

CARACTERIZAÇÃO DE FORÇAS AERODINÂMICAS ATRAVÉS DE MEDIÇÕES EM PROTÓTIPO

CHARACTERISATION OF AERODYNAMIC FORCES BASED ON PROTOTYPE MEASUREMENTS

Fernando Bastos*, Elsa de Sá Caetano**

*Bolsheiro, VIBEST - FEUP, Porto - Portugal.

**Professor Associado com Agregação, VIBEST - FEUP, Porto - Portugal.



RESUMO

O presente trabalho descreve uma análise comparativa das pressões e forças aerodinâmicas sobre o tabuleiro de uma estrutura, o viaduto da Grande Ravine, na ilha da Reunião, baseadas na medição em protótipo e nos ensaios seccionais em túnel de vento. Pretende-se com este estudo validar uma metodologia consagrada no projeto de estruturas flexíveis com base na monitorização do protótipo, evidenciando-se em particular a necessidade de adequadamente reproduzir em modelo físico as condições de turbulência do escoamento.

Palavras-chave: Aerodinâmica de pontes, Monitorização, Túnel de vento

ABSTRACT

The present work describes a comparative analysis of pressures and aerodynamic forces over the deck of Grande Ravine viaduct, at Reunion Island, based on full-scale measurements and wind tunnel tests of a sectional model. It is intended to use full-scale monitoring to validate the methodologies used in the design of slender structures, evidencing in particular the necessity of an adequate reproduction of flow turbulence conditions during physical model tests.

Key-words: Bridge Aerodynamics, Monitoring, Wind Tunnel

1. INTRODUÇÃO

O projeto de estruturas flexíveis envolve correntemente a caracterização dos efeitos aerodinâmicos e aeroelásticos através de ensaios de modelos reduzidos em túnel de vento. Contudo, a realização deste tipo de ensaios envolve algumas limitações relacionadas com a impossibilidade de reproduzir à escala todos os aspetos do comportamento dos protótipos. Refere-se em particular a impossibilidade de reprodução à escala do número de Reynolds, parâmetro adimensional que representa o cociente entre as forças de inércia e as forças de

viscosidade, e que tem um papel importante na definição das zonas de destacamento do fluido em torno de secções aerodinâmicas com formas arredondadas, logo na caracterização das forças aerodinâmicas sobre a estrutura.

Neste sentido, e tendo em conta os desenvolvimentos tecnológicos atuais em termos de instrumentação, análise e processamento de sinais e transmissão de dados, que permitem considerar fiável e realizável a monitorização contínua em protótipo, considera-se de maior utilidade a confrontação de resultados da caracteri-

zação das forças aerodinâmicas através de ensaios em túnel de vento com a caracterização em protótipo através da monitorização contínua da estrutura. Assim, apresenta-se neste trabalho um estudo desta natureza centrado no viaduto da Grande Ravine, localizado na ilha da Reunião.

Os resultados apresentados neste artigo referem-se à análise de registos correspondentes a um período de dois anos de monitorização contínua do protótipo por e à comparação com os dados obtidos através de ensaios realizados em túnel de vento de um modelo seccional.

2. O VIADUTO DA GRANDE RAVINE E O SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Com uma extensão de 288 m e formado por uma viga em caixão de secção aerodinâmica com 27m de largura, apoiada em bielas inclinadas a 20° (Fig. 1), o viaduto da Grande Ravine atravessa uma ravina com 320m de largura e uma profundidade de 170 m, localizando-se na ilha da Reunião no Oceano Índico, numa zona frequentemente afetada por ventos ciclónicos.

A limitada experiência relativa a estruturas com estas características, levou o Projetista, SETEC tpi, à instalação neste viaduto de um sistema de monitorização aerodinâmica. De acordo com a representação da Fig. 2, este sistema de monitorização inclui 4 anemómetros sónicos, 14 sensores de pressão distribuídos pelo perímetro de duas secções, 6 acelerómetros distribuídos em 3 secções da ponte segundo as direções transversal e vertical, 6 sensores de temperatura (4 externos e 2 internos), perfazendo um conjunto de 40 canais a amostrar em contínuo a uma frequência de 40Hz. Os dados colhidos são armazenados num computador no viaduto e posteriormente transferidos via FTP para um compu-



Fig. 1 – Viaduto da Grande Ravine

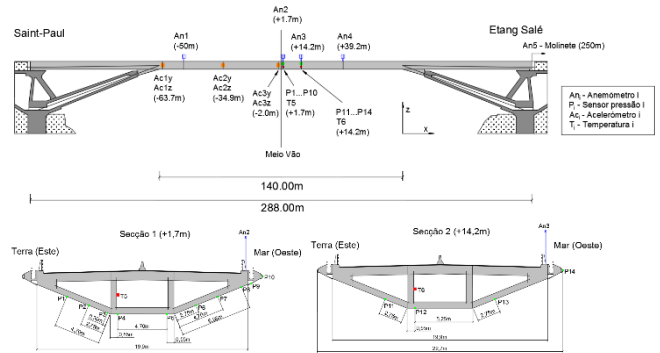


Fig. 2 – Viaduto da Grande Ravine: alçado, com identificação das secções instrumentadas, e secções instrumentadas com sensores de pressão

tador na FEUP e por sua vez tratados por software desenvolvido para o efeito em plataforma MATLAB (Bastos, 2015), visando o tratamento das componentes de cariz aerodinâmico conjuntamente com as componentes estruturais.

A colaboração entre a FEUP-Vibest, o SETEC e o laboratório francês CSTB-Nantes, no sentido de realizar a gestão e análise de dados colhidos em protótipo ao longo de um período de dois anos, levou à realização de um conjunto de ensaios seccionais em túnel de vento de camada limite atmosférica sobre um modelo à escala 1:55, com especial foco sobre a análise comparativa das forças aerodinâmicas atuantes sobre o tabuleiro da ponte.

Esta análise passou pela comparação entre as pressões registadas num conjunto de 14 sensores de pressão dispostos em dois anéis em secções próximas do meio vão da ponte e as pressões registadas em ensaios do modelo físico em túnel de vento em sensores localizados de forma homóloga e para condições de vento semelhantes (direção, incidência) e com diferentes intensidades de turbulência. Na Fig. 3 podem ver-se representadas as secções instrumentadas, bem como um exemplo dos coeficientes de força obtidos a partir destes estudos.

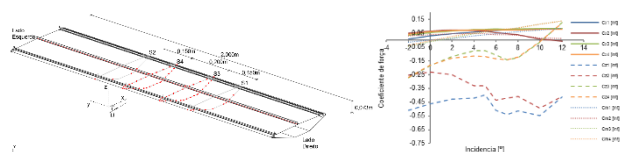


Fig. 3 – Viaduto da Grande Ravine: ensaios em túnel de vento.

3. MEDIÇÃO DE FORÇAS EM PROTÓTIPO

Nesta secção são apresentados os resultados do processamento dos registos no período de 24 meses (entre 1 de janeiro de 2010 e 31 de dezembro de 2011) dos sensores de pressão instalados sobre o protótipo. Em coerência com os dados de vento já processados (Bastos 2015), os registos das pressões foram agrupados em intervalos de 10 minutos reamostrados a 20Hz.

Neste trabalho os registos de vento utilizados referem-se apenas aos anemómetros 2 e 3, próximos das secções S1 e S2 instrumentadas com sensores de pressão (ver Fig. 2).

3.1. Análise dos registos das pressões

A observação dos dados em bruto recolhidos no viaduto evidenciou um desvio crescente no tempo. A análise deste desvio aponta para um mau funcionamento do sensor de pressão estático usado como referência, tendo sido observado que este se mantém aproximadamente constante para os intervalos de 10 minutos utilizados no processamento dos sinais. Para eliminar este desvio dos registos, foram selecionados dados de pressão correspondentes a intervalos de amostragem de 10 minutos associados a um valor médio da velocidade de vento inferior a 0.4m/s. Para esta gama de velocidades, os sensores de pressão não têm capacidade de resposta, fruto da truncatura numérica imposta pelo software de aquisição. Dada a existência de um número escasso de valores nesta gama particular de velocidade de vento, foi realizada ainda uma interpolação entre os pontos existentes, com o objetivo de extrair pontos igualmente espaçados. A curva ajustada a estes pontos representa o desvio dos dados, que poderá posteriormente ser removido. Contudo, verificou-se que este procedimento não permitiu remover completamente o desvio. A observação dos sinais mostrou que tal facto se deve à presença de um número significativo de picos nos registos das pressões, sendo estes associados à entrada dos veículos no viaduto. Este fenómeno pode ver-se ilustrado nos registos apresentados na Fig. 4, pelo que se pode concluir que os

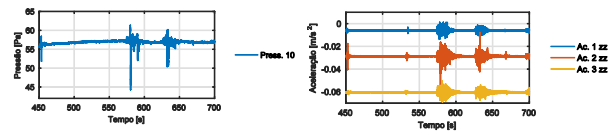


Fig. 4 – Exemplo da entrada de veículos no viaduto: (a) registos das pressões e (b) registos das acelerações colhidos em simultâneo.

sensores de pressão não são sensíveis apenas ao vento de baixa intensidade, mas também à vibração estrutural provocada pelo tráfego sobre a ponte. Os picos esporádicos registados nos dados afetam consideravelmente a determinação do “offset” registado nos sinais, requerendo por esse motivo a sua remoção.

Neste contexto, um procedimento automático foi desenvolvido tendo por objetivo remover os picos dos sinais dos sensores de pressão registados para velocidades inferiores a 0,4 m/s. Dois critérios de remoção foram impostos: a taxa de variação do sinal entre pontos consecutivos tem de ser negativa e o máximo absoluto dos picos deverá ser maior do que quatro vezes o desvio padrão do intervalo. Desta forma, os dados das pressões registados para valores da velocidade média inferior a 0.4m/s foram selecionados e os picos de pressão removidos, até à estabilização da média e do desvio padrão dos registos das pressões entre iterações sucessivas. A diferença entre as pressões obtidas após a remoção dos picos e as pressões colhidas em bruto dá então origem à curva de correção necessária para a remoção do “offset” global causado pelas perturbações induzidas pelo tráfego sobre o viaduto.

A aplicação da metodologia acima descrita conduziu a resultados positivos, já que as pressões ficaram escaladas em relação a uma pressão de referência. Contudo, nota-se que os efeitos do tráfego não foram inteiramente removidos dos registos das pressões, sendo este facto evidente no conteúdo nas frequências mais elevadas das estimativas espectrais dos registos das pressões (Bastos, 2015).

A implementação do método descrito conduziu aos dados de pressão apresentados na Fig. 5, onde se pode observar a variação com a direção e incidência do vento das pressões escaladas correspondentes a vento médio superior a 5m/s.

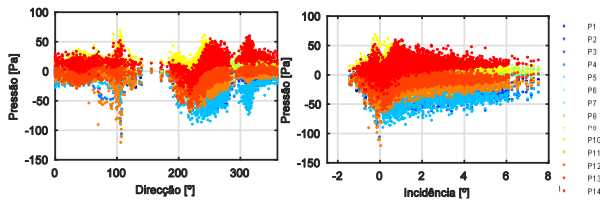


Fig. 5 – Variação das pressões com a (a) direção e incidência do vento.

A observação da Fig. 5 denota uma grande dispersão na distribuição das pressões, tendo sido registados valores mais elevados nas presas de pressão P10 e P14 (ver Fig. 2) para a gama de direções centrada em 250°, coincidente com a direção do vento de mar e com uma incidência média de 1,2°.

3.1. Medições em protótipo vs medições em túnel de vento

A avaliação dos coeficientes de pressão é baseada na equação

$$C_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1)$$

onde a velocidade U medida pelos anemómetros 2 e 3, localizados nas mesmas secções do viaduto em que se encontram os sensores de pressão, foi utilizada no processo de adimensionalização.

Os coeficientes de pressão são calculados com base no princípio de que as séries temporais de vento são estacionárias, i.e., estas não apresentam variação substancial de velocidade, intensidade ou direção. Desta forma se garante que as pressões medidas apenas variam devido à turbulência ou a possíveis fenómenos de libertação de vórtices. Considerando adicionalmente que a resposta de interesse nos registos de pressões ocorre apenas para velocidades de vento mais importantes, apenas foram retidos os registos de pressões correspondentes a velocidades superiores 7,5m/s (Bastos, 2015).

A Fig. 6 apresenta a variação dos coeficientes de pressão com as componentes médias da velocidade, direção e incidência do vento.

O posicionamento dos anemómetros no tabuleiro e a configuração adotada para a distribuição dos sensores de pressão no contorno da secção do viaduto são adequados e suficientes para caracterizar as

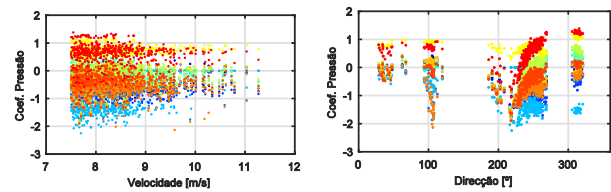


Fig. 6 – Variação dos coeficientes de pressão com a componente média da (a) velocidade e direção, para ventos superiores a 7.5m/s.

forças do vento proveniente do mar, mas insuficientes para caracterizar as forças do vento proveniente de terra, favorecendo desta forma a análise das pressões na direção normal ao viaduto e para vento de mar.

Paralelamente, ambos os estudos conduzidos, na fase de conceção (Delaunay e Sabre, 2002; Barre, 2002) e, posteriormente, em protótipo (Bastos, 2015), coincidem em definir a direção predominante de ocorrência do vento coincidente com a correspondente ao vento de mar, na direção perpendicular ao viaduto.

Por estas razões, a estimativa dos coeficientes de força é apresentada tendo por base a análise das pressões para vento de mar, i.e., direção média 250°, com uma variação angular de $\pm 7,5^\circ$ e intensidade superior a 7,5m/s.

Os coeficientes de força aerodinâmica são avaliados com base nas seguintes equações,

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 BL} \quad (2)$$

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 BL} \quad (3)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2 L} \quad (4)$$

em que o termo relativo às forças aerodinâmicas de arrastamento (F_x), de sustentação (F_z), ou de momento (M), é estimado a partir da integração das pressões p_i ao longo do perímetro da secção do tabuleiro através das equações

$$F_x = \sum_{i=1}^N \cos \alpha_i \cdot p_i \cdot \Delta l_i \quad (5)$$

$$F_z = \sum_{i=1}^N \sin \alpha_i \cdot p_i \cdot \Delta l_i \quad (6)$$

$$M = \sum_{i=1}^N F_z \cdot d_{xi} + \sum_{i=1}^N F_x \cdot d_{zi} \quad (7)$$

Nestas equações, α_i representa o ângulo com a horizontal do painel i de comprimento Δl_i do tabuleiro, e d_{zi} a distância entre o ponto de aplicação da pressão e o ponto de equilíbrio de forças no respetivo sistema de eixos da secção.

Neste contexto, para a secção do protótipo consideraram-se as seguintes dimensões de referência $B=22,7m$ e $L=1m$. Esta secção foi discretizada em 123 painéis com dimensões variando entre $0,0440 \times 1m^2$ e $0,8745 \times 1m^2$. A Fig. 7 apresenta os pontos de referência utilizados bem com as unidades de medida normalizadas em função do perímetro.

Devido a ausência de dados, as pressões na face superior da secção foram consideradas iguais a 0.

A Fig. 8 apresenta a variação com as componentes médias da velocidade, direção e incidência dos coeficientes aerodinâmicos C_x , C_z e C_M obtidos para a secção S1 (com 10 presas de pressão) e S2 (com 4 presas de pressão) do tabuleiro do viaduto da Grande Ravine.

Da observação da Fig. 8 pode concluir-se que os coeficientes de força variam linearmente com a velocidade e com a direção, exibindo, no entanto, o coeficiente de sustentação C_z , uma dispersão bastante mais elevada. Esta dispersão pode ser devida à flutuação das forças aerodinâmicas em consequência da mudança de incidência, já que normalmente este coeficiente é mais sensível à alteração da incidência, ou por outro lado à flutuação das forças em consequência do destacamento do escoamento nas

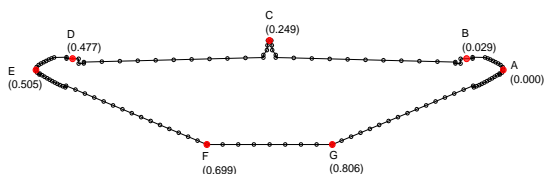


Fig. 7 – Esquema utilizado na integração das pressões e avaliação dos coeficientes de força C_x , C_z e C_M .

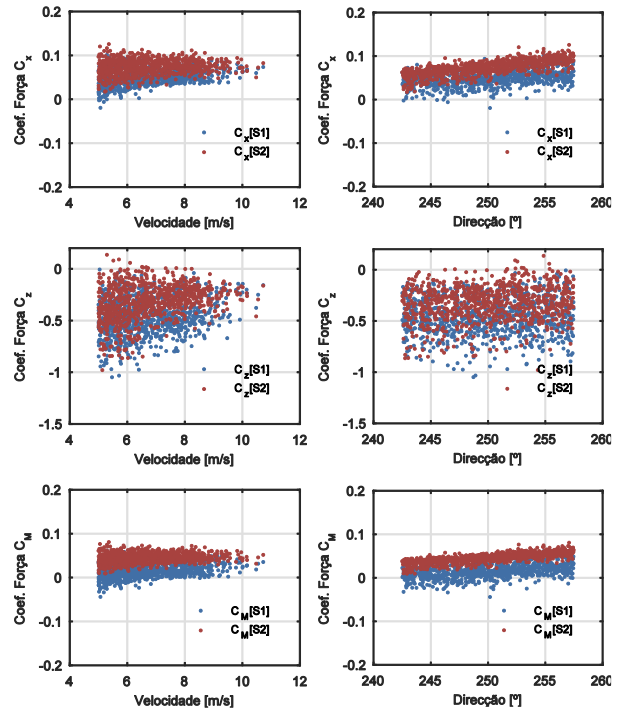


Fig. 8 – Coeficientes de força estimados através da integração das pressões no perímetro das secções S1 (azul) e S2 (vermelho). Variação com a (a) intensidade e (b) direção do vento.

arestas inferiores da secção, i.e., à influência da turbulência e da libertação de vórtices gerada pela forma da secção transversal.

Os valores médios dos dados apresentados na Fig. 8 conduziram aos valores sumarizados na Tabela 1 representados em função das respetivas incidências.

Os valores registados para a incidência e os coeficientes de arrastamento C_x e momento C_M são muito similares para as duas secções instrumentadas do protótipo. No entanto, os coeficientes de sustentação exibem alguma discrepância. As diferenças registadas são principalmente devidas à discretização adotada para os sensores de pressão no caso da secção S2, manifestamente insuficiente para caracterizar a componente vertical da força aerodinâmica.

As configurações dos coeficientes de pressão obtidas a partir das medições em protótipo ao longo do perímetro das secções S1 e S2 do tabuleiro do viaduto da Grande Ravine são agora comparadas na Fig. 9 com os correspondentes valores extraídos dos ensaios em túnel de vento para as velocidades médias de escoamento na câmara de ensaio

Tabela 1 – Valores médios da incidência e coeficientes de força para as secções instrumentadas S1 e S2 do viaduto da Grande Ravine

	Valor Médio S1(10p)	Valor Médio S2(4p)
Incidência [°]	1,208	1,109
C_x	0,057	0,076
C_z	-0,412	-0,260
M	0,021	0,048

de 6m/s e 12m/s. Os resultados de ambas as abordagens são representados tendo em conta a dimensão do contorno da secção normalizado em função do perímetro (Fig. 7).

A análise da Fig. 9 mostra que os coeficientes de pressão ao longo do perímetro das secções S1 e S2 extraídos das medições em protótipo apresentam maior proximidade aos resultados obtidos a partir dos ensaios em túnel de vento realizados sob condições de elevada turbulência.

Apesar da limitação em termos de discretização, pode concluir-se que a instrumentação da secção S1 é suficiente para caracterizar os efeitos de descolamento do escoamento das arestas inferiores para o vento de mar. Mais se observa que, para incidências próximas da horizontal, o escoamento tende a destacar-se da aresta montante (ponto G na Fig. 7 à distância normalizada de 0.806m na Fig. 9(a)).

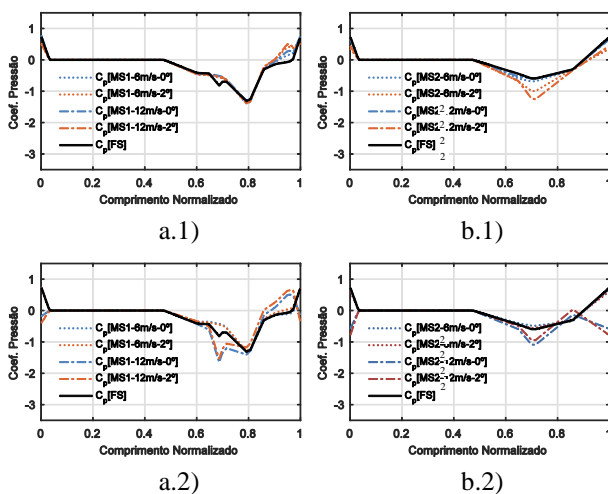


Fig. 9 - Variação dos coeficientes de pressão ao longo do perímetro normalizado da secção S1 (a); e S2 (b), obtidos a partir da monitorização em protótipo (linha sólida) e de ensaios em túnel de vento (linha interrompida) sob condições (1) turbulentas; e (2) uniformes

Para condições de baixa turbulência, a magnitude dos coeficientes de pressão registados na aresta inferior a montante é superior nos ensaios em túnel de vento à registada em protótipo. Este efeito é essencialmente devido às condições reais do escoamento, que apresentam valores de turbulência superiores aos registados em túnel de vento, afetando desta forma o descolamento do escoamento na aresta inferior da secção. Consequentemente, o ponto de contacto tende a aproximar-se da aresta inferior a jusante (ponto F da Fig. 7, à distância normalizada de 0.699m na Fig. 9(a)), conduzindo ao aumento da magnitude da pressão nesta aresta. Este efeito pode também ser observado na magnitude dos coeficientes de sustentação, que decrescem para condições de turbulência mais elevada.

A Fig. 10 apresenta os coeficientes aerodinâmicos C_x , C_z e C_M para as duas secções instrumentadas S1 e S2 estimados a partir dos ensaios em túnel de vento e da monitorização em protótipo. Os dados apresentados relativos aos ensaios em túnel de vento foram obtidos para duas gamas de velocidade média na câmara de ensaio, 6m/s (pontado) e 12m/s (tracejado). Os marcadores representam a síntese dos resultados obtidos a partir da monitorização em protótipo.

Os resultados observados da monitorização em protótipo estão próximos dos obtidos a partir dos ensaios em túnel de vento para ambas as velocidades testadas. Contudo, os dados correspondentes a condições de turbulência mais elevada apresentam maior aproximação aos valores obtidos em protótipo.

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho é apresentado um estudo detalhado visando a caracterização das forças aerodinâmicas atuantes sobre o tabuleiro do viaduto da Grande Ravine, tendo por base medições em verdadeira grandeza. A partir da observação dos registos de pressões recolhidos durante o período de 2 anos, foi possível observar a proporcionalidade entre os registos de vento e as pressões.

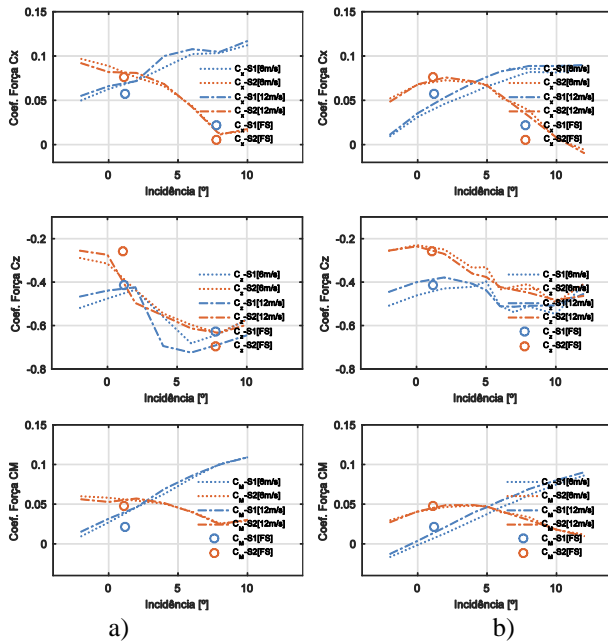


Fig. 10 – Comparação dos coeficientes de força estimados da monitorização em protótipo e dos ensaios em túnel de vento sob condições de escoamento (a) uniforme e (b) turbulento.

Foi ainda possível observar uma boa aproximação entre a distribuição de pressões ao longo do contorno da secção no protótipo e em modelo reduzido na situação de ensaio correspondente a escoamento turbulento. Mais se concluiu que os registos de pressões na secção instrumentadas com 10 sensores de pressão são representativos, conduzindo a resultados bastante satisfatórios, próximos dos obtidos em secções com maior discretização.

Através de um procedimento de combinação de resultados em protótipo com resultados em túnel de vento nas zonas não instrumentadas da secção, foi ainda possível verificar a semelhança entre coeficientes de força estimados com base em ensaios em protótipo e em túnel de vento, o que permite validar esta técnica de ensaio para o caso de estudo descrito.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da colaboração entre a FEUP-ViBest, o gabinete SETEC.tpi e o laboratório CSTB – Nantes. O primeiro autor agradece o apoio concedido pela FCT através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/46126/2008.

REFERÊNCIAS

Bastos, F., 2015. Aerodynamic behaviour of long Span structure. Numerical analysis and experimental validation based on full-scale measurements, 398p., Tese de Doutoramento, Universidade de Porto.

Delaunay, D. e Sabre, M. 2002. EN-CAPE 02.109 C-V1 – Calcul numérique du vent sur quatre sites de la route des Tamarins à la Réunion, CSTB, Nantes.

Barre, C. 2002. EN-CAPE 02.141 C-V0 – Caractérisation du vent sur 4 sites de la route des Tamarins à la Réunion – Étude en soufflerie atmosphérique sur maquettes topographiques, CSTB, Nantes.

