

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional

**Controle Ativo de Vibrações Estruturais Induzidas pela  
Ação do Vento**

Por  
**Marcelo Ribeiro**

Juiz de Fora  
2013

Marcelo Ribeiro

**Controle Ativo de Vibrações Estruturais Induzidas pela Ação do Vento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau Mestre em Modelagem Computacional.

Orientador: Prof. D.Sc. Flávio de Souza Barbosa

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> D.Sc. Patrícia Habib Hallak

Juiz de Fora

2013

Ribeiro, Marcelo .  
Controle Ativo de Vibrações Estruturais Induzidas pela Ação  
do Vento / Marcelo Ribeiro. -- 2013.  
67 f.

Orientador: Flávio de Souza Barbosa  
Coorientadora: Patrícia Habib Hallak  
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-  
Graduação em Modelagem Computacional, 2013.

1. Controle de Vibrações. 2. Controle Ativo. 3.  
Fluidodinâmica Computacional. 4. Vibrações Induzidas pelo  
Vento. I. Barbosa, Flávio de Souza, orient. II. Hallak,  
Patrícia Habib, coorient. III. Título.

Marcelo Ribeiro

**Controle Ativo de Vibrações Estruturais Induzidas pela Ação do Vento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do grau Mestre em Modelagem Computacional.

Aprovada em 1º de abril de 2013.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. D.Sc. Flávio de Souza Barbosa- Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF



---

Prof.ª D.Sc. Patrícia Habib Hallak- Coorientadora  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF



---

Prof.ª D.Sc. Michèle Schubert Pfeil  
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ



---

Prof. D.Sc. Alexandre Abrahão Cury  
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP



---

Prof. D.Sc. Franciso José Gomes  
Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

**A persistência é o menor caminho do êxito.**

*Charles Chaplin*

*Dedico esta dissertação aos meus primeiros mestres, meus pais, que sempre investiram em minha formação, e às minhas irmãs*

# Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos:

- ao professor Flávio, pela orientação, incentivo e acima de tudo pelo companheirismo e amizade;
- à professora Patrícia, por toda orientação e por ter disponibilizado o programa CFD, que tornou este trabalho possível.
- aos colegas discentes, em especial Accacio, Bruno, Daiana e Denise, aos quais sintetizo meus agradecimentos nas palavras de Fernando Pessoa:

*“O valor das coisas não está no tempo em que elas duram,  
mas na intensidade com que acontecem.  
Por isso existem momentos inesquecíveis,  
coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis!”*

- aos professores do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, por todo conhecimento transmitido;
- à Natália e Reginaldo, pela prestatividade de sempre;
- à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro durante o mestrado;
- a todos amigos e familiares que contribuíram direta e indiretamente para que eu chegasse até aqui.

Resumo da Dissertação apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES ESTRUTURAIS INDUZIDAS PELA AÇÃO DO VENTO

Marcelo Ribeiro

Abril/2013

Orientador : Flávio de Souza Barbosa

Co-orientadora : Patrícia Habib Hallak

A construção de edifícios, especialmente os mais esbeltos, requer uma análise apurada do comportamento dinâmico da estrutura. Tais estruturas são sujeitas a movimentos induzidos pelo vento, entre outras forças, o que pode causar efeitos indesejáveis tais como desconforto para os usuários ou até mesmo causar o colapso estrutural.

Neste cenário, os sistemas de controle são utilizados a fim de atenuar a vibração excessiva. Dentre estes sistemas, aqueles que utilizam respostas dinâmicas das estruturas para a determinação das forças de controle, de um modo geral, quando adequadamente construídos, têm um desempenho satisfatório. Pode-se destacar o sistema de controle com retroalimentação. No entanto, o uso desses controladores em edifícios requer uma certa quantidade de testes e simulações, uma vez que os problemas em qualquer fase do processo de controle pode transformar um controlador ativo em um excitador, o que obviamente não é desejável.

Neste trabalho foi realizada uma análise numérica de um modelo de sistema estrutural sujeito a forças dinâmicas de vento, onde as vibrações foram controladas por meio de um sistema de controle ativo. As forças de excitação foram obtidas por análise da fluidodinâmica computacional e as forças de controle foram obtidas aplicando a técnica de controle ótimo. Esta etapa constitui uma das primeiras fases do projeto de um controle.

**Palavras chaves:** Controle de Vibrações, Controle Ativo, Fluidodinâmica Computacional e Vibrações Induzidas pelo Vento.

Abstract of Dissertation presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## Active Control of Structural Vibration Induced by Wind

Marcelo Ribeiro

April/2013

Advisor: Flávio de Souza Barbosa

Co-advisor: Patrícia Habib Hallak

The construction of buildings, especially the most slender, requires a detailed analysis of the structural dynamic behavior. Such structures are subject to movements induced by the wind and other forces, which can cause undesirable effects such as discomfort for the user or even cause the structural collapse.

In this scenario, control systems are used to mitigate excessive vibration. Among these systems, those using dynamic responses of the structures to determine control forces, in general, when properly constructed, have satisfactory performance as control systems with feedback. However, the use of these controllers in buildings requires a certain amount of tests and simulations, since problems at any stage of the control process, may transform an active controller into an excitator, which is obviously undesirable.

In this work a numerical analysis of a structural model subject to dynamic wind forces was performed. The excitation forces were obtained by computational fluid dynamics analysis and control forces were obtained by applying the technique of optimal control. The present analysis is one of the first phases of a control design.

**Keywords:** Vibration Control System, Active Control, Computational Fluid Dynamics and Wind Induced Vibration.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação e Contextualização . . . . .	1
1.2	Objetivo . . . . .	5
1.3	Resumo da metodologia aplicada no trabalho . . . . .	5
1.3.1	Modelo adotado . . . . .	6
1.4	Organização da dissertação . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Comportamento de estruturas sob a ação do vento</b>	<b>9</b>
2.1	Introdução . . . . .	9
2.2	Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices . . . . .	11
2.2.1	Parâmetros adimensionais . . . . .	12
2.2.2	Descrição do fenômeno . . . . .	15
2.3	Ferramentas para Análise Aeroelástica . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Fluidodinâmica Computacional</b>	<b>23</b>
3.1	Aspectos Gerais . . . . .	23
3.2	Principais Aplicações . . . . .	24
3.3	Cenário Atual . . . . .	25
3.4	Simulação numérica de interação fluido-estrutura . . . . .	27

3.4.1	Fluxograma do programa . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Dinâmica e Sistemas de Controle de Vibrações</b>	<b>33</b>
4.1	Modelagem do sistema estrutural dinâmico . . . . .	34
4.2	Sistemas de Controle . . . . .	35
4.3	Controle Ótimo . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Aplicação e Resultados</b>	<b>40</b>
5.1	Estudos preliminares - Análise aerodinâmica . . . . .	40
5.2	Análise aeroelástica . . . . .	44
5.3	Análise dos resultados . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>48</b>

# Lista de Figuras

1.1	Ponte de Tacoma Narrows durante o colapso. . . . .	3
1.2	Modelo acoplado . . . . .	6
2.1	Ilustração dos principais fenômenos aeroelásticos. . . . .	11
2.2	Sistema massa mola amortecido. . . . .	12
2.3	Decomposição das forças provocadas pelo vento em um corpo. . . . .	14
2.4	Vórtices de Van Kármán . . . . .	15
2.5	Desprendimento cadenciado de vórtices para diferentes números de Reynolds. . . . .	17
2.6	Crescimento da amplitude de oscilação e o fenômeno de captura da frequência de desprendimento de vórtices. . . . .	18
2.7	Número de Strouhal para várias seções transversais. . . . .	19
2.8	Influência da turbulência sobre o espectro de pressões. . . . .	20
3.1	Ilustrações de utilizações da CFD em diferentes áreas de aplicação. . . . .	26
3.2	Divisão do problema no domínio em Euleriana, ALE e região do corpo rígido. . . . .	30
4.1	Modelo do sistema massa-mola-amortecedor para 1GL. . . . .	34
4.2	Esquema de Controle Ativo de Malha Fechada. . . . .	36
5.1	Modelo de torre utilizada na análise. . . . .	41

5.2	Modelo de torre utilizada na análise com respectivo perfil do vento e fórmula modal de vibração. . . . .	42
5.3	Modelo aerodinâmico bidimensional. . . . .	43
5.4	Malha de elementos finitos em volta da estrutura. . . . .	43
5.5	Detalhe da malha de elementos finitos em volta da estrutura. . . . .	44
5.6	Histórico de $C_l$ pelo tempo adimensionalizado $t^*$ . . . . .	44
5.7	Espectro do histórico de $C_l$ representado na Figura 5.6. . . . .	45
5.8	Deslocamentos obtidos para o modelo de estrutura. . . . .	45
5.9	Deslocamentos do modelo de estrutura sem e com controle de vibrações. . . . .	46
5.10	Histórico de forças de controle. . . . .	47

# Lista de Tabelas

5.1	Resultados dos deslocamentos obtidos em referência à matriz de ponderação adotada. . . . .	46
-----	--	----

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e Contextualização

Até meados de 1880 poucos edifícios tinham mais que cinco andares. Isso pode ser atribuído às dificuldades existentes na época tais como falta de elevadores, abastecimento de água e à resistência dos materiais para suportar o peso da estrutura. O desenvolvimento de materiais mais leves e mecanicamente mais resistentes, aliado à valorização dos terrenos nos grandes centros urbanos, trouxeram a tendência de se construir prédios cada vez mais altos e leves, e, como consequência, mais flexíveis e susceptíveis a problemas ocasionados por vibrações, entre elas as induzidas pela ação do vento. Quanto mais leves e flexíveis as estruturas ficam, mais baixa se torna a velocidade do vento capaz de desencadear fenômenos aeroelásticos como galope<sup>1</sup> e drapejamento torcional<sup>2</sup>. Soma-se a isso, ainda, o fato de que a tendência atual de construção de prédios com formas e sistemas estruturais mais complexos pode promover a acentuação das excentricidades entre o centro de massa, o centro elástico e o ponto de aplicação instantânea de forças aerodinâmicas, aumentando assim as possibilidades de ocorrer problemas estruturais (Oliveira, 2009).

---

<sup>1</sup>Estruturas ou elementos estruturais leves e flexíveis, com pequeno amortecimento, podem sofrer oscilações causadas pelo fenômeno de instabilidade aerodinâmica denominado de galope. Neste fenômeno a amplitude da oscilação na direção transversal ao vento aumenta com a velocidade deste Blessmann (1998).

<sup>2</sup>Drapejamento torcional pode ser descrito como um fenômeno no qual dois graus de liberdade da estrutura (torção e flexão) se acoplam em uma oscilação instável dirigida pelo escoamento.

Como exemplos de edifícios modernos e muito altos pode-se citar o Edifício Burj Khalifa Bin Zayid. Este é um dos edifícios mais altos do mundo, encontra-se em Dubai, Emirados Árabes Unidos, e tem 828 metros de altura. Sua construção começou em 21 de setembro de 2004 e foi inaugurado oficialmente em 04 de janeiro de 2010. Cita-se também o Centro Comercial Azerbaijan Tower, nas Ilhas Khazer, um arquipélago artificial no Mar Cáspio, no Sudoeste do Azerbaijão, que terá 189 andares e 1.050 metros de altura. A construção será iniciada em 2016 e deve ser finalizada em 2019. O projeto completo será entregue em 2022 pela Empresa Avesta Group (O Globo, 2013).

O ganho de altura dos edifícios trouxe a necessidade de novas considerações no que diz respeito ao cálculo estrutural. Ao contrário de edificações baixas, nas quais os carregamentos verticais são predominantes, nos edifícios altos os carregamentos horizontais devidos à ação do vento devem ser tratados com muito cuidado, pois muitas vezes eles se tornam fatores determinantes no projeto da estrutura.

Segundo Franco (2002), um edifício alto é constantemente solicitado por forças preponderantemente horizontais devidas à ação do vento, forças essas que variam no tempo e que induzem oscilações através de um complexo mecanismo de interação vento-edifício. Normas atuais permitem considerar, para efeito de análise e projeto de estrutura, forças estáticas equivalentes, o que simplifica muito o problema. Porém, mesmo nos casos mais simples, é importante que o engenheiro estrutural tenha sempre em mente o caráter dinâmico daquela interação, ficando atento àqueles casos em que oscilações excessivas possam provocar sensação de desconforto aos usuários, danos a elementos não estruturais, tais como paredes divisórias e, até mesmo, comprometimento da estrutura. Wang *et al.* (1983) citam ainda como problemas a perda e queda de vidros das janelas e distúrbios no funcionamento de elevadores.

Ainda segundo Franco (2002), nos edifícios altos é obrigatória a verificação dos deslocamentos, velocidades e acelerações, comparando os valores obtidos com valores normativos limite. A obtenção destes resultados é parte do campo de estudos da aerodinâmica de estruturas civis.

O registro mais célebre de uma estrutura que entrou em colapso devido à ação do vento foi a “Ponte de Tacoma Narrows”, localizada sobre o Estreito de Tacoma, Washington, Estados Unidos. Esta Ponte ruiu em 7 de Novembro de 1940, poucos

meses após a sua inauguração, devido à ação do vento que atuava com velocidade de aproximadamente  $70\text{km/h}$  na estrutura (Figura 1.1). Casos como este influenciaram os estudos da interação fluido-estrutura. Cita-se no Brasil os efeitos de vibrações induzidas pelo vento na superestrutura metálica da Ponte Rio-Niterói, localizada sobre a Baía de Guanabara, no Estado do Rio de Janeiro. Devido ao seu comportamento aeroelástico, sempre que a velocidade do vento atingia aproximadamente  $50\text{ km/h}$ , a Ponte era fechada como medida de segurança e conforto dos usuários. Em setembro de 2004 foi instalado um sistema de múltiplos atenuadores dinâmicos sincronizados que atenuou essas vibrações (Battista e Pfeil, 2008).



Figura 1.1: Ponte de Tacoma Narrows durante o colapso.

Dentre os possíveis sistemas de controle, aqueles que usam a resposta dinâmica da estrutura para determinar as forças de controle, quando são propriamente executados, têm desempenho razoável. Estes tipos de sistemas de controle requerem várias simulações, pois quando mal projetados e/ou executados, o processo de controle pode tornar-se um excitador da estrutura, o que obviamente não é desejado.

Os fenômenos ocorridos em decorrência da interação fluido-estrutura vêm sendo amplamente pesquisados. Oliveira (2009) estudou a resposta de edifícios altos frente à ação do vento a partir de ensaios em túnel de vento, onde foi desenvolvido uma balança dinâmica de três graus de liberdade para mensuração dos efeitos de flexo-torção. No mesmo sentido, Vanin *et al.* (2012) analisou métodos experimentais para obter a resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento. Braun (2007) também analisou os efeitos da interação fluido-estrutura, porém utilizou, ao contrário de Oliveira (2009) e Vanin *et al.* (2012), métodos computacionais para obter estas informações, através da fluidodinâmica computacional. Pfeil *et al.* (2012), também utilizando simulações numéricas, analisaram o comportamento de edificações flexíveis sob a ação dinâmica do vento turbulento.

Como pode-se observar, o estudo do comportamento de estruturas frente à ação do vento era conduzido através de modelos reduzidos em túnel de vento. Alternativamente, tem sido proposta a utilização de métodos computacionais em fluidodinâmica computacional (CFD - *Computational fluid dynamics*) que tem apresentado resultados promissores.

Paralelamente, as simulações computacionais que avaliam o comportamento de sistemas estruturais controlados também têm ganhado espaço em pesquisas recentes. Algoritmos envolvendo controle ativo de estruturas têm sido desenvolvidos e suas aplicações em estruturas reais vêm sendo objeto de estudo de diversos pesquisadores. Cita-se o trabalho de Moutinho (2012) que realizou ampla análise destes sistemas, demonstrando em seu trabalho alguns sistemas aplicados em estruturas reais e a obtenção de ferramentas da análise e dimensionamento de sistemas de controle ativo. Bueno (2007) fez simulações numéricas e experimentais para realizar controle ativo de vibrações em estruturas mecânicas, sendo analisado, ainda, o posicionamento ótimo de atuadores e sensores. Neto *et al.* (2012) realizaram uma análise numérica comparativa de três sistemas de controle ativo para quatro situações de carregamento na estrutura distintos.

## 1.2 Objetivo

Nesse contexto apresentado, busca-se no presente trabalho desenvolver uma metodologia de análise que considera um modelo computacional na análise da interação fluido-estrutura, na avaliação das forças de excitação conjugada com modelos numéricos que, partindo das forças de excitação e das características dinâmicas da estrutura, forças de controle são calculadas e, desta forma, é possível realizar análises preliminares do desempenho de um sistema estrutural excitado pelo vento e controlado ativamente.

## 1.3 Resumo da metodologia aplicada no trabalho

Para se alcançar o objetivo, a pesquisa foi dividida em duas etapas. A primeira etapa consistiu na análise aerodinâmica bidimensional do modelo da estrutura, ou seja, a estrutura foi mantida em repouso e calculou-se as respostas no tempo dos coeficientes aerodinâmicos e o correspondente valor da frequência de desprendimento de vórtices. Este procedimento permitiu estimar a velocidade crítica do vento que induz vibrações devidas ao desprendimento cadenciado de vórtices.

Na segunda etapa o modelo da estrutura foi excitado utilizando as informações obtidas na primeira etapa do trabalho. Sobre esta estrutura em movimento devido a ação do vento, aplicou-se o sistema de controle das vibrações. A consideração das forças de controle sobre o sistema foi feita por meio de um modelo denominado de modelo acoplado. A proposta desse modelo é descrita a na seção 1.3.1.

### 1.3.1 Modelo adotado

A etapa de modelagem do problema foi feita com o auxílio do programa comercial GID<sup>3</sup> que gerou a entrada para o programa de dinâmica dos fluidos computacional

---

<sup>3</sup>É um pré e pós-processador para simulações numéricas em ciência e engenharia. Ele foi projetado para cobrir todas as necessidades comuns no domínio simulações numéricas do pré para o pós-processamento: modelagem geométrica, definição eficaz de análise de dados, transferência de dados para software de análise, bem como a visualização dos resultados numéricos.

(Hallak, 2002). Como resultado dessas simulações obtiveram-se as forças de interação fluido-estrutura e, conseqüentemente, os respectivos deslocamentos no domínio do tempo. Para a realização da simulação da fluidodinâmica computacional, o modelo CFD apresentado por Hallak (2002) é tomado como referência.

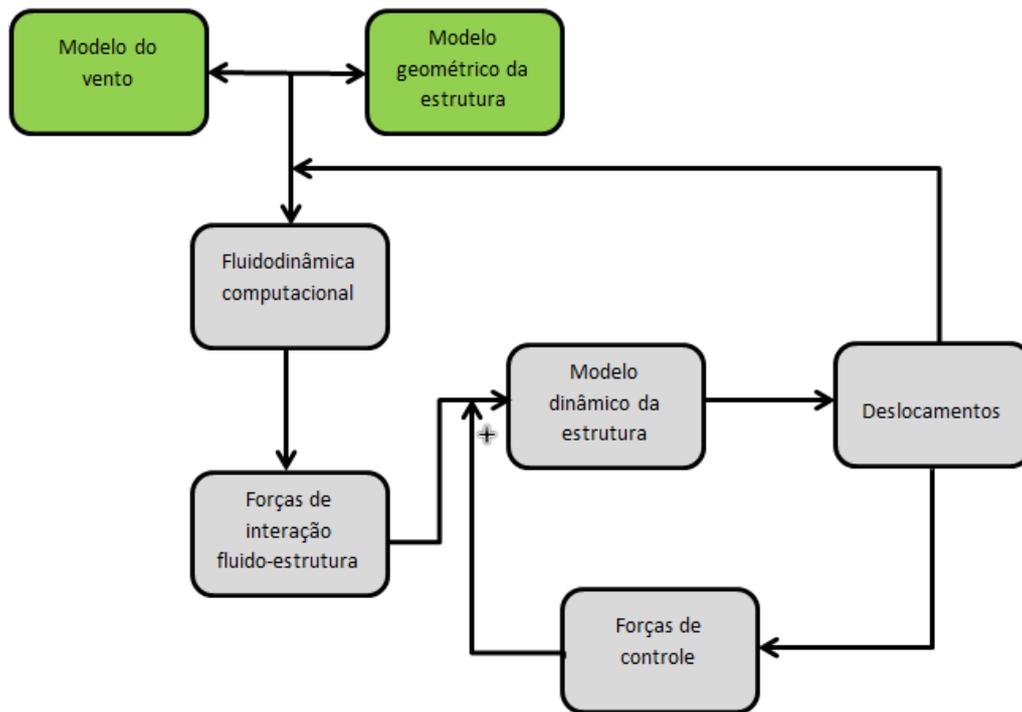


Figura 1.2: Fluxograma do modelo adotado.

Este modelo consiste em realizar as simulações numéricas de interação fluido-estrutura e do sistema de controle adotado em um mesmo algoritmo num processo incremental no domínio do tempo. Ou seja, utilizando as modelagens do vento e geométrico da estrutura, realiza-se a análise numérica da interação fluido-estrutura, resultando em deslocamentos da estrutura em estudo. Com estes deslocamentos, calculam-se as respectivas forças de controle através da teoria de Controle Ótimo. No passo incremental seguinte esta força de controle é aplicada, ao modelo da estrutura, em conjunto com a nova força de interação fluido-estrutura.

No cálculo das forças de controle adota-se a teoria de controle ótimo, onde um funcional quadrático que considera deslocamentos nodais e excitações, uma vez minimizado, resulta em forças de controle otimizados (Barbosa, 2000).

## 1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

### Capítulo 1

Este capítulo apresenta um breve histórico sobre o incremento (crescimento) da altura das estruturas civis, os problemas enfrentados por estas estruturas devido à ação do vento e um método de identificação e atenuação do problema. São expostos, ainda, o objetivo principal deste trabalho e a metodologia empregada.

### Capítulo 2

Este capítulo foi escrito com base nas referências Hallak (2002), Simiu e Scanlan (1978) e Blessmann (1998). Nele apresentam-se os principais fenômenos aeroelásticos decorrentes da interação fluido-estrutura.

### Capítulo 3

Neste capítulo apresenta-se uma visão geral sobre a Dinâmica dos Fluidos Computacional, seu contexto atual e suas principais utilizações. Este capítulo foi escrito com base na referência Braun (2007).

### Capítulo 4

Neste capítulo descrevem-se alguns conceitos básicos da dinâmica estrutural e a teoria do sistema de controle utilizado neste trabalho. A principal referência para este capítulo é Barbosa (1996).

### Capítulo 5

Neste capítulo são apresentados o exemplo de aplicação realizado para análise do método proposto e seus resultados, assim como uma breve discussão sobre esses.

### Capítulo 6

Neste capítulo apresenta-se apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Comportamento de estruturas sob a ação do vento

### 2.1 Introdução

No capítulo 1 desta dissertação foram relatados problemas ocorridos devido à ação do vento em estruturas. Desta forma, fica clara a importância de se conhecer alguns dos fenômenos associados a interação entre essas duas partes, ou seja, entre a força de excitação do vento e o correspondente comportamento estrutural. Em função de suas características dinâmicas, identificam-se dois tipos de estruturas que apresentam comportamentos distintos sob a ação do vento:

- Estruturas que sob a ação do vento não desenvolvem forças de inércia e para as quais o vento atua como uma força quase-estática;
- Estruturas que apresentam oscilações induzidas pelo vento.

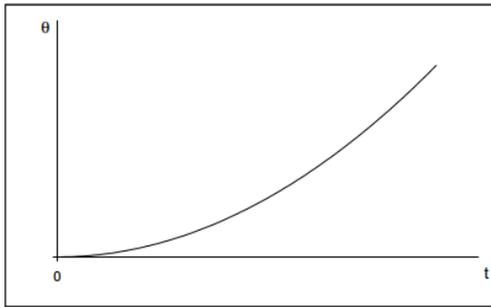
No primeiro caso as forças induzidas pelo vento são consideradas, em projeto, como um carregamento estático equivalente às resultantes de pressão de vento, que dependem da velocidade do vento extrema estimada para um certo período de tempo. A estabilidade aeroelástica deve ser verificada em algumas situações. No segundo caso a ação do vento induz o surgimento de fenômenos aeroelásticos que podem comprometer a integridade estrutural, além de causar o desconforto humano. Dentre

os fenômenos aeroelásticos (estáticos e dinâmicos) observados em estruturas civis citam-se:

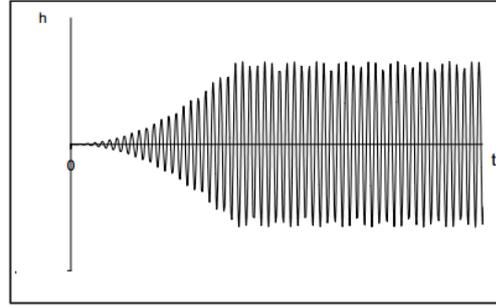
- Divergência torcional - acréscimo quase-estático da rotação de torção de tabuleiro de ponte com ocorrência de instabilidade para uma determinada velocidade de vento crítica.
- Instabilidade aerodinâmica (*flutter*) - oscilações com amplitudes divergentes devidas às forças de vento dependentes do próprio movimento da estrutura, para uma velocidade chamada crítica.
- Vibrações induzidas por desprendimento cadenciado de vórtices - ocorrência de vibração devida à ressonância com o desprendimento de vórtices alternado na esteira do fluxo.
- Vibrações induzidas por turbulência atmosférica - vibração causada pela turbulência natural do vento.

Nas Figuras 2.1 estão apresentados graficamente os comportamentos, em termos de deslocamento  $y$  ou rotação  $\theta$  de um ponto de uma estrutura sujeita aos fenômenos mencionados. A divergência torcional é um fenômeno quase-estático de instabilidade, de certa forma similar à flambagem de uma coluna. Observa-se na Figura 2.1(b) o caráter autolimitante da resposta para vibração por desprendimento de vórtices em contraposição às oscilações divergentes do fenômeno de instabilidade (2.1(c)). A vibração induzida pela turbulência natural do vento da Figura 2.1(d) tem caráter aleatório.

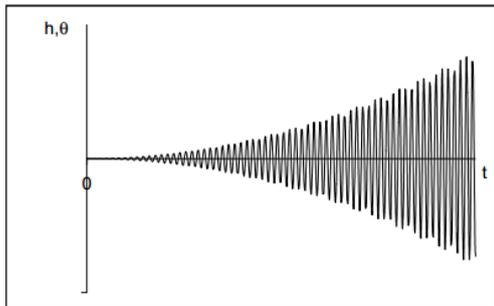
Quando se deseja analisar uma estrutura quanto aos fenômenos de desprendimento de vórtices e turbulência busca-se, ainda na fase de projeto, obter a sua resposta para verificá-la sob critérios de vibrações excessivas. Se o problema é de instabilidade aerodinâmica, deseja-se determinar o valor da velocidade acima da qual se iniciam movimentos divergentes. Caso não seja estabelecida, ainda na fase de projeto, medidas de segurança contra a ocorrência de um desses fenômenos, a introdução de sistemas controladores é uma das alternativas adotadas.



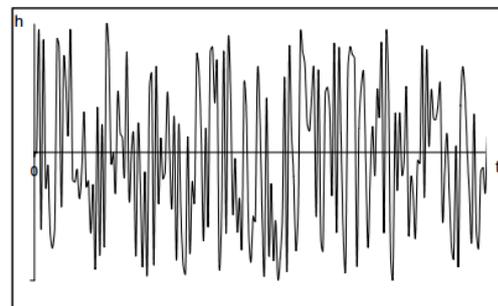
(a) Divergência torcional



(b) Vibrações induzidas por vorticidade



(c) Instabilidade aerodinâmica



(d) Vibrações induzidas por turbulência

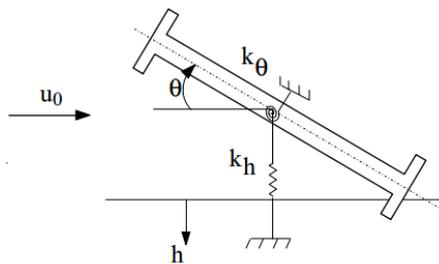


Figura 2.1: Ilustração dos principais fenômenos aeroelásticos, extraído de Hallak (2002)

## 2.2 Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices

A estrutura exemplo deste trabalho foi analisada quando oscila devido ao fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices. Por este motivo, neste item descreve-se detalhadamente este fenômeno, iniciando pela apresentação dos parâmetros adi-

dimensionais necessários para sua compreensão.

### 2.2.1 Parâmetros adimensionais

Para melhor compreensão do fenômeno aeroelástico de vibrações devido ao desprendimento cadenciado de vórtices apresentado nesta seção, são introduzidos neste item as definições de alguns parâmetros adimensionais associados ao fenômeno. A Figura 2.2 ilustra um sistema massa mola amortecido, onde  $u_0$  é a velocidade relativa do vento,  $\rho$  é a massa específica do ar,  $D$  é a dimensão do modelo perpendicular ao escoamento do vento,  $B$  é a largura do modelo,  $m$  é a massa,  $u_0/f$  é o comprimento da onda por ciclo e  $A_y$  é a amplitude do deslocamento.

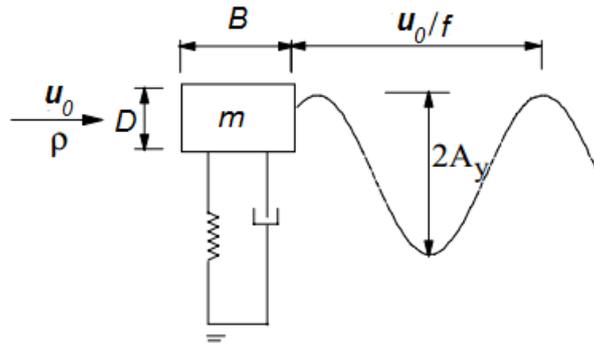


Figura 2.2: Sistema massa mola amortecido, extraído de Blevins (1990).

Com base nessas informações, definem-se:

1. Razão de esbeltez: a esbeltez do corpo pode ser descrita por um parâmetro de esbeltez:

$$\frac{B}{D} = \frac{\text{Largura do corpo}}{\text{Altura do modelo}}. \quad (2.1)$$

2. Velocidade reduzida e amplitude adimensional

$$\text{Velocidade Reduzida } U_r = \frac{u_0}{fD} = \frac{\text{comprimento da onda por ciclo}}{\text{altura do modelo}}, \quad (2.2)$$

$$\text{Amplitude adimensional } \frac{A_y}{D} = \frac{\text{amplitude de vibração}}{\text{altura do modelo}}. \quad (2.3)$$

## 2.2 Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices 12

### 3. Massa adimensional

$$m_r = \frac{m}{\rho D^2} = \frac{\text{massa por unidade de comprimento do modelo}}{\text{massa específica do fluido}}, \quad (2.4)$$

onde  $m$  é a massa estrutural somada à “massa adicional” do fluido deslocada pelo movimento do modelo. No caso de estrutura imersa no fluido ar o efeito da massa adicionada é desprezado.

### 4. Número de Reynolds - $Re$

Em um corpo imerso em um meio fluido em movimento, existe uma fina camada de fluido situada nas proximidades do contorno do corpo denominada *camada limite*. Nesta região os efeitos da viscosidade do fluido se fazem sentir com maior intensidade retardando o seu movimento. A relação entre as forças de inércia e de viscosidade é denominada de número de Reynolds, dado pela expressão:

$$Re = \frac{u_0 D}{\nu} = \frac{\text{força de inércia}}{\text{força viscosa}}, \quad (2.5)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido equivalente à viscosidade absoluta dividida pela massa específica do fluido.

O número de Reynolds ( $Re$ ) fornece a medida da espessura da camada limite e a transição entre escoamentos laminar e turbulento.

### 5. Número de Strouhal

É a frequência adimensional de desprendimento de vórtice e é definido por:

$$St = \frac{f_S D}{u_0}, \quad (2.6)$$

onde  $f_S$  é a frequência de desprendimento de um par de vórtices.

O número de Strouhal depende da forma da seção, do seu acabamento superficial, do número de Reynolds ( $Re$ ) e das características do escoamento.

### 6. Coeficientes de arrasto, sustentação e torção

As forças induzidas pelo vento sobre as estruturas são comumente tratadas através de coeficientes que as relacionam com a pressão dinâmica  $q = 1/2\rho u_0^2$ ,

## 2.2 Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices 13

onde  $\rho$  é a massa específica do ar e  $u_0$  é a velocidade relativa do vento em relação à estrutura.

A Figura 2.3 é uma ilustração bidimensional de um corpo qualquer sujeito à ação do vento. Nesta figura  $\alpha$  é o ângulo de ataque do vento. A força resultante induzida pelo vento sobre o corpo é decomposta nas direções paralela e perpendicular à direção do escoamento, resultando nas seguintes componentes de força generalizada:

$F_D$ : força de arrasto (na direção do vento);

$F_L$ : força de sustentação (na direção perpendicular ao vento);

$M$ : Momento torsor.

Os subíndices D e L têm origem na nomenclatura em inglês das palavras *drag* (arrasto) e *lift* (sustentação).

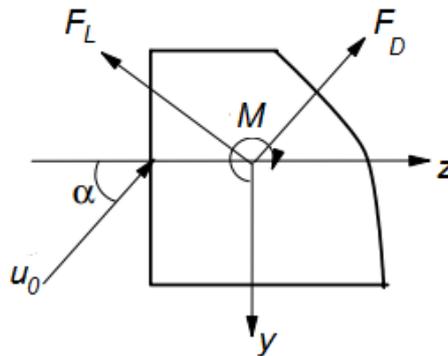


Figura 2.3: Decomposição das forças provocadas pelo vento em um corpo, extraído de Hallak (2002)

Os coeficientes de arrasto  $C_D$ , de sustentação  $C_L$  e de torção  $C_M$  são definidos por:

$$C_D = \frac{F_D}{qA}, \quad (2.7)$$

$$C_L = \frac{F_L}{qA}, \quad (2.8)$$

$$C_M = \frac{M}{qDA}, \quad (2.9)$$

onde  $D$  é uma dimensão característica da estrutura e  $A$  é uma área plana de referência.

Quando estes coeficientes são influenciados pela frequência do movimento, são denominados coeficientes aeroelásticos, tomando-se em geral os seus valores médios.

### 2.2.2 Descrição do fenômeno

Os vórtices são pequenos turbilhões na esteira do fluxo causado pelo deslocamento da camada limite da superfície do corpo e são denominados de esteiras de Kármán, em homenagem ao pesquisador Theodore Von Kármán (1881 - 1963). A Figura 2.4 é uma ilustração deste fenômeno para diversos perfis não aerodinâmicos.

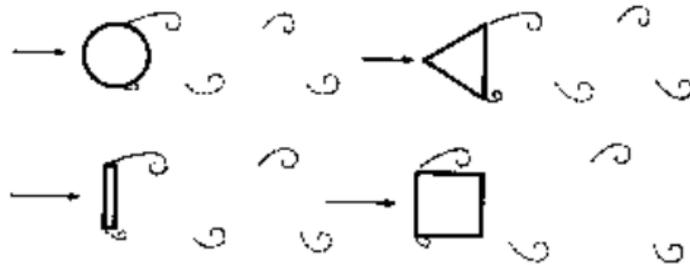


Figura 2.4: Vórtices de Van Kármán, extraído de Blessmann (1998)

A formação do vórtice ocorre quando o gradiente de velocidade dentro da camada limite, associado à geometria do corpo imerso no fluido, promove separação dessa mesma camada limite. Em cilindro é difícil estudar a localização exata do ponto de descolamento, pois este depende de uma série de fatores, tais como: rugosidade do objeto, velocidade do escoamento etc. Para corpos contendo arestas vivas, que é o caso da maioria dos edifícios, a posição do descolamento se dá em uma ou algumas arestas.

Esses vórtices desprendem-se aleatoriamente ou de forma alternada, dependendo do número de Reynolds ( $Re$ ). A frequência de desprendimento de vórtices alternados depende do número adimensional de Strouhal definido por 2.6.

A Figura 2.5 ilustra a formação de vórtices para diferentes números de Reynolds.

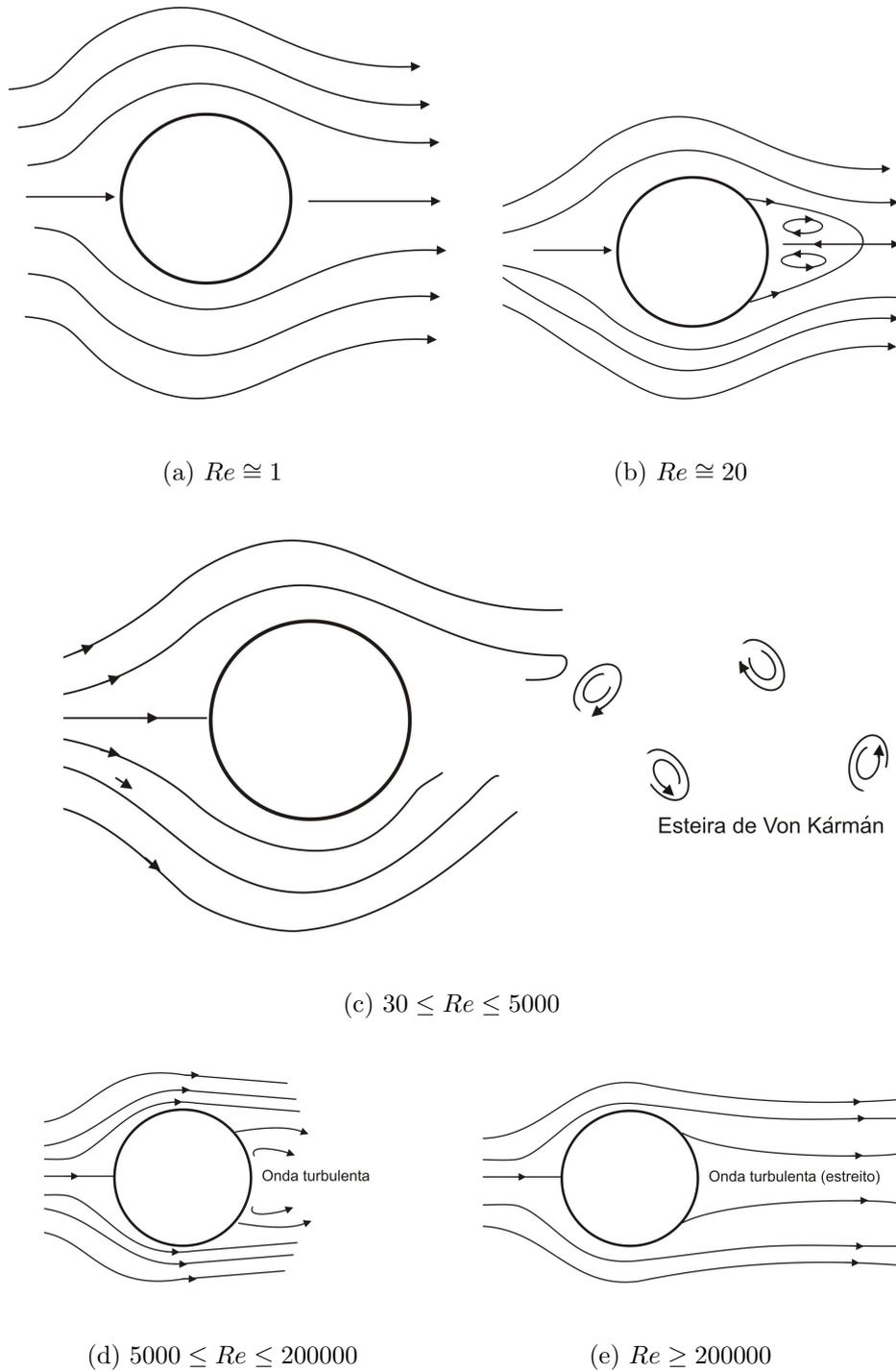


Figura 2.5: Desprendimento cadenciado de vórtices para diferentes números de Reynolds, adaptado de Simiu e Scanlan (1978).

## 2.2 Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices 16

Os vórtices gerados, ilustrados nas Figuras 2.4 e 2.5, originam forças periódicas oblíquas em relação à direção do vento médio. Considerando suas componentes, as forças alternadas na direção vento (forças de arrasto) ocorrem na frequência do desprendimento individual de vórtice ( $2f_s$ ), enquanto que as forças alternadas na direção transversal ao vento (força de sustentação) ocorrem na frequência do desprendimento de cada par de vórtices ( $f_s$ ). As componentes das forças tendem a produzir oscilações nas direções em que agem. Entretanto, a da força na direção do vento, embora possa representar uma importante carga estática, apresenta flutuação pequena em comparação com a força na direção transversal ao vento.

Para corpos flexíveis com amortecimento estrutural reduzido poderá aparecer oscilação transversal considerável sempre que a frequência de desprendimento de um par de vórtices ( $f_s$ ) coincidir ou ficar próxima de uma das frequências naturais da estrutura ( $f_n$ ). Define-se então velocidade crítica como sendo aquela para a qual  $f_s = f_n$  ou seja:

$$U_{crit} = \frac{f_n D}{St}. \quad (2.10)$$

Uma característica deste fenômeno é a chamada captura ou sincronização do desprendimento de vórtice na frequência (*lock-in*) na frequência natural de oscilação da estrutura, que ocorre na faixa de velocidades  $u_o$  para qual as amplitudes de vibração são significativas.

A Figura 2.7, extraída de Blessmann (1998), mostra uma tabela com o número de Strouhal para diversos tipos de seções.

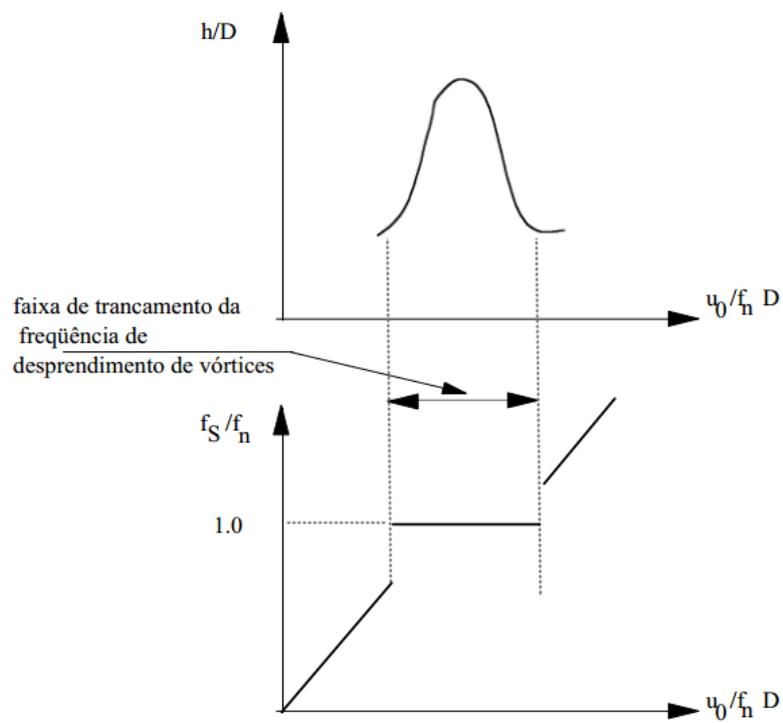


Figura 2.6: Crescimento da amplitude de oscilação e o fenômeno de captura da frequência de desprendimento de vórtices, extraída de Hallak (2002).

2.2 Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices 18

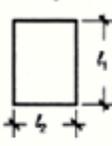
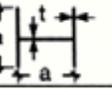
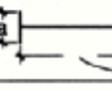
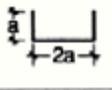
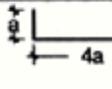
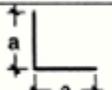
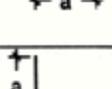
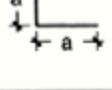
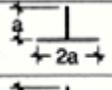
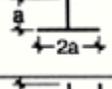
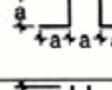
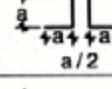
Direção do vento	Forma da secção	$S_f$	
Qualquer	 Círculo $Re = 70\,000 \bar{V} d$ ( $\bar{V}$ sobre 10 min)	$10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^6$ ..... 0,20 $Re \geq 10^6$ ..... 0,28 (interpolando linearmente)	
		 Placa	→ 0,16 ↓ 0,15
→	 Retângulo	$l_1 / l_2 = 0,5$ ..... 0,15 1,0 ..... 0,12 1,5 ..... 0,09 2,0 ..... 0,07 2,5 ..... 0,07 3,0 ..... 0,15 4,0 ..... 0,13 4,5 ..... 0,12	
		 $t = a / 25$	→ 0,12 ↓ 0,14
		 $2a : t = a / 25$ $4a : t \cong a / 8$	↓ 0,14
		 $t = a / 25$	↓ 0,14 ↑ 0,15
		 $t = a / 12,5$	↓ 0,15 ↑ 0,17
		 $t = a / 50$	← 0,15 ↑ 0,14 ↘ 0,15
		 $t = a / 25$	← 0,13 ↑ 0,13 ↘ 0,14
→	 $t = a / 50$	→ 0,16	
→	 $t = a / 25$	→ 0,11	
↑		↑ 0,15	
→	 $t = a / 25$	→ 0,12	
↓		↓ 0,14	
→	 $t = a / 25$	→ 0,14	
↓	 $t = a / 12,5$	↓ 0,15	

Figura 2.7: Número de Strouhal para várias seções transversais (Blessmann, 1998).

## 2.2 Vibrações induzidas pelo desprendimento cadenciado de vórtices 19

A turbulência atmosférica exerce grande influência sobre o desprendimento de vórtices, e, conseqüentemente, sobre a resposta da estrutura. A Figura 2.8 mostra que, em escoamento suave, o pico alto e estreito na frequência reduzida  $f_a/VD = 0,12$  indica desprendimento de vórtices no número de Strouhal previsto para uma seção quadrada. Já em escoamento turbulento, com uma escala de turbulência próxima à largura do cilindro, a contribuição do desprendimento de vórtices para o espectro é drasticamente reduzida, sendo substituída por flutuações aleatórias em uma larga banda de frequências mais altas.

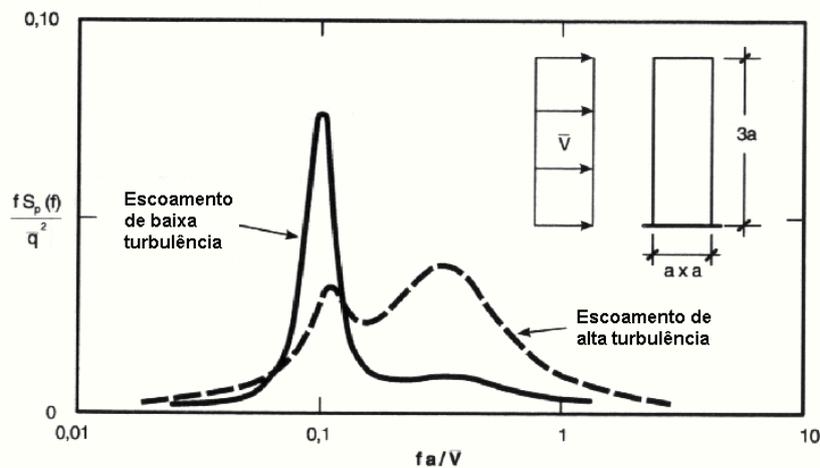


Figura 2.8: Influência da turbulência sobre o espectro de pressões (Blessmann, 1998).

Citam-se aqui como estruturas (edifícios e torres) que apresentaram oscilações oriundas de desprendimento de vórtices. Algumas delas foram atenuadas empregando-se mecanismos para redução de vibrações.

- “*World Trade Center*” em Nova York. Duas torres gêmeas, uma de 415 metros e a outra de 417 metros, foram introduzidos atenuadores com materiais visco-elásticos
- “*Citicorp Centre*” em Nova York. Foi utilizado um sistema absorvedor de massa auxiliar para atenuar as oscilações. Esse sistema constitui-se um mecanismo de dissipação de energia e consiste em um sistema vibratório secundário ligado à estrutura. Neste caso uma massa de concreto de 373.000 kg foi colocada na parte superior do edifício ligada à estrutura por um sistema mola-amortecedor.

- “Torre CN”, em Toronto, Canadá. Esta é uma torre mista com 553 metros de altura. Seu topo é um mastro de aço, de 102 metros de altura e 290 toneladas, com antenas de rádio e TV apoiado em concreto armado. As vibrações foram atenuadas empregando-se um dispositivo de massa auxiliar similar ao utilizado no *Citicorp Center*.

Como exemplo de edifício que foi construído com um sistema de controle, cita-se o edifício Taipei 101, com 101 andares, localizado em Taipei, Taiwan. O edifício foi projetado para ser construído com um sistema de controle de vibrações, sendo implantado um pêndulo de 660 toneladas instalado entre o 87º e o 92º andar, o qual é controlado eletronicamente para compensar as oscilações causadas pelo vento ou por tremores. Com o uso deste sistema de controle de vibrações, os projetistas do edifício afirmaram que o prédio é capaz de suportar terremotos de até 7 graus na escala Richter e ventos de mais de 450 *km/h*, pois o absorvedor reduz em 60% os efeitos dos tremores na estrutura.

## 2.3 Ferramentas para Análise Aeroelástica

O comportamento das estruturas sujeitas aos fenômenos aeroelásticos pode ser analisado através de ensaios experimentais de modelos reduzidos em túnel de vento ou a partir de modelos simplificados, lineares ou não lineares, de um, dois ou mais graus de liberdade generalizados, na forma:

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = F(x, \dot{x}, y, \dot{y}, \theta, \dot{\theta}),$$

$$m\ddot{q} + c_y\dot{q} + k_y y = F(x, \dot{x}, q, \dot{q}, \theta, \dot{\theta}),$$

$$I_\theta\ddot{\theta} + c_\theta\dot{\theta} + k_\theta\theta = M(q, \dot{q}, \theta, \dot{\theta}),$$

onde  $x$ ,  $y$  e  $\theta$  representam, respectivamente, as amplitudes de deslocamento associadas a modos de flexão lateral, flexão vertical e torção;  $m$  e  $I_\theta$  são a massa e o momento de inércia de massa, respectivamente,  $c$  é o amortecimento e  $k$  é a rigidez.

Nestes modelos as forças generalizadas podem depender ou não do movimento da estrutura e são funções da velocidade do vento  $u_0$  e da massa específica do ar  $\rho$ .

No caso de fenômenos auto-excitados como instabilidade dinâmica (*flutter*) e vibração por desprendimento de vórtices, os coeficientes das variáveis de movimento ( $x, \dot{x}, q, \dot{q}, \theta, \dot{\theta}$ ) são denominados coeficientes aeroelásticos, pois dependem da frequência de oscilação. Quando as forças devidas ao vento não dependem do movimento da estrutura os coeficientes são denominados aerodinâmicos.

Os coeficientes aeroelásticos são tradicionalmente obtidos a partir de ensaios em túnel de vento de modelos reduzidos.

Alternativamente, tem sido proposta a utilização de técnicas recentes em fluidodinâmica computacional ou mecânica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*), para a determinação dos mencionados coeficientes aerodinâmicos e aeroelásticos. Este estudo enquadra-se na chamada engenharia de vento computacional (CWE - *Computational Wind Engineering*), derivada de métodos numéricos usuais de outros campos da mecânica dos fluidos.

De uma forma geral, neste campo de estudo, inúmeras são as possibilidades de situações que se pode analisar e diversos são os tratamentos e os procedimentos utilizados, que compreendem, desde a modelagem física até as técnicas numéricas.

No trabalho de Hallak (2002) a análise numérica adotou uma abordagem abrangendo questões relevantes tais como o caráter incompressível do escoamento e os diferentes conjuntos de variáveis dependentes utilizados para escrever as equações governantes de Navier-Stokes. Quando a descrição adotada utiliza as variáveis primitivas de velocidade e pressão, por exemplo, surgem outras questões numéricas relevantes: a discretização de problemas fortemente convectivos e incompatibilidade entre as interpolações do campo de velocidade e pressão. Neste contexto, o uso dos chamados métodos estabilizados, como os propostos por Hughes *et al.* (1986), são de fundamental importância para a obtenção de soluções estáveis.

# Capítulo 3

## Fluidodinâmica Computacional

Neste capítulo serão apresentados um breve histórico da fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), suas principais aplicações, seu estágio atual de desenvolvimento na comunidade científica e uma visão geral da técnica utilizada no algoritmo CFD desenvolvido por De Sampaio *et al.* (2004).

### 3.1 Aspectos Gerais

Até pouco tempo atrás, os fenômenos de interação fluido-estrutura eram analisados somente em técnicas experimentais em túnel de vento. Atualmente utilizam-se também recursos da Fluidodinâmica Computacional (CFD) para tratar os problemas clássicos da Engenharia do Vento. Este é um campo de pesquisa relativamente recente, cujo início se deu em meados da década de 1980, e o seu rápido crescimento na comunidade científica ocorreu, principalmente, em virtude de significativas melhoras nos modelos numéricos e do avanço na tecnologia dos computadores. Além disso, as dificuldades inerentes aos ensaios realizados em túneis de vento, tais como os altos custos, o tempo de análise e a impossibilidade de se estudar um número maior de problemas e com uma maior variabilidade de parâmetros também contribuíram para um maior crescimento na demanda por técnicas numéricas de análise (Braun, 2007).

Braun (2007) cita ainda que a Fluidodinâmica Computacional pode ser definida como o resultado do processo evolutivo na forma de abordagem dos problemas da Engenharia do Vento, a qual foi construída a partir das técnicas experimentais desenvolvidas nos túneis de vento. Através da abordagem computacional, as análises passam a ser feitas empregando-se técnicas numéricas de solução para as equações de conservação de quantidade de movimento e de massa, as quais regem o comportamento de fluidos em movimento e de estruturas imersas deformáveis. Consequentemente, a maioria das áreas de aplicação desenvolvidas pela Engenharia do Vento pode ser analisada no ambiente computacional.

Segundo Simiu e Scanlan (1996), a principal tarefa da Engenharia do Vento é fornecer informações a respeito da performance estrutural e das condições ambientais no entorno de estruturas sujeitas à ação do vento. Neste contexto, a Engenharia do Vento pode ser dividida em três grandes subáreas de aplicação: avaliação das condições ambientais devidas à circulação de vento, determinação das forças induzidas pelo vento sobre estruturas e resposta estrutural sob ação do vento. Sendo as duas últimas de interesse deste trabalho.

## 3.2 Principais Aplicações

Com o avanço dos computadores aliados aos métodos numéricos que possibilitam resultados cada vez mais fiéis à realidade, a CFD vem apresentando ampla aplicação em diferentes áreas do conhecimento científico. Braun (2007) cita como áreas de aplicações:

- Circulação do fluxo sanguíneo em artérias;
- Aerodinâmica de paraquedas e aerofólios; e
- Instabilidade aeroelástica que ocorrem em pontes, edifícios, torres, linhas de transmissão de energia e em asas de avião.

Braun (2007) cita ainda que a demanda por algoritmos desenvolvidos a partir de técnicas numéricas deve-se ao fato de modelos experimentais e semi-empíricos

baseados em dados obtidos em ensaios em túnel de vento possuir severas limitações e dispêndio de tempo e dinheiro envolvidos nos experimentos.

As ilustrações da Figura 3.1 demonstram aplicação da CFD em diferentes áreas de aplicação. As Figuras 3.1(a) e 3.1(b) ilustram uma aplicação 2D de um projétil percorrendo em um tubo. As Figuras 3.1(c) e 3.1(d) ilustram uma aplicação em 3D de fluido-estrutura, de um barco em um canal. As Figuras 3.1(e) e 3.1(f) tem-se também uma aplicação 3D de interação fluido-estrutura, neste caso a saída de água por um tubo, tendo uma cortina como anteparo e um prisma retangular para depósito.

### 3.3 Cenário Atual

Segundo McAlpine (2004), atualmente a CFD pode fornecer resultados quase tão precisos como um túnel de vento, sendo muitas vezes mais útil devido à visualização sofisticada e medidas de amplo domínio característicos de CFD. A CFD pode, também, ser usada para ajudar engenheiros com projeto de ventilação natural e carregamento de vento em edifícios.

McAlpine (2004) realizou uma comparação entre CFD e túnel de vento, sendo suas principais ponderações encontradas nos itens que seguem:

1. Modelagem de túnel de vento é geralmente aceita nas comunidades científica e de engenharia.
2. A Fluidodinâmica Computacional é uma ferramenta comprovada que era economicamente viável apenas em computadores *mainframe*, porém com os recentes avanços na computação tornou-se possível usar um PC desktop. No entanto, os resultados de CFD podem não ser tão abrangente comparados aos resultados no mundo real, como a maioria dos resultados do túnel de vento pode ser.
3. Muitos resultados de CFD que eram criticados por acadêmicos como insuficientemente exato, são muitas vezes bastante satisfatórios para fins de engenharia, porque o grau de erro está dentro de limites razoáveis.

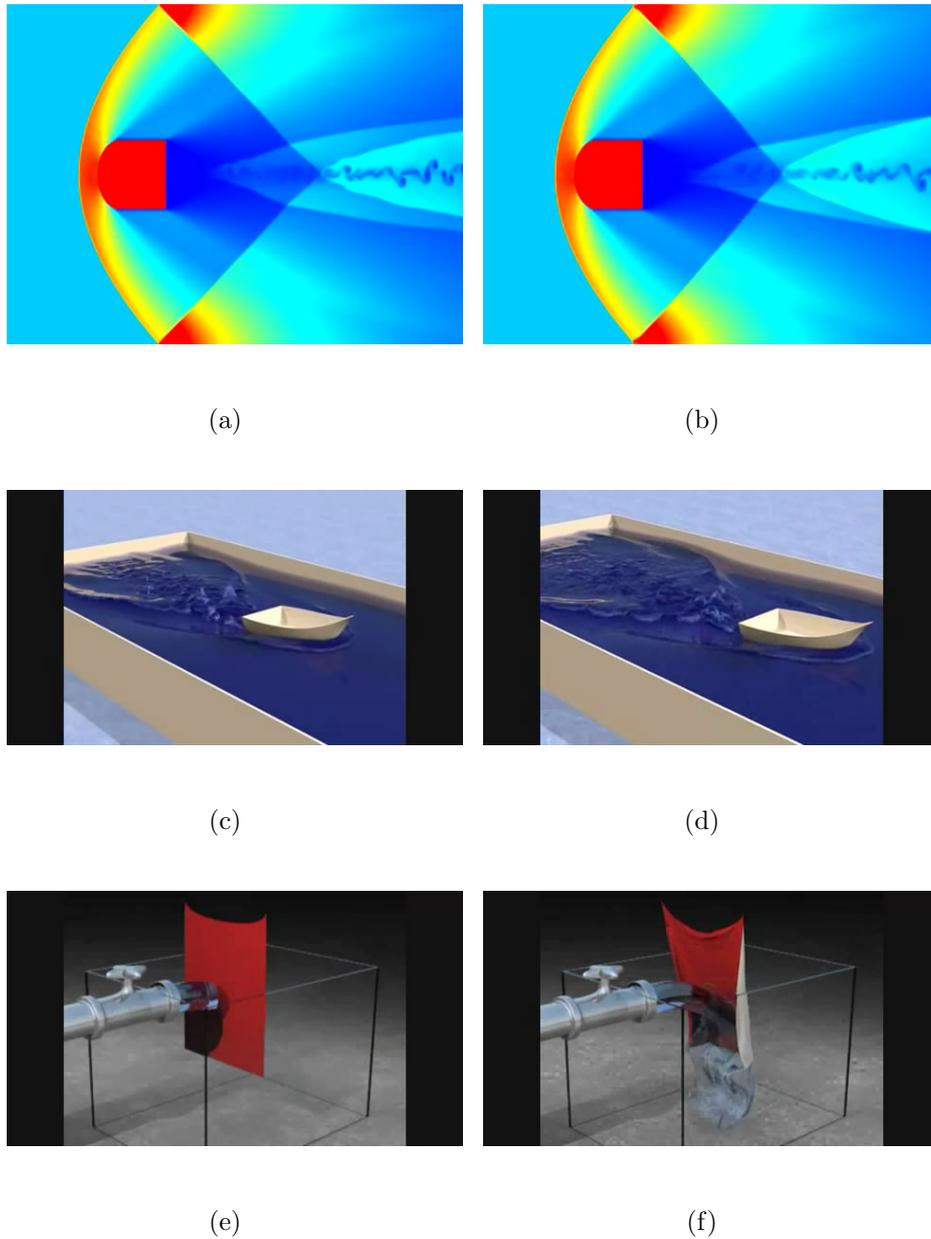


Figura 3.1: Ilustrações de utilizações da CFD em diferentes áreas de aplicação (Fonte: Figuras 3.1(a) e 3.1(b): (Owen, 2013); Figuras 3.1(c) a 3.1(f): (Dodd, 2013).

### 3.4 Simulação numérica de interação fluido-estrutura

Em consonância com a tendência de utilização de métodos computacionais para análise de fenômenos aerodinâmicos e aeroelásticos em estruturas, este trabalho aplica a CFD para a análise de estruturas esbeltas do tipo torres altas. Todavia, na utilização da CFD para estruturas civis, um dos principais desafios diz respeito à

modelagem numérica da turbulência. Isto porque o número de Reynolds, parâmetro aerodinâmico adimensional que define a transição entre escoamentos laminares e turbulentos, normalmente atinge valores elevados. Dentre os caminhos para a modelagem da turbulência do vento destaca-se a chamada simulação das grandes escalas (*LES - Large Eddy Simulation*), adotada na pesquisa. Nesta, as equações de Navier Stokes são filtradas e as escalas maiores são resolvidas pela discretização do modelo, enquanto as pequenas, não resolvíveis, são modeladas por meio de uma formulação estabilizada em elementos finitos e técnicas adaptativas no espaço e no tempo.

Outra preocupação diz respeito ao movimento relativo da estrutura, onde as equações de movimento estão descritas no referencial Lagrangiano, em relação ao fluido, em que as equações de equilíbrio, que são as de Navier Stokes, estão descritas no referencial Euleriano. Para compatibilizar os movimentos do fluido e da estrutura adota-se, portanto, um referencial misto conhecido como referencial lagrangiano-euleriano arbitrário (*ALE - Arbitrary Lagrangian-Eulerian*).

Em resumo, as técnicas computacionais em CFD consistem em discretizar as equações de Navier Stokes. O problema é definido em um domínio  $\Omega$  com contorno  $\Gamma$  contendo  $nde$  dimensões no espaço Euclidiano. Na forma não conservativa, ou seja, utilizando as variáveis primitivas de pressão e velocidade, usando a convenção do somatório  $a = 1, \dots, nde$  e  $b = 1, \dots, nde$ . e no referencial ALE, essas equações assumem a forma:

- Equação de conservação de quantidade de movimento:

$$\rho \left[ \frac{\partial u_a}{\partial t} + (u_b) \frac{\partial u_a}{\partial x_b} \right] - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = f_a, \quad (3.1)$$

- Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho u_a}{\partial x_a} = 0. \quad (3.2)$$

Nestas equações a tensão viscosa é  $\tau_{ab} = \mu(\partial u_a / \partial x_b + \partial u_b / \partial x_a)$ , a densidade do fluido é indicada por  $\rho$  e as variáveis dependentes são os campos de velocidade  $u$  e pressão  $p$ .

Na Equação 3.1 o termo entre colchetes é a derivada total de  $u_a$  em relação ao tempo. Introduzindo a velocidade  $w_b$ , esta equação pode ser escrita como:

$$\frac{\partial u_a}{\partial t} + (u_b) \frac{\partial u_a}{\partial x_b} = \frac{du_a}{dt} + (u_b - w_b) \frac{\partial u_a}{\partial x_b}, \quad (3.3)$$

que leva para a equação no referencial ALE na seguinte forma:

$$\rho \left[ \frac{du_a}{dt} + (u_b - w_b) \frac{\partial u_a}{\partial x_b} \right] - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = f_a. \quad (3.4)$$

A velocidade  $\mathbf{v} = \mathbf{u} - \mathbf{w}$  é a velocidade convectiva aparente, onde  $\mathbf{w}$  é a velocidade de referência do observador. A derivada no tempo da Equação 3.1 é a derivada no tempo vista por este observador que se move com esta velocidade  $\mathbf{w}$ . A velocidade  $\mathbf{w}$  é definida convenientemente com o objetivo de ajustar a transição entre o referencial Euliano, distante do corpo em movimento e onde  $\mathbf{w} = \mathbf{0}$ , e o Lagrangiano, na superfície do corpo onde  $\mathbf{w} = \mathbf{u}$ . O fluido, devido ao efeito da viscosidade, é aderente a superfície do corpo onde a velocidade é nula.

Utilizando coordenadas bidimensionais com  $u_1 = u$ ,  $u_2 = v$  e  $x_2 = y$  a Equação 3.1 terá a forma:

$$\rho \left[ \frac{du}{dt} + (u - w_x) \frac{\partial u}{\partial x} + (v - w_y) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = f_x, \quad (3.5)$$

$$\rho \left[ \frac{dv}{dt} + (u - w_x) \frac{\partial v}{\partial x} + (v - w_y) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = f_y. \quad (3.6)$$

A estrutura exposta ao fluxo é livre para mover-se na direção vertical  $y$ , mas o seu movimento é restringido na direção  $x$ . A rotação é também restringida. Assim, a estrutura é de um grau de liberdade, na equação de movimento é descrita como:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + c \frac{dh}{dt} + kh = F_L, \quad (3.7)$$

onde  $m$ ,  $c$  e  $k$  são a massa, coeficientes de amortecimento e rigidez por unidade de comprimento, respectivamente, e  $h$  é o deslocamento vertical. A força  $F_L$  representa a componente de força resultante do fluido sobre a superfície do corpo na direção transversal ao vento  $y$  e é responsável pela ligação dinâmica entre o fluido e o corpo

rígido em movimento. Esta força é calculada a partir da integração da tensão de viscosidade e componentes de pressão, obtidas do fluido, ao longo da superfície do corpo na direção vertical principal:

$$F_L = - \int_{\Gamma_C} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) n_x + 2\mu \frac{\partial v}{\partial x} n_x - p n_y \right] d\Gamma, \quad (3.8)$$

onde  $\mathbf{n}$  é o vetor normal unitário na interface fluido-sólido (apontando do fluido ao sólido).

Para a descrição ALE do problema de interação fluido-estrutura adotou-se a proposta apresentada por Nomura e Hughes (1992), que define uma região externa Euleriana para o fluido longe da estrutura, uma região de transição, entre a região Euleriana e a estrutura, descrita no referencial ALE, e uma descrição Lagrangiana na interface fluido-sólido. Estas regiões estão representados na Figura 3.2

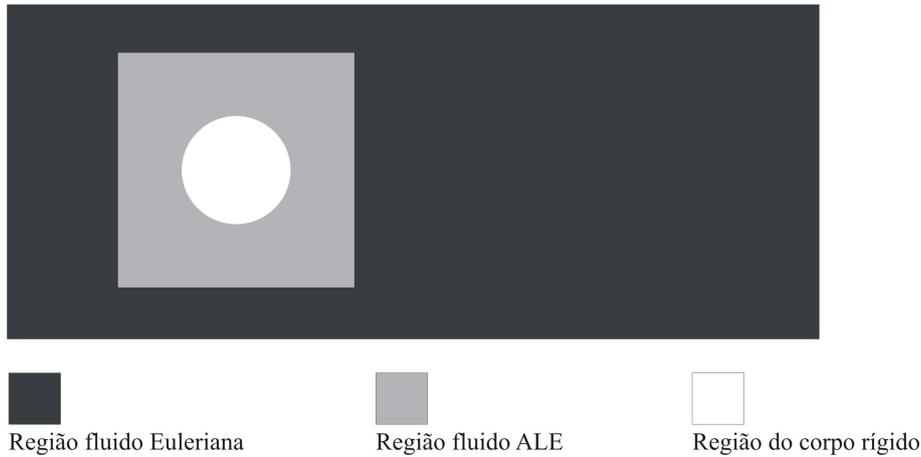


Figura 3.2: Divisão do problema no domínio em Euleriana, ALE e região do corpo rígido.

Vale a pena notar que a velocidade da malha deve variar entre zero, na região Euleriana, e a velocidade da estrutura na interface fluido-sólido. Aqui, no entanto, por causa de uma estratégia de remalhagem baseada no refinamento de uma malha grossa do fundo, não só a malha corrente computacional deve ser deslocada, mas também a malha de plano de fundo que será utilizada para remalhagem. O algoritmo de Laplace é usado em ambos os casos para determinar uma transição suave e gradual de velocidade de malha (e posição).

As equações de Navier-Stokes 3.1 e 3.2 são discretizadas de acordo com a formu-

lação estabilizada de elementos finitos de De Sampaio *et al.* (2004). A derivação é apenas esboçada aqui e o leitor é remetido para a obra original para mais detalhes.

A formulação é obtida a partir da minimização de mínimos quadrados da equação de conservação da quantidade de movimento em relação à velocidade e à pressão. Na simulação bidimensional (2D), elementos triangulares foram utilizados para aproximar os campos de velocidade e de pressão. Uma equação de continuidade-pressão, aplicando o balanço de massa, é obtida combinando a aproximação Galerkin padrão da equação de continuidade com a minimização do impulso quadrado residual em relação aos graus de liberdade de pressão. Esta tem a forma de uma equação de Poisson que evita as limitações associadas com a condição de estabilidade Babuska-Brezzi, permitindo o uso de interpolação de ordem igual para velocidade e pressão na formulação.

Considerando-se que os campos discretizados são escritos em termos de funções de forma, o método tem a forma de uma aproximação residual ponderada de Petrov-Galerkin da equação de movimento, utilizando a velocidade aparente convectiva  $\mathbf{v} = \mathbf{u} - \mathbf{w}$  (De Sampaio e Coutinho, 1999).

O avanço de tempo segue um esquema segregado. A pressão é calculada primeiramente, e, em seguida, os novos componentes de velocidade são atualizados.

### 3.4.1 Fluxograma do programa

O algoritmo foi desenvolvido por De Sampaio *et al.* (2004) para solução das equações de Navier-Stokes para problemas transientes, incompressíveis e bidimensionais. Este programa utiliza o procedimento LES com modelo de submalha implícito numericamente para simulação dos escoamentos turbulentos, e uma formulação estabilizada de Petrov-Garlekin com elementos triangulares para interpolar os campos de velocidade e pressão. O tamanho mínimo dos elementos é definido, *a priori* por razões de economia de recurso computacional.

A seguir apresenta-se o fluxograma da implementação computacional dos procedimentos para interação fluido-estrutura, este desenvolvido por Hallak (2002).

1. Dados de entrada:

- a) fluido: propriedades físicas, malha inicial, tamanhos máximos e mínimo dos elementos, parâmetros de qualidade da análise, condições iniciais; e
- b) estrutura: rigidez, amortecimento e massa.
2. Cálculo do passo de tempo  $\Delta t$  da malha atual, utilizando o correspondente valor do número de Reynolds ( $Re$ );
  3. Cálculo do novo instante de tempo da análise;
  4. Solução do problema de dinâmica do corpo, pelo método Runge-kutta. As forças a serem consideradas são provenientes do fluido e calculadas no passo de tempo anterior. Desta solução obtém-se os deslocamentos e as velocidades do corpo, a serem utilizados na solução dinâmica do fluido;
  5. Cálculo dos deslocamentos e velocidade da malha na região  $\Omega_{ALE}(t)$  resolvendo o problema de Laplace;
  6. Atualização das coordenadas da malha e do vetor velocidade;
  7. Solução das equações de Navier-Stokes na malha atual;
  8. Cálculo das forças que serão utilizadas no passo 4 para o próximo instante de tempo;
  9. Estimativa de erro e refinamento da malha;
  10. Se o tempo de processamento exceder o tempo exigido da análise  $\mapsto$  FIM;
  11. Caso contrário  $\mapsto$  retorna ao passo 2.

# Capítulo 4

## Dinâmica e Sistemas de Controle de Vibrações

Um sistema estrutural dinâmico é caracterizado pela própria estrutura e pelas forças dinâmicas que sobre ela atuam. Uma vez solicitado, o sistema mostra uma resposta que é descrita pelas acelerações, velocidades e deslocamento dos seus pontos característicos.

Dependendo de suas características geométricas e propriedades mecânicas de seus componentes, bem como das propriedades físicas dos materiais que o compõem, um sistema estrutural pode apresentar comportamento linear ou não-linear.

Um sistema tem comportamento dito linear quando é válido o princípio da superposição dos efeitos, ou seja: o sistema é linear se para uma excitação  $f_e(t) = f_{e1}(t) + f_{e2}(t) + \dots + f_{eN}(t)$ , a resposta do sistema é dada por  $q(t) = q_1(t) + q_2(t) + \dots + q_N(t)$ , onde  $t$  é a variável que descreve o tempo,  $f_e(t)$  é a força de excitação atuante na estrutura,  $q(t)$  a variável característica que descreve o estado ou resposta do sistema, sendo  $q_i(t)$  a resposta para  $f_i(t)$

## 4.1 Modelagem do sistema estrutural dinâmico

A modelagem de um sistema estrutural, em muitos casos, requer modelos refinados com muitos graus de liberdade. Entretanto, em problemas onde existe o predomínio de uma certa frequência de vibração, modelos simplificados com apenas um grau de liberdade generalizado (1GL) podem fornecer resultados interessantes com um baixo custo computacional.

No presente trabalho adota-se um modelo estrutural com um grau de liberdade generalizado para se analisar os algoritmos de controle. Esta estratégia visa reduzir o esforço computacional das simulações numéricas, entretanto, é necessário estar atento aos casos onde a resposta dinâmica de uma estrutura depende de mais de um grau de liberdade generalizado.

O comportamento de um sistema estrutural sujeito à ação de uma fonte de excitação externa com oscilações pode ser descrito por 3 propriedades físicas: a massa do sistema, a perda de energia mecânica ou amortecimento e sua rigidez, podendo resultar num modelo de 1GL mostrado na Figura 4.1

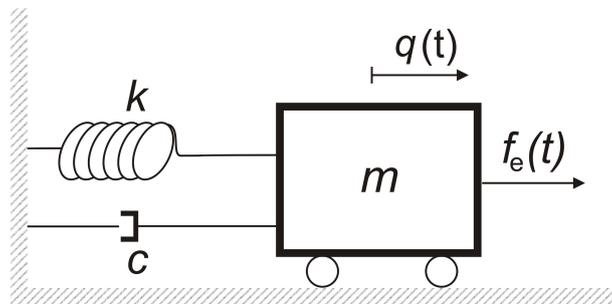


Figura 4.1: Modelo do sistema massa-mola-amortecedor para 1GL.

Neste caso, a Equação que representa a equação de movimento de um sistema dinâmico linear de 1GL com amortecimento viscoso é escrita como:

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = f(t), \quad (4.1)$$

onde  $t$  é o tempo,  $q(t)$  é a resposta do sistema em termos de deslocamentos,  $\ddot{q}$  é a aceleração,  $\dot{q}$  é a velocidade,  $m, c, k$  são, respectivamente, propriedades físicas da estrutura (massa, coeficiente de amortecimento e constante de rigidez) e  $f$  são as forças resultantes aplicadas na estrutura.

A equação 4.1 pode ser reescrita através de duas equações diferenciais de primeira ordem, chamadas de equações de estado. A essa representação, mostrada na equação 4.2, dá-se o nome de espaço de estados.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad (4.2)$$

onde:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix};$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m^{-1}k & -m^{-1}c \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u}(t) = f(t).$$

Tradicionalmente os algoritmos de controle são implementados no espaço de estados. Este procedimento facilita a implementação computacional, pois reduz a ordem das equações diferenciais além de tornar mais compactas a escrita das equações que regem o comportamento de sistemas controlados.

## 4.2 Sistemas de Controle

A equação diferencial que descreve a resposta do sistema estrutural controlado é obtida a partir da Equação 4.2 através da consideração de que as forças que agora atuam na estrutura são  $f_e(t)$  (força de excitação) e  $f_c(t)$  (resultante das forças de controle).

Pode-se dividir os sistemas de controle em três grupos:

- Sistema de Controle Passivo (SCP);
- Sistema de Controle Ativo (SCA); e
- Sistema de Controle Ativo/Passivo (SPC/A).

Neste trabalho foi utilizado Sistema de Controle Ativo. Neste tipo de sistema as forças de controle são introduzidas por meio de atuadores tais como macaco hidráulico, motor elétrico, etc, que dependem de uma fonte de energia externa. Muitas estruturas fazem uso de controladores ativos para solucionar problemas dinâmicos. A maioria delas está localizada no Japão, como o Edifício Kyobashi Seiwa (Jr. e Sain, 1997) e a Ponte Rainbow (Tanida, 2002), ambos situados em Tóquio.

Na maioria das vezes o sistema de controle ativo usado em estruturas é de malha fechada, como neste presente trabalho, onde a força de controle  $f_c(t)$  é função direta das amplitudes de resposta do sistema estrutural. A força de controle é função da diferença entre um sinal de referência  $r(t)$ , resposta desejada, e a resposta real  $q(t)$ , ou seja:  $f_c(t) = f_c[r(t) - q(t)]$ , conforme representado na Figura 4.2.

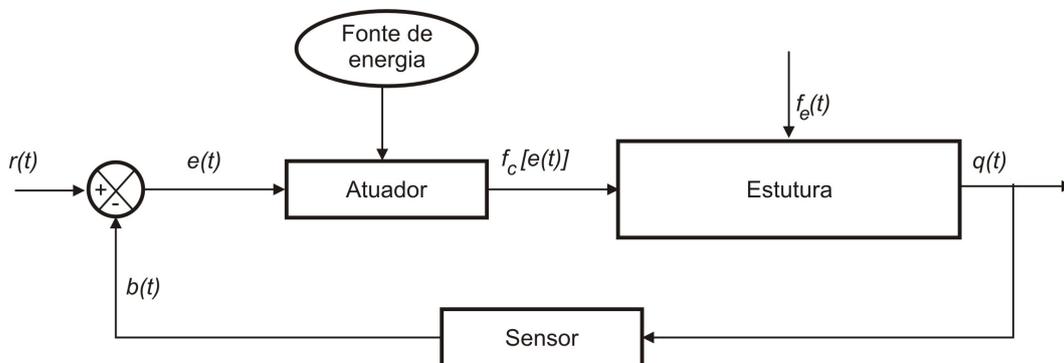


Figura 4.2: Esquema de Controle Ativo de Malha Fechada, adaptado de Barbosa (1996).

O SCA com Malha Fechada possui as seguintes características:

- a estrutura necessita ser sensoriada para obtenção do sinal de sua resposta real;
- a força de controle é calibrada automaticamente, pois o sensoriamento da estrutura permite a reanálise da medida de erro dada por  $e(t) = r(t) - b(t)$ , onde  $b(t)$  é o sinal sensoriado da estrutura, a cada instante de tempo; e

- também como no SCA com Malha Aberta, a resposta desejada  $r(t)$  é programada em função dos níveis de deslocamentos, velocidades e acelerações desejáveis.

O SCA com Malha Fechada também conhecido como Sistema de Controle com Realimentação é capaz de compensar:

- possíveis perturbações ou distúrbios na força de excitação; e
- incertezas inerentes às propriedades e características dinâmicas da estrutura, bem como nas medidas dos sensores e atuadores.

Na literatura é possível identificar diversos algoritmos usados para determinação de forças de controle. Dentre eles pode-se destacar o PID<sup>1</sup>, via Alocação de Pólos<sup>2</sup> e Controle Ótimo.

Adotou-se neste trabalho o algoritmo de controle denominado Controle Ótimo, uma vez que os resultados para este algoritmo observados na literatura têm-se apresentado sempre competitivos (Neto *et al.*, 2012).

## 4.3 Controle Ótimo

O desempenho de um sistema de controle dinâmico é medido segundo alguns critérios de segurança ligados às amplitudes de resposta em termos de deslocamentos; conforto do usuário, relacionados com as amplitudes de velocidade e/ou acelerações; e praticidade, referente a limitações econômicas e/ou físicas na concepção do sistema de controle. Conceitua-se então um controle ótimo como sendo: “A determinação de um controle admissível ( $f_c$ ) que leve o sistema a um estado desejado  $\bar{x}(t)$  e que minimize uma certa medida de desempenho” (Meirovitch, 1990).

---

<sup>1</sup>O controle do tipo proporcional-integral-derivativo, mais conhecido pelas suas iniciais PID, resulta da conjugação simultânea dos três tipos básicos de ações de controle Proporcional, de controle Integral e de controle Derivativo (Ogata, 2003).

<sup>2</sup>Esta técnica de controle denominada alocação de pólos, simplificada, permite que seja escolhida a dinâmica de operação do sistema desejado através da realimentação de estados, quando o sistema é totalmente controlável (Ogata, 2003).

A determinação da força de controle ótimo, neste caso, é feita tomando-se como medidas de desempenho as amplitudes dos estados e da própria força de controle atuante em um sistema ativo de malha fechada. A minimização das amplitudes dos estados em um período de tempo compreendido entre  $t_0$  e  $t_f$  pode ser feita tomando-se um funcional quadrático que inclui a parcela relativa às forças de controle como o escrito na Equação 4.3.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{x}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{f}_c^T(t)\mathbf{R}\mathbf{f}_c(t)]dt, \quad (4.3)$$

onde  $J$  é o funcional a ser minimizado através da determinação da função  $\mathbf{f}_c(t)$ ;  $\mathbf{Q}$  e  $\mathbf{R}$  são matrizes de ponderação com dimensão  $(2n, 2n)$  e  $(n, n)$ , respectivamente, sendo  $n$  o número de graus de liberdade do sistema.

Para a minimização do funcional  $J$  é necessário obter a matriz ( $\mathbf{P}$ ), que é a solução da Equação Matricial de Riccati dada por:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}. \quad (4.4)$$

Após determinar a Matriz de Riccati ( $\mathbf{P}$ ), com dimensão  $(2n, 2n)$ , pode-se determinar a Matriz de Ganho da força de controle ( $\mathbf{G}$ ), que possui dimensão  $(n, 2n)$  e é definida da seguinte maneira:

$$\mathbf{G} = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}. \quad (4.5)$$

A força de controle é dada, então, pela Equação 4.6.

$$\mathbf{f}_c(t) = \mathbf{G}\mathbf{x}(t). \quad (4.6)$$

Chega-se, assim, ao controle ótimo do regulador linear com utilização de funcional quadrático. Para maiores detalhes, é sugerida a leitura da referência Barbosa (1996).

# Capítulo 5

## Aplicação e Resultados

### 5.1 Estudos preliminares - Análise aerodinâmica

No intuito de analisar as vibrações induzidas pelo vento em estruturas foram idealizadas adaptações na estrutura apresentada por Basu e Vickery (1983), que serviu de referência para os estudos realizados via CFD e Controle Ótimo.

Um dos grandes objetivos destes estudos preliminares é a determinação de parâmetros que permitam construir um modelo aeroelástico da estrutura e, numa etapa posterior, analisar este modelo aeroelástico com controle de vibrações.

A estrutura analisada possui de 330 metros de altura e é composta por um prédio em estrutura de concreto, o qual apresenta em sua cota 305 uma torre metálica de seção quadrada com lado de 5 metros. As análises basearam-se nessa torre metálica. A Figura 5.1 a ilustra e suas propriedades dinâmicas encontram-se abaixo.

- $m = 997,99 \text{ kg/m}$ ;
- $k = 33.920,33 \text{ kN/m}$ ;
- $c = 564,46 \text{ kN.s/m}$ ;
- $\xi = 4\%$ ;
- $f_1 = 0,93 \text{ Hz}$ ;

onde  $m$  é a massa,  $k$  é a constante de rigidez,  $c$  é o coeficiente de amortecimento (todos por unidade de comprimento),  $\xi$  é a taxa de amortecimento da estrutura e  $f_1$  é a primeira frequência natural.

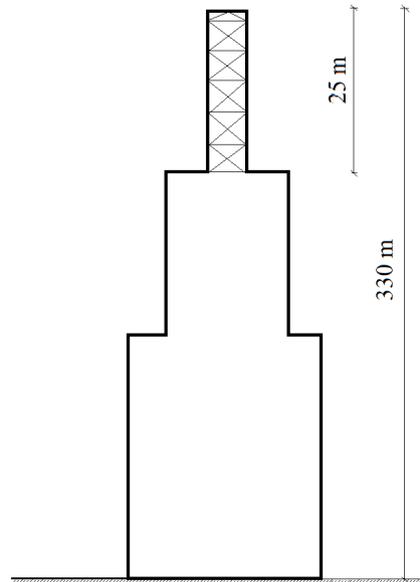


Figura 5.1: Modelo de torre utilizada na análise.

A análise é feita simulando o movimento da célula superior desta torre. Através da fórmula modal do deslocamento desta torre, pode-se obter os deslocamentos dos demais pontos da mesma. A Figura 5.2 ilustra o perfil do vento que atua na estrutura e as fórmulas modais de todo o edifício ( $\phi_1$ ) e de sua torre ( $\phi_2$ ).

As propriedades do fluido utilizadas foram:

- $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ;
- $\mu = 1,01 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ ;

onde  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $\mu$  é a viscosidade absoluta, ambas em condições normais de temperatura e pressão.

As análises aerodinâmicas foram adimensionalizadas em termos das escalas de referência. A escala de referência de comprimento foi a aresta da estrutura, denominada de  $D$  no presente trabalho. A velocidade de referência do vento  $u_0$  é a escala de referência de velocidade,  $\rho u_0^2$  é a escala de referência de pressão. O tempo é adimensionalizado em relação à  $D/u_0$ .

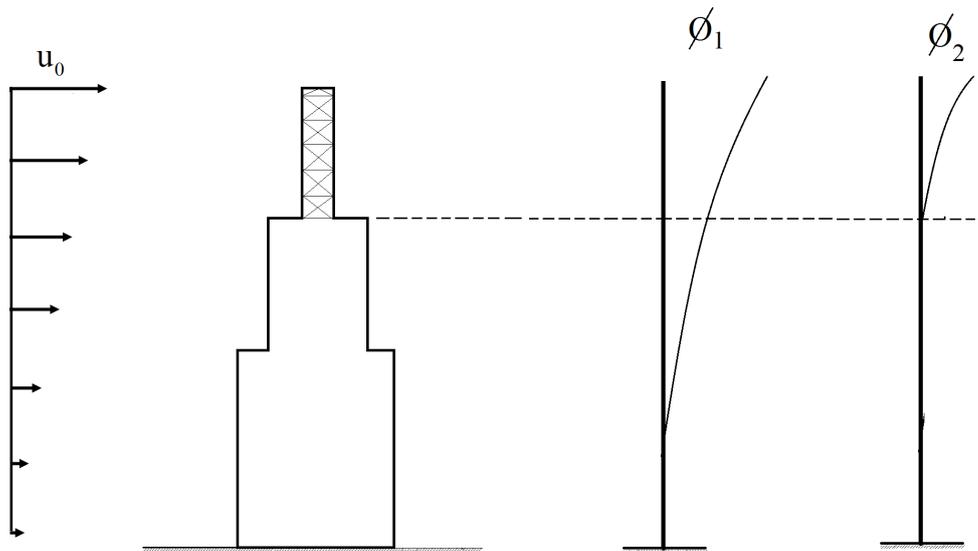


Figura 5.2: Modelo de torre utilizada na análise com respectivo perfil do vento e fórmula modal de vibração.

Considerando o modelo aerodinâmico bidimensional, a Figura 5.3 apresenta o domínio computacional adotado. Uma velocidade uniforme com componentes  $u_1 = u_0$  e  $u_2 = 0$  é prescrita na face AB. Os subíndices 1 e 2 referem-se aos eixos horizontal e vertical, coincidentes com as direções  $x$  e  $y$ , respectivamente, do corpo. Nas faces AC e BD, impõe-se a condição  $u_2 = 0$  e na face CD, prescrevem-se os valores de tensão de superfície livre na direção  $y$  e pressão nula. Na superfície impermeável do corpo, obedece-se à condição de não deslizamento, fazendo  $u_1 = 0$  e  $u_2 = 0$ .

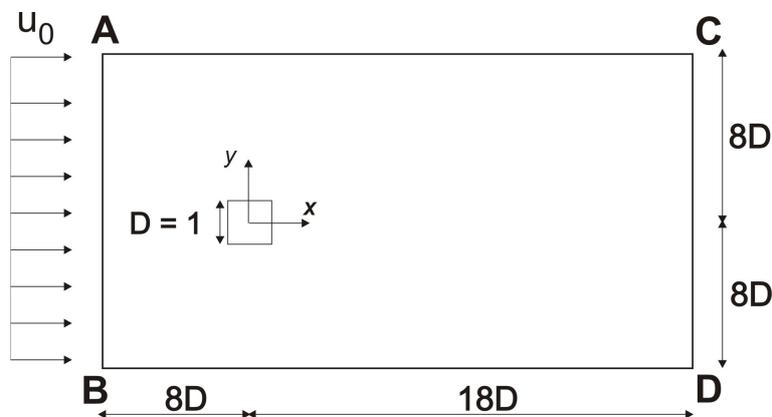


Figura 5.3: Modelo aerodinâmico bidimensional.

A Figura 5.3 ilustra o domínio adotado. Essa configuração foi utilizada com base

no trabalho desenvolvido por Sohankar (2008).

A Figura 5.4 apresenta a malha inicial com 13.417 nós e 26.208 elementos e a Figura 5.5 exibe o detalhamento da malha de elementos finitos em volta do modelo de estrutura.

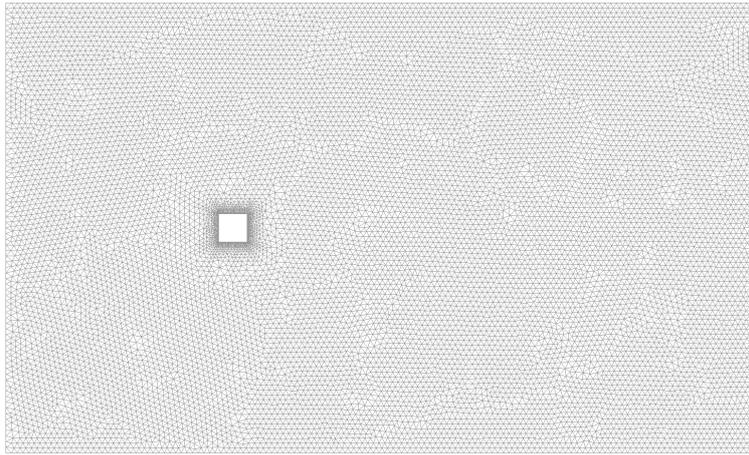


Figura 5.4: Malha de elementos finitos em volta da estrutura.

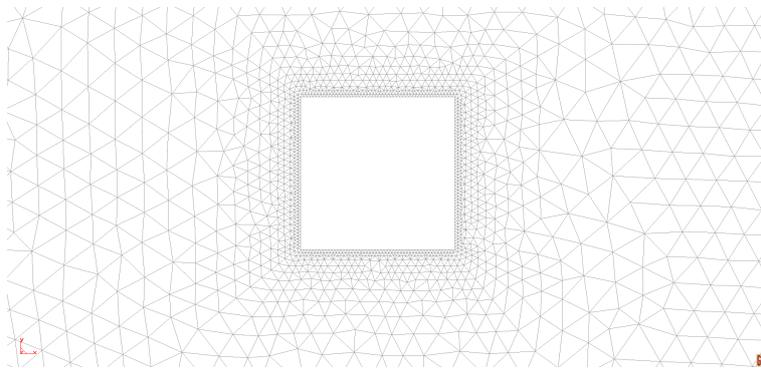


Figura 5.5: Detalhe da malha de elementos finitos em volta da estrutura.

Na simulação desta etapa, manteve-se a estrutura em repouso e foi obtida a resposta no tempo do coeficiente de sustentação ( $C_l$ ). De acordo com a teoria apresentada na Seção 2.2.2, estimou-se a frequência de desprendimento de vórtices que, na forma adimensional e de acordo com a Equação 2.6, é conhecida como o número de Strouhal. Obteve-se, portanto, a velocidade crítica do vento de acordo com a Equação 2.10. Com estas informações, pôde-se: construir o modelo dinâmico da segunda etapa, denominada de aeroelástica, obter os deslocamentos no domínio do tempo a partir e aplicar o sistema de controle ótimo.

A Figura 5.6 apresenta a resposta no domínio do tempo de  $C_l$  e a Figura 5.7

a sua densidade espectral. O número de Strouhal obtido do espectro de  $C_l$  foi de 0,12. Sabendo-se que a frequência natural da estrutura é de 0,93 Hz, estimou-se a velocidade crítica do vento ( $U_{crit}$ ) de aproximadamente 139,18km/h.

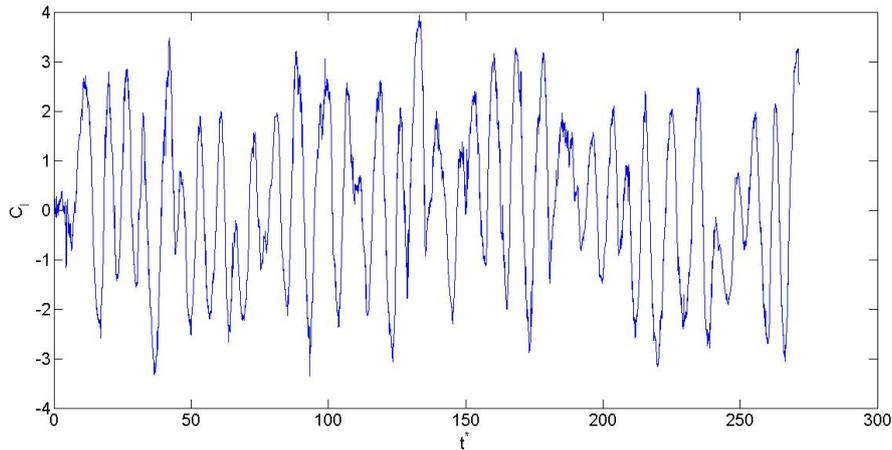


Figura 5.6: Histórico de  $C_l$  pelo tempo adimensionalizado  $t^*$ .

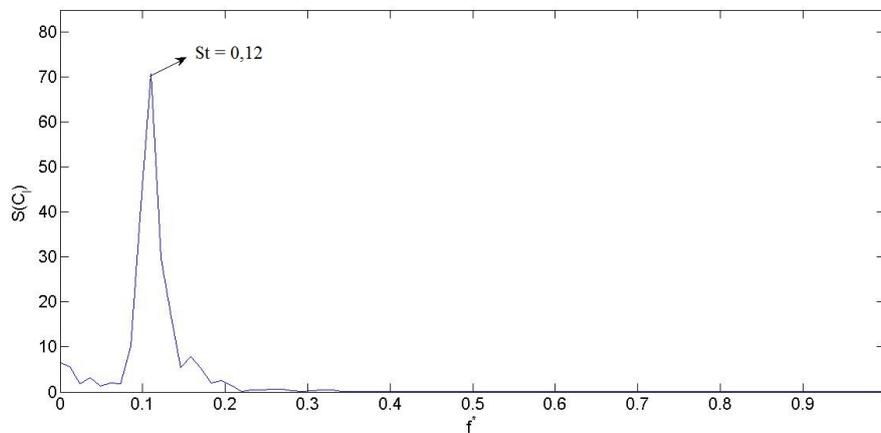


Figura 5.7: Espectro do histórico de  $C_l$  representado na Figura 5.6.

## 5.2 Análise aeroelástica

A velocidade crítica de 139,18 km/h, obtida da etapa anterior, é aplicada ao modelo dinâmico, onde o movimento na direção transversal ao vento foi liberado, sendo utilizada análise de 1GL.

Inicialmente, para o modelo proposto, foi simulado um exemplo sem controle de vibrações, o qual resultou em um deslocamento máximo de 1,21 metro verificado no instante 440,32 segundos (Figura 5.8).

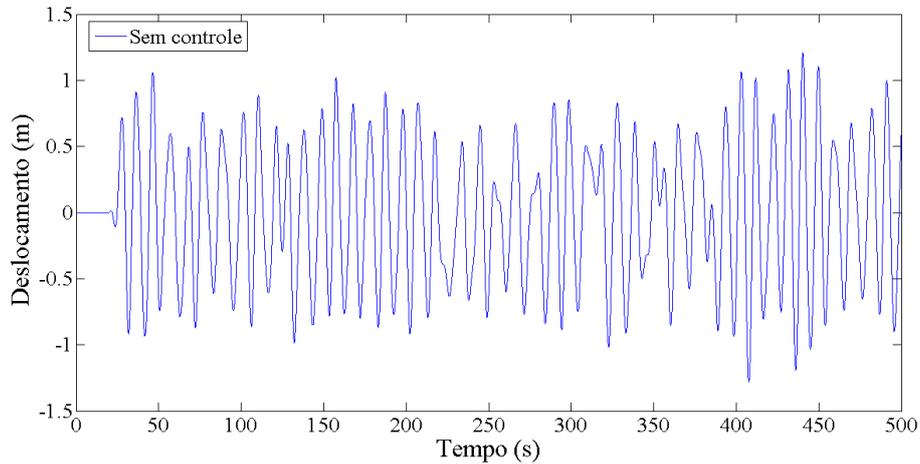


Figura 5.8: Deslocamentos obtidos para o modelo de estrutura.

Simulado o sistema de controle do modelo de estrutura analisado, obteve-se o resultado ilustrado na Figura 5.9, sendo o deslocamento máximo observado de 0,0004 metro verificado no instante 170,4 segundos.

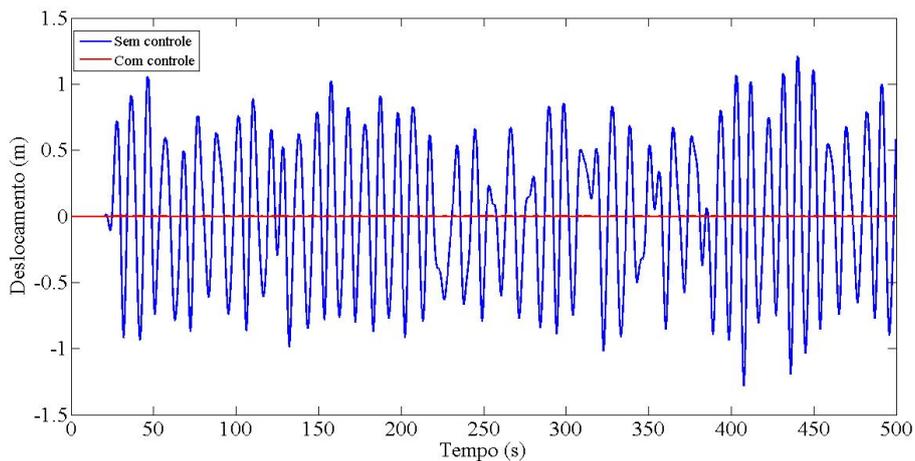


Figura 5.9: Deslocamentos do modelo de estrutura sem e com controle de vibrações.

O deslocamento controlado, ilustrado na Figura 5.9, é resultante da aplicação da força de controle (em conjunto com a força de excitação) apresentada em 5.10. Essa força de controle foi obtida quando aplicado a matriz de ponderação ( $\mathbf{Q} = 10^8 \mathbf{I}_{2,2}$ ),

sendo 17,75 kN sua força máxima.

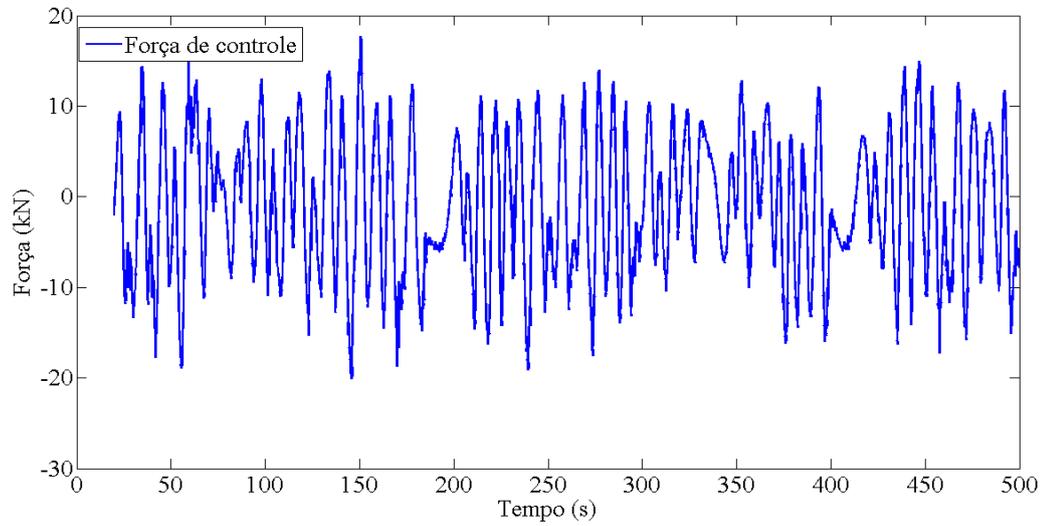


Figura 5.10: Histórico de forças de controle quando aplicado a Matriz de ponderação  $\mathbf{Q} = 10^8 \mathbf{I}_{2,2}$ .

## 5.3 Análise dos resultados

O modelo de vento aplicado ao modelo de estrutura analisado causou deslocamento com amplitude superior a 1,0 metro. Essa vibração poderia levar a estrutura ao colapso e/ou impossibilitar sua utilização.

A Tabela 5.3 exibe os valores de deslocamento máximo e médio para as simulações com controle de vibrações para diferentes valores de matriz de ponderação adotado, bem como as respectivas forças máximas de controle.

Matriz de ponderação	Deslocamento máximo (m)	Deslocamento médio (m)	Força de controle máxima (kN)
$\mathbf{Q} = 10^2 \mathbf{I}_{(2,2)}$	0,70	0,01	7,04
$\mathbf{Q} = 10^4 \mathbf{I}_{(2,2)}$	0,015	0,0014	10,45
$\mathbf{Q} = 10^6 \mathbf{I}_{(2,2)}$	$7,5 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-5}$	17,62
$\mathbf{Q} = 10^8 \mathbf{I}_{(2,2)}$	$4,0 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-5}$	17,75

Tabela 5.1: Resultados dos deslocamentos obtidos em referência à matriz de ponderação adotada.

Observa-se na Tabela 5.3 que diretamente proporcional ao aumento do valor da matriz de ponderação ( $\mathbf{Q}$ ) adotado, tem-se o aumento da força de controle e, conseqüentemente, menos amplitude máxima de deslocamento. Observa-se ainda que os valores de deslocamento e de força máxima de controle quando adotado as matrizes de ponderação  $\mathbf{Q} = 10^6 \mathbf{I}_{(2,2)}$  e  $\mathbf{Q} = 10^8 \mathbf{I}_{(2,2)}$  são muito próximos.

# Capítulo 6

## Conclusões

Conforme exposto, a ação do vento pode ocasionar vibrações na estrutura que, além de causar desconforto humano, pode levar a mesma ao colapso. Tais fatos justificam análises na fase de projeto para o emprego de um controlador para atenuar ou evitar as vibrações frente a essas solicitações. Constata-se que a aplicação de sistemas de controle pode levar a estrutura a ter um comportamento dinâmico com menores amplitudes de excitações.

Espera-se que para um aumento de valores da matriz de ponderação  $\mathbf{Q}$ , tenha-se maiores reduções das amplitudes de deslocamentos com aumento nas magnitudes de deslocamento com aumento na magnitude das forças de controle, o que de fato foi constatado.

A determinação de valores otimizados para a matriz  $\mathbf{Q}$  depende da solução de um problema de otimização com restrições práticas como magnitudes máximas dos atuadores e amplitudes máximas para os deslocamentos, o que não foi o foco do presente trabalho.

Os resultados obtidos são importantes informações preditivas na fase de projeto, tendo em vista que pela análise numérica o projetista pode verificar se o projeto seria exequível diante às circunstâncias (níveis de deslocamento aceitáveis; espaço para instalação do sistema de controle por exemplo). Ressalta-se a necessidade de análises complementares e ensaios para se alcançar um resultado satisfatório de um sistema de controle a ser projetado.

Cita-se como sugestões de trabalhos futuros:

- a necessidade de ampliação do algoritmo para análise numérica de outros sistemas de controles de vibrações (passivo e/ou ativo);
- a análise de vibração em " $n$ " graus de liberdade;
- a validação do método via ensaios experimentais; e
- a paralelização do código a fim de diminuir o tempo para cada simulação, hoje em torno de 72 horas para uma simulação de 500 segundos.

# Referências Bibliográficas

- Barbosa (1996)** BARBOSA, F.S. Controle ativo modal de vibrações estruturais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Barbosa (2000)** BARBOSA, F.S. *Modelagem Computacional de Estruturas com Camadas Viscoelásticas Amortecedoras*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Basu e Vickery (1983)** BASU, RI e VICKERY, BJ. Across-wind vibrations of structure of circular cross-section. part ii. development of a mathematical model for full-scale application. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12(1):75–97.
- Battista e Pfeil (2008)** BATTISTA, R.C. e PFEIL, M.S. Múltiplos atenuadores dinâmicos sincronizados para controle das oscilações induzidas pelo vento na ponte rio-niterói. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 2(1).
- Blessmann (1998)** BLESSMANN, J. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Blevins (1990)** BLEVINS, R. D. Flow-induced vibration.
- Braun (2007)** BRAUN, A.L. *Simulação Numérica na Engenharia do Vento Incluindo Efeitos de Interação Fluido-Estrutura*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Brooks e Hughes (1982)** BROOKS, A.N. e HUGHES, T.JR. Streamline upwind/pevov-galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible navier-stokes equations. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 32(1):199–259.

- Bueno (2007)** BUENO, D.D. *Controle Ativo de Vibrações e Localização Ótima de Sensores e Atuadores Piezelétricos*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. São Paulo/SP - Brasil.
- De Sampaio (1993)** DE SAMPAIO, P.A.B. Transient solutions of the incompressible navier–stokes equations in primitive variables employing optimal local time stepping. Em *Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods for Laminar and Turbulent Flow*, páginas 1493–1504.
- De Sampaio e Coutinho (1999)** DE SAMPAIO, P.A.B. e COUTINHO, A.L.G.A. Simulation of free and forced convection incompressible flows using an adaptive parallel vector finite element procedure. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 29:289–309.
- De Sampaio et al. (2004)** DE SAMPAIO, P.A.B., HALLAK, P.H., COUTINHO, A.L.G.A. e PFEIL, M.S. A stabilized finite element procedure for turbulent fluid-structure interaction using adaptive time-space refinement. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 44(6):673–693. cited By (since 1996) 20.
- Dodd (2013)** DODD, JAMES. Computacional fluid dynamics. Acesso em 15/03/2013, 2013. URL <http://www.youtube.com/watch?v=nJWzOPaMlkI>.
- Franco (2002)** FRANCO, M. A torção nos edifícios altos. *V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto*.
- Hallak (2002)** HALLAK, P.H. *Parâmetros aeroelásticos para pontes via fluidodinâmica computacional*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Hughes et al. (1986)** HUGHES, T.J.R., FRANCA, L.P. e BALLESTRA, M. A new finite element formulation for computational fluid dynamic: V. circumventing the babuska-brezzi condition: A stable petrov-galerkin formulation for stokes problem accommodating equal-order interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 59:85–99.
- Jr. e Sain (1997)** JR., B.S. e SAIN, M.K. Controlling buildings: A new frontier in feedback. *IEEE control System Magazine on Emerging Technology*, 17:19–35.

- McAlpine (2004)** MCALPINE, J.D. Computational fluid dynamics or wind tunnel modeling? URL <http://www.envirometrics.com/abstracts/CFDvsWT.pdf>. Acesso em 31/01/2013.
- Meirovitch (1990)** MEIROVITCH, L. *Dynamics and Control of Structure*. John Wiley & Sons, New York.
- Moutinho (2012)** MOUTINHO, C.M.R. *Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil*. Tese de Doutorado, Universidade do Porto.
- Neto et al. (2012)** NETO, A.F.S., NAGAHAMA, C.V., RIBEIRO, M., GOMES, F.G. e BARBOSA, F.S. Análise numérica do desempenho de controladores ativos de vibrações estruturais. *XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*.
- Nomura e Hughes (1992)** NOMURA, T. e HUGHES, T.JR. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 95(1):115–138.
- O Globo (2013)** O Globo, JORNAL. O novo prédio mais alto do mundo. URL <http://oglobo.globo.com/imoveis/o-novo-predio-mais-alto-do-mundo-7203633>. Acesso em: 31/01/2013.
- Ogata (2003)** OGATA, K. Engenharia de controle moderno. *4ª edição*, Pearson Prentice Hall.
- Oliveira (2009)** OLIVEIRA, M.G.K. *Desenvolvimento de uma balança dinâmica de três graus de liberdade para estudo dos efeitos de flexo-torção em edifícios altos submetidos à ação do vento*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Rio Grande do Sul.
- Owen (2013)** OWEN, MICHAEL. 2d cfd bullet in a pipe. Acesso em 01/03/2013, 2013. URL <http://www.youtube.com/watch?v=sBQNnhfZ6CY>.
- Pfeil et al. (2012)** PFEIL, M.S., JUNIOR, S.D.C., CONCEIÇÃO, R.S. e BATTISTA, R.C. Edificações flexíveis sob a ação dinâmica do vento turbulento. *Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*.
- Simiu e Scanlan (1978)** SIMIU, E. e SCANLAN, R.H. *Wind Effects on Structures, an Introduction to Wind Engineering*. John Wiley & Sons, New York, 3 ed.

- Simiu e Scanlan (1996)** SIMIU, E. e SCANLAN, R.H. *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*. John Wiley & Sons, New York, third ed.
- Sohankar (2008)** SOHANKAR, A. Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders: Side ratio effects. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(5):640–655.
- Tanida (2002)** TANIDA, K. Progress in the application of active vibration control technologies to long-span bridges in japan. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4:363–371.
- Vanin et al. (2012)** VANIN, D.D., OLIVEIRA, M.G.K., LOREDO-SOUZA, A.M. e ROCHA, M.M. Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento. *Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural*.
- Wang et al. (1983)** WANG, P.C., KOZIN e AMINI, F. Vibration control of tall buildings. *Engineering Structures*, 5:282–288.