

## CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS INDUZIDAS PELA AÇÃO DO VENTO

**Marcelo Ribeiro<sup>a</sup>, Flávio Souza Barbosa<sup>b</sup> e Patrícia Habib Hallak<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>*Mestrando em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer - Campus Universitário - Juiz de Fora, Brasil, eng.marcelo@me.com*

<sup>b</sup>*Professor Adjunto Universidade Federal de Juiz de Fora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer - Campus Universitário - Juiz de Fora, Brasil, flavio.barbosa@ufjf.edu.br, <http://www.ufjf.br/mac/professores/flavio-de-souza-barbosa/>*

<sup>c</sup>*Professora Adjunta Universidade Federal de Juiz de Fora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Rua José Lourenço Kelmer - Campus Universitário - Juiz de Fora, Brasil, patricia.hallak@ufjf.edu.br, <http://www.ufjf.br/mac/professores/patricia-hallak/>*

**Palavras Chave:** Prédios altos, Vibrações induzidas pelo vento, Sistema de controle de vibrações, Sistemas de controle de vibrações para prédios altos.

### Resumo.

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 da estrutura.

Neste cenário, os sistemas de controle são utilizados a fim de atenuar a vibração excessiva. Entre 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 é obviamente não desejável.

Neste trabalho foi realizada uma análise numérica de um sistema sujeito a forças estruturais de vento controlado ativamente. 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.

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional e ao avanço tecnológico na área construtiva, os edifícios vêm apresentando maiores alturas e uma esbelteza cada vez maior. Destaca-se o Edifício Burj Khalifa Bin Zayid, Dubai, Emirados Árabes Unidos, atualmente o mais alto do mundo com 828 metros de altura. Sua construção começou em 21 de setembro de 2004 e foi inaugurado oficialmente em 04 de janeiro de 2010.

Edifícios como estes, altos e esbeltos, requerem uma análise mais apurada de seu comportamento dinâmico, pois estão sujeitos a movimentos induzidos pelo vento, entre outras forças, que podem causar efeitos indesejáveis e desconforto humano, além de levar a estrutura ao colapso. Wang et al. (1983) citam ainda como problemas a perda e queda de vidros das janelas e distúrbios no funcionamento de elevadores.

Um exemplo de estrutura que apresentou comportamento indesejado devido a ação do vento foi a Ponte Tacoma Narrows Bridge, localizada sobre o Estreito de Tacoma, Washington, Estados Unidos. Esta ruiu em 7 de novembro de 1940, apenas poucos meses após a sua inauguração, devido à ação do vento atuando a uma velocidade de aproximadamente  $70\text{km/h}$  na estrutura. A partir de então intensificaram-se estudos sobre os efeitos do vento em edificações. No Brasil, o caso mais conhecido é o da Ponte Rio-Niterói, a qual inaugurada em 1974, por várias vezes tinha que permanecer fechada quando o vento atingia velocidades próximas de  $50\text{km/h}$ . Posteriormente foi implantado um sistema de controle de vibrações de massas sintonizadas, diminuindo os deslocamentos antes verificados (Battista e Pfeil, 2010).

Neste cenário, sistemas de controle são usados para atenuar possíveis vibrações excessivas. Dentre estes sistemas, aqueles que usam a resposta dinâmica da estrutura para determinar as forças de controle, quando são propriamente executados, têm desempenho satisfatório. Todavia, estes tipos de sistemas de controle requerem várias simulações, pois quando mal projetados o processo de controle pode tornar-se um excitador da estrutura, o que obviamente não é desejado.

Este trabalho visa analisar computacionalmente o desempenho de um sistema de controle ativo para um modelo de estrutura esbelta sob ação do vento. Para se obter as forças atuantes na estrutura são realizadas simulações de fluidodinâmica computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*) propostas por Hallak (2002), já as forças de controle são obtidas através da minimização de seu funcional quadrático que inclui forças de controle e deslocamentos da estrutura. Para tal, no próximo item descreve-se um dos fenômenos aeroelásticos o qual estão sujeitas estruturas de torres altas contendo cantos vivos. Na sequência, tem-se a descrição do modelo atenuador e o caso analisado.

## 2 VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR DESPRENDIMENTO CADENCIADO DE VÓRTICES

Alguns tipos de estruturas, tais como pontes, viadutos e edifícios altos e esbeltos, apresentam oscilações induzidas pelo vento. Neste caso a ação do vento induz o surgimento de fenômenos aeroelásticos, os quais podem comprometer a integridade estrutural, além de causar desconforto humano. Um desses fenômenos aeroelásticos é o chamado desprendimento cadenciado de vórtices.

Os vórtices são pequenos turbilhões na esteira do fluxo causado pelo deslocamento da camada limite da superfície do corpo, denominado de esteiras de Kármán, em homenagem ao pesquisador Theodore von Kármán (1881 - 1963). A Figura 1 é uma ilustração desse fenômeno para diversos perfis não aerodinâmicos.

A formação do vórtice ocorre quando o gradiente de velocidade dentro da camada limite,

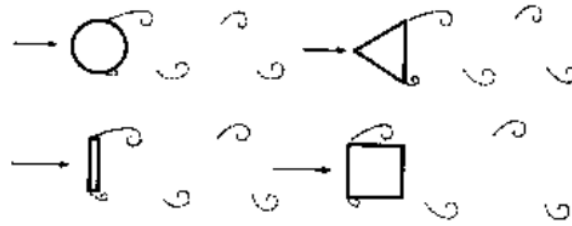


Figura 1: Vórtices de Van Kármán, extraído de Hallak (2002)

associado à geometria do corpo imerso no fluido, promove separação dessa mesma camada limite. Em um cilindro é difícil estudar a localização exata do ponto de deslocamento, 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 deslocamento se dá em uma ou algumas arestas.

Esses vórtices desprendem-se aleatoriamente ou de forma alternada, dependendo do número de Reynolds, que é um parâmetro adimensional definido pela relação entre as forças viscosas e inerciais, ou seja:

$$Re = \frac{u_0 D}{\nu}, \quad (1)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido,  $u_0$  é a velocidade de incidência do vento e  $D$  é a dimensão do corpo perpendicular à direção do vento. A frequência de desprendimento de vórtices alternados depende do número adimensional de Strouhal ( $St$ ) definido por:

$$St = \frac{f_s D}{u_0}, \quad (2)$$

onde  $f_s$  é a frequência de desprendimento de um par de vórtice. O número de Strouhal depende da forma da seção, do seu acabamento superficial e do número de Reynolds.

Os vórtices gerados, ilustrados na Figura 1, 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 vórtice ( $f_s$ ). As componentes das forças tendem a produzir oscilações nas direções em que agem. Entretanto, a 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 pequeno, aparecerá uma forte oscilação transversal sempre que a frequência de desprendimento de um par de vórtice ( $f_s$ ) 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:

$$U_{crit} = \frac{f_n D}{St}, \quad (3)$$

Uma característica deste fenômeno é a chamada captura ou sincronização do desprendimento de vórtice (*lock-in* (Simiu e Scanlan, 1978)) na frequência natural de oscilação por flexão da estrutura, que ocorre na faixa de velocidades  $u_0$  para qual as amplitudes de vibração são grandes.

## 2.1 Ferramentas para projeto de estruturas submetidas a ação do vento

O estudo dos efeitos do vento em estrutura, tendo em vista a sua concepção estrutural, utiliza os métodos de dinâmica estrutural para estimar o comportamento da estrutura sob a ação de forças conhecidas. Aplicando os conhecimentos da mecânica dos fluidos obtêm-se as forças aerodinâmicas induzidas pelo movimento do vento ao redor das edificações, que dependem principalmente da forma e do tamanho da estrutura, da massa específica, da viscosidade e da velocidade do fluido em relação à estrutura. As leis que governam a mecânica dos fluidos estão sintetizadas nas equações de Navier Stokes de conservação de massa e quantidade de movimento (Hallak, 2002).

Nestas situações, em geral, busca-se obter ainda na fase de projeto a resposta da estrutura para verificá-lo sob os critérios de vibração excessiva e, conseqüentemente, avaliar os possíveis problemas associados ao mau comportamento em serviço, à ocorrência de mecanismo de colapso localizado, à propagação de fraturas e ao desconforto humano para usuários da estrutura.

Para estudo específico do fenômeno de desprendimento cadenciado de vórtices, a análise, até meados da década de 80, era feita exclusivamente através de ensaios experimentais em túnel de vento, quando se observou que o comportamento do sistema é não linear, auto-excitado e também auto-limitado. Atualmente, utilizam-se recursos oriundos CFD que apresentam resultados promissores.

Em consonância com esta tendência, 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 atingem 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 mista 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 convecção 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:

$$\rho \left[ \frac{du_a}{dt} + (v_b) \frac{\partial u_a}{\partial x_b} \right] - \frac{\partial \tau_{ab}}{\partial x_b} + \frac{\partial p}{\partial x_a} = 0, \quad (4)$$

- Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial u_a}{\partial x_a} = 0. \quad (5)$$

Nestas equações a tensão 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  $p$ . 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 4 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.

Pormenores sobre a técnica computacional, incluindo a metodologia *LES* no referencial *ALE* e os esquemas adaptativos no espaço e no tempo podem ser encontrados em Hallak (2002) e Sampaio et al. (2004).

### 3 SISTEMAS DE CONTROLE

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 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 o algoritmo de controle. Esta estratégia, além de reduzir o esforço computacional das simulações numéricas, permite uma avaliação precisa do algoritmo de controle, uma vez que o comportamento dinâmico de estruturas obtido através destes sistemas de um grau de liberdade tende a não experimentar problemas numéricos. Obviamente é necessário estar atento às diferenças destes modelos para outros multi-modais.

O comportamento de um sistema estrutural sujeito a 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 elasticidade. A Figura 2 ilustra um edifício alto e esbelto sujeito à ação do vento com velocidade de incidência  $u_0$ . O problema é tridimensional com o perfil de velocidade  $u_0$  variando com a altura da estrutura. O modelo dinâmico pode ser simplificado considerando o movimento do topo do edifício, resultando em um modelo bidimensional com vento na direção  $x$  e vibração na direção  $y$ . Assim recai-se em um sistema de um grau de liberdade generalizado (1GL), onde cada uma destas propriedades dinâmicas é assumida concentrada em um elemento físico, de forma que a representação gráfica deste modelo é apresentado na Figura 3.

Nestes casos, a Equação 6, que representa a equação de movimento de um sistema dinâmico de 1GL com amortecimento viscoso, pode estar associada a um modelo que simula o comportamento dinâmico de uma estrutura real.

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = f_e(t), \quad (6)$$

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 as propriedades físicas da estrutura (massa, coeficiente de amortecimento e constante de rigidez) e  $f$  são as forças resultantes aplicadas na estrutura.

A equação diferencial que descreve a resposta do sistema estrutural controlado é obtida a partir da Equação 6 através da consideração de que as forças que agora atuam na estrutura são  $f_e(t)$  e  $f_c(t)$  é resultante das forças de controle. Assim, a Equação 7 fica:

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = f_e(t) + f_c(t), \quad (7)$$

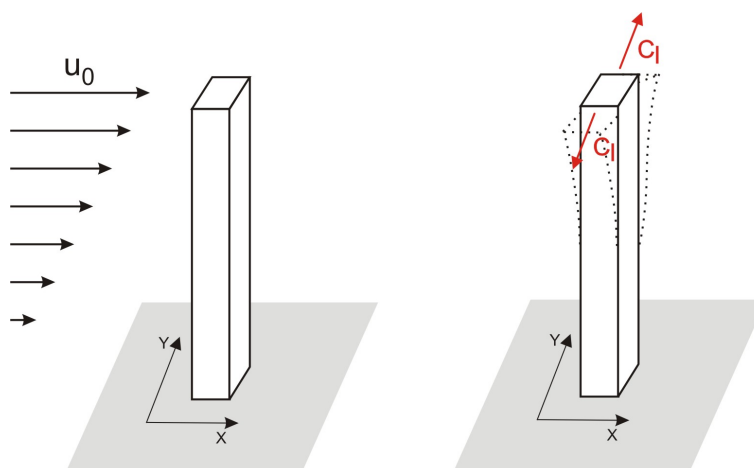


Figura 2: Representação gráfica da ação do vento em um edifício de seção quadrada, com respectivo movimento provocado devido ao desprendimento cadenciado de vórtices.

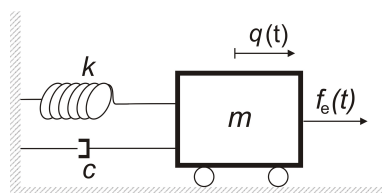


Figura 3: Modelo do sistema massa-mola-amortecedor para 1GL, representativo do modelo ilustrado na Figura 2.

### 3.1 Equações de Estado do Sistema

A Equação 7 pode ser apresentada na forma de espaço de estados, conforme a equação:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad (8)$$

onde:  $\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}$ ;  $\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{q}(t) \\ \ddot{q}(t) \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m^{-1}k & -m^{-1}c \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}_e(t) + \mathbf{f}_c(t)$ .

### 3.2 SISTEMA DE CONTROLE ATIVO (SCA)

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. Neste trabalho serão abordados sistemas de controle ativo de ciclo fechado.

#### 3.2.1 Controle de Ciclo Fechado

Este sistema é chamado de ciclo fechado porque 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.

O SCA com Ciclo Fechado possui as seguintes características:

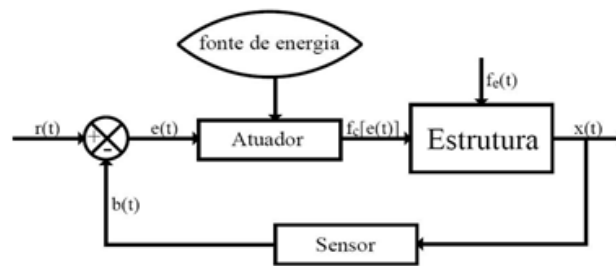


Figura 4: Esquema de Controle Ativo de Ciclo Fechado, extraído de [Barbosa \(1996\)](#).

- 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 Ciclo Aberto, a resposta desejada  $r(t)$  é programada em função dos níveis de deslocamentos, velocidades e acelerações desejáveis.

O SCA com Ciclo Fechado também conhecido como Sistema de Controle com Retroação 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.

Neste trabalho foi utilizado o Sistema de Controle ativo do tipo ciclo fechado conhecido como “Controle Ótimo”.

### 3.3 Controle Ótimo

Em um sistema dinâmico controlado ativamente por meio de forças de controle  $\bar{f}_c(t)$ , que alteram sua resposta no tempo, o desempenho do sistema de controle é medido segundo alguns critérios de segurança, ligada às amplitudes de resposta em termos de deslocamentos, conforto do usuário, relacionado com as amplitudes de resposta em termos 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](#)).

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 ciclo fechado. 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 9.

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{H} \mathbf{x}(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{f}_c^T(t) \mathbf{R} \mathbf{f}_{c(t)}] dt, \quad (9)$$



onde  $J$  é o funcional a ser minimizado através da determinação da função  $f_c(t)$ ; e  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{Q}$  e  $\mathbf{R}$  são matrizes de ponderação com dimensão  $(2n, 2n)$ ,  $(2n, 2n)$  e  $(n, n)$ , respectivamente.

Para a minimização do funcional  $J$  é necessário obter a solução da Equação Matricial de Riccati dada por:

$$\mathbf{PA} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{PBR}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

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:

$$\mathbf{G} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}, \quad (11)$$

A força de controle é dada, então, pela Equação 12.

$$\mathbf{f}_c(t) = \mathbf{G}\mathbf{x}(t), \quad (12)$$

Chega-se, assim, ao controle ótimo do regulador linear com utilização de funcional quadrático. Neste trabalho, para simular o controle ótimo foram utilizadas as seguintes matrizes de ponderação:

$\mathbf{Q} = 10^7 \mathbf{I}_{(2n, 2n)}$  e  $\mathbf{R} = \mathbf{I}_{(n, n)}$   
onde:  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade.

#### 4 APLICAÇÃO

Para analisar as vibrações induzidas pelo vento em estruturas foi idealizada uma torre alta e foi aplicado o método CFD para determinar, computacionalmente, as forças atuantes na estrutura.

A estrutura analisada é um prédio de 330 metros de altura, com seção transversal (no plano  $xy$  de acordo com o referencial da Figura 2) de  $10 \times 10$  metros, com os seguintes parâmetros dinâmicos:

- $m = 2369, 2kg/m$ ;
- $k = 1833, 4 \frac{Nm}{s}$ ;
- $c = 166, 725 \frac{Nm}{s}$ ;
- $\xi = 4\%$ ;
- $f_n = 0, 14Hz$ .

onde  $m$  é a massa por metro,  $k$  é a constante de rigidez,  $c$  é o coeficiente de amortecimento,  $\xi$  é a taxa de amortecimento da estrutura e  $f_n$  é a primeira frequência natural da estrutura.

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  $D/u_0$ .

Considerando o modelo aerodinâmico bidimensional, a Figura 5 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  $u_2 = 0$ .

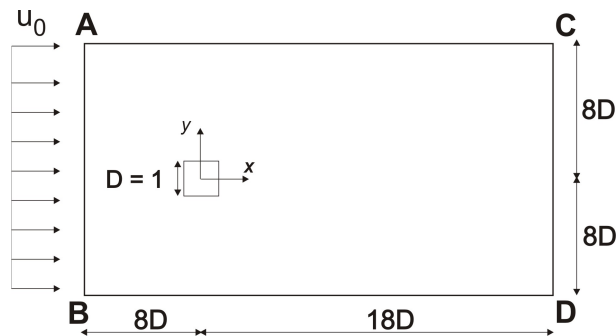


Figura 5: Modelo aerodinâmico bidimensional.

As análises foram conduzidas em duas etapas. Na primeira, denominada de aerodinâmica, manteve-se a estrutura em repouso e foi obtida a história no tempo do coeficiente de sustentação ( $C_l$ ). De acordo com a teoria apresentada na Seção 2, estimou-se a frequência de desprendimento de vórtices que, na forma adimensional e de acordo com a Equação 2, é conhecida como o número de Strouhal. Obteve-se, portanto, a velocidade crítica do vento de acordo com a Equação 3. Com estas informações, pôde-se construir o modelo dinâmico da segunda etapa, denominada de aeroelástica e obter os deslocamentos no tempo a partir do histórico em deslocamento, aplica-se o sistema de controle ótimo.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análise aerodinâmica

A Figura 6 apresenta a história no tempo de  $C_l$  e a Figura 7 a sua densidade espectral. O número de Strouhal obtido do espectro de  $C_l$  foi de 0,10. Sabendo-se que a frequência natural da estrutura é de 0,14Hz, estimou-se a velocidade crítica do vento ( $U_{crit}$ ) de aproximadamente 60km/h.

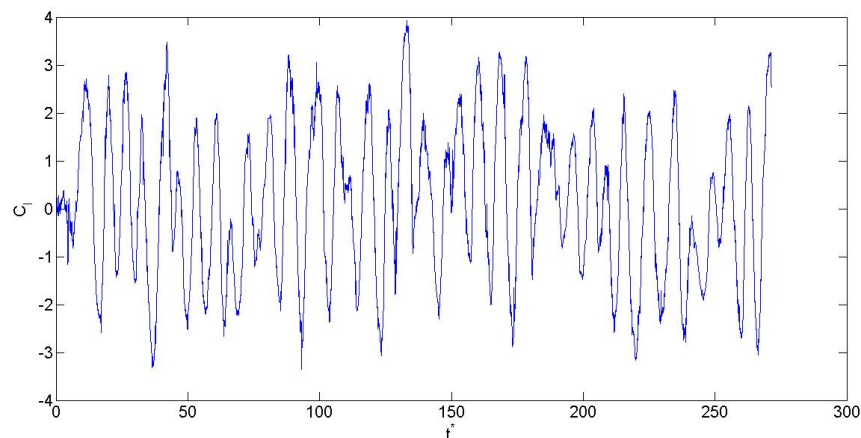


Figura 6: Histórico de  $C_l$  pelo tempo adimensionalizado  $t^*$ .

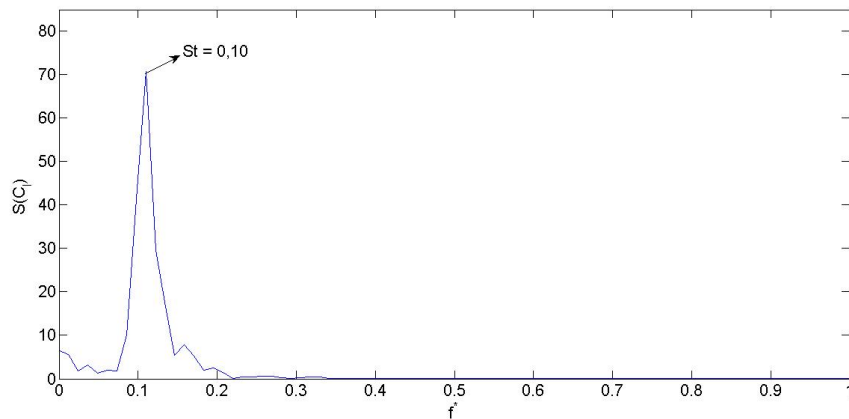


Figura 7: Espectro do histórico de  $C_l$  representado na Figura 6.

## 5.2 Análise aeroelástica

A velocidade crítica de  $60\text{km/h}$ , obtida da etapa anterior, é aplicada ao modelo dinâmico, onde o movimento na direção transversal ao vento foi liberado, sendo obtido o histórico de deslocamento da estrutura em análise, os quais encontram-se na Figura 8. Com estes deslocamentos foram calculados as forças de controle pela técnica de controle ótimo que uma vez aplicadas à estrutura obtém-se os respectivos deslocamentos, utilizando a superposição de efeitos (deslocamento obtido pelo CFD + deslocamento causado pela força de controle). Este resultado também encontra-se apresentado na Figura 8.

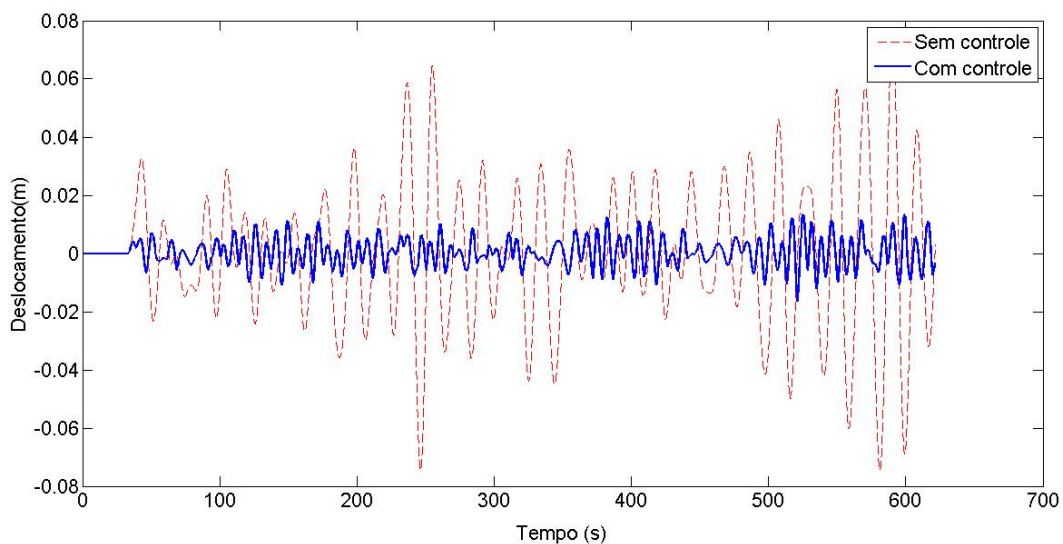


Figura 8: Histórico do deslocamento da estrutura obtido pela simulação aeroelástica via CFD com o respectivo resultado obtido aplicando um sistema de controle ótimo.

Conforme mencionado anteriormente, o problema de vibrações induzidas pela ação do vento é um fenômeno não-linear, auto-excitado e auto-limitado. Para o modelo utilizado neste trabalho foi realizado uma abordagem linear do problema, tendo em vista que foi utilizada a superposição dos efeitos. Obviamente um estudo mais refinado do problema deve levar em conta as não-linearidades, entretanto, em problemas onde pequenos deslocamentos são considerados os

aspectos não-lineares tendem a perder um pouco suas importâncias para as análises.

## 6 CONCLUSÃO

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. O foco do presente trabalho foi um modelo desacoplado, porém, como trabalho futuro cita-se na necessidade de incluir no CFD utilizado, as respectivas forças de controle e o deslocamento da estrutura frente à solicitação (ação do vento) e a força de controle, sendo este modelo mais representativo da situação real.

## REFERÊNCIAS

- Barbosa F.S. *Controle Ativo Modal de Vibrações Estruturais*. Tesis de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.
- Battista R.C. e Pfeil M.S. Control of wind oscillations of rio-niterói bridge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 163:87–96, 2010.
- Hallak P.H. *PARÂMETROS AEROELÁSTICOS PARA PONTES VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL*. Tesis de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.
- Jr. B.S. e Sain M.K. Controlling buildings: A new frontier in feedback. *IEEE control System Magazine on Emerging Techonology*, 17:19–35, 1997.
- Meirovitch L. *Dynamics and Control of Structure*. Jonh Wiley & Sons, New York, 1990.
- Sampaio P.A.B.D., Coutinho P.H., e Pfeil M.S. A stabilized finite element procedure for turbulent fluid-structure interation using adaptive time-space refinement. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 44:673–693, 2004.
- Simiu E. e Scanlan R.H. *Wind Effects on Structures, an Introduction to Wind Engineering*. John Wiley & Sons, New York, 3 edição, 1978.
- 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, 2002.
- Wang P.C., Kozin, e Amini F. Vibration control of tall buildings. *Engineering Structures*, 5:282–288, 1983.