para o domínio do fluido utiliza-se uma abordagem Lagrangeana Euleriana Arbitrária (ALE). Diante do que foi exposto, entende-se que essa metodologia é a mais adequada quando é necessário considerar uma estrutura flexível. Para a resolução do problema da mecânica dos fluidos, será utilizado o código computacional FLUENT [17], o qual resolve o campo do escoamento do fluido via método de volumes finitos, enquanto que para a estrutura o método de elementos finitos é utilizado.

3.1 Vibração de uma viga induzida por um escoamento

Nesta seção, o objetivo é mostrar uma metodologia que seja consistente para acoplar o problema do fluido com o problema da

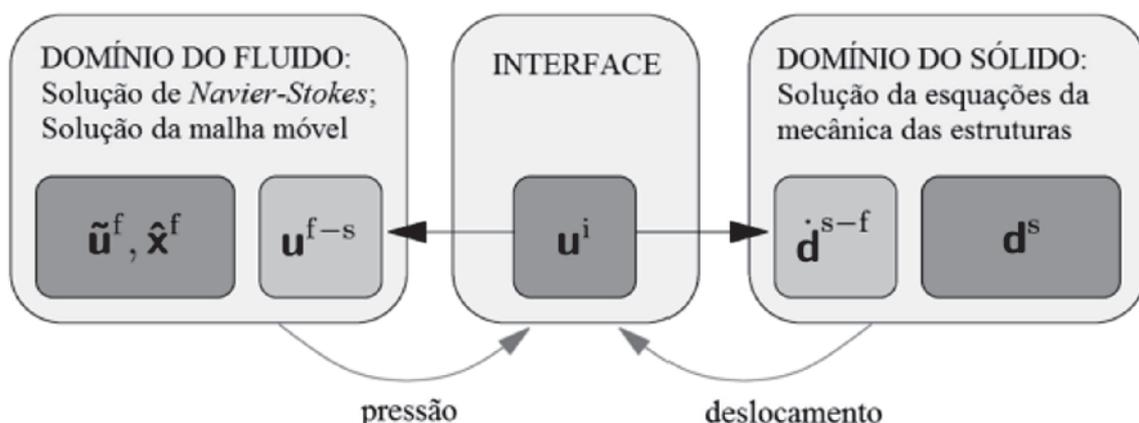


Figura 1
Esquema de resolução para o acoplamento fluido-estrutura

Fonte: adaptado de Dettmer e Peric, [13]

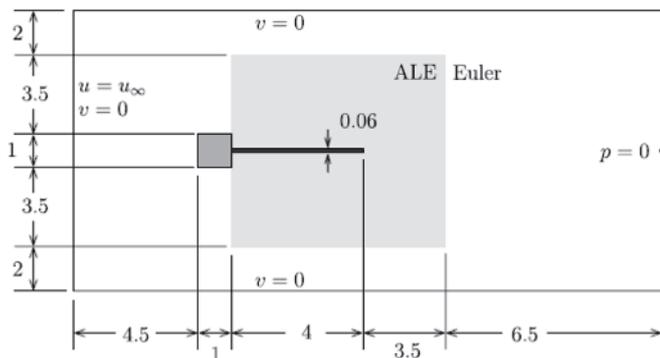


Figura 2
Vibração de uma viga induzida por um escoamento de um fluido: condições de contorno e geometria
Fonte: Dettmer e Peric, [13]

estrutura. Tendo como objetivo verificar o efeito da incidência de um escoamento de um fluido em um objeto, e também o efeito que uma variação de carga de pressão (através da análise do coeficiente de sustentação) exerce sobre uma estrutura. Pretende-se acoplar os dois tipos de problema, transferindo o efeito do escoamento à estrutura, e o efeito do deslocamento da estrutura causado por esse escoamento para o domínio do fluido.

Para comparação do modelo de interação fluido-estrutura, é apresentado o problema onde um escoamento induz a vibração de uma viga flexível. Este problema foi resolvido por diversos autores, como Wall e Ramm [12]; Dettmer e Peric [13], Bazilevs *et. al.* [10] entre outros. O problema foi modelado e o resultado comparado com o disponível na literatura.

Um corpo rígido em formato de cubo e fixo é submerso em um escoamento de um fluido newtoniano, gerando vórtices no fluido, os quais, em contato com a viga, fazem com que o coeficiente de sustentação sobre ela oscile e, conseqüentemente, a fazem vibrar. O esquema é mostrado na figura 2, onde as dimensões estão em centímetros (cm). Em relação à abordagem e as condições de contorno, neste problema adotou-se uma abordagem Lagrangeana-Euleriana Ar-

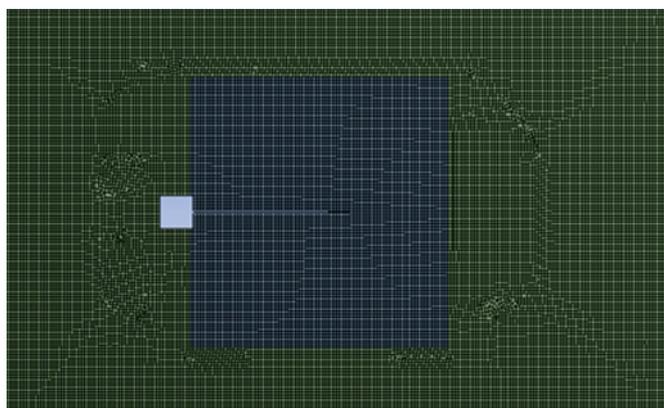


Figura 3
Malha de volumes finitos para o domínio do fluido



Figura 4
Malha de elementos finitos para o domínio da estrutura

bitrária (ALE), onde na região do domínio do fluido próxima à estrutura foram utilizadas malhas móveis para acompanhar o deslocamento da estrutura. As propriedades adotadas para o fluido e o sólido foram as mesmas utilizadas por Wall e Ramm [12], sendo a viscosidade e a densidade do fluido, respectivamente, $\mu_f = 1,82 \times 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}$ e $\rho_f = 1,18 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. A densidade, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do sólido são, respectivamente, $\rho_s = 0,1 \text{ kg/m}^3$, $E = 2,5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ e $\nu = 0,35$. Trata-se de um sólido com baixa rigidez e, portanto, esperam-se grandes deformações na viga. O objetivo dessa abordagem é demonstrar o acoplamento forte que há entre fluido e estrutura quando adotada essa abordagem (ALE). A velocidade constante do escoamento na entrada do domínio é $u_\infty = 51,3 \text{ m/s}$ na direção x , sentido positivo. Isso significa que o número de Reynolds para o caso é $Re = (\rho_f D u_\infty) / \mu_f = 333$, onde D é o diâmetro hidráulico do corpo rígido de geometria quadrada que é submerso no escoamento com a intenção de gerar vórtices, os quais induzem a vibração na viga. A malha de volumes finitos para o escoamento é mostrada na figura 3, enquanto que a malha de elementos finitos da viga é mostrada na figura 4. Optou-se por se utilizar uma malha de quadriláteros bem refinada, a fim de se obter resultados mais precisos. A malha do domínio do fluido possui 47854 elementos e 23552 nós, enquanto que a malha do domínio da estrutura possui 400 elementos e 3053 nós. Para o acoplamento, os dados de pressão foram transferidos do fluido para a estrutura, enquanto que o deslocamento da estrutura foi transferido para o domínio do fluido.

3.2 Análise modal de uma estrutura de aço em escala reduzida

É muito importante saber quais são os modos de vibração de uma estrutura e a frequência natural correspondente a cada modo.

Tabela 1
Propriedades da estrutura de aço

Propriedades da estrutura de aço	Valores numéricos	
Altura (H)	0,6	m
Altura parcial (D)	0,15	m
Espessura da seção (a)	0,00615	m
Comprimento da seção (b)	0,0131	m
Densidade de massa (ρ)	7850	kg/m ³
Módulo de Young (E)	200	GPa
Módulo de Poisson (ν)	0,26	-
Área da seção transversal ($A = a.b$)	$8,06 \times 10^{-05}$	m ²
Momento de Inércia ($I = b.a^3/12$)	$2,54 \times 10^{-10}$	m ⁴

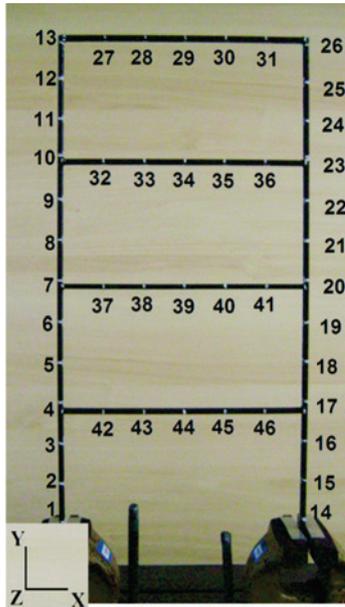


Figura 5
Estrutura de aço utilizada para o experimento

Portanto, nesta seção, os parâmetros modais de uma estrutura de aço foram estimados por meio do método de análise modal experimental RFP. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados via MEF.

Para o estudo, foram realizadas três etapas: modelagem da estrutura de aço pelo "software" ANSYS® para aquisição dos parâmetros modais em MEF; leitura dos dados e obtenção das Funções Resposta em Frequência (FRF) através de experimento realizado e uso da metodologia "Rational Fraction Polynomial method" (RFP) para a comparação de resultados.

3.2.1 Instalação do experimento

Neste experimento, foi utilizada uma estrutura de aço construída em laboratório, seguindo os parâmetros apresentados na tabela 1. A estrutura foi fixada por morsas mecânicas para simular um engas-

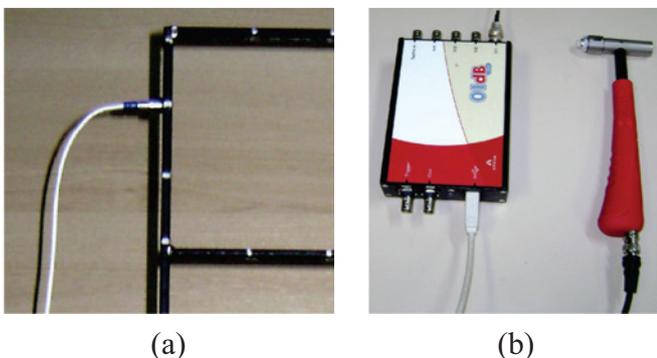


Figura 6
(a) Posição do acelerômetro e
(b) Analisador de vibração e martelo de impacto

Tabela 2

Frequências naturais para os três primeiros modos de vibração

	Método RFP		MEF
	Frequência [Hz]	Coef. de amortecimento [%]	Frequência [Hz]
1°	26,302	1,2746	29,319
2°	92,508	0,2440	98,771
3°	177,203	0,1863	191,27

te e garantir as condições de contorno nos apoios durante as medidas. A montagem da estrutura está mostrada na figura 5. Foram medidos 46 pontos para obter os modos verticais e horizontais de vibração. Os modos transversais não foram avaliados neste trabalho.

3.2.2 Procedimento experimental

Os dados foram adquiridos utilizando um analisador dinâmico de vibrações, figura 6b. A frequência de amostragem foi fixada em 400 Hz. Os sinais de entrada e saída foram filtrados por uma janela de força e uma janela de decaimento exponencial respectivamente, enquanto que a resolução da medição foi de 0,25 Hz.

A estrutura foi excitada com um martelo de impacto (figura 6b) no nó 24, impulsionando-o para o sentido negativo do eixo x. O martelo possui uma célula de carga com uma sensibilidade de 2.27 mV/N para detectar a magnitude da força de excitação.

A resposta de vibração foi medida, em todos os nós, com um acelerômetro. O acelerômetro foi posicionado na estrutura para medir apenas as acelerações perpendiculares à superfície da mesma (figura 6a).

O método RFP foi implementado e inserido no "toolbox" *EasyMod* (Kouroussis, [18]). Com isso, foi possível a obtenção dos parâmetros modais experimentais.

3.3 Problema acoplado fluido-estrutura

O caso analisado neste trabalho tem por objetivo estudar o comportamento dinâmico de uma estrutura submetida a oscilações de cargas de pressão. Para simular isso, um corpo rígido em forma de cubo é submergido em um escoamento de ar, gerando vórtices e,

Table 3

Natural frequencies for the first mode of vibration of the various frames tested by the FEM

H x L (mm)	a x b (mm)	Natural frequency of 1 st vibration mode
1200 x 600	6.15 x 13.1	7.8
1200 x 600	12.3 x 26.2	15.9
1800 x 900	18.4 x 39.3	10.6
2400 x 1200	24.6 x 52.4	7.9
2700 x 1350	27.7 x 58.9	7.1
3000 x 1500	30.8 x 65.5	6.4

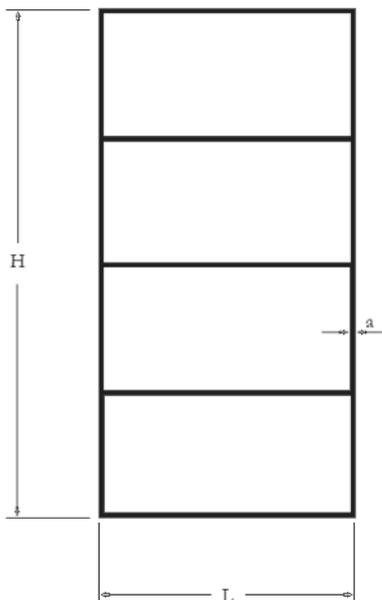


Figura 7
Modelo estrutural com suas principais medidas do pórtico utilizado para estudo de análise modal

consequentemente, fazem o coeficiente de sustentação sobre a estrutura oscilar. Para comparar com os modos de vibração da estrutura, foi realizada uma análise modal através do “software” ANSYS®, onde os modos de vibração e as frequências naturais para diversos pórticos semelhantes com tamanhos e rigidezes diferentes entre si foram determinados. A tabela 3, traz um resumo deste estudo, enquanto que a figura 7 mostra a estrutura e suas principais dimensões. Percebe-se que a frequência natural da estrutura é alterada à medida que suas dimensões mudam. Por exemplo, um pórtico com 120 cm de altura por 60 cm de largura, feito com barras de 0,615 x 1,31 cm de seção transversal, tem uma frequência natural próxima de 7,8 Hz. Este foi o pórtico utilizado no problema acoplado fluido-estrutura simulado e a figura 8 mostra o modelo e as condições de contorno. Uma abordagem semelhante ao caso de acoplamento fluido-estrutu-

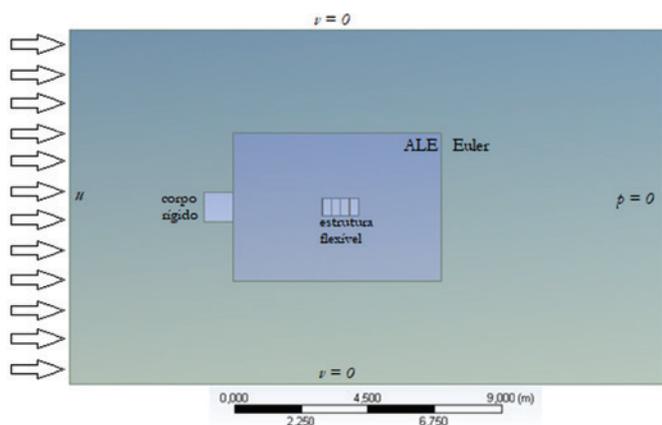


Figura 8
Geometria para o problema acoplado

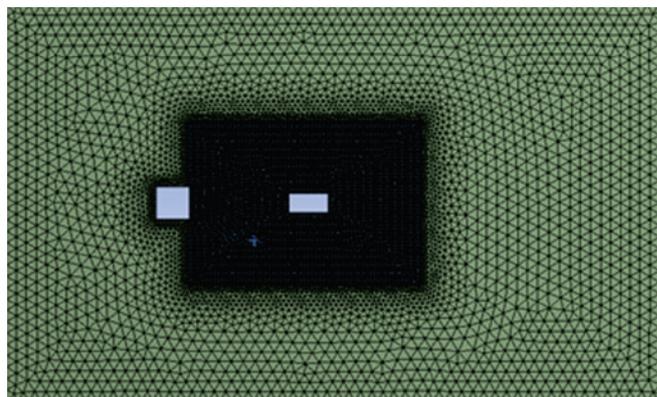


Figura 9
Malha de volumes finitos para o problema acoplado

ra da seção 3.1 deste trabalho foi considerada. Ou seja, uma malha móvel para o fluido na região próxima da estrutura, fluxo de entrada de ar constante, condição de não escorregamento nos contatos entre fluido e corpos sólidos e pressão nula na saída. Para geração dos vórtices, o escoamento foi bloqueado por um corpo rígido de geometria quadrada com 100 cm de lado, como o era no caso da viga sendo excitada pelo fluxo de fluido (item 3.1 deste artigo). Tendo em vista que o coeficiente de sustentação gerado pelo obstáculo rígido oscila entre positivo e negativo, o pórtico foi posicionado “deitado” e engastado na sua extremidade direita, para fazer com que o coeficiente de sustentação atuasse de forma a oscilar a estrutura conforme seus modos de vibração analisados.

Aqui, a velocidade de entrada foi controlada e algumas velocidades foram testadas, monitorando-se os coeficientes de arrasto e de sustentação para cada uma dessas velocidades. Para uma velocidade $u_{\infty} = 80$ m/s constatou-se que a frequência de oscilação do coeficiente de sustentação sobre o pórtico fica próxima de 8 Hz, assim como a frequência natural do pórtico. Para o fluido, uma malha de 21162 elementos e 21450 nós foi montada, enquanto que para a estrutura uma malha de 1082 elementos e 10192 nós foi construída. Nas figuras 9 e 10 são mostradas as malhas para o domínio do fluido e da estrutura, respectivamente.

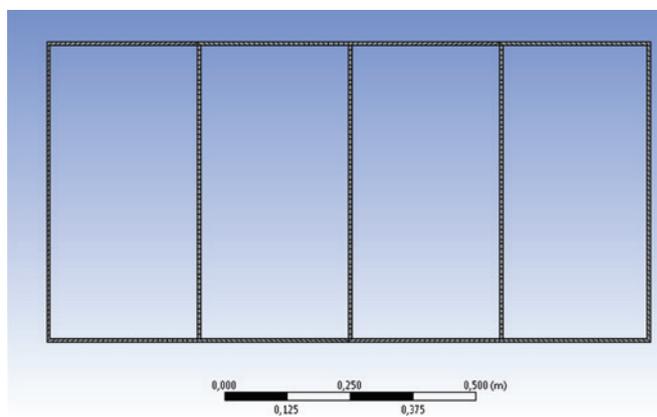


Figura 10
Malha da estrutura para o problema acoplado

4. Resultados e discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados de cada um dos modelos apresentados na seção anterior, assim como as discussões pertinentes.

4.1 Vibração de uma viga induzida por um fluxo de fluido

O deslocamento ao longo da direção vertical do vértice da direita da viga foi monitorado. O resultado obtido por Dettmer e Peric [13] e Wall e Ramm [12] são mostrados nas figuras 11 e 12, respectivamente.

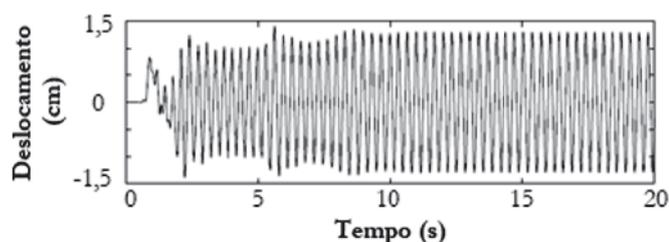


Figura 11
Deslocamento vertical do vértice da estrutura. Resultados obtidos por Dettmer e Peric [13]

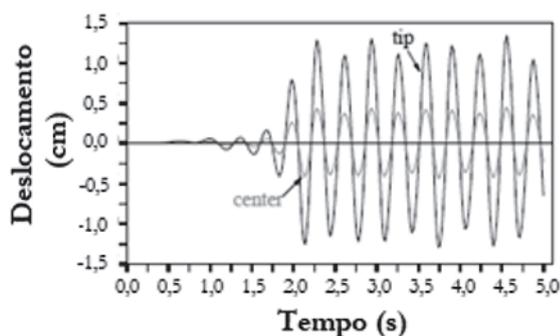


Figura 12
Deslocamento vertical do vértice e do centro da estrutura. Resultados obtidos por Wall e Ramm [12]

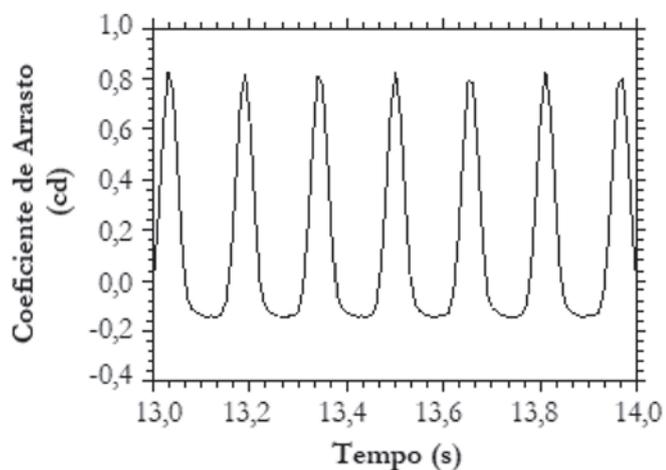


Figura 13
Coeficiente de arrasto entre 13 e 14 segundos de simulação

Nos dois casos, a amplitude do deslocamento vertical é próxima de 1,2 cm, enquanto que um ciclo demora em torno de 0,3 s. Percebe-se que o comportamento para os dois casos não são

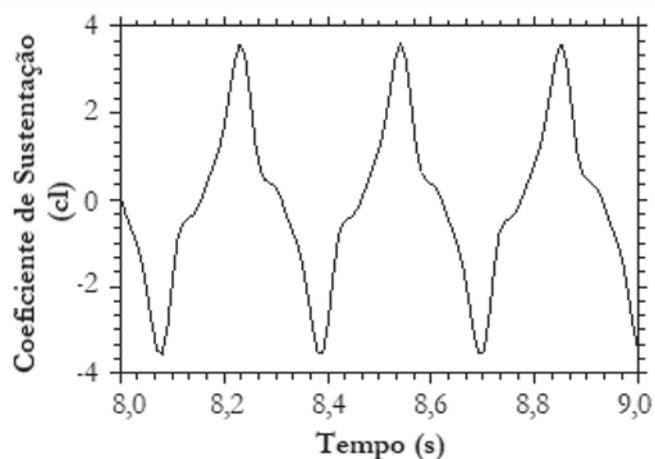


Figura 14
Coeficiente de sustentação entre 8 e 9 segundos

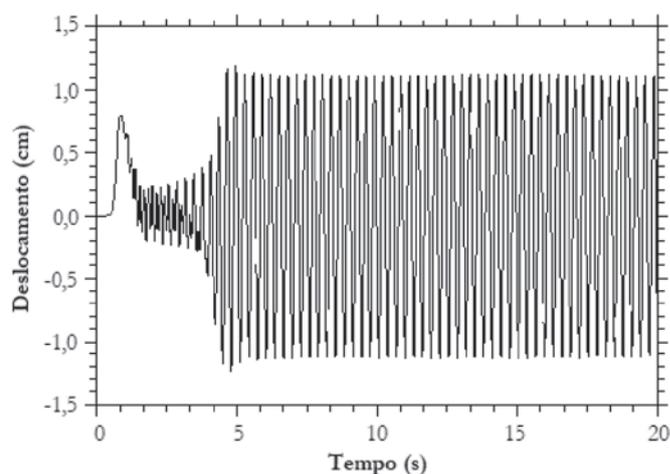


Figura 15
Deslocamento do vértice da direita da viga ao longo do tempo

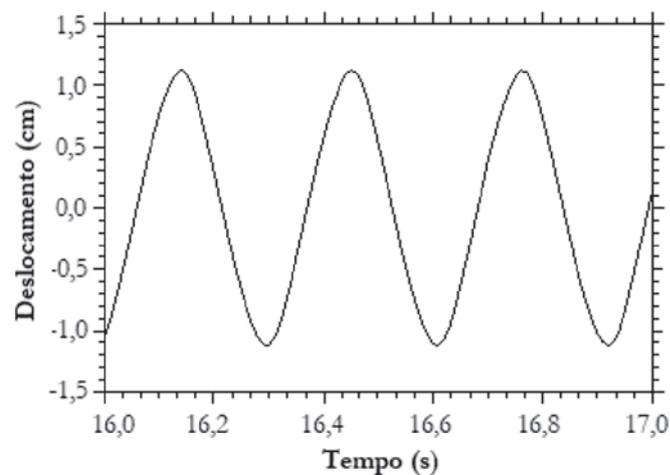


Figura 16
Deslocamento do vértice da direita da viga entre 16 e 17 segundos de simulação

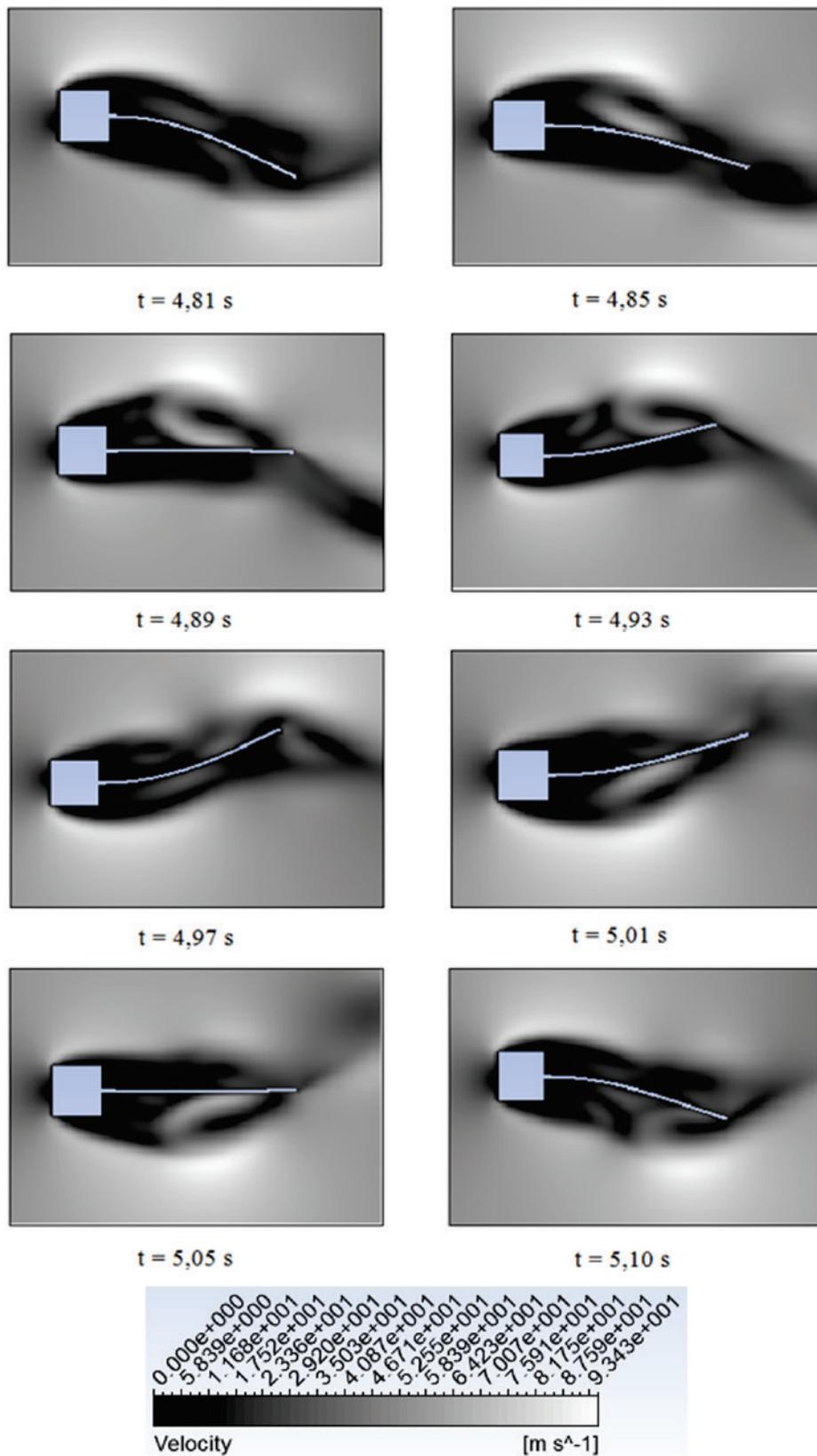


Figura 17
Vibração de uma viga induzida por um fluxo de um fluido

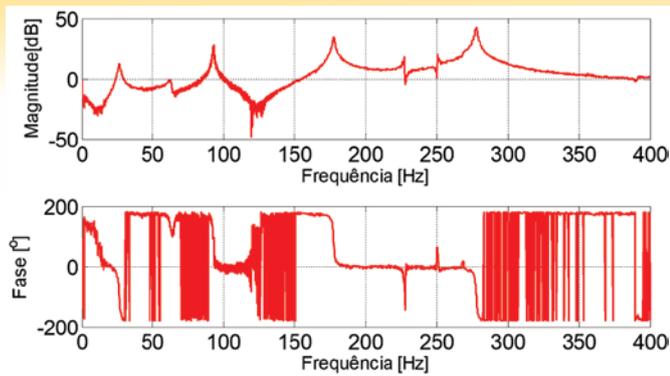


Figura 18
FRF experimental (ponto 3)

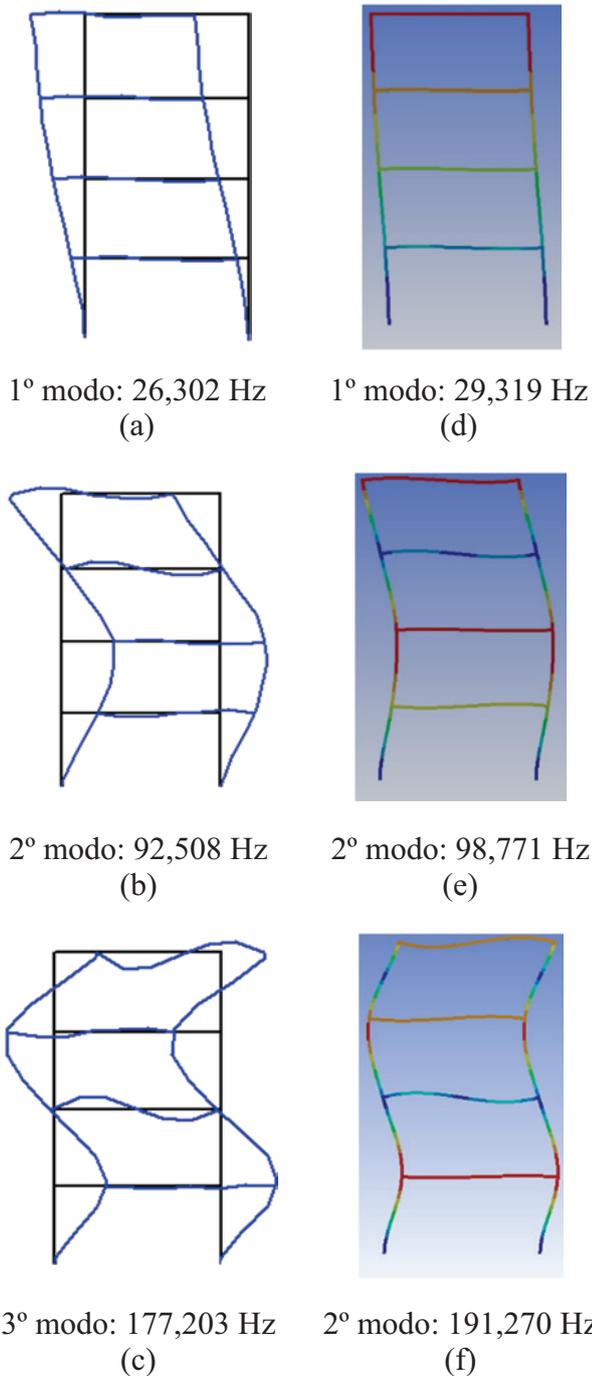


Figura 19
Modo de vibração: (a), (b), (c) por RFP ;(d),(e),(f) por FEM (ANSYS)

idênticos, principalmente no início do escoamento, que se encontra em regime transiente. Isso porque cada autor desenvolveu seu próprio modelo numérico para resolução. Porém, o que se nota é que após estabelecido o regime permanente, o comportamento dinâmico da estrutura é o mesmo.

Durante a resolução do problema acoplado simulado pelos autores deste artigo, monitorou-se também os coeficientes de arrasto (C_d) e de sustentação (C_l) sobre a estrutura, além do deslocamento da viga. As oscilações do arrasto e da sustentação são mostradas nas figuras 13 e 14. Nota-se que um ciclo de variação do C_l demora aproximadamente os mesmos 0,3 s que o ciclo de oscilação da viga.

O deslocamento obtido na simulação deste problema também está de acordo com os trabalhos encontrados na literatura. Ele é mostrado nas figuras 15 e 16. A oscilação da viga durante o regime permanente do escoamento do fluido é mostrada na figura 17.

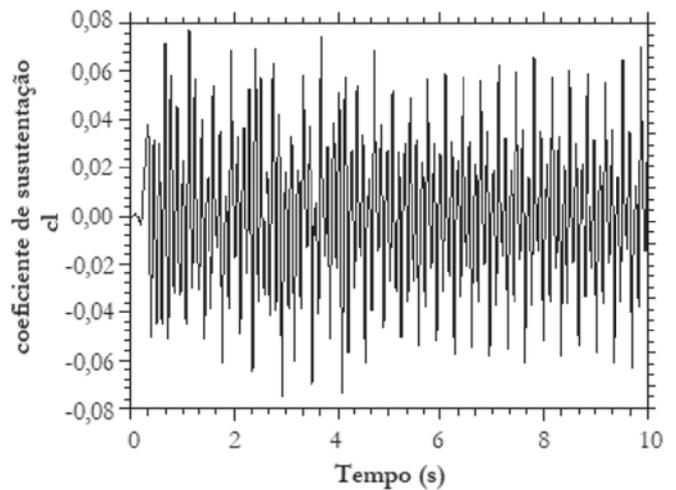


Figura 20
Coeficiente de sustentação sobre o Pórtico x Tempo

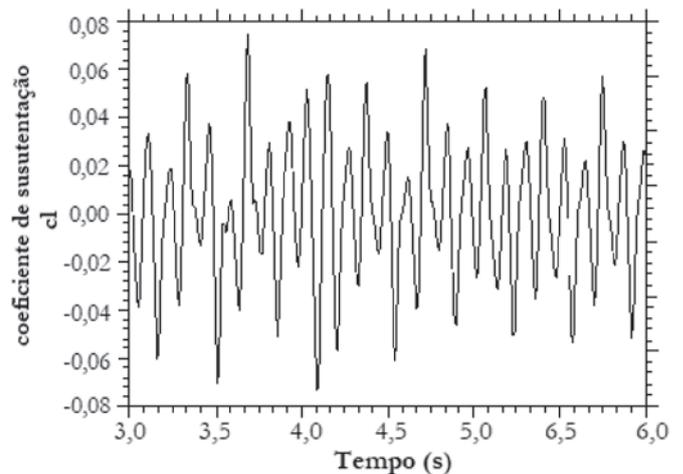


Figura 21
Coeficiente de sustentação sobre o pórtico entre 3 e 6 segundos

4.2 Análise modal de uma estrutura de aço em escala reduzida

As frequências naturais e o fator de amortecimento para os três primeiros modos de vibração estão mostrados na tabela 2, onde apenas os modos no plano x-y foram medidos, sendo então os outros planos desconsiderados. Em relação ao MEF, os resultados de frequências naturais do primeiro, segundo e terceiro modos de vibração utilizando o método RFP, apresentam um erro de 10,3%, 6.3% e 7.4%, respectivamente. A Figura 18 apresenta a Função Resposta em Frequência (FRF) experimental do ponto 3.

A figura 19 apresenta os modos de vibração obtidos pelo método RFP com os dados experimentais e pelo MEF utilizando o “software” ANSYS®.

Conforme apresentado, os resultados obtidos pelo método RFP são compatíveis com o MEF, apesar das frequências naturais terem uma pequena dispersão nos valores, quando comparados os dois méto-

dos. Isso pode ser atribuído aos seguintes fatores: divergências geométricas entre o pórtico real e o modelado no método analítico; o resultado obtido pelo MEF não considera o fator de amortecimento; o método RFP sofre influências externas não controláveis no momento de coleta de dados, interferindo nos resultados finais.

A validação da modelagem numérica utilizada pelo “software” ANSYS® foi eficaz, quando comparados seus resultados com os resultados experimentais. Desta forma, se utilizou da modelagem numérica para realizar a análise modal da estrutura apresentada na sequência deste trabalho.

4.3 Problema acoplado fluido-estrutura

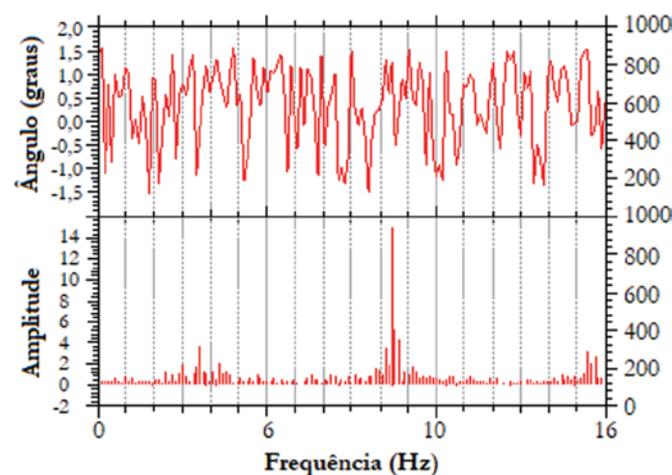


Figura 22
FFT para o coeficiente de sustentação

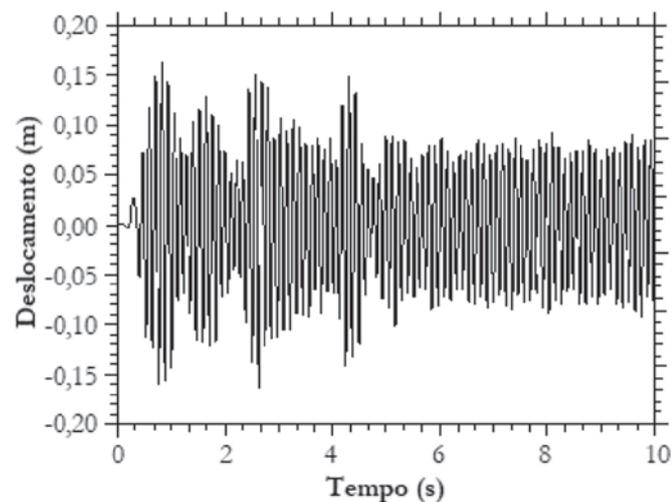


Figura 23
Deslocamento do Vértice superior esquerdo x Tempo

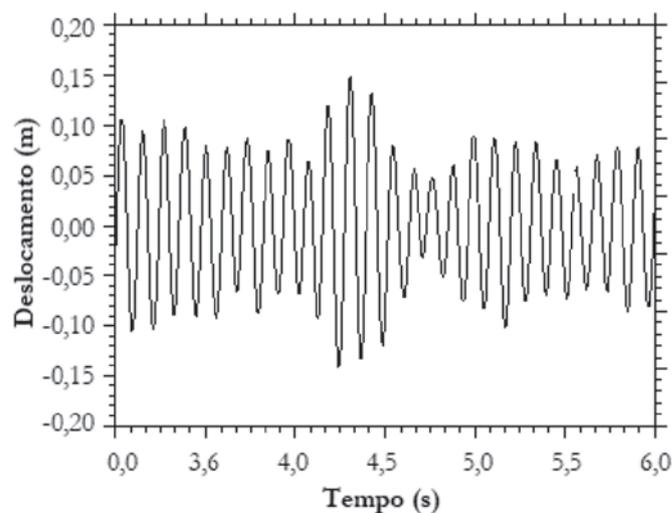


Figura 24
Deslocamento do vértice superior esquerdo entre 3 e 6 segundos

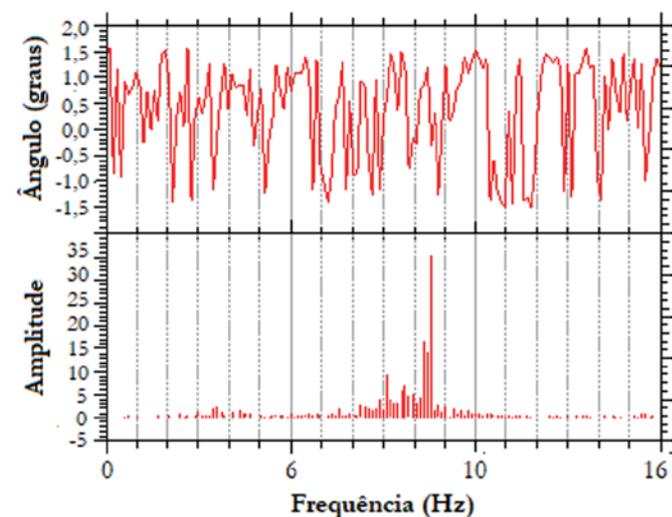


Figura 25
FFT para o deslocamento do vértice superior esquerdo

Neste estudo buscou-se equilibrar a frequência de oscilações do coeficiente de sustentação com a frequência natural relativa ao 1º modo de vibração de um pórtico. O pórtico escolhido e o problema foram os modelados anteriormente.

O coeficiente de arrasto neste caso não é importante, tendo em vista que o deslocamento vertical do vértice superior esquerdo do pórtico foi monitorado. O interessante é o comportamento do coeficiente de sustentação sobre o pórtico. Ele é o responsável pelos deslocamentos verticais sobre a estrutura. As figuras 20 e 21 mostram o comportamento do coeficiente de sustentação. Este varia com valor médio nulo e com amplitude de até 0,075. Sua frequência de oscilação é próxima de 8,8 Hz, conforme sua "Fast Fourier Transform" (FFT) mostrada na figura 22.

O gráfico da FFT para o coeficiente de sustentação mostra que a frequência de oscilação deste é de 8,8 Hz. Essa frequência é muito próxima da frequência natural do pórtico analisado, que é 7,9 Hz. Pode-se imaginar que o pórtico esteja vibrando conforme seu primeiro modo de vibração.

Para verificar isso é necessário analisar o comportamento do deslocamento do pórtico. O deslocamento vertical do vértice superior esquerdo é mostrado nas figuras 23 e 24. Por fim, na figura 25,

percebe-se que a frequência retirada da FFT do deslocamento real da estrutura registra uma frequência de 8,8 Hz, assim como a do coeficiente de sustentação.

Neste caso, observou-se que o deslocamento aumenta de amplitude em cada ciclo até certo momento, atingindo um deslocamento máximo em torno de 17 centímetros. Após atingir essa amplitude máxima este começa decair novamente, e essa variação de amplitude persiste até o estabelecimento do regime permanente. A figura 26 ilustra esse comportamento. Além disso, nesta figura, observa-se que a estrutura vibra conforme seu primeiro modo de vibração, e também que a amplitude do deslocamento aumenta em cada ciclo até 4,32 segundos, para então começar a diminuir gradativamente até 4,45 segundos. Após 4,50 segundos, a amplitude começa aumentar novamente e assim segue até o regime permanente.

5. Conclusões

Neste trabalho foi abordado um problema acoplado fluido-estrutural, comparando o resultado com a análise modal de uma estrutura. Para tal, uma abordagem experimental e numérica foram realizadas, ou seja, os resultados experimentais foram utilizados para validação da modelagem numérica. Abaixo são apresentadas as

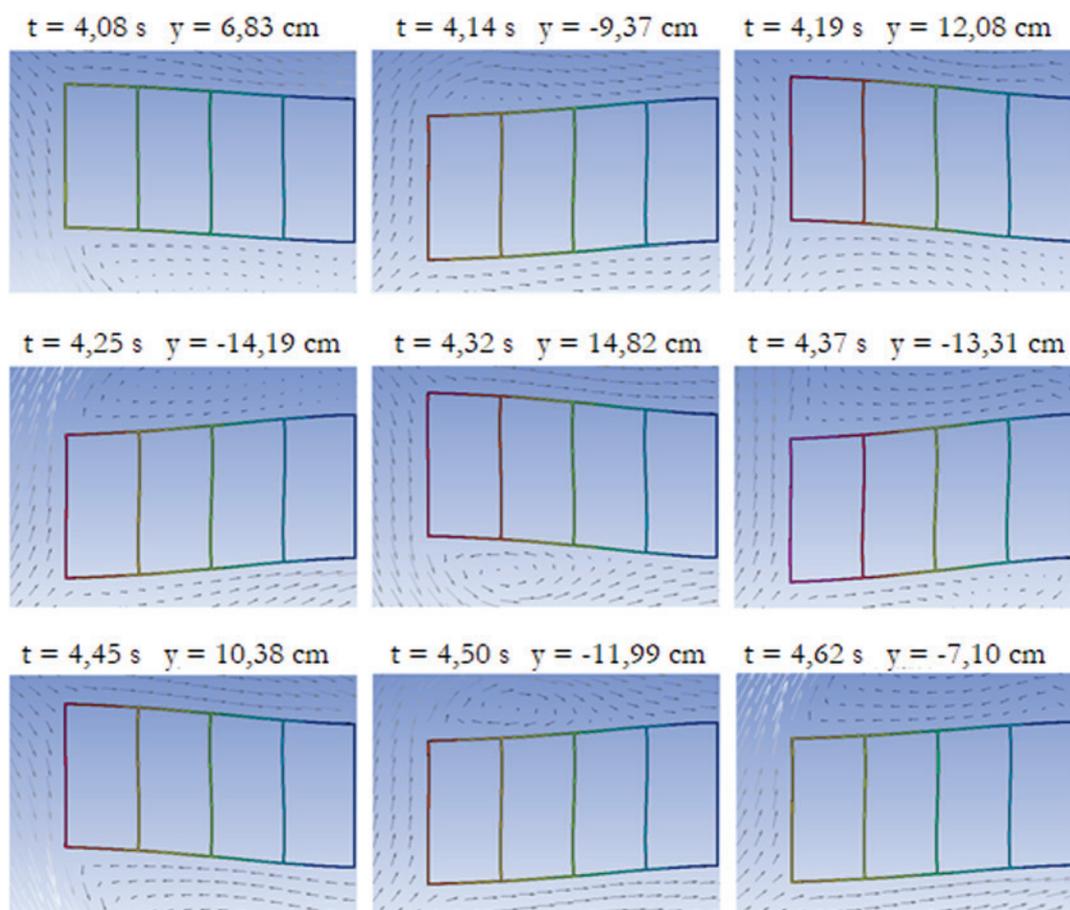


Figura 26

Movimento oscilatório da estrutura, onde: t é o tempo de simulação e y é o deslocamento vertical do vértice superior esquerdo da estrutura

conclusões de cada caso abordado no trabalho.

5.1 Vibração de uma viga induzida por um fluxo de fluido

Após realizar uma análise comparativa de um problema encontrado na literatura, conclui-se que o modelo adotado para resolução de um problema acoplado fluido-estrutura, onde a estrutura é flexível e o fluido Newtoniano, apresenta resultados compatíveis com os modelos numéricos desenvolvidos nas referências. Este modelo é adotado pelo “software” de análises multi-físicas ANSYS®, utilizado nas simulações dos casos.

5.2 Análise modal de uma estrutura de aço em escala reduzida

Conforme apresentado, os resultados obtidos pelo método RFP são compatíveis com o MEF, apesar de as frequências naturais terem uma pequena dispersão nos valores, quando comparado os dois métodos. Isso pode ser atribuído aos seguintes fatores: divergências geométricas entre o pórtico real e o modelado no método analítico; o resultado obtido pelo MEF não considera o fator de amortecimento; o método RFP sofre influências externas não controláveis no momento de coleta de dados, interferindo nos resultados finais. Estes resultados validam a modelagem numérica utilizada no “software” ANSYS®. Portanto, é válido utilizar este para análise modal da estrutura abordada no próximo caso.

5.3 Problema acoplado fluido-estrutura

O problema acoplado consiste em analisar o comportamento dinâmico da estrutura quando ela está sujeita à um coeficiente de sustentação oscilatório, gerados pela incidência de um escoamento de ar em obstáculos. Constatou-se que uma estrutura submetida à este tipo de escoamento tende a se movimentar conforme seus modos de vibração.

Por fim, acrescenta-se o fato de que o avanço da mecânica computacional está permitindo a resolução de problemas complexos em tempo hábil e esta pode ser incorporada em projetos estruturais. Ainda há um caminho longo e árduo de pesquisas a serem feitas para que isso se torne habitual. Porém, acredita-se que a consideração dos efeitos dinâmicos em estruturas leves podem trazer resultados mais precisos dos fenômenos que envolvem estas estruturas, e torná-las mais seguras e econômicas ao mesmo tempo.

6. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem à UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco, pelos recursos disponíveis para realização dessa pesquisa e à CAPES, pelo suporte financeiro ao primeiro autor. Os autores também gostariam de agradecer a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo suporte financeiro concedido - Edital 24/2012 Programa de Pesquisa Básica e Aplicada (Convenio FUNTEF-PR 376/2014).

7. Referências bibliográficas

- [1] Souza JR., L. C. Uma Aplicação dos Métodos dos Elementos Finitos e Diferenças Finitas à Interação Fluido-Estrutura. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-008/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2006, 197p.
- [2] Gilbert, R. J. “Vibrations des structures – Interactions avec les fluids – Sources d’excitation aléatoires”. E. Eyroller, Paris, França, 1988.
- [3] Zienkiewicz, O. C. e Taylor, R. L. “The Finite Element Method”, Fourth Edition, McGraw-Hill, Pub. Co. Ltd. UK, vol.2, 1989.
- [4] Junger, M.C. “Acoustic fluid-elastic structure interactions: basic concepts.” In: *Computers & Structures*, vol. 65, nº 3, 287-293, 1997.
- [5] Tabarrok, B. “Dual formulations for acoustic-structural vibrations.” In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 13, 197-201p, 1978.
- [6] Leitão, G. B. Análise Numérica de Segunda Ordem de Pórticos Planos de Estruturas de Aço. Dissertação de Mestrado em Estruturas, Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, SP, 2014.
- [7] Everstine, C.G. “Finite element formulations of structural acoustics problems.” In: *Computers & Structures*, vol. 65, nº 3, 307-321p, 1997.
- [8] Gomes, F.A.A. Análise Numérica do Escoamento Hipersônico em Torno de Corpos Rombudos Utilizando Métodos de Alta Ordem. Tese de Doutorado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2012.
- [9] Soares Jr, D. Análise Dinâmica de Sistemas Não-lineares com Acoplamento do Tipo Solo-fluido-estrutura por Intermédio dos Métodos dos Elementos Finitos e do Método dos Elementos de Contorno. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- [10] Bazilevs, Y., Takizawa, K., and Tezduyar, T. E. “Computational fluid-structure interaction: methods and applications”. John Wiley & Sons. 2013.
- [11] Zienkiewicz, O. C. e Bettess, P. “Fluid-structures dynamics interaction and wave forces. An introduction to numerical treatment. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 13.1, 1-16p. 1978.
- [12] Wall, W. A. e Ramm, E. “Fluid-structure interaction based upon a stabilized (ALE) finite element method”. *Computational mechanics. New Trends and Applications*. S.R. Idelsohn, E. Oñate and E.N. Dvorkin (Eds). CIMNE, Barcelona, Spain, 1998.
- [13] Dettmer, W., Peric, D. “A computational framework for fluid-structure interaction: Finite element formulation and applications”. *Computational Methods Appl. Mech. Engrg.* 195 5754-5779, 2005.
- [14] Teixeira, P. R. F. e Awruch, A. M. “Numerical simulation of fluid-structure interaction using the finite element method”. *Computers & Fluids*. 34, 249-273, 2004.
- [15] Ewins, D. J., 2000. “Modal Testing: Theory, Practice and Application”. John Wiley, Philadelphia, 2nd edition.
- [16] Schwarz, B. e Richardson, M. H. “Experimental Modal Analysis. In: CSI Reliability Week, 1999. Proceedings: Jamestown, Califórnia, 1999.

- [17] FLUENT v6.3, Fluent Incorporate Inc., Centerra Resource Park, 10, Cavendish Court, Lebanon, New Hampshire, USA, 03766, 2006.
- [18] Kouroussis, G., Bem Fekih, L., Conti, C., Verlinden, O. "EasyMod: a matlab / scilab toolbox for teaching modal analysis". Proceedings of the 19th International Congresso on Sound and Vibration, Vilnius (Lituânia), July 9-12, 2012.