



ANÁLISE NUMÉRICA DA AÇÃO DO VENTO NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA PONTE ESTAIADA

Malveira, Leandro

Kurokawa, Fernando Akira

malveira@usp.br

fernando.kurokawa@poli.usp.br

Depto. de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 83, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil
Escola Politécnica da USP

Nakao, Osvaldo Shigueru

nakao@usp.br

Escola Politécnica da USP

Depto. de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, trav. 2, 83, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil
Escola Politécnica da USP

Resumo. *O estudo dos fenômenos de aerodinâmica e aeroelasticidade em pontes no contexto da engenharia do vento, ganha cada vez mais importância, haja vista sua aplicação na definição e cálculo de parâmetros fundamentais para entendimento e caracterização do evento de interação entre o fluxo de vento e a estrutura de uma ponte. Dois dos mais importantes fenômenos de instabilidade dinâmica são abordados, drapejamento e desprendimento de vórtices. Este trabalho apresenta uma análise numérica da ação do vento na seção transversal do tabuleiro de uma ponte estaiada, verificando seu comportamento em face à ação dos esforços aerodinâmicos e aeroelásticos inerentes desta interação fluido estrutura. Nesta análise foram investigados os esforços aerodinâmicos, ensejando na obtenção dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto, sustentação e momento e o número de Strouhal. Além disso, foi obtida a velocidade do vento que provoca o fenômeno de instabilidade de drapejamento ("flutter") O modelo da ponte estaiada analisada neste trabalho é similar ao da ponte Sunshine Skyway, localizada na Flórida, EUA. A simulação numérica da interação fluido-estrutura foi feita utilizando-se a ferramenta ANSYS CFX®*

Keywords: *Dinâmica dos Fluidos Computacional; Flutter; Vortex Shedding, Simulação Numérica, Ponte Estaiada.*

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento e a determinação dos efeitos do vento em pontes com longos vãos apresentam-se de forma preponderante para elaboração de projetos de estruturas. A determinação das cargas induzidas pelo vento e sua respectiva ação dinâmica na estrutura dessas pontes demanda análises mais aprofundadas, em face da complexidade do fenômeno e o caráter absolutamente aleatório do seu comportamento. Devido a isso, a ação dinâmica do vento é capaz de excitar a resposta dinâmica de estruturas que apresentam baixos valores amortecimento e frequência natural (Miguel, 2003).

Segundo Blessmann (1998), em estruturas esbeltas e flexíveis, principalmente aquelas com baixas frequências naturais de vibração ($f < 1,0$ Hz), os efeitos dinâmicos da ação do vento devem ser considerados, identificados e quantificados, evitando-se assim as consequências indesejáveis de eventuais cargas imprevistas provocadas pelo vento em um sistema estrutural.

No caso das pontes estaiadas, apresentam especial interesse e estas devem ser projetadas para suportar as forças impostas pelo vento. Os esforços aerodinâmicos, causados por essas forças, pelas suas características alteram a rigidez e o amortecimento das estruturas podendo levar ao surgimento dos fenômenos aeroelásticos indesejáveis como o drapejamento e o deprendimento vórtices. O estudo dos fenômenos de aerodinâmica e aeroelasticidade em pontes no contexto da engenharia do vento, ganha cada vez mais importância, haja vista sua aplicação na definição e cálculo de parâmetros fundamentais para entendimento e caracterização do evento de interação entre o fluxo de vento e a estrutura de uma ponte.

A aeroelasticidade é um termo oriundo da engenharia aeronáutica, introduzido inicialmente por Cox e Pugsley (1932) e abordado no âmbito da engenharia civil com maior destaque a partir do famoso acidente da ponte de Tacoma Narrows nos EUA. Em novembro de 1940, a ponte sob ação de vento com velocidades em torno de 70 km/h entrou em colapso após significativas oscilações verticais e torcionais que conduziram à ruptura do seu tabuleiro (Pfeil, 1993).

O estudo das características do vento no contato com uma estrutura é portanto, o ponto de partida para que o engenheiro estrutural possa desenvolver as hipóteses e apresentar de forma adequada, as cargas, deformações e deslocamentos correspondentes à ação do fluxo de ar incidente em um modelo construtivo. Informações como o gradiente de velocidade do vento, velocidade crítica e respectiva direção de incidência, são dados básicos e fundamentais para o correto equacionamento e melhor entendimento da ação dinâmica envolvendo o fluido e a estrutura. Uma vez que a velocidade crítica do vento é atingida, o movimento pode ser considerado como uma harmônica não amortecida na qual se inicia a instabilidade. Esta velocidade crítica do vento é denominada velocidade de drapejamento (*flutter*), enquanto que, a frequência circular crítica é chamada de frequência de drapejamento.

Com base neste contexto, dois dos mais importantes fenômenos de instabilidade dinâmica são abordados neste trabalho. O primeiro, chamado de drapejamento ou *flutter*, que descreve uma instabilidade aeroelástica no acoplamento de dois modos de deslocamento da estrutura, o vertical (flexão) e o torcional (rotação) (Hallak, 2002). E, o segundo, conhecido como oscilação por desprendimento de vórtices (*Vortex Shedding*), que descreve o evento de interação entre fluido e estrutura onde ocorre a separação da camada de fluxo do fluido do sólido na qual são formados turbilhões que são convectados de forma cadenciada e alternada na esteira à jusante do corpo sólido (Mannini, 2006).

Visando a análise da ação do vento sobre uma seção transversal do tabuleiro de uma ponte estaiada, o objetivo deste trabalho é determinar os coeficientes aerodinâmicos (arrasto, sustentação e momento), número de Strouhal e a velocidade crítica do vento que provoca o fenômeno de instabilidade dinâmica, “flutter”, na ponte. Os coeficientes foram obtidos pela simulação numérica do escoamento em torno de uma seção de ponte que possui deslocamentos verticais e rotações devidas aos efeitos de torção. Já a análise do fenômeno de instabilidade “flutter” foi realizado através da análise sobre a curva obtida para os coeficientes de drapejamento (*flutter derivatives*) dado pela seção da ponte. O estudo de caso considerado neste trabalho é o modelo reduzido da ponte estaiada *Sunshine Skyway*, localizada na Flórida, EUA.

2 METODOLOGIA

2.1 Equações governantes

As equações governantes que modelam escoamentos incompressíveis, transientes e isotérmicos são as equações de conservação de massa e de momento, dadas respectivamente por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \quad i = 1, 2, \quad (2)$$

em que u_i são as componentes de velocidade, t é o tempo, ρ é a massa específica, p é a pressão, ν é a viscosidade cinemática, f_i representa as forças externas.

A maioria dos escoamentos são turbulentos caracterizados pela flutuação dos campos de velocidade, na qual pode ser definido com uma condição de fluxo caótica, flutuante e aleatória (Asyikin, 2012). Estas flutuações aleatórias em um escoamento também transportam importantes quantidades, tais como força e energia. Escoamentos turbulentos são altamente instáveis, tridimensionais e são um processo dependente do tempo. Nesse regime de escoamento a viscosidade passa a ter uma característica randômica, e por essa razão são necessárias maneiras que possam prever esse comportamento para que os termos das equações que envolvem a viscosidade sejam completos. Com isso, há a necessidade de escolha de um modelo de turbulência. De acordo com Wilcox (1993) existem na literatura vários modelos de turbulência.

O modelo de turbulência adotado neste trabalho é o modelo SST (Shear Stress Transport). Esse modelo foi proposto por Menter (1994) e é um modelo que utiliza a modelagem RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) na qual faz uso de dois outros modelos, κ - ϵ e κ - ω (Launder e Spalding, 1974; Yakhot et al. 1992). Na região externa do escoamento utiliza-se a formulação do modelo κ - ϵ , em que se mostra pouco eficiente. E, na região próxima à parede, utilizam-se as equações de transporte do modelo κ - ω .

O modelo de turbulência SST é composto por duas equações de transporte, sendo uma a equação da energia cinética turbulenta (κ), Eq. (3), e a outra a taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta (ω), Eq. (6) (Martins, 2007).

A equação da energia cinética turbulenta (κ) é dada por

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial(\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\tilde{P}_k}{\rho} - \beta^* \omega \kappa + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\kappa \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right], \quad (3)$$

em que, u_i são as componentes de velocidade, ρ é a massa específica, μ é a viscosidade molecular, μ_t é a viscosidade turbulenta. O termo $\tilde{P}_k$ é dado por:

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10\varepsilon) \quad (4)$$

na qual, $\varepsilon = \beta^* \kappa \omega$, com P_k representando a produção de energia cinética turbulenta média dado por:

$$P_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

E, a equação da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, ω , para o modelo SST é dada por:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(\omega u_i)}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \quad (6)$$

em que F_1 representa a função *Blending* e é dado por:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\kappa \omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (7)$$

na qual,

$$CD_{\kappa \omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad (8)$$

e y é a distância da superfície de não deslizamento.

Além disso, a viscosidade turbulenta é calculada da seguinte forma:

$$\mu_t = \rho \frac{\alpha_1 \kappa}{\max(\alpha_1 \omega (S_{ij} S_{ij})^{1/2} F_2)} \quad (9)$$

na qual $(S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ representa uma medida invariante do tensor taxa de deformação e F_2 (segunda função *Blending*) é determinada por

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (10)$$

As constantes $\sigma_{\kappa 1} = 0.85$ e $\sigma_{\omega 1} = 0.5$ são os coeficientes de difusão turbulentos e $\beta_1 = 3/40$ a constante empírica do modelo κ - ω . Já $\sigma_{\kappa 2} = 1$ e $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ são os coeficientes de difusão turbulentos e $\beta_2 = 0.0828$ a constante empírica do modelo κ - ε . E, $\beta^* = 0.09$, $\alpha_1 = 5/9$ são as constantes SST (Menter, 2003; Martins, 2007).

2.2 Equações do movimento

As duas equações do movimento para um sistema desacoplado com 2 graus de liberdade com vibrações no modo vertical h e rotacional α , para uma determinada velocidade, podem ser escritas como:

$$m[\ddot{h}(t) + 2\zeta_h\omega_h\dot{h}(t) + \omega_h^2h(t)] = L(t) \quad (11)$$

$$I[\ddot{\alpha}(t) + 2\zeta_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha}(t) + \omega_\alpha^2\alpha(t)] = M(t) \quad (12)$$

em que m e I são massa e momento de inércia por unidade de comprimento, ζ_h e ζ_α as taxas de amortecimento no ar parado e ω_h e ω_α as frequências angulares naturais e $L(t)$ e $M(t)$ são os esforços aerodinâmicos dados por:

$$L(t) = qB \left[KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2H_3^*(K)\alpha + K^2H_4^*(K) \frac{h}{B} \right], \quad (13)$$

$$M(t) = qB^2 \left[KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2A_3^*(K)\alpha + K^2A_4^*(K) \frac{h}{B} \right], \quad (14)$$

Nas expressões (13) e (14), U é a velocidade do vento e $q = \frac{1}{2}\rho U^2$ é a pressão dinâmica. Por outro lado $\dot{h}$, $\dot{\alpha}$, h e α são funções do tempo (t) e os coeficientes de flutter H_i^* e A_i^* são funções do parâmetro adimensional K (frequência reduzida) que é dada por:

$$K = B\omega/U, \quad (15)$$

na qual, B é a largura do tabuleiro e ω a frequência angular do movimento, representada por:

$$\omega = 2\pi f. \quad (16)$$

Sendo f é a frequência natural cíclica em Hertz, fornecida pelo espectro de frequência, então, U_R , a velocidade reduzida do vento (um parâmetro adimensional) é dada por:

$$U_R = \frac{U}{Bf}. \quad (17)$$

2.3 Interação fluido estrutura

Interação fluido estrutura é um complexo fenômeno de interação entre dois meios contínuos, em que a ação do fluido do entorno do sólido produz carregamentos estáticos e dinâmicos que tendem a deformar elasticamente a estrutura, induzindo à vibração (Mannini, 2006). Se essa vibração apresentar deslocamentos significativos, então ela é capaz de interferir no fluxo do fluido no entorno do sólido, alterando o seu comportamento aerodinâmico.

Os coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D), sustentação (C_L) e momento torsional (C_M) são importantes parâmetros adimensionais de um escoamento, que dependem das características geométricas da seção transversal, do ângulo de incidência do vento na estrutura

e também do número de Reynolds do escoamento. Esses coeficientes são dados respectivamente por:

$$C_D = \frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad (18)$$

$$C_L = \frac{\bar{F}_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 B} \quad (19)$$

$$C_M = \frac{\bar{M}_T}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2} \quad (20)$$

na qual, F_D e F_L são as forças médias de arrasto e sustentação respectivamente, M_T é o momento torsional médio, ρ é a densidade do fluido, U é a velocidade média e B é a largura da seção transversal do tabuleiro da ponte.

Em corpos rombudos, ou seja, sem nenhuma forma aerodinâmica, imersos em um escoamento com um determinado número de Reynolds, nota-se que na esteira a jusante do sólido surge uma formação caracterizada pelo desprendimento alternado de “redemoinhos” denominados vórtices (Blessmann, 2005). Esse fenômeno aeroelástico, conhecido como vórtices de Von Kármán, ocorre com uma frequência característica e dá origem a forças periódicas e oblíquas em relação à direção do vento. Os componentes dessas forças tendem a produzir oscilações que ocorrem na frequência de desprendimento de cada par de vórtices (Limas, 2007). A relação linear entre esta frequência de desprendimento dos vórtices (f_v) e a velocidade do escoamento define outro parâmetro adimensional do escoamento denominando número de Strouhal (St), expresso por:

$$St = \frac{f_v B}{U}. \quad (21)$$

O número de Strouhal é dependente das características geométricas da seção transversal e do número de Reynolds e tem valor aproximado de 0,2 para placas planas, como o tabuleiro de uma ponte (Righi, 2003).

2.4 Condições iniciais e de contorno

Para as condições iniciais, todas as variáveis são prescritas no início dos cálculos (condição de Dirichlet). Em contornos rígidos, a velocidade obedece a condição de não-deslizamento ($\mathbf{u} = 0$). Na entrada do domínio (“inlet”), as velocidades são prescritas e na saída do fluido (“outlet”) a condição de Neumann homogênea é utilizada para a velocidade. Nas paredes superior e inferior do domínio, a condição de simetria foi imposta.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso considerado neste trabalho é um modelo seccional reduzido da ponte estaiada *Sunshine Skyway*, localizada em *Tampa Bay*, estado da *Flórida* nos EUA. A construção da atual ponte iniciou-se em 1982, motivada pelo fechamento da antiga ponte, interdita após a colisão de um barco cargueiro na estrutura da ponte em 1980.

A atual ponte (Fig. 1), denominada *Bob Graham Sunshine Skyway Bridge* foi aberta ao tráfego em abril de 1987, com comprimento total de 6.663 metros, com vão central estaiado com 366 metros de comprimento, sustentado por 42 estais distribuídos em 2 pilares principais (21 estais por pilar).



Figura 1. Vista da ponte estaiada *Sunshine Skyway*

A Fig. 2 apresenta o modelo seccional reduzido desenvolvido para os ensaios experimentais em túnel de vento, apresentados no trabalho de Bartoli et al. (2009).

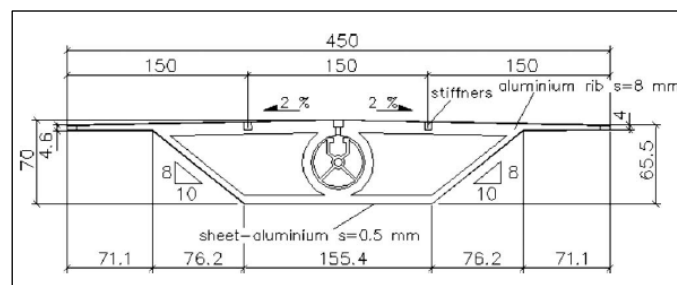


Figura 2. Modelo seccional reduzido da ponte *Sunshine Skyway* (Bartoli et al., 2009)

3.1 Geometria e domínio computacional

O domínio computacional criado para a presente simulação respeitou as distâncias mínimas estabelecidas pela simulação numérica apresentada no trabalho de Mannini (2006) e estão ilustradas na Fig. 3.

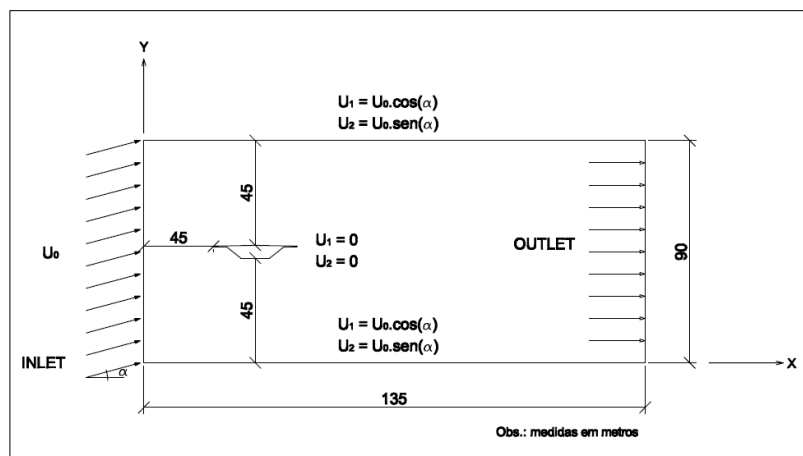


Figura 3. Ilustração do domínio computacional e condições de contorno

A geometria da seção transversal do tabuleiro da ponte utilizada ponte *Sunshine Skyway* foi modelada de acordo com o modelo seccional reduzido da seção transversal apresentada no trabalho de Bartoli et al. (2009) (Fig. 2).

No ferramenta ANSYS CFX[®], a geometria da seção transversal foi desenvolvida e gerada com auxílio da aplicação de modelagem *Design Modeler* da plataforma de integração *Workbench*, conforme representado na Fig. 4.

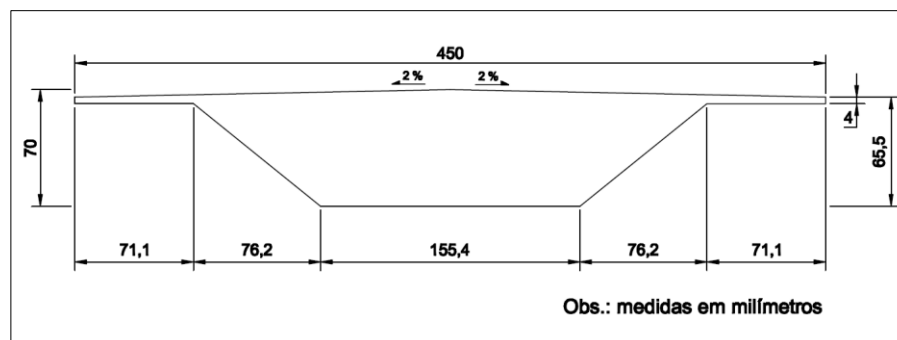


Figura 4. Ilustração do tabuleiro da ponte gerado no *Design Modeler*

Também na plataforma *Workbench*, o domínio computacional foi discretizado, utilizando o ANSYS *ICEM CFD*, o gerador de malhas da plataforma. A malha gerada foi de elementos prismáticos de base quadrangular (tipo *Hex 8*) e elementos prismáticos de base triangular (tipo *Wed 6*). Embora o escoamento seja considerada bidimensional, foram empregados elementos volumétricos na malha, devido às características do *solver* do ANSYS CFX[®], criando um elemento unitário na dimensão desprezada do domínio (eixo Z). Portanto, a malha final (Fig. 5) resultou em 60.388 nós.

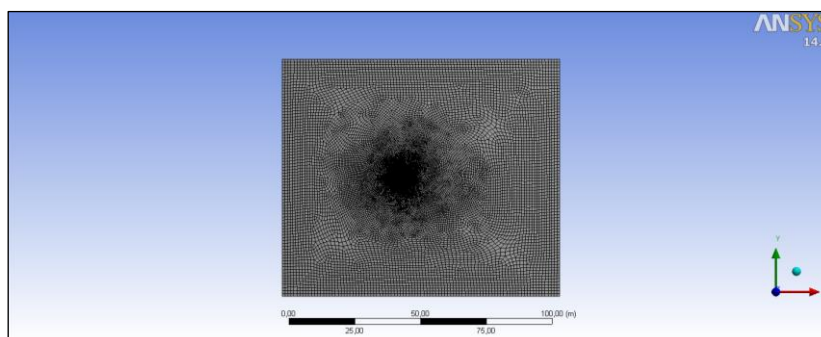


Figura 5. Malha final gerada no ANSYS *ICEM CFD*

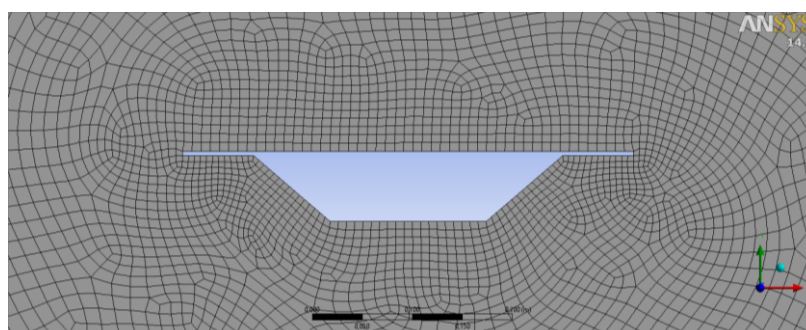


Figura 6. Detalhes da malha no contorno do tabuleiro

3.2 Características do escoamento e parâmetros físicos

No desenvolvimento das simulações computacionais, foi modelada a interação entre o fluido, considerado como ar atmosférico e a estrutura do tabuleiro da ponte, representada por um sólido rígido. O número de Reynolds utilizado para as simulações é $Re = 3 \times 10^5$. As demais constantes envolvidas na interação fluido estrutura estão nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Dados do fluido

Propriedades	Valor
Massa específica do ar (ρ)	1.2041 kg/m^3
Viscosidade dinâmica (μ)	$3.059 \times 10^{-5} Pa.s$
Velocidade de entrada (U_0)	34 m/s
Dimensão característica – altura da seção (D)	0.655 m

Tabela 2. Dados do tabuleiro da ponte

Propriedades	Valor	Unidade
Comprimento do tabuleiro (B)	0.45	m
Massa do sistema dinâmico (m)	12.968	kg
Momento de inércia de massa (I)	0.2273	kgm^2
Rigidez flexional (K_h)	4714.4	n/m
Rigidez torsional (K_α)	290.07	nm
Frequência natural sustentação (f_h)	3.05	hz
Frequência natural torsional (f_α)	5.96	hz
Fator de amortecimento sustentação (ζ_h)	0.42	%
Fator de amortecimento torsional (ζ_α)	0.33	%

As simulações computacionais transcorreram durante 10 segundos, com um passo de tempo $\Delta t = 0.0028s$. Para este estudo de caso, foi escolhida uma modelagem de turbulência URANS (*Unsteady Reynolds Average Navies-Stokes*), sendo o modelo de turbulência adotado foi o modelo $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*).

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos na análise numérica da ação do vento e sobre a seção transversal do tabuleiro da ponte. Além disso, a análise é estendida para o comportamentos aerodinâmico e aeroelástico da ponte. As simulações foram realizadas em um modelo seccional reduzido com características estáticas e dinâmicas. As simulações foram realizadas utilizando a ferramenta ANSYS CFX[®].

Os resultados numéricos obtidos no presente trabalho para seção fixa foram comparados com os resultados de Mannini (2006), cujos ensaios numéricos e experimentais são realizados para o mesmo modelo seccional reduzido da Ponte *Sunshine Skyway*.

4.1 Seção fixa

Primeiramente, o modelo seccional do tabuleiro da ponte é analisada de forma estática, ou seja, o tabuleiro da ponte é considerado fixo em relação ao fluxo de vento, sem liberdade de deslocamentos. Com a interação entre o fluxo de vento e a estrutura da ponte foi possível obter os coeficientes aerodinâmicos em função dos três ângulos de ataque do vento (α): -5° ,

0° e +5° a uma velocidade inicial $U_0 = 34\text{m/s}$. Além disso, foi obtido também o número de Strouhal (St) para o ângulo de ataque igual a 0°.

As médias dos coeficientes aerodinâmicos (arrasto, sustentação e momento) obtidas pelas simulações estão apresentadas nas Tabelas 3 a 5, juntamente com os resultados numéricos e experimentais de Mannini (2006) e com o experimental de Davenport e King (1982).

Tabela 3. Resultados dos coeficientes aerodinâmicos e n° Strouhal para $\alpha = -5^\circ$

Referência	C_D	C_L	C_M	St
Presente trabalho (ANSYS CFX)	0.120	-0.310	-0.010	0.220
Manini (2006) (Túnel de vento - CRIACIV)	0.115	-0.500	-0.025	0.230
Davenport e King (1982) (SSB – exp.)	0.140	-0.100	0.080	0.140
Mannini (2006) (numérico)	0.155	-0.250	0.060	0,150

Tabela 4. Resultados dos coeficientes aerodinâmicos e n° Strouhal para $\alpha = 0^\circ$

Test	C_D	C_L	C_M	St
Presente trabalho (ANSYS CFX)	0.130	-0.300	0.250	0.246
Manini (2006) (Túnel de vento - CRIACIV)	0.110	-0.200	0.100	0.210
Davenport e King (1982) (SSB – exp.)	0.120	0.300	0.170	0.135
Mannini (2006) (numérico)	0.115	0.300	0.165	0.150

Tabela 5. Resultados dos coeficientes aerodinâmicos e n° Strouhal para $\alpha = +5^\circ$

Referência	C_D	C_L	C_M	St
Presente trabalho (ANSYS CFX)	0.155	0.421	0.386	0.250
Mannini (2006) (Túnel de vento - CRIACIV)	0.135	0.300	0.200	0.235
Davenport e King (1982) (SSB – exp.)	0.140	0.500	0.160	0.085
Mannini (2006) (numérico)	0.145	0.550	0.130	0.080

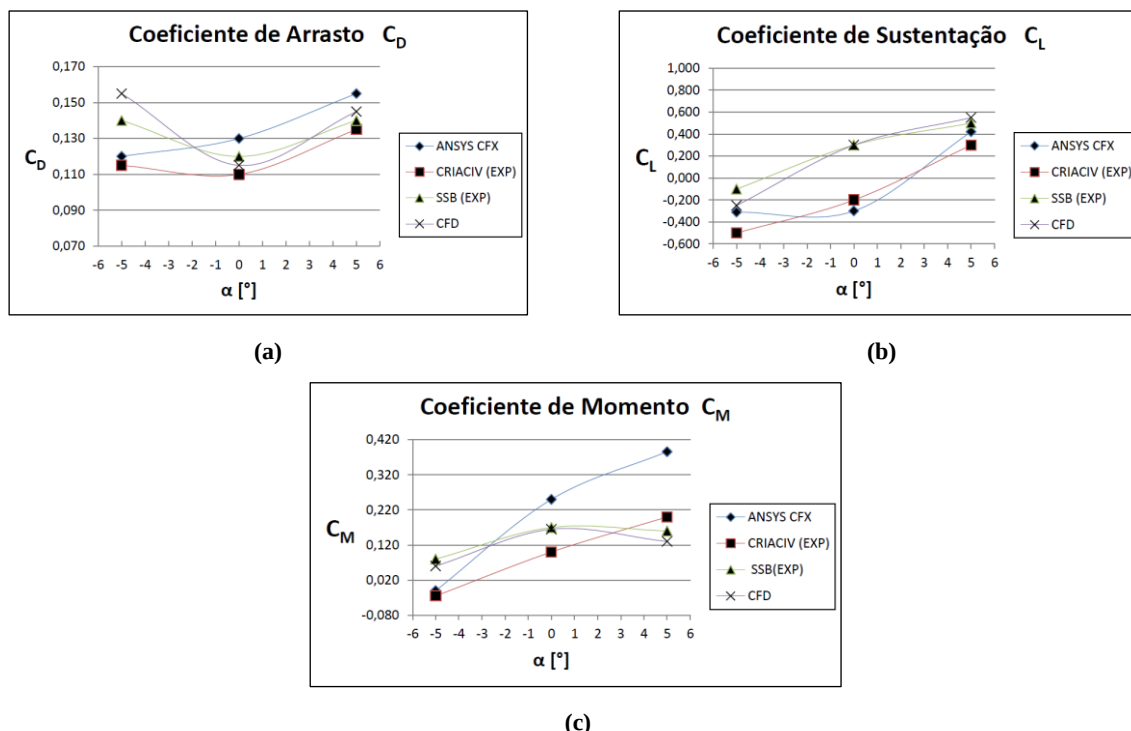


Figura 7. Coeficientes aerodinâmicos de arrasto C_D (a), sustentação C_L (b) e momento C_M (c) para diferentes ângulos de ataque do vento (α)

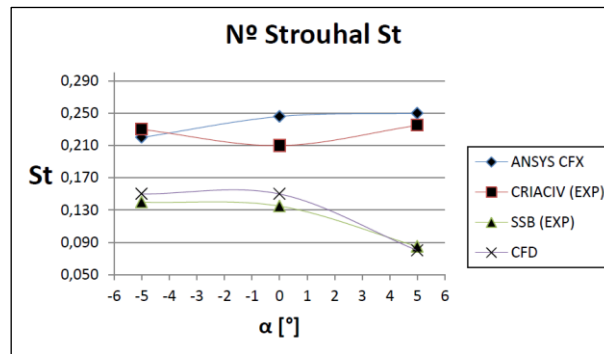


Figura 8. Número de Strouhal para diferentes ângulos de ataque do vento (α)

Para uma melhor interpretação e comparação dos resultados, os coeficientes de arrasto (C_D), sustentação (C_L) e momento torsional (C_M) em função do ângulo de ataque apresentados nas Tabelas 3 a 5, foram organizados em gráficos e estão ilustrados na Fig 7. Já na Fig. 8 está o gráfico comparativo para o número de Strouhal (St).

Pode-se observar nessas figuras que, os resultados obtidos no presente trabalho estão mais próximos dos resultados do túnel de vento (CRIACIV) de Mannini (2006). Já os resultados numéricos de Mannini estão mais próximos dos resultados experimentais (SSB) de Davenport e King (1982).

Na sequência, são apresentadas na Fig. 9, as ilustrações das linhas de corrente obtidas para as presentes simulações com o ANSYS CFX, com os ângulos de incidência do vento (α), -5° , 0° e $+5^\circ$. A Fig. 10 ilustra o campo de velocidades em torno do tabuleiro para $\alpha = 0^\circ$.

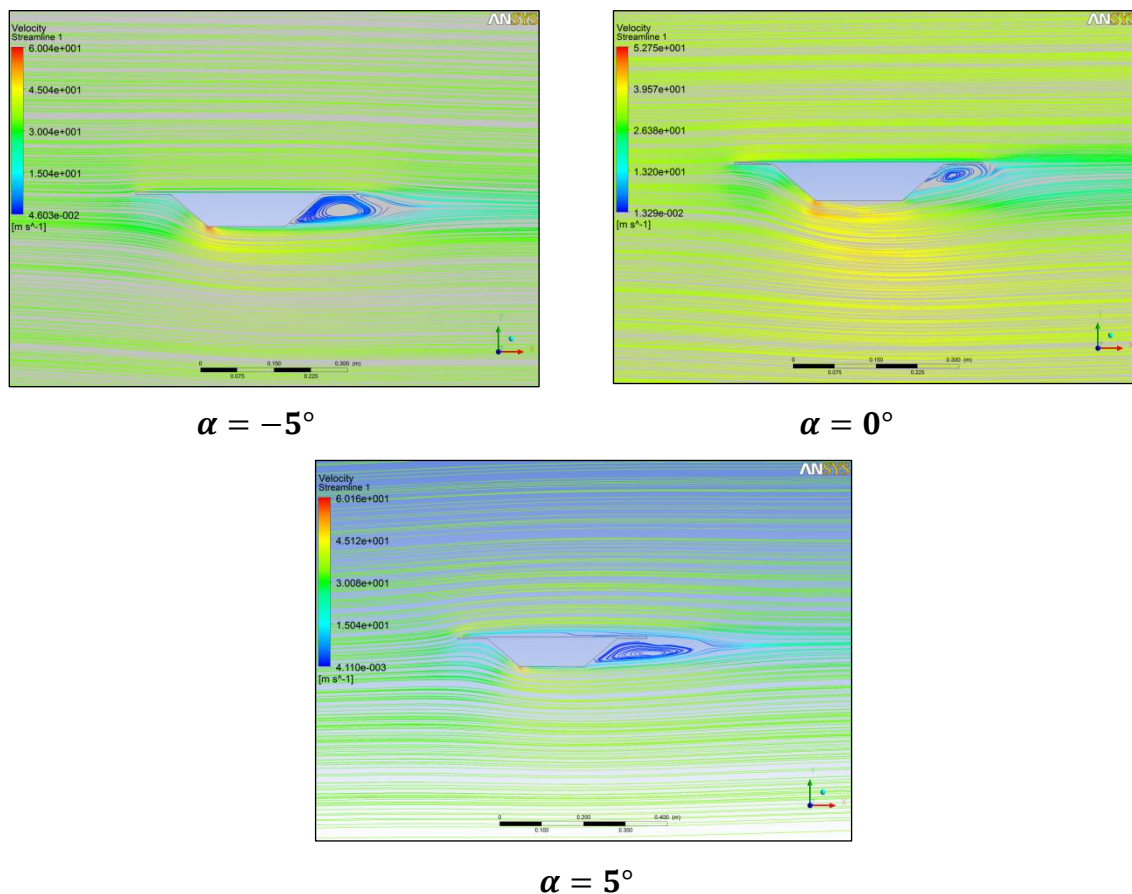


Figura 9. Linhas de corrente para diferentes ângulos de ataque do vento (α)

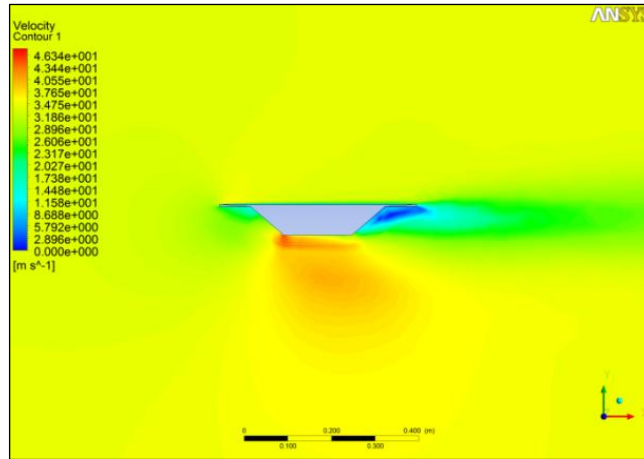


Figura 10. Campo de velocidade para $\alpha = 0^\circ$

4.2 Análise aeroelástica: drapejamento

Nesta segunda abordagem, o estudo do fenômeno de instabilidade aeroelástica de drapejamento ou *flutter* é realizado, cujo objetivo é a obtenção da velocidade crítica de iminência da instabilidade. O modelo seccional do tabuleiro da ponte agora é considerado móvel, com 2 graus de liberdade no deslocamento vertical e torsional.

Neste trabalho foi estudado exclusivamente os efeitos do deslocamento torsional, em que é investigado o comportamento do coeficiente de *flutter* A_2^* , na qual é coeficiente que apresenta a condição crítica para análise do *flutter* (Simiu e Scanlan, 1996).

Para este propósito, foram utilizadas duas técnicas distintas para se alcançar o valor da velocidade crítica de *flutter*.

Na primeira técnica, denominada método das oscilações livres (método direto), apresentado em Braun (2002) *apud* Selvam et al. (2002), determina-se a taxa de decaimento, conforme Eq. (22), da resposta de oscilações apresentadas pelo tabuleiro da ponte submetido ao fluxo de vento para uma série de velocidades reduzidas dos vento,

$$\gamma_d = \frac{\gamma^k - \gamma^{k+1}}{\gamma^k} \quad (22)$$

em que γ_d é a taxa de decaimento, γ^k e γ^{k+1} correspondem aos valores de pico da amplitude de um mesmo período de oscilação da resposta em deslocamentos angulares.

Interpolando em um gráfico as taxas de decaimento das oscilações (eixo das ordenadas) com as velocidades reduzidas (eixo das abcissas), obtém-se a velocidade crítica de flutter no instante em que a curva gerada cruza o eixo das abcissas.

Na segunda técnica, é realizada uma verificação do coeficiente de *flutter* A_2^* (Braun *apud* Scanlan e Tomko, 1971), em que o valor dos coeficientes é obtido numericamente através da equação:

$$A_2^*(U_R) = \frac{I}{\rho B^4} \frac{2\delta_\theta^{exp}}{\pi} \quad (23)$$

na qual δ_θ^{exp} é o decremento logarítmico definido por:

$$\delta_{\theta}^{exp} = 2\pi\zeta^{exp} \quad (24)$$

sendo ζ^{exp} a taxa de amortecimento.

Para ambas as técnicas, foram realizadas as simulações com variação na velocidade reduzida (U_R), atribuindo os seguintes valores: $U_R = 2$, $U_R = 4$, $U_R = 6$, $U_R = 8$, $U_R = 10$, $U_R = 12$, $U_R = 14$, $U_R = 16$ e $U_R = 18$ que correspondem às velocidades de entrada no domínio $U_0 = 5.364 \text{ m/s}$, $U_0 = 10.728 \text{ m/s}$, $U_0 = 16.092 \text{ m/s}$, $U_0 = 21.456 \text{ m/s}$, $U_0 = 26.820 \text{ m/s}$, $U_0 = 32.184 \text{ m/s}$, $U_0 = 37.548 \text{ m/s}$, $U_0 = 42.912 \text{ m/s}$, $U_0 = 48.276 \text{ m/s}$, respectivamente.

Na Fig. 11 estão os históricos de deslocamento torcional para vários valores de velocidades reduzidas.

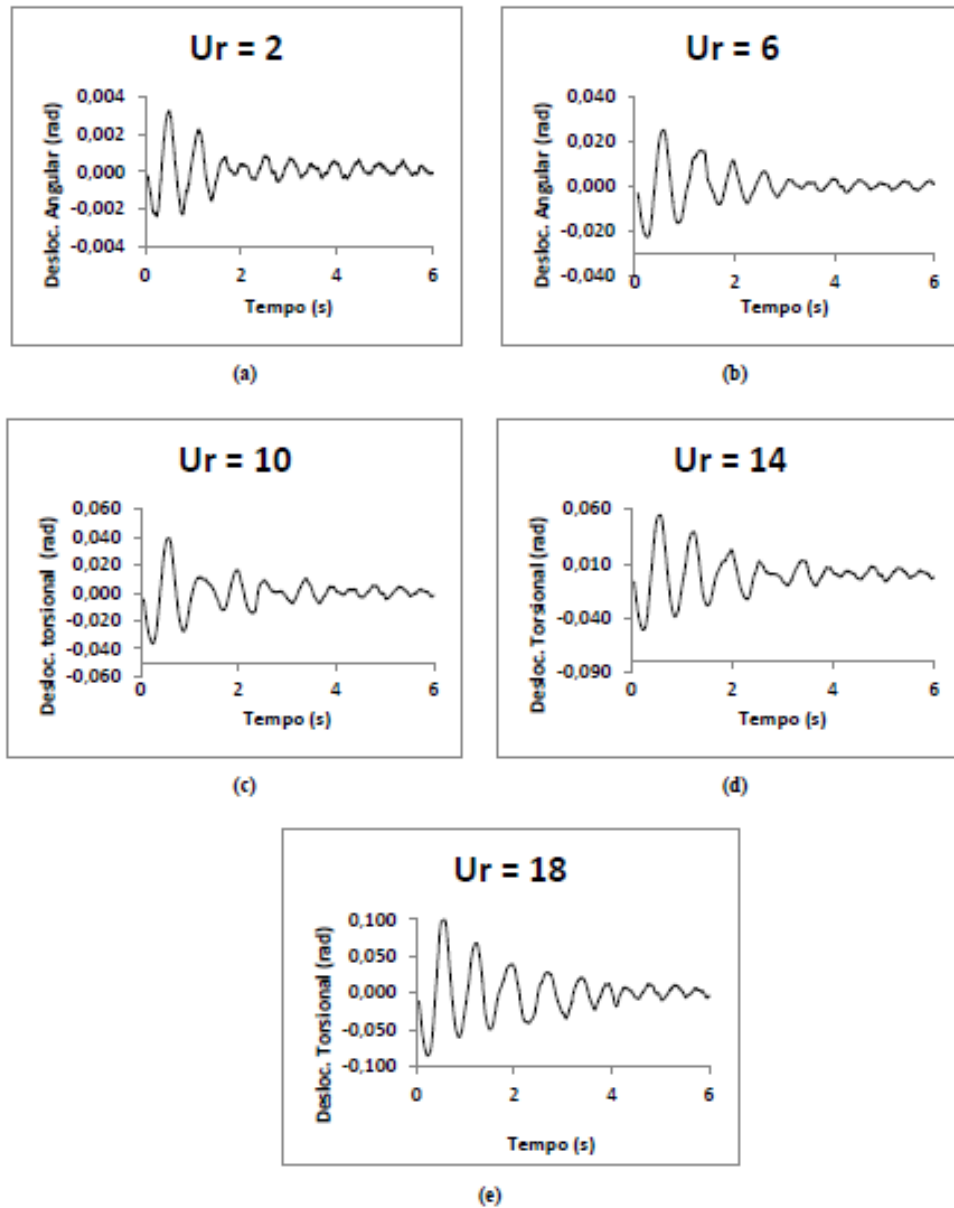


Figura 21. Históricos de deslocamento torcional para valores de velocidade reduzida: (a) $U_R = 2$, (b) $U_R = 6$, (c) $U_R = 10$, (d) $U_R = 14$ e (e) $U_R = 18$

Com base nos resultados obtidos dos históricos do deslocamento torcional da Fig. 11, foram obtidos a taxa de decaimento, calculada numericamente através da Eq. (22), o decremento logarítmico, calculado através da Eq. (24) e o coeficiente de *flutter* A_2^* calculado através da Eq. (23). Na Tabela 6 estão os valores obtidos nas respostas do decremento logarítmico δ_θ^{exp} , taxa de decaimento γ_d e coeficiente de *flutter* A_2^* para cada velocidade reduzida (U_R).

Tabela 6. Resultados de δ_θ^{exp} , γ_d e A_2^* obtidos nas simulações

Resultados	$U_r = 2$	$U_r = 4$	$U_r = 6$	$U_r = 8$	$U_r = 10$	$U_r = 12$	$U_r = 14$	$U_r = 16$	$U_r = 18$
<i>Decremento logarítmico</i>	1.386	1.253	0.405	0.182	0.134	0.078	0.044	0.028	-0.051
<i>Taxa de decaimento</i>	0.750	0.714	0.333	0.167	0.125	0.075	0.043	0.027	-0.052
A_2^*	-0.007	-0.006	-0.002	-0.001	-0.0007	-0.0004	-0.0002	-0.0001	0.0003

A Fig. 12 ilustra o gráfico da taxa de decaimento em função da velocidade reduzida. Já a Fig. 13 mostra o gráfico do coeficiente A_2^* em função da velocidade reduzida U_R .

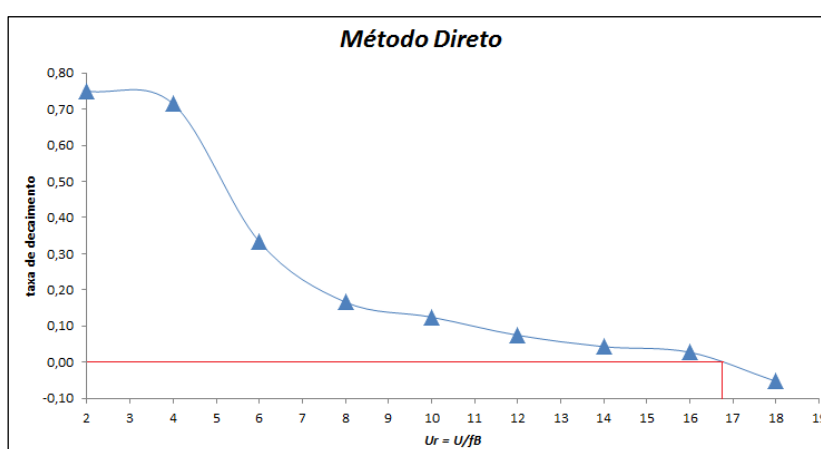


Figura 32. Gráfico da taxa de decaimento em função da velocidade reduzida U_R

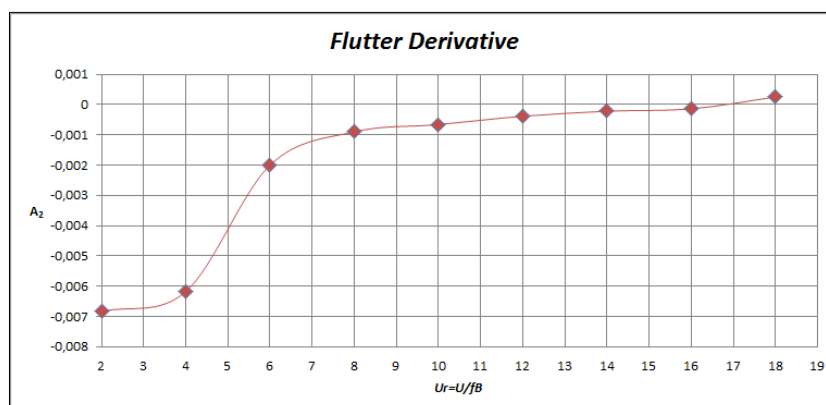


Figura 13. Gráfico do coeficiente A_2^* em função da velocidade reduzida U_R

Através da Fig 12, verifica-se graficamente velocidade crítica de drapejamento (segundo o método direto) ocorre no ponto onde a curva corta o eixo horizontal (taxa de incremento igual a zero). Ou seja, o valor observado é de aproximadamente $U_R \cong 16,7$, o que corresponde à velocidade de 44,79 m/s. E pela Fig. 13, observa-se que o coeficiente de *flutter* A_2^* atinge o eixo de origem também em uma velocidade reduzida U_R entre 16 e 17.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou uma simulação computacional da interação vento estrutura, cujo objetivo foi constatar a aderência das respostas desta simulação com resultados numérico e experimentais do trabalho de referência. No entanto, os resultados não tiveram uma boa aderência. Este fato pode ser atribuído devido ao tipo de malha utilizado. Foi apresentado também um modelo com 2 graus de liberdade no deslocamento vertical e e torcional, para estudo do comportamento aeroelástico. Nesse estudo foi feita uma investigação numérica da condição crítica de início da instabilidade de *flutter*, na qual foi observado o valor da velocidade crítica de *flutter*. Muito embora o método direto apresenta imprecisão na captação gráfica dos valores de amplitude das oscilações, a praticidade do método permite respostas imediatas das condições de *flutter*.

No que tange a simulação computacional e sua configuração, melhorias serão alcançadas com uma maior acurácia na malha do contorno do tabuleiro, para captação dos efeitos da camada limite e estudos mais aprofundados sobre o modelo de turbulência mais adequado para simulação das condições reais do modelo físico representado.

REFERÊNCIAS

- Asyikin, M. T., 2012. *CFD Simulation of Vortex Induced Vibration of a Cylindrical Structure*. Tese de D. Sc., Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University, Trondheim, Norway.
- Bartoli, G., Contri, S., Mannini, C., & Righi, M., 2009. Toward an Improvement in the Identification of Bridge Deck Flutter Derivatives, *Journal of Engineering Mechanics Division*, vol. 135, n. 8, pp. 771-785.
- Blessmann, J., 2005. *Introdução ao Estudo da Ação Dinâmica do Vento*. 2. ed. Editora da Universidade. UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Braun, A. L., 2002. *Um Modelo para a Simulação Numérica da Ação do Vento Sobre Seções de Ponte*. Dissertação de M. Sc., Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Braun, A. L., & Awruch, A. M., 2002. Simulação Numérica da Ação do Vento sobre Seções de Pontes Suspensas. *Periódico de Mecânica Computacional*. vol. XXI, pp. 163-182. Argentina.
- Cox, H. R., & Pugsley, A. G., 1932. Stability of Static Equilibrium of Elastic and Aerodynamic Actions on a Wing. *Aeronautical Research Committee*. R. & M. 1509.
- Fortuna, A. de O., 2012. *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações*. 2. ed., EDUSP, São Paulo, Brasil.
- Hallak, P. H., 2002. *Parâmetros Aeroelásticos para Pontes via Fluidodinâmica Computacional*. Tese de D. Sc., COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Limas, L. F., 2007. *Determinação da Influência de Seções Transversais na Resposta Dinâmica de Pontes Através de Ensaios em Túnel de Vento e Identificação de Sistemas*. Tese de D. Sc., Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Maliska, C. R., 2004. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. 2. ed., LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

- Mannini, C., 2006. *Flutter Vulnerability Assessment of Flexible Bridges*. Tese de D. Sc., Department of Architecture, Civil Engineering and Environmental Sciences of the Technische Universitat Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany and Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Florence, Italy.
- Miguel, L. F. F., 2003. Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido a ação dinâmica do vento, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia UFRGS, Porto Alegre
- Pfeil, M. S., 1993. *Comportamento Aeroelástico de Pontes Estaiadas*. Tese de D. Sc., COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Righi, M., 2003. *Aeroelastic Stability of Long Span Suspended Bridges: Flutter Mechanism on Rectangular Cylindres in Smooth and Turbulent Flow*. Tese de D. Sc., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering of the University of Florence, Italy.
- Scanlan, R. H., & Tomko, J. J., 1971. Airfoil and Bridge Deck Flutter Derivatives, *Journal of Engineering Mechanics Division*, vol. 97, n. 6, pp. 1717-1737.
- Simiu, E., & Scanlan R.H., 1996. *Winds Effects on Structures: Fundamentals and Application to Design*. 3. ed., John Willey & Sons.
- Spalart, P., & Allmaras, S., 1992. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamics Flows, AIAA , pp. 92-0439.
- Yakhot, V., Orszag, S. A., Tangam, S., Gatski, T. B., Speziale, C. G., 1992. Development of turbulence models for shear flows by double expansion technique. *The Physics of Fluids*, vol. 4, pp. 1510-1520.
- White, F. M., 2011. *Fluid Mechanics*. 5. Ed. Mc Gran Hill, New York.
- Wilcox, D. C., 1993. *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries Inc., California.