UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Francisco Cantarelli Santos Souza

DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES EM PONTES: VIBRAÇÕES TRANSVERSAIS INDUZIDAS NO TABULEIRO

Porto Alegre
junho 2013

FRANCISCO CANTARELLI SANTOS SOUZA

DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES EM PONTES: VIBRAÇÕES TRANSVERSAIS INDUZIDAS NO TABULEIRO

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Acir Mércio Loredo-Souza

Porto Alegre

junho 2013

FRANCISCO CANTARELLI SANTOS SOUZA

DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES EM PONTES: VIBRAÇÕES TRANSVERSAIS INDUZIDAS NO TABULEIRO

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2013

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza
PhD pela University of Western Ontario, Canadá
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza (UFRGS)
PhD pela University of Western Ontario, Canadá

Eng. Mario Gustavo Klaus de Oliveira
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Gustavo Javier Zani Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais Sérgio e Zaira, pelos estímulos em busca de uma vida nova a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido desenvolvido sem a contribuição direta e indiretamente de diversos indivíduos ligados a mim através do curso de Engenharia Civil nesta Universidade.

Agradeço ao meu orientador, prof. Acir Mércio Loredo-Souza, pelo empenho, estímulo, colaboração e amizade desenvolvidos na realização deste trabalho.

Ao mestrando Matthew Bruce Vallis pela colaboração fundamental ao trabalho fornecendo os dados e resultados obtidos em sua dissertação de mestrado.

A profa. Carin Maria Schmitt pelo empenho e dedicação como coordenadora do Trabalho de Diplomação de Engenharia Civil.

A todos os meus amigos, em especial a Felipe Sperling, Arthur Weizenmann Pilla, Juliane Natália Dolvitsch e respectivos familiares, pela amizade próxima e companheirismo durante os anos da graduação.

Aos engenheiros Sérgio Henrique Santa Rosa e Elvis Antônio Carpeggiani pela primeira oportunidade profissional que tive, e aos colaboradores da Simon Engenharia, Projetak Projetos Estruturais e Construtora Tenda S/A pelas demais oportunidades de crescimento profissional.

Agradeço, de forma especial, a minha namorada Júlia e seus familiares, por terem aceito se privar da minha companhia durante os estudos, concedendo a mim a oportunidade de me realizar ainda mais.

Tornamos o mundo significativo pela coragem de nossas
perguntas e profundidades de nossas respostas.

Carl Edward Sagan

RESUMO

A ação do vento é um aspecto predominante no projeto aerodinâmico que determina as características da seção transversal de um tabuleiro de ponte. Dessa forma, a aplicação da teoria aerodinâmica, em estruturas de pontes conhecidas, deve se voltar para a supressão de fenômenos autoexcitados, como as vibrações transversais induzidas por desprendimento de vórtices, afim de impedir sua instabilidade. A vibração induzida por vórtice é uma resposta aerodinâmica que pode ocorrer para estruturas flexíveis sujeitas a ventos transversais, como os tabuleiros de pontes de longos vão e proporções esbeltas. A interação entre fluido e estrutura, através da separação do escoamento do ar, provoca desprendimento de vórtices alternadamente em cada face do tabuleiro da ponte, que por sua vez pode ocasionar um movimento oscilatório do tabuleiro da ponte quase sempre associado à ruína por fadiga dos materiais constituintes ou, por exemplo, de cabos de estaiamento a ele conectados. Foram estudadas modificações geométricas em uma seção transversal de um tabuleiro de ponte ensaiado no Túnel de Vento prof. Joaquim Blessmann, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através da implementação de dispositivos aerodinâmicos de controle passivo de vibrações como forma de verificar uma redução nas amplitudes de vibração provocadas pelo desprendimento de vórtices. De maneira a investigar experimentalmente a influência de dispositivos aerodinâmicos de controle passivos para prevenir vibrações em seções transversais, são utilizados resultados de ensaios em túnel de vento com modelos em escala reduzida e estabelecidas comparações entre as reduções de amplitude observadas nas respostas correspondentes aos mesmos casos de ataque de vento.

Palavras-chave: Aerodinâmica das Estruturas. Vibrações Induzidas por Vórtices. Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes. Túnel de Vento.

ABSTRACT

The wind effect is a major factor in the aerodynamic design, which determines characteristics of a bridge deck cross-section. Thus, the application of aerodynamic theory in known bridge structures must head towards the suppression of self-excited phenomena such as transverse vibrations induced by vortex shedding, in order to prevent its instability. The vortex-induced vibration is an aerodynamic response, which appears in flexible structures subjected to transverse winds, as well as bridge decks with slender long span and slender cross-sections. The interaction between fluid and structure, through separation of air flow causes vortex shedding alternatively on either side of the bridge deck, which in turn can cause an oscillatory motion of bridge deck almost always associated with failure by fatigue of the constituent materials or, for example, stay-cables attached to it. Geometric modifications were studied in a cross-section of a bridge deck tested in Wind Tunnel prof. Joaquim Blessmann at the Federal University of Rio Grande do Sul, through the implementation of aerodynamic devices for passive vibration control as a way to verify a reduction in the vibration amplitude caused by vortex shedding. In order to experimentally investigate the influence of passive control aerodynamic devices to prevent vibrations in cross sections, wind-tunnel test results using reduced scale models were used to establish comparisons between reductions in responses amplitude corresponding to the same cases of attack of wind.

Keywords: Wind Engineering. Vortex-Induced Vibrations. Aerodynamic Bridge Devices.. Wind Tunnel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama representativo das etapas do delineamento da pesquisa 20

Figura 2 – Formação de vórtices de Kármán na esteira de um cilindro 24

Figura 3 – Desenvolvimento da camada limite para uma placa plana 25

Figura 4 – Forças de sustentação e arrasto em uma seção transversal de tabuleiro 28

Figura 5 – Variação dos coeficientes aerodinâmicos e número de Strouhal em função da variação do número de Reynolds 31

Figura 6 – Croqui simplificado da topologia bidimensional do escoamento 33

Figura 7 – Definição dos regimes de escoamento e parâmetros característicos para cilindros circulares bidimensionais 34

Figura 8 – Faixa de sincronização para vibrações transversais 36

Figura 9 – Sincronização ou captura de vórtices 37

Figura 10 – Formação e desenvolvimento de vórtices induzidos e a distribuição de pressões ao longo de uma seção retangular 38

Figura 11 – Resposta típica em escoamentos de baixa turbulência 40

Figura 12 – Relações entre B/D e $1/S_t$ ou velocidade reduzida 42

Figura 13 – Dimensões longitudinal e transversal a direção do escoamento 43

Figura 14 – Amplitude de oscilação das respostas vertical e rotacional 44

Figura 15 – Padrões de escoamento ao redor de seções rombudas em vibração 45

Figura 16 – Distribuição das pressões e diferença de fase dos modelos do grupo 2 47

Figura 17 – Dispositivos aerodinâmicos estabilizadores 49

Figura 18 – Esquema do circuito aerodinâmico do túnel de vento TV-2 da UFRGS 52

Figura 19 – Semelhança geométrica entre os escoamentos de um protótipo com diâmetro D_p e um modelo com escala D_m 53

Figura 20 – Representação esquemática de um sistema com um grau de liberdade 55

Figura 21 – Seção de projeto original do tabuleiro ponte em escala real 56

Figura 22 – Modelo 1 (seção original alterada com nariz de vento tipo 1) 58

Figura 23 – Modelo 2 (seção original alterada com nariz de vento tipo 2) 58

Figura 24 – Modelo 3 (seção original alterada com nariz de vento tipo 3) 59

Figura 25 – Modelo 4 (seção original alterada com fechamento inferior) 59

Figura 26 – Modelo 5 (seção original alterada com placas divisórias) 60

Figura 27 – Modelo 6 (seção original altera com aletas) 60

Figura 28 – Resposta vertical da seção original, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}21\%$ 63

Figura 29 – Resposta rotacional da seção original, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$ 63

Figura 30 – Resposta vertical seção original, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}23\%$ 63

Figura 31 – Resposta rotacional da seção original, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$ 63
Figura 32 – Resposta vertical da seção original, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}24\%$ 64
Figura 33 – Resposta rotacional da seção original, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$ 64
Figura 34 – Resposta vertical do modelo 1, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}22\%$ 65
Figura 35 – Resposta rotacional do modelo 1, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}15\%$ 65
Figura 36 – Resposta vertical do modelo 1, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}20\%$ 65
Figura 37 – Resposta rotacional do modelo 1, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}14\%$ 65
Figura 38 – Resposta vertical do modelo 1, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}25\%$ 66
Figura 39 – Resposta rotacional do modelo 1, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}12\%$ 66
Figura 40 – Resposta vertical do modelo 2, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}21\%$ 67
Figura 41 – Resposta rotacional do modelo 2, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$ 67
Figura 42 – Resposta vertical do modelo 2, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}20\%$ 67
Figura 43 – Resposta rotacional do modelo 2, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$ 67
Figura 44 – Resposta vertical do modelo 2, com$\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}21\%$ 68
Figura 45 – Resposta rotacional do modelo 2, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$ 68
Figura 46 – Resposta vertical do modelo 3, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}31\%$ 69
Figura 47 – Resposta rotacional do modelo 3, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$ 69
Figura 48 – Resposta vertical do modelo 3, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}23\%$ 69
Figura 49 – Resposta rotacional do modelo 3, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$ 69
Figura 50 – Resposta vertical do modelo 3, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}29\%$ 70
Figura 51 – Resposta rotacional do modelo 3, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}15\%$ 70
Figura 52 – Resposta vertical do modelo 4, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}26\%$ 71
Figura 53 – Resposta rotacional do modelo 4, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}19\%$ 71
Figura 54 – Resposta vertical do modelo 4, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}24\%$ 71
Figura 55 – Resposta rotacional do modelo 4, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$ 71
Figura 56 – Resposta vertical do modelo 4, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}26\%$ 72
Figura 57 – Resposta rotacional do modelo 4, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}19\%$ 72
Figura 58 – Resposta vertical do modelo 5, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}23\%$ 73
Figura 59 – Resposta rotacional do modelo 5, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}34\%$ 73
Figura 60 – Resposta vertical do modelo 5, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}26\%$ 73
Figura 61 – Resposta rotacional do modelo 5, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}36\%$ 73
Figura 62 – Resposta vertical do modelo 5, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}30\%$ 74
Figura 63 – Resposta rotacional do modelo 5, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}22\%$ 74
Figura 64 – Resposta vertical do modelo 6, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}27\%$ 75

Figura 65 – Resposta rotacional do modelo 6, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$ 75
Figura 66 – Resposta vertical do modelo 6, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}25\%$ 75
Figura 67 – Resposta rotacional do modelo 6, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$ 75
Figura 68 – Resposta vertical do modelo 6, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}25\%$ 76
Figura 69 – Resposta rotacional do modelo 6, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$ 76
Figura 70 – Comparação das amplitudes máximas verticais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = 0°$ 78
Figura 71 – Comparação das amplitudes máximas verticais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = -4°$ 79
Figura 72 – Comparação das amplitudes máximas verticais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = +4°$ 79
Figura 73 – Comparação das amplitudes máximas rotacionais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = 0°$ 80
Figura 74 – Comparação das amplitudes máximas rotacionais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = -4°$ 81
Figura 75 – Comparação das amplitudes máximas rotacionais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = +4°$ 81
Figura 76 – Variação dos picos da resposta vertical em relação a seção original para $\alpha = 0°$ 83
Figura 77 – Variação dos picos da resposta vertical em relação a seção original para $\alpha = -4°$ 84
Figura 78 – Variação dos picos da resposta vertical em relação a seção original para $\alpha = +4°$ 85
Figura 79 – Variação dos picos da resposta rotacional em relação a seção original para $\alpha = 0°$ 86
Figura 80 – Variação dos picos da resposta rotacional em relação a seção original para $\alpha = -4°$ 87
Figura 81 – Variação dos picos da resposta rotacional em relação a seção original para $\alpha = +4°$ 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das principais propriedades do tabuleiro de ponte em estudo 57

Tabela 2 – Resumo das máximas amplitudes de deslocamento nos ensaios 77

Tabela 3 – Amplitudes d/D_{tab} das velocidades reduzidas de pico da resposta vertical para $\alpha = 0°$ 82

Tabela 4 – Amplitudes d/D_{tab} das velocidades reduzidas de pico da resposta vertical para $\alpha = -4°$ 83

Tabela 5 – Amplitudes d/D_{tab} das velocidades reduzidas de pico da resposta vertical para $\alpha = +4°$ 84

Tabela 6 – Amplitudes de rotação das velocidades reduzidas de pico da resposta rotacional para $\alpha = 0°$ 86

Tabela 7 – Amplitudes de rotação das velocidades reduzidas de pico da resposta rotacional para $\alpha = -4°$ 87

Tabela 8 – Amplitudes de rotação das velocidades reduzidas de pico da resposta rotacional para $\alpha = +4°$ 88

LISTA DE SÍMBOLOS

δ – Distância de influência da viscosidade sobre o gradiente de velocidades (m)

R_e – Número de Reynolds (adimensional)

V – Velocidade característica do escoamento (m/s)

L – Dimensão característica, em pontes é considerada a altura do tabuleiro (m)

ν – Coeficiente de viscosidade cinemática (m^2/s)

S_t – Número de Strouhal (adimensional)

f_s – Frequência associada a um ciclo completo de desprendimento de vórtices (s^{-1})

θ_s – Ângulo de separação laminar (graus)

Δp_e – Diferença de pressão externa (Pa)

ρ – Peso específico (kgf/m^3)

V_o – Velocidade do escoamento não perturbado pelo corpo (m/s)

V_m – Velocidade do escoamento no contorno da camada limite (m/s)

C_e – Coeficiente de pressão externa (adimensional)

q – Pressão dinâmica do escoamento (Pa)

C_a – Coeficiente de arrasto (adimensional)

$\overline{F_a}$ – Força de arrasto média por unidade de comprimento (N/m)

C_s – Coeficiente de sustentação (adimensional)

$\overline{F_V}$ – Força de sustentação média por unidade de comprimento (N/m)

C_t – Coeficiente de torção (adimensional)

$\overline{M_t}$ – Momento de torção médio por unidade de comprimento (Nm/m)

$V_{red,v}$ – Velocidade reduzida associada ao movimento vertical (adimensional)

f_h – Frequência associada a um ciclo completo de oscilação vertical (s^{-1})

$V_{red,r}$ – Velocidade reduzida associada ao movimento rotacional (adimensional)

$f_{\boldsymbol{\theta}}$ – Frequência associada a um ciclo completo de oscilação de rotação (s^{-1})

$V_{cr1,v}$ – velocidade reduzida crítica de disparo para o movimento vertical (adimensional)

$V_{cr1,t}$ – velocidade reduzida crítica de disparo para o movimento rotacional (adimensional)

B – dimensão característica da seção do tabuleiro, longitudinal a direção do escoamento (m)

D – dimensão característica da seção do tabuleiro, transversal a direção do escoamento (m)

$\ddot{x}(t)$ – Aceleração da massa em função do tempo (m/s^2)

$\dot{x}(t)$ – Velocidade da massa em função do tempo (m/s)

$x(t)$ – Deslocamento da massa em função do tempo (m)

$F(t)$ – Força de excitação em função do tempo (N)

m – Massa do corpo fixado na extremidade da haste (kg)

c – Amortecimento do movimento devido à viscosidade (N/m^2)

ζ – Razão de amortecimento estrutural (%)

ζ_h – Razão de amortecimento estrutural do movimento vertical (%)

ζ_θ – Razão de amortecimento estrutural do movimento rotacional (%)

k – Rigidez elástica à flexão ou torção transversal (Pa)

n – frequência natural da estrutural (Hz)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA 18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA 18
2.2.1 Objetivo principal 18
2.2.2 Objetivos secundários 18
2.3 PRESSUPOSTOS 19
2.4 DELIMITAÇÕES 19
2.5 LIMITAÇÕES 19
2.6 DELINEAMENTO 19
3 DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES 22
3.1 CARACTERÍSTICAS 23
3.1.1 Considerações gerais 23
3.1.1.1 Vórtices de Kármán 23
3.1.1.2 Influência da viscosidade e camada limite 24
3.1.1.3 Número de Reynolds 25
3.1.1.4 Número de Strouhal 26
3.1.1.5 Coeficientes de pressão 27
3.1.1.6 Coeficientes aerodinâmicos 28
3.1.1.6.1 Coeficiente da arrasto 29
3.1.1.6.2 Coeficiente de sustentação 29
3.1.1.6.3 Coeficiente de torção 30
3.1.2 Influência do número de Reynolds nos coeficientes aerodinâmicos 30
3.1.3 Interação entre fluido e estrutura: sincronização 35
3.1.4 Mecanismo de formação de oscilações autossustentadas 37
3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES 38
3.2.1 Influência das velocidades reduzidas críticas 40
3.2.2 Respostas características das amplitudes de oscilações 43
3.2.3 Padrões de escoamento ao redor de seções em vibração 45
3.2.4 Distribuição de pressões 46
4 MEDIDAS DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS 48
4.1 SOLUÇÕES ESTRUTURAIS 48
4.2 SOLUÇÕES AERODINÂMICAS 49

5 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO 50
5.1 SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA 50
5.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS 52
5.3 SEMELHANÇA DIMENSIONAL 52
5.3.1 Semelhança do número de Reynolds 53
5.3.2 Amortecimento e frequência natural 54
5.4 PROJETO ANALISADO 56
5.4.1 Modelo 1 (nariz de vento tipo 1) 57
5.4.2 Modelo 2 (nariz de vento tipo 2) 58
5.4.3 Modelo 3 (nariz de vento tipo 3) 59
5.4.4 Modelo 4 (fechamento inferior do tabuleiro) 59
5.4.5 Modelo 5 (placas divisórias) 60
5.4.6 Modelo 6 (aletas inferiores) 60
6 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS 62
6.1 RESPOSTAS DE DESLOCAMENTOS OBTIDAS 62
6.1.2 Respostas do modelo 1 76
6.1.3 Respostas do modelo 2 66
6.1.4 Respostas do modelo 3 68
6.1.5 Respostas do modelo 4 70
6.1.6 Respostas do modelo 5 72
6.1.7 Respostas do modelo 6 74
6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS 76
6.2.1 Comparação das amplitudes máximas verticais 78
6.2.2 Comparação das amplitudes máximas rotacionais 80
6.2.3 Comparação das amplitudes verticais para as velocidades reduzidas dos picos da resposta da seção original 82
6.2.4 Comparação das amplitudes rotacionais para as velocidades reduzidas dos picos da resposta da seção original 85
7 CONCLUSÕES 89
REFERÊNCIAS 91

1 INTRODUÇÃO

A interação entre os escoamentos fluidos e as superfícies dos corpos sólidos é capaz de produzir forças variáveis em função do tempo. Essas forças são resultantes das flutuações instantâneas das pressões dinâmicas em decorrência da variação da velocidade do vento. Dessa forma, os corpos se movimentam repetidamente devido às suas características estruturais serem excitadas por mecanismos associados às velocidades de vento naturais em uma região, como no caso de pontes de longos vãos, as quais são submetidas a vibrações transversais naturalmente provocadas pela ação do vento incidindo na superestrutura do tabuleiro.

O fenômeno de excitação por desprendimento de vórtices pode produzir vibrações excessivas em relação a segurança estrutural, levando a ruptura por fadiga dos materiais. Esse efeito de excitação foi experimentado pela ponte Rio-Niterói nos anos de 1980, 1997 e 2002. Foi comprovado que a resposta dinâmica dessa ponte, sob ação de velocidades críticas de vento na faixa de 55 a 60 km/h, apresentou deslocamentos da seção transversal com amplitudes entre 25 e 60 cm. A instabilidade inerente ao estado limite de conforto estrutural da travessia conduziu um extenso estudo para a instalação de amortecedores de deslocamentos transversais de massa como uma medida mitigadora frente ao efeito do vento sobre a estrutura (BATTISTA; PFEIL, 2000, tradução nossa).

Para Simiu e Scanlan (1978, tradução nossa), as forças aerodinâmicas às quais uma estrutura está submetida podem ser tanto estimadas através da teoria quanto por meio de resultados experimentais. Por outro lado, para determinação verossímil dos efeitos aerodinâmicos influentes em estruturas complexas são demandados ensaios de laboratório com modelos em escala reduzida. A avaliação do desempenho da estrutura sob ação de vibrações transversais induzidas por desprendimento de vórtices, por exemplo, em uma fase de concepção do projeto da ponte Rio-Niterói, poderia garantir tanto segurança quanto funcionalidade estrutural. O estudo aerodinâmico da seção transversal poderia conceber, desde o início do projeto, uma forma geométrica com a implementação de dispositivos aerodinâmicos incorporados em detrimento de uma onerosa instalação de dispositivos de controle mecânico de vibrações posterior à construção da ponte.

Este trabalho aborda os efeitos provocados pelo desprendimento de vórtices em seções de tabuleiro de ponte afim de caracterizar a influência de dispositivos de controle de vibrações nas respostas dinâmicas de um modelo ensaiado em túnel de vento. Preliminarmente, no capitulo 3, são feitas considerações inicias a respeito dos principais conceitos que cercam o desprendimento de vórtices abrangendo alguns tópicos em mecânica dos fluidos. No desenvolvimento da primeira parte do capítulo, são apresentadas a influência do número de Reynolds, o fenômeno de sincronização e o funcionamento de mecanismo de vibração em seções retangulares. A segunda parte do capítulo é reservada a classificação de vibrações transversais induzidas em função de parâmetros como velocidades reduzidas, respostas características, padrões de escoamento e distribuição de pressões.

No decorrer do desenvolvimento do trabalho, no capítulo 4, são descritas medidas de controle de vibrações induzidas em seções de pontes. São brevemente apresentadas soluções de caráter estrutural, e mais detalhadamente discutidas soluções de caráter aerodinâmico. A análise experimental em túnel de vento é apresentada, no capítulo 5, dividida em três partes. Na primeira parte, são feitas considerações gerais sobre a simulação da camada limite atmosférica e é apresentado o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, local de realização e desenvolvimento dos ensaios. A segundo parte enuncia brevemente conceitos sobre semelhança dimensional entre modelos em escala reduzida e estruturas em escala real. Na última parte do capítulo, é apresentada uma seção de projeto estudada pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAC/UFRGS) e suas respectivas alterações da geometria da seção transversal por meio de dispositivos de controle passivo de vibrações.

No sexto capítulo, é realizada a análise dos resultados obtidos em túnel de vento, dividindo-se o capítulo em tantas partes quanto foram os modelos ensaiados. São, de forma geral, apresentadas as respectivas respostas dinâmicas de deslocamentos e rotações em função da velocidade do vento com o intuito de avaliar a influência da aplicação dos dispositivos de atenuação de vibrações vistos anteriormente.

No último capítulo deste trabalho, de modo a fornecer um parecer sob os resultados comparados nas fases anteriores do trabalho, são estabelecidas as conclusões sobre a influência da implementação de dispositivos de controle no tabuleiro.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são apresentadas a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a influência da implementação de dispositivos aerodinâmicos de controle passivo de vibrações nos deslocamentos transversais de um tabuleiro de ponte submetida ao efeito de excitação por vórtices, se comparados com a ausência de controle?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal e os objetivos secundários da pesquisa são enunciados nos itens subsequentes.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho busca a determinação da influência da implementação de dispositivos aerodinâmicos de controle passivo de vibrações nos deslocamentos transversais de um tabuleiro de ponte submetido ao efeito de excitação por vórtices, se comparados com a ausência de controle.

2.2.2 Objetivos secundários

São abaixo listados os objetivos secundários:

a) descrição dos dispositivos de controle de vibrações em pontes utilizados nos ensaios em túnel de vento;

b) descrição da resposta dinâmica de deslocamentos transversais do modelo seccional do tabuleiro sem dispositivos de controle de vibrações;

c) descrição das respostas dinâmicas de deslocamentos transversais dos modelos seccionais do tabuleiro com implementação dos respectivos dispositivos de controle de vibrações;

2.3 PRESSUPOSTOS

Admite-se que a análise experimental em túnel de vento de um modelo em escala reduzida seja suficientemente capaz de reproduzir as principais características do escoamento sobre o modelo em escala real.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho é restringido aos resultados das análises experimentais utilizando modelos seccionais de tabuleiro de ponte em escala reduzida.

2.5 LIMITAÇÕES

A realização do estudo limita-se a realização de análises de vibrações induzidas, em uma seção transversal de tabuleiro de ponte, desconsiderando demais instabilidades que não sejam provocadas por desprendimento de vórtices. Para fins de comparação, as análises são realizadas tanto sobre os resultados obtidos para a geometria original quanto para as implementações com dispositivos aerodinâmicos de controle passivo de vibrações. A interpretação dos efeitos provocados pela inclusão dos dispositivos é realizada através da análise dos deslocamentos verticais e rotacionais associados às velocidades de vento às quais os modelos foram ensaiados. Os resultados fornecidos se limitam aos ensaios realizados pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAC/UFRGS).

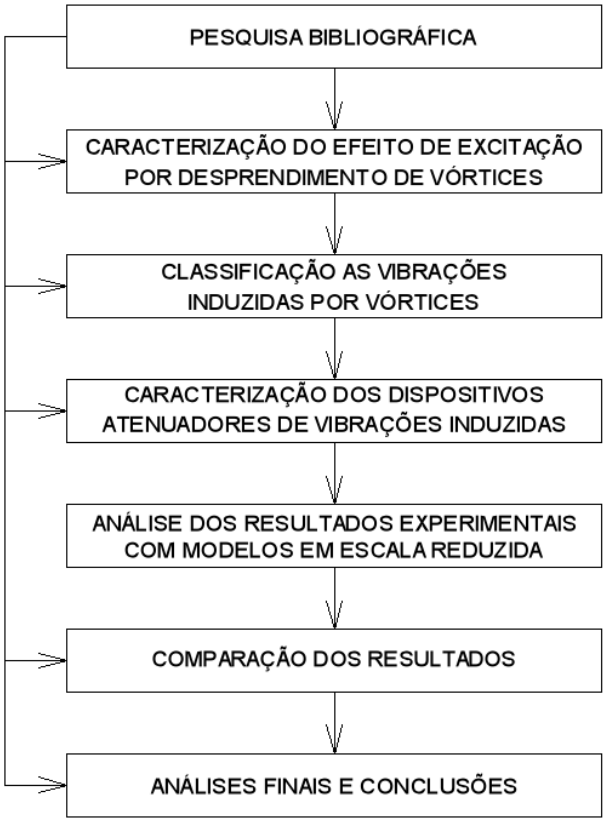
2.6 DELINEAMENTO

A compilação do estudo, também mostrada na figura 1, comporta as seguintes etapas:

a) pesquisa bibliográfica;
b) caracterização do efeito de excitação por desprendimento de vórtices;
c) classificação das vibrações induzidas por vórtices;
d) caracterização dos dispositivos atenuadores de vibrações induzidas;
e) análise dos resultados experimentais com modelos em escala reduzida;
f) comparação dos resultados;

g) análises finais e conclusões.

Figura 1 – Diagrama representativo das etapas do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

A pesquisa bibliográfica é uma revisão teórica que busca informações sobre a aplicação das teorias de aerodinâmica e da mecânica dos fluidos nas estruturas de tabuleiros de pontes e que busca caracterizar os efeitos devidos a turbulência dos escoamentos nessas estruturas. A revisão teórica também constitui uma ferramenta utilizada durante as etapas subsequentes do trabalho, verificada a necessidade de confirmar, comparar ou analisar os resultados.

A caracterização do efeito de excitação por desprendimento de vórtices é a etapa introdutória do trabalho. A caracterização do mecanismo de desprendimento de vórtices é responsável por descrever o fenômeno causador de vibrações transversais. Essa etapa abrange as condições nas quais o fenômeno ocorre, descreve as principais características aerodinâmicas dos corpos sujeitos à indução de vibrações e do escoamento que as produzem.

Conhecido o fenômeno excitador de vibrações é necessário propor, por meio de pesquisa bibliográfica uma **classificação das vibrações induzidas por vórtices**. É necessário

classificar as oscilações por desprendimento para que a posterior comparação dos resultados ocorra para grupos semelhantes entre si.

A caracterização dos dispositivos atenuadores faz referencia a forma como são controladas as vibrações transversais induzidas no modelo em escala reduzida em túnel de vento. Também é uma revisão bibliográfica teórica sobre o controle de vibrações em tabuleiro de pontes.

A análise experimental com modelo em escala reduzida é o programa experimental proposto nos ensaios realizados pelo LAC/UFRGS que analisa o efeito do uso dos atenuadores de vibrações sobre uma seção de tabuleiro de ponte.

A comparação dos resultados conduz a uma verificação do desempenho das soluções adotas para atenuar as vibrações dos modelos ensaiados. O tratamento dos dados de ensaios foi realizado através da resposta dinâmica de deslocamentos de translação vertical e deslocamentos angulares em função da implementação de dispositivos de controle passivo de vibrações.

As **análises finais e conclusões**, através da comparação dos resultados obtidos, possibilitam estabelecer a influência dos dispositivos aerodinâmicos sobre o desempenho da seção transversal do tabuleiro submetido ao desprendimento de vórtices por meio da avaliação da sua eficiência.

3 DESPRENDIMENTO DE VÓRTICES

O estudo da aerodinâmica de pontes deve se voltar para supressão de situações em que fenômenos autoexcitados, originados por desprendimento de vórtices, possam torná-las instáveis. Simiu e Scanlan (1978, p. 343, tradução nossa) recomendam que:

> [...] as estruturas sujeitas a cargas de vento sejam suficientemente resistentes para que tenham desempenho adequado de um ponto de vista estruturalmente seguro. Experimentos recentes tem mostrado que [...] estruturas devem ser projetadas para que seus movimentos induzidos pelo vento não provoquem desconforto inaceitável [...].

A análise do movimento excitado por desprendimento de vórtices em tabuleiros de pontes requer, para determinação de critérios pertinentes a conforto e fadiga, conhecimento das velocidades de disparo, padrões de escoamentos e avaliações da amplitude dos deslocamentos provocados. Experimentos com modelos de escala reduzida, nos quais a seção transversal de um tabuleiro é representada por características geométricas e dinâmicas, fisicamente semelhantes, podem identificar maior ou menor propensão à vibrações induzidas pelo desprendimento de vórtices. O fenômeno é percebido na esteira formada pelo escoamento do fluido sobre o contorno de um corpo rombudo[1], no qual a diferença das velocidades nas faces impõe uma componente da força aerodinâmica resultante perpendicular ao escoamento. Conforme existam características tais como alternância, frequência definida dos desprendimentos e excentricidade da força resultante existe a possibilidade de ocorrerem grandes amplitudes de deslocamentos transversais periódicos e momentos de torção alternados (NÚÑEZ, 2008, p. 33-34).

Núñez (2008, p. 77) aponta que a geometria do tabuleiro de uma ponte é bastante influente nos efeitos aerodinâmicos aos quais pode estar submetida. Embora as seções transversais sejam projetadas a fim de respeitar critérios de estado limite de ruptura, estado limite de serviço ou até mesmo exigências estéticas, a escolha de uma seção aerodinamicamente estável pode estar relacionada a um menor custo e maior durabilidade da estrutura.

[1] Corpos rombudos interferem no escoamento no qual se encontram formando uma região identificada como esteira, apresentando separação das linhas em ambos os lados da seção do corpo (NÚÑEZ, 2008, p. 35).

A caracterização do efeito de excitação por desprendimento de vórtices é um tópico no qual as referências bibliográficas são majoritariamente experimentais. Para definir o fenômeno são abordados primeiramente considerações iniciais sobre a Mecânica dos Fluidos e posteriormente é apresentada uma classificação das oscilações. Os itens apresentados a seguir são divididos dessa forma afim de formalizar essa caracterização.

3.1 CARACTERÍSTICAS

Inicialmente, para caracterizar o fenômeno de desprendimentos de vórtices, é necessário apresentar alguns tópicos relativos a teoria aerodinâmica pertencente à Mecânica dos Fluidos. A abordagem teórica que é exposta nas próximas subdivisões desta seção caracterizam alguns agentes diretamente envolvidos nesse processo.

3.1.1 Considerações gerais

É interessante, sob o ponto de vista do desprendimento de vórtices em corpos rombudos, apresentar algumas características dos escoamentos que estabeleçam parâmetros para avaliar o fenômeno de desprendimento de vórtices. A seguir são abordados, respectivamente, formação dos vórtices de Kármán, influência da viscosidade no escoamento, caracterização da camada limite, definição dos números de Reynolds e Strouhal e, dos coeficientes de pressão e aerodinâmicos.

3.1.1.1 Vórtices de Kármán

Conforme Blessmann (1998, p. 161), os vórtices de Kármán desprendem-se de forma regular na superfície dos corpos rombudos, ou seja, possuem uma frequência conhecida. Os vórtices, que são gerados pelo desprendimento do escoamento em ambas faces do corpo com diferentes velocidades, geram forças devidas a pressão de sucção provocando uma força de sustentação oblíqua ao escoamento. Ambas as componentes, transversal e longitudinal, dessa força de sustentação, em relação a direção do escoamento, tendem a produzir vibrações nas direções em que atuam. Consideram-se as vibrações transversais ao escoamento predominantes em relação as longitudinais para o caso do desprendimento de vórtices nas seções de tabuleiros de pontes conhecidas. De forma geral, para que ocorra desprendimento de vórtices de Kármán são necessárias condições tais como:

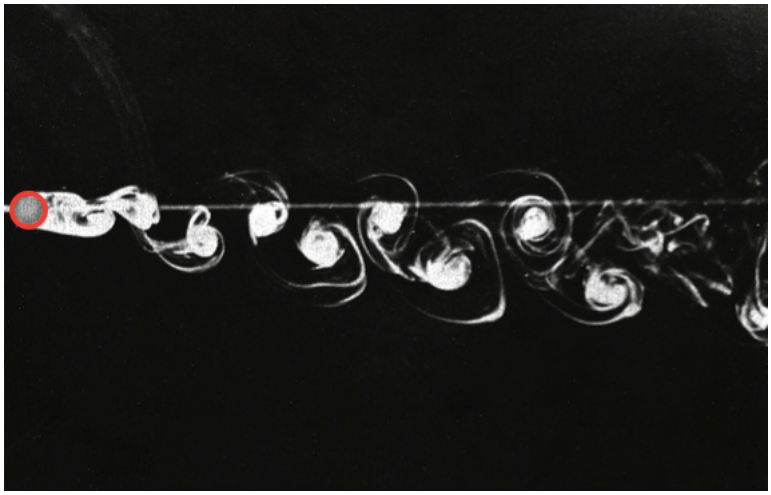
a) presença de um corpo rombudo com boa correlação de desprendimento ao longo de toda sua extensão;

b) escoamento de baixa turbulência;

c) inexistência de recolamento do escoamento desprendido.

A figura 2 mostra a interferência de um corpo rombudo de seção circular em um escoamento. Observa-se a formação de uma "alameda" de vórtices na esteira do escoamento devido ao desprendimento dos vórtices de Kármán. O corpo cilíndrico foi assinalado em vermelho para que seja distinguido dos vórtices formados na sua esteira

Figura 2 – Formação de vórtices de Kármán na esteira de um cilindro



(fonte: adaptado de SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 126)

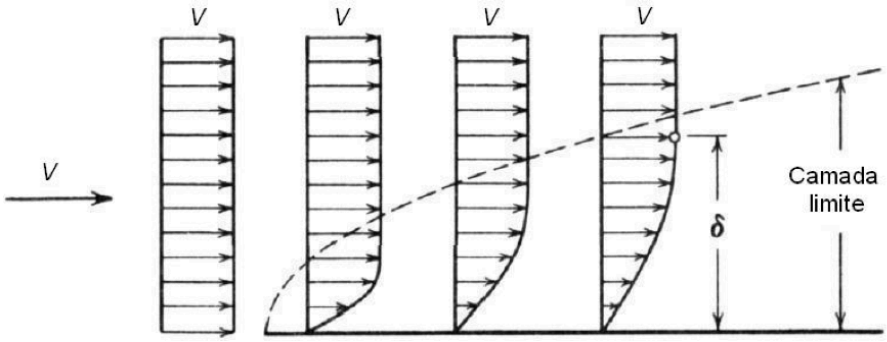
3.1.1.2 Influência da viscosidade e camada limite

Um fluido, sob ação de uma tensão de cisalhamento constante, deforma-se continuamente sem atingir uma configuração de equilíbrio estático. Sob ação dessa tensão de cisalhamento, admite-se que o fluido possui um gradiente de velocidades, pois os pontos que constituem o meio contínuo se deslocam a mesma velocidade. A razão definida entre essa tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido é denominada viscosidade dinâmica. A viscosidade dinâmica é uma função de temperatura e pressão, no caso do ar atmosférico essa variação é suficientemente suave tornando a razão praticamente linear. Entretanto, no caso desse fluido, é interessante trabalhar com unidades de comprimento e tempo, ou seja, trata-se a viscosidade cinemática como uma razão entre a viscosidade dinâmica pelo valor da sua massa específica (BRUNETTI, 2007).

Blessmann (1983, p. 71) afirma que para um fluido ideal, por definição invíscuo, a conformação do escoamento depende unicamente da geometria dos sólidos pelos quais o fluido percorre. Por outro lado, a consideração dos efeitos de viscosidade retarda as camadas do escoamento próximas da superfície do corpo. Quanto mais próximas da superfície sólida menores são as velocidades, na medida em que estejam suficientemente próximas, tendem a atingir valores nulos dada a condição de não-escorregamento dos fluidos. Analogamente, as camadas do escoamento mais afastadas do corpo atingem, a partir de uma determinada distância, a mesma velocidade do escoamento não perturbado pelo corpo.

Na figura 3, é possível observar a separação do escoamento em duas zonas distintas. São mostrados os efeitos da camada limite sobre um gradiente de velocidades V uniforme genérico atuando em uma placa plana suficientemente extensa. A linha tracejada aponta a região de abrangência dos efeitos viscosos sobre o gradiente das velocidades, e é função da distância δ da influência da viscosidade.

Figura 3 – Desenvolvimento da camada limite para uma placa plana



(fonte: NÚÑEZ, 2008, p. 37)

3.1.1.3 Número de Reynolds

Núñez (2008, p. 37) ressalta que "[...] a propriedade dos fluidos responsável pelos pontos de separação num corpo é a viscosidade.". O número de Reynolds demonstra uma relação de proporção entre as forças inerciais e viscosas atuantes em um escoamento, sua expressão é conhecida conforme a fórmula 1:

$$R_e = \frac{VL}{\nu} \qquad \text{(fórmula 1)}$$

Onde:

R_e = número de Reynolds;

V = velocidade característica do escoamento;

L = dimensão característica do corpo;

ν = coeficiente de viscosidade cinemática.

3.1.1.4 Número de Strouhal

Segundo Núñez (2008, p. 40), o número de Strouhal é interessante por ser um parâmetro de frequência adimensional do desprendimento de vórtices alternados. No caso dos tabuleiros de pontes a dimensão característica é a própria altura do tabuleiro. Patil et alli (2011, p. 1244, tradução nossa) definem o conceito de vibrações induzidas em função do número de Strouhal:

> Vibração induzida por vórtice é uma resposta aerodinâmica que pode ocorrer para estruturas flexíveis sujeitas a ventos transversais. A separação do escoamento do ar causa desprendimento de vórtices alternadamente em cada face do tabuleiro da ponte, que por sua vez causa vibrações. Evidências experimentais mostram que essas cargas flutuantes são estreitamente definidas e centralizadas na frequência de desprendimento de vórtices.

De acordo com Núñez (2008, p. 40), a frequência de desprendimento de vórtices é expressa pela fórmula 2:

$$S_t = f_s \frac{L}{u} \qquad \text{(fórmula 2)}$$

Onde:

S_t = número de Strouhal;

f_s = frequência associada a um ciclo completo de desprendimento de vórtices;

L = dimensão característica do corpo;

u = velocidade característica do escoamento.

3.1.1.5 Coeficientes de pressão

Segundo Blessmann (1983, p. 46-47), a aplicação do teorema de Bernoulli entre os pontos de pressão estática no contorno da camada limite suficientemente próxima da superfície sólida e a pressão estática em um ponto da corrente não perturbada pela presença do corpo, expressa a diferença de pressões Δp_e na fórmula 3. Os coeficientes de pressão são adimensionais subentendidos nessa relação e são dependentes da forma da seção transversal do tabuleiro, do ângulo de ataque, da velocidade do vento e do regime do escoamento.

$$\Delta p_e = \frac{1}{2}\rho {V_o}^2 \left(1 - \left(\frac{V_m}{V_0}\right)^2\right) \qquad \text{(fórmula 3)}$$

Onde:
Δp_e= diferença de pressão externa;
ρ = peso específico;
V_o = velocidade do escoamento não perturbado pelas fronteiras sólidas do corpo;
V_m = velocidade do escoamento no contorno da camada limite junto ao corpo.

A pressão dinâmica, implícita na formulação anterior, é expressa pela fórmula 4:

$$q = \frac{1}{2}\rho {V_o}^2 \qquad \text{(fórmula 3)}$$

Onde:
q = diferença de pressão externa;
ρ = peso específico;
V_o = velocidade do escoamento não perturbado pelas fronteiras sólidas do corpo;

A fórmula 5 apresenta o coeficiente de pressão externa[2] em função da pressão dinâmica[3] conforme:

$$C_e = \frac{\Delta p_e}{q} \qquad \text{(fórmula 5)}$$

Onde:

C_e= coeficiente de pressão externa;

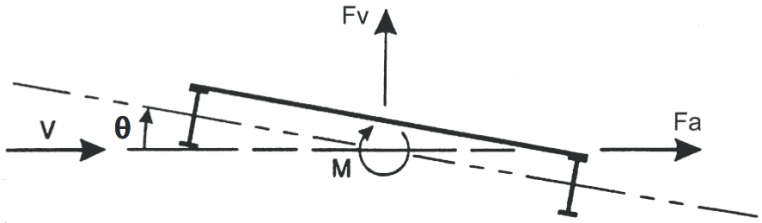
Δp_e = diferença de pressão externa entre dois pontos;

q = pressão dinâmica do escoamento.

3.1.1.6 Coeficientes aerodinâmicos

Simiu e Scanlan (1978, p. 133-134, tradução nossa) apontam que a força aerodinâmica resultante pode ser decomposta em duas direções principais em relação o escoamento, uma componentes transversal e outra longitudinal. Como sugere a figura 4, a componente transversal a direção do escoamento é denominada força de sustentação, enquanto que a componente longitudinal à direção do escoamento é denominada força de arrasto. Existe ainda, conforme se observa na figura 4, um momento de torção no tabuleiro devido a excentricidade de atuação da força aerodinâmica resultante.

Figura 4 – Forças de sustentação e arrasto em uma seção transversal de tabuleiro



(fonte: WARDLAW, 1994, p. 297, tradução nossa)

[2] O coeficiente de pressão externa corresponde a parcela $\left(1 - \left(\frac{u_m}{u_0}\right)^2\right)$ no final do segundo termo expresso na fórmula 3.

[3] A pressão dinâmica corresponde a parcela $\frac{1}{2}\rho {u_o}^2$ no início do segundo termo expresso na fórmula 3, sendo constante para um mesmo valor de velocidade do escoamento não perturbado pelo corpo sólido.

3.1.1.6.1 Coeficiente da arrasto

O coeficiente de arrasto é um adimensional relacionado à força obtida pela integração do campo de pressões resultantes exercidas pelo vento na direção longitudinal ao escoamento (SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 134, tradução nossa). A fórmula 5 é o resultado dessa integração:

$$C_a = \frac{\overline{F_a}}{qB} \qquad \text{(fórmula 5)}$$

Onde:
C_a= coeficiente de arrasto;
$\overline{F_a}$ = força de arrasto média por unidade de comprimento;
q = pressão dinâmica do escoamento;
B = altura do tabuleiro.

3.1.1.6.2 Coeficiente de sustentação

O coeficiente de sustentação é um adimensional relacionado à força obtida pela integração do campo de pressões resultantes exercidas pelo vento na direção transversal ao escoamento (SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 134, tradução nossa). A fórmula 6 é o resultado dessa integração:

$$C_s = \frac{\overline{F_V}}{qB} \qquad \text{(fórmula 6)}$$

Onde:
C_s= coeficiente de sustentação;
$\overline{F_V}$ = força de sustentação média por unidade de comprimento;
q = pressão dinâmica do escoamento;
B = altura do tabuleiro.

3.1.1.6.3 Coeficiente de torção

É o coeficiente adimensional relacionado à torção em função da excentricidade de atuação das forças de arrasto e sustentação. O coeficiente de torção é obtido por integração análoga aos coeficientes de arrasto e sustentação (SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 134, tradução nossa), seu resultado é expresso na fórmula 7:

$$C_t = \frac{\overline{M_t}}{qB^2} \qquad \text{(fórmula 7)}$$

Onde:

C_t = coeficiente de torção;

$\overline{M_t}$ = momento de torção médio por unidade de comprimento;

q = pressão dinâmica do escoamento;

B = altura do tabuleiro.

3.1.2 Influência do número de Reynolds nos coeficientes aerodinâmicos

Segundo Schewe (2001, p. 1267, tradução nossa)

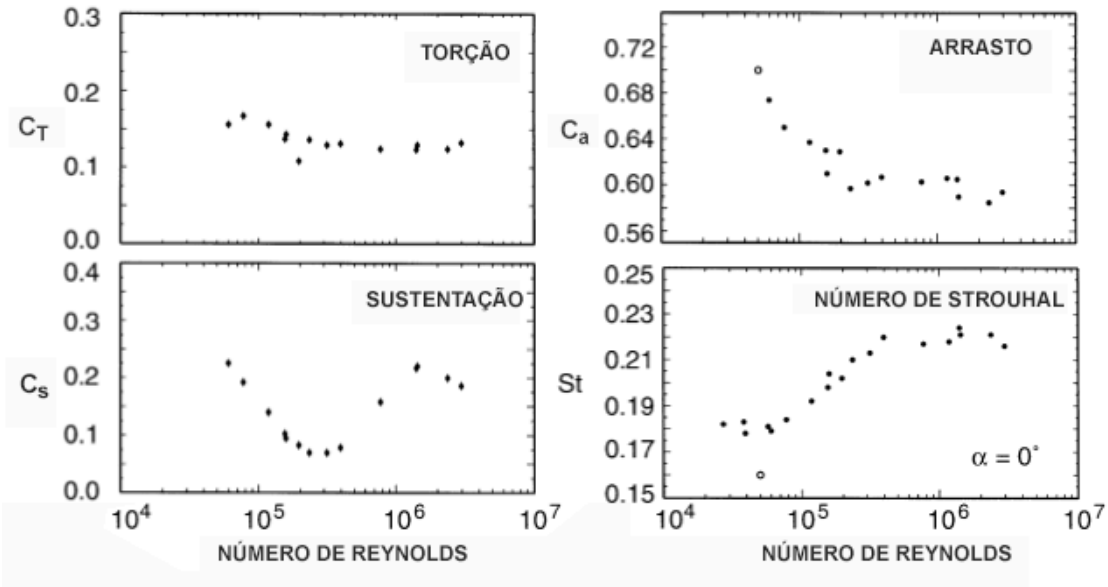
> O escoamento ao redor de corpos mais ou menos rombudos é determinado pela separação do escoamento que forma alamedas de vórtices na esteira. Um atributo característico é a instabilidade causada pelo processo de separação do escoamento. Interações entre o fluido e a estrutura podem levar a vibrações induzidas pelo escoamento, as quais podem tanto ser forçadas pela ressonância de vórtices ou autoexcitadas, como no caso quando galope ou drapejamento ocorrem.

Schewe (2001, p. 1268, tradução nossa), o número de Reynolds desenvolve um papel importante uma vez que a separação de escoamentos geralmente depende do seu comportamento, mesmo nos casos em que o corpo é constituído por arestas vivas. A razão para esta dependência se traduz na configuração da camada limite, que possui uma extensa influência em todo o campo do escoamento sobre o corpo. Em particular, a localização do ponto de transição entre os regimes laminar e turbulento dentro da camada limite, ou na camada separada, é um parâmetro importante na consideração do fenômeno. A configuração e localização da transição são responsáveis pela formação e determinação do comprimento e

forma das borbulhas de separação. Quando aumenta o número de Reynolds, R_e, uma borbulha de separação se forma, cresce, torna-se instável e então desprende-se para a esteira. Essas mudanças na topologia da estrutura da esteira do escoamento podem ser aproximadas por escoamentos bidimensionais em corpos rombudos ou quase rombudos. Foram estudados os efeitos do número de Reynolds nesses corpos com três seções transversais distintas: circular, aerofólio e trapezoidal. De modo geral, foram identificadas faixas de variação do número de Reynolds que implicaram em mudanças acentuadas nos coeficientes aerodinâmicos e no número de Strouhal.

Durante a construção dos vãos de cabeceira da ponte Great Belt, na Dinamarca, foi constatado que a velocidade crítica de disparo era consideravelmente inferior a prevista em projeto. Baseados na suposição de que a redução era atribuída aos efeitos devidos ao número de Reynolds, foram realizados ensaios em túnel de vento com a intenção de determinar os coeficientes aerodinâmicos na faixa de variação, abrangendo o comportamento verdadeiro do escoamento sobre a estrutura do tabuleiro da ponte. Os resultados mostrados na figura 5 representam as medições, em túnel de vento, do comportamento dos coeficientes de torção, arrasto, sustentação e do número de Strouhal em função do aumento do número de Reynolds do escoamento, com ângulo de ataque $\alpha = 0°$, ao redor da seção trapezoidal aproximada para os vãos de cabeceira da ponte Great Belt (SCHEWE, 2001, tradução nossa).

Figura 5 – Variação dos coeficientes aerodinâmicos e número de Strouhal em função da variação do número de Reynolds



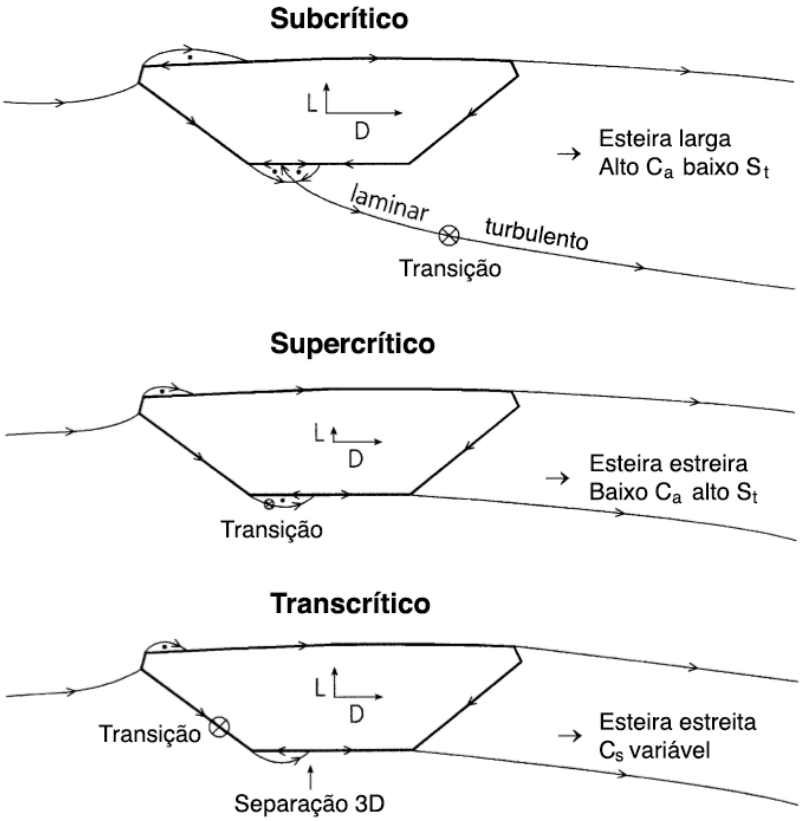
(fonte: adaptado de SCHEWE, 2001, p. 1285, tradução nossa)

Para Schewe (2001, p. 1284, tradução nossa), o principal resultado descrito na figura 5 diz respeito à dependência que os coeficientes aerodinâmicos característicos do escoamento possuem em relação ao número de Reynolds. A variação do número de Strouhal mostra que é razoável associar os patamares inferior e superior com os escoamentos em regimes subcrítico e supercrítico, respectivamente. Entre os dois patamares é evidenciada uma região de transição na qual o número de Strouhal aumenta cerca de 20%. Para valores baixos do número de Reynolds as medições do número de Strouhal são em média coincidentes com os resultados convencionais em ensaios em túnel de vento, e para valores altos de número de Reynolds foram encontrados valores coincidentes com os medidos no local da ponte em construção.

Para a variação do número de Reynolds até 4×10^5 o coeficiente de arrasto, C_a, apresenta um comportamento inverso aos dos números de Reynolds e Strouhal. Acima desse limite, o coeficiente de arrasto permanece aproximadamente constante conforme Reynolds aumenta. Já o coeficiente de sustentação apresenta uma variação acentuada com Reynolds, enquanto o coeficiente de torção possui uma menor variação entre os coeficientes medidos no experimento (SCHEWE, 2001, p. 1284-1285, tradução nossa).

A figura 6 esquematiza os resultados obtidos a partir da visualização de escoamentos durante o experimento, na seção trapezoidal. Ela sugere que os efeitos do número de Reynolds são devidos às mudanças observadas na topologia da estrutura do escoamento separado, a qual é acentuada na face inferior da seção do tabuleiro.

Figura 6 – Croqui simplificado da topologia bidimensional do escoamento



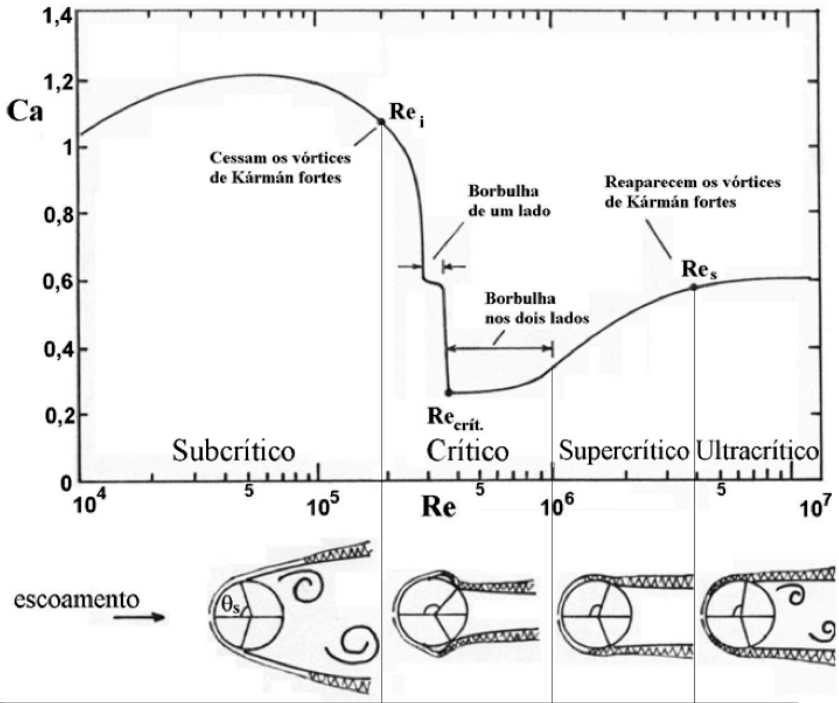
(fonte: adaptado de SCHEWE, 2001, p. 1286, tradução nossa)

Núñez (2008, p. 38) sugere que no caso de cilindros circulares os coeficientes aerodinâmicos se alterem constantemente de acordo com os valores assumidos pelo número de Reynolds. Porém, para valores de Reynolds superiores a 10^4 alguns regimes de escoamento passam a ser distinguidos. De acordo com Ribeiro[4] (1989 apud NÚÑEZ, 2008, p. 38), os regimes são definidos como: subcrítico, crítico, supercrítico e ultracrítico. Os regimes de escoamento e a influência no comportamento dos coeficientes aerodinâmicos é estudada na figura 7.

O gráfico da figura 7 apresenta a estimativa do coeficiente de arrasto, C_a, em função do número de Reynolds entre 10^4 e 10^7. A variação desse coeficiente aerodinâmico caracteriza os regimes de escoamentos compreendidos para aplicações de Engenharia Civil.

[4] RIBEIRO, J. L. D. **Efeitos da rugosidade superficial sobre as pressões médias e flutuantes em cilindros circulares fixos em fluxo bidimensional**. 1989. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

Figura 7 – Definição dos regimes de escoamento e parâmetros característicos para cilindros circulares bidimensionais



Vórtices de Kármán:	Fortes	Fracos	Fracos	Fortes
θ_s	75°	140°	120°	105°
$\lvert c_{pm} \rvert$	1,2	2,8	2,3	1,9
$\lvert c_{pb} \rvert$	1,2	0,25	0,4	0,6
C_a	1,2	0,25	0,4	0,6
St	0,19	0,45	0,23	0,28

(fonte: adaptado de RIBEIRO[5], 1989 apud NÚÑEZ, 2008, p. 39)

Na figura 7, Ribeiro[6] (1989 apud NÚÑEZ, 2008, p. 38-39) explica que os regimes são função do ângulo de separação laminar, θ_s, em relação a linha de estagnação do escoamento. No regime subcrítico, o coeficiente de arrasto, C_a, é elevado em função de uma larga esteira, caracterizada por desprendimento de vórtices de Kármán regulares e intensos, normalmente formada por uma separação a barlavento do corpo. A camada limite, laminar nesse regime, quando desprendida torna-se turbulenta na medida em que se afasta do ponto de separação e do corpo cilíndrico. No regime crítico, o ângulo de separação aumenta e o ponto passa para a

[5] RIBEIRO, J. L. D. **Efeitos da rugosidade superficial sobre as pressões médias e flutuantes em cilindros circulares fixos em fluxo bidimensional.** 1989. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

[6] opus citatua

sotavento da seção, promovendo a formação de uma borbulha de separação. A borbulha ocorre sempre que a transição da camada limite atingir as proximidades do ponto de separação ao se deslocar nesse sentido. Essa aproximação provoca um recolamento da camada limite turbulenta, a sotavento do ponto de separação, e é uma característica intrínseca do regime crítico. A visualização das borbulhas de separação em ambos os lados da seção identificam a situação de menor arrasto aerodinâmico e maior número de Strouhal, o que pode implicar em uma velocidade crítica de desprendimento de vórtices mais elevada.

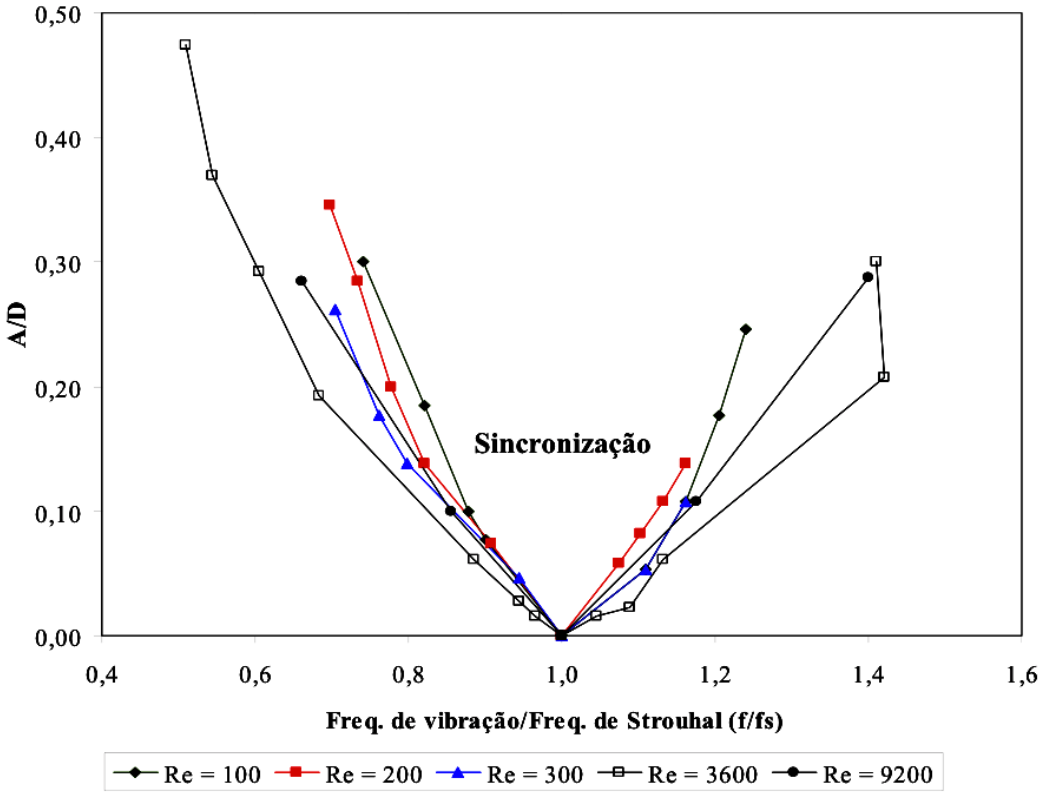
3.1.3 Interação entre fluido e estrutura: sincronização

Todo cilindro imerso em escoamento possui um movimento natural. Esse movimento pode provocar efeitos de aumento de energia dos vórtices, melhorar a correlação dos vórtices ao longo do corpo, elevar o coeficiente de arrasto no cilindro e, sobretudo, provocar um efeito denominado sincronização (BLESSMANN, 1998, p. 168).

Na sincronização, o movimento do cilindro controla o mecanismo de instabilidade causador do desprendimento de vórtices com uma frequência única de vibrações e desprendimento de vórtices (KAERCHER, 2007, p. 27). Complementarmente, Núñez (2008, p. 60) afirma que "A resposta [...] é devida à sincronização dos vórtices de Kármán que se desprendem em torno da seção transversal do tabuleiro da ponte com a mesma frequência natural de um dos modos de vibração da estrutura.".

A figura 8 mostra a influência da amplitude das oscilações de um cilindro em escoamento permanente. Para frequências natural e de Strouhal iguais, a razão de sincronização é unitária.

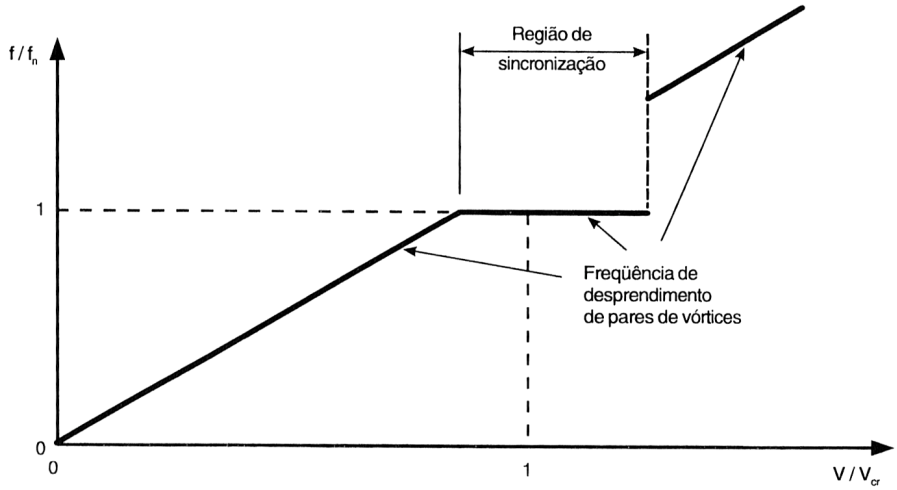
Figura 8 – Faixa de sincronização para vibrações transversais



(fonte: KAERCHER, 2007, p. 28)

Por outro lado, Blessmann (1998, p. 167) mostra, através da figura 9, uma relação em termos de uma razão de velocidades do vento em função de uma razão de frequências para apresentar o fenômeno de sincronização. A razão de frequências é o quociente entre a frequência do desprendimento de vórtices e a frequência natural do cilindro, já a razão de velocidades é o quociente entre as velocidades medidas e crítica de sincronização (definida quando as frequências são iguais).

Figura 9 – Sincronização ou captura de vórtices



(fonte: BLESSMANN, 1998, p. 167)

3.1.4 Mecanismo de formação de oscilações autossustentadas

O funcionamento do mecanismo de indução de vibrações, segundo Komatsu e Kobayashi (1980, p. 357, tradução nossa), considera que:

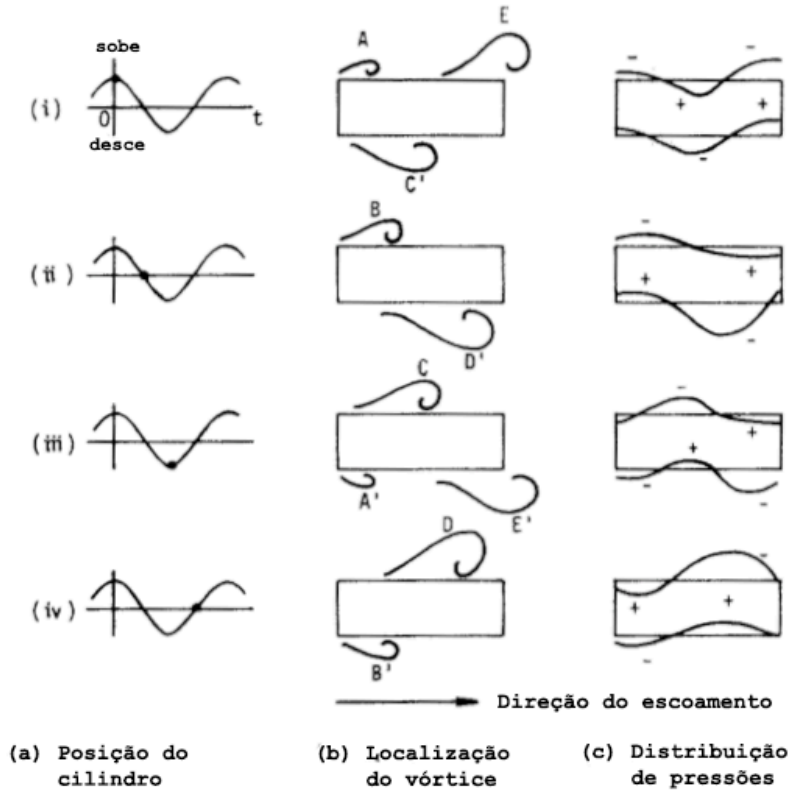
a) ao se formar no bordo de barlavento, o vórtice sincroniza com o movimento vertical da seção;

b) o vórtice se desenvolve por um ciclo inteiro de oscilação até se desprender no bordo de sotavento E' em direção a esteira do escoamento. No bordo de barlavento inferior A', a formação possui comportamento análogo. A configuração do escoamento, devido a vorticidade sobre a face do corpo, produz uma redução na pressão superficial;

c) uma força de sustentação orientada para cima é produzida pelo vórtice D com intensidade superior a força de sustentação orientada para baixo produzida pelo vórtice B'. A força resultante é orientada para cima e sincronizada com o movimento vertical ascendente da seção. Essa interação deve se reproduzir a cada ciclo de oscilação, pois o corpo é excitado por uma força produzida pelo desprendimento de vórtices induzidos pelo seu próprio movimento.

O funcionamento de um ciclo de oscilação para o caso de um corpo de seção retangular, no qual os efeitos são similares aos que ocorrem em tabuleiros de pontes, pode ser observado na figura 10.

Figura 10 – Formação e desenvolvimento de vórtices induzidos e a distribuição de pressões ao longo de uma seção retangular



(fonte: KOMATSU; KOBAYASHI, 1980, p. 356, tradução nossa)

Conforme Komatsu e Kobayashi (1980, tradução nossa), o vórtice percorre a largura B do corpo em um ciclo de oscilação. É necessária uma relação adequada entre velocidade, frequência de desprendimento e largura do tabuleiro para que os vórtices induzidos pelo movimento sejam responsáveis pela excitação. A excitação das vibrações induzidas não ocorre em todos os tipos de seções de tabuleiro, por outro lado algumas seções são estáveis em determinadas velocidades se estiverem inicialmente em repouso, mas instáveis se possuírem algum movimento inicial. As velocidades crítica de disparo (relativa ao surgimento das oscilações), V_{cr1}, e velocidade crítica de máxima oscilação (relativa a maior amplitude das oscilações), V_{cr2}, não são necessariamente iguais.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR VÓRTICES

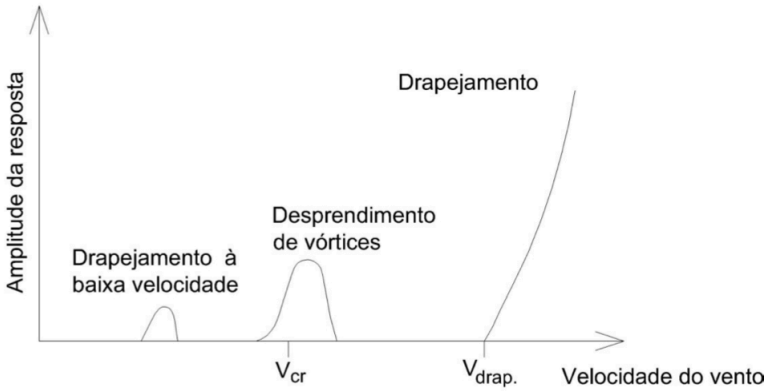
Segundo Komatsu e Kobayashi (1980, p. 361, tradução nossa), as oscilações induzidas pelo desprendimento de vórtices não são essencialmente provocadas pelos vórtices de Kármán. Sabe-se que para alguns formatos retangulares existem vibrações autossustentadas, nas quais

o oscilação do próprio tabuleiro produz vórtices desprendidos no bordo de barlavento que, consecutivamente, são responsáveis por retroalimentar o movimento. De modo geral, a oscilação induzida pelo desprendimento de vórtices pode ser distinguida em função do ponto de separação do escoamento. Os escoamentos separados no bordo de sotavento possuem oscilações de baixa amplitude e são causadas pelos vórtices de Kármán. Por outro lado os escoamentos separados no bordo de barlavento, mais suscetíveis a oscilações de grande amplitude por desprendimentos de vórtices, são independentes em relação aos vórtices de Kármán.

Conforme Komatsu e Kobayashi (1980, p. 361, tradução nossa), as oscilações cujos pontos de separação do escoamento se localizam no bordo de barlavento possuem uma característica peculiar: os vórtices induzidos pelo movimento surgem nesse bordo sincronizados com o próprio movimento do corpo. Portanto, para uma determinada faixa de velocidades existe sustentação aerodinâmica tornando esse tipo de oscilação autossustentada. Nos próximos capítulos são apresentados o mecanismo de autoexcitação e uma classificação das oscilações.

Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 419, tradução nossa) destacam que uma seção de tabuleiro deve ser projetada com atenção especial às velocidades críticas capazes de excitar os fenômenos aerodinâmicos. Uma seção deve ser ensaiada para verificar sua estabilidade frente às velocidades críticas de desprendimento de vórtices mesmo que tenha sido verificada estável para o fenômeno de drapejamento em altas velocidades de vento. O gráfico da figura 11 demonstra essa prerrogativa, pois as oscilações por desprendimento de vórtices ocorrem para velocidades de vento inferiores as quais se observa o drapejamento efetivo. No entanto, como os mecanismos de excitação dos fenômenos são diferentes, a verificação de estabilidade ao drapejamento para altas velocidades de vento não assegura que o mecanismo de desprendimento de vórtices seja excitado a velocidades inferiores.

Figura 11 – Resposta típica em escoamentos de baixa turbulência



(fonte: ITO; NAKAMURA[7], 1982, p. 36 apud NÚÑEZ, 2008, p. 26)

Para Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 420, tradução nossa), "A classificação é essencialmente baseada em ensaios de túnel de vento em escoamento suave através do qual são obtidas a resposta característica, padrões de escoamento e distribuição de pressões.". As oscilações autossustentadas, ou induzidas por vórtices, são classificadas em três grupos distintos. Além de demonstrar o processo na qual se desenvolvem essas oscilações para todos grupos, nos próximos subitens também são apresentados a influência das velocidades reduzidas críticas, respostas características, padrões de escoamento e distribuição de pressão.

3.2.1 Influência das velocidades reduzidas críticas

Nas fórmula seguintes, Núñez (2008, p. 47) apresenta as velocidades reduzidas de acordo com o movimento em análise. Velocidades reduzidas são adimensionalizações cujo interesse é a reciprocidade com o número de Strouhal associado, de forma que a V_{red} vertical, na fórmula 8, é:

$$V_{red,v} = \frac{V}{f_h L} \qquad \text{(fórmula 8)}$$

Onde:

$V_{red,v}$ = velocidade reduzida associada ao movimento vertical;

[7] ITO, M.; NAKAMURA, Y. Aerodynamic Stability of Structures in Wind. **IABSE Surveys**, Zurich, v. 6, n. 2, p. 33-56, 1982.

u = velocidade média;
f_h = frequência associada a um ciclo completo de oscilação vertical;
L = dimensão característica (altura do tabuleiro).

Já a V_{red} rotacional é expressa pela fórmula 9, de maneira que:

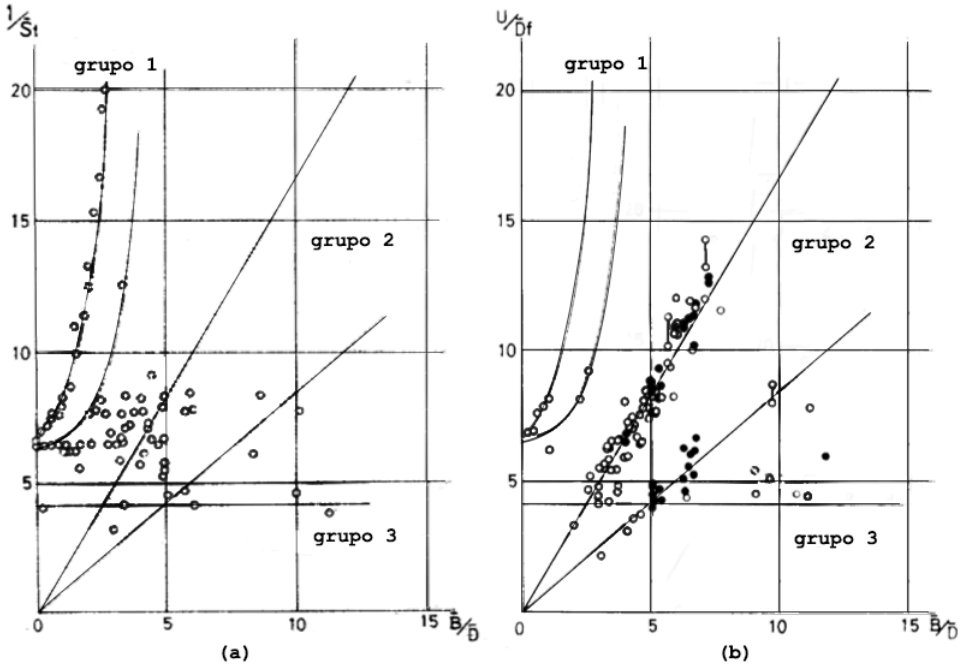
$$V_{red,r} = \frac{V}{f_{\boldsymbol{\theta}} L} \qquad \text{(fórmula 9)}$$

Onde:
$V_{red,r}$ = velocidade reduzida associada ao movimento rotacional;
V = velocidade média;
f_θ = frequência associada a um ciclo completo de oscilação de rotação;
L = dimensão característica (para as pontes é considerada como a altura do tabuleiro).

Do ponto de vista das oscilações induzidas por vórtices podem ser observadas duas velocidades críticas reduzidas: a velocidade crítica reduzida de disparo das oscilações, V_{cr1}, e a velocidade crítica reduzida de máxima amplitude de vibrações, V_{cr2} (SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 420, tradução nossa).

Na figura 12, são representadas duas situações. No gráfico à esquerda, são relacionados a proporção B/D da seção transversal com o inverso do número de Strouhal, definido como velocidade reduzida. No gráfico à direita, são relacionados a proporção B/D com as velocidades reduzidas V_{cr1} e V_{cr2}. Os resultados que são mostrados na figura 12 foram obtidos a partir de experimentos com modelos em escala reduzida utilizando seções transversais usuais em pontes (retangular, em formato H, trapezoidal e hexagonal, entre outras). As dimensões efetivas e geometria da seção transversal, dessas seções rombudas são mostradas na figura 13, em função do ângulo de ataque que do vento.

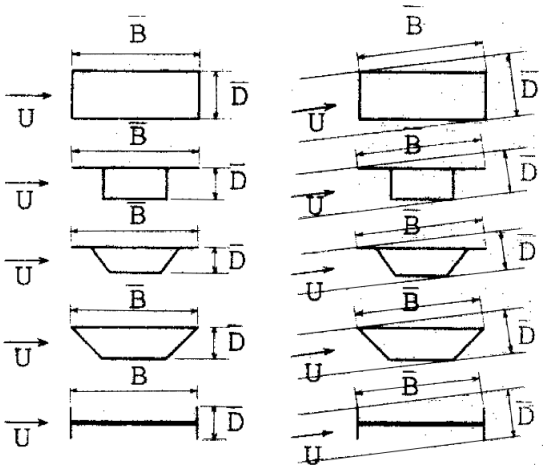
Figura 12 – Relações entre B/D e $1/S_t$ ou velocidade reduzida



(fonte: adaptado de SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 420-421, tradução nossa)

Os resultados, mostrados na figura 12, definem a classificação das oscilações induzidas por vórtices em três grupos com características distintas: os grupos 1, 2 e 3. O gráfico à esquerda mostra os ajustes de curvas, com mais de uma tendência em alguns grupos, para o recíproco do número de Strouhal e a relação entre as dimensões, do tabuleiro, longitudinal e transversal à direção do escoamento. A definição das dimensões B e D, utilizadas no experimento, são representadas na figura 13 e são função do ângulo de ataque do vento e forma geométrica da seção do tabuleiro. Por outro lado, o gráfico à direita mostra ajustes de curvas similares aos anteriores, porém as ordenadas são substituídas pela velocidade reduzida, em função da dimensão característica do tabuleiro, transversal ao escoamento.

Figura 13 – Dimensões longitudinal e transversal a direção do escoamento



(fonte: SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 420)

Conforme Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 420-421, tradução nossa), a influência das velocidades reduzidas implica que:

a) no primeiro grupo, as velocidades reduzidas críticas de máximas amplitudes, V_{cr2}, coincidem com o inverso dos respectivos números de Strouhal;
b) no segundo grupo, a velocidade reduzida crítica de disparo, V_{cr1}, e a proporção B/D possuem relação linear com duas inclinações distintas;
c) no terceiro grupo, a velocidade reduzida crítica de disparo, V_{cr1}, e a proporção B/D possuem relação constante ou praticamente constante entre si.

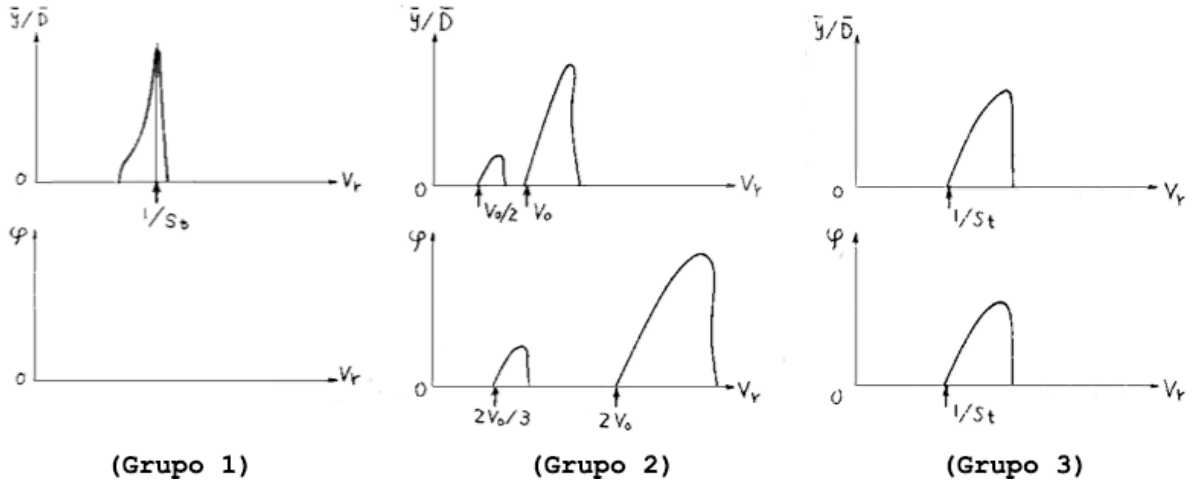
Para ângulo de incidência de vento entre +7º e -7º, as oscilações induzidas por vórtices na maioria das seções transversais de pontes se comportam como as do segundo grupo do gráfico da figura 12 (SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 421, tradução nossa).

3.2.2 Respostas características das amplitudes de oscilações

Segundo Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 421, tradução nossa), são admitidos pelo menos dois tipos de respostas em função de deslocamentos e da velocidade reduzida para o mecanismo de oscilações induzidas por vórtices. Uma resposta associa as oscilações induzidas por vórtices a um movimento de translação vertical, enquanto a outra associa a um

movimento de torção longitudinal, ou rotação, da seção rombuda. As formas de resposta dinâmica, em termos de deslocamentos verticais e rotacionais para os três grupos classificados neste trabalho, são mostrados na figura 14.

Figura 14 – Amplitude de oscilação das respostas vertical e rotacional



(fonte: adaptado de SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 421, tradução nossa)

Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 421, tradução nossa), demonstram as respostas características para os grupos 1, 2 e 3 na forma de dois diagramas. Para a resposta ao movimento vertical as ordenadas são representadas por amplitudes adimensionalizadas pela dimensão característica do tabuleiro da ponte (altura da seção rombuda), transversal ao escoamento, mensurado em função da velocidade reduzida. Para a resposta ao movimento rotacional as ordenadas são representadas pela amplitudes angulares em função da velocidade reduzida.

Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 421-422, tradução nossa) concluem que:

a) no grupo 1, a resposta ao movimento vertical impõe um pico íngreme no inverso do número de Strouhal. Não existe resposta a rotação para esses casos;

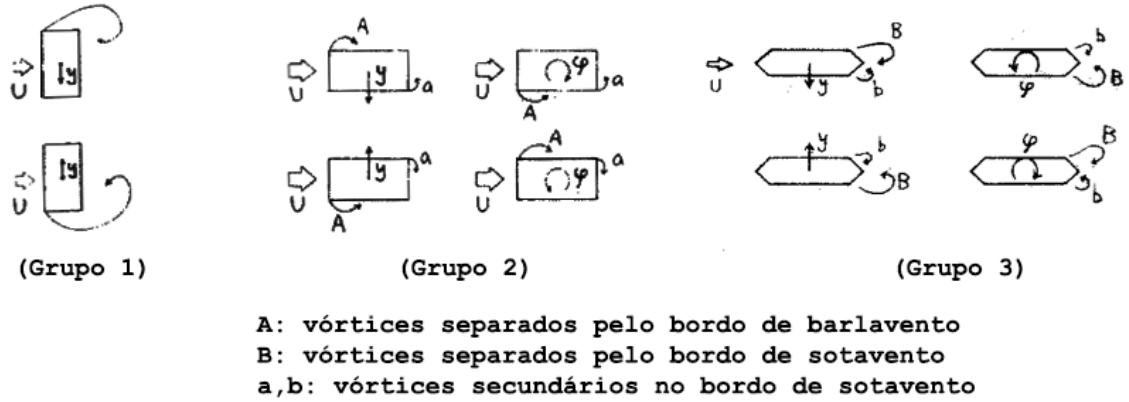
b) no grupo 2, as velocidades reduzidas críticas, V_{cr1}, nas quais os movimentos são excitados, não são iguais. Considerando que para o movimento vertical a resposta seja excitada em V_0 (velocidade reduzida crítica de disparo padrão) e em $(1/2)V_0$, a resposta rotacional deverá responder a uma excitação em $(2/3)V_0$ e em $2V_0$;

c) no grupo 3, ambas as velocidades reduzidas críticas vertical e rotacional são excitadas pelo inverso do valor do número de Strouhal das seções.

3.2.3 Padrões de escoamento ao redor de seções em vibração

As respostas dinâmicas observadas na figura 14 são representados pelos padrões de escoamento esquematizados na figura 15. Cada grupo, na classificação adotada, possui um comportamento distinto em função do tipo da resposta. De modo geral, para estimativa do padrão do escoamento é observada uma dependência dos locais de formação e desprendimento dos vórtices principais e secundários e a direção da força resultante que produzem associados sobre a seção.

Figura 15 – Padrões de escoamento ao redor de seções rombudas em vibração



(fonte: SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 422, tradução nossa)

Para o grupo 1, a separação dos vórtices, no bordo de barlavento, é bastante intensa e inclui todo o corpo na região de separação. A inclusão de toda seção na esteira do escoamento inibe o surgimento de vórtices secundários no bordo de sotavento, impossibilitado um esforço de momentos alternados que dê origem ao movimento rotacional nesse grupo de vibrações. O movimento vertical também gera vórtices intensos alternadamente no bordo de sotavento (SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 422, tradução nossa).

Segundo Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 422-423, tradução nossa), no grupo 2, dois tipos de vórtices são responsáveis pelo padrão formado. Um tipo de vórtice se forma no bordo de barlavento conforme o escoamento é separado, e o outro tipo é formado na esteira logo após o bordo de sotavento devido ao movimento do corpo. Esses dois tipos são chamados de vórtices separados pelo bordo de barlavento e vórtices secundários no bordo de sotavento. Os vórtices secundários, gerados em fase com os vórtices separados no bordo de barlavento, surgem em faces opostas para oscilações verticais e na mesma face para oscilações de

rotação, caracterizando a principal diferença entre os vórtices gerados pelos movimentos nesse grupo. Admitem-se oscilações induzidas por vórtices, nesse grupo, caso sejam satisfeitas as seguintes condições:

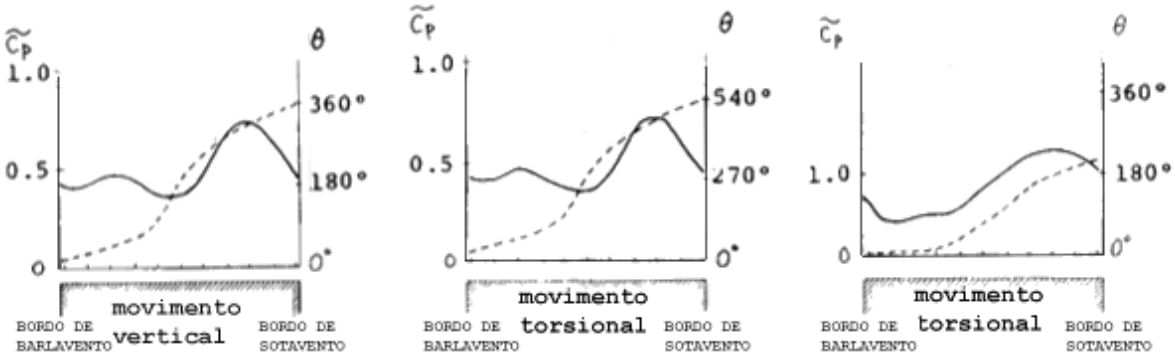
a) se os vórtices de cada bordo se unirem após um ou um mais múltiplos períodos de oscilação vertical, ou ainda meio ou meio mais múltiplos períodos de oscilação de rotação;
b) se os vórtices gerados em cada movimento possuírem mesma velocidade média;
c) se o desprendimento de vórtices for periódico e estável;
d) se o desenvolvimento dos vórtices de barlavento for suficientemente capaz para atingir a excitação, ou seja, eles devem, chegar ao bordo de sotavento após n ciclos do movimento vertical ou (2n-1)/2 ciclos do movimento rotacional.

No grupo 3, é gerada separação de vórtices no bordo de sotavento ao invés do bordo de barlavento, permanecendo em conjunto com os vórtices secundários no bordo de sotavento. Não existe diferença de fase entre esses dois tipos de vórtice independentemente do movimento. Os vórtices em fase justificam as velocidades reduzidas críticas de disparo idênticas em ambos os movimentos.

3.2.4 Distribuição de pressões

A distribuição de pressões é tanto caracterizada pela intensidade dos vórtices separados no bordo de barlavento, quanto pela sua diferença de fase com os vórtices secundários no bordo de sotavento. Essa diferença indica o tempo para que o vórtice percorra toda a extensão da seção transversal até o bordo de sotavento, pois cada meio período de oscilação vertical ou de rotação equivale a uma diferença de fase de 180º (SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 425, tradução nossa). A figura 16 mostra a distribuição de pressões flutuantes na superfície de modelos do grupo 2 e a diferença de fase entre os vórtices gerados em bordos opostos. As linhas sólidas indicam a amplitude das pressões de sucção, enquanto que as linhas tracejadas indicam a diferença de fase entre o movimento vertical ou rotacional e os vórtices desprendidos no bordo de barlavento.

Figura 16 – Distribuição das pressões e diferença de fase dos modelos do grupo 2



(fonte: adaptado de SHIRAISHI; MATSUMOTO, 1983, p. 425, tradução nossa)

Para Shiraishi e Matsumoto (1983, p. 425, tradução nossa) a velocidade reduzida crítica de disparo vertical ou rotacional, V_{cr1}, excitada pela união entre o vórtice gerado no bordo de barlavento e o vórtice no bordo de sotavento, encontram-se expressas empiricamente pelas fórmulas 10 e 11:

$$V_{cr1,v} = 1{,}67 \frac{1}{n} \frac{B}{D} \qquad \text{(fórmula 10)}$$

Onde:

$V_{cr1,v}$ = velocidade reduzida crítica de disparo para o movimento vertical;

B = dimensão característica longitudinal da seção do tabuleiro;

D = dimensão característica transversal da seção do tabuleiro;

n = índice inteiro natural (1, 2, 3...).

$$V_{cr1,t} = 1{,}67 \frac{2}{(2n-1)} \frac{B}{D} \qquad \text{(fórmula 11)}$$

Onde:

$V_{cr1,t}$ = velocidade reduzida crítica de disparo para o movimento rotacional;

B = dimensão característica da seção do tabuleiro longitudinal a direção do escoamento;

D = dimensão característica da seção do tabuleiro transversal a direção do escoamento;

n = índice inteiro natural (1, 2, 3...).

4 MEDIDAS DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS

As vibrações transversais induzidas em pontes são detalhadamente estudadas com a finalidade de que sejam suprimidas em tabuleiros de pontes. No entanto, a existência dessas oscilações são mais observadas conforme são empregados materiais mais leves e formas geométricas mais esbeltas em tabuleiros. Para Ito[8] (1998 apud NÚÑEZ, 2008), podem ser empregadas medidas mitigadoras obedecendo dois critérios principais:

a) a velocidade crítica de disparo pode ser manipulada para que seja suficientemente maior que a velocidade considerada no projeto para prevenir a ocorrência do fenômeno, quando houver vibrações com amplitudes divergentes;
b) a máxima amplitude medida na resposta vertical pode ser reduzida para obedecer critérios de aceitação, quando houver vibrações com amplitudes limitadas.

Duas vertentes de controle de vibrações induzidas por vórtices, são encontrados em publicações do gênero. A seguir são tratadas brevemente soluções de caráter mecânicas, e posteriormente apresentadas soluções de caráter aerodinâmicas nas seções de tabuleiros.

4.1 SOLUÇÕES ESTRUTURAIS

Ito[9] (1998 apud NÚÑEZ, 2008) salienta que as soluções de intervenção estrutural (ou mecânica) manipulam a resposta dinâmica por meio da introdução de um agente externo, na forma de dispositivos projetados para exercerem forças ou ajustarem propriedades físicas, como massa e rigidez da estrutura. As soluções estruturais podem ser prejudiciais, pois oneram cargas estáticas permanentes exigindo dispendiosos reforços na estrutura. Entretanto, o aumento na rigidez da estrutura impacta em menores amplitudes de deslocamentos e maiores velocidades críticas de disparo e máxima amplitude (devido à frequência natural da estrutura ser maior).

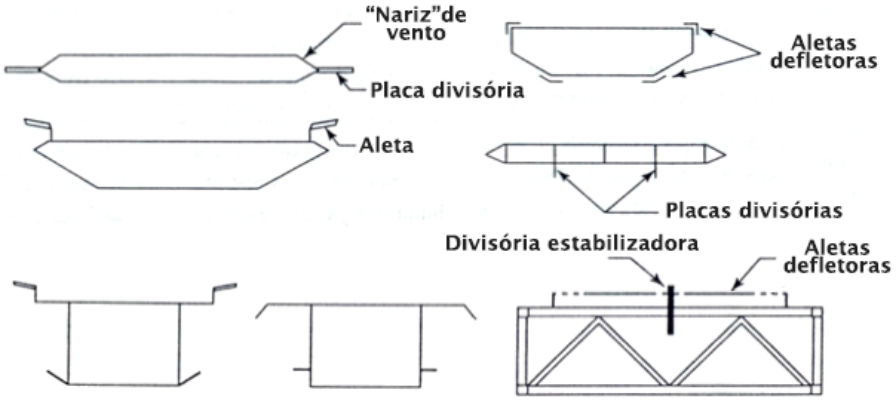
[8] ITO, M. Control of wind-induced vibrations of structures. In: Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, 1998, Gramado. **Proceedings...** Porto Alegre: Riera and Davenport Editors, 1998, p. 297-306.

[9] opus citatua

4.2 SOLUÇÕES AERODINÂMICAS

Conforme Ito[10] (1998 apud NÚÑEZ, 2008), as soluções aerodinâmicas procuram melhorar a interação fluido-estrutura de forma econômica, através da modificação da geometria da seção do tabuleiro da ponte. Em linhas gerais, os dispositivos aerodinâmicos diferem basicamente no grau de alteração geométrica. É comum, em pontes de grandes vãos, o uso de seções vazadas trapezoidais alongadas, hexagonais ou até mesmo seções com aberturas para passagem de ar verticais que permitam redução de diferença de pressões nas faces opostas do tabuleiro. Não sendo possível redefinir toda geometria da seção, é possível introduzir apenas alguns dispositivos capazes de controlar a separação do escoamento ou restringir a formação dos vórtices. Esses dispositivos, passiva ou ativamente, são responsáveis por minimizar o efeito das vibrações induzidas de maneira a intervir minimamente na arquitetura da ponte. Os dispositivos de controle ativo se referem a interferência externa sob uma condição específica, como por exemplo o uso de jatos de ar, aletas giratórias ou dispositivos com intenção de controlar a camada limite. Já os dispositivos passivos atuam como obstáculos com menor custo, e segundo El-Gammal et alli (2007, p. 664, tradução nossa) são "[...] usualmente selecionadas por causa da sua confiabilidade, simplicidade e eficácia.". A figura 17 mostra combinações de soluções aerodinâmicas passivas e ativas que empregam geometrias diferentes.

Figura 17 – Dispositivos aerodinâmicos estabilizadores



(fonte: adaptado de ITO[11], 1998 apud NÚÑEZ, 2008, p. 78)

[10] ITO, M. Control of wind-induced vibrations of structures. In: Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, 1998, Gramado. **Proceedings...** Porto Alegre: Riera and Davenport Editors, 1998, p. 297-306.

[11] opus citatua

5 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Conforme Núñez (2008, p. 109)

> Testes em túnel de vento de modelos de pontes envolvem a forte interação entre a estrutura do modelo e o escoamento. O significado imediato desta é que não apenas a estrutura deve ser corretamente modelada, mas também o escoamento, [com as] suas características próprias de acordo com o local de construção da ponte.
>
> [...]
>
> A decisão mais importante durante o processo de modelagem consiste na determinação de quais relações de semelhança devem ser atendidas de tal forma que, aquelas que deixarem de ser cumpridas causem o menor prejuízo aos testes. Essa decisão deve ser tomada com base no conhecimento dos principais parâmetros envolvidos, ou seja, na identificação dos parâmetros dominantes. Dessa forma os menos importantes podem deixar de ser considerados.

A seguir são apresentados brevemente técnicas de modelagem em túnel de vento, como simulação da camada limite atmosférica e semelhança dimensional, e posteriormente é apresentado o projeto a ser ensaiado em túnel de vento.

5.1 SIMULAÇÃO DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

A superfície da Terra exerce, sobre o ar em movimento, uma força de arrasto horizontal sobre o escoamento que diminui conforme aumenta a altura sobre o solo. De forma que, somente acima da região conhecida como camada limite atmosférica, na região da atmosfera livre, a consideração dessa força de arrasto não é necessária (SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 19, tradução nossa).

Loredo-Souza et alli (2004, p. 137) alegam que, na região da camada limite atmosférica, “Para qualquer velocidade do vento, o número de Reynolds associado [...] é tão grande, que se espera que o escoamento seja turbulento.”. Além disso, Loredo-Souza et alli (2004, p. 138) referem-se a uma particularidade, que devido a estrutura da camada limite atmosférica, provoca o chamado deslocamento do plano-zero. No caso dos centros urbanos, nos quais a as edificações existentes constituem a rugosidade do terreno, o vento possui a tendência de se estabelecer entre eles, causando um deslocamento no perfil de velocidades dos efeitos

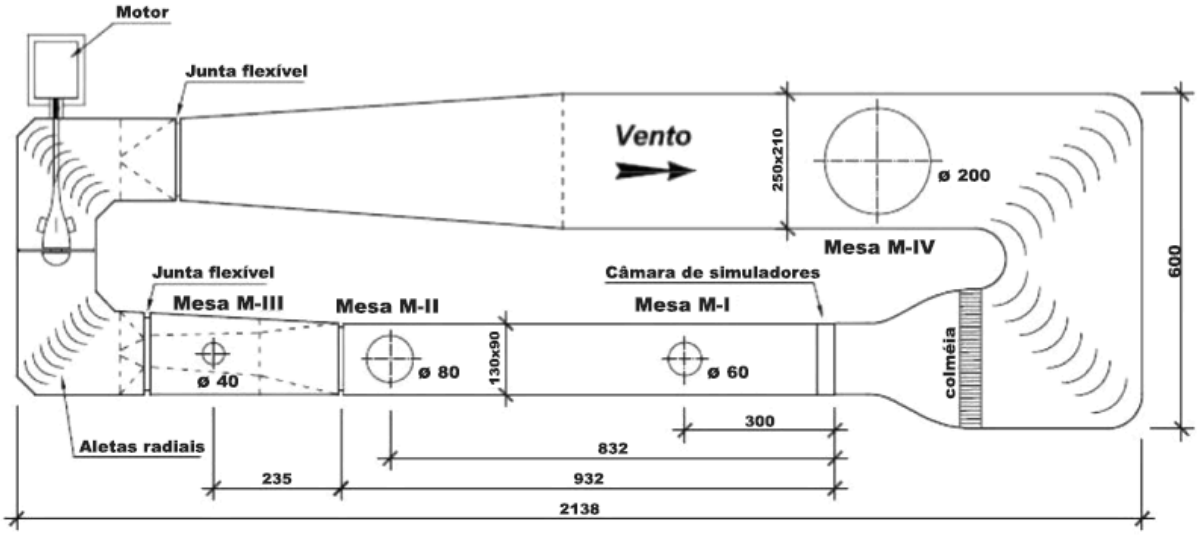
provocados pelo nível do terreno para uma altura equivalente a altura média das edificações, tornando assim o escoamento determinado por fatores locais como a geometria dos edifícios.

A rugosidade constitui importante parâmetro regulador da simulação. Para reproduzir a escala e simular a turbulência próxima às baixas altitudes no terreno natural, deve-se cobrir um trecho suficientemente longo do piso do túnel de vento com material que seja rugosamente análogo ao terreno da construção (BLESSMANN, 1983, p. 112-113). De acordo com Loredo-Souza et alli (2004, p. 141), a camada limite atmosférica cresce lentamente, de modo que métodos artificiais são necessários para que a camada não desenvolva sua espessura em grandes extensões. No entanto, esses métodos artificiais são capazes apenas de reproduzir o perfil de velocidades, sem reproduzir as características da turbulência.

Loredo-Souza et alli (2004, p. 143-152) resumem a simulação das características da camada limite em túnel de vento de crescimento natural com o uso de métodos passivos ou ativos. Métodos passivos compreendem obstáculos com a finalidade de reproduzir características da camada limite atmosférica, porém, como causam efeitos de bloqueio, implicam em perda de velocidade do escoamento. Métodos ativos são utilizados através da adição de quantidade de movimento, como a injeção de jatos de ar perpendiculares ao escoamento. Blessmann (1983, p. 114), conforme a figura 18, ressalta que o túnel de vento TV-2[12] da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) combina métodos passivos de mistura, barreira e elementos rugosos juntamente com métodos ativos, tal como um conjunto de 17 jatos perpendiculares ao eixo do circuito do túnel.

[12] Atualmente denominado como túnel de vento prof. Joaquim Blessmann, em homenagem ao pesquisador que fundou o laboratório em 1977.

Figura 18 – Esquema do circuito aerodinâmico do túnel de vento TV-2 da UFRGS



(fonte: adaptado de LOREDO-SOUZA et alli, 2004, p. 141)

5.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

A velocidade do vento e a turbulência são medidas por um sistema de anemômetros de dois canais com temperatura constante linearizada por meio de técnica de fio-quente. As respostas dinâmicas do modelo seccional são medidas por dois acelerômetros piezoelétricos, com sinais condicionados por um amplificador de carga fixados nas vinculações de apoio dos modelos (BLESSMANN,1982, p. 245). O amplificador condiciona os dados e um microcomputador registra os dados em um arquivo de saída. (NÚÑEZ, 2008, p. 188)

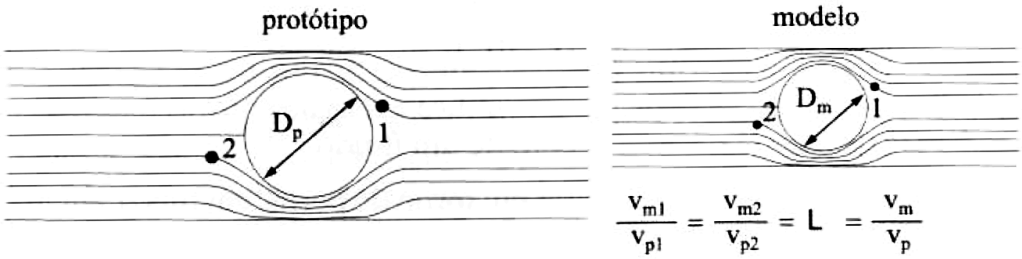
5.3 SEMELHANÇA DIMENSIONAL

De acordo com Brunetti (2007, p. 141), muitos problemas na Mecânica dos Fluidos possuem soluções analíticas trabalhosas, ou até mesmo impossíveis, pois normalmente existe um número de variáveis muito grande envolvido. Métodos experimentais, especialmente desenvolvidos, muitas vezes tornam possíveis uma aproximação desses resultados por meio da reprodução dos fenômenos em escala reduzida. A análise dimensional é uma teoria que permite construir modelos cujos resultados experimentais são capazes de simplificar e racionalizar as pesquisas. Segundo Brunetti (2007, p. 151-152), a teoria da semelhança, ou dos modelos, é utilizada para construir modelos que sejam convenientes ao fenômeno investigado e é, de modo geral, uma indicação de que dois fenômenos tem um mesmo comportamento. Na mecânica dos fluidos, o termo semelhança indica a relação entre dois

escoamentos de diferentes dimensões, mas com semelhança geométrica entre seus contornos. Para ser possível esta comparação entre o modelo e a realidade, é indispensável que os conjuntos de condições sejam fisicamente semelhantes. A semelhança física necessariamente envolve:

a) semelhança geométrica: é a razão conhecida como fator de escala, no qual a propriedade característica dos sistemas geometricamente semelhantes é a proporção constante entre as dimensões do modelo reduzido e natural;
b) semelhança cinemática: é a semelhança do movimento, quando dois escoamentos de diferentes escalas geométricas têm o mesmo formato de linhas de corrente conforme a figura 19;
c) semelhança dinâmica: é a semelhança das forças, dois sistemas são dinamicamente semelhantes quando os valores absolutos das forças, em pontos equivalentes dos dois sistemas estão numa razão fixa.

Figura 19 – Semelhança geométrica entre os escoamentos de um protótipo com diâmetro D_p e um modelo com escala D_m



(fonte: BRUNETTI, 2007, p. 152)

Para Núñez (2008, p. 109-111), os fatores que intervém na modelagem em túnel de vento, de modo geral são:

a) rigidez e graus de liberdade necessários;
b) massa;
c) momento de inércia de massa dos elementos constituintes do modelo;
d) amortecimento estrutural do sistema;
e) forma e frequência dos modos de vibração;
f) efeitos de vizinhança, entre outros fatores.

A seguir são mostrados alguns parâmetros pertinentes a modelagem de tabuleiros de pontes.

5.3.1 Semelhança do número de Reynolds

Conforme visto no capítulo 3, o número de Reynolds estabelece uma proporção entre as forças inerciais e viscosas. Como o ar é considerado um fluido incompressível, pois apresenta uma variação puntual frente a um aumento de pressão, a única medida compensatória encontrada para a escala do modelo é o aumento da velocidade do vento. Entretanto, a semelhança quanto ao número de Reynolds entre modelo e protótipo é parcialmente comprometida, já que não é possível atingir a faixa de velocidades necessária nos túneis de vento conhecidos (NÚÑEZ, 2008).

Segundo Núñez (2008, p. 112-113), nos corpos de superfícies curvas e lisas a forma de escoamento é dependente do número de Reynolds, de forma que a influência sobre o ponto de separação do escoamento é severa. Já para corpos com superfícies retilíneas a separação do escoamento preferencialmente ocorre nas arestas definidas, como no caso da maioria das seções de ponte. Logo, a influência do número de Reynolds passa a ser secundária, pois ainda é possível ocorrer um recolamento a sotavento do escoamento separado a barlavento. Nos casos em que é necessária apurar essa semelhança, é possível alterar dimensões no modelo para que o coeficiente de arrasto seja ajustado para valores esperados, entretanto é preciso negligenciar outros fatores como alterações de massa no modelo ou rigidez da seção.

5.3.2 Amortecimento e frequência natural

Simiu e Scanlan (1978, p. 171-172, tradução nossa) definem o amortecimento estrutural através de um sistema com um grau de liberdade, representado pela figura 20. O sistema é constituído por uma haste vertical AB de massa desprezível, engastada na extremidade A com um corpo de massa m fixado na extremidade B. O deslocamento do corpo provocado por uma força de excitação $F(t)$ é resistido principalmente por uma reação devida a rigidez da haste e por uma força de amortecimento elástica, devido à viscosidade atuante no sistema durante seu movimento. O equilíbrio dessas forças é expresso pela aplicação da 2ª lei de Newton, conforme a equação 1:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \qquad \text{(equação 1)}$$

Onde:

$\ddot{x}(t)$ = aceleração da massa em função do tempo;

$\dot{x}(t)$ = velocidade da massa em função do tempo;

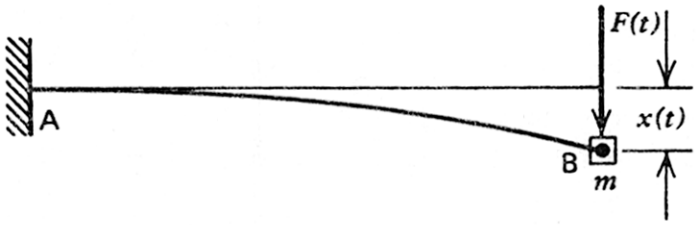
$x(t)$ = deslocamento da massa em função do tempo;

$F(t)$ = força de excitação em função do tempo;

m = massa do corpo fixado na extremidade da haste;

c =amortecimento do movimento devido à viscosidade.

Figura 20 – Representação esquemática de um sistema com um grau de liberdade



(fonte: adaptado de SIMIU; SCANLAN, 1978, p. 172)

Conforme Blessmann (1998, p. 22), a razão de amortecimento em sistemas lineares com um grau de liberdade representa o decremento do deslocamento em relação à posição de equilíbrio estático no tempo. Segundo Simiu e Scanlan (1978, p. 172, tradução nossa), a relação de amortecimento estrutural pode ser obtida através solução da equação diferencial expressa na equação 1. A razão entre os amortecimentos viscoso e crítico[13] é definida na fórmula 12:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \qquad \text{(fórmula 12)}$$

Onde:

ζ = razão de amortecimento estrutura;

k = rigidez elástica à flexão ou torção transversal;

m = massa do corpo fixado na extremidade da haste;

c =amortecimento do movimento devido à viscosidade.

[13] O coeficiente de amortecimento critico é determinando no momento em que o movimento livre do corpo é não oscilatório, possui valor equivalente ao denominador $2\sqrt{km}$ da fórmula 12.

Análoga ao amortecimento, a frequência natural da haste pode ser expressa na fórmula 13:

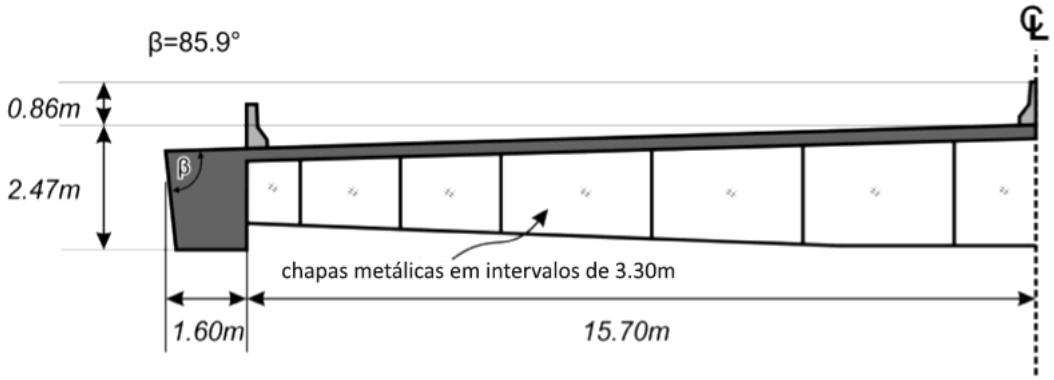
$$n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad \text{(fórmula 13)}$$

Onde:
n = frequência natural da estrutural;
k = rigidez elástica à flexão ou torção transversal;
m = massa do corpo fixado na extremidade da haste.

5.4 PROJETO ANALISADO

A figura 21 mostra a seção de projeto do tabuleiro de ponte em estudo realizado pelo Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAC/UFRGS). Trata-se de um ponte[14] a ser construída em Porto Alegre. O projeto constitui uma ponte rodoviária como parte de um esforço para implantação de melhorias de mobilidade urbana no município. A ponte possui um vão de aproximadamente 300,0 m, com perfis metálicos sob o tabuleiro a cada 3,30 m e guarda-rodas sobre o tabuleiro (no centro do vão e nas laterais). As dimensões do tabuleiro em escala real são apresentadas na figura 21.

Figura 21 – Seção de projeto original do tabuleiro ponte em escala real



[14] A autorização para identificação do projeto e dos respectivos autores não foi obtida para este trabalho.

(fonte: em fase de elaboração[15])

A tabela 1 contém as principais propriedades da seção transversal do projeto analisado.

Tabela 1 – Resumo das principais propriedades do tabuleiro de ponte em estudo

Parâmetro	**Valor**
Largura (B)	$34{,}7\ m$
Altura (D)	$3{,}33\ m$
Esbeltez (B/D)	10,4
Vão (l)	$\sim 300\ m$
Primeira frequência de flexão vertical (f_h)	$0{,}617\ Hz$
Primeira frequência de rotação (f_θ)	$0{,}794\ Hz$
Relação entre modos de vibração (f_h/f_θ)	1,287
Massa por unidade de comprimento (m/l)	$40{,}2\ t/m$
Momento de inércia de massa por unidade de comprimento (l/l)	$6626\ tm^2/m$

(fonte: em fase de elaboração[16])

A seguir são aspresentadas as alterações geométricas em função da adição de dispositivos passivos de controle de vibrações transversais na seção de projeto. Foram introduzidas as seguintes modificações na geometria da seção transversal: narizes de vento triangulares, fechamento inferior do tabuleiro, placas divisórias e aletas inferiores.

5.4.1 Modelo 1 (nariz de vento tipo 1)

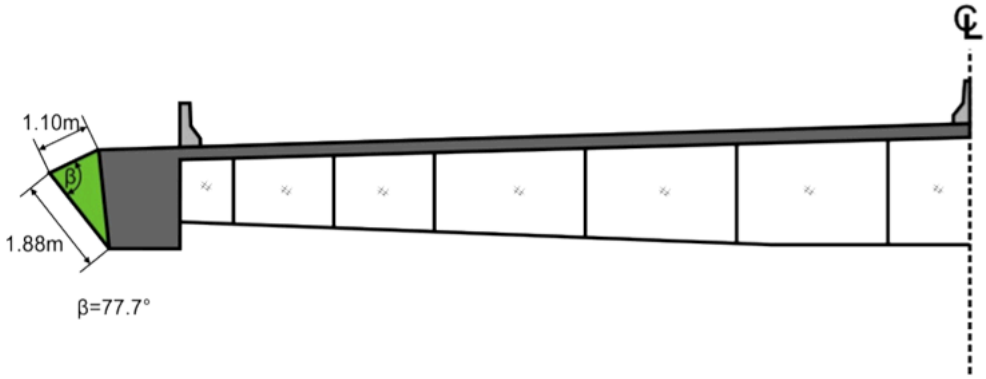
A figura 22 mostra a modificação da seção transversal com introdução de narizes de vento triangulares, de pequenas proporções, nos bordos de barlavento e sotavento do tabuleiro com

[15] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[16] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

ângulo interno $\beta = 77{,}7°$. Os narizes de vento, em cada um dos bordos, possuem seções iguais com dimensões das faces superior e inferior de 1,10 e 1,88 m, respectivamente.

Figura 22 – Modelo 1 (seção original alterada com nariz de vento tipo 1)

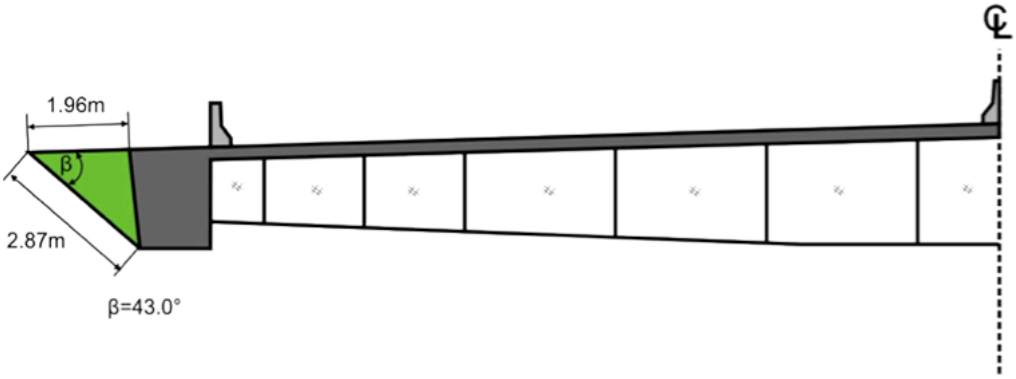


(fonte: em fase de elaboração[17])

5.4.2 Modelo 2 (nariz de vento tipo 2)

A figura 23 mostra a modificação da seção transversal com introdução de narizes de vento triangulares, de tamanho intermediário, nos bordos de barlavento e sotavento do tabuleiro com ângulo interno $\beta = 43{,}0°$. Os narizes de vento, em cada um dos bordos, possuem seções iguais com dimensões das faces superior e inferior de 1,96 e 2,87 m, respectivamente.

Figura 23 – Modelo 2 (seção original alterada com nariz de vento tipo 2)



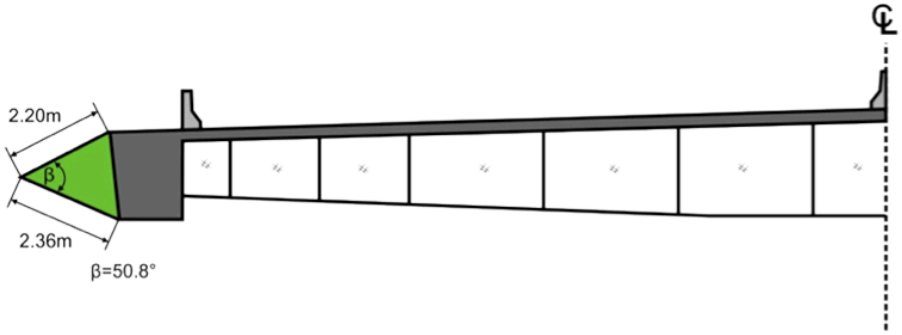
(fonte: em fase de elaboração[18])

[17] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

5.4.3 Modelo 3 (nariz de vento tipo 3)

A figura 24 mostra a adição de narizes de vento triangulares de grandes proporções, nos bordos de barlavento e sotavento do tabuleiro com ângulo interno $\beta = 50{,}8°$. Os narizes de vento, possuem dimensões de 2,20 e 2,36 m, nas faces superior e inferior respectivamente.

Figura 24 – Modelo 3 (seção original alterada com nariz de vento tipo 3)



(fonte: em fase de elaboração[19])

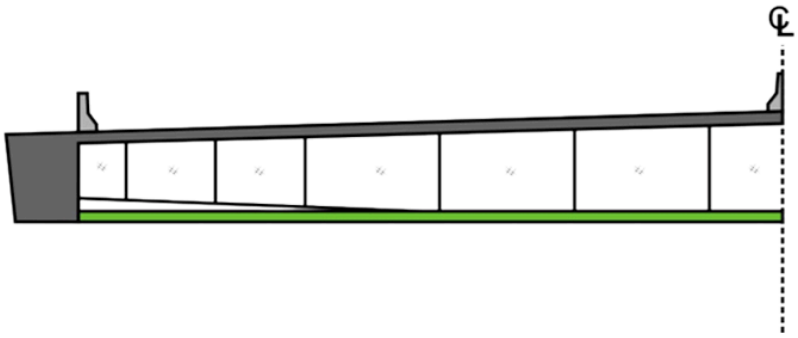
5.4.4 Modelo 4 (fechamento inferior do tabuleiro)

A figura 25 mostra a modificação da seção transversal com fechamento horizontal. A face inferior é vedada com uma placa horizontal para restringir a região de formação de vórtices.

Figura 25 – Modelo 4 (seção original alterada com fechamento inferior)

[18] Idem

[19] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

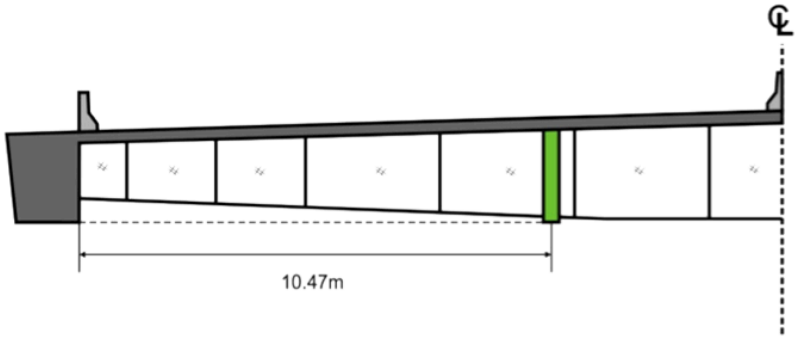


(fonte: em fase de elaboração[20])

5.4.5 Modelo 5 (placas divisórias)

A figura 26 mostra a modificação da seção transversal com o uso de placas divisórias verticais sob o tabuleiro, situadas a uma distância de 10,47 m entre o eixo de simetria das placas e a face interna das longarinas do tabuleiro.

Figura 26 – Modelo 5 (seção original alterada com placas divisórias)



(fonte: em fase de elaboração[21])

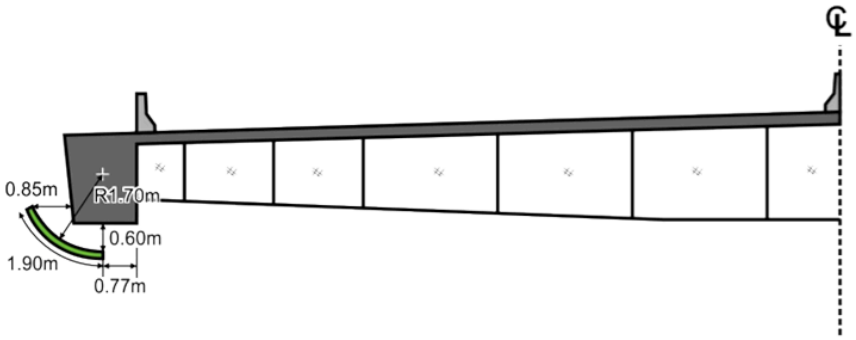
5.4.6 Modelo 6 (aletas inferiores)

A figura 27 mostra a modificação da seção transversal com o uso de aletas. Seu uso tem como objetivo controlar a separação e a formação dos vórtices na face inferior do tabuleiro.

Figura 27 – Modelo 6 (seção original altera com aletas)

[20] Idem

[21] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.



(fonte: em fase de elaboração[22])

[22] Idem

6 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados dos modelos ensaiados no túnel vento prof.º Joaquim Blessmann. Os experimentos foram realizados com modelos em escala reduzida de 1/70, submetidos a escoamento suave com velocidade média do vento variando entre 1,6 e 23,4 m/s (5,8 e 84,3 km/h). Afim de investigar as situações mais desfavoráveis, foram testadas três inclinações distintas, representando os ângulos de ataque do vento de 0°, $-4°$ e $+4°$.

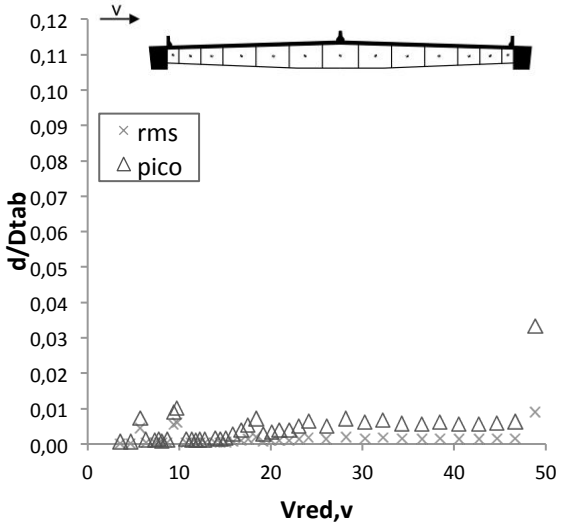
6.1 RESPOSTAS DE DESLOCAMENTOS OBTIDAS

Conforme visto anteriormente, a resposta dinâmica devida ao vento em uma estrutura se resume ao comportamento frente a ação do vento (BLESSMANN, 1998). As respostas dinâmicas de deslocamentos transversais apresentadas neste trabalho se referem às máximas amplitudes de translação vertical e rotação medidas no modelos durante os ensaios. As ordenadas das respostas verticais são plotadas em termos de amplitudes adimensionais (d/D_{tab}), e as abscissas em termos de velocidades reduzidas verticais de vento ($V_{red,v} = V/f_h D_{máx}$). As ordenadas das respostas rotacionais são plotadas em termos de amplitudes angulares (em graus), e as abscissas termos velocidades reduzidas rotacionais ($V_{red,r} = V/f_\theta D_{máx}$).

6.1.1 Respostas da seção original

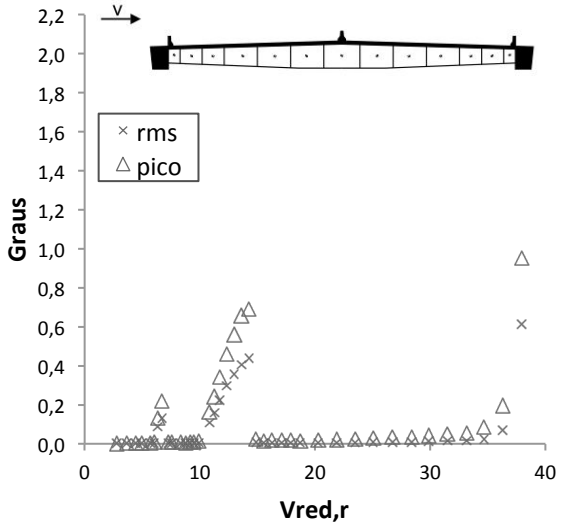
As figuras 28 e 29 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}21\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$, respectivamente. As figuras 30 e 31 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}23\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$. Já as figuras 32 e 33 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}24\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$.

Figura 28 – Resposta vertical da seção original, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}21\%$



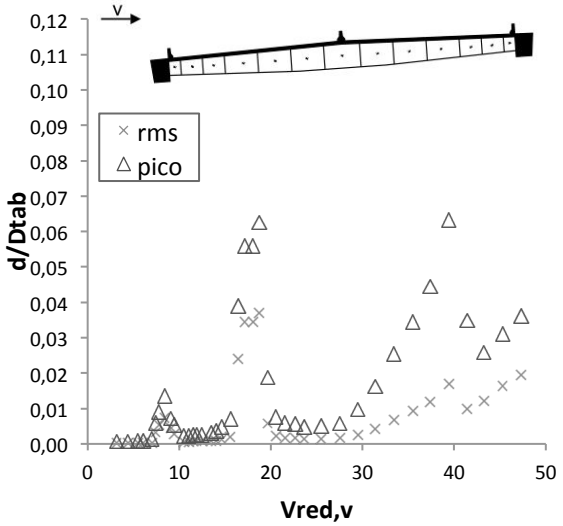
(fonte: em fase de elaboração[23])

Figura 29 – Resposta rotacional da seção original, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$



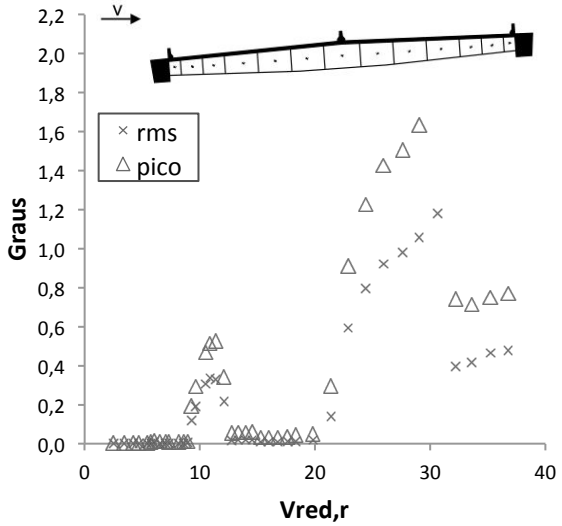
(fonte: em fase de elaboração[24])

Figura 30 – Resposta vertical seção original, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}23\%$



(fonte: em fase de elaboração[25])

Figura 31 – Resposta rotacional da seção original, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$



(fonte: em fase de elaboração[26])

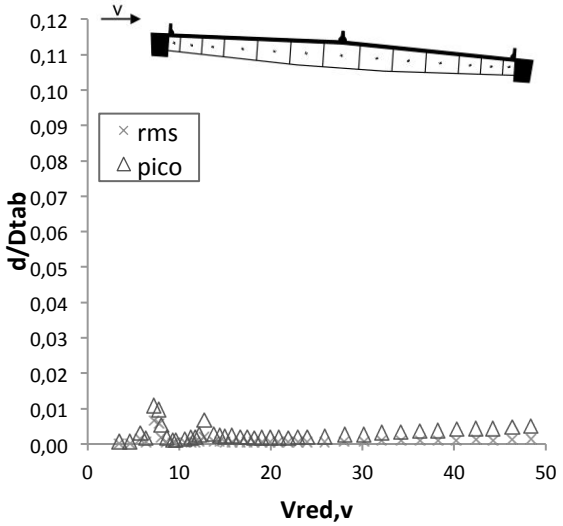
[23] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[24] Idem

[25] Idem

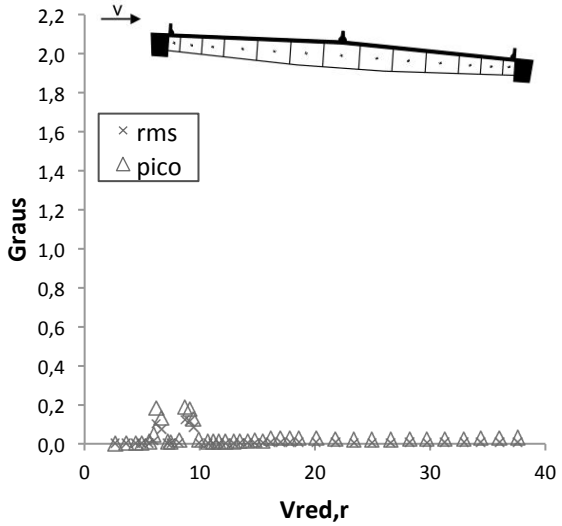
[26] Idem

Figura 32 – Resposta vertical da seção original, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}24\%$



(fonte: em fase de elaboração[27])

Figura 33 – Resposta rotacional da seção original, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}13\%$



(fonte: em fase de elaboração[28])

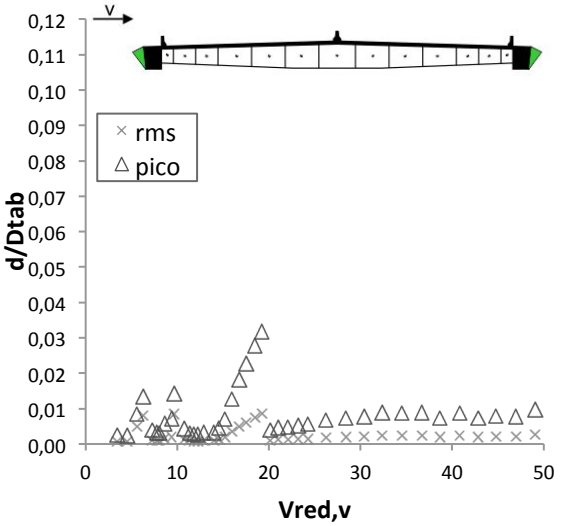
6.1.2 Respostas do modelo 1

As figuras 34 e 35 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}22\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}15\%$, respectivamente. As figuras 36 e 37 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}20\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}14\%$. Já as figuras 38 e 39 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}25\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}12\%$.

[27] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

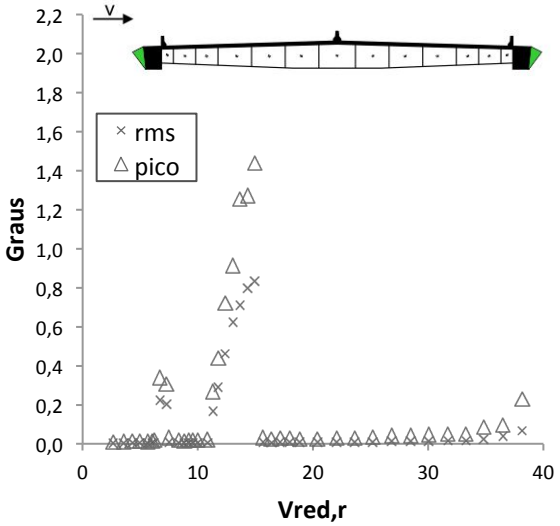
[28] Idem

Figura 34 – Resposta vertical do modelo 1, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}22\%$



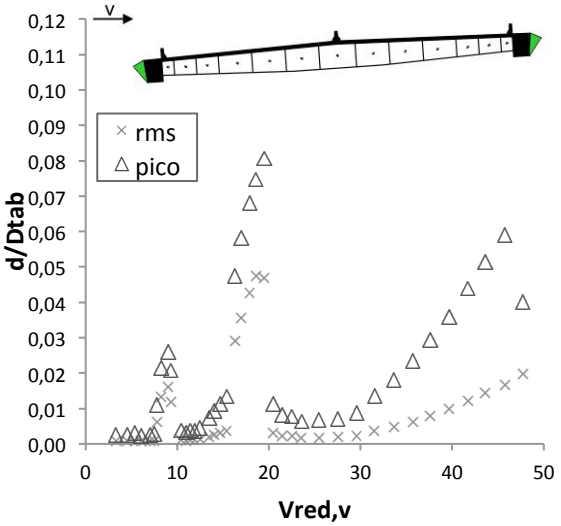
(fonte: em fase de elaboração[29])

Figura 35 – Resposta rotacional do modelo 1, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}15\%$



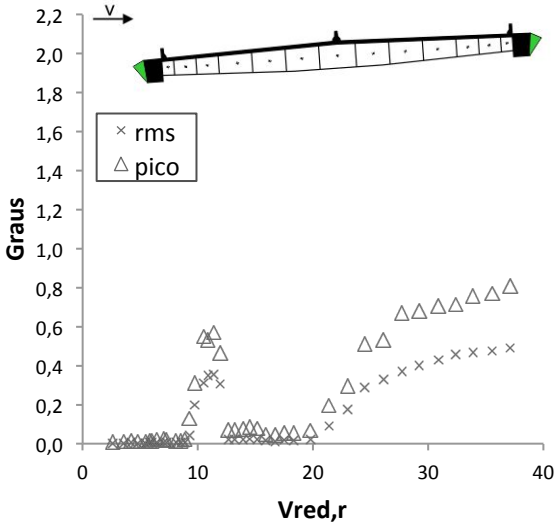
(fonte: em fase de elaboração[30])

Figura 36 – Resposta vertical do modelo 1, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}20\%$



(fonte: em fase de elaboração[31])

Figura 37 – Resposta rotacional do modelo 1, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}14\%$



(fonte: em fase de elaboração[32])

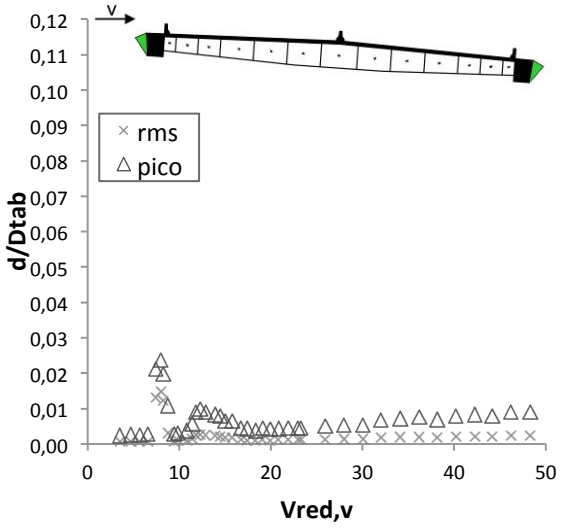
[29] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[30] Idem

[31] Idem

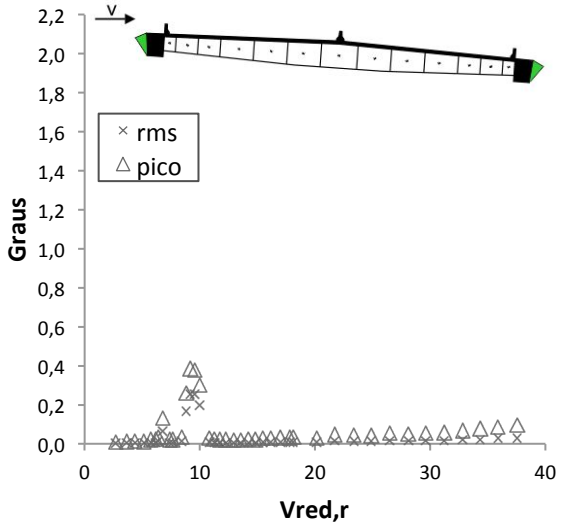
[32] Idem

Figura 38 – Resposta vertical do modelo 1, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}25\%$



(fonte: em fase de elaboração[33])

Figura 39 – Resposta rotacional do modelo 1, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}12\%$



(fonte: em fase de elaboração[34])

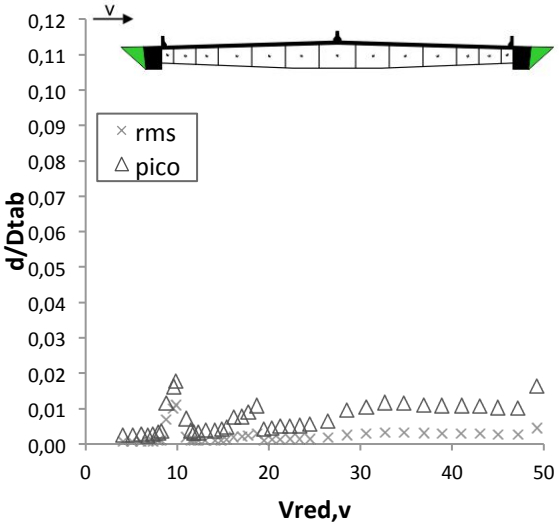
6.1.3 Respostas do modelo 2

As figuras 40 e 41 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}21\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$, respectivamente. As figuras 42 e 43 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}20\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$. Já as figuras 44 e 45 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}21\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$.

[33] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

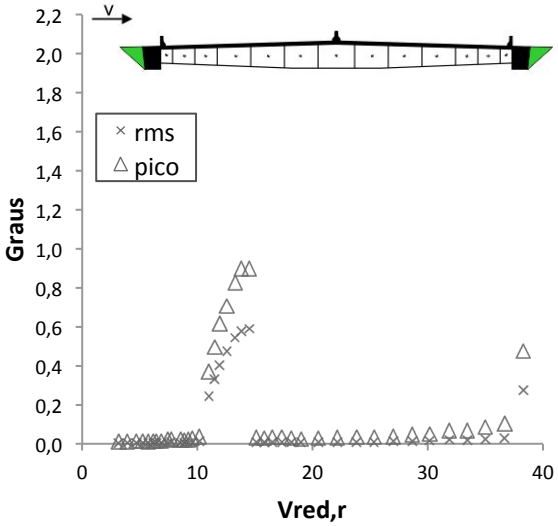
[34] Idem

Figura 40 – Resposta vertical do modelo 2, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}21\%$



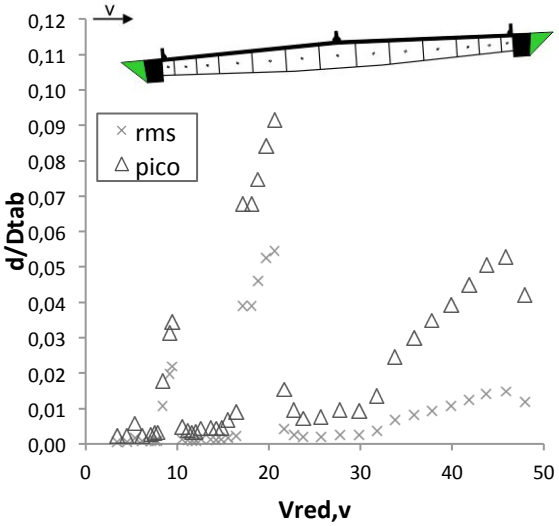
(fonte: em fase de elaboração[35])

Figura 41 – Resposta rotacional do modelo 2, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$



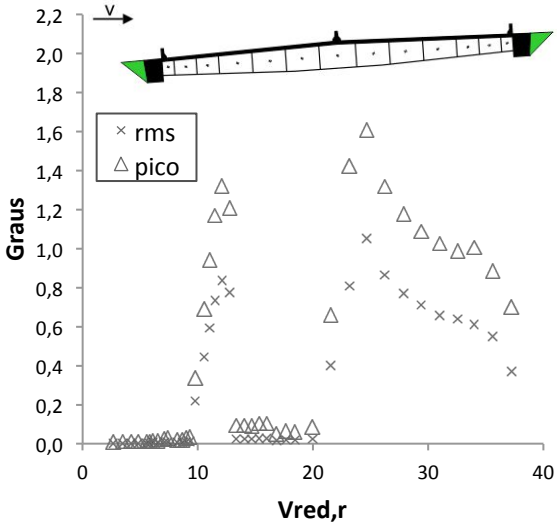
(fonte: em fase de elaboração[36])

Figura 42 – Resposta vertical do modelo 2, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}20\%$



(fonte: em fase de elaboração[37])

Figura 43 – Resposta rotacional do modelo 2, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$



(fonte: em fase de elaboração[38])

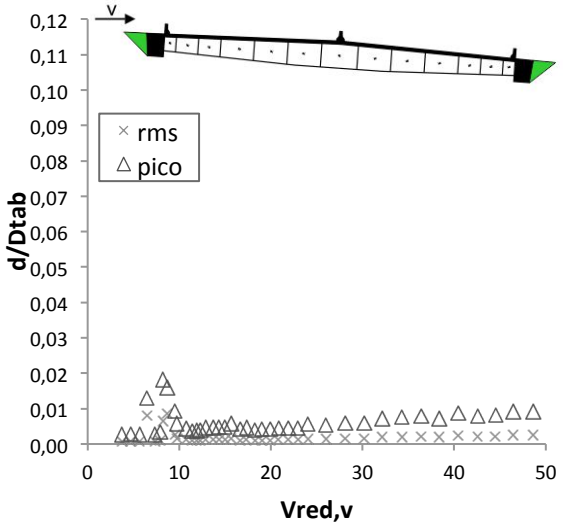
[35] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[36] Idem

[37] Idem

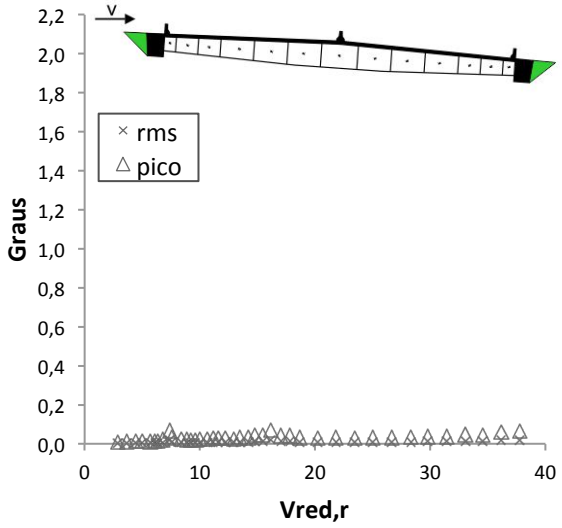
[38] Idem

Figura 44 – Resposta vertical do modelo 2, com$\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}21\%$



(fonte: em fase de elaboração[39])

Figura 45 – Resposta rotacional do modelo 2, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$



(fonte: em fase de elaboração[40])

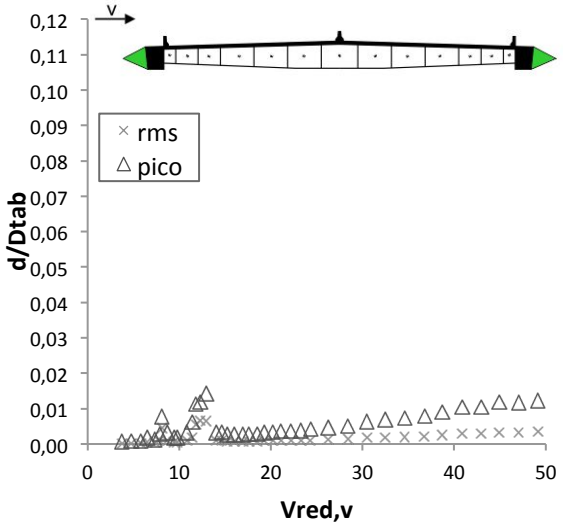
6.1.4 Respostas do modelo 3

As figuras 46 e 47 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}31\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$, respectivamente. As figuras 48 e 49 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}23\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$. Já as figuras 50 e 51 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}29\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}15\%$.

[39] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

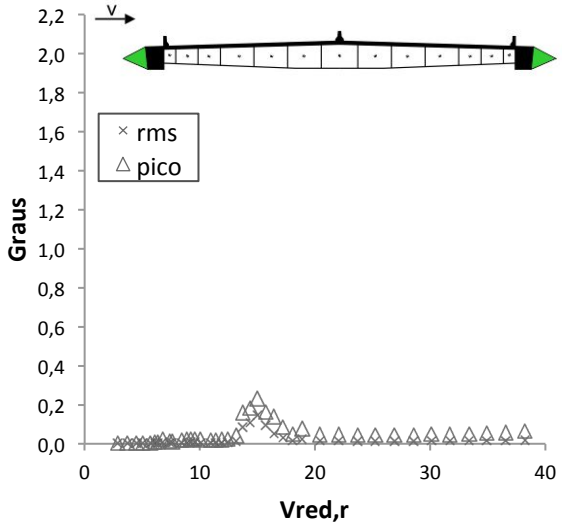
[40] Idem

Figura 46 – Resposta vertical do modelo 3, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}31\%$



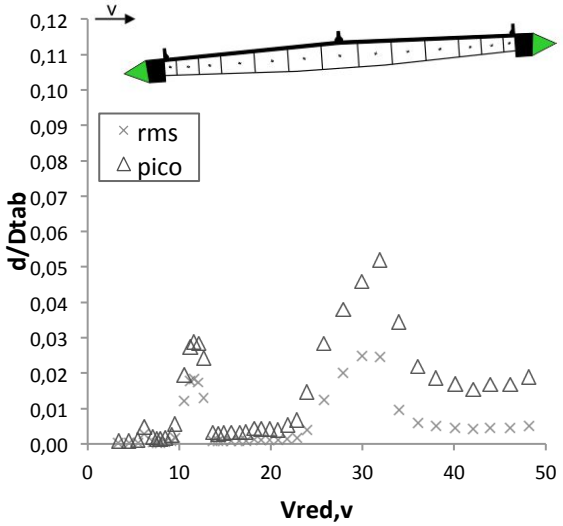
(fonte: em fase de elaboração[41])

Figura 47 – Resposta rotacional do modelo 3, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$



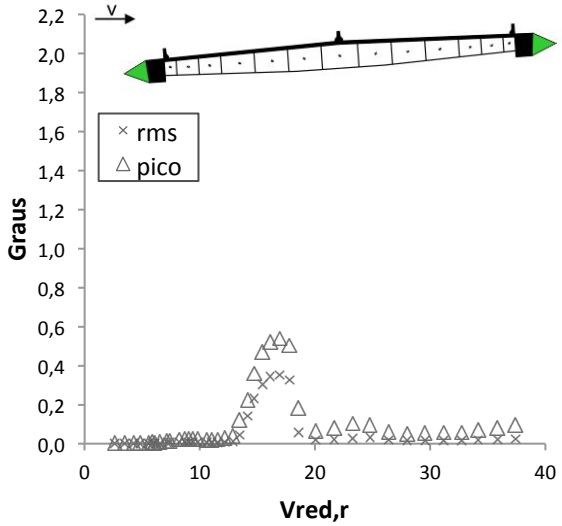
(fonte: em fase de elaboração[42])

Figura 48 – Resposta vertical do modelo 3, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}23\%$



(fonte: em fase de elaboração[43])

Figura 49 – Resposta rotacional do modelo 3, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$



(fonte: em fase de elaboração[44])

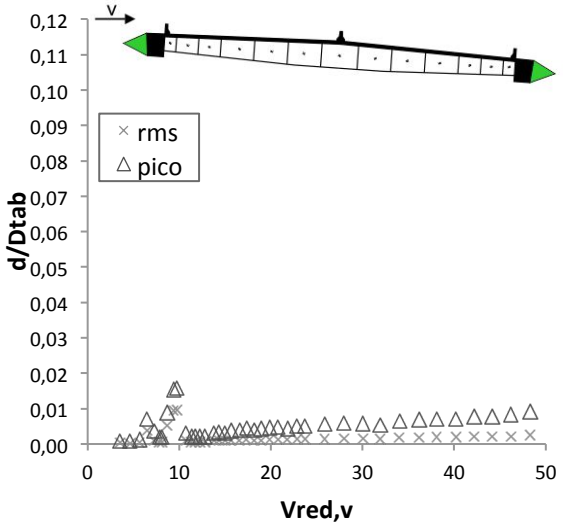
[41] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[42] Idem

[43] Idem

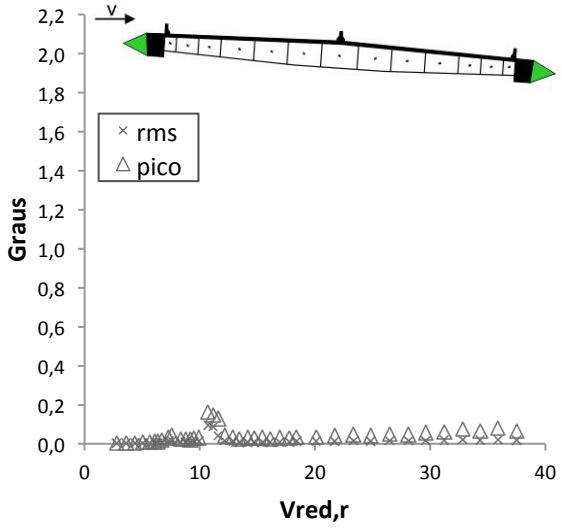
[44] Idem

Figura 50 – Resposta vertical do modelo 3, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}29\%$



(fonte: em fase de elaboração[45])

Figura 51 – Resposta rotacional do modelo 3, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}15\%$



(fonte: em fase de elaboração[46])

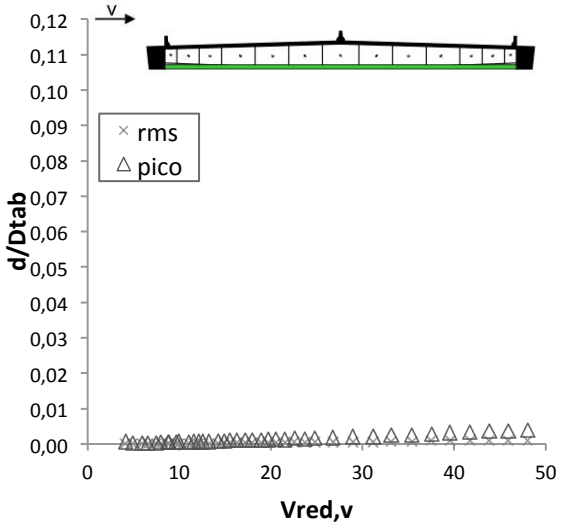
6.1.5 Respostas do modelo 4

As figuras 52 e 53 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}26\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}19\%$, respectivamente. As figuras 54 e 55 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}24\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$. Já as figuras 56 e 57 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}26\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}19\%$.

[45] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

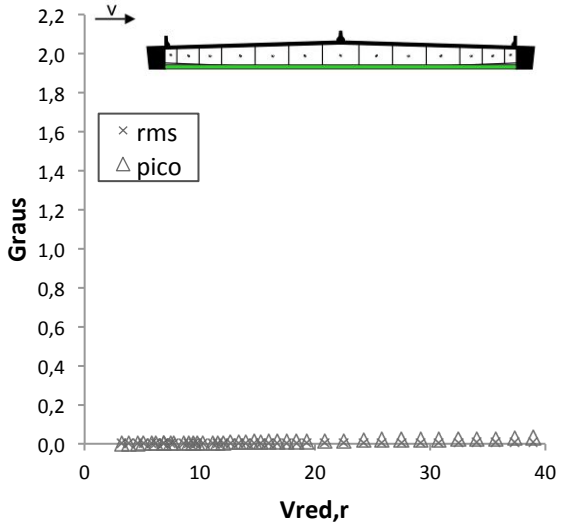
[46] Idem

Figura 52 – Resposta vertical do modelo 4, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}26\%$



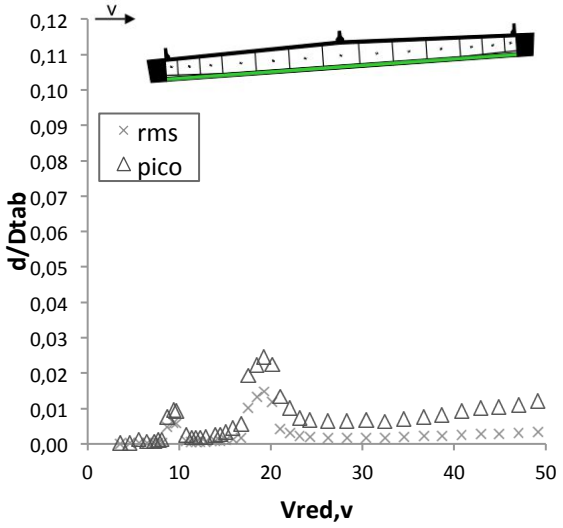
(fonte: em fase de elaboração[47])

Figura 53 – Resposta rotacional do modelo 4, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}19\%$



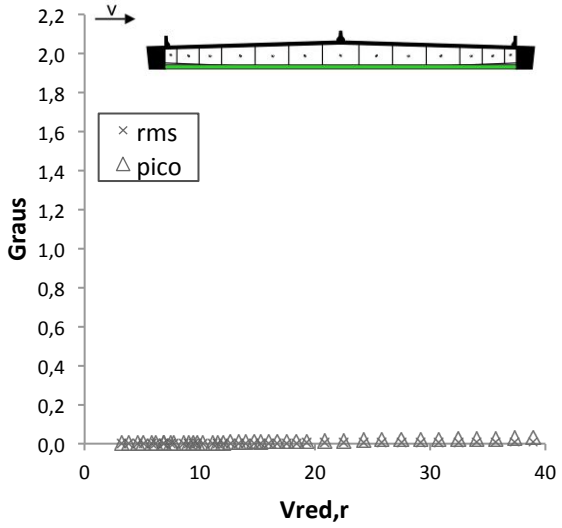
(fonte: em fase de elaboração[48])

Figura 54 – Resposta vertical do modelo 4, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}24\%$



(fonte: em fase de elaboração[49])

Figura 55 – Resposta rotacional do modelo 4, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}16\%$



(fonte: em fase de elaboração[50])

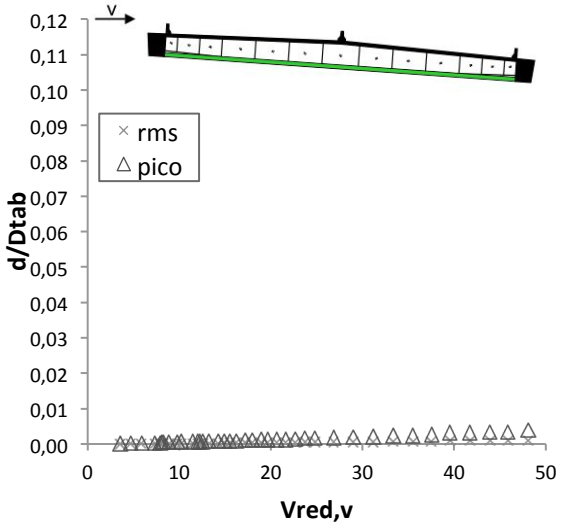
[47] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[48] Idem

[49] Idem

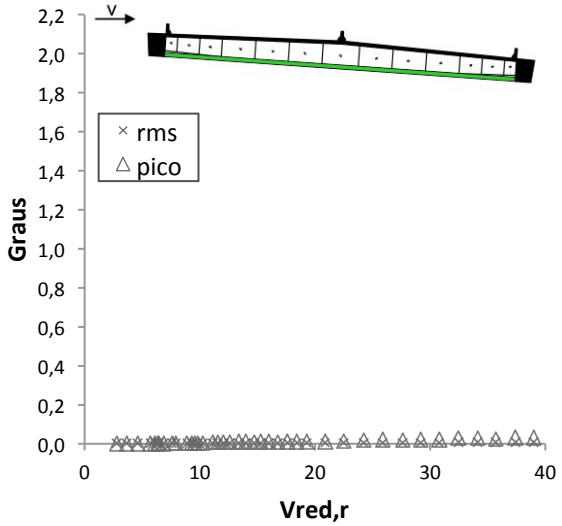
[50] Idem

Figura 56 – Resposta vertical do modelo 4, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}26\%$



(fonte: em fase de elaboração[51])

Figura 57 – Resposta rotacional do modelo 4, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}19\%$



(fonte: em fase de elaboração[52])

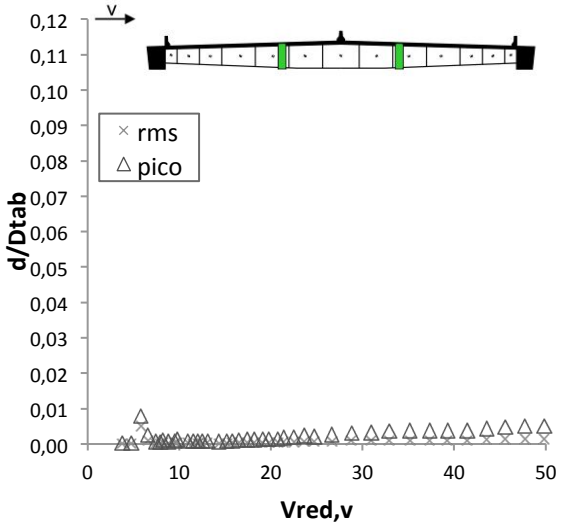
6.1.6 Respostas do modelo 5

As figuras 58 e 59 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}23\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}34\%$, respectivamente. As figuras 60 e 61 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}26\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}36\%$. Já as figuras 62 e 63 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}30\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}22\%$.

[51] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

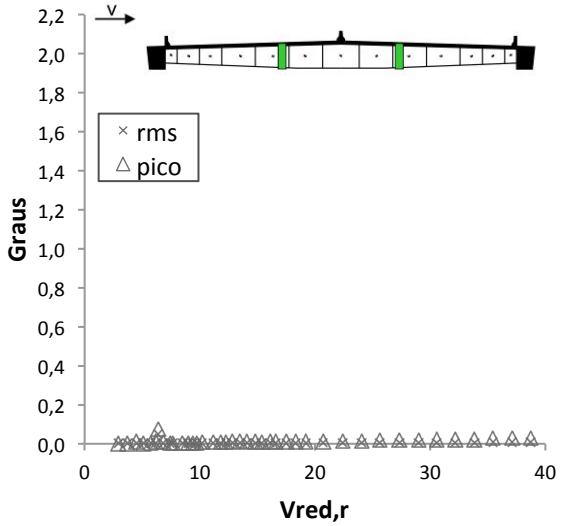
[52] Idem

Figura 58 – Resposta vertical do modelo 5, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}23\%$



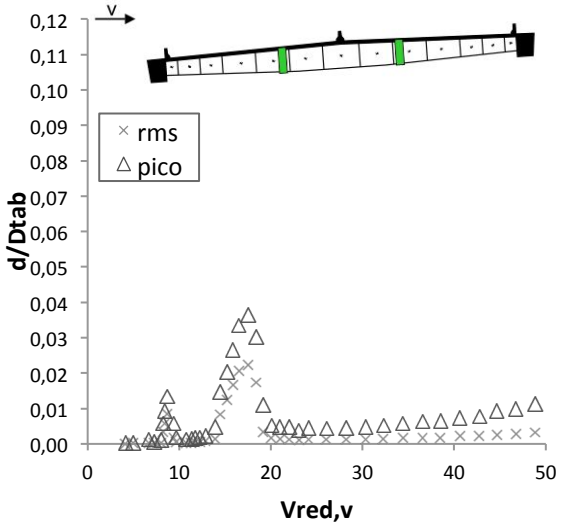
(fonte: em fase de elaboração[53])

Figura 59 – Resposta rotacional do modelo 5, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}34\%$



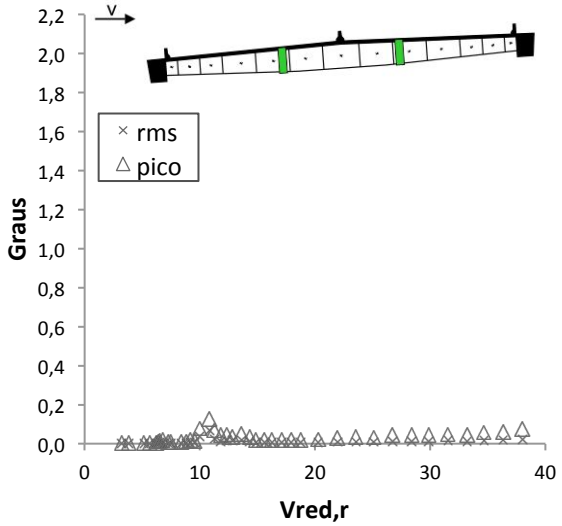
(fonte: em fase de elaboração[54])

Figura 60 – Resposta vertical do modelo 5, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}26\%$



(fonte: em fase de elaboração[55])

Figura 61 – Resposta rotacional do modelo 5, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}36\%$



(fonte: em fase de elaboração[56])

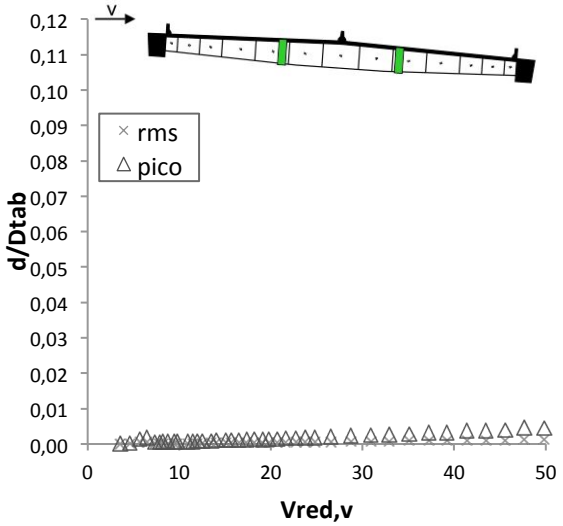
[53] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[54] Idem

[55] Idem

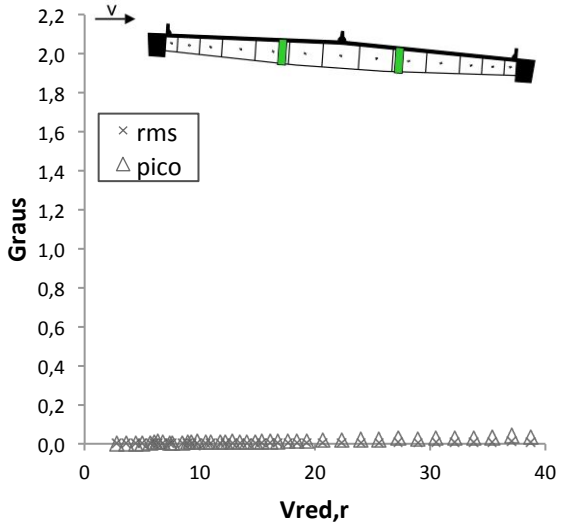
[56] Idem

Figura 62 – Resposta vertical do modelo 5, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}30\%$



(fonte: em fase de elaboração[57])

Figura 63 – Resposta rotacional do modelo 5, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}22\%$



(fonte: em fase de elaboração[58])

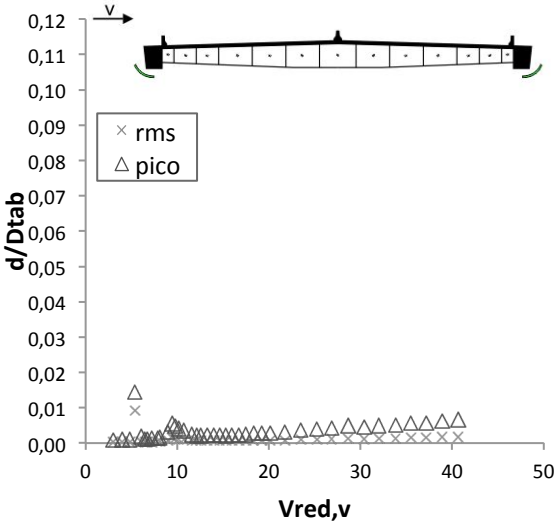
6.1.7 Respostas do modelo 6

As figuras 64 e 65 representam as respostas deslocamentos vertical e rotacional da seção original, para $\alpha = 0°$. Para esse ângulo de ataque, os amortecimentos estruturais vertical e rotacional são estimados em $\zeta_h = 0{,}27\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$, respectivamente. As figuras 66 e 67 são válidas para $\alpha = -4°$, e em função disso os amortecimentos valem $\zeta_h = 0{,}25\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$. Já as figuras 68 e 69 são igualmente válidas para $\alpha = +4°$, e consequentemente $\zeta_h = 0{,}25\%$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$.

[57] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

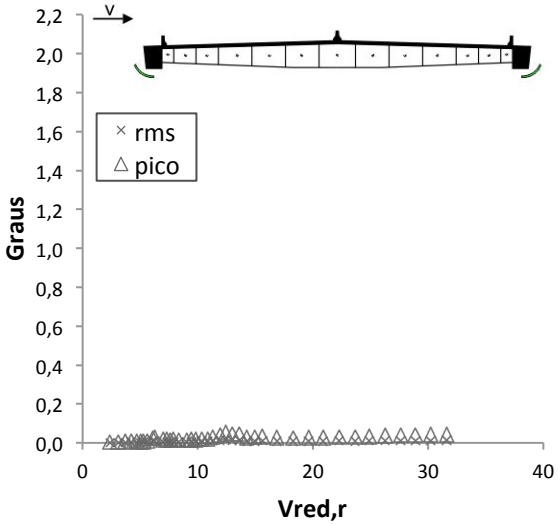
[58] Idem

Figura 64 – Resposta vertical do modelo 6, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_h = 0{,}27\%$



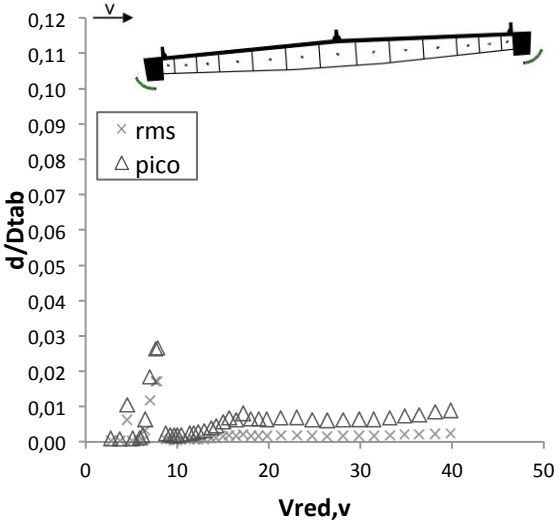
(fonte: em fase de elaboração[59])

Figura 65 – Resposta rotacional do modelo 6, com $\alpha = 0°$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$



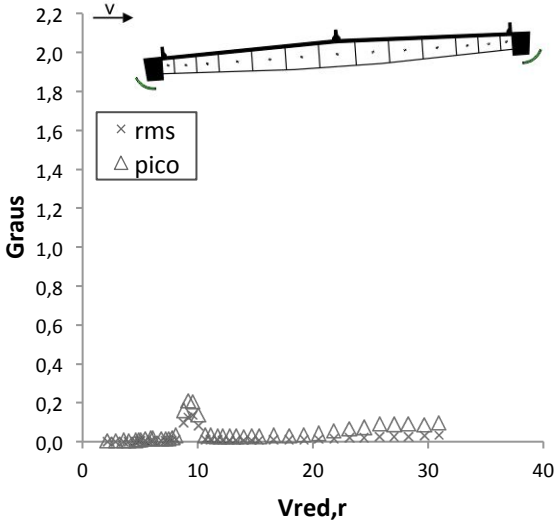
(fonte: em fase de elaboração[60])

Figura 66 – Resposta vertical do modelo 6, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_h = 0{,}25\%$



(fonte: em fase de elaboração[61])

Figura 67 – Resposta rotacional do modelo 6, com $\alpha = -4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}18\%$



(fonte: em fase de elaboração[62])

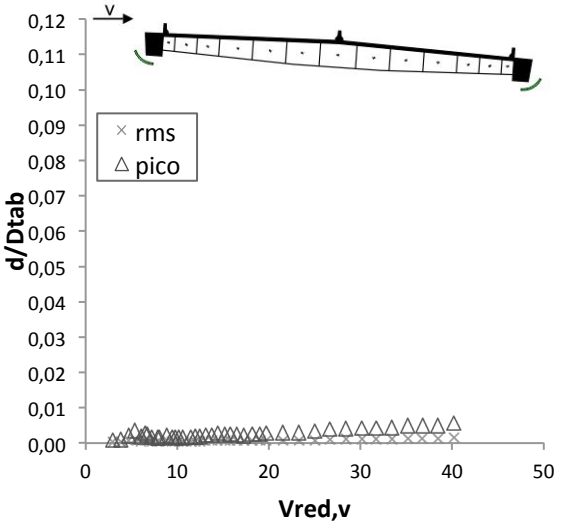
[59] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[60] Idem

[61] Idem

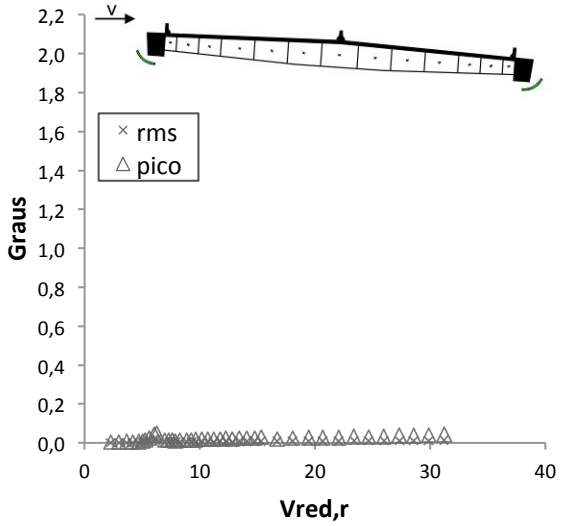
[62] Idem

Figura 68 – Resposta vertical do modelo 6, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_h = 0{,}25\%$



(fonte: em fase de elaboração[63])

Figura 69 – Resposta rotacional do modelo 6, com $\alpha = +4°$ e $\zeta_\theta = 0{,}17\%$



(fonte: em fase de elaboração[64])

6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

O efeito provocado pelos dispositivos de controle passivo utilizados nos modelos de ensaio pode ser quantificado por meio da sua influência sobre os picos de deslocamento e as velocidades reduzidas correspondentes. A tabela 2 resume os valores de pico encontrados nas respostas dinâmicas das figuras 28 a 33, referentes aos movimentos vertical e rotacional da seção original do projeto, para os ângulos de ataque ensaiados de 0°, -4° e +4°.

A tabela 2 resume ainda as máximas amplitudes de vibração para cada modelo em seu respectivo ângulo de ataque. Cada incidência de vento corresponde a uma máxima amplitude de translação vertical e uma máxima amplitude de rotação angular, os respectivos amortecimentos também foram inclusos.

[63] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

[64] Idem

Tabela 2 – Resumo das máximas amplitudes de deslocamento nos ensaios

	α (°)	d/D_{tab}	$V_{red,v}$	ζ_h (%)	θ (°)	$V_{red,r}$	ζ_θ (%)
MODELO ORIGINAL	0	0,01004	9,69	0,21	0,69083	14,28	0,13
MODELO ORIGINAL	-4	0,06327	39,43	0,23	1,81119	30,64	0,13
MODELO ORIGINAL	+4	0,00980	7,74	0,24	0,18960	8,74	0,13
MODELO 1	0	0,03186	19,22	0,22	1,44057	14,94	0,15
MODELO 1	-4	0,08072	19,50	0,2	0,56887	11,39	0,14
MODELO 1	+4	0,02374	7,95	0,25	0,38727	9,16	0,12
MODELO 2	0	0,01775	9,89	0,21	0,89882	14,51	0,16
MODELO 2	-4	0,09144	20,60	0,2	1,60866	24,68	0,18
MODELO 2	+4	0,01832	8,16	0,21	0,07098	16,18	0,17
MODELO 3	0	0,01419	12,94	0,31	0,23305	15,00	0,16
MODELO 3	-4	0,05187	31,87	0,23	0,53910	16,93	0,17
MODELO 3	+4	0,01572	9,69	0,29	0,16189	10,70	0,15
MODELO 4	0	0,00066	4,14	0,24	0,00491	5,83	0,19
MODELO 4	-4	0,02454	19,21	0,24	0,19298	13,04	0,16
MODELO 4	+4	0,00133	20,60	0,26	0,00463	9,52	0,19
MODELO 5	0	0,00795	5,81	0,23	0,07527	6,38	0,34
MODELO 5	-4	0,03644	17,52	0,26	0,12485	10,81	0,36
MODELO 5	+4	0,00177	6,42	0,3	0,01088	9,75	0,22
MODELO 6	0	0,01433	5,38	0,27	0,05274	12,41	0,18
MODELO 6	-4	0,02657	7,86	0,25	0,20537	9,55	0,18
MODELO 6	+4	0,00359	5,37	0,25	0,04961	6,27	0,17

(fonte: em fase de elaboração[65])

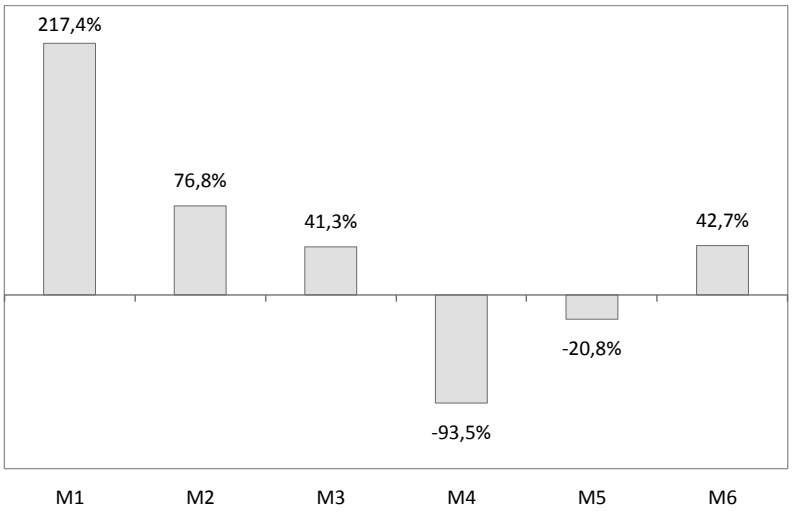
[65] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

A seguir são apresentados gráficos comparativos, onde é ressaltada a variação dos picos de deslocamento vertical adimensional e de deslocamento angular bem como as velocidades reduzidas associadas a cada movimento.

6.2.1 Comparação das amplitudes máximas verticais

As barras verticais dos gráficos a seguir indicam a variação percentual dos valores de pico das respostas dinâmicas de deslocamentos verticais dos modelos de 1 a 6 em comparação com o pico da resposta vertical da seção original do tabuleiro. Na figura 70 é mostrada essa comparação para o ângulo de ataque $\alpha = 0°$.

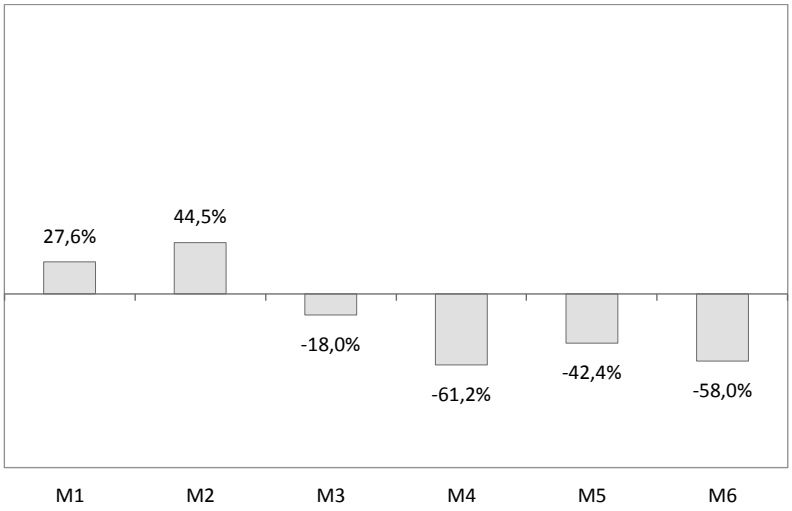
Figura 70 – Comparação das amplitudes máximas verticais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = 0°$



(fonte: elaborado pelo autor)

Através da figura 70 é possível observar a ineficácia do uso de narizes de vento e aletas na redução da amplitude de vibração vertical com $\alpha = 0°$. Os modelos constituídos pelo fechamento inferior e placas divisórias atenuam as amplitudes efetivamente em 93,5% e 20,8%, respectivamente. De forma semelhante, a figura 71 realiza a comparação da redução de amplitudes para $\alpha = -4°$.

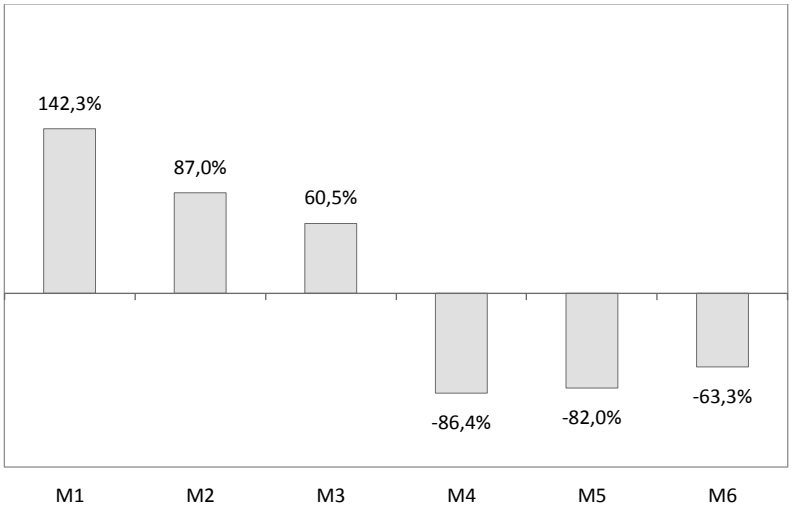
Figura 71 – Comparação das amplitudes máximas verticais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = -4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

A partir da figura 71 verifica-se novamente a ineficácia do uso dos narizes de vento tipos 1 e 2. Os demais dispositivos apresentam comportamento eficaz na redução das amplitudes máximas de oscilação vertical da seção original. A figura 72, de maneira similar às anteriores, estabelece a mesma comparação para as respostas verticais dos modelos com $\alpha = +4°$.

Figura 72 – Comparação das amplitudes máximas verticais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = +4°$



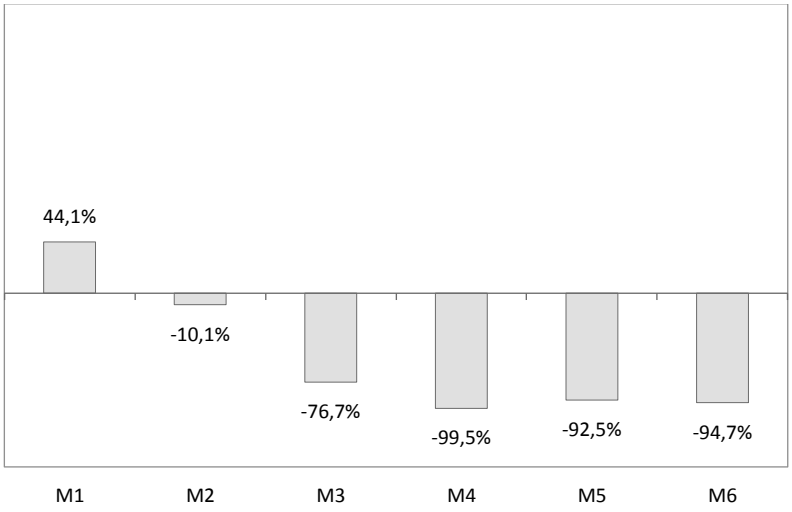
(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 72 produz uma comparação análoga à anterior, porém para esse ângulo de ataque todos os modelos com narizes de vento produzem aumento nas amplitudes de oscilação. De forma geral, apenas os modelos 4 (fechamento inferior) e 5 (placas divisórias) apresentam eficácia em todos os ângulos de ataque do vento estudados, e entre eles o modelo 4 demonstra maior regularidade reduzindo em pelo menos 60% as amplitudes em cada um dos 3 casos abordados.

6.2.2 Comparação das amplitudes máximas rotacionais

De forma análoga à comparação realizada em 6.2.1 para as amplitudes máximas verticais, as barras verticais dos gráficos a seguir indicam a variação percentual dos valores de pico das respostas dinâmicas de deslocamentos rotacionais dos modelos de 1 a 6 em comparação com o pico da resposta rotacional da seção original do tabuleiro. Na figura 73, a comparação desses valores para o ângulo de ataque $\alpha = 0°$ mostra uma agravação das rotações nos modelos 2 e 3, que modificam a seção transversal com uso de dois tipos de narizes de vento, além das demais seções exceto no caso do modelo 1.

Figura 73 – Comparação das amplitudes máximas rotacionais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = 0°$

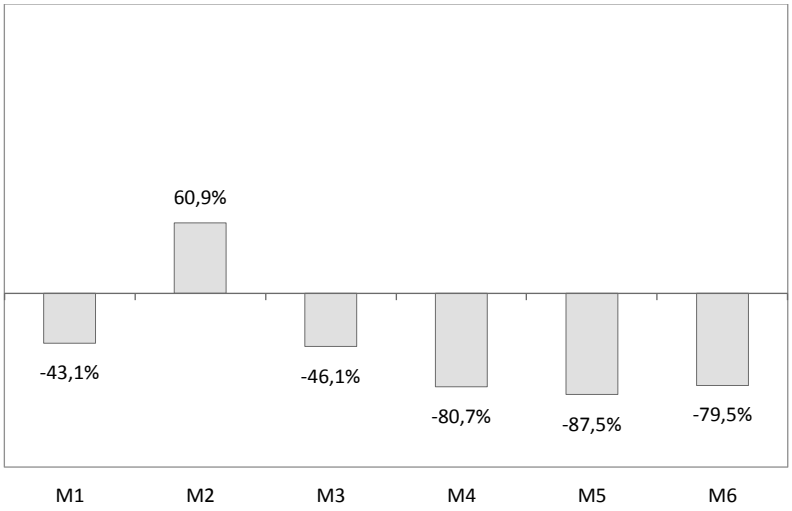


(fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos das figuras 74 e 75 mostram melhoras na redução das amplitudes de oscilação angulares em todos os modelos. Na comparação da figura 74, para $\alpha = -4°$, com exceção

do modelo 2 todos os dispositivos testados foram capazes de suprimir de alguma forma as oscilações de rotação.

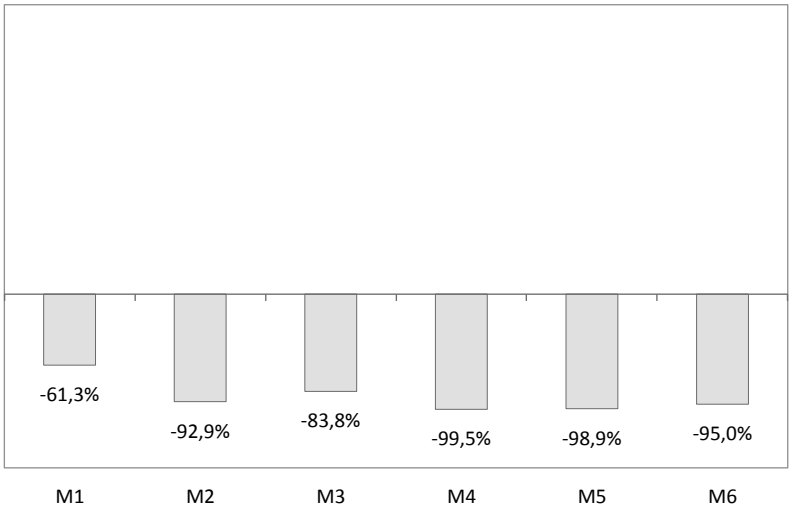
Figura 74 – Comparação das amplitudes máximas rotacionais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = -4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

Na comparação da figura 75, para $\alpha = +4°$, com exceção do modelo 3 todos os dispositivos testados atingiram pelo menos 60% de redução das oscilações.

Figura 75 – Comparação das amplitudes máximas rotacionais dos modelos em relação à seção original, para o ângulo de ataque de $\alpha = +4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.3 Comparação das amplitudes verticais para as velocidades reduzidas dos picos da resposta da seção original

A influência da implementação dos dispositivos aerodinâmicos pode ser observada na redução de amplitudes adimensionais para as mesmas velocidades em que foram registrados os picos de amplitude de vibração na resposta vertical de deslocamentos. De forma geral, resposta de deslocamentos vertical da figura 28 possui três velocidades reduzidas de máxima amplitude associadas onde se podem observar, por meio da variação das amplitudes nos demais modelos em relação ao original, os efeitos dos dispositivos aerodinâmicos. De forma a indicar a eficiência em redução de amplitudes, a tabela 3 resume os deslocamentos verticais d/D_{tab} adimensionais relacionados às velocidades de pico e os respectivos deslocamentos nas velocidades dos ensaios com dispositivos para $\alpha = 0°$.

Tabela 3 – Amplitudes d/D_{tab} das velocidades reduzidas de pico da resposta vertical para $\alpha = 0°$

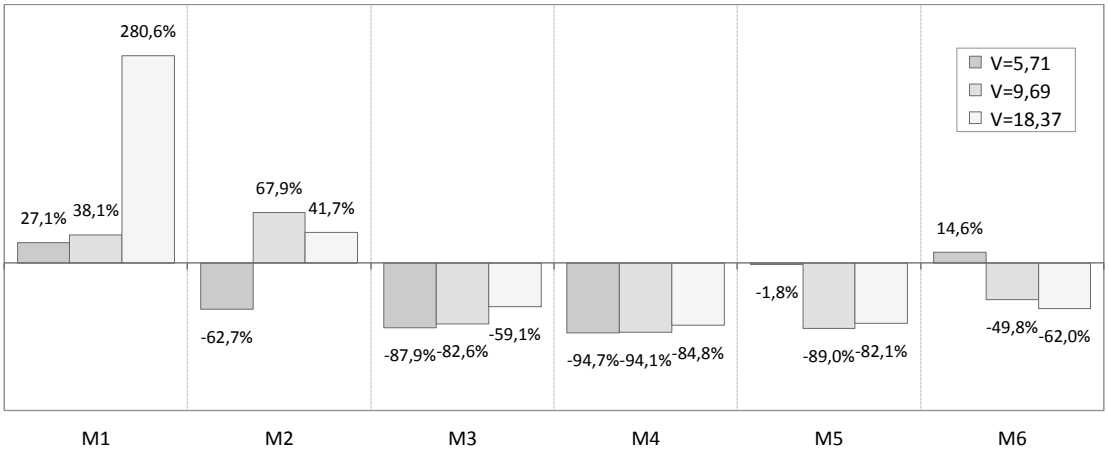
	$V_{red,v}$=5,71	$V_{red,v}$=9,69	$V_{red,v}$=18,37
MODELO ORGINAL	0,00735	0,01004	0,00718
MODELO 1	0,00934	0,01386	0,02732
MODELO 2	0,00274	0,01686	0,01017
MODELO 3	0,00089	0,00174	0,00293
MODELO 4	0,00039	0,00060	0,00109
MODELO 5	0,00722	0,00110	0,00129
MODELO 6	0,008419204	0,00504	0,00273

(fonte: em fase de elaboração[66])

A figura 76 mostra a variação dos picos da resposta de deslocamentos verticais para $\alpha = 0°$.

[66] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

Figura 76 – Variação dos picos da resposta vertical em relação a seção original para $\alpha = 0°$



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 4 resume as amplitudes dos modelos correspondentes às velocidades de pico da seção original. A figura 77 mostra a variação dos picos da resposta vertical para $\alpha = -4°$.

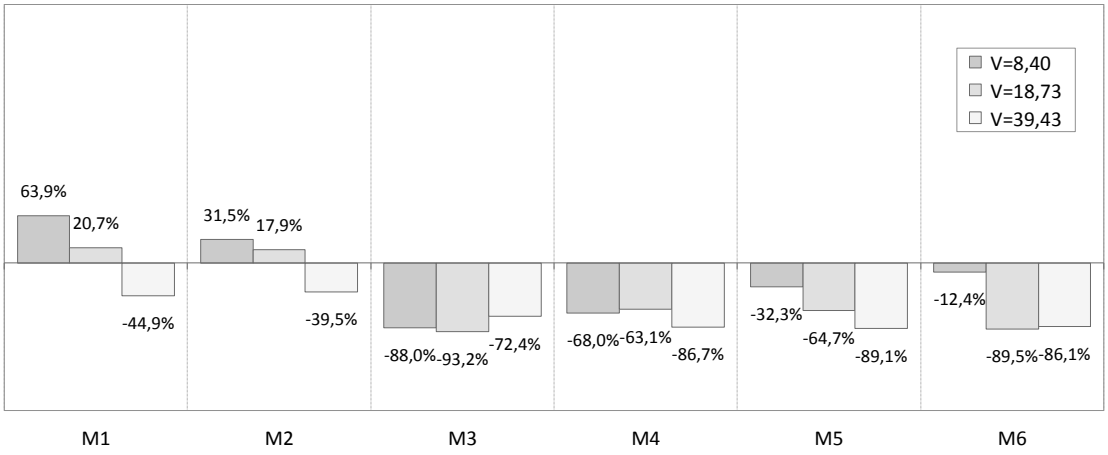
Tabela 4 – Amplitudes d/D_{tab} das velocidades reduzidas de pico da resposta vertical para $\alpha = -4°$

	$V_{red,v}$=8,40	$V_{red,v}$=18,73	$V_{red,v}$=39,43
MODELO ORIGINAL	0,01352	0,06247	0,06327
MODELO 1	0,02215	0,07543	0,03485
MODELO 2	0,01777	0,07367	0,03825
MODELO 3	0,00162	0,00426	0,01750
MODELO 4	0,00432	0,02303	0,00844
MODELO 5	0,00915	0,02203	0,00690
MODELO 6	0,01184	0,00658	0,00882

(fonte: em fase de elaboração[67])

[67] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

Figura 77 – Variação dos picos da resposta vertical em relação a seção original para $\alpha = -4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 5 mostra as amplitudes dos modelos correspondentes às velocidades de pico da seção original para $\alpha = +4°$. A figura 78 mostra a variação dos picos da resposta vertical para $\alpha = +4°$.

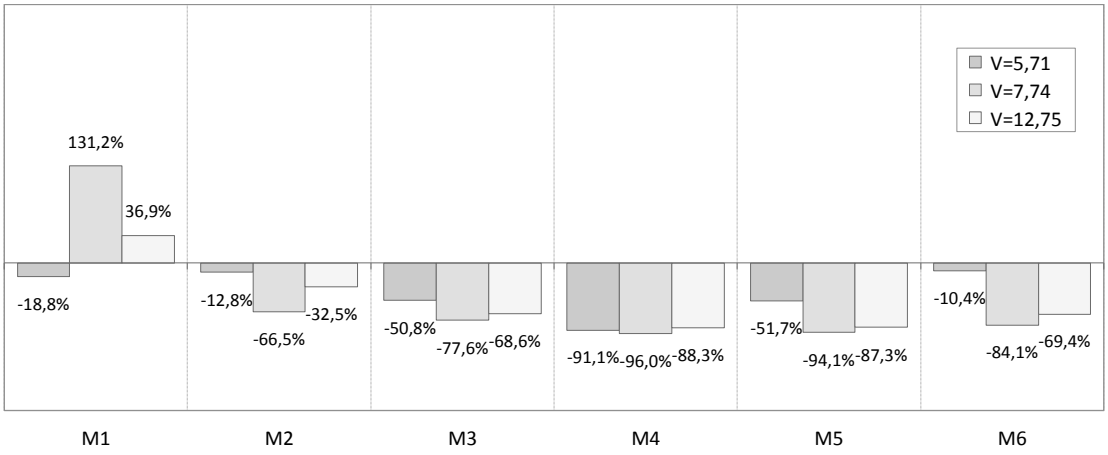
Tabela 5 – Amplitudes d/D_{tab} das velocidades reduzidas de pico da resposta vertical para $\alpha = +4°$

	$V_{reD,v}$=5,71	$V_{red,v}$=7,74	$V_{red,v}$=12,75
MODELO ORIGINAL	0,00311	0,00980	0,00670
MODELO 1	0,00253	0,02265	0,00916
MODELO 2	0,00271	0,00328	0,00452
MODELO 3	0,00153	0,00220	0,00210
MODELO 4	0,00028	0,00040	0,00078
MODELO 5	0,00150	0,00057	0,00085
MODELO 6	0,00279	0,00156	0,00205

(fonte: em fase de elaboração[68])

[68] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

Figura 78 – Variação dos picos da resposta vertical em relação a seção original para $\alpha = +4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.4 Comparação das amplitudes rotacionais para as velocidades reduzidas dos picos da resposta da seção original

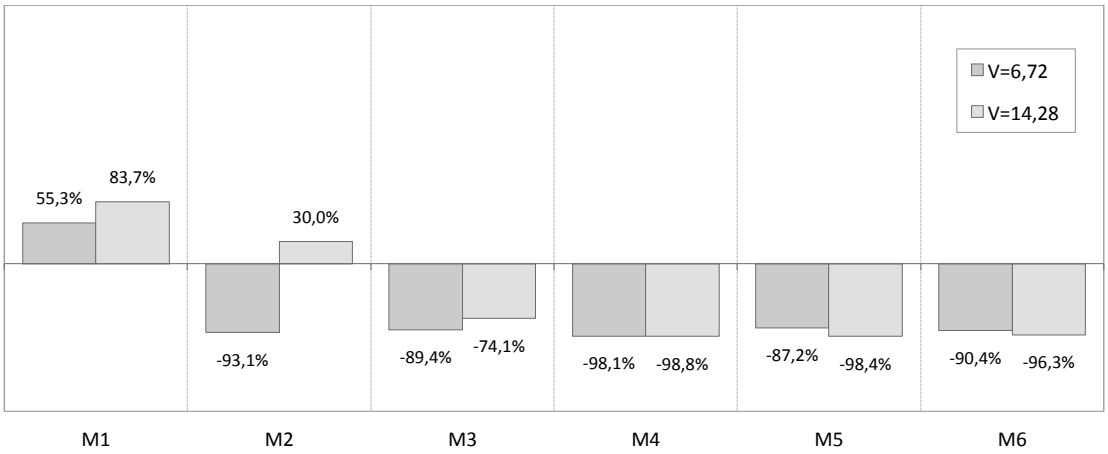
De forma análoga a 6.2.3, a influência dos dispositivos aerodinâmicos também pode ser observada na redução de amplitudes adimensionais de rotação para as mesmas velocidades em que foram registrados os picos de amplitude de vibração na resposta rotacional de deslocamentos da seção original. A tabela 6 mostra esses valores para a seção original e os demais modelos e a figura 79 mostra a variação das amplitudes, para $\alpha = 0°$

Tabela 6 – Amplitudes de rotação das velocidades reduzidas de pico da resposta rotacional para $\alpha = 0°$

	$V_{red,r}$=6,72	$V_{red,r}$=14,28
MODELO ORIGINAL	0,21706	0,69083
MODELO 1	0,33713	1,26934
MODELO 2	0,01497	0,89817
MODELO 3	0,02306	0,17862
MODELO 4	0,00416	0,00856
MODELO 5	0,02775	0,01113
MODELO 6	0,02078	0,02523

(fonte: em fase de elaboração[69])

Figura 79 – Variação dos picos da resposta rotacional em relação a seção original para $\alpha = 0°$



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 7 mostra as amplitudes dos modelos, correspondentes às velocidades de pico da seção original, e a figura 80 mostra a variação das amplitudes da resposta rotacional, para $\alpha = -4°$.

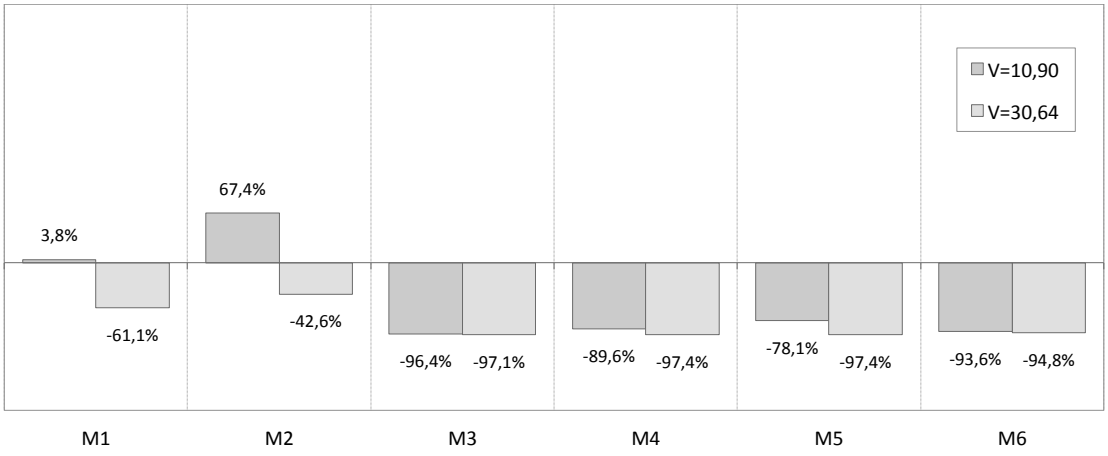
[69] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

Tabela 7 – Amplitudes de rotação das velocidades reduzidas de pico da resposta rotacional para $\alpha = -4°$

	$V_{red,r}$=10,90	$V_{red,r}$=30,64
MODELO ORIGINAL	0,51239	1,81119
MODELO 1	0,53200	0,70431
MODELO 2	0,85775	1,03957
MODELO 3	0,01863	0,05334
MODELO 4	0,05321	0,04636
MODELO 5	0,11240	0,04705
MODELO 6	0,03295	0,09425

(fonte: em fase de elaboração[70])

Figura 80 – Variação dos picos da resposta rotacional em relação a seção original para $\alpha = -4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 8 mostra as amplitudes dos modelos, correspondentes às velocidades de pico da seção original, e a figura 80 mostra a variação das amplitudes da resposta rotacional, para $\alpha = -4°$.

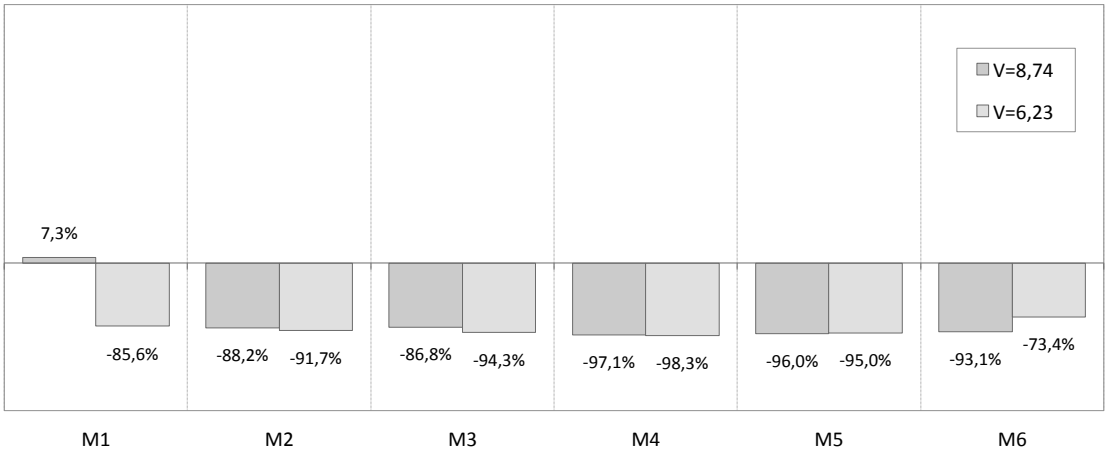
[70] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

Tabela 8 – Amplitudes de rotação das velocidades reduzidas de pico da resposta rotacional para $\alpha = +4°$

	$V_{red,r}$=8,74	$V_{red,r}$=6,23
PROJETO	0,18960	0,18250
MODELO 1	0,20337	0,02627
MODELO 2	0,02229	0,01512
MODELO 3	0,02501	0,01039
MODELO 4	0,00547	0,00310
MODELO 5	0,00764	0,00915
MODELO 6	0,01309	0,04859

(fonte: em fase de elaboração[71])

Figura 81 – Variação dos picos da resposta rotacional em relação a seção original para $\alpha = +4°$



(fonte: elaborado pelo autor)

[71] Dados obtidos da Dissertação de Mestrado em desenvolvimento por Matthew Bruce Vallis, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, com título provisório Investigação Experimental dos Dispositivos Aerodinâmicos de Pontes em Túnel de Vento frente ao Desprendimento de Vórtices.

7 CONCLUSÕES

Através de uma observação criteriosa dos resultados obtidos, a solução com maior efetividade na redução de amplitudes de vibração determinada por meio dos ensaios é a implementação do modelo 4 (fechamento inferior do tabuleiro). Do ponto de vista teórico, a solução com fechamento do bordo inferior torna a seção mais aerodinâmica possível. Em comparação com as soluções dos modelos 1, 2 e 3, nos quais são utilizadas implementações com narizes-de-vento, a inibição da formação do vórtice com fechamento inferior passa a ser mais influente sobre a seção original estudada. Entretanto, a utilização de narizes de vento provou ser ineficaz tornando a seção transversal mais rombuda que a original.

Os efeitos provocados pelo modelo 5, em contrapartida com os resultados apresentados pela seção original, também mostram uma significativa redução das amplitudes de vibração das respostas vertical e rotacional. Embora a redução das amplitudes devidas a implementação de placas divisórias não sejam superiores as reduções provocadas pelo fechamento inferior do tabuleiro utilizado no modelo 4. Seu uso pode ser vantajoso economicamente pois requer menores quantidades de material para adquirir um mesmo nível de redução de vibrações induzidas. No modelo 4 é observada uma máxima amplitude de translação vertical de 7,44 cm provocada por uma velocidade de aproximadamente 11,49 km/h (41,35 m/s) com incidência de -4º, enquanto que para a mesma incidência de vento com velocidade de 26,70 km/h (96,11 m/s) é provocada uma translação vertical de 3,32 cm.

De forma geral, o uso de dispositivos aerodinâmicos de controle passivo de vibrações é uma solução adequada para pontes de concreto armado com baixo amortecimento estrutural pois para a maioria dos casos de incidência de vento e formas geométricas implementadas apresentou redução nas amplitudes de vibração. A análise dos resultados com modelos em escala reduzida mostra que existe uma proporcionalidade entre o aumento do amortecimento estrutural e a redução das amplitudes de resposta das vibrações. Foi constatado que não só a forma geométrica da seção transversal mas também o amortecimento estrutural provocado pela inclusão de dispositivos aerodinâmicos de controle passivo influenciam as amplitudes máximas de oscilação.

Neste trabalho foi estudada a relação entre a implementação de dispositivos aerodinâmicos de controle passivo de vibrações sobre o aspecto da amplitude de vibrações. Para uma análise que melhor demonstre essa influência são necessários testes complementares que possam identificar o descolamento das camadas do escoamento, para por exemplo, por meio de técnicas de visualização de escoamento, identificar o ponto de separação da camada limite na seção em função dos dispositivos aerodinâmicos.

REFERÊNCIAS

BATTISTA, R. C.; PFEIL, M. S. Reduction of vortex-induced oscillations of Rio-Niterói bridge by dynamic control devices. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 84, n. 3, p. 273-288, 2000.

BLESSMANN. The Boundary Layer TV-2 Wind Tunnel of the UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 10, n. 2, p. 231-248, 1982.

_____. **Aerodinâmica das Construções.** Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1983.

_____. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

EL-GAMMAL, M.; HANGAN, H.; KING, P. Control of vortex shedding-induced effects in a sectional bridge model by spanwise pertubation method. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 95, n. 8, p. 663-678, 2007.

KAERCHER, A. L. **Estudo de Vibrações Induzidas por Vórtices em Estruturas Cilíndricas Submetidas a Escoamento Permanente.** 2007. 185 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KOMATSU, S.; KOBAYASHI, H. Vortex-induced oscillation on bluff cylinders. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,** Amsterdam, v. 6, n. 3-4, p. 335-362, 1980.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em Túnel de Vento. In: MÖLLER, S. V.; SILVESTRINI, J. H. (Ed.). **Turbulência:** Coleção Cadernos de Turbulência. Rio de Janeiro: ABCM, 2004. v. 4. p. 137-163.

NÚÑEZ, G. J. Z. **Investigação Experimental do Efeito de Interferência de Tabuleiros Paralelos de Pontes em Túnel de Vento Frente ao Desprendimento de Vórtices.** 2008. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PATIL, A.; JUNG, S.; LEE, S.; KWON, S. Mitigation of vortex-induced vibrations in bridges under conflicting objectives. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 99, n. 12, p. 1243-1252, 2011.

SCHEWE, G. Reynolds-number effects in flow around more-or-less bluff bodies. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 89, n. 14-15, p. 1267-1289, 2001.

SHIRAISHI, N.; MATSUMOTO, M. On classification of vortex-induced oscillation and its application for bridge structures. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Amsterdam, v. 14, n. 1-3, p. 419-430, 1983.

SIMIU, E.; SCANLAN, R. **Wind Effects on Structures:** An Introduction to Wind Engineering. Canada: John Wiley & Sons, 1978.

WARDLAW, R. L. Flutter and torsional instability. **Wind-Excited Vibrations of Structures. CISM Courses and Lectures 335**, Springer – Verlag, 1994.