



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Investigação em Túnel de Vento do Comportamento Dinâmico de uma Ponte em Arco Metálico

Eduardo Gibbon Rosa¹, Marcelo Maia Rocha², Acir Mércio Loredo-Souza³, Mario Gustavo Klaus Oliveira⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / eduardo.gibbon@ufrgs.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / mmrocha@ufrgs.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / acir@ufrgs.br

⁴ Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento LTDA. / mariogustavo@vento-s.com

Resumo

Em geral, as pontes que apresentam grandes vãos são classificadas como estruturas suscetíveis à ação dinâmica do vento, seja pelos valores normalmente baixos referentes às frequências naturais dos primeiros modos de vibração ou pelo formato pouco aerodinâmico dos componentes da superestrutura, como os tabuleiros, por exemplo. Neste cenário, a investigação experimental de modelos reduzidos em túnel de vento atinge caráter praticamente obrigatório como etapa de projeto deste tipo de ponte, fornecendo informações que devem apontar quaisquer instabilidades que possam se manifestar na estrutura real. No presente trabalho, são apresentados os resultados da determinação da resposta transversal de uma ponte em arco metálico frente à ação do vento, com ênfase nas vibrações induzidas por vórtices. Os objetivos principais consistem na avaliação da velocidade crítica de desprendimento de vórtices e na medição das amplitudes de resposta. Para tal, foram construídos e ensaiados dois tipos de modelo reduzido: um modelo seccional e um modelo aeroelástico completo, nas escalas geométricas de 1:60 e 1:160, respectivamente. Os modelos foram ensaiados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, localizado no Laboratório de Aerodinâmicas das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para configurações de escoamento que admitem variação no ângulo de ataque e incidência do vento, na intensidade de turbulência e na taxa de amortecimento. Os resultados obtidos na conclusão do estudo mostram com clareza as regiões de amplificação de resposta associadas ao desprendimento de vórtices, permitem aferir as velocidades críticas que caracterizam a ocorrência deste fenômeno e evidenciam a queda na amplitude de resposta com o aumento da turbulência e do amortecimento do modelo.

Palavras-chave

Ação dinâmica do vento; Aerodinâmica de Pontes; Desprendimento de Vórtices; Túnel de Vento.

1. Introdução

As pontes de longos vãos são estruturas que apresentam uma série de desafios de projeto para os engenheiros estruturais e do vento. Aspectos como o avanço da tecnologia, desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas e maior diversidade de softwares para análise estrutural, por exemplo, contribuem para a existência de tabuleiros cada vez mais extensos, resultando em estruturas mais esbeltas e flexíveis, com baixos valores de frequências naturais nos primeiros modos de vibração e formato pouco aerodinâmico dos componentes da superestrutura, aumentando o potencial prejudicial dos efeitos dinâmicos da ação do vento.

De forma geral, a atuação do vento nas estruturas pode ser entendida pela composição de uma parcela estática, cujas diretrizes de determinação, no Brasil, seguem as disposições da NBR 6123 (ABNT, 1988) e de uma parcela dinâmica, que requer um tratamento mais complexo, devido aos diversos fenômenos aerodinâmicos relacionados. Segundo Arrol e Chatterjee (1981), os efeitos dinâmicos da atuação do vento podem ser classificados em dois grandes grupos: os que causam amplitudes limitadas de oscilação, como os fenômenos de desprendimento de vórtices e martelamento, e os que causam oscilações divergentes, como o galope e o drapejamento. O primeiro grupo é caracterizado por deslocamentos relativamente pequenos e com um limite máximo definido, ou seja, fazem com que a estrutura oscile até um determinado ponto, onde as amplitudes estagnam ou voltam a diminuir, causando problemas essencialmente relacionados aos estados limites de serviço; tais oscilações podem ser eliminadas a partir de alterações na seção transversal do tabuleiro e acréscimo de amortecimento estrutural, por exemplo, ou até mesmo incorporadas no projeto como forças estáticas equivalentes. O segundo grupo, por outro lado, não apresenta um limite definido nos deslocamentos que, uma vez estabelecidos, crescem progressivamente com potencial para colapsar a estrutura; tais oscilações devem ser, necessariamente, extinguidas na fase de projeto, afastando as velocidades associadas das velocidades do vento esperadas para o local de instalação.

Para Strømmen (2010), as origens dos efeitos dinâmicos do vento estão associadas com três principais razões: flutuações de pressão devidas à turbulência (martelamento), separação do escoamento na superfície de um corpo não-aerodinâmico (desprendimento de vórtices) e interação entre o movimento oscilatório desenvolvido na estrutura com o vento incidente (galope e drapejamento). Por mais que apresentem características distintas, em alguns casos esses efeitos podem influenciar uns aos outros, o que torna difícil a distinção de qual está, de fato, ocorrendo; as causas do colapso da Ponte Tacoma Narrows, em 1940, por exemplo, foram discutidas por muitos anos após o incidente, ilustrando a complexidade envolvida no tema: o que, inicialmente, fora descrito como um simples caso de ressonância causado por excitações periódicas devido ao desprendimento de vórtices, acabou sendo reconhecido, anos mais tarde, como um estado de instabilidade autoalimentada, definida como drapejamento (BILLAH e SCANLAN, 1991).

De qualquer forma, apesar de haver possibilidade de ocorrência simultânea, a literatura especializada lida com a diversidade de efeitos dinâmicos de maneira isolada. De acordo com Strømmen (2010), a grande razão para esta simplificação reside na observação de que, para a maior parte das estruturas da engenharia civil, cada fenômeno apresenta o seu máximo potencial (maiores amplitudes de oscilação), em diferentes faixas de velocidade do vento (Figura 1):

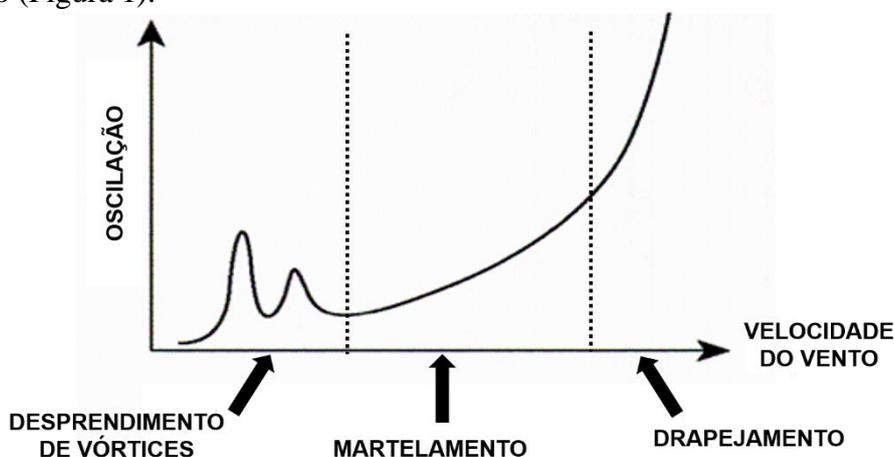


Figura 1 – Resposta típica relacionada a cada efeito dinâmico.

Como é possível observar, velocidades do vento mais baixas podem ser responsáveis por maiores amplitudes de resposta, o que ressalta a importância da investigação do fenômeno de desprendimento de vórtices. Este complexo tópico de dinâmica dos fluidos é discutido em diversos livros de engenharia do vento e de pontes, tais como Simiu e Scanlan (1996), Chen e Duan (1999), Strømmen (2010) e Holmes (2015); basicamente, a formação dos vórtices pode ser descrita como consequência de um ponto de estagnação na interface entre o fluido e a superfície da estrutura, a partir do qual resultam movimentos circulares em torno de um referencial (Figura 2), que, no momento em que passam a ser periódicos (Vórtices de Von Kàrmàn), induzem solicitações com potencial de causar deslocamentos consideráveis na estrutura.

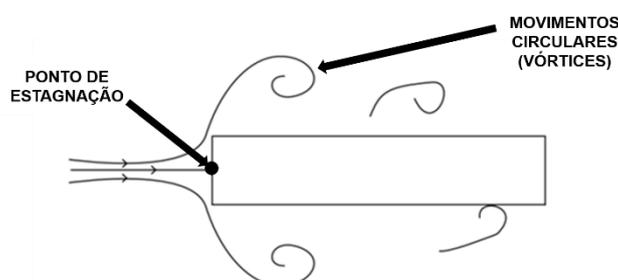


Figura 2 – Escoamento e formação de vórtices em uma seção genérica.

A frequência periódica de desprendimento de vórtices (f_v), obtida a partir do número de Strouhal (St), velocidade média do vento (V) e altura da seção transversal (D), pode ser destacada como o aspecto central acerca dos Vórtices de Von Kàrmàn (Equação 1):

$$f_v = \frac{St V}{D} \quad (1)$$

Enquanto a frequência de desprendimento de vórtices (f_v) se encontrar afastada da frequência natural da estrutura (f_n), esta deverá apresentar pouco ou nenhum movimento. Por outro lado, como é de se esperar em termos de análise dinâmica, quando a frequência de desprendimento de vórtices (f_v) se aproximar da frequência natural da estrutura (f_n), as máximas amplitudes de deslocamento são desenvolvidas. Sendo assim, introduz-se o conceito de velocidade crítica de desprendimento de vórtices (V_{cr}), definindo a velocidade do vento na qual as frequências mencionadas devem coincidir:

$$V_{cr} = \frac{f_n D}{St} \quad (2)$$

Usualmente, nos estudos que se propõem a estudar o desprendimento de vórtices, a velocidade crítica V_{cr} mostrada na Equação 2 é normalizada pelo produto $f_n D$, resultando na chamada velocidade crítica reduzida de desprendimento de vórtices ($V_{r,cr}$), cuja formulação, considerando o primeiro modo de vibração (f_n equivalente à frequência fundamental) é dada na Equação 3:

$$V_{r,cr} = \frac{1}{St} \quad (3)$$

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta os resultados da determinação da resposta transversal de uma ponte em arco metálico frente à ação dinâmica do vento, com ênfase nas vibrações induzidas por vórtices. Os objetivos principais consistem na avaliação da velocidade crítica de desprendimento e na medição das amplitudes de resposta, identificando o nível de correspondência com as proposições teóricas e destacando os principais parâmetros de influência.

2. Descrição dos modelos reduzidos

Para realização deste estudo, dois modelos reduzidos foram construídos: um modelo seccional e um modelo aeroelástico completo. Ambos foram submetidos a ensaios realizados no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para diferentes configurações de escoamento.

Por razões de confidencialidade, a ponte objeto de estudo neste trabalho é ficticiamente identificada como “Ponte A”. Esta apresenta vão livre de 172,70 metros e tabuleiro com seção transversal efetiva de 3,04 metros de altura (D) e 20,00 metros de largura (B); detalhes são mostrados na Figura 3 abaixo (dimensões em metros):

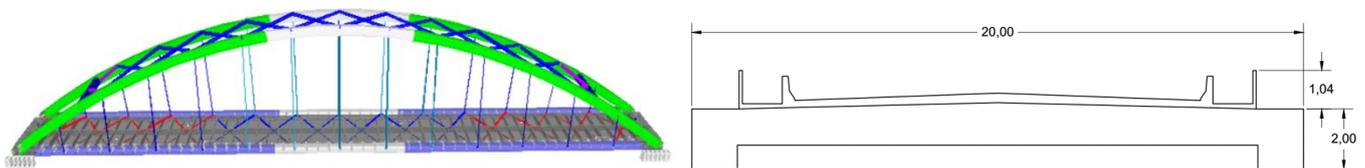


Figura 3 – Modelo em 3D (esquerda) e seção transversal do tabuleiro da “Ponte A” (direita).

As características dinâmicas da estrutura real e do modelo reduzido foram estimadas através de análise numérica e são apresentadas na Tabela 1. O modelo seccional foi concebido em escala geométrica de 1:60 (λ_L), com comprimento total de 1203 mm, escala de densidade de 1:1 (λ_ρ) e escala de frequência de aproximadamente 1:0,075 (λ_f). O modelo completo, por sua vez, foi construído com escala geométrica de 1:160 (λ_L), com comprimento total de 1080 mm, escala de densidade de 1:1 (λ_ρ) e escala de frequência de aproximadamente 1:0,106 (λ_f); como esperado em análises dimensionais, os demais parâmetros possuem escalas derivadas.

Tabela 1 – Características dinâmicas estimadas para estrutura real e modelos reduzidos.

Parâmetro	"Ponte A"	Modelo Seccional	Modelo Aero. Completo
Frequência natural vertical, f_{vert} (Hz)	0,74	9,88	6,95
Frequência natural torsional, f_{tors} (Hz)	1,08	15,04	9,77
f_{tors} / f_{vert}	1,46	1,52	1,41
Razão de amortecimento crítico vertical, ζ_{vert} (%)	-	$\approx 0,3\%$ (próprio) $< 2\%$ (adicional)	$\approx 1,1\%$ (próprio)
Massa por unidade de comprimento, m (kg/m)	23504,00	6,53	0,92
Inércia de massa por unid. de comp., i_m (kg m ² /m)	712131,00	0,05	0,001

Em termos de construção física e comportamento estrutural, o modelo seccional não apresenta novidades em relação ao que é normalmente realizado nas análises de pontes no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann: as características geométricas do tabuleiro são conferidas a partir de carenagens confeccionadas em impressora 3D e as características estruturais são ajustadas de acordo com posicionamento de um sistema de massas e molas nas extremidades do modelo; mais detalhes sobre construção dos modelos seccionais podem ser obtidos no trabalho de Rosa (2019).

Em contrapartida, na concepção do modelo aeroelástico completo, foi projetado um “esqueleto estrutural” (Figura 4), onde cada elemento possui uma função semelhante ao que se destina a estrutura real: cordões de aço como vigas longarinas, barras de teflon como vigas transversinas, tubos de alumínio como tirantes e chapa de aço recortada representando o arco metálico. Para ajuste da rigidez, os cordões de aço foram esticados de maneira a aproximar os modos de vibração e frequências naturais do modelo à estrutura real. Assim como no modelo seccional, as características geométricas são conferidas a partir de carenagens confeccionadas em impressora 3D (Figura 4).

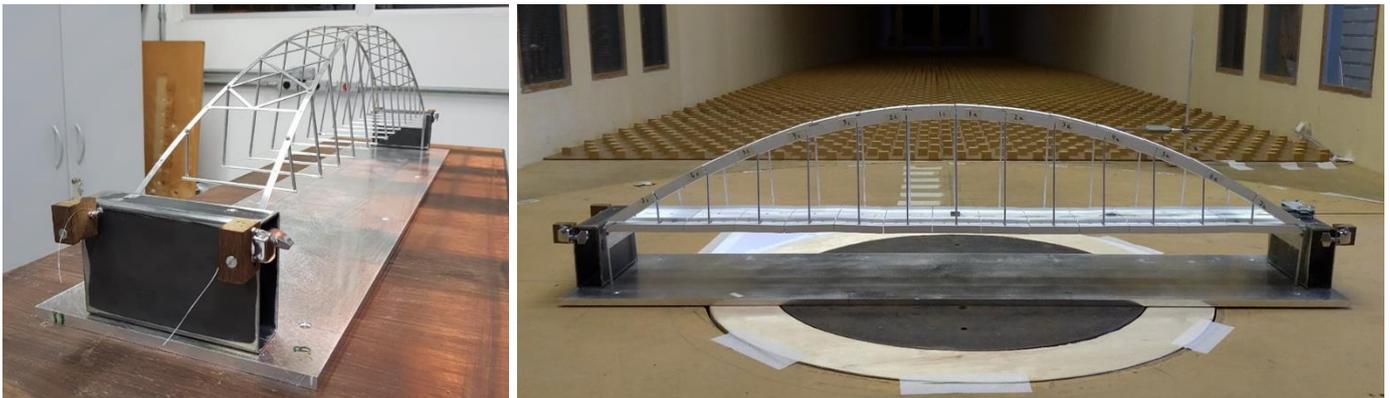


Figura 4 – Esqueleto estrutural (esquerda) e modelo aeroelástico completo (direita).

3. Resposta dinâmica do modelo seccional

Para a demonstração da resposta dinâmica do modelo seccional, são avaliadas quatro configurações distintas de escoamento: uniforme e suave com amortecimento próprio (Figura 5), uniforme e turbulento com amortecimento próprio (Figura 6), uniforme e suave com amortecimento adicional (Figura 7) e uniforme e turbulento com amortecimento adicional (Figura 8), todos com variação do ângulo de ataque (α) para -4° , 0° e 4° .

Na sequência de figuras, são ilustrados os resultados de amplitude reduzida de resposta vertical (valor RMS em vermelho e valor de pico em azul), onde a amplitude total de oscilação é normalizada pela altura total da seção transversal do tabuleiro, em relação à velocidade reduzida do vento, considerando como f_n a frequência fundamental da estrutura (primeiro modo de vibração vertical). Para efeitos de comparação, são calculadas as velocidades críticas teóricas de acordo com as Equações 2 e 3 (Tabela 2); uma vez que o número de Strouhal não foi determinado experimentalmente, utilizou-se a estimativa do EUROCODE (2005) para uma seção retangular genérica, resultando em St aproximadamente igual a 0,10.

Tabela 2 – Características dinâmicas estimadas para estrutura real e modelos reduzidos.

Velocidades críticas reduzidas de desprendimento de vórtices - Vr, cr	
Descrição	Valor
Primeiro modo de vibração vertical - $St = 0,10$ e $f_n = 0,74$	10,00
Segundo modo de vibração vertical - $St = 0,10$ e $f_n = 1,19$	16,08
Terceiro modo de vibração vertical - $St = 0,10$ e $f_n = 1,77$	23,92



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

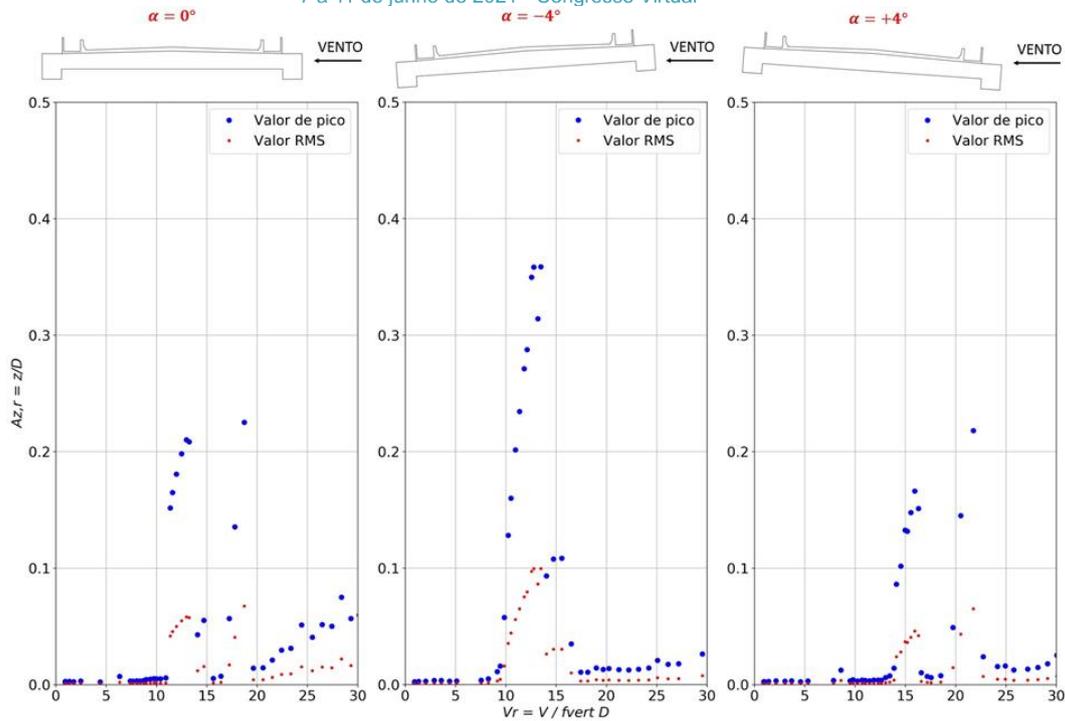


Figura 5 – Amplitudes reduzidas de resposta vertical ($A_{z,r}$) em função da velocidade reduzida do vento (V_r), para configuração de escoamento uniforme e suave e $\zeta_{vert} \cong 0,3\%$.

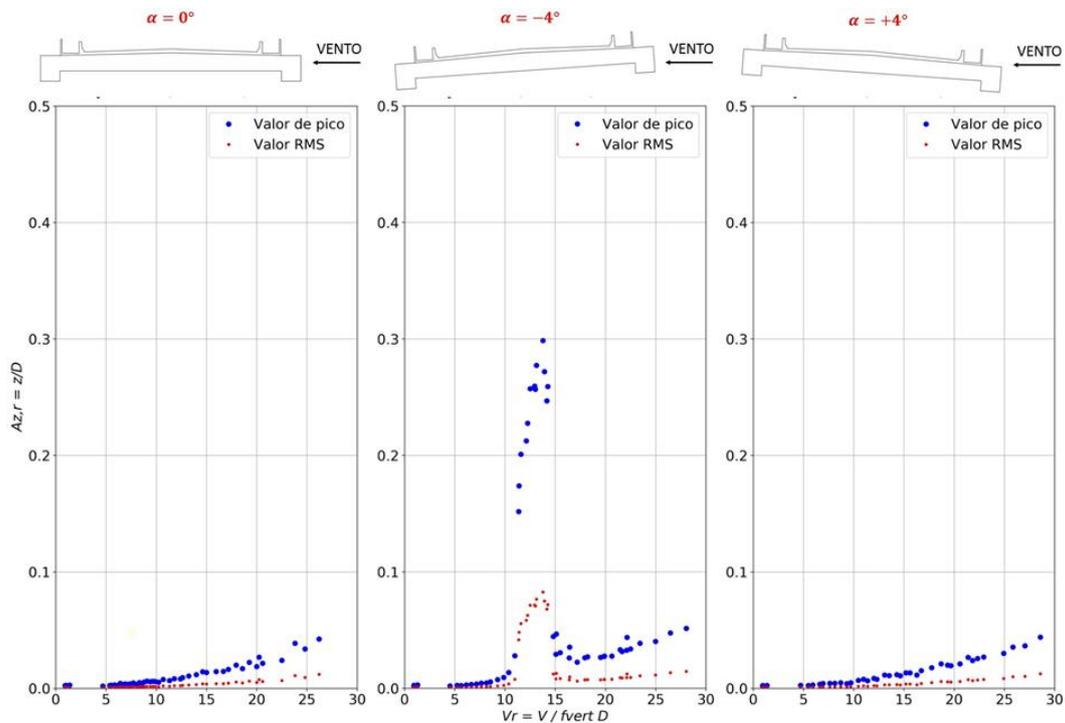


Figura 6 – Amplitudes reduzidas de resposta vertical ($A_{z,r}$) em função da velocidade reduzida do vento (V_r), para configuração de escoamento uniforme e turbulento e $\zeta_{vert} \cong 0,3\%$.



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

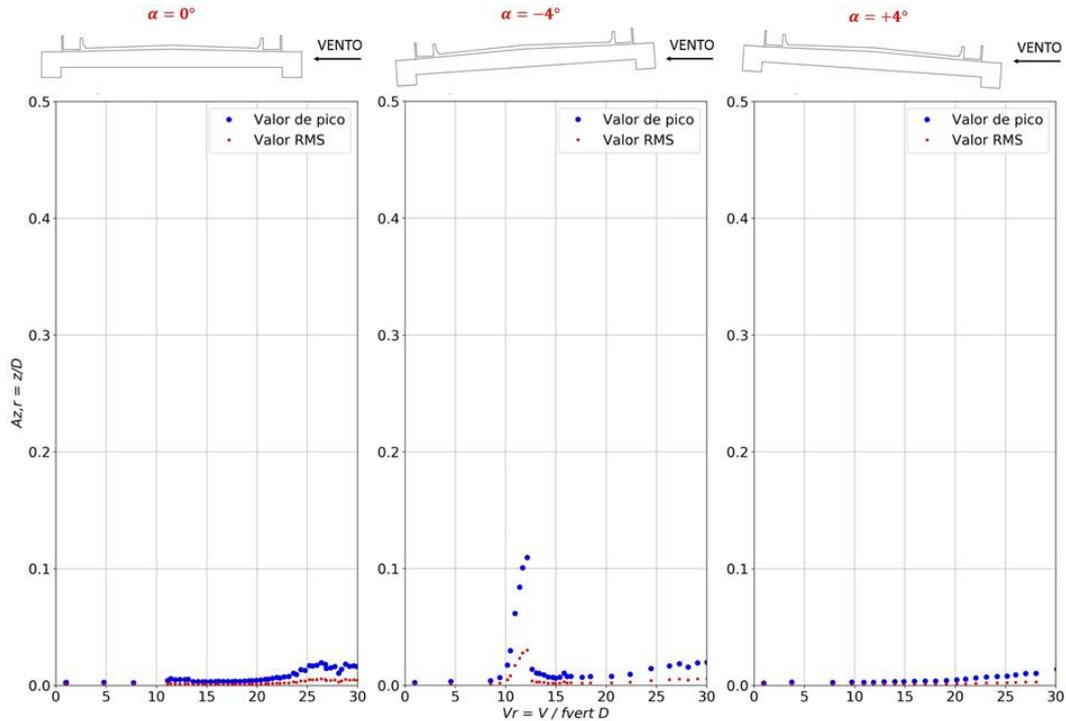


Figura 7 – Amplitudes reduzidas de resposta vertical ($A_{z,r}$) em função da velocidade reduzida do vento (V_r), para configuração de escoamento uniforme e suave e $\zeta_{vert} \cong 2\%$.

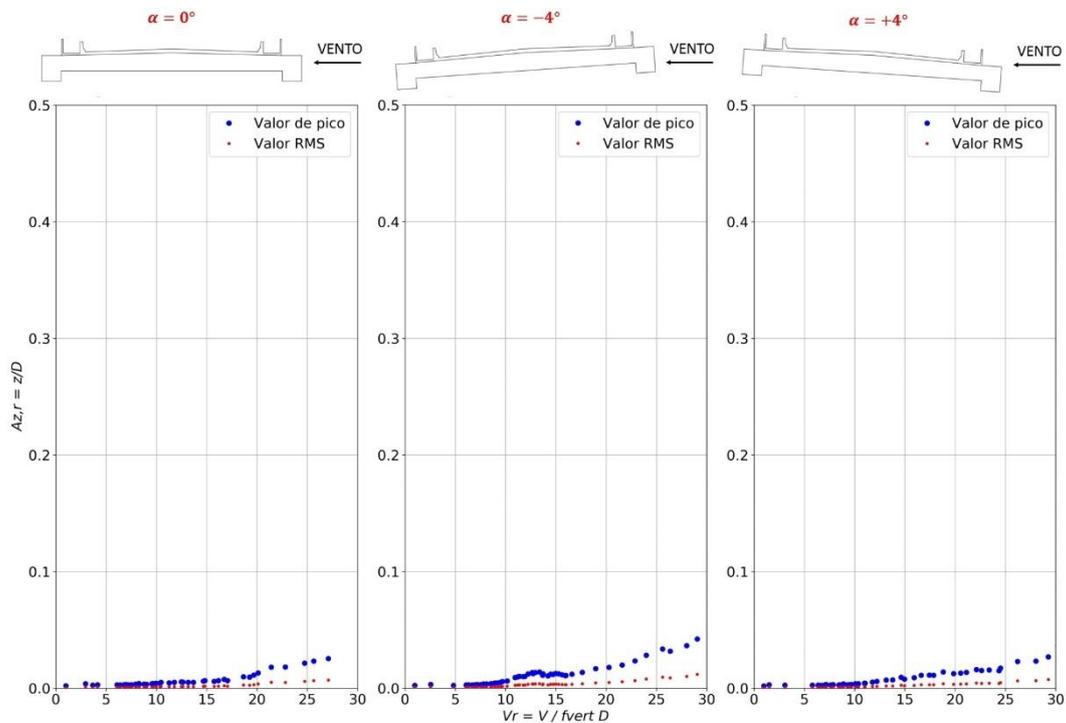


Figura 8 – Amplitudes reduzidas de resposta vertical ($A_{z,r}$) em função da velocidade reduzida do vento (V_r), para configuração de escoamento uniforme e turbulento e $\zeta_{vert} \cong 2\%$.

4. Resposta dinâmica do modelo aeroelástico completo

No caso do modelo aeroelástico completo, a apresentação de resultados ilustra a amplitude total de deslocamento obtida em 1/2 (em vermelho) e 1/4 (em azul) do vão, em termos de valores RMS (círculos menores) e de pico (círculos maiores).

Como a função principal deste modelo reduzido é investigar as instabilidades aerodinâmicas de forma global (escoamento que considera tabuleiro, tirantes e arco), somente o pior caso é apresentado (escoamento com alta intensidade de turbulência), para ângulos de incidência (β) iguais a 0° e 30° , conforme mostram as Figuras 9 (deslocamento vertical, A_z) e 10 (deslocamento lateral, A_y):

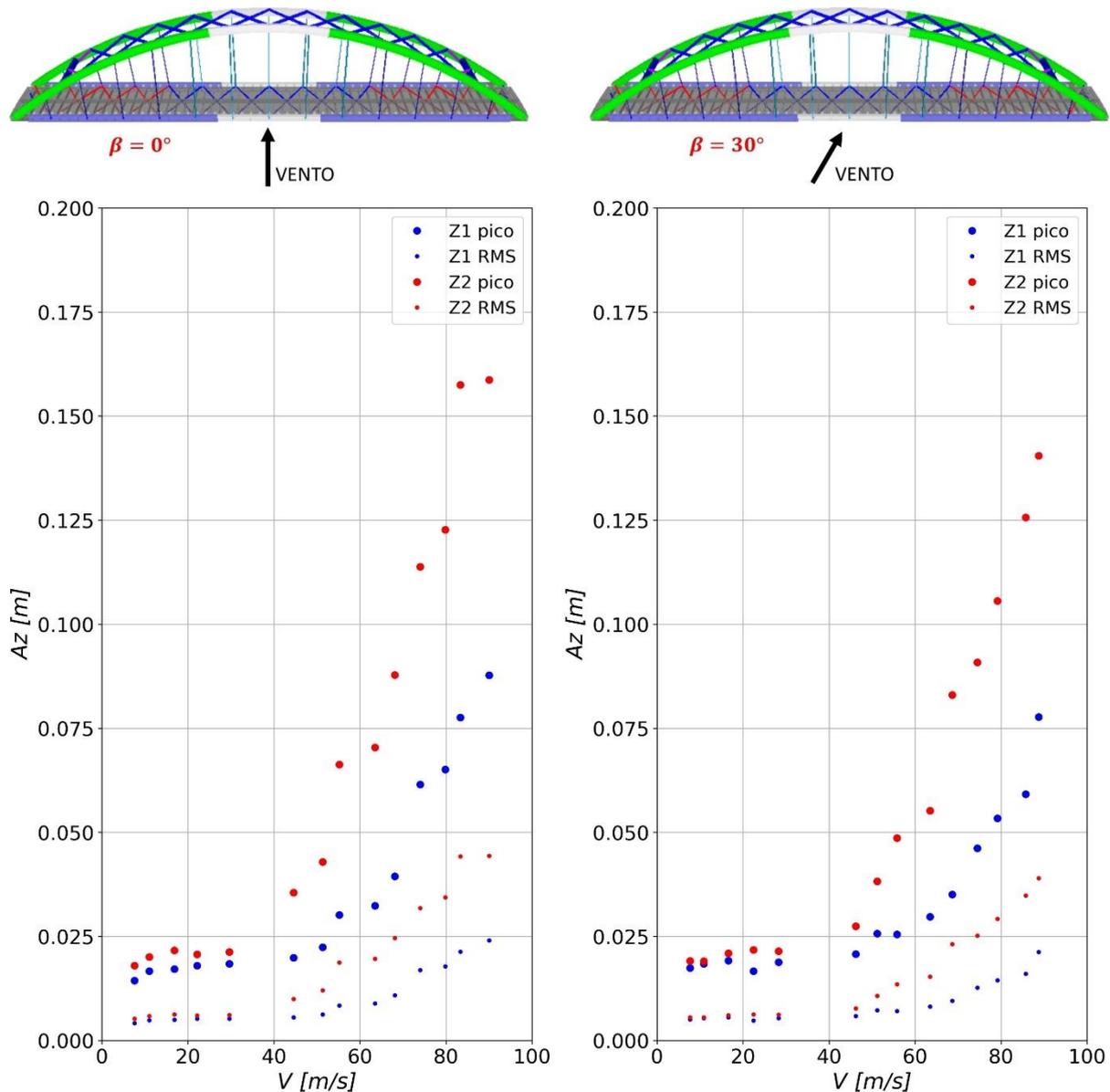


Figura 9 – Amplitudes reduzidas de resposta vertical ($A_{z,r}$) em função da velocidade média do vento (V), para configuração de escoamento uniforme e turbulento e $\zeta_{vert} \cong 2\%$.

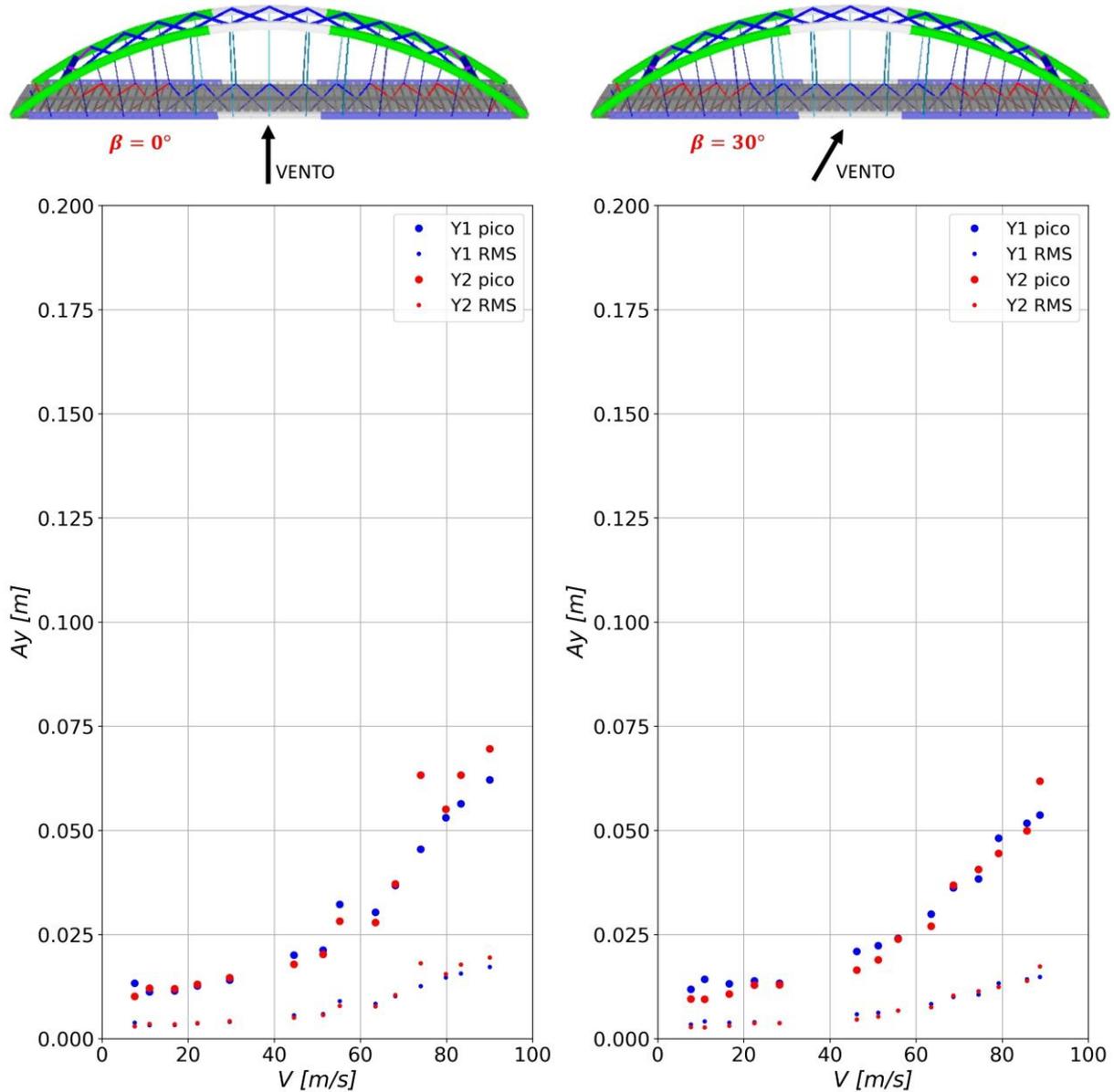


Figura 9 – Amplitudes reduzidas de resposta lateral ($A_{z,r}$) em função da velocidade média do vento (V), para configuração de escoamento uniforme e turbulento e $\zeta_{vert} \cong 2\%$.

5. Conclusões

Os efeitos dinâmicos do vento possuem diferentes origens e, conseqüentemente, provocam diferentes respostas nas estruturas. As vibrações induzidas por vórtices, por exemplo, estão associadas a velocidades mais baixas e, contraintuitivamente, podem ser mais danosas do que os eventos que ocorrem em velocidades mais altas.



A avaliação do comportamento de modelos reduzidos em ensaios de túnel de vento é de grande importância para estruturas esbeltas como as pontes de grandes vãos. Modelos seccionais são utilizados para análise de um trecho isolado de tabuleiro, anulando a turbulência local causada pelos demais elementos estruturais e sendo mais eficazes para determinação da resposta frente ao desprendimento de vórtices; modelos aeroelásticos completos, por outro lado, permitem avaliar instabilidades aerodinâmicas de maneira mais global, capturando, principalmente, as oscilações por martelamento e drapejamento.

No presente estudo, os resultados mostrados para os ensaios dinâmicos do modelo seccional ilustram claramente as zonas de amplificação de resposta características do fenômeno de desprendimento de vórtices. Em um primeiro momento, para o caso crítico de pouca turbulência e amortecimento, as maiores oscilações alcançam valores que superam 35% da altura da seção transversal, isto é, em torno de 1,05 metros. Com a variação de parâmetros proposta, é possível perceber que o aumento da turbulência decresce a amplitude de oscilação para aproximadamente 30% da altura da seção transversal e a adição de amortecimento estrutural para 10%, mesmo sem anular totalmente a ocorrência do fenômeno. Todavia, ao serem combinados, turbulência e amortecimento foram capazes de extinguir a atuação dos vórtices periódicos no modelo seccional, com amplitudes de resposta que mal alcançam 0,5% da altura da seção transversal ou 1,5 centímetros. Além disso, nota-se uma satisfatória correspondência entre os valores de velocidade crítica teóricos e os valores desenvolvidos no modelo, mesmo sem determinação de número de Strouhal específico.

Nos resultados do modelo aeroelástico completo, tanto as amplitudes de resposta vertical quanto de resposta lateral demonstram um perfil de comportamento sem maiores amplificações por instabilidades dinâmicas. O crescimento das amplitudes de oscilação acompanha o crescimento da velocidade média do vento, sendo que, para uma velocidade em torno de 42,41 m/s (velocidade característica do local de instalação da “Ponte A”), os deslocamentos associados atingem em torno de 2,5 cm, respeitando critérios de estado limite de serviço.

Por fim, faz-se uma nota de agradecimento ao Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) e à empresa Vento-S pelas informações e dados disponibilizados, bem como ao apoio institucional da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e financeiro da Capes e CNPq para concretização deste estudo.

Referências

- ARROL, W. C.; CHATTERJEE, S. Implications of the Rules on bridge design—past and future. In: BRIDGE AERODYNAMICS. Thomas Telford Publishing, 1981. p. 49-56.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BILLAH, K. Yusuf; SCANLAN, Robert H. Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks. American Journal of Physics, v. 59, n. 2, p. 118-124, 1991.
- BLESSMANN, Joaquim. The boundary layer TV-2 wind tunnel of the UFRGS. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 10, n. 2, p. 231-248, 1982.
- CHEN, Wai-Fah; DUAN, Lian (Ed.). Bridge engineering handbook. CRC press, 1999.
- EUROCODE. Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions. European Standard EN 1991-1-4:2005.
- HOLMES, John D. Wind loading of structures. CRC press, 2015.
- ROSA, Eduardo Gibbon. Determinação experimental da resposta transversal de uma ponte em arco metálico frente ao fenômeno de desprendimento de vórtices. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- SIMIUI, Emil; SCANLAN, Robert H. Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. 1996.
- STRØMMEN, Einar. Theory of bridge aerodynamics. Springer Science & Business Media, 2010.