

**XXXVIII****Jornadas Sudamericanas
de Engenharia Estrutural****Lima 2018**

La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

ID: XXXVIIIJSIE-07-001

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DOS EFEITOS DE INTERFERÊNCIA DEVIDOS AO VENTO EM TABULEIROS PARALELOS DE PONTES

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF INTERFERENCE EFFECTS DUE TO WIND ACTION ON PARALLEL BRIDGE DECKS

Gustavo J. Z. Núñez (1) (P); Renato V. Linn (2); Acir M. Loredou-Souza (3)

(1) D.Sc., Prof. Adjunto, Departamento de Design e Expressão Gráfica, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

(2) D.Sc., Prof. Adjunto, Departamento de Design e Expressão Gráfica, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

(2) Ph.D., Prof. Associado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, Brasil

Endereço para correspondência: gustavo.javier@ufrgs.br; (P) Apresentador

Área Temática: Investigações experimentais e Tecnologia de Materiais.

Resumo

O conhecimento do comportamento aerodinâmico do tabuleiro de uma ponte é um fator determinante em projetos de pontes e na resolução de problemas práticos de engenharia associados. Este trabalho investiga os efeitos de interferência devidos à ação do vento em tabuleiros paralelos de pontes. Os modelos utilizados neste trabalho correspondem aos dois tabuleiros da ponte estaiada Octávio Frias de Oliveira, construída em São Paulo capital. Os testes com modelos reduzidos foram realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, da UFRGS. Foram realizadas medidas em modelos seccionais reduzidos do tabuleiro da ponte, em escala geométrica 1:50. Um modelo teve sua secção transversal média instrumentada com tomadas de pressão para determinação do campo de pressões. Foram obtidos campos de pressões para o modelo isolado e para distintas configurações de vizinhança obtidas através do posicionamento de outro tabuleiro idêntico paralelo ao instrumentado. Os efeitos de interferência observados, a partir dos testes com modelos estáticos, variaram de acordo com cada uma das disposições geométricas estudadas. Em determinadas situações, foram observados efeitos benéficos de proteção; entretanto, amplificações nos coeficientes também ocorreram. A investigação numérica do comportamento aerodinâmico de tais configurações foi conduzida empregando-se o método dos elementos finitos conjuntamente da técnica de simulação de grandes vórtices, sendo os resultados comparados com os obtidos experimentalmente.

Palavras-clave: Vento, Pontes paralelas, Interferência, Túnel de Vento, Elementos Finitos.-

Abstract

The knowledge of the aerodynamic behavior of bridge decks is a determining factor in bridge design and in the resolution of associated practical engineering problems. This work investigates the effects of interference due to the action of the wind on parallel bridge decks. The models used in this work correspond to the two decks of the cable-stayed bridge Octávio Frias de Oliveira, built in the city of São Paulo. The tests with scaled models were performed in the boundary layer wind tunnel *Prof. Joaquim Blessmann* located at UFRGS. Measurements were performed on reduced sectional models of the bridge decks, using a 1:50 geometric scale. One of the models had its medium cross-sectional area instrumented with pressure taps for the measurement of the individual pressure fields. Pressure fields were obtained for the isolated model and for different configurations, which were obtained by positioning another identical deck (dummy model) parallel to the instrumented one. The observed interference effects from tests with static models varied according to each of the geometric conditions studied. In certain situations, beneficial protection effects were observed; however, amplifications in the coefficients also occurred. The numerical investigation of the aerodynamic behavior of such configurations was performed using the finite element method combined with the Large Eddy Simulation technique, being the results compared with those obtained experimentally.

Keywords: wind, parallel bridges, interference, wind tunnel, finite element method.



XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

1. INTRODUÇÃO

Pontes de grandes vãos são estruturas sensíveis ao vento e comumente utilizadas para resolver questões de tráfego e logística. Muitas vezes, tais pontes são construídas paralelamente a uma já existente, enquanto outras são projetadas com um ou mais tabuleiros. Nestas situações, o posicionamento de tabuleiros paralelos ou próximos um dos outros acaba por desenvolver fenômenos aerodinâmicos relevantes.

O formato de tabuleiros influencia diretamente os coeficientes aerodinâmicos (Ostenfeld and Larsen 1992; Miyata and Yamaguchi 1993), e o comportamento aerodinâmico de um tabuleiro isolado se mostra suficientemente complexo. Para o caso de dois ou mais tabuleiros, podem ocorrer fenômenos de interferência que alteram o comportamento aerodinâmico da estrutura (Honda *et al.* 1993).

O estudo da interferência inclui efeitos decorrentes de afastamento horizontal entre tabuleiros (Larsen and Astiz and Larose 2000; Kimura *et al.* 2008) bem como efeitos afastamentos verticais e combinações de afastamentos verticais com horizontais (Núñez *et al.* 2018).

A investigação do comportamento aerodinâmico de tabuleiros de pontes pode ser realizada experimentalmente com modelos reduzidos em túneis de vento, assim como numericamente com modelos matemáticos (Shirai and Ueda 2003). Existem vantagens e dificuldades em cada metodologia. Em túneis de vento, por exemplo, tem-se o fluido real e, portanto, os valores medidos são também reais. Entretanto, como é o caso de pontes, os modelos são estudados em escala, o que pode resultar em diferentes efeitos na estrutura real (Wang *et al.* 1996). Na simulação numérica, por outro lado, a estrutura pode ser modelada em escala real e o escoamento a ser analisado pode ser modelado sem necessitar um equipamento específico, bem como o escoamento pode ser visualizado diretamente, possibilitando conduzir estudos paramétricos com facilidade. A grande dificuldade reside na validade dos resultados obtidos, sendo estes relacionados com a exatidão do modelo matemático empregado. Tipicamente, modelos realísticos envolvem enormes quantidades de cálculos, tornando a simulação muito custosa computacionalmente, de forma que poucos segundos de simulação de um escoamento demorem horas ou dias de processamento. A situação ideal é o emprego conjunto da investigação experimental e numérica. A primeira pode ser empregada para calibração e validação do algoritmo numérico, enquanto que a simulação computacional calibrada pode ser empregada para realização de estudos paramétricos, tais como a modificação da posição de um tabuleiro com relação a outro.

Neste estudo, investiga-se experimentalmente em túnel de vento e numericamente os efeitos aerodinâmicos em tabuleiros isolados e alguns efeitos de interferência. O estudo foi conduzido com a geometria dos tabuleiros da ponte estaiada Octavio Frias de Oliveira.

2. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL EM TÚNEL DE VENTO

Foram construídos dois modelos seccionais reduzidos, um instrumentado com tomadas de pressão e o outro denominado mudo, na escala geométrica 1:50. Na Fig. 1 é mostrada a secção transversal do tabuleiro da ponte estudada. Os modelos têm um comprimento de 1207mm correspondendo a um trecho de 60,35m de comprimento na ponte real. Os modelos foram construídos em alumínio e madeira, sendo reproduzidos todos os detalhes significativos da secção transversal da ponte, incluindo guarda-corpos e guarda-rodas. Uma vista geral do modelo no interior do túnel de vento e detalhes do mesmo é mostrada na Fig. 2.

La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

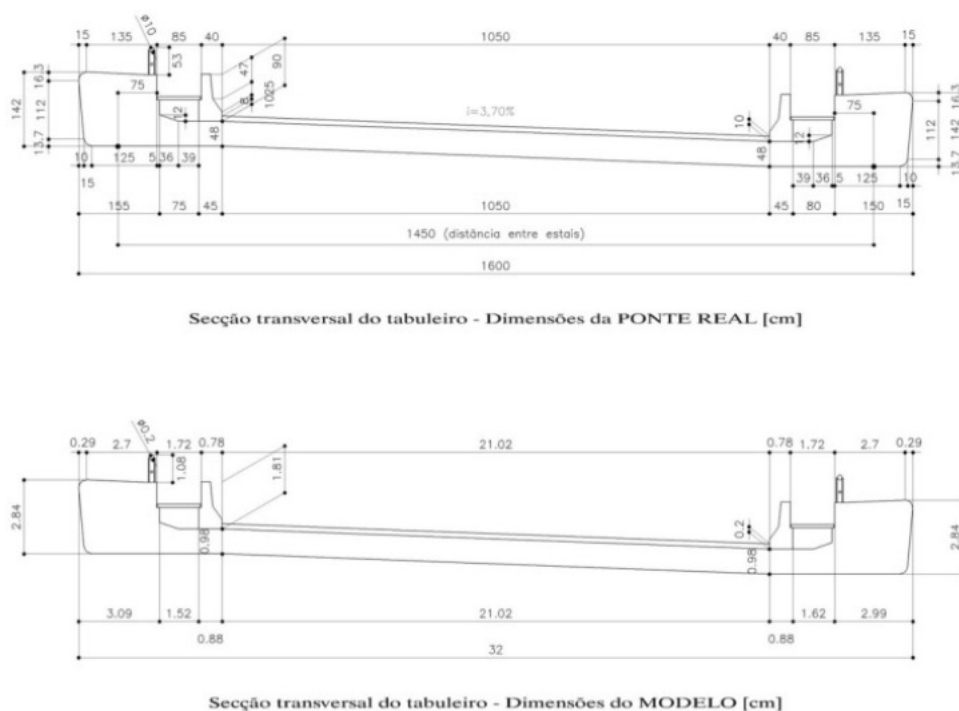


Figura 1. Seção transversal do tabuleiro da ponte: dimensões da ponte real e do modelo.



Figura 2. (a) Modelo seccional para medida de pressões nos tabuleiros no interior do túnel de vento e (b) detalhe da instrumentação com tomadas de pressão.

A investigação experimental foi conduzida no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (Blessmann 1989), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no Brasil. O túnel de vento conta com câmara de ensaios de seção transversal que mede 1.30m x 0.90m, sendo que as hélices do ventilador são acionadas por um motor elétrico de 100HP. No circuito fechado onde estão localizadas as hélices, é possível produzir dois tipos de escoamentos: uniforme e turbulento, com intensidades de turbulência de 0.4% e 11%, respectivamente, obtidos com o uso de uma grelha.

As simulações no túnel de vento foram realizadas com modelos estáticos para determinação dos coeficientes aerodinâmicos para a configuração do tabuleiro isolado, bem como para os casos de interferência (Núñez *et al.* 2018). A seção transversal média de um dos modelos foi instrumentada com 54 tomadas de pressão estática e os coeficientes aerodinâmicos foram calculados baseados em uma aquisição de pressão ao longo de 8s, em 512Hz.

3. INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA

Algumas das configurações estudadas experimentalmente foram também investigadas numericamente empregando-se o algoritmo *Characteristic-Based Split* (CBS) em uma formulação de elementos finitos (Zienkiewicz and Codina 1995; Nithiarasu and Codina and Zienkiewicz 2006; Linn and Awruch 2017). Conjuntamente, para capturar efeitos de turbulência no escoamento, o Método da Simulação das Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation - LES*) é incorporado no algoritmo CBS (Linn and Awruch 2016). As simulações foram realizadas empregando-se um método explícito, com elementos triangulares lineares e o modelo de Smagorinsky dinâmico para o modelo LES.

Foram consideradas as dimensões do modelo reduzido na simulação. O escoamento considerado é uniforme, com número de Mach = 0.1 e número Reynolds = 5×10^4 . Empregou-se um domínio computacional circular de raio igual a 100 vezes o tamanho da largura do tabuleiro. As malhas empregadas possuem tamanho mínimo das arestas de 0.001m, sendo a região no entorno do contorno do tabuleiro mais refinada.

4. TABULEIRO ISOLADO

O tabuleiro isolado foi testado no túnel de vento para a incidência do vento sobre a borda superior para 17 diferentes ângulos de ataque entre -8° e $+8^\circ$ (Fig. 3). Os coeficientes aerodinâmicos de arrasto C_D e de sustentação C_L são investigados, sendo eles definidos por:

$$C_D = F_D / (q_0 B) \quad ; \quad C_L = F_L / (q_0 B) \quad (1)$$

onde F_D e F_L e são a força de arrasto e de sustentação, respectivamente; $q_0 = \rho_\infty V_\infty^2 / 2$ é a pressão dinâmica referente à de corrente livre que possui massa ρ_∞ e velocidade V_∞ ; e B é a largura do tabuleiro da ponte. As forças de arrasto e de sustentação são calculadas por integração dos coeficientes de pressão médio \bar{c}_p medidos no tabuleiro.

Os coeficientes determinados são apresentados na Fig. 3, onde o coeficiente de arrasto C_D varia entre 0.08 e 0.24 e o coeficiente de sustentação C_L se apresenta variações significativas entre o caso de escoamento suave e turbulento.

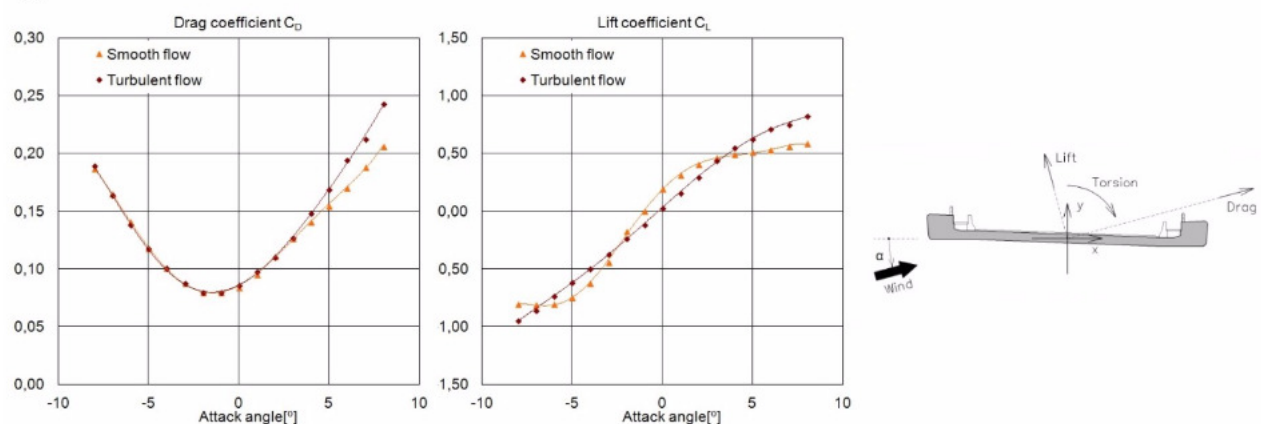


Figura 3. Coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de incidência do vento sobre a borda superior do tabuleiro isolado.

La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

O caso de ângulo de ataque nulo foi simulado numericamente. Nesta simulação, o coeficiente de arrasto obtido foi de $C_D = 0.076$ e o de sustentação $C_L = 0.072$, enquanto que os valores experimentais foram $C_D = 0.084/0.086$ e $C_L = 0.192/0.023$ para os casos de escoamento suave e turbulento, respectivamente (Tab. 1). Os coeficientes de pressão média obtidos em túnel e vento são comparados com o resultado numérico na Fig. 4. Embora o resultado numérico considere o escoamento suave, a distribuição dos coeficientes de pressão assemelha-se ao caso experimental turbulento, com inversão do sinal do coeficiente de pressão ao longo da pista de rolamento do tabuleiro. Disto resulta que o coeficiente aerodinâmico de sustentação também se aproxima mais do caso experimental turbulento.

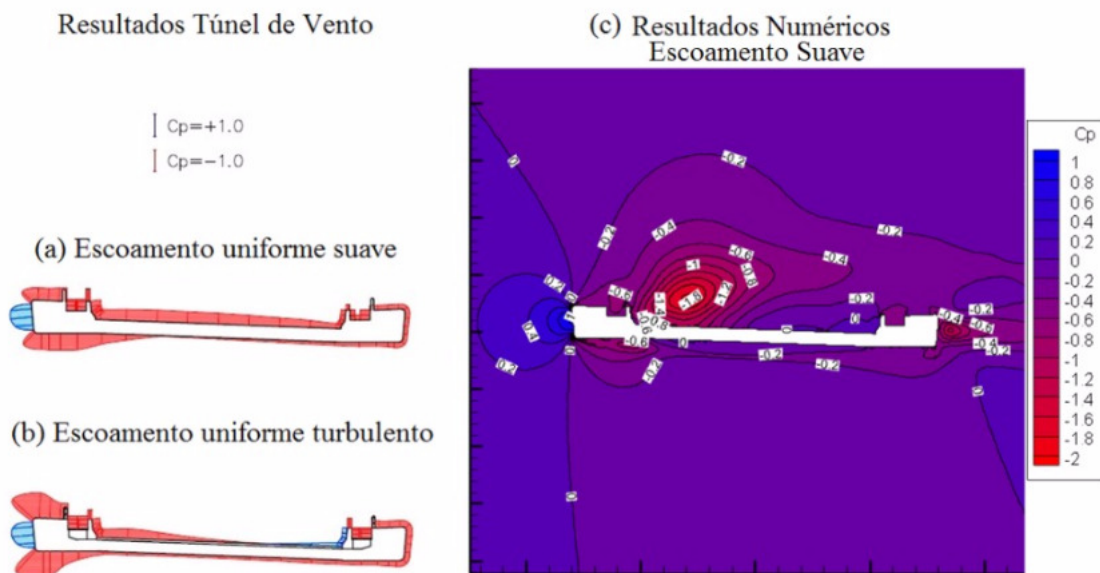


Figura 4. Coeficientes de pressão média para o tabuleiro isolado.

5. INTERFERÊNCIA

Foram analisados dois casos de interferência neste trabalho. O primeiro é o caso de dois tabuleiros distanciados horizontalmente do valor $1.5B$ (onde B é a largura do tabuleiro), e o segundo com valor $2B$, ambos para ângulo de ataque nulo, conforme indicado na Fig. 5.

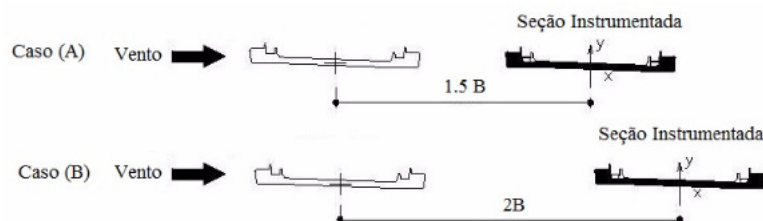


Figura 5. Casos de interferência analisados.

Os coeficientes aerodinâmicos encontram-se indicados na Tab. 1. Na Tab. 2, são indicados os fatores de interferência obtidos para cada coeficiente, calculados dividindo-se o coeficiente obtido na condição de interferência pelo valor obtido no caso do tabuleiro isolado.

La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

Os coeficientes de pressão média obtidos em túnel de vento são comparados com os resultados numéricos nas Fig. 6 e 7.

Tabela 1. Coeficientes aerodinâmicos obtidos via Túnel de Vento (TV) e numericamente.

Caso	C_D TV. Suave	C_D TV. Turbul.	C_D Numérico	C_L TV. Suave.	C_L TV. Turbul.	C_L Numérico
Tabuleiro Isolado	0.084	0.086	0.076	0.192	0.023	0.072
Interferência (A)	0.052	0.060	0.043	-0.016	0.042	0.014
Interferência (B)	0.052	0.065	0.045	0.016	0.065	0.018

Tabela 2. Fatores de interferência obtidos via Túnel de Vento (TV) e numericamente.

Caso	I_D TV. Suave	I_D TV. Turbul.	I_D Numérico	I_L TV. Suave.	I_L TV. Turbul.	I_L Numérico
Tabuleiro Isolado	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Interferência (A)	0.62	0.70	0.56	-0.08	1.82	0.19
Interferência (B)	0.62	0.76	0.59	0.08	2.82	0.49

Resultados Túnel de Vento

(c) Resultados Numéricos

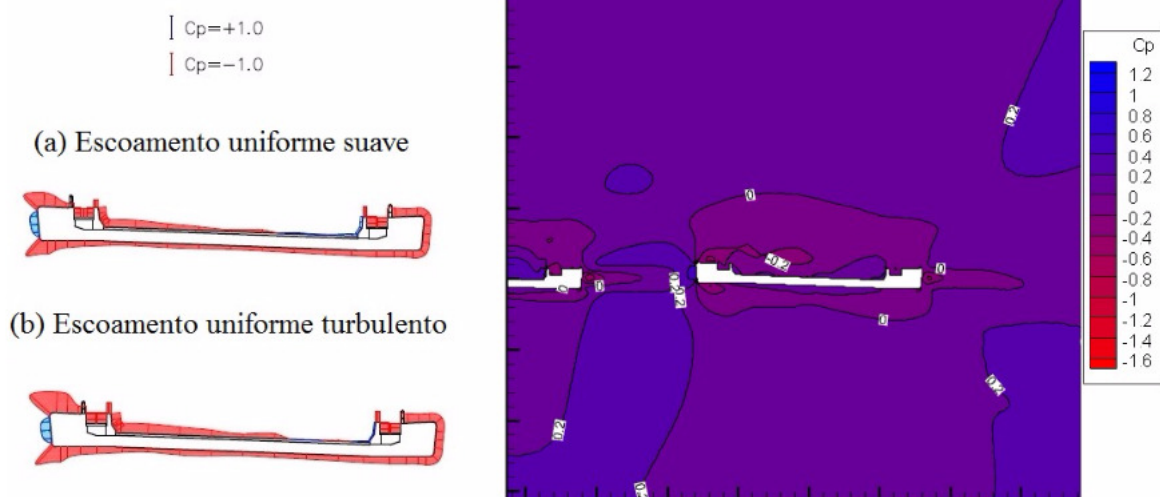


Figura 6. Coeficientes de pressão média para o caso (A) de interferência.

La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

Resultados Túnel de Vento

(c) Resultados Numéricos

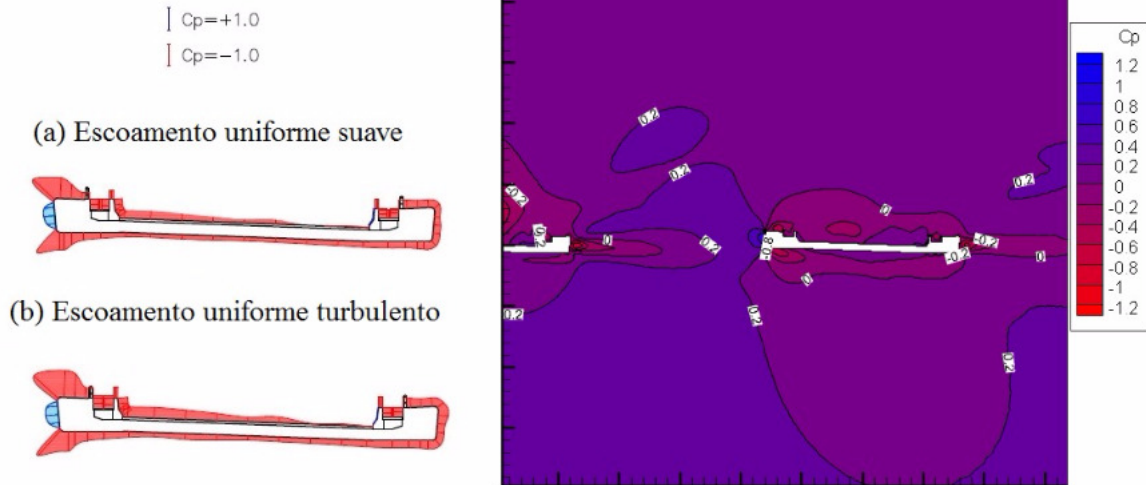
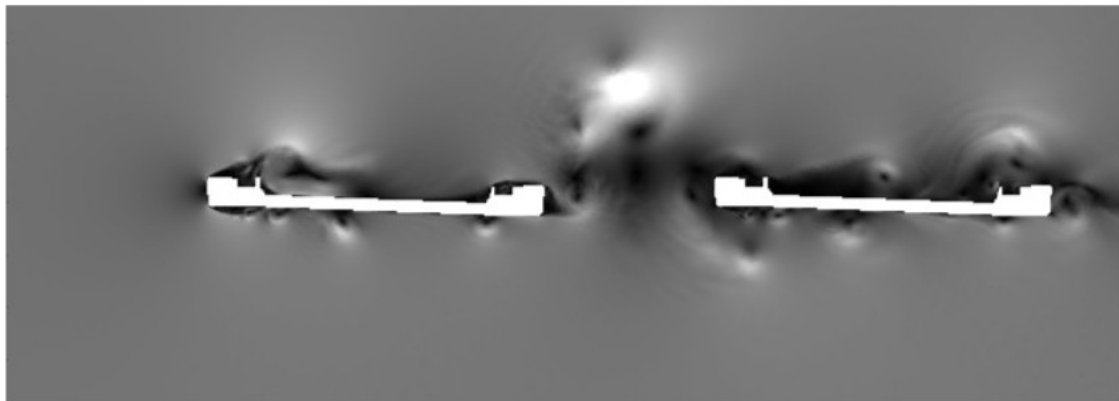


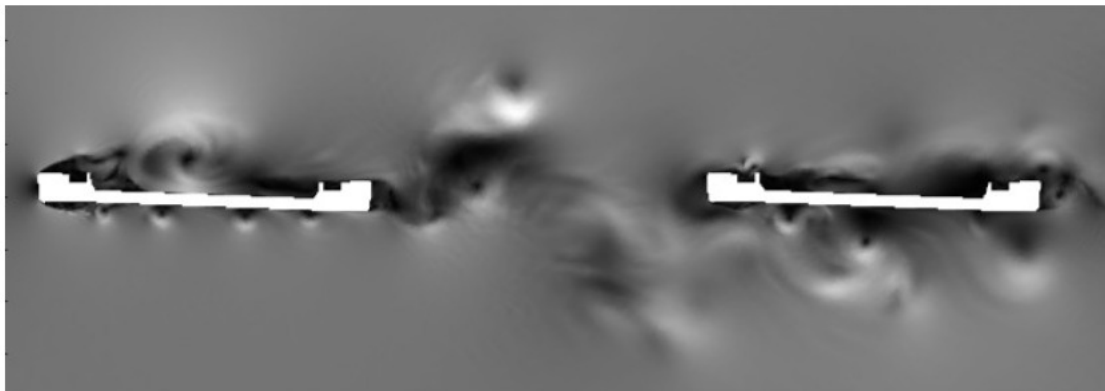
Figura 7. Coeficientes de pressão média para o caso (B) de interferência.

Na Fig. 8 é apresentado o campo de velocidades instantâneas obtidos numericamente para os dois casos de interferência.

O coeficiente de arrasto medido no tabuleiro instrumentado é reduzido com relação ao caso do tabuleiro isolado em ambas as configurações de interferência (A) e (B). Já para o caso do coeficiente de sustentação, cada um dos casos de interferência indicaram uma tendência diferente, a qual varia também com relação ao tipo do escoamento.



(A)





XXXVIII

Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

(B)

Figura 8. Campo de velocidades instantâneas obtido numericamente para o escoamento nos casos de interferência (A) e (B).

6. CONCLUSÕES

O estudo de interferência do comportamento aerodinâmico para tabuleiros foi apresentado neste trabalho para o caso de tabuleiros afastados horizontalmente. Foi apresentada a solução experimental via túnel de vento e a solução numérica. A interferência altera os coeficientes aerodinâmicos do tabuleiro à sotavento, em alguns casos aumentando e em outros reduzindo estes valores. A fenomenologia envolvida é complexa e vários outros fatores também devem ser investigados, tais como diferentes posicionamentos, condições de escoamento e geometria dos tabuleiros. O presente trabalho apresentou também a possibilidade do emprego conjunto de técnicas numéricas para caracterização do escoamento desenvolvido. Embora o modelo computacional empregado seja bidimensional, eliminando efeitos tridimensionais do escoamento, assim como alguns detalhes geométricos como o guarda-corpo foram desconsiderados, os coeficientes aerodinâmicos obtidos são razoavelmente próximos dos obtidos experimentalmente, principalmente para o coeficiente de arrasto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ostenfeld, K.H. and Larsen, A. (1992). Bridge engineering and aerodynamics. Proceeding of 1st Int. Symp. Aerodyn. of Large Bridges, Copenhagen, Denmark, Feb.
- Miyata, T. and Yamaguchi, K. (1993). Aerodynamics of wind effects on the Akashi Kaikyo Bridge. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 48, issue 2-3, p. 287-315.
- Honda, A. and Shiraishi, N. and Matsumoto, M. and Fuse, Y. and Sumi, K. and Sasaki, N. (1993). Aerodynamic stability of Kansai International Airport access bridge. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 49, issue 1-3, p. 533-542.
- Larsen, S.V. and Astiz, M.A. and Larose, G.L. (2000). Aerodynamic interference between two closely spaced cable supported bridges. Proceeding of 4th Int. Colloq. Bluffy Body Aerodyn. and Applications, Bochum, Germany, Sep.
- Kimura, K. and Shima, K. and Sano, K. and Kubo, Y. and Kato, K. and Ukon, H. (2008). Effects of separation distance on wind-induced response of parallel box girders. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 96, issue 6-7, p. 954-962.
- Núñez, G.J.Z. and Loredó-Souza, A.M. and Rocha, M.M. and Bagatini-Cachuço, F. (2018). Aerodynamic behavior of a cable-stayed bridge section composed by inclined parallel decks. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 173, p. 156-170.
- Shirai, S. and Ueda, T. (2003). Aerodynamic simulation by CFD on flat box girder of super-long-span suspension bridge. *Journal of Wind Engineering*, v. 91, p. 279-290.
- Wang, Z.Y. and Plate, E.J. and Rau, M. and Keiser, R. (1996). Scale effects in wind tunnel modelling. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 61, issue 2-3, p. 113-130.
- Blessmann, J. (1989). The boundary layer wind tunnel of UFRGS. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, v. 10, p. 231-248.
- Zienkiewicz, O.C. and Codina, R. (1995). A general algorithm for compressible and incompressible flow – part I: The split, characteristic-based scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 20, p. 869-885.
- Nithiarasu, P. and Codina, R. and Zienkiewicz, O.C. (2006). The Characteristic-Based Split (CBS) scheme – a unified approach to fluid dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 60, p. 1514-1546.



XXXVIII

**Jornadas Sudamericanas
de Ingeniería Estructural**

Lima 2018



La Ingeniería Estructural: puente para el desarrollo e integración de América y el mundo

- Linn, R. V. and Awruch, A.M. (2017). Edge-Based anisotropic mesh adaptation of unstructured meshes with applications to compressible flows. *Engineering with computers*, v. 33, issue 4, p. 1017-1025.
- Linn, R. V. and Awruch, A.M. (2016). Large Eddy Simulation of turbulent compressible flows using the Characteristic-Based Split Scheme and mesh adaptation. *Proceeding of VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2016)*, Hersonissos, Crete Island, June.