

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC

Caracterização Aerodinâmica de Cabos de Pontes Estaiadas
Submetidos à Ação Combinada de Chuva e Vento

Daniel de Souza Machado

Porto Alegre
Abril de 2008

Daniel de Souza Machado

**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE CABOS DE
PONTES ESTAIADAS SUBMETIDOS À AÇÃO COMBINADA
DE CHUVA E VENTO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA.
ORIENTAÇÃO: PROF. DR. ACIR MÉRCIO LOREDO-SOUZA.

Porto Alegre

Abril de 2008

DANIEL DE SOUZA MACHADO

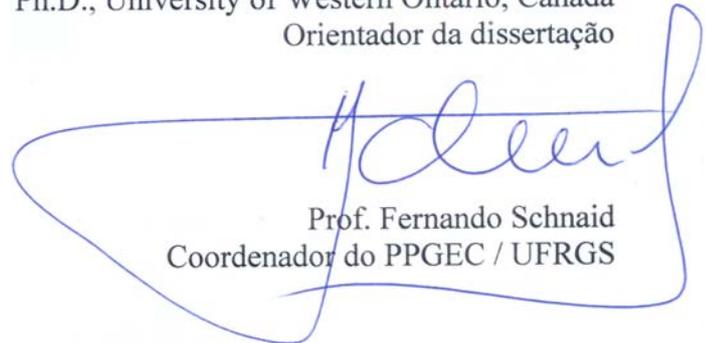
**CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE CABOS DE
PONTES ESTAIADAS SUBMETIDOS À AÇÃO COMBINADA
DE CHUVA E VENTO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre
Abril de 2008



Prof. Acir Mércio Loredo Souza
Ph.D., University of Western Ontario, Canadá
Orientador da dissertação



Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC / UFRGS

Banca examinadora:
Prof. Marcelo Maia Rocha
Dr.techn. - Universitaet Innsbruck, Áustria

Prof. Ruy Carlos Ramos de Menezes
Dr techn - Universitaet Innsbruck, Áustria

Prof. José Luis Vital de Brito
Dr - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Aos meus pais, João e Zulai;
Aos meus irmãos, Adelmir, Rogério, João e Carolina,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio constante.

Ao meu orientador, Professor Acir Mércio Loredo-Souza pela amizade, confiança, sugestões e apoio durante todo o período deste curso de mestrado em Porto Alegre.

A toda a equipe técnica e amigos do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Paulo, Gustavo, Elvis, Fabrício, Karin, Fernando, Mario, Emerson e bolsistas, Guilherme, Maria Cristina e Miguel.

Aos meus amigos do PPGEC da UFRGS pela amizade e pela troca de experiências nas horas de estudo.

Aos professores do PPGEC da UFRGS que transmitiram conhecimento necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Ademir da UFBA e aos demais professores da UCSal pela amizade e pelo estímulo constante.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos, indispensável para a realização deste curso.

RESUMO

MACHADO, D.S.M., Caracterização Aerodinâmica de Cabos de Pontes Estaiadas Submetidos à Ação Combinada de Chuva e Vento.

Simultâneas ocorrências de vibrações de cabos de pontes estaiadas sob ação combinada de chuva de vento têm sido observadas ao redor do mundo nos últimos 20 anos. Este mecanismo tem causado grande preocupação aos engenheiros de pontes e pesquisadores por provocar grandes amplitudes de vibração. O melhor conhecimento do fenômeno evitará que perigosas oscilações induzidas pelo efeito combinado de chuva e vento ocorram evitando que medidas sejam tomadas apenas após a ocorrência de acidentes. Foi possível determinar, neste trabalho, as características aerodinâmicas de cabos de pontes estaiadas submetidos à ação combinada de chuva e vento no que diz respeito à influência dos filetes sobre as forças aerodinâmicas (arrasto e sustentação) e sobre o desprendimento de vórtices em três modelos seccionais. O modelo M1 foi posicionado horizontalmente com vento incidente normal ao eixo longitudinal, o modelo M2 foi posicionado horizontalmente com vento incidindo obliquamente ao eixo longitudinal e o modelo M3 representa um cabo inclinado típico de ponte estaiada. Os filetes nas posições $\theta_1 = 60^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$ aumentaram as sucções na esteira do M3 consideravelmente. Para qualquer posição dos filetes no M3 não ocorreram mudanças em seus coeficientes de sustentação. Os coeficientes de arrasto aumentaram com a presença dos filetes, no entanto não apresentaram mudanças nos valores com a variação da posição dos filetes. Em modelos horizontais, a presença dos filetes pode causar supressão ou amplificação da intensidade do desprendimento de vórtices dependendo da localização dos filetes. Para o M3 notou-se aumento da intensidade do desprendimento de vórtices para qualquer posição dos filetes. A maior intensidade ocorreu para $\theta_1 = 50^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$. Para todos os modelos com filetes, o desprendimento de vórtices é mais forte em escoamento turbulento. Independente da presença dos filetes, o modelo M3 apresentou frequências de desprendimento de vórtices mais baixas que as frequências de desprendimento do vórtice de Kármán convencional. Verifica-se, portanto, o efeito de vórtice axial. Para $Re < 1,2 \times 10^5$ o filete inferior não tem influência sobre o escoamento. Entretanto, para $Re > 1,2 \times 10^5$ o filete inferior passa a afetar nitidamente o escoamento em torno do cilindro. Para o modelo inclinado o filete inferior apresentou influência no escoamento para todos os valores de Re .

Palavras-chave: pontes estaiadas, chuva e vento, filetes d'água.

ABSTRACT

Simultaneous occurrences of cable vibrations under combined action of wind and rain have been observed around the world in cable-stayed bridges in the last 20 years. This mechanism has caused great concern to bridge engineers and researchers due to the large vibration amplitudes. A better knowledge of the phenomenon may prevent that dangerous oscillations induced by the combined effect of rain and wind occur, compromising the usefulness and safety of cable-stayed bridges, besides to avoiding the necessity of measures taken only after some accident occurrence. It was possible to determine, in this study, the aerodynamic characteristics of cables submitted to the combined action of rain and wind regarding the influence of rivulets on aerodynamic forces (drag and lift) and on the vortex shedding in three sectionals models. The M1 model was positioned horizontally with perpendicular wind incidence to the longitudinal axis, the M2 model was positioned horizontally with oblique wind to the longitudinal axis and the M3 model is a typical, cable of cable-stayed bridges. The rivulets positioned in the 60° (upper) position and the 110° (lower) position increase considerably the negative pressures in the M3 model wake. For any rivulets position, the M3 do not change their lift coefficients. The drag coefficients increased with the rivulet presence, however its position seems to make no difference in the values of the coefficients. In horizontal models, the rivulets can suppress or cause amplification in the vortex shedding intensity, depending of their position. For the M3 model, the vortex shedding intensity increases for all rivulets positions. The greater intensity occurred when the upper and lower rivulets were at 50° and 110°, respectively. For all models with rivulets, the vortex shedding is stronger in turbulent flow. Independent of the rivulets presence, the vortex shedding frequencies at the inclined model (M3) presented lower frequencies than the conventional Karman vortex shedding. This shows, therefore, the effects of the axial vortex. For $Re < 1.2 \times 10^5$ the lower rivulet has no influence on the flow. However, for $Re > 1.2 \times 10^5$ the lower rivulets affect significantly the flow around the cylinder. For the inclined model the lower rivulet has no influence on the flow for all Re range.

Key-words: cable-stayed bridges, rain and wind, water rivulets.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA.....	5
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
1.3 OBJETIVOS.....	22
2 AERODINÂMICA DE CABOS ESTAIADOS	23
2.1 AÇÃO DO VENTO	23
2.1.1 Coeficientes de pressão	23
2.1.2 Coeficientes de força e de momento	23
2.1.3 Número de Reynolds, Re	24
2.1.4 Número de Strouhal, St	24
2.1.5 Número de Froude, Fr	25
2.1.6 Número de Scruton, Sc	25
2.1.7 Turbulência.....	25
2.1.8 Escoamento bidimensional.....	26
2.2 RESPOSTAS DAS ESTRUTURAS DE PONTES AO VENTO.....	27
2.2.1 Efeitos estáticos.....	28
2.2.2 Efeitos dinâmicos	28
2.3 AERODINÂMICA DE CILINDROS CIRCULARES.....	30
2.4 AERODINÂMICA DE CILINDROS CIRCULARES INCLINADOS	33
2.4.1 Características geométricas.....	33
2.4.2 Escoamento axial.....	35
2.4.3 Desprendimento de vórtices de alta velocidade reduzida	35
3 VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR CHUVA E VENTO EM CABOS DE PONTES ESTAIADAS.....	37
3.1 FORMAÇÃO DOS FILETES.....	38
3.1.1 Influência do material da superfície do cabo	41

3.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO NA POSIÇÃO DOS FILETES	41
3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM AS VIBRAÇÕES DO CABO	43
3.3.1 Inclinação e ângulo de ataque	43
3.3.2 Intensidade de chuva	45
3.3.3 Turbulência.....	46
3.3.4 Amortecimento.....	46
3.3.5 Filetes d'água	46
3.3.6 Localização dos filetes	47
3.3.7 Movimento dos filetes.....	49
3.3.8 Tamanho e forma dos filetes d'água	49
3.4 CARACTERÍSTICAS DOS MODOS DE VIBRAÇÃO	50
3.5 CARACTERÍSTICAS DA VIBRAÇÃO.....	51
3.6 MECANISMOS DE VIBRAÇÃO.....	55
3.6.1 Mecanismos segundo Verwiebe e Ruscheweyh (1996).....	55
3.6.2 Mecanismo baseado no fenômeno do fio de Prandtl (Seidel e Dinkler, 2006).....	58
3.7 DISPOSITIVOS MITIGADORES	59
3.7.1 Protuberâncias longitudinais	59
3.7.2 Fios entrelaçados em espirais.....	60
3.7.3 Mossas superficiais	63
3.7.4 Anéis espaçados	63
3.8 MODELOS MATEMÁTICOS	65
3.8.1 Modelos de 1 grau de liberdade	65
3.8.2 Modelos de 2 graus de liberdade.....	80
3.8.3 Modelos para determinação das características dos filetes.....	83
3.8.4 MODELOS TEÓRICOS DE CABOS ESTAIADOS 3D.....	85
3.8.5 Método probabilístico de ocorrência de vibrações induzidas por chuva e vento	90
3.8.6 Junção da FDP da velocidade do vento e direção do vento.....	91
3.8.7 FDP da intensidade de chuva	92
3.8.8 Intervalo de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento.....	92

3.8.9 Probabilidade de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento ..	93
4 PROGRAMA EXPERIMENTAL	95
4.1 CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA	95
4.2 MODELOS REDUZIDOS DE PONTES	95
4.3 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO	96
4.3.1 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN	96
4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO NO TÚNEL	99
4.5 SIMULAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL	101
4.6 DEFINIÇÃO DO MODELO	103
4.7 EXPERIMENTOS	105
4.7.1 Procedimento dos ensaios	106
4.7.2 Medição de pressões médias no cilindro.....	108
4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	110
4.8.1 Análise da distribuição de pressões	111
4.8.2 Análise espectral	125
5 CONCLUSÕES	135
TRABALHOS FUTUROS.....	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
APÊNDICE A – Fotos dos ensaios.....	144
ANEXO A - Parâmetros aerodinâmicos, Γ_1, Γ_2 e Γ_3. (modelo analítico de xu e wang, 2003).....	144
ANEXO B - Parâmetros aerodinâmicos (modelo analítico de wilde e witkowski, 2003)	146
ANEXO C – Tabelas de resumos de ensaios e modelos matemáticos desenvolvidos por pesquisadores	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - (a) Embarcação egípcia construída com cabos estaiados sustentando vigas; (b) passarela estaiada primitiva de bambu em Borneo (Troitsky, 1977).	1
Figura 1.2 - Ponte Strömsund, Suécia - possuía arranjo de cabo duplo e conseqüentemente grande espaçamento entre eles (Troitsky, 1977).	2
Figura 1.3 - Fotografias de pontes estaiadas em que foram observadas vibrações nos cabos devido ao efeito combinado de chuva e vento (a) ponte Köhlbrand; (b) ponte Meiko Nishi; (c) ponte FarØ.	3
Figura 1.4 – Pontes estaiadas (a) Erasmus e (b) Dongting.	4
Figura 2.1 – Desprendimento de vórtices numa seção de um cilindro submetido à ação do vento.	29
Figura 2.2 – escoamento em torno de um cilindro circular.	30
Figura 2.3 – Distribuição circunferencial de pressões (Roshko, 1961 apud Núñez, 2001).	31
Figura 2.4 – Definição dos regimes de escoamento e parâmetros característicos para cilindros circulares bidimensionais (Ribeiro, 1989).	32
Figura 2.5 – (a) Definição da inclinação do cabo, do ângulo de incidência do vento e do ângulo equivalente de incidência do vento (b) referência para ângulo de incidência e forças aerodinâmicas (Phelan et al., 2006).	33
Figura 2.6– (a-b) Decomposição das componentes da velocidade do vento no plano vertical que contém o cabo (c) Definição da velocidade efetiva do vento (Wilde e Witkowski, 2003).	34
Figura 2.7 – Escoamento secundário axial a sotavento do cabo inclinado (Matsumoto, 1990).	35
Figura 2.8 – Coeficiente de força de sustentação de um cabo estacionário ($\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 45^\circ$) (Matsumoto et al., 2001).	36
Figura 2.9 – Visualização de vórtice axial na esteira de cabo inclinado ($\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 45^\circ$, $V = 0,5 \text{ m/s}$, escoamento suave) (Matsumoto et al., 2001).	36
Figura 3.1 – Evento de vibração (perpendicular à direção do vento) de um cabo estaiado da Ponte Veteran (Phelan et al., 2006).	38
Figura 3.2 – Filetes d’água vistos no sentido longitudinal (a) filete inferior (a sotavento) e (b) filete superior (a barlavento) (Wang et al., 2005).	39

Figura 3.3 – (a) Representação da posição dos filetes d'água numa seção típica de cabos de ponte estaiada e (b) definição da posição dos filetes superior e inferior.....	39
Figura 3.4 – (a) Processo de formação do filete superior em um cabo inclinado em três instantes, A, B e C; (b) resposta do cabo inclinado com velocidades e amplitudes correspondentes a cada um dos instantes. ($\alpha=\beta=45^\circ$) (Hikami e Shiraishi, 1988).	40
Figura 3.5 – Configuração dos filetes d'água, superior e inferior sobre a superfície de cabos inclinados (a) polietileno, (b) alumínio ou acrílico.	41
Figura 3.6 – Variação da posição dos filetes (a) superior e (b) inferior com a velocidade do vento (Hikami e Shiraishi, 1988).....	42
Figura 3.7 – RMS da Aceleração do cabo para intervalos de 1 minuto variando com a velocidade média (a) no plano e (b) fora do plano dos cabos (Ni et al., 2007).....	42
Figura 3.8 - Registros de amplitudes realizados ao mesmo tempo para todos os cabos da ponte Meikonishi (Hikami e Shiraishi, 1988).	44
Figura 3.9 – Influência da direção do vento sobre a amplitude de oscilação (Bosdogianni e Olivari, 1996).	44
Figura 3.10 – RMS da aceleração do cabo para intervalos de 1min variando com a intensidade de chuva (a) no plano e (b) fora do plano dos cabos (Ni et al., 2007).....	45
Figura 3.11 – Efeito do filete inferior na vibração do cabo (adaptado de Gu et al., 2002).	46
Figura 3.12 – Efeito da posição do filete sobre a amplitude de oscilação a $\beta = 25^\circ$ (Bosdogianni e Olivari, 1996).	47
Figura 3.13 – Efeito da posição do filete sobre a amplitude de oscilação a $\beta = 30^\circ$ (Bosdogianni e Olivari, 1996).	48
Figura 3.14 – Efeito da posição do filete inferior sobre a amplitude de oscilação a $\beta = 30^\circ$ (Bosdogianni e Olivari, 1996).	48
Figura 3.15 – Influência da forma na oscilação do cabo em modelos dinâmicos realizados por (a) Bosdogianni e Olivari, (1996) e (b) Gu et al. (2002).	49
Figura 3.16 – Espectro de potência da aceleração do cabo num evento de excitação por chuva e vento (a) no plano e (b) fora do plano dos cabos (Ni et al., 2007).	50
Figura 3.17 – Coeficiente de arrasto e de sustentação de cabo com a posição relativa entre filete superior e vento (Gu et al., 2002).	52
Figura 3.18 – Vibração do tipo velocidade restrita (a) $\theta_1=60^\circ$, (b) $\theta_1=58^\circ$ (c) $\theta_1=55^\circ$ (d) $\theta_1=52^\circ$ e (e) $\theta_1=50^\circ$ (Gu et al., 2002).	53

Figura 3.19 – Comparação das amplitudes de vibração do cabo com filete artificial (Gu et al., 2002).....	54
Figura 3.20 – Espectro de potência da força variável de sustentação num cilindro estacionário com filete superior artificial (extremidade superior do cabo, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V = 4\text{m/s}$, escoamento suave) (Matsumoto et al., 2003a).....	55
Figura 3.21 – Espectro de potência da força variável de sustentação num cilindro estacionário com filete superior artificial (extremidade inferior do cabo, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V = 4\text{m/s}$, escoamento suave) (Matsumoto et al., 2003a).....	55
Figura 3.22 – Vibração do tipo 1: na direção do vento, movimentos simétricos dos filetes d'água; (a) orientação do cabo e movimento dos filetes na seção; (b) diagramas de x , \dot{x} e \ddot{x} no tempo (Verwiebe, 1998).....	56
Figura 3.23 – Vibração do tipo 2.1: na direção transversal à direção do vento, movimentos anti-simétricos dos filetes d'água; (a) orientação do cabo e movimento dos filetes na seção; (b) diagramas de x , \dot{x} e \ddot{x} no tempo (Verwiebe, 1998).....	57
Figura 3.24 – Vibração do tipo 2.2: vibração predominantemente na direção transversal à direção do vento, principalmente causada pelo movimento do filete inferior; (a) orientação do cabo e movimento dos filetes na seção; (b) diagramas de x , \dot{x} e \ddot{x} no tempo (Verwiebe, 1998).....	58
Figura 3.25 – Escoamento em volta da esfera (a) sem e (b) com o fio de Prandtl (Seidel e Dinkler, 2006).....	59
Figura 3.26 – (a) Cabo de Polietileno com protuberâncias longitudinais (b) Ilustração da ponte Higashi-Kobe (Matsumoto et al., 1992).....	60
Figura 3.27 – Efeito do diâmetro da espiral na eficiência da eliminação das vibrações (Gu e Du, 2005).....	61
Figura 3.28 – Efeito da direção do entrelaçamento da espiral na eficiência da eliminação das vibrações (Gu e Du, 2005).....	62
Figura 3.29 – Efeito do passo da espiral na eficiência da eliminação das vibrações (Gu e Du, 2005).....	62
Figura 3.30 – Pequenas mossas ao longo da superfície dos dutos dos cabos da ponte de Tatara (Virlobeux, 1999).....	63
Figura 3.31 – Cabo com anéis circulares como dispositivo mitigador de vibrações (Phelan et al., 2006).....	64

Figura 3.32 – Diagrama do RMS aceleração (1 min.) variando com o RMS da velocidade do vento (1 min.) (a) antes e (b) depois da instalação de anéis nos cabos (Phelan et al., 2006)...	64
Figura 3.33 – (a) Localização do filete sobre a superfície do cabo; (b) ângulo dinâmico da velocidade relativa; (c) diagrama esquemático das forças aerodinâmicas.....	67
Figura 3.34 - Variação dos coeficientes aerodinâmicos com o ângulo de ataque (adaptado de Gu et al., 1999).....	69
Figura 3.35 – Velocidade relativa no cabo com movimento do filete.....	73
Figura 3.36 – Modelo analítico de cabo com filete superior (adaptado de Yamaguchi, 1990).	80
Figura 3.37 – Velocidade relativa para translação do cabo com rotação do filete (adaptado de Yamaguchi, 1990).	81
Figura 3.38 – Ação das forças quasi-permanente (adaptado de Yamaguchi, 1990).	82
Figura 3.39 – Filete fluindo ao longo do cilindro sujeito ao vento (a) vista lateral; (b) seção transversal (adaptada de Lemaitre et al., 2006).	83
Figura 3.40 – Comparação da razão de crescimento local de um filete uniforme em volta do cilindro sob ação combinada de gravidade e vento (a) $\rho^* Fr^2=0$, (b) $\rho^* Fr^2=0,01$ e (c) $\rho^* Fr^2=10$ (Lemaitre et al., 2006).	85
Figura 3.41 – Representação do cabo estaiado contínuo em três dimensões (Li e Gu, 2007).	86
Figura 3.42 – Perfil estático do cabo (Li e Gu, 2007).	89
Figura 3.43 – Fluxograma do método probabilístico proposto (Xu et al, 2007).	91
Figura 4.1 - Vista da parte externa da câmara de ensaios do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS.	97
Figura 4.2 - Planta baixa do circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS.	99
Figura 4.3 - (a) Vista superior dos transdutores de 64 canais do Scanivalve; (b) Manoir e mangueiras de conexão aos anéis piezométricos.....	100
Figura 4.4 - Alguns dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. (a) grelha; (b) $p=0,11$; (c) $p=0,23$; (d) $p=0,34$ (Loredo-Souza et al., 2004).....	101
Figura 4.5 - Perfis de velocidade média, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do túnel de vento. Vento uniforme e suave (sem simuladores) e vento uniforme e turbulento (gerado por grelha).	102

Figura 4.6 – (a) Esquema de seção transversal de cabo de ponte estaiada e (b) exemplo de modelo seccional para ensaio.	103
Figura 4.7 - Modelo seccional de cabo.	104
Figura 4.8 – Perspectiva e seção transversal dos filetes artificiais (a) perspectiva e (b) seção transversal.	104
Figura 4.9 - Localização e distribuição das tomadas de pressões no modelo.	105
Figura 4.10 - Posicionamento dos modelos M1 à M3 na câmara de ensaios.	106
Figura 4.11 – Grelha para geração da turbulência (a) perspectiva e (b) vista frontal.	107
Figura 4.12 – Convenção de sinais para a análise dos coeficientes de pressão.	109
Figura 4.13 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M1).	112
Figura 4.14 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M1).	112
Figura 4.15 – Coeficiente de arrasto médio em função do número de Reynolds e de diferentes intensidades da turbulência (Núñez, 2001).	113
Figura 4.16 – Distribuição de pressões externas obtidas em escoamento uniforme e suave para $Re \cong 2,3 \times 10^5$ (a) SF, (b) F40, (c) F50 e (d) F60.	113
Figura 4.17 – Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M1).	114
Figura 4.18 – Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M1).	115
Figura 4.19 - Distribuição circunferencial dos coeficientes de pressão externa, obtidos em escoamento uniforme e suave para dois ensaios idênticos, $Re \cong 1,5 \times 10^5$ (M2, sem filetes).	116
Figura 4.20 – Formação de borbulhas na face superior do M2 sem filetes para (a) $Re \cong 1,5 \times 10^5$, (b) $Re \cong 1,9 \times 10^5$ e (c) $Re \cong 2,3 \times 10^5$	117
Figura 4.21 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M2).	117
Figura 4.22 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M2).	118
Figura 4.23 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M2).	119
Figura 4.24 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M2).	119

Figura 4.25 - Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M3).	120
Figura 4.26 - Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M3).	120
Figura 4.27 – Distribuição de pressões externas obtidos em escoamento uniforme e turbulento para $Re \cong 1,9 \times 10^5$ (a) SF, (b) F40, (c) F50 e (d) F60.....	121
Figura 4.28 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M3).	121
Figura 4.29 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M3).	122
Figura 4.30 – Distribuição de pressões externas obtidos em escoamento uniforme e turbulento para $Re \cong 1,9 \times 10^5$ (a) M1, (b) M2 e (c) M3.....	123
Figura 4.31 – RMS dos coeficientes de pressão externa para o modelo M1, obtidos em escoamento uniforme e suave, $Re \cong 1,9 \times 10^5$, para as configurações SF, F40, F50 e F60..	124
Figura 4.32 – RMS dos coeficientes de pressão externa para o modelo M1, obtidos em escoamento uniforme e suave para a configuração F60.....	124
Figura 4.33 –St x Re e espectros (Blessmann, 2005).....	125
Figura 4.34 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1.....	126
Figura 4.35 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de arrasto (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1.	127
Figura 4.36 – (a) Número de Strouhal variando com a posição do filete superior e (b) a configuração utilizada no ensaio (Matsumoto, 2007).	127
Figura 4.37 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 8, (b) canal 30, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1, SF.....	128
Figura 4.38 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 4, (b) canal 5, (c) canal 7, (d) canal 11, (e) canal 29, (f) canal 26, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F40.....	129
Figura 4.39 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 5, (b) canal 6, (c) canal 30, para escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F50.	130
Figura 4.40 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 6, (b) canal 7, (c) canal 30, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F60.	131
Figura 4.41 – Esquema do desprendimento de vórtices no modelo M1 para todas as configurações.....	131

- Figura 4.42 – Isolinhas de pressões para dois casos de posições dos filetes para $Re \cong 1 \times 10^4$ (Liu et. al, 2007). 132
- Figura 4.43 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M1 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$. 133
- Figura 4.44 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M2 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$. 133
- Figura 4.45 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M3 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$. 134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Efeito do vento nas estruturas.....	27
Tabela 3.1 - Máximas amplitudes duplas de vibrações induzidas por chuva e vento em pontes estaiadas (Matsumoto, Shiraishi e Shirato, 1992)	37
Tabela 3.2 – Faixa de velocidades em que ocorrem vibrações induzidas por chuva e vento segundo pesquisadores.	43
Tabela 3.3 – Valores críticos de ângulos de inclinação de cabos e de incidência do vento que provocam vibrações induzidas por chuva e vento.....	45
Tabela 3.4 – Características geométricas dos filetes d’água formados em cabos sob ação de chuva e vento.....	50
Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros variáveis dos ensaios.....	108

Lista de símbolos

A	Área da seção transversal do cabo
A	Amplitude de vibração dinâmica
A_i	Coefficiente de Taylor com $i=1,2,\dots,n$
A_i	Coefficiente que relaciona o coeficiente de arrasto com o ângulo θ , com $i=1$ e 2
A_x	Amplitude na direção paralela à direção do vento
A_y	Amplitude na direção perpendicular à direção do vento
A_{\max}	Amplitude máxima
A_{mod}	Máxima amplitude dinâmica do modelo
$A_{e,\text{mod}}$	Deslocamento estático equivalente
A_{per}	Amplitude permitida
$A(V, \beta)$	Amplitudes para várias velocidade e direções do vento
A_s	Amplitude a qual acima desta as demais amplitudes são consideradas inaceitáveis
B_i	Coefficiente de Taylor com $i=1,2,\dots,n$
B_o	Número de Bond
C_a	Coefficiente de arrasto instantâneo
\bar{C}_a	Coefficiente de arrasto médio
C_t	Coefficiente de torção instantâneo
C_s	Coefficiente de sustentação instantâneo
\bar{C}_s	Coefficiente de sustentação médio
C_s'	Primeira derivada do C_s em relação ao ângulo relativo entre filete e ponto de estagnação
C_y	Coefficiente de força na direção y (vertical)
C_τ	Coefficiente de atrito
D	Diâmetro do cabo
D_{\max}	Diâmetro máximo do cabo

E	Modulo de elasticidade transversal do cabo
F_a	Força de arrasto
F_s	Força de sustentação
$F_{e,mod}$	Força estática generalizada
F_e	Força estática no protótipo
F_x	Força na direção x
F_y	Força na direção y
F_z	Força na direção z
$F_x(x,t)$	Força aerodinâmica na direção x em função de x e de t
$F_y(x,t)$	Força aerodinâmica na direção y em função de x e de t
$F_z(x,t)$	Força aerodinâmica na direção z em função de x e de t
\tilde{F}	Força normalizada
F_{amort}	Força de amortecimento
F_{exc}	Força de excitação
Fr	Número de Froude
F_i	Coefficiente para cálculo da força de excitação, i=1, 2 e 3
H_n	Função de frequência complexa da função n
H	Componente horizontal da tensão estática e dinâmica do cabo
I	Momento de inércia polar
I_1	Intensidade de turbulência da componente longitudinal do escoamento
L	Comprimento do cabo
L_1	Escala longitudinal de turbulência
L_h	Comprimento da projeção horizontal do cabo
L_v	Comprimento da projeção vertical do cabo
L_{exp}	Passo da espiral
M_t	Momento torçor médio

P_{atm}	Pressão atmosférica
$P(A)$	Probabilidade de acontecer o evento A
$P(A, B)$	Probabilidade de ocorrência conjunta
$P(A B)$	Probabilidade de ocorrência condicional (probabilidade de ocorre A dado que B ocorreu ou ocorrerá)
Q	Vazão
R	Raio do cabo
R_n	Função de correlação da função n
Re	Número de Reynolds
S_i	Coefficiente que relaciona o coeficiente de sustentação com o ângulo θ , com $i=1$ e 2
S_n	Espectro de potência da função n
Sc	Número de Scruton para o modo fundamental
Sc_n	Número de Scruton para o modo n
S_t	Número de Strouhal
T	Temperatura
T	Tempo adimensional
T	Tensão estática no cabo
V	Velocidade média do vento
V_{disp}	Velocidade de disparo
V_r	Velocidade reduzida
V_{rel}	Velocidade relativa
V_{ef}	Velocidade efetiva do vento
V_1	Limite inferior do intervalo da velocidade
V_2	Limite superior do intercalo da velocidade
Y	Deslocamento adimensional na direção y (vertical)
\dot{Y}	Velocidade adimensional na direção y (vertical)

\ddot{Y}	Aceleração adimensional na direção y (vertical)
Z_i	Coefficiente para cálculo da força de amortecimento, $i=1, 2$ e 3

Letras romanas minúsculas

a	Amplitude de oscilação do filete
a_1	Constante a ser determinada para dado cabo
a_2	Constante a ser determinada para dado cabo
b_{fil}	Dimensão da base do filete
d	Diâmetro do filete quando considerado circular
\bar{c}_p	Coefficiente de pressão médio
\hat{c}_p	Coefficiente de pressão máximo
\check{c}_p	Coefficiente de pressão mínimo
\tilde{c}_p	Coefficiente de pressão mínimo RMS
c_1	Coefficiente de amortecimento estrutural do cabo no plano xy
c_2	Coefficiente de amortecimento estrutural do cabo fora do plano xy
ds	Comprimento de arco do segmento de cabo deformado referindo-se ao perfil dinâmico do mesmo
\overline{ds}	Comprimento de arco do segmento de cabo indeformado referindo-se ao perfil estático do mesmo
f_1	Frequência natural para o modo fundamental
f_n	Frequência natural para o modo n
f_i	Frequência de ocorrência da intensidade de chuva
f_s	Frequência de desprendimento de um par de vórtices
g	Aceleração da gravidade
h_{fil}	Altura do filete
h_o	Referência de espessura do filete
h	Componente horizontal de tensão estática do cabo
i	Número imaginário

i	Intensidade de chuva
k	Rigidez de mola generalizada
k_{mod}	Rigidez de mola generalizada do modelo
k_o	Relação entre a pressão dinâmica e a variação da pressão de referência
l	Comprimento do filete relevante no protótipo
l_{mod}	Comprimento do filete relevante no modelo
m	Massa por unidade de comprimento
m_{F1}	Massa por unidade de comprimento do filete superior
m_{F2}	Massa por unidade de comprimento do filete inferior
p	Pressão normal local
$p(t)$	Pressão instantânea
\bar{p}	Pressão média
$\hat{p}(t)$	Valor máximo de $p(t)$ para período de amostragem em T.
$\check{p}(t)$	Valor mínimo de $p(t)$ para período de amostragem em T.
q	Pressão dinâmica ao longe
r	Raio do arco do filete
s	Coordenada curvilínea
t	Tempo
u	Componente de deslocamento dinâmico na direção x
v	Componente de deslocamento dinâmico na direção y
w	Componente de deslocamento dinâmico na direção z
x	Deslocamento na direção paralela à direção do vento
x	Eixo cartesiano
\dot{x}	Velocidade na direção paralela à direção do vento
\ddot{x}	Aceleração na direção paralela à direção do vento
y	Eixo cartesiano
y	Deslocamento na direção perpendicular à direção do vento
\dot{y}	Velocidade na direção perpendicular à direção do vento
\ddot{y}	Aceleração na direção perpendicular à direção do vento

y_x Derivada de configuração y em relação à x

z Eixo cartesiano

Letras gregas maiúsculas minúsculas

Δpa Variação da pressão entre dois anéis piezométricos do convergente

Δp Variação da pressão na superfície de um corpo

Γ_i Função que engloba parâmetros relativos à geometria e aerodinâmica do cabo com $i=1,2,3$

Letras gregas maiúsculas minúsculas

α Ângulo de inclinação do cabo

β Ângulo de incidência do vento

β^* Ângulo equivalente de incidência do vento

ε Fator de influência no ângulo de ataque do vento devido a presença de filetes

ε Constante $\frac{h_o}{R}$

γ Ângulo de ataque do vento

γ^* Ângulo de ataque da velocidade relativa do vento, V_{rel}

δ Decremento logarítmico

δ Delta de Dirac

δ_{mod} Decremento logarítmico do modelo

ϕ Fator que leva em conta a forma modal

ϕ Ângulo de flutuação do filete

ϕ_{ext} Diâmetro externo da tomada de pressão

ϕ_{int} Diâmetro interno da tomada de pressão

ϕ_{exp} Diâmetro da espiral

η Fonte de ruído branco

η Parâmetro de distribuição de escala

κ Parâmetro de distribuição de forma

ψ	Função de oscilação do filete
ν	Viscosidade cinemática do ar
θ	Ângulo relativo entre a posição do filete superior e ponto de estagnação do vento
θ	Posição circunferencial onde se analisa o coeficiente de pressão
θ_s	Posição circunferencial onde ocorre a separação do escoamento
θ_1	Posição estática do filete superior, positivo no sentido horário
θ_2	Posição estática do filete inferior, positivo no sentido anti-horário
θ^{eq}	Posição de equilíbrio do filete superior. Ocorre quando $\phi = 0$
ρ_{agua}	Massa específica da água
ρ_{ar}	Massa específica do ar
σ_n	Desvio padrão da função n
σ_s	Tensão superficial
τ	Pressão tangencial local
τ	Tensão dinâmica no cabo
ω_n	Frequência angular natural
ω_f	Frequência angular natural com filtro
$\hat{\omega}$	Frequência de oscilação do filete superior
$\Omega_{V,\beta}^{A_s}$	intervalo de ocorrência da velocidade do vento e direção do vento o qual as vibrações induzidas por chuva e vento excedem A_s , pode ser escrito
Ω_i	intervalo de ocorrência da intensidade de chuva para as vibrações induzidas por chuva e vento
ζ	Razão de amortecimento crítico para o modo fundamental
ζ_f	Razão de amortecimento crítico para o modo fundamental com filtro
ζ_n	Razão de amortecimento crítico para o modo n
ζ_{total}	Amortecimento total da estrutura

1 INTRODUÇÃO

A idéia de utilizar cabos para suportar pontes não é nova. Infelizmente, o sistema inicialmente obteve pequeno sucesso devido a diversos fatores, dentre os quais destacam-se o baixo conhecimento que se tinha sobre estática, à utilização de materiais impróprios (ex.: barras e correntes usadas como estais).

O sucesso da aplicação das pontes estaiadas surgiu com a introdução de aços de alta resistência, com o desenvolvimento de novas técnicas e com o progresso na análise estrutural. Ainda, o desenvolvimento dos computadores permitiu possibilidades ilimitadas de soluções exatas de sistemas indeterminados estaticamente e precisas análises estáticas em três dimensões (Troitsky, 1977).

Os egípcios já utilizavam cabos como suporte para construção de embarcações, indicando quão antiga é esta criação (Figura 1.1). Em Borneo, na Oceania, utilizavam-se cordões de trepadeira como cabos de sustentação de uma passagem de pedestres feita de bambu (Fig. 1.1b) (Troitsky, 1977).

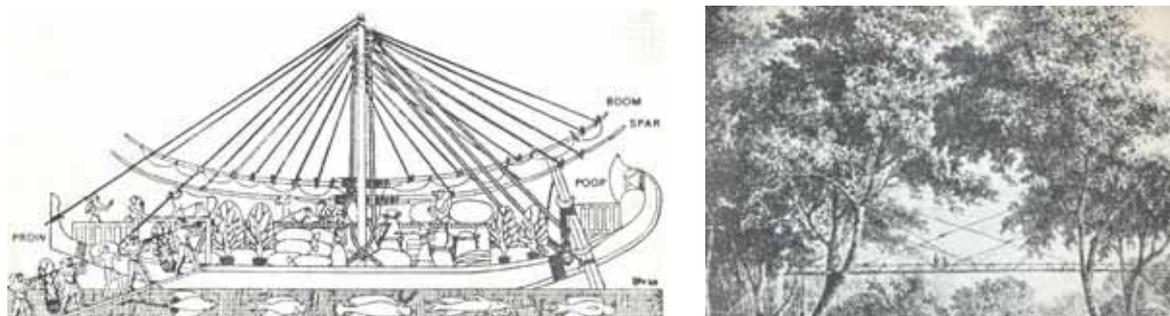


Figura 1.1 - (a) Embarcação egípcia construída com cabos estaiados sustentando vigas; (b) passarela estaiada primitiva de bambu em Borneo (Troitsky, 1977).

Após a segunda guerra mundial, várias pontes encontravam-se destruídas na Europa (15.000 só no oeste da Alemanha) com apenas as fundações intactas. Engenheiros, construtores e projetistas enfrentaram o desafio de construir pontes leves e aplicar nova tecnologia para aproveitar as fundações existentes (Podolny e Scalzi, 1976).

Em 1952, uma firma alemã projetou a ponte Strömsund, na Suécia. Esta ponte, erguida em 1955, foi considerada como a mais moderna ponte estaiada construída na época. Seu sistema possuía arranjo de poucos cabos com grande rigidez e espaçamento entre eles (Figura 1.2).



Figura 1.2 - Ponte Strömsund, Suécia - possuía arranjo de cabo duplo e consequentemente grande espaçamento entre eles (Troitsky, 1977).

O grande passo no desenvolvimento internacional foi dado em 1990, quando pontes estaiadas entraram no domínio de grandes vãos que era reservado às pontes pênséis. Esta geração caracteriza-se pela presença de muitos estais pouco espaçados suportando tabuleiros flexíveis, seções esbeltas, aumento do comprimento dos vãos e pela construção de pontes estaiadas de múltiplos vãos (Mathivat, 1994 apud Torneri, 2002). Por esta razão o projeto de pontes estaiadas é atualmente predominantemente controlado pela resposta dinâmica à ação do vento. Os cabos de pontes estaiadas atualmente apresentam grande flexibilidade, massa relativamente baixa e amortecimento extremamente baixo. Portanto, este tipo de cabo apresenta susceptibilidade às vibrações causadas por vários mecanismos aerodinâmicos de excitação, dentre eles, os mecanismos de vibração induzidas pelo efeito combinado de chuva e vento.

Simultâneas ocorrências de vibrações de cabos de pontes estaiadas sob ação combinada de chuva de vento têm sido observadas ao redor do mundo nos últimos 20 anos. Este mecanismo tem causado grande preocupação aos engenheiros de pontes e pesquisadores de vários países por atingirem grandes amplitudes de vibração (Burton, 2005).

Estas vibrações, que são predominantemente transversais à direção do vento, foram observadas apenas sob condições de chuva leve e baixas velocidades do vento ocorrendo simultaneamente. Este novo fenômeno foi mais observado em cabos de pontes estaiadas (cabos inclinados) de seção circular. As oscilações são provocadas principalmente pela formação de filetes d'água ao longo da superfície dos cabos na direção axial.

Em 1970 foram observadas vibrações induzidas por chuva e vento nos cabos da ponte de Köhlbrand em Hamburgo (Figura 1.3a), na Alemanha (Ruscheweyh e Verwiebe, 1995). O mesmo fenômeno foi observado ainda na ponte de Farø, na Dinamarca em 1985 (Figura 1.3c).

Grande influência do vento com a presença da chuva foi observada por Hikami e Shiraishi (1988) durante a fase de construção da ponte de Meiko Nishi em 1985, no Japão (Figura 1.3b). Eles notaram pequenas amplitudes nos cabos submetidos somente à ação do vento, e grandes amplitudes (causando instabilidade) nos cabos sob ação combinada de chuva e vento.



Figura 1.3 - Fotografias de pontes estaiadas em que foram observadas vibrações nos cabos devido ao efeito combinado de chuva e vento (a) ponte Köhlbrand; (b) ponte Meiko Nishi; (c) ponte Farø.

Em 1993 e 1994 foram observadas rachaduras nas extremidades dos estais devida à fadiga provocada pelas vibrações induzidas por chuva e vento nos cabos quase verticais da ponte de Dömitz, na Alemanha (Ruscheweyh e Verwiebe, 1995).

Um caso recente de vibração devido à presença da chuva foi observado na ponte de Erasmus em Rotterdam (Figura 1.4a). Seus cabos vibraram fortemente no dia 4 de novembro de 1996, menos de 2 meses antes de ser aberta ao tráfego (Burgh et al, 2006).

Os cabos da ponte Dongting, construída em 2000 em Hunan, China, (Figura 1.4b) apresentaram vibrações induzidas por chuva e vento com amplitudes de deslocamento de até 70cm de pico-a-pico, no terceiro modo dominante. As oscilações foram observadas diversas vezes logo após a abertura da pista para o tráfego e ocorreram sob baixa velocidade do vento e chuva leve (Ni et al., 2007).



Figura 1.4 – Pontes estaiadas (a) Erasmus e (b) Dongting.

Recentemente alguns cabos da ponte construída em Shanghai e Nanjing, na China, apresentaram oscilações devido ao efeito combinado de chuva e vento. A ponte de Shanghai apresentou oscilações tão fortes que os tubos de aço que protegem os cabos ao nível da laje quebraram (Gu e Du, 2005).

Vibrações devidas ao efeito combinado da chuva e vento também ocorreram nas pontes de Brotonne, na França, Meiko e Aratsu, ambas no Japão, Fred Hartman e Veteran, ambas no Texas (EUA). Ainda foi observado este tipo de vibração em cabos das pontes, Ben-Ahin, Wandre, Second Severn, Burlington, Baytown, Glebe Island, entre outras (Virlogeux, 1999).

Os registros mostram que diversas pontes construídas recentemente apresentaram ou ainda apresentam ocorrências de vibrações devido ao efeito combinado de chuva e vento nos

cabos estaiados. Isto ocorre devido à falta de conhecimento deste novo fenômeno pelos engenheiros, construtores e projetistas.

Grande esforço no estudo do comportamento de cabos sob ação combinada de chuva e vento tem sido realizado desde alguns anos no Japão, França, Dinamarca, Alemanha, Bélgica, China, Estados Unidos, Polônia, Rússia, Inglaterra e Itália.

No Brasil, nos últimos anos, tem-se observado a construção de algumas pontes. A primeira ponte estaiada, por exemplo, foi inaugurada em São Paulo, em 2002, a ponte sobre o Rio Pinheiros (Estação Santo Amaro). Diversas pontes estaiadas estão sendo ou já foram construídas no âmbito nacional, por exemplo, a ponte sobre o Rio Paranaíba, a ponte sobre o rio Cuiabá, a ponte sobre o Rio Poty, a ponte Internacional Wilson Pinheiro (Brasil/Bolívia), a ponte sobre o rio Potengi, a ponte Internacional (Brasil/ Peru), a ponte sobre o Lago Paranoá ou JK e a ponte sobre o Rio Guamá, entre outras.

1.1 RELEVÂNCIA DO PROBLEMA

Oscilações de largas amplitudes e baixa frequência foram observadas nas últimas décadas em cabos de diversas pontes estaiadas ao redor do mundo. Devido à alta flexibilidade, massa relativamente pequena e amortecimento extremamente baixo, o sistema de cabos de pontes estaiadas pode estar sujeito a largos movimentos dinâmicos induzidos pela ação combinada de chuva e vento. As grandes amplitudes atingidas reduzem a vida útil dos cabos e de suas conexões devido à fadiga e em consequência causam danos aos dutos de proteção contra corrosão. Além disso, as oscilações excessivas podem ainda provocar choques entre cabos adjacentes e causar situação de desconforto ao usuário.

Para uma melhor qualificação dos modelos analíticos que estão sendo desenvolvidos, é necessário que se entenda os mecanismos de vibração induzida por chuva e vento através de ensaios experimentais realizados em campo ou em túnel de vento. Apesar dos ensaios em escala natural não apresentarem nenhuma interferência devido aos erros de modelagem de parâmetros relativos ao escoamento, são bastante onerosos e imprevisíveis quanto à possibilidade, podendo demandar, portanto, um tempo excessivo para a realização das medições. Os ensaios em túnel de vento têm a vantagem de ter custos menos elevados e serem

executados em tempo relativamente curto, além de contar com a menor possibilidade de erros quando estes ensaios são controlados.

O fenômeno das vibrações induzidas por chuva e vento envolve uma complexa interação entre vento, filete e cabo que ainda não está esclarecida.

O melhor conhecimento do fenômeno evitará que perigosas oscilações induzidas pelo efeito combinado de chuva e vento ocorram, comprometendo a utilidade e segurança das pontes estaiadas, e que medidas sejam tomadas apenas após a ocorrência de acidentes.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos relatos foram feitos por pesquisadores nos últimos 20 anos sobre acidentes em cabos de pontes estaiadas causados pelo efeito simultâneo da chuva e vento. Um forte investimento tem sido feito desde o final da década de 80 na descoberta dos mecanismos que provocam oscilações excessivas devido ao efeito combinado da chuva e vento em cabos de pontes estaiadas. Vários pesquisadores têm realizado estudos analíticos e experimentais para simular e explicar o fenômeno. Baseados no conhecimento dinâmico e aerodinâmico de estruturas, desenvolveram modelos matemáticos considerando a formação e movimentação dos filetes de água nos cabos. No Anexo C, encontram-se tabelas que resumem as condições de ensaios experimentais e de desenvolvimento de modelos matemáticos relevantes, realizados por outros pesquisadores.

Os estudos sobre vibração de cabos de pontes estaiadas com a presença de chuva e vento foi primeiro relatado em 1988, quando grandes oscilações foram observadas nos cabos na fase de construção da ponte estaiada de Meikonishi, no Japão. No mesmo ano, para tentar entender o papel que a chuva tinha nas oscilações da ponte, Hikami e Shiraishi fizeram medições no protótipo e ensaios em túnel de vento, ambos sob condições de vento com e sem a presença da chuva. A análise realizada pelos autores mostrou que as vibrações observadas nos cabos da ponte não foram causadas por desprendimento de vórtices nem galope de esteira. A frequência observada de vibração foi bem abaixo da frequência crítica de oscilação induzida por vórtices. Além disso, as oscilações nos cabos só foram notadas com a presença da chuva, isso fez com que os autores levantassem a hipótese de que as vibrações eram causadas por efeito combinado da chuva e vento. Observaram que em dias chuvosos formava-

se um filete d'água na geratriz inferior do cabo que sobre ação do vento oscilava na direção circunferencial da seção e conseqüentemente o cabo vibrava. Observaram que a formação dos filetes d'água está limitada a cabos inclinados em relação à direção do vento. Em conseqüência das observações do comportamento dos filetes d'água, realizou-se ensaios em túnel de vento para entender os mecanismos de formação dos filetes. As condições de chuva sobre o modelo aeroelástico foram reproduzidas a partir de água borrifada. As amplitudes de vibrações induzidas pela presença da chuva foram em torno de 5 vezes maior quando comparadas com as amplitudes provocadas por desprendimento de vórtices. Os autores descobriram a formação de um segundo filete na parte superior do cabo para determinadas inclinações e ângulo de ataque. Este filete não aparece quando o cabo está inclinado na direção oposta. O filete superior apresentou efeito excitante no cabo enquanto que o filete inferior amorteceu as vibrações. Observaram que os filetes oscilavam na direção circunferencial da seção do cabo e no mesmo período de movimento de oscilação do cabo. Desta forma, a oscilação dos filetes aparece como uma mudança periódica da seção transversal. Baseados no comportamento do filete superior, os autores consideraram duas possibilidades de mecanismos de instabilidade: (a) mecanismo de Den Hartog e (b) divergência torsional.

Matsumoto et al. (1990) investigaram através de ensaios em túnel de vento as características de cabos horizontais e inclinados sujeitos à ação de vento com e sem a presença de chuva. Utilizaram diferentes materiais para representação da superfície do modelo de cabo. Encontraram intenso escoamento axial (escoamento na direção axial de cabos inclinados) na esteira do cabo, que tem características semelhantes à de uma placa submersa posicionada no mesmo local. O escoamento axial resulta uma força aerodinâmica excitadora secundária agindo no cilindro horizontal ou inclinado. Os autores dizem que a estabilização das vibrações induzidas por chuva e vento pode depender do controle destas forças aerodinâmicas secundárias. Pode ocorrer a formação de um ou dois filetes na superfície dos cabos dependendo do material da superfície.

Yamaguchi (1990) desenvolveu um modelo analítico de vibrações induzidas por chuva e vento em cabos com a presença do filete superior apenas. Foram investigadas as características aerodinâmicas estáticas do modelo primeiramente através de ensaios realizados em túnel de vento. Foram sugeridos dois mecanismos de vibração por galope: o mecanismo de Den Hartog e o de instabilidade de 2GDL (mecanismo torsional). Yamaguchi (1990)

concluiu que a oscilação do filete superior é indispensável para o surgimento das vibrações induzidas por chuva e vento.

As vibrações provocadas pelo efeito combinado de chuva e vento em cabos de pontes estaiadas tornaram-se um grande interesse de engenheiros de pontes em vários países devido as grandes amplitudes atingidas e ocorrência sob ventos de baixa velocidade. Matsumoto et al., (1992) realizaram estudos para esclarecer as características e mecanismos do fenômeno, bem como desenvolver medidas aerodinâmicas de controle de vibrações. Para isto, promoveram uma série de ensaios em túnel de vento sob condições combinadas de escoamentos suave, turbulento, com chuva e sem chuva. Os autores notaram que a posição do filete d'água superior afeta drasticamente a estabilidade aerodinâmica dependendo do ângulo de incidência do vento. Sugeriram que as vibrações de cabos devido ao efeito combinado de chuva e vento são excitados por dois diferentes fatores: escoamento axial e formação dos filetes d'água, podendo cada fator afetar o cabo independentemente. Observaram que a turbulência pode ter efeito estabilizante ou instabilizante dependendo do ângulo de ataque do vento e da localização do filete superior. Como uma solução para suprimir vibrações sob efeito de chuva e vento, os autores propuseram cobertura de cabos com protuberâncias no sentido longitudinal. Aparentemente, este dispositivo interrompeu a formação de filetes a uma posição aerodinamicamente instável.

Ruscheweyh e Verwiebe (1995) realizaram ensaios no túnel de vento da Universidade de Aachen na Alemanha com o objetivo de detalhar informações sobre os mecanismos de vibrações causadas pelo efeito combinado de chuva e vento em barras quase verticais e verticais submetidos à chuva artificial. Concluíram que grandes amplitudes de vibração iniciam em valores de velocidade baixas e ocorrem em inclinações de 80° a 90° para todos os ângulos de ataque. Além disso, as amplitudes dependem da intensidade de chuva sobre o cabo e podem ser reduzidas com o uso de amortecedores estruturais.

Flamand (1995) estudou a influência que os dutos de proteção de cabos cobertos por fuligem de poluição atmosférica exerce no movimento dos filetes d'água em torno da seção transversal. Os ensaios foram realizados em túnel de vento para analisar o comportamento dos cabos estaiados da ponte Normandie submetida ao efeito combinado de chuva e vento. Foram ensaiados cabos com revestimento de PP (polipropileno) e PE (polietileno). Flamand observou que a presença de fuligem na superfície dos cabos aumentam a possibilidade de aparecimento de filetes d'água. Observou que a fuligem pode ser eliminada facilmente por

chuva fina quando a superfície é de PP e mais de uma hora para a superfície de PE. Ressaltou o aparecimento de oscilações para velocidades médias do vento baixas e notou a remoção dos filetes pelo escoamento quando estas velocidades atingiam valores altos.

Matsumoto et al. (1995) investigaram as características das respostas das vibrações induzidas por chuva e vento em cabos e seus mecanismos. Foi investigada principalmente a resposta do tipo velocidade restrita e a importância do papel do desprendimento de vórtices de período muito maior que o convencional desprendimento de vórtices de Kármán. Discutiram algumas considerações relacionadas ao assunto a partir de resultados obtidos em vários ensaios realizados nos túneis da Mitsubishi Heavy Industries e Universidade de Kyoto. Segundo os autores, o cilindro com ou sem filetes d'água mostram várias características de repostas que são afetadas pelo posicionamento em relação ao escoamento do vento, localização do filete superior, condições de escoamento, número de Scruton, etc. Classificaram as repostas analisadas em (a) resposta de velocidade restrita; (b) resposta divergente e (c) resposta híbrida de (a) e (b). Sugeriram que a resposta divergente pode ser originada por galope devido à formação do filete superior em certa localização ou devido ao aparecimento do escoamento axial atrás do cabo. A resposta de velocidade restrita pode ser velocidade restrita de galope devido à formação do filete superior em uma localização instável aerodinamicamente.

Observações e medições de vibrações induzidas por efeito combinado de chuva e vento em cabos quase verticais foram feitas na ponte em arco sobre rio Elbe na Alemanha em 1993 e 1994. Observaram-se rachaduras nas conexões de alguns cabos com o tabuleiro. Com o objetivo de obter informações detalhadas sobre os mecanismos envolvidos nos danos causados aos cabos de aço desta ponte, Verwiebe e Ruscheweyh (1996) realizaram ensaios de modelos de cabos no túnel de vento da Universidade de Aachen. Mostraram que grandes oscilações na direção do escoamento do vento ocorrem apenas com a presença da chuva atingindo relação máxima de amplitude/diâmetro de 0,17. Essas vibrações iniciam a certa velocidade do vento e mudam de direção às velocidades mais altas. Para o ângulo de inclinação 79° foram observadas vibrações para todos os ângulos de ataque. Os autores afirmam que o uso de amortecedores não altera significativamente a velocidade crítica, mas provoca uma redução proporcional das vibrações de amplitudes.

Bosdogianni e Olivari (1996) mediram amplitudes de oscilação em modelos de cabos de pontes estaiadas ensaiados em túnel de vento utilizando filetes rígidos (artificiais) e

posteriormente fluidos (reais) e compararam com amplitudes medidas sem a presença dos filetes. Estudaram também a influência da posição dos filetes de água na superfície do cabo, bem como a influência do ângulo de incidência do vento sobre os cabos. A mudança da forma da seção transversal do cilindro devido a presença de filetes d'água levou os autores a pensar na idéia de que as vibrações do cabo eram induzidas por galope. Sendo assim, os autores não simularam cabos sob escoamento turbulento, assumindo-se que os piores casos de galope aparecem em escoamento suave. Bosdogianni e Olivari visualizaram claramente o comportamento dos filetes utilizando óleo misturado com dióxido de titânio branco escoando livremente na superfície do cilindro. Notaram uma formação mais pronunciada dos filetes d'água para velocidades médias entre 7,5m/s e 16m/s e para ângulos de incidência do vento entre 0° e 45°. Eles determinaram a variação da posição dos filetes d'água superior e inferior ao longo da circunferência da seção do cabo, a qual mostrou relação quase linear com a velocidade e ângulo de incidência do vento. Determinaram as piores condições de inclinação e ângulo de incidência do vento, bem como a posição crítica dos filetes ao longo da direção circunferencial da seção. Os autores sugerem que a instabilidade do cabo é causada pela posição dos filetes e não pelo movimento destes.

Verwiebe e Ruscheweyh (1997) deram prosseguimento ao estudo iniciado em 1995 após vibrações devidas ao efeito combinado da chuva e vento terem sido observadas nos cabos de sustentação da mesma ponte em arco. Neste estudo os autores apresentaram mecanismos de excitação a partir de ensaios em túnel de vento para diversas inclinações do modelo de cabo e vários ângulos de incidência do vento. Consideraram no modelo o mesmo diâmetro do cabo real para evitar os efeitos de escala devido o tamanho das gotas d'água. Para a determinação dos mecanismos propriamente ditos, os autores se basearam em mecanismos básicos: (a) a forma geométrica da seção transversal do cabo permanece em constante mudança devido à formação de um ou dois filetes d'água ao longo do cabo. A forma da seção dependerá da adesão entre água e superfície do cabo, ação das forças do vento e aceleração da oscilação; (b) os filetes d'água oscilam na direção circunferencial da seção transversal do cabo devido à aceleração momentânea; (c) o sistema ganha energia se a força resultante agindo na seção transversal oscila na mesma frequência natural do cabo e com o mesmo sinal de oscilação da velocidade. Os autores frisam que modelos com filetes artificiais não são capazes de apresentar resultados reais, pois não simulam o movimento dos filetes e conseqüentemente a variação contínua da seção transversal.

Verwiebe (1998) complementou seu estudo e ensaiou cabos em túnel de vento levando-se em conta a variação do ângulo de ataque do vento, ângulo de inclinação do cabo e frequência natural do modelo. Investigou a interação entre o movimento dos filetes d'água na direção circunferencial e a vibração do cilindro. Verwiebe propôs um método aproximado de estimativa de amplitudes de deslocamento de cabos e barras sob ação combinada de chuva e vento. O método é baseado num sistema generalizado massa-mola-amortecedor e pode ser dividido em duas etapas: determinação da força estática equivalente no modelo e determinação da máxima amplitude dinâmica do cabo original.

Sarkar e Gardner (2000) investigaram vários aspectos do fenômeno das vibrações induzidas por chuva e vento através de uma série de ensaios realizados em túnel de vento. Investigaram também a efetividade de dispositivos eliminadores desta vibração.

Hortmanns et al. (2000) utilizaram um modelo aeroelástico de dois graus de liberdade (vertical e rotacional) que permitia o movimento de um filete artificial na direção circunferencial da seção do cilindro. No entanto, ressaltaram que não é apenas a forma da seção que é dependente do tempo, mas também o tamanho e a forma dos filetes. As duas últimas considerações não foram levadas em conta no modelo, pois, os autores confirmam que essa simplificação não provoca influência significativa nas características da resposta. Hortmanns et al. (2000) afirmam neste estudo que o desprendimento de vórtices e efeito de galope não fazem parte dos mecanismos de vibrações induzidas por chuva e vento. As respostas obtidas com o modelo foram semelhantes às observações em túnel de vento com a presença de filetes reais. Pretendem investigar futuramente a influência do tamanho e forma dos filetes nas vibrações em questão e adicionar mais um filete que poderá se movimentar independentemente do outro.

Consentino et al. (2002) mediram o campo de pressões variáveis e espessura d'água em volta do modelo de cabo sob condições de chuva e vento. Com isso, um modelo mecânico de mecanismo de excitação foi elaborado e seus parâmetros foram calibrados por resultados experimentais. O modelo propõe ajudar com o entendimento do fenômeno.

Gu et al. (2002) investigaram as características das respostas de cabos de pontes estaiadas com a utilização de modelos de diferentes massas e rigidezes com a presença de filetes artificiais. O modelo foi ensaiado no túnel de camada limite TJ-2 na Universidade de Tongji para várias posições dos filetes, diferentes velocidades do vento e ângulos de ataque,

sob escoamento suave. Os resultados para ângulos de incidência do vento normal ao eixo do cabo foram apresentados e comparados com a teoria do galope de Den Hartog. A adição do filete inferior teve pouco efeito sobre a vibração dos cabos. Notaram que o tamanho do filete é insignificante sobre a vibração dos cabos. A velocidade de disparo (velocidade em que se iniciam as vibrações) é aproximadamente proporcional à frequência e também ao amortecimento estrutural, mas não ao número de Scruton. Todos os ensaios realizados em cabos horizontais e vento normal ao cabo, exibiram vibrações transversais que ocorriam subitamente quando a velocidade do vento atingia certo valor. Os autores confirmaram através dos resultados que as vibrações transversais em cabos horizontais com direção do vento normal são do tipo galope. Analisaram a influência da posição do filete superior sobre a velocidade de disparo. Para ensaios com ângulos de incidência não normais ao eixo do cabo, ocorreram dois efeitos misturados: para baixa velocidade do vento aparecem vibrações de velocidade restrita; quando a velocidade aumenta a certo nível, ocorre o galope.

Chen et al. (2003) publicaram trabalho sobre a instalação dos amortecedores MR¹ nos 156 cabos mais longos da ponte Dongting com o objetivo de reduzir as vibrações induzidas por chuva e vento.

Matsumoto et al. (2003a) realizaram ensaios em túnel de vento com modelos de cabos inclinados e filetes artificiais fixos. Dos experimentos, relataram que o fenômeno provocado pelo efeito combinado de chuva de vento ocorre em regiões de altas velocidades reduzidas do vento. O fenômeno pode ser explicado como vibração induzida por vórtices, que ocorre a altas velocidades reduzidas do vento. Investigaram o efeito dos filetes d'água e da turbulência do vento sobre as vibrações induzidas por estes vórtices. Para Matsumoto et al. (2003a) o filete superior e a turbulência do vento são essenciais no mecanismo de vibração induzidas por vórtices a altas velocidades reduzidas do vento. Os autores pretendem investigar futuramente e esclarecer a interação aerodinâmica entre instabilidade por galope e vórtices de Kármán.

Matsumoto et al. (2003b) publicaram estudo sobre observações de campo em pontes estaiadas a partir de 2000. Observaram as vibrações induzidas por chuva e vento e as do tipo

¹ Amortecedor com fluido MR (magneto-reológico). Quando se aplica um força magnética ao fluido, pequenas partículas de ferrocarbonila imersas no fluido se alinham para fazer com que este endureça e fique sólido, fenômeno causado pelo campo magnético de corrente direta, que faz as partículas se imobilizarem em uma polaridade uniforme. O quanto a substância endurece depende da força do campo magnético. Caso se retire a força magnética, as partículas ficam livres imediatamente.

galope. O segundo mecanismo não foi completamente comprovado como sendo galope. No entanto, os resultados mostraram a possibilidade de vibração do tipo divergente. Investigaram também os coeficientes de forças do vento estáticos em túnel de vento para cabos inclinados.

Para Matsumoto et al. (2003c), as medições em protótipo podem ser melhores para medir e analisar as vibrações induzidas por chuva e vento comparadas a ensaios realizados com modelos em túnel de vento. No entanto, existem várias restrições em observações em protótipos de cabos de pontes estaiadas, por exemplo, interrupção do tráfego. Com o intuito de eliminar essas restrições, um modelo de cabo em escala real foi construído em 2000 para se analisar o comportamento destes sob diversas condições reais de clima. Também observaram o comportamento dos cabos da ponte japonesa Meiko, principalmente em dias de vento e chuva. Dos experimentos, os autores observaram a existência de um novo mecanismo que pode ser explicado como vibração induzida por vórtices a altas velocidades reduzidas do vento.

Per e Nahrath (2003) apresentaram modelo matemático que descreve as vibrações induzidas por chuva e vento utilizando a teoria quase-permanente. O modelo descreve ambos os movimentos, do cabo e dos filetes d'água sobre a superfície da seção, incluindo a não linearidade física e geométrica. O modelo é capaz de simular o fenômeno básico das vibrações induzidas por chuva e vento.

Wilde e Witkowski (2003) apresentaram modelo analítico de um grau de liberdade (1GDL) das vibrações em cabos estaiados causada pelo efeito combinado de chuva e vento. Para isto, admitiram que a frequência do movimento circunferencial do filete d'água é igual a frequência da oscilação do cabo. Além disso, foram feitas outras considerações: (a) apenas foi considerada a existência do filete superior devido ao seu efeito excitante; (b) a relação de amplitude do filete superior e do cabo é constante para uma dada velocidade, e pode ser modelado por uma função que descreve a dependência da amplitude do filete sobre a velocidade do vento; (c) a posição inicial do filete superior é função da velocidade do vento; (d) a massa do filete é negligenciada comparada com a do cabo; (e) não foi levada em consideração a existência do escoamento axial. O modelo proposto é descrito por uma fórmula simples que pode ser facilmente usada para estimar a máxima amplitude da oscilação dos cabos submetidos à ação simultânea da chuva e vento.

Wang e Xu (2003) realizaram estudo teórico preliminar objetivando estabelecer uma solução analítica para o problema de vibrações excessivas devido à ação combinada de chuva e vento em cabos de pontes estaiadas. Foram feitas medidas de campo e ensaios em túnel de vento para comparação dos resultados obtidos pelo modelo. O modelo analítico proposto leva em conta o efeito da velocidade média do vento na posição do filete d'água superior e a influência do movimento do filete no cabo. Algumas considerações foram feitas no desenvolvimento do modelo: (a) foi admitida uma distribuição uniforme do filete superior ao longo do eixo longitudinal do cilindro; (b) efeitos de turbulência e do escoamento axial não foram considerados; (c) o movimento do filete superior na direção circunferencial da seção do cilindro foi admitido com harmônico, baseados em Hikami e Shiraishi (1988); (d) a frequência de movimento do filete é a mesma do movimento do cabo (Hikami e Shiraishi, 1988). O modelo de Wang e Xu foi validado através da comparação com ensaios realizados com filete superior fixo e móvel. O modelo é capaz de prever vibrações em cilindros inclinados com filetes em movimento. Concluíram que a ocorrência de vibração de velocidade e amplitude restritas é principalmente devido à alternância do amortecimento aerodinâmico e/ou alternância da interação entre o movimento do filete superior, movimento do cabo e vento. Ressaltaram que a proposta do modelo ainda é preliminar e que podem ser feitos estudos futuros com a consideração de alguns efeitos citados acima que foram negligenciados.

Um modelo analítico estocástico para a resposta de cabos estaiados sujeitos a ação combinada de chuva e vento foi desenvolvido por Cao et al. (2003). O modelo analítico descreve o movimento vertical de um modelo de seção transversal de cabo estaiado composto com filete superior. O movimento do filete é descrito por um processo estocástico simples que, junto às forças aerodinâmicas, modelam a complexa interação fluido-estrutura. Foi analisada a resposta estocástica do modelo com forças aerodinâmicas linearizadas. Os autores concluíram que se o amortecimento total do cabo é tal que provoque efeito de galope ($\zeta \leq 0$), o comportamento dinâmico do cabo poderia depender de termos negligenciados na expansão das forças aerodinâmicas e, portanto fora do alcance do modelo linearizado discutido. Desta forma, tendo que se discutir posteriormente um comportamento não linear para o cabo. Quando o fator de amortecimento é positivo ($\zeta > 0$), o processo de resposta do sistema linear é estacionário, desta forma, a derivada da resposta estocástica apresentada no estudo de Cao et al. (2003) pode ser usada para avaliar a amplitude de resposta dos cabos estaiados sob condições de chuva e vento.

Seidel e Dinkler (2003) revisaram o estado da arte das vibrações induzidas por chuva e vento e suas causas, desde a descoberta do fenômeno por Hikami e Shiraishi em 1986.

Xu e Wang (2003) apresentaram estudo analítico com o objetivo de explicar alguns fenômenos observados de vibrações induzidas por chuva e vento. Basearam-se em alguns resultados de túneis de vento e medições de campo para a construção do modelo analítico. O modelo foi desenvolvido considerando o efeito da velocidade do vento sobre a posição do filete superior e a influência do movimento deste sobre o cabo.

Nahrath (2003) em sua tese, desenvolveu modelo analítico de 4 GDL, que utiliza dados obtidos em túnel de vento para obtenção dos resultados analíticos. O modelo descreve a oscilação de um cabo inclinado acoplado aos filetes superior e inferior. Os resultados obtidos pelo modelo são utilizados para auxiliar no entendimento dos mecanismos das vibrações induzidas por chuva e vento, através de ensaios em túnel de vento. O autor considerou o modelo validado após a comparação de resultados obtidos analiticamente, e através do modelo desenvolvido experimentalmente. O modelo mostra uma dependência de diversos parâmetros de influência sobre as vibrações. Da mesma forma que investigações realizadas por outros pesquisadores, Nahrath (2003) concluiu que o filete superior tem influência crucial nas vibrações e que o tamanho dos filetes varia em função do tempo e espaço, que novamente influenciarão as forças do vento. O autor sugere que novas investigações para caracterização do comportamento dos filetes sejam realizadas.

Dreyer (2004) apresentou em sua tese, baseado nos modelos de Yamaguchi (1990) e Nahrath (2004), um algoritmo para simulação das vibrações induzidas por chuva e vento em cabos com filetes d'água. Desenvolveu equações do movimento para o cabo e para os filetes baseados nas equações de Navier-Stokes.

Chen et al. (2004) conduziram uma série de ensaios para investigar a possibilidade do uso de amortecedores MR na ponte estaiada Dongting, China, após intensivas observações de vibrações induzidas por chuva e vento desde a abertura do tráfego em 1999. A instalação do sistema de amortecedores MR apresentou efetividade e confiabilidade a partir da observação de três anos de serviço da ponte Dongting Lake.

Seidel e Dinkler (2004) desenvolveram um modelo através da formulação das equações do movimento para cabos e filetes d'água. Consideraram os efeitos da camada limite baseada nas equações da camada limite de Prandtl e fundamentos da física das gotas.

Concluíram que o resultado do movimento dos filetes d'água é uma transição periódica de escoamento, entre subcrítico e crítico. O mecanismo é baseado no fenômeno do fio de Prandtl e considera os filetes d'água como uma perturbação móvel. A interação entre cabo, filetes e escoamento determinam o desenvolvimento de um mecanismo auto excitante que provoca vibrações de largas amplitudes paralela ou perpendicular à direção do vento dependendo da localização dos filetes. As observações indicam que as vibrações induzidas por chuva e vento são compostas por dois fenômenos. O primeiro ocorre a baixas velocidades e o segundo ocorre a altas velocidades.

Um modelo matemático foi desenvolvido por Burgh e Hartono (2004) para análise linear e não linear de vibrações induzidas por chuva e vento, como um simples oscilador (de 1 grau de liberdade). As forças estáticas devidas à chuva e vento são medidas em túnel de vento e expressas na forma de coeficientes aerodinâmicos adimensionais que dependem do ângulo relativo entre ponto de estagnação do vento e posição do filete superior.

Li e Lin (2005) conduziram testes de cabos com filete superior artificial para esclarecer os mecanismos das vibrações induzidas por chuva e vento. Testaram a influência do tamanho e posição dos filetes, parâmetros dinâmicos do cabo, ângulos de ataque, entre outros parâmetros. Os resultados obtidos por Li e Lin (2005) mostram que a presença do filete superior parece ser pré-requisito para o aparecimento das vibrações induzidas por chuva e vento em cabos de pontes estaiadas. As vibrações obviamente diminuem com o aumento do amortecimento e da frequência natural do cabo.

Schwarzkopf e Sedlacek (2005) investigaram os mecanismos das vibrações induzidas por chuva e vento para produzir modelos futuros de cálculo da variação da posição dos filetes d'água e da magnitude das amplitudes de vibração.

Wang et al. (2005) realizaram ensaios em túnel de vento para entender os efeitos da dinâmica do fluido (filete) próximo à esteira. Compararam cabos estacionários com e sem a presença de filetes; investigaram as características da tridimensionalidade do escoamento em volta do cilindro, especialmente no que diz respeito à interação entre vórtices de Kármán e estruturas alongadas. Afirmaram que a posição e o movimento dos filetes dependem da intensidade de chuva, velocidade do vento, ângulo de inclinação e ângulo de ataque. Ambos os filetes ocorrem em torno da linha de separação do escoamento. A força de arrasto aumenta significativamente com a presença dos filetes na seção. A formação de filetes provoca grande

aumento na frequência dominante próxima da esteira. As largas variações das oscilações circunferenciais dos filetes perturbam a separação do escoamento do cilindro. Os autores ainda pretendem investigar as vibrações induzidas pelo efeito combinado de chuva e vento em cabos, associadas ao acoplamento entre dinâmica de fluidos e dinâmica de estruturas. Sugerem que mais investigações sejam feitas a respeito da tridimensionalidade do escoamento para esclarecer a interação dos vórtices longitudinais de Kármán.

Gu e Du (2005) observaram grandes oscilações em cabos da ponte estaiada construída em Shanghai e Nanjing, China. Foram observadas vibrações sobre condições moderadas de chuva que provocaram o rompimento do tubo de aço que protege o cabo de protensão. Após a instalação de novos anéis de borracha absorvedores de energia ainda observaram vibrações de amplitude limitada. Para encontrar a razão pelas quais os cabos de pontes estaiada sofriam fortes vibrações sobre a presença da chuva os autores realizaram ensaios no túnel de vento TJ-1 da Universidade de Tongji com a presença de filetes naturais formados a partir de água borrifada. Estudaram também o uso de fios entrelaçados aos cabos em espiral como dispositivo redutor de vibrações. Afirmaram ser efetivo o uso de fios entrelaçados em espiral em cabos na redução das vibrações induzidas por ação simultânea da chuva e vento. Para isto deve-se selecionar cuidadosamente o diâmetro, direção do entrelaçamento do fio (horário ou anti-horário) e o passo.

Burton et al. (2005) desenvolveram um modelo que parte da premissa que o movimento da seção do cabo é acoplado ao movimento do filete d'água superior via interação fluido-estrutura. O modelo permite o uso de dados obtidos em ensaios realizados em túnel de vento. Na aproximação, a estabilidade do sistema linearizado é reduzida a um problema de autovalor de sexta dimensão e seus autovalores são explorados numericamente como uma função de parâmetros que entram no modelo. O modelo conta com dados medidos de coeficientes de arrasto, sustentação e torção para cilindros experimentais fixos com filetes artificiais.

Zhou e Xu (2006) desenvolveram modelo analítico para investigar as vibrações induzidas por chuva e vento em cabos de pontes estaiadas. O modelo de 1GDL foi desenvolvido levando-se em consideração a variação da velocidade média do vento ao longo do estai e os efeitos das formas modais de vibração. Após a modelagem, os parâmetros estudados foram utilizados para explorar os mecanismos das vibrações induzidas por chuva e vento. O modelo criado também é capaz de considerar o controle das vibrações, na qual um

amortecedor viscoso é adicionado ao estai. Os resultados numéricos obtidos revelam que existe um valor ótimo do coeficiente de amortecimento do amortecedor viscoso para efeito de mitigação das vibrações.

Ensaio em túnel de vento e medições de campo foram conduzidos simultaneamente por Phelan et al. (2006). As medições realizadas nos protótipos duraram três anos e foram realizadas nas pontes estaiadas de Fred Hartman e Veterans' Memorial, ambas construídas no Texas. Das medições realizadas na ponte Fred Hartman, Phelan et al. concluíram que as vibrações ocorrem devido ao efeito combinado de chuva e vento, para baixas velocidades do vento e certa faixa de ângulo de ataque, correspondendo aos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. A adição de anéis de borracha ao longo dos cabos reduziu significativamente as vibrações causadas pelo efeito combinado da chuva e vento.

Seidel e Dinkler (2006) analisaram um complexo sistema de equações diferenciais não lineares em duas dimensões, de cabos e filetes. A modelagem mecânica, considera a presença dos dois filetes d'água formados (inferior e superior) e baseia-se no fenômeno de Prandtl tripwire. Também consideraram os efeitos da camada limite sobre as equações de camada limite de Prandtl e os fundamentos da física das gotas. Os resultados numéricos obtidos nos ensaios realizados por Hikami e Shiraishi (1988) foram confirmados a partir dos obtidos pela análise numérica realizada por Seidel e Dinkler. Os resultados demonstraram que a frequência natural dos cabos não tem influência sobre o início e extensão da velocidade restrita do vento que provoca a vibração. No entanto, as amplitudes de vibração são influenciadas pela frequência natural. O modelo numérico foi testado com sucesso na ponte de FarØ-Falster, na Dinamarca e na ponte em arco de Dömitz.

Um modelo matemático foi proposto por Lemaitre et al. (2006) para entender as características da formação e movimento de filetes d'água, onde o parâmetro de controle é o número de Froude. Para isto, investigaram a condição de formação e a relação entre a posição dos filetes e parâmetros físicos tais como velocidade do vento, tensão superficial, viscosidade da água, espessura do filete, diâmetro do cabo e inclinação. Posteriormente, derivaram a equação que rege a dinâmica dos filetes sobre cilindros sujeitos ao vento. Em seguida, é proposto um critério que estima a posição dos filetes, sendo negligenciado o efeito do impacto da água da chuva sobre o cilindro. Compararam o modelo proposto com dados experimentais e mostraram que a formação dos filetes ocorre devido ao equilíbrio entre a gravidade e a

pressão do vento, sendo o número de Froude utilizado como parâmetro avaliador dos efeitos causados pela ação combinada de chuva e vento.

Burgh et al. (2006) apresentaram modelo de equação para o estudo das vibrações induzidas por chuva e vento de um simples oscilador. No modelo, é investigada a influência da variação da massa do oscilador devido a presença de gotas d'água fluindo sobre o cabo e devido ao destacamento das gotas pelo vento. A massa variando no tempo é modelada por uma função harmônica. Também é considerada a variação dos coeficientes de arrasto e de sustentação no cabo.

Peil e Dreyer (2007) apresentaram uma revisão da literatura descrevendo aproximações matemáticas para simulação das vibrações induzidas por chuva e vento. Mostraram também, alguns exemplos para verificação dos resultados dos cálculos e discussões de medidas para suprimir as vibrações.

Denoël et al. (2007) apontaram em seu trabalho a necessidade da criação de um método semi-empírico para que a complexidade do procedimento de projeto seja mantida. Baseados em dados coletados durante ensaios em túnel de vento, uma nova proposta de modelo foi sugerida.

A ocorrência frequente de vibrações induzidas por chuva e vento nos cabos da ponte estaiada Dongting (construída na China em 2000) logo após a inauguração levou Ni et al. (2007) a estudarem os efeitos provocados nesta ponte a partir de observações de campo. Os autores realizaram medições durante três eventos típicos de excitação e analisaram cabos a diferentes tipos de segmentos das respostas. Os autores observaram que as grandes oscilações apenas ocorrem sob presença de chuva leve ou moderada. Ressaltaram que as vibrações no cabo cessam quando a velocidade do vento e o ângulo de ataque estão fora de certa faixa de valores para ambos. Observaram também que o modo dominante em todos os eventos de excitação de chuva e vento foi o terceiro modo. Notaram que durante as vibrações induzidas por chuva e vento, apenas pequenos segmentos de intervalos de tempo da resposta manifestam vibração no primeiro modo e a maior parte da resposta envolve a participação do terceiro modo como dominante.

Lemaitre et al. (2007) aperfeiçoaram o modelo analítico de dinâmica de filetes d'água desenvolvido por Lemaitre et al. (2006). O modelo atual também se baseia na teoria da lubrificação, descreve a evolução de um filete sujeito à gravidade, tensão superficial e vento,

além de considerar o movimento do cilindro. Realizaram também simulações numéricas e ensaios experimentais em túnel de vento que levaram os autores a algumas conclusões, especialmente a de que o aparecimento dos filetes é responsável pela instabilidade. As posições em que os filetes aparecem dependem da velocidade do vento, para velocidades altas os filetes são eliminados da superfície do cabo. Os dois filetes formados posicionam-se próximos ao ponto de separação do escoamento.

Li e Gu (2007) desenvolveram modelo teórico de vibração induzida por chuva e vento de cabo estaiado contínuo tri-dimensional com filete superior apenas que oscila segundo lei senoidal, portanto, oscilação forçada do filete. É possível obter a resposta para todos os modos de vibração, efeito do perfil de velocidade ao longo da altura e distribuição do filete ao longo do cabo. Compararam o efeito de galope com as vibrações induzidas por chuva e vento. As características desta última foram investigadas usando o presente modelo, incluindo efeitos da velocidade do vento, frequência do filete, distribuição do filete ao longo do eixo do cabo, perfil de velocidade média do vento e amortecimento do cabo. Mostraram que as vibrações foram do tipo velocidade restrita e amplitude restrita.

Zuo et al. (2007) utilizaram medições em protótipo para avaliar o desempenho de cabos transversais (cross-tie) na mitigação de vibrações em cabos de pontes estaiadas submetidos à ação combinada de chuva e vento. De acordo com os dados obtidos da medição, concluiu-se que os cabos transversais não são efetivos quando se trata de vibrações laterais. Não recomenda-se que os cabos transversais seja projetados com espaçamento constante.

Robertson e Taylor (2007) apresentaram um método numérico que permite investigações detalhadas das vibrações induzidas por chuva e vento. O método está em desenvolvimento no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Strathclyde. Neste estudo, os autores examinaram o efeito da distribuição de pressões ao redor do cabo sob a presença dos filetes inferior e superior. A implementação numérica utilizará o método do vórtice discreto e a teoria da lubrificação.

Xu et al. (2007a) apresentaram método de estimativa da probabilidade de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento em cabos de pontes estaiadas. O método se baseia na análise estatística da velocidade e direção do vento e da intensidade de chuva. A junção da função densidade de probabilidade da velocidade e direção do vento com a função densidade de probabilidade da intensidade de intensidade de chuva foram obtidas primeiramente para o local da ponte através de análise estatística. Esta análise torna-se importante para auxiliar profissionais na determinação da necessidade de programar sistemas mitigadores de vibrações.

Xu et al. (2007b) considerando a dinâmica de cabos, desenvolveram uma nova configuração de modelo para ensaio que pode simular forças nos modelos para ensaios de vibrações induzidas por vento e vibrações induzidas por chuva e vento. Realizaram três ensaios distintos: efeito dos vórtices no modelo sem chuva; efeito do galope para o modelo com filete artificial e ensaio do modelo com água escorrendo ao longo do cabo.

Liu et al. (2007) realizaram simulação por Large-eddy (LES/Large-Eddy Simulation) do escoamento em volta de um cilindro com filete d'água superior. Analisaram as forças de arrasto e de sustentação. Notaram que o filete a certa localização sobre a superfície do cilindro provoca o aparecimento de pequenos vórtices de alta intensidade atrás do filete, sendo esta, suficiente para suprimir o desprendimento de vórtices no cilindro. Por outro lado, outras posições do filete podem realçar o desprendimento de vórtices.

Li et al. (2007a) desenvolveram modelo teórico de 3 GDL assumindo que a interação entre forças do filete superior e superfície do cabo incluem força de amortecimento de Coulomb e força de amortecimento linear ao contrário dos demais modelos matemáticos apresentados neste trabalho. O modelo utiliza coeficientes aerodinâmicos do cabo e do filete obtidos a partir de medições em cabo inclinado de 30° e ângulo de ataque de 35° . Para encontrar as soluções das equações de movimento do cabo e do filete foi utilizado o método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Li et al. (2007b) obtiveram os coeficientes aerodinâmicos a partir de um modelo de cabo espacial testado em escoamento tri-dimensional. Os resultados dos ensaios mostraram diferenças entre o método utilizado neste trabalho e o obtido a partir da decomposição trigonométrica (modelos horizontais, sem ângulos de ataque e escoamento bidimensional) como utilizados na maioria dos modelos analíticos até então. É proposto um modelo analítico baseado no princípio da conservação de energia. Li et al. (2007) afirmaram ser necessário a adoção de coeficientes aerodinâmicos medidos diretamente do modelo espacial de cabo em escoamento tri-dimensional.

Gu (2007) realizou ensaios em túnel de vento para medir pressões e forças aerodinâmicas em cilindro com certo ângulo de ataque e de inclinação com filetes artificiais, superior e inferior. Os resultados foram utilizados para comparação com resultados obtidos por análise numérica. Um modelo teórico 2D é estabelecido com a presença de um filete apenas.

As razões das vibrações induzidas por chuva e vento não puderam ainda ser determinada satisfatoriamente.

1.3 OBJETIVOS

Pretende-se neste trabalho investigar as características aerodinâmicas de cabos de pontes estaiadas submetidos à ação combinada de chuva e vento. Para isto serão medidas as pressões externas instantâneas em torno de uma seção transversal de um modelo seccional reduzido de um cabo típico de uma ponte estaiada com e sem a presença de filetes d'água artificiais. A partir dos sinais de pressões externas será possível fazer as seguintes análises:

- Determinar a influência da localização dos filetes sobre os coeficientes de arrasto e de sustentação;
- Determinar a influência da localização dos filetes sobre a posição e intensidade do desprendimento de vórtices em modelos com filetes artificiais;
- Verificar se a presença dos filetes é responsável pela ocorrência do vórtice axial em cabos inclinados;
- Determinar a influência do tipo de escoamento sobre o modelo com a presença de filetes.

Os ensaios experimentais são realizados no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Os resultados apresentados servem como subsídio para o aprimoramento do projeto de pontes estaiadas.

2 AERODINÂMICA DE CABOS ESTAIADOS

2.1 AÇÃO DO VENTO

2.1.1 Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão são coeficientes adimensionais obtidos da razão entre a pressão efetiva, Δp , provocada pelo vento em uma pequena área sobre a superfície de um corpo e a pressão dinâmica do vento, q , Equação (2.1).

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} \quad (2.1)$$

Onde, c_p é o coeficiente de pressão, $q = \frac{1}{2} \rho_{ar} V^2$ em $[\text{N}/\text{m}^2]$ é a pressão dinâmica do vento correspondente à velocidade média de referência medida no centro da transversal do modelo de cabo, V é a velocidade média do vento ao nível da seção do cabo $[\text{m}/\text{s}]$ e ρ_{ar} é a massa específica do ar em $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Estes coeficientes variam com a inclinação do cabo, ângulo de ataque, velocidade do vento, regime de escoamento e forma da seção transversal do cabo. A variação da seção transversal dos cabos de pontes estaiadas pode ocorrer devido à formação dos filetes d'água. Detalhes sobre a influência dos filetes nos coeficientes de pressão serão visto na seção 3.

2.1.2 Coeficientes de força e de momento

Estes coeficientes também são adimensionais e dependem da forma da seção transversal e do ângulo de incidência do escoamento, β . Além disso, dependem também do regime de escoamento e para seções circulares variam significativamente com número de Reynolds, Re . Os coeficientes são:

- a) Coeficiente de arrasto: coeficiente relacionado à força de arrasto que consiste na componente da força global na direção do escoamento;

$$C_a = \frac{F_a}{qD} \quad (2.2)$$

- b) Coeficiente de sustentação: coeficiente relacionado à força de sustentação que consiste na componente da força global na direção transversal ao escoamento;

$$C_s = \frac{F_s}{qD} \quad (2.3)$$

- c) Coeficiente de torção: coeficiente relacionado à torção que será diferente de zero se as forças de arrasto e sustentação apresentarem excentricidades em relação ao eixo de torção da estrutura.

$$C_t = \frac{M_t}{qD^2} \quad (2.4)$$

Onde, F_a é a força de arrasto média por unidade de comprimento [N/m], F_s é a força de sustentação média por unidade de comprimento [N/m], M_t é o momento torçor médio por unidade de comprimento [N.m/m], D é o diâmetro do cabo [m].

2.1.3 Número de Reynolds, Re

É uma relação entre as forças de inércia e as forças devido à viscosidade do fluido.

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.5)$$

Onde, ν é a viscosidade cinemática do ar.

2.1.4 Número de Strouhal, St

Pode-se prever a ocorrência de efeitos dinâmicos através do número de Strouhal. Depende em geral da geometria da estrutura e do número de Reynolds.

$$S_t = \frac{f_s D}{V} \quad (2.6)$$

Onde, f_s é a frequência de desprendimento de um par de vórtices.

2.1.5 Número de Froude, Fr

O número de Froude é um número adimensional que relaciona as forças de inércia e gravitacionais.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (2.7)$$

Onde, D é uma dimensão característica do corpo imerso e g é a aceleração da gravidade.

2.1.6 Número de Scruton, Sc

O número de Scruton determina a medida da propensão que a estrutura terá em sofrer fortes vibrações ou fenômenos de instabilidade.

$$Sc = \frac{4\pi m \zeta}{\rho_{ar} D^2} \quad (2.8)$$

Onde, m é a massa por unidade de comprimento e ζ é a razão de amortecimento crítico.

2.1.7 Turbulência

A turbulência pode ser identificada como flutuações irregulares da velocidade do vento. A turbulência exerce grande influência sobre o escoamento em torno de cilindros, principalmente no que diz respeito ao desprendimento de vórtices ou às transições dos regimes. A turbulência caracteriza-se, em geral, pelos parâmetros intensidade longitudinal da turbulência, I_1 , e escala longitudinal da turbulência, L_1 , que representa o comprimento na direção do vento incidente, dos maiores turbilhões presentes no escoamento (Ribeiro, 1989).

O conhecimento das propriedades da turbulência é necessário tanto para o cálculo da resposta dinâmica das estruturas às rajadas de vento, como para a simulação correta do vento em túneis de vento. O estudo destas propriedades é feito através da teoria estatística da turbulência (Blessmann, 2005), determinando-se:

- a) distribuição de probabilidade de cada uma das três componentes de flutuações;
- b) intensidade de turbulência de cada uma destas componentes. Trata-se de uma medida adimensional da energia cinética contida na respectiva componente de flutuações, dada pela relação entre a parcela flutuante e a parcela média de velocidade;
- c) correlações espaciais das flutuações em pontos distintos. Elas permitem determinar a macro escala da turbulência;
- d) espectro de potência (densidade espectral da variância) das flutuações. Indica a distribuição, em frequência, da energia cinética contida nestas flutuações;
- e) espectro cruzado, que estuda flutuações em dois pontos.

2.1.8 escoamento bidimensional

O escoamento bidimensional distingue-se pela condição de que todas as propriedades e características do escoamento são funções de suas coordenadas cartesianas, x e y , e do tempo, sem depender da direção z em dado instante. Todos os planos normais à direção z terão, em dado instante, a mesma configuração de linhas de correntes (Shames, 1973). Diz-se que o escoamento é bidimensional quando se tem estruturas de comprimento idealmente infinito, ou seja, uma das dimensões é muito maior que as outras.

Para se garantir escoamento bidimensional em cilindros curtos (ex.: modelo seccional) em ensaios em túnel de vento, é bastante comum utilizar placas terminais. As placas terminais acentuam a bidimensionalidade do escoamento. As flutuações de pressão ficam melhor correlacionadas e apresentam um espectro de potência com um pico mais pronunciado e uma largura de faixa mais estreita. As placas terminais causam o aumento da frequência do desprendimento de vórtices (portanto, St) em todos os regimes. E, a intensidade dos vórtices é consideravelmente aumentada. A uniformidade e simetria do escoamento também melhoram com o uso de placas terminais (Ribeiro, 1989).

Wlezien e Way (1979) apud Ribeiro (1989) recomendam para o uso de placa terminais:

- a) a barlavento do cilindro, as placas devem ser levemente suavizadas para evitar separação do escoamento;
- b) a barlavento, as placas não devem estender-se mais que uma distância de $D/4$ à frente do cilindro, com espessura de $D/8$;
- c) a sotavento, as placas devem estender-se o suficiente para impedir a comunicação da esteira do cilindro com as paredes do túnel de vento.

2.2 RESPOSTAS DAS ESTRUTURAS DE PONTES AO VENTO

Estruturas de pontes devem ser projetadas tanto à ação estática quanto dinâmica do vento. Os diversos fenômenos induzidos pelo vento possibilitam a ocorrência de vários tipos de falhas em certa estrutura para diferentes velocidades do vento, sendo que alguns destes efeitos podem ocorrer simultaneamente (Limas, 2003). Os efeitos estáticos e dinâmicos podem ser classificados de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Efeito do vento nas estruturas.

Estático	Efeito dos valores médios dos esforços do vento	
	Instabilidade Estática	Divergência torsional
		Flambagem lateral
Dinâmico	Instabilidade Dinâmica	Galope
		Drapejamento
		Excitação por vórtices
Resposta devido à turbulência (rajadas, martelamento)		

2.2.1 Efeitos estáticos

2.2.1.1 Efeitos dos valores médios dos esforços do vento

Estes efeitos são considerados como sendo uma ação estática equivalente à ação real, dinâmica do vento. A ação estática do vento é determinada a partir dos chamados coeficientes aerodinâmicos

2.2.1.2 Divergência torsional

Sobre o efeito do vento, a estrutura estará sujeita à ação de forças de arrasto, sustentação e de momento torçor. Quando a velocidade aumenta, o momento torçor em particular também aumenta (Simiu e Scanlan, 1996). Em cilindros de seção circular, este efeito não ocorre, pois, a resultante das forças de arrasto e de sustentação passam pelo centro elástico da seção e em consequência, o momento torçor na seção será nulo. Este fenômeno é bastante estudado na análise de tabuleiros de pontes.

2.2.2 Efeitos dinâmicos

Os valores dos efeitos dinâmicos e dos efeitos estáticos normalmente utilizados são obtidos através de medidas em túnel de vento.

As origens das forças dinâmicas podem normalmente ser remetidas a um ou vários dos seguintes fenômenos em associação:

2.2.2.1 Galope

O galope ocorre tipicamente em estruturas leves de baixo amortecimento estrutural com formas de seção transversal especial. Estas estruturas exibem grandes amplitudes na direção transversal ao vento e frequências muito mais baixas que as observadas por despreendimento de vórtices para a mesma seção (Blessmann, 2005). O fenômeno foi sugerido por Den Hartog no estudo de seções de linhas de transmissão cobertas de gelo.

No galope as amplitudes das vibrações aumentam com o aumento da velocidade. Durante as vibrações, o ângulo de incidência varia continuamente em relação ao corpo. Neste caso, a oscilação pode aumentar se for desenvolvida uma força na direção e sentido do movimento do cabo devido à retirada de energia do vento, a qual manterá a oscilação.

O galope caracteriza-se principalmente pela intensidade violenta de vibração, súbito aparecimento quando a velocidade atinge a velocidade de disparo e aumento da amplitude de vibração com a velocidade do vento.

2.2.2.2 Excitação por vórtices

Em corpos de forma não aerodinâmica este efeito aparece quando o corpo é imerso em escoamento. Aparece o desprendimento de pares de vórtices a partir de certo número de Reynolds, Figura 2.1. Conhecidos como vórtices de Kármán, este desprendimento origina forças transversais ao sentido do escoamento e conseqüentemente movimentos nesta direção. As forças na direção do vento são pequenas em comparação às forças na direção transversal.

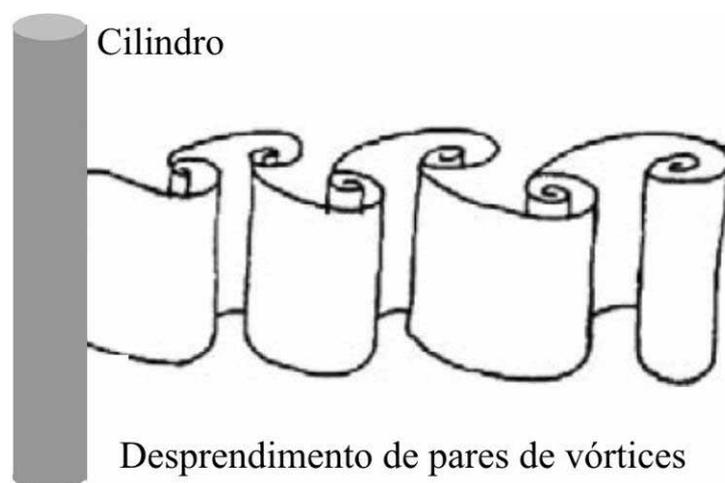


Figura 2.1 – Desprendimento de vórtices numa seção de um cilindro submetido à ação do vento.

2.2.2.3 Martelamento

O martelamento (em inglês, buffeting) é definido como um carregamento variável de uma estrutura pelas flutuações de velocidade do escoamento incidente (Simiu e Scanlan, 1996).

Uma estrutura situada na esteira de outra semelhante está sujeita aos turbilhões gerados por esta estrutura. Este efeito pode atingir grandes valores quando a frequência de excitação pelo martelamento coincidir com a frequência natural da estrutura a sotavento (martelamento ressonante). Além da frequência, também influirá a intensidade de turbulência do vento incidente. Pode-se citar o fenômeno que ocorre em cabos de linhas de transmissão agrupados em dois ou mais, dispostos paralelamente (Blessmann, 2005).

2.3 AERODINÂMICA DE CILINDROS CIRCULARES

Analisaremos as características aerodinâmicas de cabos através da analogia com a aerodinâmica de cilindros circulares com eixo perpendicular à direção do vento.

Quando um fluido escoar sobre um corpo imerso, forma-se uma fina camada próxima à superfície do mesmo, devido à influência da viscosidade. Prandtl, em 1904, chamou esta camada de camada limite (Blessmann, 1990).

A Figura 2.2 mostra as características do escoamento sobre um cilindro estacionário definindo a camada limite, ponto de estagnação, ponto de separação e esteira.

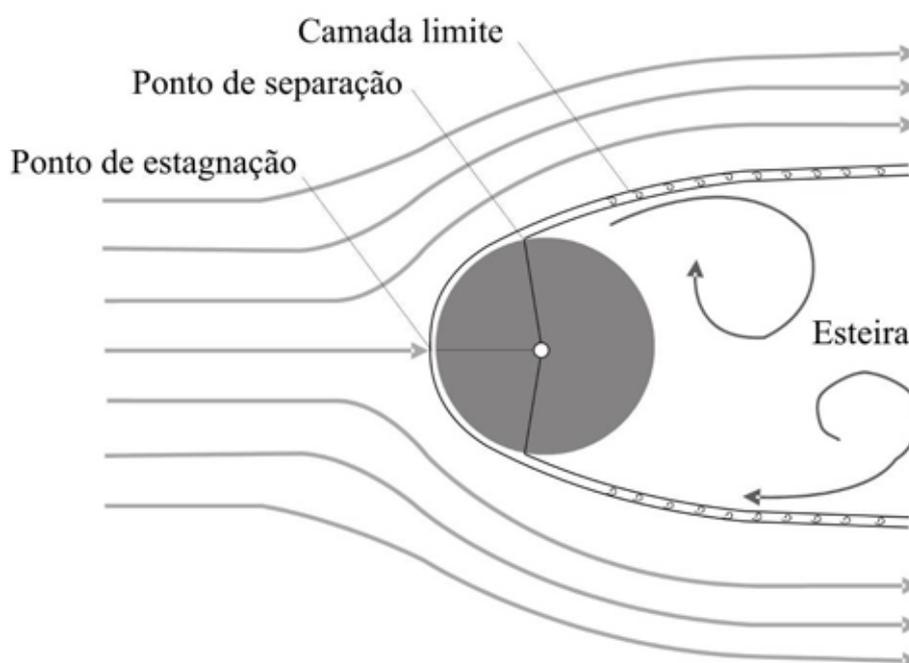


Figura 2.2 – Escoamento em torno de um cilindro circular.

Na região da esteira são geradas pressões negativas parcialmente responsáveis pelas forças de arrasto no cilindro. Já as forças transversais ao escoamento são provocadas pelo desprendimento de um par de vórtices que geram forças periódicas laterais de sinais alternados e de mesma frequência de desprendimento dos vórtices (Blessmann, 2005). As forças na direção do vento são pequenas em comparação com as forças na direção transversal do vento.

Devido ao escoamento, um cilindro apresentará certa distribuição de pressões ao longo de sua circunferência. Roshko (1961), Flachsbart (1929) e Fage e Falkner (1931) apresentaram distribuição de pressões externas em volta de cilindro no regime ultracrítico, crítico e subcrítico, respectivamente (Núñez, 2001). A Figura 2.3 ilustra essas distribuições.

O primeiro fato que chamou a atenção dos pesquisadores para o estudo de cilindros circulares foi a queda brusca no coeficiente de arrasto que se verifica quando se atinge um determinado número de Reynolds. Observa-se que as características físicas do escoamento mudam continuamente com o número de Reynolds. Para regimes acima de $Re=10^4$, é possível distinguir alguns intervalos, onde as características do escoamento podem ser consideradas constantes (Ribeiro, 1989). A curva da Figura 2.4 ilustra a dependência que o coeficiente de arrasto mantém com o número de Reynolds e refere-se a um cilindro circular com superfície lisa, em escoamento suave e uniforme, etc.

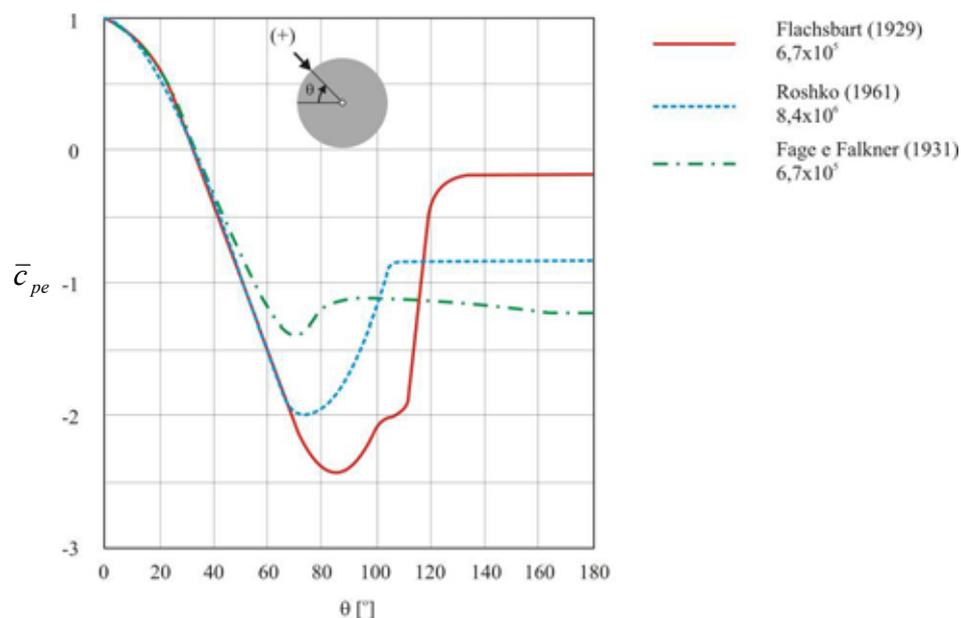
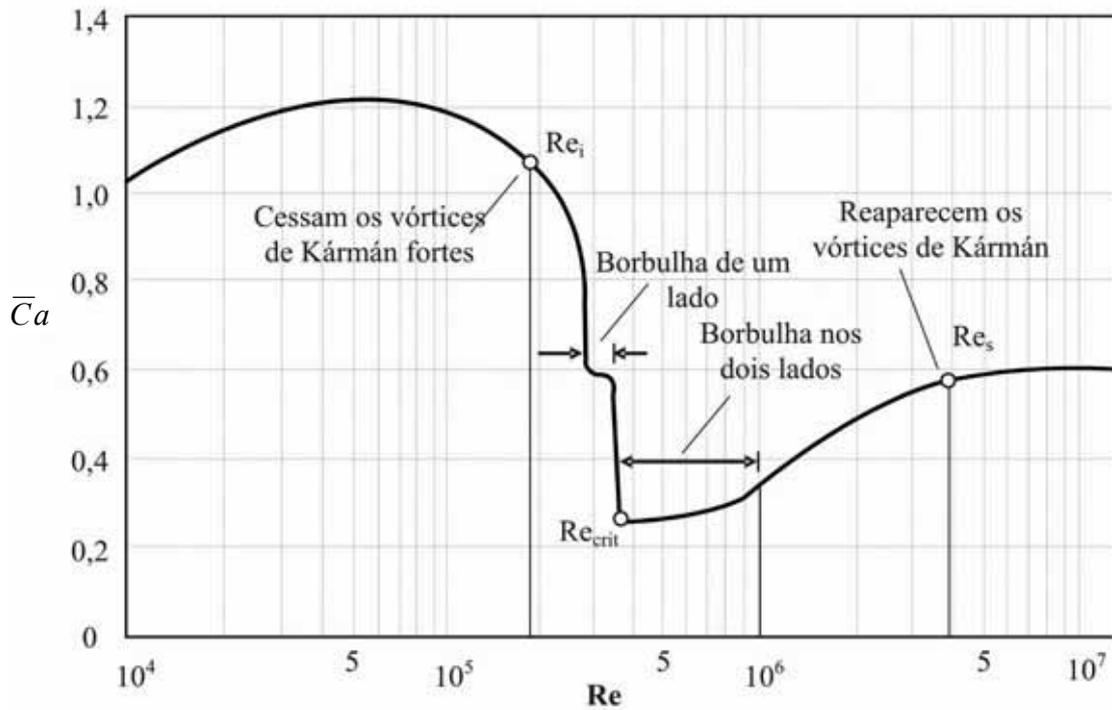


Figura 2.3 – Distribuição circunferencial de pressões (Roshko, 1961 apud Núñez, 2001).

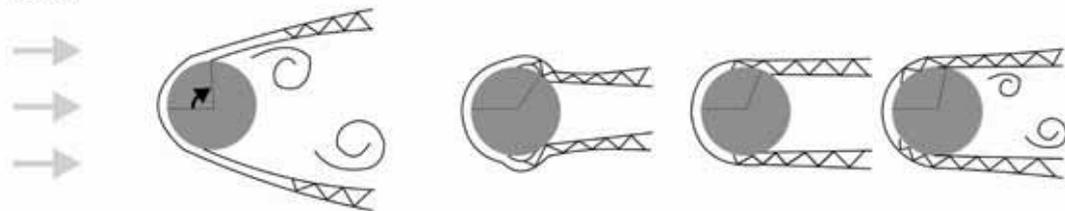
É importante frisar que a curva da Figura 2.4 varia sua forma dependendo de vários parâmetros, como por exemplo, rugosidade da superfície do cilindro e intensidade de turbulência do escoamento incidente. Estudo detalhado sobre a influência da turbulência sobre a curva do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds pode ser visto em Ribeiro (1989).



Regimes:

subcrítico	crítico	supercrítico	ultracrítico
------------	---------	--------------	--------------

Vento



θ_s	75°	140°	120°	105°
Ca	1,2	0,25	0,4	0,6
St	0,19	0,45	0,23	0,28

Figura 2.4 – Definição dos regimes de escoamento e parâmetros característicos para cilindros circulares bidimensionais (Ribeiro, 1989).

2.4 AERODINÂMICA DE CILINDROS CIRCULARES INCLINADOS

Diferentemente de cilindros perpendiculares ao escoamento, em cilindros inclinados em relação ao vento aparecerão efeitos instabilizantes adicionais, como por exemplo, escoamento axial, desprendimento de vórtices de baixa frequência e vibrações induzidas por chuva e vento. Todos estes efeitos serão apresentados a seguir. Será dada ênfase às vibrações induzidas por chuva e vento num capítulo especial por ser este o assunto em estudo neste trabalho.

2.4.1 Características geométricas

A direção da vibração de cilindros inclinados difere dos cilindros horizontais. O cilindro horizontal pode vibrar na direção normal ao plano horizontal, que contém o cilindro e o ponto de estagnação. Por outro lado, o cilindro inclinado vibra normal ao plano inclinado, que contém o cilindro e o ponto de estagnação. Então, o acoplamento entre oscilações com modos vertical e horizontal é uma das propriedades aerodinâmicas essenciais de cabos estaiados (Matsumoto, 1990).

A posição do cabo em relação ao vento é definida aqui conforme Figura 2.5a. Os ângulos de inclinação (ângulo que o cabo forma com o plano horizontal) e de incidência do vento sobre o cabo (definido pelo ângulo formado entre a projeção do cabo sobre o plano horizontal e o plano vertical perpendicular à direção do vento) são definidos pelas letras gregas α e β , respectivamente.

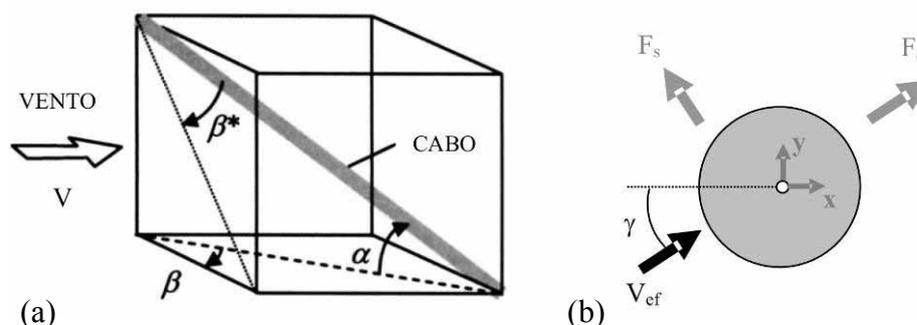


Figura 2.5 – (a) Definição da inclinação do cabo, do ângulo de incidência do vento e do ângulo equivalente de incidência do vento (b) referência para ângulo de incidência e forças aerodinâmicas (Phelan et al., 2006).

β^* é o ângulo equivalente de incidência do vento, formado entre o cabo e a projeção do cabo no plano perpendicular à direção do vento. O ângulo de incidência do vento, β , é igual a 0° quando o vento é perpendicular ao eixo longitudinal do cabo.

Matsumoto et al. (1995) relacionaram geometricamente o ângulo de incidência equivalente do vento, β^* , o ângulo de incidência do vento, β , e o ângulo de inclinação do cabo, α , como mostra a Equação (2.1) Observe que para $\alpha = 0^\circ$, $\beta = \beta^*$.

$$\beta^* = \arcsen(\sin \beta \cos \alpha) \quad (2.9)$$

O ângulo de ataque no plano normal ao eixo do cabo, γ , é mostrado na Figura 2.5b e representado pela Equação (2.10) (Xu e Wang; Wang e Xu; Wilde e Witkowski; 2003). Observe que para $\beta = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$ e para $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 90^\circ$.

$$\gamma = \arcsen\left(\frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}}\right) \quad (2.10)$$

O cabo sobre a ação do vento com velocidade V , tem uma inclinação α , e um ângulo de incidência β . A velocidade do vento efetiva, V_{ef} , no plano normal ao eixo do cabo é definida na Figura 2.6 e Equação (2.11).

$$V_{ef} = V \sqrt{\cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} \quad (2.11)$$

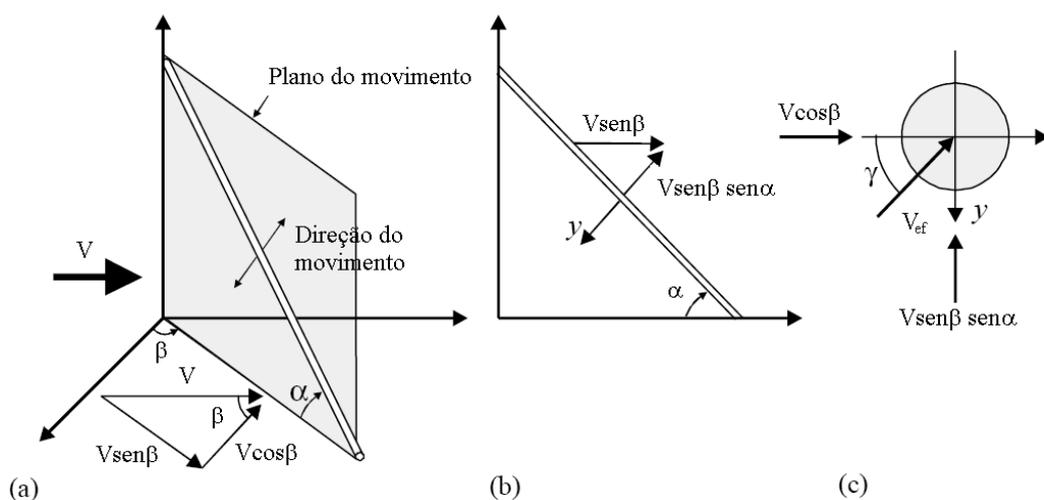


Figura 2.6– (a-b) Decomposição das componentes da velocidade do vento no plano vertical que contém o cabo (c) Definição da velocidade efetiva do vento (Wilde e Witkowski, 2003).

2.4.2 Escoamento axial

Shiragashi et al. (1986) *apud* Matsumoto et al. (1990) apontaram a existência de um escoamento axial intenso próximo da esteira ao longo do eixo de um cilindro horizontal com vento incidindo obliquamente ao eixo longitudinal. O escoamento axial provoca distúrbio no desprendimento regular de vórtices de Kármán. A Figura 2.7 mostra o escoamento em volta de um cilindro com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 45^\circ$.

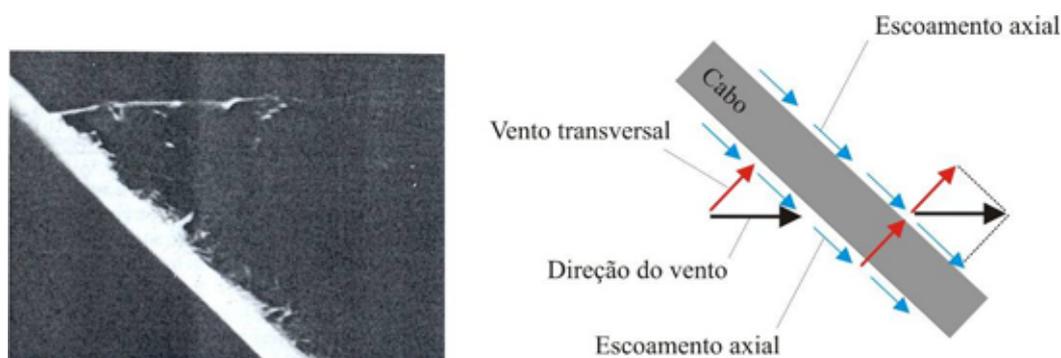


Figura 2.7 – Escoamento secundário axial a sotavento do cabo inclinado (Matsumoto, 1990).

Para cilindros circulares inclinados, pode-se dizer que o escoamento axial próximo à esteira tem característica similar a uma placa de separação submersa na esteira. Em outras palavras, pela interrupção da interação do fluido entre as duas camadas limite separadas, a característica do escoamento axial terá aerodinamicamente o mesmo efeito de uma cortina de ar em comparação com uma placa de separação (Matsumoto, 1990).

2.4.3 Desprendimento de vórtices de alta velocidade reduzida

O desprendimento de vórtices de alta velocidade reduzida também é mencionado na literatura como vórtice axial, desprendimento de vórtices de longo período ou desprendimento de vórtices de frequência mais baixa que o desprendimento de vórtices de Kármán. Conforme a própria denominação, o desprendimento ocorre a altos valores de velocidades reduzidas (ex.: $V_r = 20, 40, 60, 80$, etc.) (Matsumoto et al., 2001).

Matsumoto et al. (2001) mostrou em cilindro posicionado à $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 45^\circ$ através de análise wavelet das forças de sustentação, que a componente de baixa frequência do vórtice de

Kármán é detectada e corresponde a velocidade reduzida de aproximadamente 40 (Figura 2.8).

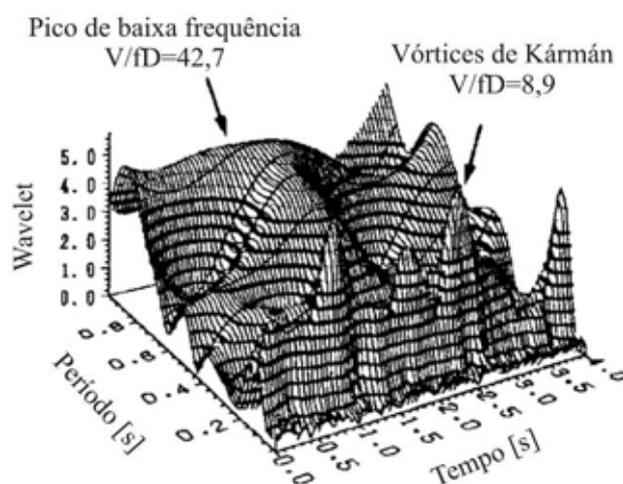


Figura 2.8 – Coeficiente de força de sustentação de um cabo estacionário ($\alpha=0^\circ$ e $\beta=45^\circ$) (Matsumoto et al., 2001).

Matsumoto et al. (2001) ainda confirmou a existência do vórtice axial através de ensaio utilizando filete de fumaça para visualizar a formação do vórtice na esteira do cabo conforme mostra a Figura 2.9.

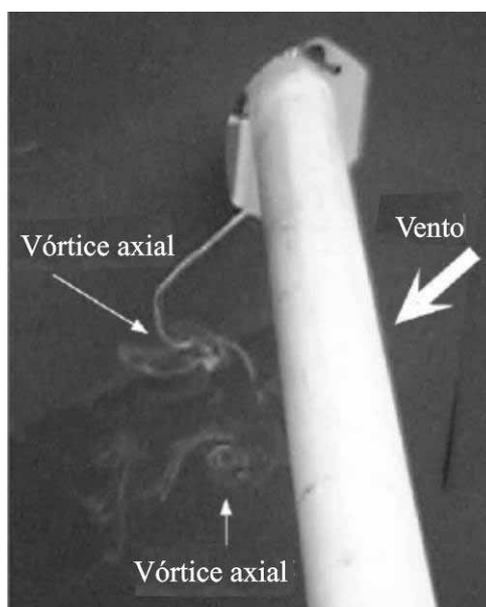


Figura 2.9 – Visualização de vórtice axial na esteira de cabo inclinado ($\alpha=0^\circ$ e $\beta=45^\circ$, $V=0,5\text{m/s}$, escoamento suave) (Matsumoto et al., 2001).

3 VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR CHUVA E VENTO EM CABOS DE PONTES ESTAIADAS

Vibrações induzidas por chuva e vento constituem-se em um novo tipo de fenômeno de instabilidade causado pelo efeito combinado da chuva e vento (Hikami e Shiraishi, 1988; Matsumoto et al., 1992; Flamand, 1995). Estas vibrações, que são predominantemente transversais à direção do vento, foram observadas apenas sob condições de chuva leve e baixa velocidade do vento ocorrendo simultaneamente. As oscilações são provocadas principalmente pela formação de filetes d'água ao longo da superfície dos cabos na direção axial, os quais, devido ao seu movimento, modificam continuamente a distribuição de pressões em torno dos cabos.

Devido à alta flexibilidade, massa e amortecimento baixos, o sistema de cabos de pontes estaiadas pode estar sujeito a grandes movimentos dinâmicos induzidos pela ação combinada de chuva e vento. As grandes amplitudes atingidas reduzem a vida útil dos cabos e de suas conexões e em consequência causam danos aos dutos de proteção contra corrosão. Além disso, as oscilações excessivas podem provocar choques entre cabos adjacentes e causar situações de desconforto ao usuário. Estudos mostram que diversas pontes estaiadas construídas recentemente apresentaram ou ainda apresentam ocorrências de vibrações nos cabos devido a este efeito.

Matsumoto et al., (1992) reuniram as máximas amplitudes duplas (de pico a pico) de algumas pontes em que foram observadas vibrações induzidas por chuva e vento (Tabela 3.1). A maior amplitude foi observada na Ponte Faroe.

Tabela 3.1 - Máximas amplitudes duplas de vibrações induzidas por chuva e vento em pontes estaiadas (Matsumoto, Shiraishi e Shirato, 1992)

Ponte	Amplitude [cm]
Brotonne	60
Koehlbrant	100
Faroe	200
Meikoh West	26
Aratsu	60
Tenpohzan	195

Hikami e Shiraishi (1988), Gu e Du (2005) e Phelan et al. (2006) mostraram que as grandes oscilações só ocorriam na presença de chuva e vento. O diagrama de aceleração na Figura 3.1 mostra resultados de ensaios realizados por Phelan et al. (2006) em um cabo da Ponte Veteran. Nota-se que o cabo permanece em estado não oscilatório até o início da precipitação ($t=200s$), as oscilações atingem acelerações acima de $5g$ e o cabo retorna ao estado não oscilatório quando a chuva cessa ($t \approx 1720$).

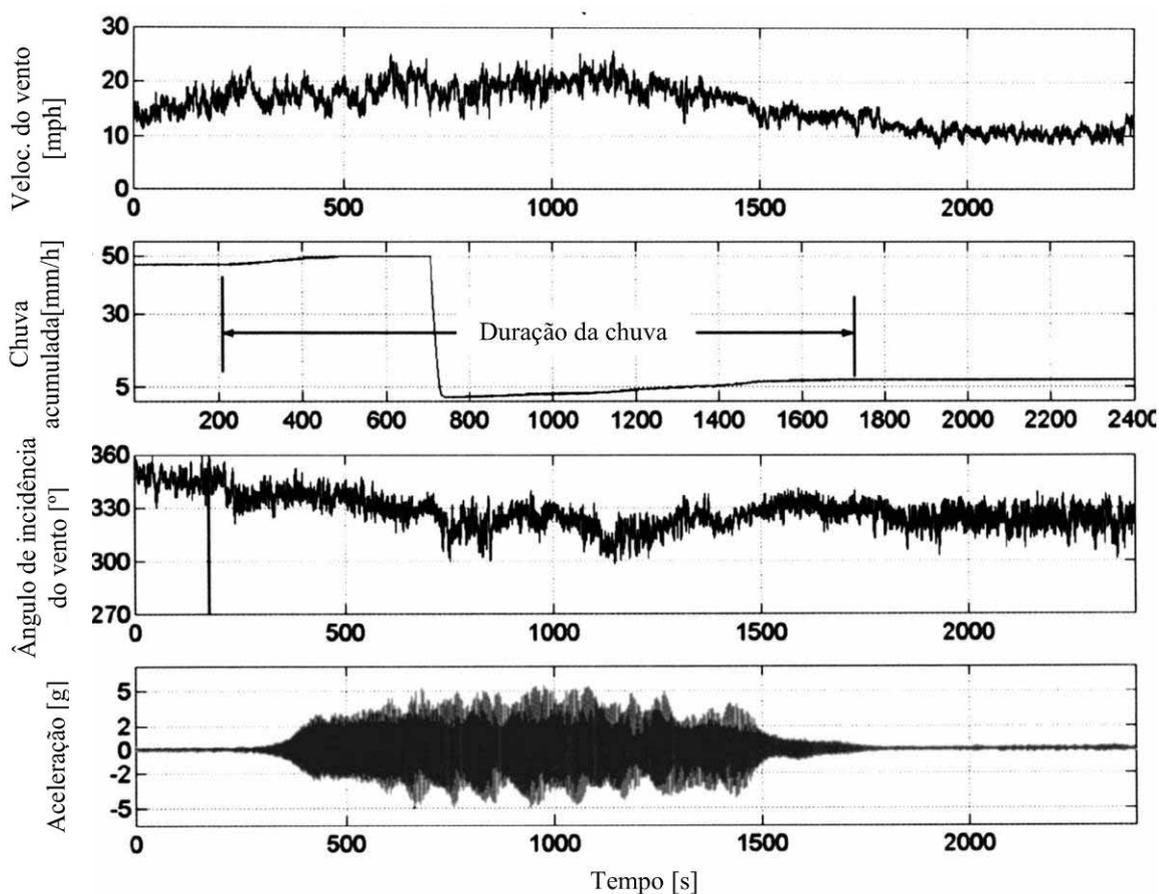


Figura 3.1 – Evento de vibração (perpendicular à direção do vento) de um cabo estaiado da Ponte Veteran (Phelan et al., 2006).

3.1 FORMAÇÃO DOS FILETES

Na presença de vento e chuva simultaneamente ocorre a formação de um ou dois filetes d'água sobre a superfície dos cabos. Cada um dos filetes é formado por um filamento de água da chuva resultante da precipitação sobre os cabos (Figura 3.2). São denominados aqui por filete inferior (Figura 3.2a) e filete superior (Figura 3.2b).

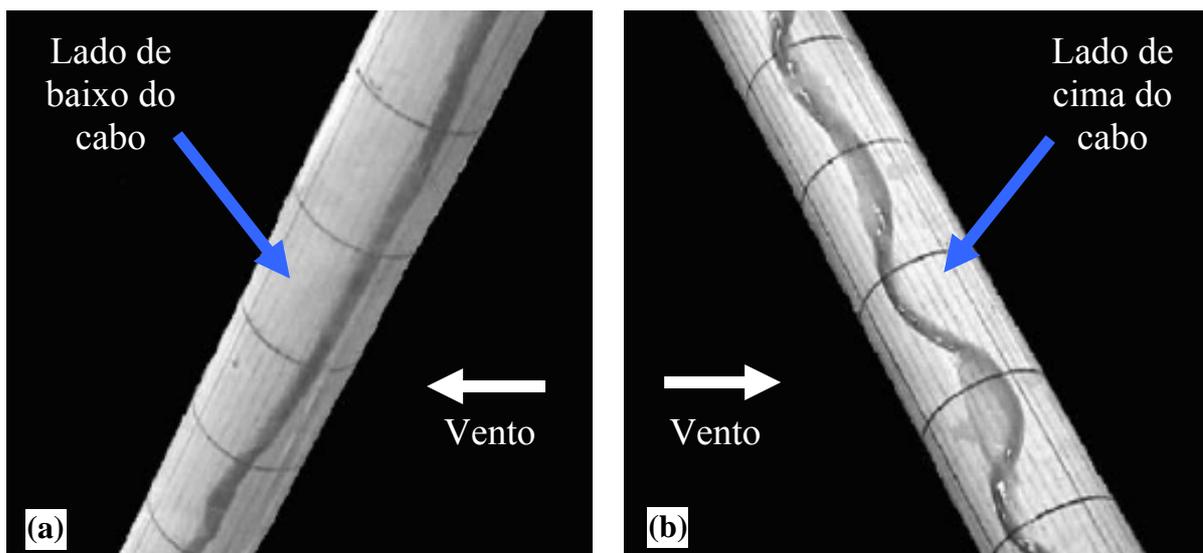


Figura 3.2 – Filetes d’água vistos no sentido longitudinal (a) filete inferior (a sotavento) e (b) filete superior (a barlavento) (Wang et al., 2005).

Geralmente, os dois filetes são formados, sendo o superior a barlavento e o inferior a sotavento. A formação do filete superior pode seguir a forma de uma onda senoidal (Wang et al., 2005). A posição dos filetes d’água superior e inferior são definidos neste trabalho por θ_1 e θ_2 , respectivamente (Figura 3.3).

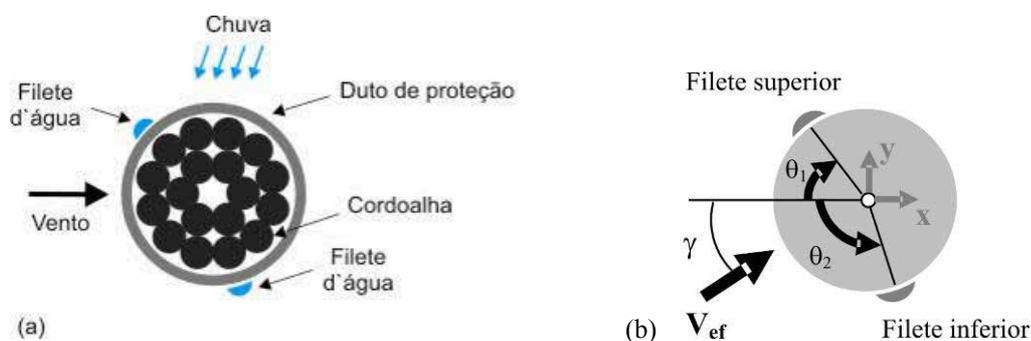


Figura 3.3 – (a) Representação da posição dos filetes d’água numa seção típica de cabos de ponte estaiada e (b) definição da posição dos filetes superior e inferior.

Hikami e Shiraishi, (1988) realizaram ensaios de campo em um cabo inclinado com a presença de chuva e vento. A Figura 3.4a ilustra o processo de formação do filete superior no cabo em três instantes, A, B e C. Figura 3.4b apresenta resposta do cabo inclinado com as velocidades e amplitudes correspondentes a cada um dos instantes.

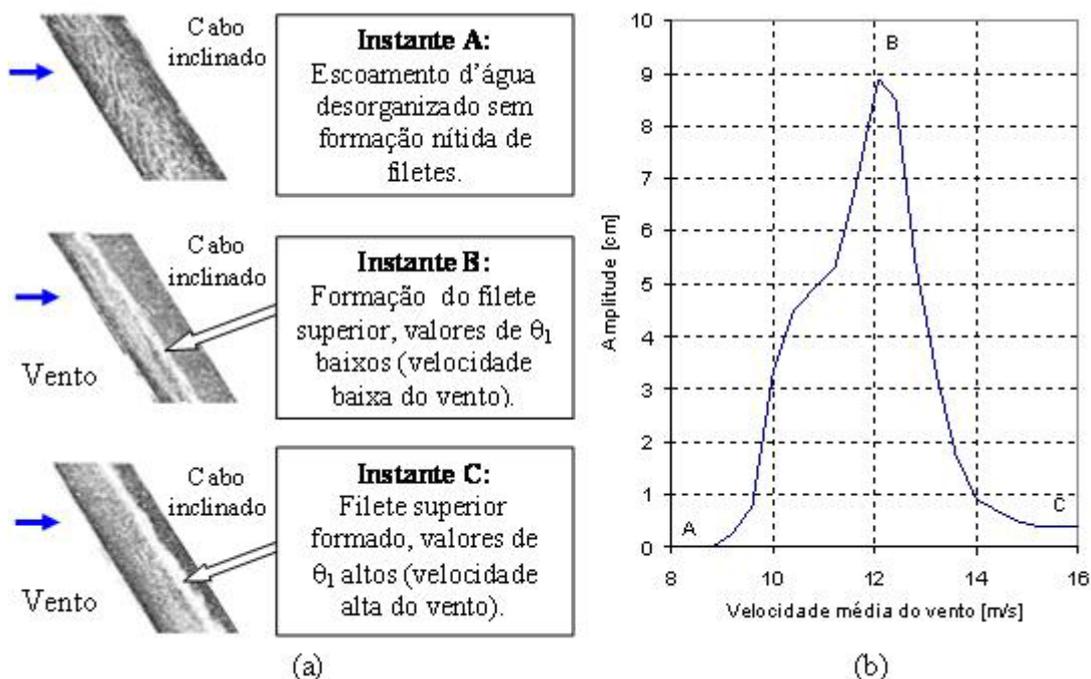


Figura 3.4 – (a) Processo de formação do filete superior em um cabo inclinado em três instantes, A, B e C; (b) resposta do cabo inclinado com velocidades e amplitudes correspondentes a cada um dos instantes. ($\alpha=\beta=45^\circ$) (Hikami e Shiraishi, 1988).

Quando a velocidade é mais baixa que a velocidade de disparo (instante A, na Figura 3.4a e $V \cong 9\text{m/s}$ na Figura 3.4b) as gotas d'água que caem sobre a superfície do cabo apresentam-se desorganizadas em torno do cabo sem formação perceptível do filete superior. No instante A, as gotas d'água podem deslocar-se para a face inferior do cabo dando início à formação do filete inferior. Para velocidades maiores que a velocidade de disparo, a força de arrasto agindo sobre o filete supera as forças de gravidade e atrito, deslocando-o desta forma para a parte mais alta da superfície, constituindo o filete superior. O filete continua deslocando-se para cima à medida que a velocidade do vento aumenta (instante B, na Figura 3.4a e $V \cong 12\text{m/s}$ na Figura 3.4b). À velocidade correspondente ao instante C, as vibrações cessam ($V \cong 16\text{m/s}$ na Figura 3.4b) (Hikami e Shiraishi, 1988). É provável que quando se atinja velocidades acima de 16m/s , o aumento da força de arrasto agindo sobre o filete superior faça com que o mesmo varta em direção a sotavento ou seja destacado pelas forças aerodinâmicas, cessando as vibrações. Phelan et al. (2006) menciona que a posição dos filetes depende do equilíbrio da força da gravidade, pressão do vento, e força de tensão entre superfície e água agindo sobre os filetes.

3.1.1 Influência do material da superfície do cabo

Matsumoto et al. (1990) mostrou que o material da superfície do cabo pode influenciar na formação dos filetes superior e inferior (Figura 3.5).

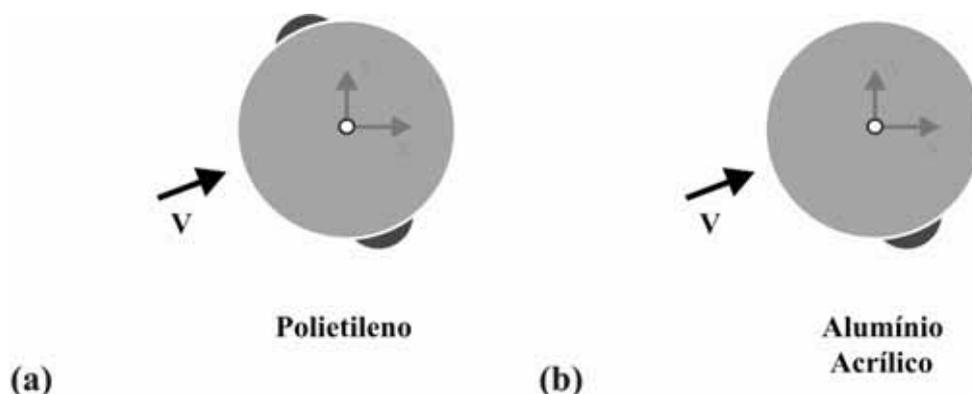


Figura 3.5 – Configuração dos filetes d'água, superior e inferior sobre a superfície de cabos inclinados (a) polietileno, (b) alumínio ou acrílico.

Observa-se que para a mesma posição do cabo e ângulo de ataque (Figura 3.5) não ocorre a formação do filete superior quando o material de superfície do cabo é alumínio ou acrílico, diferentemente quando se utiliza o polietileno.

3.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO NA POSIÇÃO DOS FILETES

O entendimento da influência da velocidade do vento nas vibrações tem papel importante, pois, pode-se determinar a que velocidade ocorre o início e o término das oscilações nos cabos. Bosdogianni e Olivari (1996) em ensaios com modelo seccional realizados em túnel de vento, mostraram que o início da formação dos filetes d'água ocorre à velocidade do vento de 7,5m/s à 16m/s e os filetes d'água tendem a deslocar-se para uma parte mais alta (Figura 3.6).

Observa-se na Figura 3.6 que a posição dos filetes d'água varia quase linear com a velocidade do vento. À medida que a velocidade do vento aumenta os filetes se deslocam a sotavento.

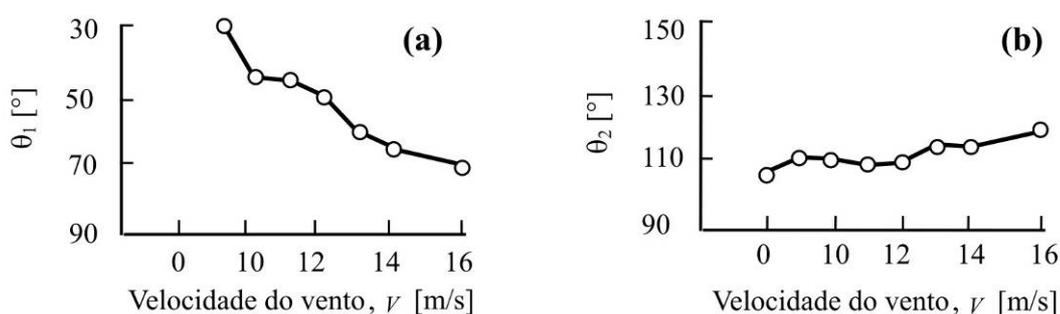


Figura 3.6 – Variação da posição dos filetes (a) superior e (b) inferior com a velocidade do vento (Hikami e Shiraishi, 1988).

Ni et al. (2007) realizaram medições em 3 dias chuvosos em um cabo da ponte estaiada Dongting. A partir da análise estatística dos dados das medições, construíram diagramas que representam as respostas RMS da aceleração do cabo (no plano e fora do plano do feixe de cabos) para intervalos de 1 minuto variando com velocidade média do vento. (Figura 3.7).

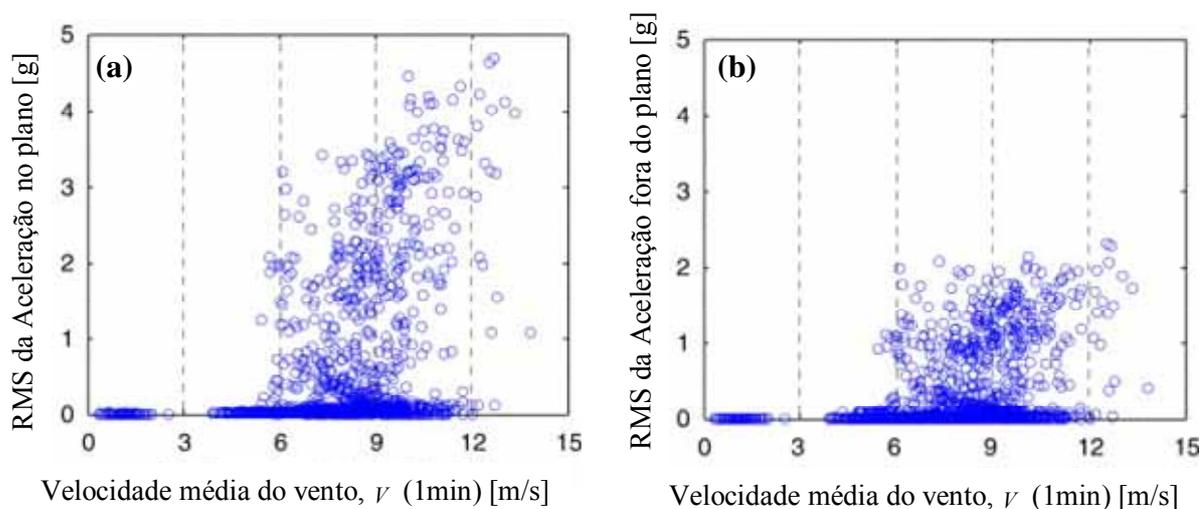


Figura 3.7 – RMS da Aceleração do cabo para intervalos de 1 minuto variando com a velocidade média (a) no plano e (b) fora do plano dos cabos (Ni et al., 2007).

As vibrações induzidas por chuva e vento ocorreram entre as velocidades médias do vento entre 6 e 14m/s.

A Tabela 3.2 mostra os intervalos de velocidades do vento em que foram observadas vibrações induzidas por chuva e vento em modelos e protótipos de cabos de pontes estaiadas.

Tabela 3.2 – Faixa de velocidades em que ocorrem vibrações induzidas por chuva e vento segundo pesquisadores.

Pesquisador	Faixa de velocidades [m/s]
Hikami e Shiraishi (1988)	9 a 13 7 a 14
Matsumoto et al. (1995)	4 a 15 6 a 17 7 a 10
Flamand (1995)	7 a 12
Bosdogianni e Olivari (1996)	7,5 a 16
Gu et al. (2002)	5 a 18
Wang et al. (2005)	8 a 15
Phelan et al. (2006)	6,3 a 14 6,3 a 9,8
Ni et al. (2006)	6 a 14

As vibrações induzidas por chuva e vento ocorreram numa faixa de velocidades de 4 a 18m/s.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM AS VIBRAÇÕES DO CABO

3.3.1 Inclinação e ângulo de ataque

Hikami e Shiraishi (1988) mostraram que a ocorrência de vibrações induzidas por chuva e vento está limitada a cabos geometricamente inclinados contra a direção do vento. A Figura 3.8 mostra as medições realizadas para todos os cabos da ponte Meikonishi.

Flamand (1995) realizou ensaios em cabos com ângulos de inclinação $\alpha = 25^\circ$ e variou apenas os ângulos de incidência do vento, β , de 0° a 90° . Nenhuma excitação foi notada para valores de β abaixo de 25° e acima de 50° . A máxima amplitude encontrada foi para $\beta = 30^\circ$.

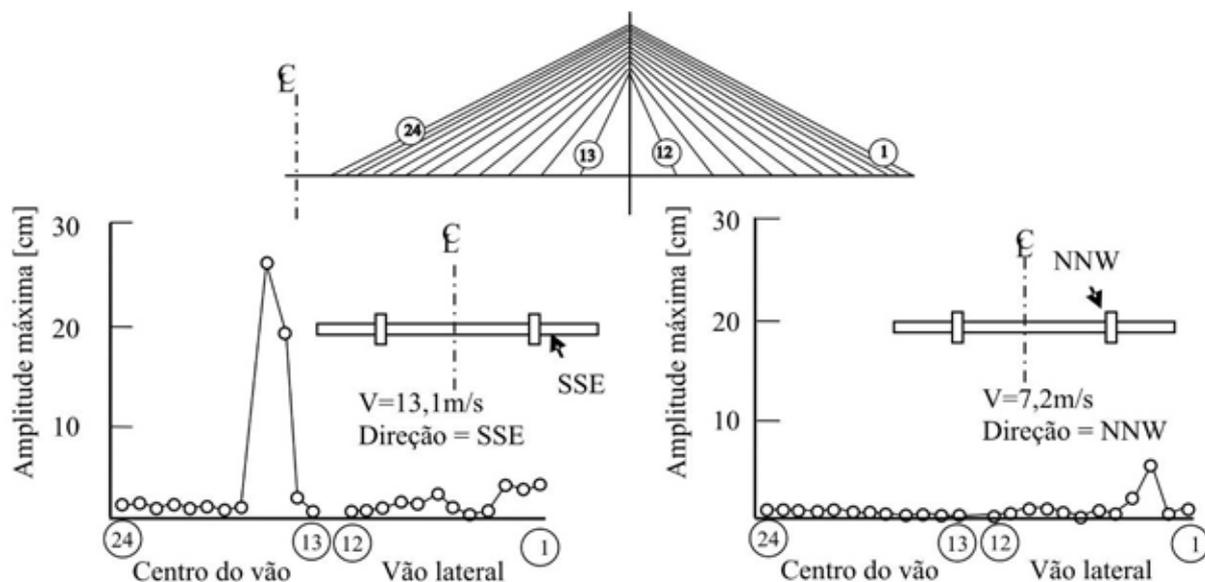


Figura 3.8 - Registros de amplitudes realizados ao mesmo tempo para todos os cabos da ponte Meikonishi (Hikami e Shiraishi, 1988).

A Figura 3.9 mostra que a pior situação para ângulo de incidência do vento é $\beta = 30^\circ$, enquanto que para $\beta = 45^\circ$ temos as menores amplitudes, segundo ensaios de modelos de cilindros realizados por Bosdogianni e Olivari (1996).

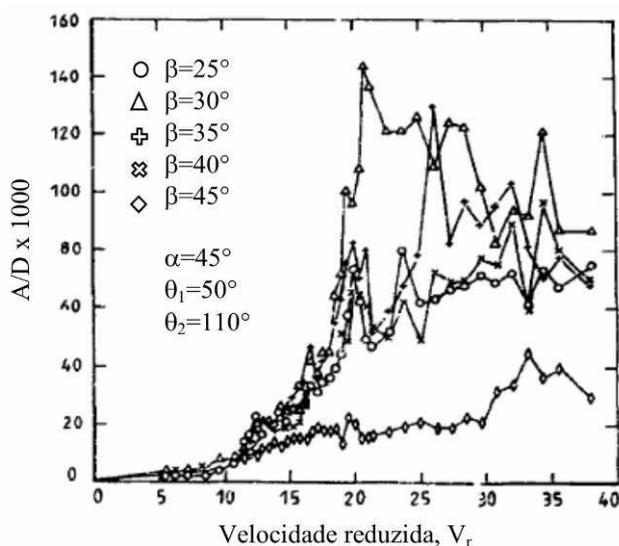


Figura 3.9 – Influência da direção do vento sobre a amplitude de oscilação (Bosdogianni e Olivari, 1996).

A Tabela 3.3 apresenta posição crítica do cabo e posições em que foram observadas vibrações induzidas por chuva e vento.

Tabela 3.3 – Valores críticos de ângulos de inclinação de cabos e de incidência do vento que provocam vibrações induzidas por chuva e vento.

Pesquisador	Inclinação do cabo, α [°]	Ângulo de incidência do vento, β [°]
Flamand (1995)	25	30
Bosdogianni e Olivari (1996)	45	30
Verwiebe (1998)	30	45
Gu e Du. (2005)	30	30 e 35

3.3.2 Intensidade de chuva

As vibrações que atingem grandes amplitudes ocorrem apenas na presença de chuva leve a moderada (intensidade de chuva menor que 8mm/h segundo Ni et al., 2007). Para valores de intensidade mais altas não ocorrem vibrações induzidas por chuva e vento. As medições realizadas por Ni et al. (2007) na ponte Dongting confirmam este comportamento (Figura 3.10).

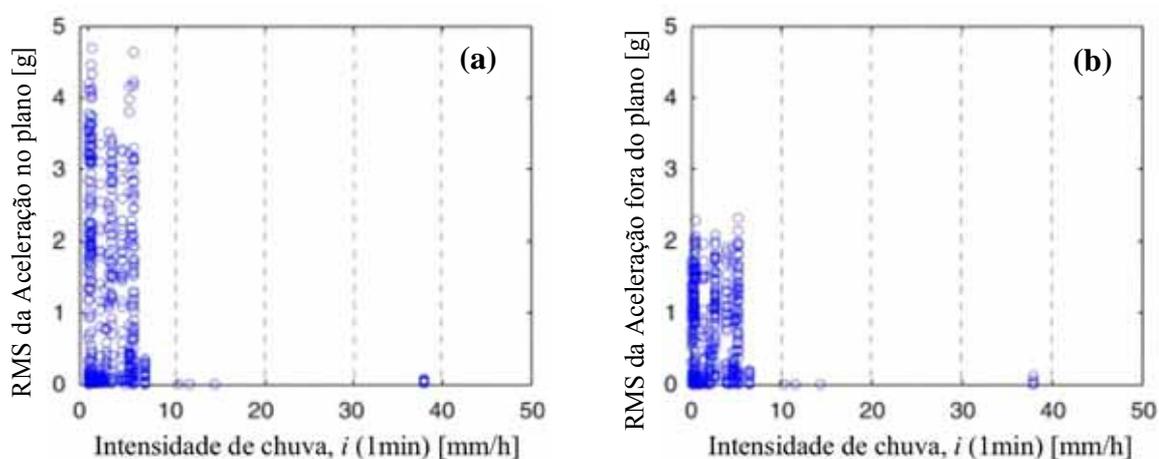


Figura 3.10 – RMS da aceleração do cabo para intervalos de 1min variando com a intensidade de chuva (a) no plano e (b) fora do plano dos cabos (Ni et al., 2007).

3.3.3 Turbulência

A turbulência pode causar tanto estabilidade quanto instabilidade aerodinâmica dependendo do ângulo de inclinação do cabo, ângulo de ataque e posição dos filetes d'água (Matsumoto et al., 1992)

3.3.4 Amortecimento

Quanto maior o amortecimento dos cabos, menores são as amplitudes atingidas nas vibrações induzidas por chuva e vento (Gu e Du, 2005).

3.3.5 Filetes d'água

Gu et al. (2002) realizaram ensaios em modelos de cabo com o filete superior apenas e também com o filete superior e inferior juntos (Figura 3.11), onde A_{\max} e A_{per} são, respectivamente, a amplitude de deslocamento e o deslocamento permitido.

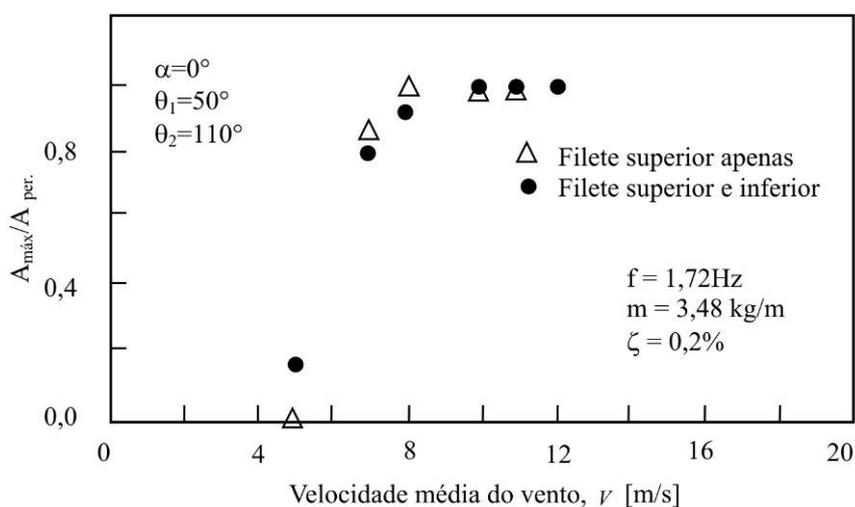


Figura 3.11 – Efeito do filete inferior na vibração do cabo (adaptado de Gu et al., 2002).

Segundo Gu et al. (2002), o filete inferior tem pequena influência sobre as vibrações. Medições realizadas das forças aerodinâmicas com filetes formados separadamente mostraram o papel negligente do filete inferior, desde que este seja formado na região da esteira (Wilde e Witkowski, 2003). Os autores Hikami e Shiraishi (1988), Flamand (1995) e

Bosdogianni e Olivari também descrevem que o papel do filete inferior pode ser negligenciado. Entretanto, Seidel e Dinkler (2006) dizem que a existência de dois filetes é muito importante para o comportamento das vibrações.

3.3.6 Localização dos filetes

A formação dos filetes não necessariamente indica a ocorrência de vibrações induzidas por chuva e vento. Matsumoto et al. (1990) verificaram a formação de um ou dois filetes de água no cabo inclinado a favor da direção do vento, no entanto não ocorrem vibrações induzidas por chuva e vento.

Bosdogianni e Olivari (1996) ensaiaram modelos com filetes rígidos, sendo que o superior, θ_1 , foi posicionado entre 50° e 70° , mantendo-se a posição do filete inferior, θ_2 , fixa em 110° . As Figuras 3.12 a 3.14 mostram que as amplitudes mais pronunciadas ocorrem para $\theta_1=50^\circ$ e $\theta_2=110^\circ$.

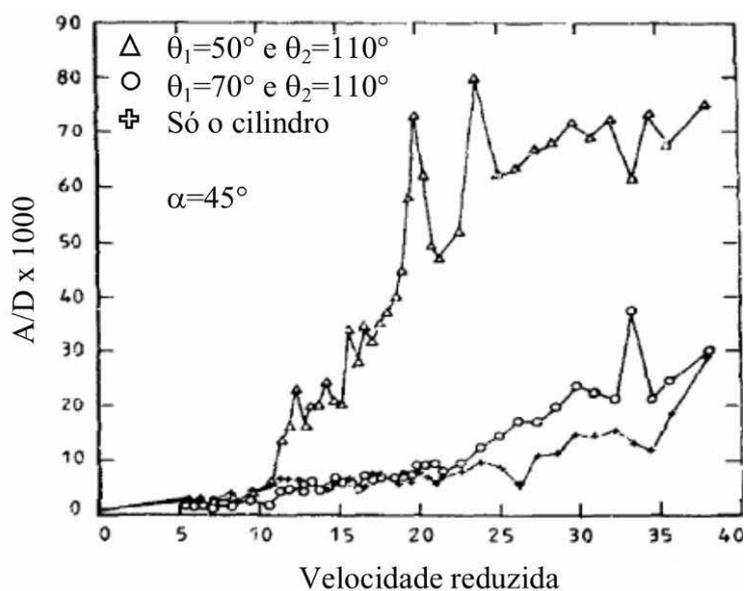


Figura 3.12 – Efeito da posição do filete sobre a amplitude de oscilação a $\beta = 25^\circ$ (Bosdogianni e Olivari, 1996).

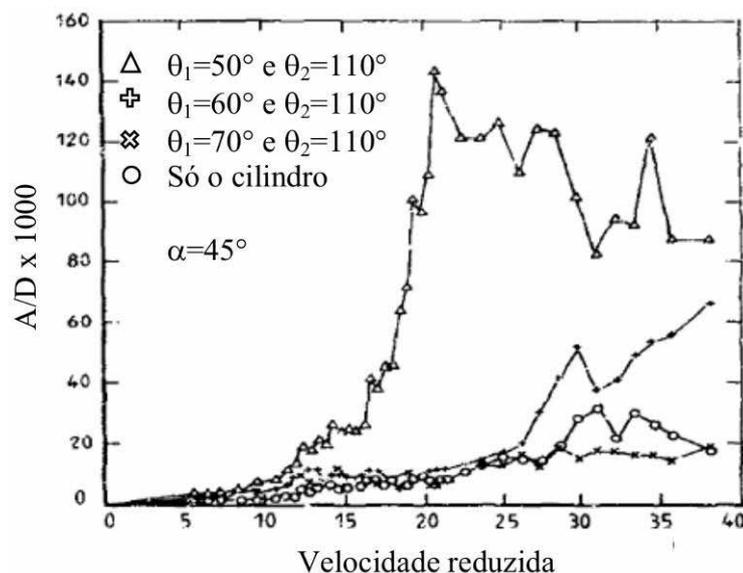


Figura 3.13 – Efeito da posição do filete sobre a amplitude de oscilação a $\beta = 30^\circ$ (Bosdogianni e Olivari, 1996).

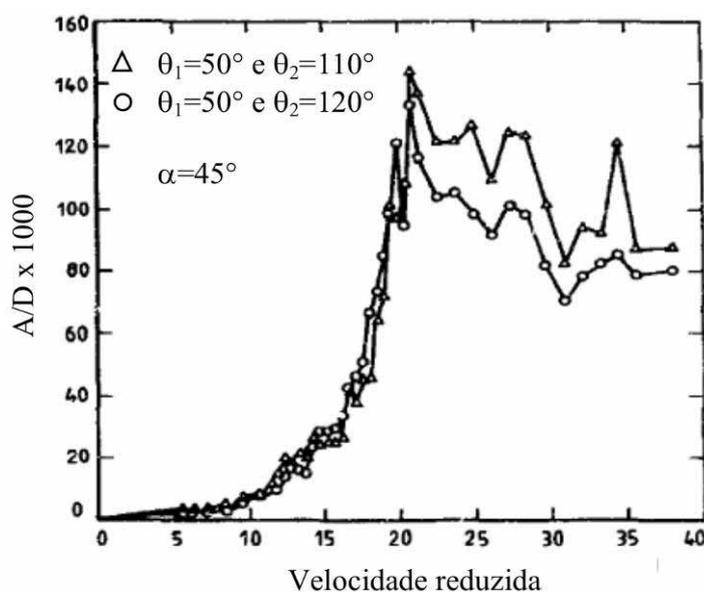


Figura 3.14 – Efeito da posição do filete inferior sobre a amplitude de oscilação a $\beta = 30^\circ$ (Bosdogianni e Olivari, 1996).

Bosdogianni e Olivari (1996) afirmaram não ocorrer mudanças nas amplitudes observadas com alteração da posição do filete inferior e fixação da posição do filete superior em $\theta_1=50^\circ$ (pior caso). Por este fato, concluíram que o filete inferior pode ter seu papel negligenciado sobre as vibrações. Bosdogianni e Olivari (1996) dizem que isto pode ser explicado pelo fato de que o filete inferior se localiza dentro da esteira formada à sotavento do cilindro.

3.3.7 Movimento dos filetes

Os filetes d'água oscilam sobre a superfície de cabos na direção circunferencial, oscilação esta, causada principalmente pela aceleração momentânea da seção transversal. O movimento dos filetes são influenciados pela adesão fluido-estrutura e pelas forças agindo sobre os mesmos. A variação da posição dos filetes aparece como uma variação contínua da forma da seção transversal do cabo, a qual provoca, por sua vez, a variação dos coeficientes de força nas direções paralela e transversal à direção do vento (Verwiebe, 1998). Os filetes oscilam com a mesma frequência do movimento do cabo (Hikami e Shiraishi, 1988).

3.3.8 Tamanho e forma dos filetes d'água

Para o posicionamento dos filetes, $\theta_1=50^\circ$ e $\theta_2=110^\circ$, Bosdogianni e Olivari (1996) ensaiaram três formas diferentes de filetes rígidos presos a cilindros. Mostraram a partir da Figura 3.15a, que a forma dos filetes não tem importância quanto às amplitudes e pode ser negligenciada. Gu et al. (2002) dizem que o tamanho é insignificante na vibração do cabo Figura 3.15b. Verwiebe (1998), através de ensaios dinâmicos com chuva artificial, mostrou que o efeito de sustentação torna-se muito maior quando o filete inferior cresce. O modelo pode não vibrar, mas pode mudar de posição.

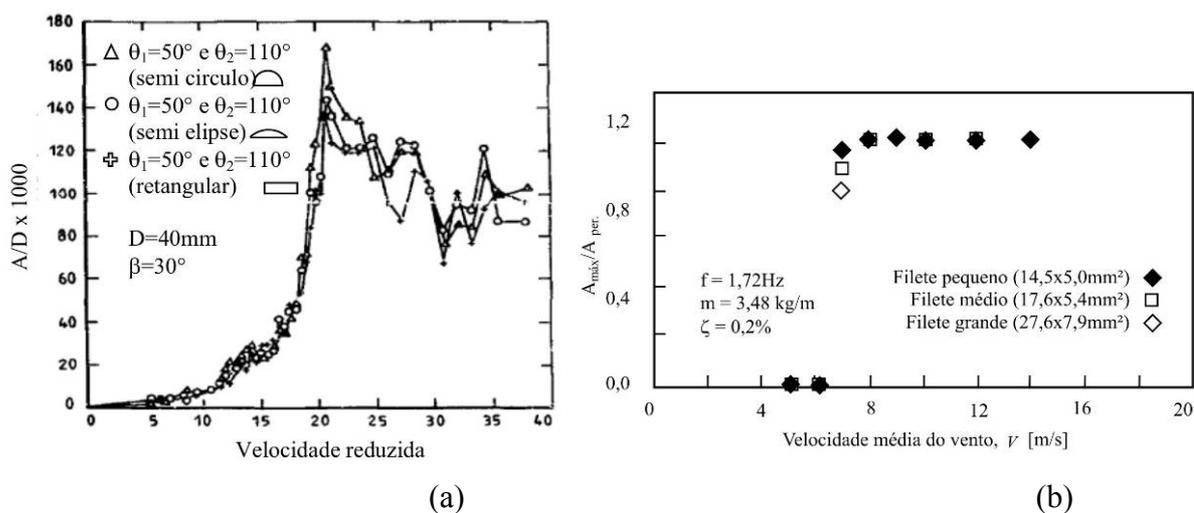


Figura 3.15 – Influência da forma na oscilação do cabo em modelos dinâmicos realizados por (a) Bosdogianni e Olivari, (1996) e (b) Gu et al. (2002).

A Tabela 3.4 mostra as características dos filetes segundo autores que realizaram ensaios com filetes artificiais ou com filetes reais, onde b_{fil} é a dimensão da base do filete e, h_{fil} é a dimensão da altura do filete.

Tabela 3.4 – Características geométricas dos filetes d'água formados em cabos sob ação de chuva e vento.

Pesquisador	Dimensões b_{fil} x h_{fil} altura [mm]	Forma	Diâmetro do cabo [mm]
Matsumoto et al. (1992)	17x1,2	retangular	50
Flamand (1995)	35x5	semi-elíptico	168
Matsumoto et al. (1995)	7,5x1,2	retangular	50
Bosdogianni e Olivari (1996)	6x3 2x1 5x2	Semi-circular retangular semi-elíptico	40
Gu et al. (2002)	14,5x5	Semi-elíptico	120
Matsumoto et al. (2003b)	3,6x1,6	retangular	54

3.4 CARACTERÍSTICAS DOS MODOS DE VIBRAÇÃO

Ni et al. (2007) realizaram medições em 3 dias chuvosos em um cabo da ponte Dongting. O diagrama de espectro de potência para o cabo testado é mostrado na Figura 3.16. Nota-se a evidência do 3º modo como dominante para ambas as respostas, no plano e fora do plano do feixe de cabos. O 2º e 4º modos também participam da vibração do cabo, já o modo fundamental não tem contribuição significativa para a resposta do cabo.

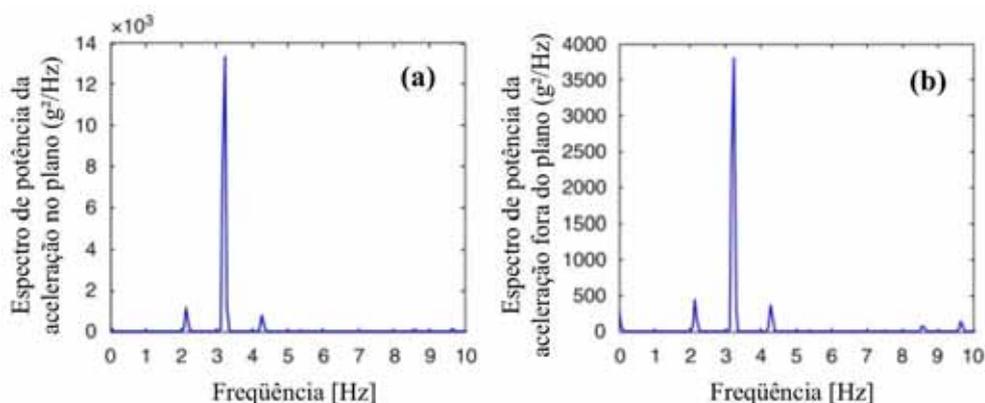


Figura 3.16 – Espectro de potência da aceleração do cabo num evento de excitação por chuva e vento (a) no plano e (b) fora do plano dos cabos (Ni et al., 2007).

3.5 CARACTERÍSTICAS DA VIBRAÇÃO

Bosdogianni e Olivari (1996) afirmaram que o tipo de oscilação observada nas Figuras 3.12 a 3.14 corresponde ao fenômeno aerodinâmico do galope. A primeira razão para esta interpretação é explicada pelo aumento contínuo da amplitude observada acima da velocidade de 7,5m/s; a segunda, é que o corpo oscila na frequência natural de 10,5Hz independente da velocidade, indicando uma independência do número de Strouhal associado com a excitação por desprendimento de vórtices. Hikami e Shiraishi (1988) mostraram que a frequência de vibração dos cabos da ponte Meikonishi era muito mais baixa que a frequência crítica de oscilação por desprendimento de vórtices.

Matsumoto et al. (1992) mediram flutuações da velocidade próxima à esteira do cabo e identificaram através do espectro de potência, que as vibrações de velocidade restrita eram amplificadas significativamente na faixa de velocidades onde a resposta ocorria. Concluíram que cilindros com a presença de filetes d'água exibem desprendimento de vórtices com frequência muito mais baixa que o desprendimento de vórtices de Kármán. Descreveram que as oscilações são adicionalmente realçadas pelo escoamento axial na esteira de cabos inclinados devido a presença do filete superior. Matsumoto et al. (1992) ainda frisam que os efeitos da tridimensionalidade do desprendimento do vórtice de Kármán e o escoamento axial ocorrem também sem a presença da chuva sobre os cabos. Isso demonstra que estes efeitos são em geral um mecanismo de excitação de cabos inclinados mesmo sem a presença de chuva. De modo óbvio, estes efeitos aumentam as amplitudes de vibração dos cabos quando a chuva é envolvida (Seidel e Dinkler, 2006).

Todos os ensaios realizados por Gu et al. (2002) demonstraram que cabos horizontais (ângulo de inclinação do cabo $\alpha = 0^\circ$) com filetes d'água posicionados entre 32° e 42° e vento normal ao cabo (ângulo de ataque $\beta = 0^\circ$) podem exibir vibrações transversais divergentes, as quais ocorrem a certa velocidade de disparo. Os autores explicaram este mecanismo pela teoria do galope de Den Hartog:

A análise com respeito à velocidade de disparo demonstra que a vibração transversal divergente de cabos horizontais com filetes artificiais numa certa posição e com vento normal ao cabo é galope de 1GDL, onde a velocidade de disparo pode ser predita pela teoria do galope de Den Hartog. Para confirmar a conclusão, Gu et al. (2002) realizaram testes em túnel

de vento para determinar a variação dos coeficientes de arrasto e de sustentação para ângulos θ_1 (Figura 3.17).

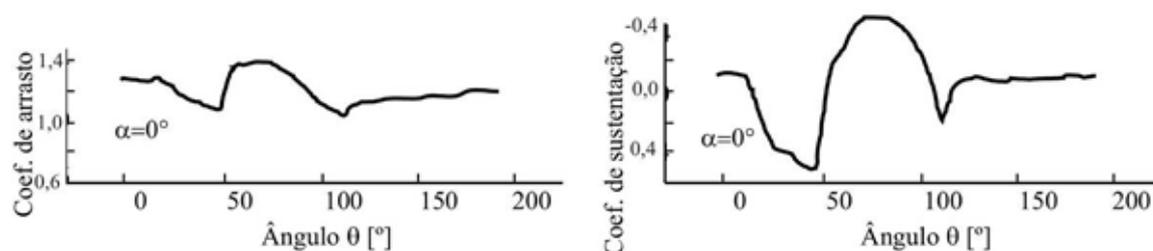


Figura 3.17 – Coeficiente de arrasto e de sustentação de cabo com a posição relativa entre filete superior e vento (Gu et al., 2002).

Pode ser visto que a curva do coeficiente de sustentação tem grande valor de pico quando o ângulo $\theta=48^\circ$. Entre 48° e 58° , a primeira derivada do coeficiente de sustentação com respeito ao ângulo de ataque é negativa. A derivada negativa de alto valor faz com que a soma ($C'_s + C_a$) seja negativa. Portanto, Gu et al. (2002) concluem que o galope ocorre para cabos com filetes artificiais.

Cao et al. (2003) sugere que o mecanismo básico das vibrações induzidas por chuva e vento seja similar ao produzido pelo galope.

Gu et al. (2002), para entender melhor as vibrações induzidas por chuva e vento, ensaiaram modelos de cabos com filetes artificiais sob condições de ângulos de ataque diferentes. Os resultados são apresentados a seguir.

A Figura 3.18 mostra resultados da amplitude normalizada versus velocidade média do vento sobre cabos horizontais com filetes artificiais localizados à $50^\circ < \theta_1 < 60^\circ$. O ângulo de ataque é $\beta=45^\circ$ e terá seus resultados comparados ao vento normal ao eixo do cabo.

Para $\theta_1=60^\circ$ e $\beta=0^\circ$ (vento normal ao cabo) o cabo não apresenta qualquer tipo de vibração (Figura 3.18a). Porém, quando $\beta=45^\circ$ o cabo apresenta vibrações entre as velocidades de 5 a 18m/s (Figura 3.18a). Na Figura 3.18b, quando $\theta_1=58^\circ$, o cabo exibe vibração do tipo galope para o caso de vento normal ao cabo. Para vento à 45° , o cabo retorna às vibrações de velocidade restrita, o mesmo ocorrendo para $\theta_1=55^\circ$ e 52° (Figura 3.18c e d). Portanto, o galope aparece quando o vento é normal ao cabo e as vibrações de velocidade restrita aparecem para ângulo de incidência do vento de 45° . Para $\theta_1=50^\circ$ (Figura 3.18e) ainda

identifica-se a velocidade restrita, no entanto, bem menor comparando-se aos casos anteriores (Gu et al., 2002). Quando o ângulo de ataque não é nem 0° nem 45° , o cabo exibe vibração do tipo híbrida, entre galope e vibração do tipo velocidade restrita. A baixas velocidades, aparecem vibrações do tipo velocidade restrita e quando a velocidade aumenta a certo nível ocorre o galope (Gu et al., 2002).

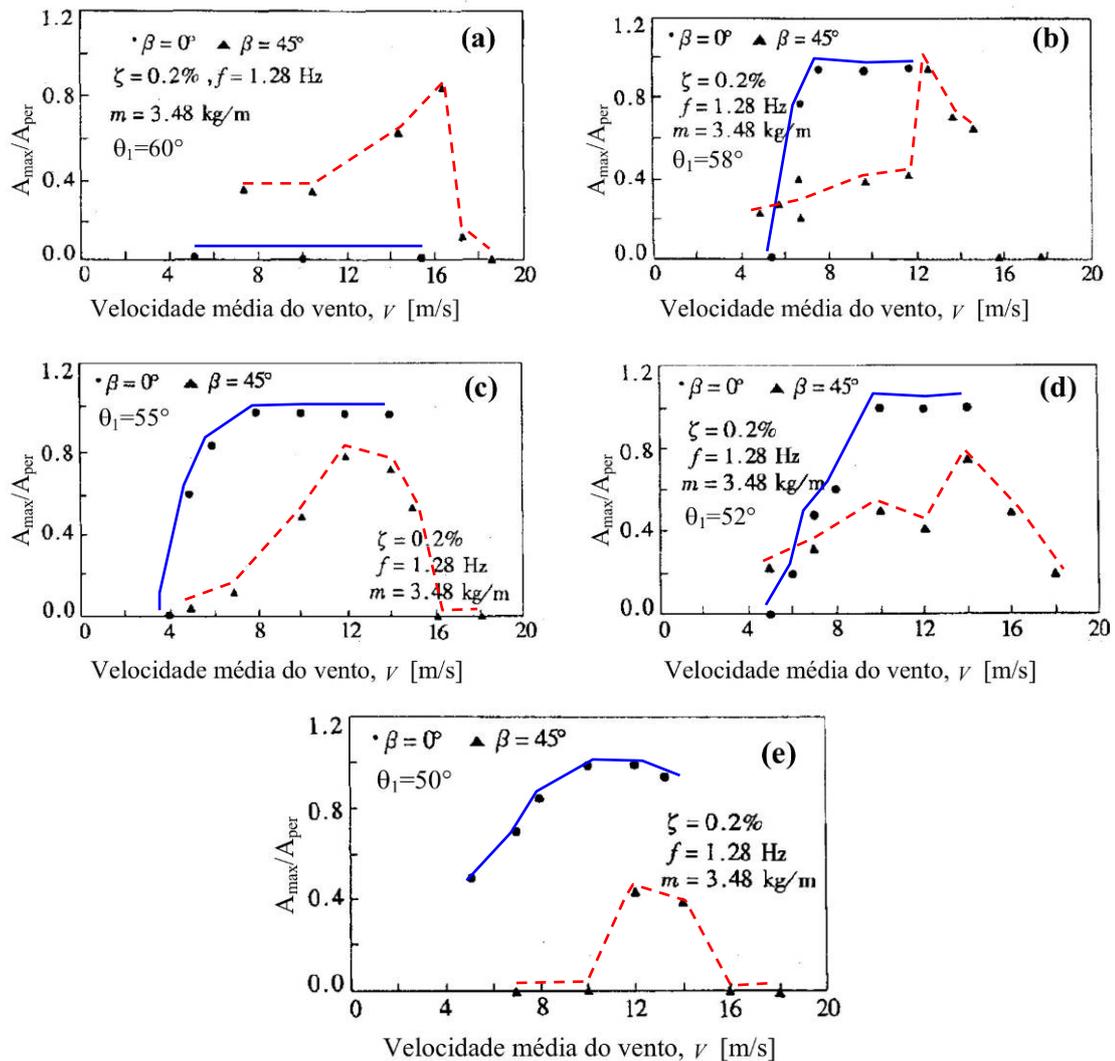


Figura 3.18 – Vibração do tipo velocidade restrita (a) $\theta_1 = 60^\circ$, (b) $\theta_1 = 58^\circ$ (c) $\theta_1 = 55^\circ$ (d) $\theta_1 = 52^\circ$ e (e) $\theta_1 = 50^\circ$ (Gu et al., 2002).

Na Figura 3.19 são comparadas amplitudes normalizadas variando-se a posição do filete para 3 ângulos de incidência, $\beta = 0^\circ$, $\beta = 30^\circ$ e $\beta = 45^\circ$.

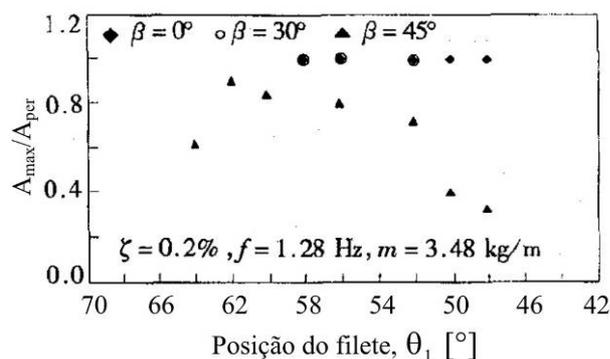


Figura 3.19 – Comparação das amplitudes de vibração do cabo com filete artificial (Gu et al., 2002).

Para $\beta = 0^\circ$, o cabo exibe vibração do tipo divergente. Para $\beta = 30^\circ$, as vibrações aparecem do tipo híbrida e para $\beta = 45^\circ$ são do tipo velocidade restrita (Figura 3.19) (Gu et al., 2002).

Matsumoto et al. (2003a) realizaram ensaios em modelo de cabo estacionário com filete superior artificial e identificaram desprendimento de vórtices de Kármán e desprendimento de vórtices de alta velocidade reduzida. A Figura 3.20 mostra estes efeitos identificados na extremidade superior do modelo sem e com o filete superior para $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$. A Figura 3.20 mostra a configuração do cabo no túnel de ensaios. Observa-se que à posição do filete superior de 68° a 75° , as componentes de baixa frequência do coeficiente de sustentação são extremamente grandes.

Na Figura 3.21, as componentes de baixa frequência das forças aerodinâmicas de sustentação não foram em qualquer momento observadas, mas somente componentes de vórtices de Kármán são dominantes. Além disso, os valores do espectro de potência para desprendimento de vórtices de Kármán na extremidade inferior do modelo são extremamente maiores que os valores para a parte superior do cabo. Portanto, é visto que a formação de vórtices na parte superior do cabo é diferente da formação na parte inferior (Matsumoto et al., 2003a).

O diagrama de espectro de potência da força de sustentação variável medida na extremidade inferior do modelo é mostrado na Figura 3.21.

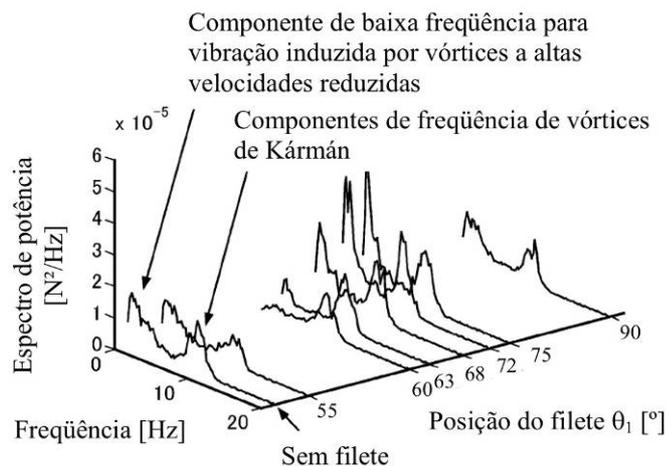


Figura 3.20 – Espectro de potência da força variável de sustentação num cilindro estacionário com filete superior artificial (extremidade superior do cabo, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V = 4\text{m/s}$, escoamento suave) (Matsumoto et al., 2003a).

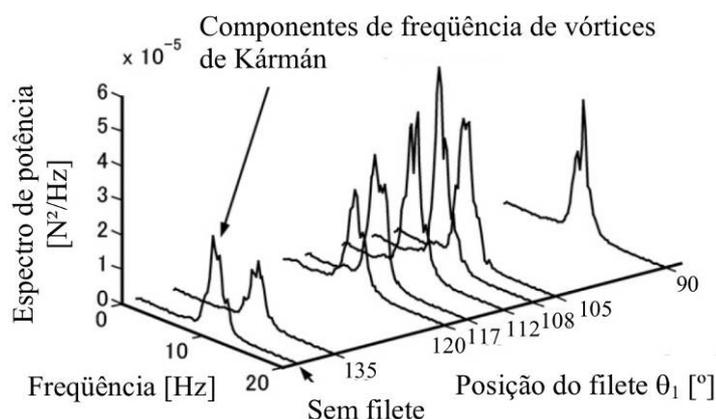


Figura 3.21 – Espectro de potência da força variável de sustentação num cilindro estacionário com filete superior artificial (extremidade inferior do cabo, $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V = 4\text{m/s}$, escoamento suave) (Matsumoto et al., 2003a).

3.6 MECANISMOS DE VIBRAÇÃO

3.6.1 Mecanismos segundo Verwiebe e Ruscheweyh (1996)

Verwiebe (1996) através de ensaios dinâmicos em cilindros submetidos à chuva artificial, classificou a excitação induzida por chuva e vento em três tipos de mecanismos:

3.6.1.1 Vibração paralela à direção do vento, com oscilação simétrica de dois filetes d'água sobre a seção transversal (tipo 1)

Nas vibrações do tipo 1 (Figura 3.22) a mudança da força resultante do vento é causada pelo deslocamento periódico dos filetes d'água sobre a superfície do cabo (simétrico à direção do vento), que provoca um deslocamento periódico da linha de separação do escoamento. O deslocamento simétrico da linha de separação altera a distribuição de pressões simetricamente ao redor do cilindro e conseqüentemente altera a força do vento na direção do vento. Existe uma velocidade mínima necessária para dividir o filete inicial à barlavento em dois filetes localizados nas laterais da seção. As vibrações do tipo 1, além da orientação, $\alpha = 30^\circ$ e $\beta = +90^\circ$, podem ocorrer também em barras verticais.

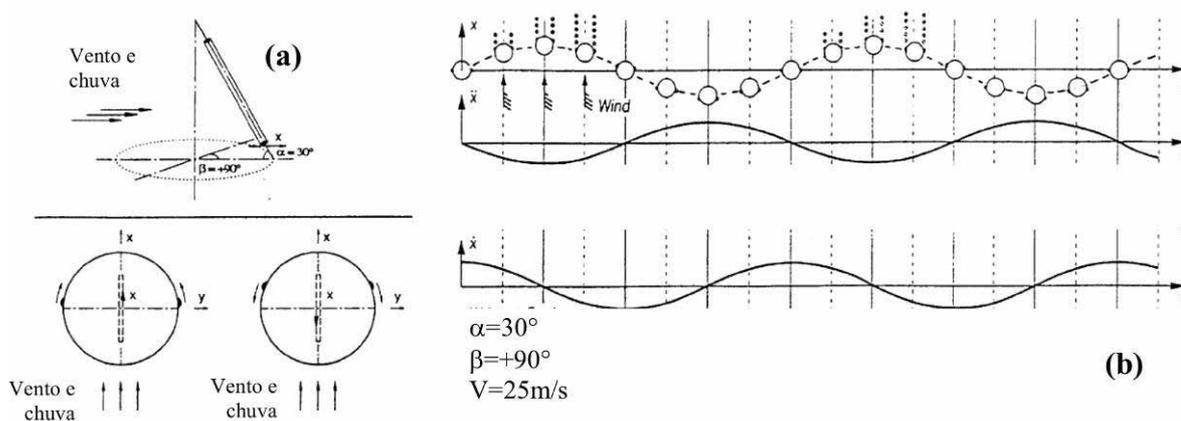


Figura 3.22 – Vibração do tipo 1: na direção do vento, movimentos simétricos dos filetes d'água; (a) orientação do cabo e movimento dos filetes na seção; (b) diagramas de x , \dot{x} e \ddot{x} no tempo (Verwiebe, 1998).

3.6.1.2 Vibração principalmente transversal à direção do vento (tipo 2)

A mudança do coeficiente de sustentação é causada pela variação da seção transversal do cabo com um ou dois filetes d'água e pelo deslocamento anti-simétrico das linhas de separação. Verwiebe (1996) classificou as vibrações do tipo 2 em 2.1 e 2.2, que serão descritas a seguir.

3.6.1.2.1 Vibração transversal à direção do vento, com uma oscilação anti-simétrica de dois filetes d'água sobre a seção transversal (tipo 2.1)

O tipo de vibração 2.1 pode ocorrer em cabos inclinados contra a direção do vento com filetes em ambas as laterais do cabo (ex. $\alpha = 30^\circ$, $\beta = +90^\circ$). Semelhante à vibração do tipo 1, na vibração do tipo 2.1, a divisão em dois filetes ocorre a certa velocidade do vento e os posiciona nas laterais tendendo a barlavento (Figura 3.23). Devido ao movimento estocástico inicial lateral do cabo, os filetes se deslocam diferentemente na seção (Figura 3.23a). A nova configuração dos filetes provocará uma distribuição de pressões anti-simétrica e causará forças laterais, F_y , que mudará de sinal no ritmo da oscilação. Este efeito aumenta caso a aceleração da oscilação seja suficiente para destacar as partículas d'água (filetes) da superfície do cabo. As vibrações do tipo 2.1 podem ocorrer também em barras verticais.

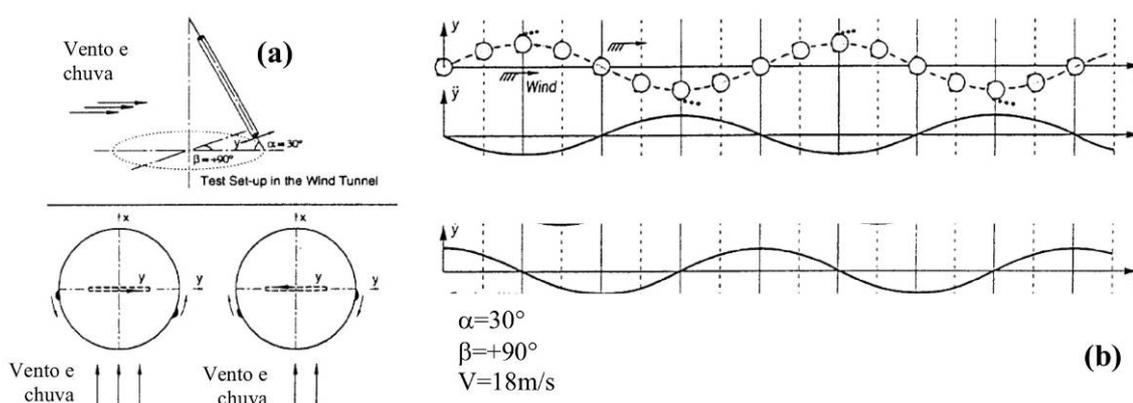


Figura 3.23 – Vibração do tipo 2.1: na direção transversal à direção do vento, movimentos anti-simétricos dos filetes d'água; (a) orientação do cabo e movimento dos filetes na seção; (b) diagramas de x , \dot{x} e \ddot{x} no tempo (Verwiebe, 1998).

3.6.1.2.2 Vibração principalmente transversal à direção do vento, com um filete d'água atrás da seção transversal (tipo 2.2)

A vibração do tipo 2.2 ocorre em cabos inclinados ortogonais à direção do vento, $\beta = 0^\circ$ (ou para ângulos de ataque aproximadamente $-45^\circ < \beta < +45^\circ$). Neste caso, o filete inferior provoca efeito de sustentação. O modelo não vibra, mas muda sua posição se o filete inferior flui para a parte inferior do cabo. O efeito de sustentação torna-se muito maior quando o filete inferior cresce. De forma relativamente menor o coeficiente de arrasto

também age sobre o cabo; portanto, o movimento oscilatório se caracteriza pela forma elíptica. A altas velocidades o filete superior pode se desenvolver e vibrações do tipo 1 ou 2.1 podem ocorrer. A Figura 3.24 mostra o exemplo de cabo inclinado ortogonal à direção do vento ($\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$).

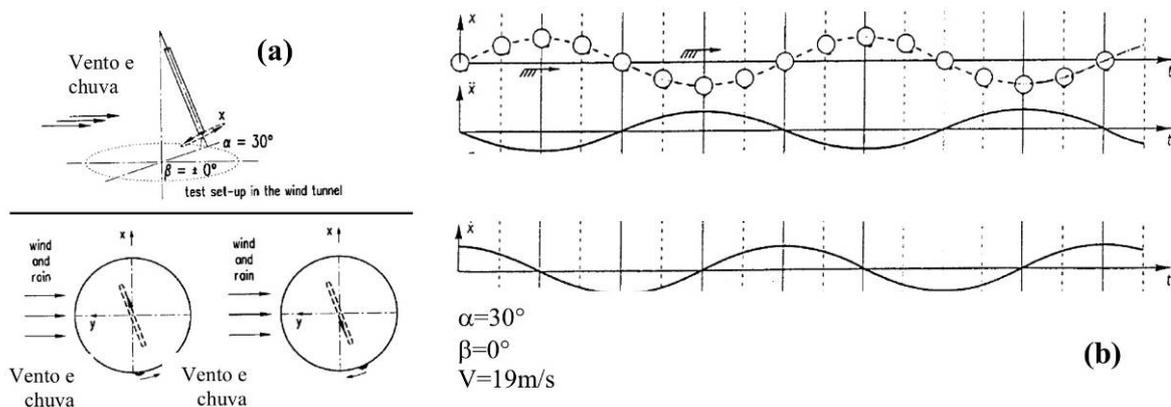


Figura 3.24 – Vibração do tipo 2.2: vibração predominantemente na direção transversal à direção do vento, principalmente causada pelo movimento do filete inferior; (a) orientação do cabo e movimento dos filetes na seção; (b) diagramas de x , \dot{x} e \ddot{x} no tempo (Verwiebe, 1998).

3.6.2 Mecanismo baseado no fenômeno do fio de Prandtl (Seidel e Dinkler, 2006)

Outro mecanismo de excitação induzida por chuva e vento baseia-se no fenômeno do fio de Prandtl e considera os filetes como um movimento desordenado. Um fio, quando amarrado a uma esfera de diâmetro 300mm no ponto crítico de transição, reduz o coeficiente de arrasto significativamente. O fio induz uma transição do regime subcrítico para o supercrítico a número de Reynolds consideravelmente mais baixo para um escoamento em volta da esfera sem perturbações (Figura 3.25).

Fenômeno similar pode ser observado em cilindros circulares alongados. Em contraste com o fio de Prandtl (caso em que o fio está fixo), o movimento dos filetes provoca desordem móvel e em conseqüência, vibrações induzidas por chuva e vento. Ao início das oscilações, os filetes se localizam próximos a linha de separação do escoamento subcrítico, na mesma área onde o fio de Prandtl é ativo. Ao contrário do fio de Prandtl, uma interação entre o movimento

do cabo e os filetes existe num caso especial de vibração induzida por chuva e vento. Os filetes oscilam em volta do ponto de transição do escoamento com a mesma frequência do cabo. O resultado deste movimento é uma transição periódica do escoamento entre os regimes subcrítico e supercrítico. A interação entre cabo, filetes e escoamento determina o desenvolvimento de um mecanismo de auto-excitação. Podem ocorrer, desta forma, vibrações de grandes amplitudes, tanto na direção do vento quanto transversalmente a ela, dependendo da posição dos filetes.

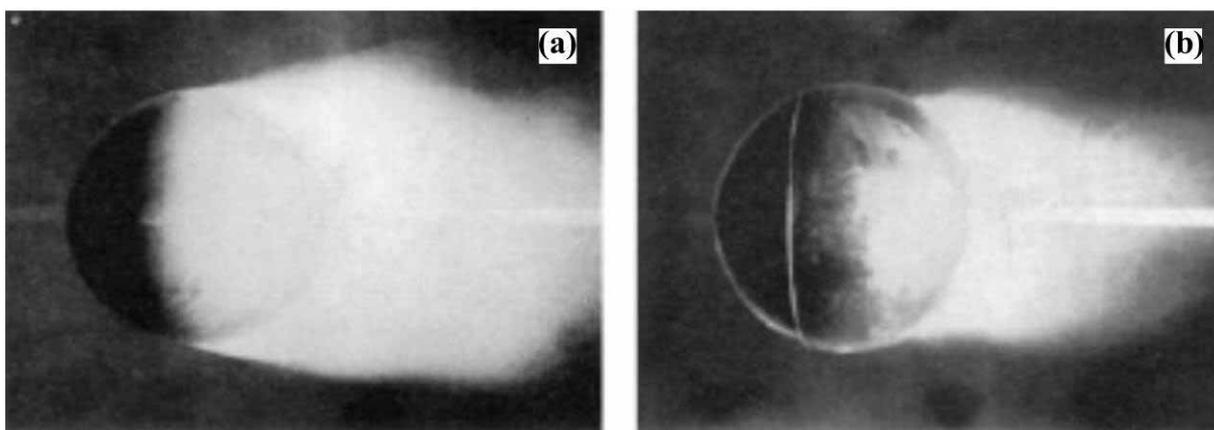


Figura 3.25 – Escoamento em volta da esfera (a) sem e (b) com o fio de Prandtl (Seidel e Dinkler, 2006).

3.7 DISPOSITIVOS MITIGADORES

3.7.1 Protuberâncias longitudinais

Foram propostos cabos com protuberâncias longitudinais para suprimir os efeitos provocados pela chuva e vento. Este dispositivo reduz o escoamento axial em cabos inclinados (Figura 3.26a), e aparentemente interrompe a formação dos filetes d'água em posições aerodinamicamente instáveis. A primeira aplicação deste dispositivo foi na ponte Higashi Kobe, Japão, que foi utilizado com sucesso na eliminação das vibrações induzidas por chuva e vento; no entanto, as protuberâncias provocaram um aumento no coeficiente de arrasto de 1,35 (Virlogeux, 1999).

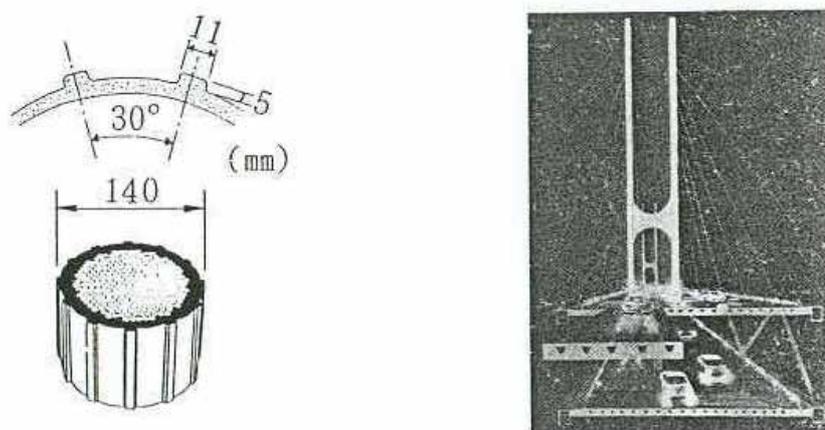


Figura 3.26 – (a) Cabo de Polietileno com protuberâncias longitudinais (b) Ilustração da ponte Higashi-Kobe (Matsumoto et al., 1992).

3.7.2 Fios entrelaçados em espirais

Flamand (1995) concluiu que fios helicoidais duplos, com 1,3mm de altura, 2mm de espessura e passo de 0,6m é eficiente para estabilizações dos cabos.

Verwiebe e Ruscheweyh (1998) afirmam não ser efetivo o uso de fios entrelaçados, pois, apenas desloca a água de um lado para o outro do cilindro e as vibrações ocorrem da mesma forma.

Gu e Du (2005) realizaram ensaios em modelo dinâmico ($\alpha=30^\circ$ e $\beta=35^\circ$) para analisar a eficiência de espirais entrelaçadas nos cabos com o objetivo de eliminar ou diminuir as vibrações induzidas por chuva e vento. Testaram espirais de diâmetros $\phi_{esp}=0,5, 1, 3$ e 7mm entrelaçados no sentido horário e anti-horário ao longo dos cabos num passo de $L_{esp} = 30$ e 60cm.

A Figura 3.27 apresenta resultados da influência do diâmetro da espiral na eficiência do dispositivo. Observa-se na Figura 3.27 que para espiral de diâmetro de 1mm, a formação do filete superior é impedida em algumas extensões e a vibração torna-se bem pequena. Para as espirais de $\phi_{esp}=3$ e 7mm, não ocorreu a formação de filetes e as vibrações foram completamente eliminadas. Inesperadamente, encontrou-se para espirais duplas de

$\phi_{esp}=0,5\text{mm}$ vibrações muito maiores comparadas aos modelos sem espirais. Para espirais de $\phi_{esp}=0,5\text{mm}$ foram vistos claramente a formação do filete superior (Gu e Du, 2005).

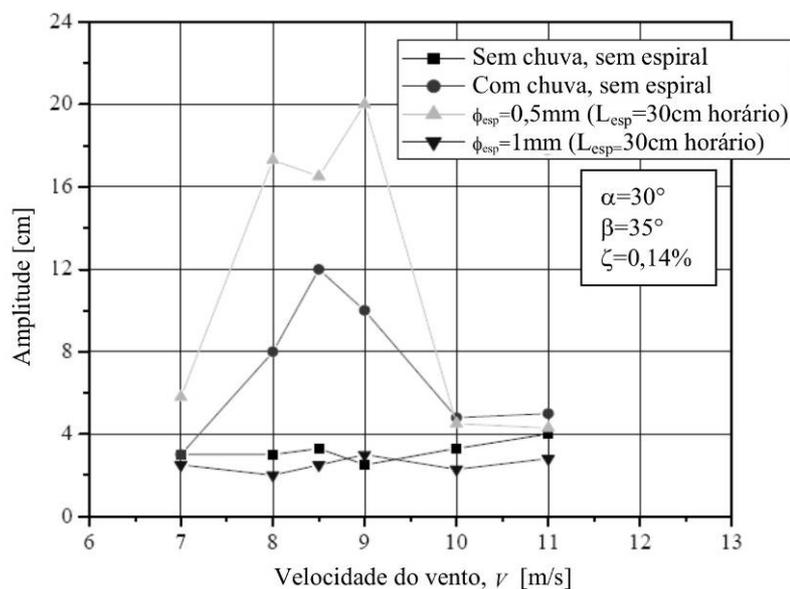


Figura 3.27 – Efeito do diâmetro da espiral na eficiência da eliminação das vibrações (Gu e Du, 2005).

Gu e Du (2005) testaram também o efeito do sentido do entrelaçamento dos espirais. A Figura 3.28 mostra os resultados para cabos com espirais de $\phi_{esp}=1\text{mm}$ amarradas nos sentidos, horário e anti-horário.

Pode-se ver na Figura 3.28 que para o cabo com espiral de $\phi_{esp}=1\text{mm}$ e $L_{esp}=30\text{cm}$, amarrada no sentido horário obteve a maior eficiência. No entanto, quando a mesma espiral é amarrada do sentido anti-horário, a formação do filete superior é observada. Somente quando as espirais de $\phi_{esp}=1\text{mm}$, no sentido anti-horário são menores que $L_{esp}=15\text{cm}$, a vibração é eliminada. Portanto, conclui-se que a direção do entrelaçamento tem grande efeito sobre a eficiência na eliminação de vibrações (Gu e Du, 2005).

Gu e Du (2005) também estudaram o efeito do passo da espiral, L_{esp} . A Figura 3.29 mostra o efeito do comprimento do passo de $L_{esp}=15$ e 60cm sobre a eficiência da eliminação da vibração.

Apenas quando o passo decresce para $L_{esp}=15\text{cm}$, nenhuma vibração é vista. Isto indica que somente um passo apropriado da espiral pode impedir a formação do filete d'água

e suprimir as vibrações induzidas por chuva e vento. Conclui-se que para garantir a efetividade de fios entrelaçados em espiral em cabos de pontes estaiadas, deve-se selecionar cuidadosamente, diâmetro, passo e direção do entrelaçamento da espiral (Gu e Du, 2005).

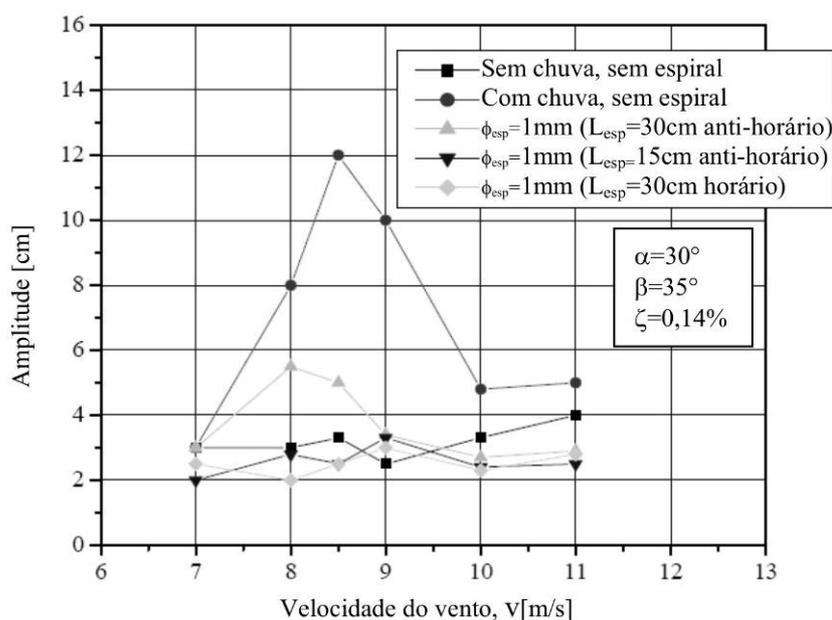


Figura 3.28 – Efeito da direção do entrelaçamento da espiral na eficiência da eliminação das vibrações (Gu e Du, 2005).

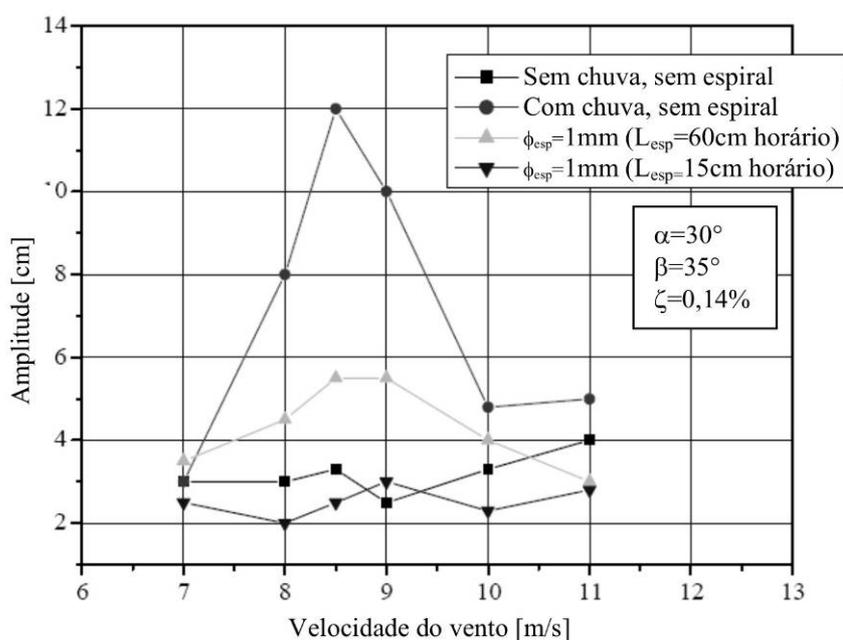


Figura 3.29 – Efeito do passo da espiral na eficiência da eliminação das vibrações (Gu e Du, 2005).

3.7.3 Mossas superficiais

Para a ponte Tatara, engenheiros japoneses distribuíram mossas sobre a superfície do duto de proteção dos cabos. Desde a instalação do dispositivo, nenhuma vibração transversal foi observada (Figura 3.30) (Virlogeux, 1999).

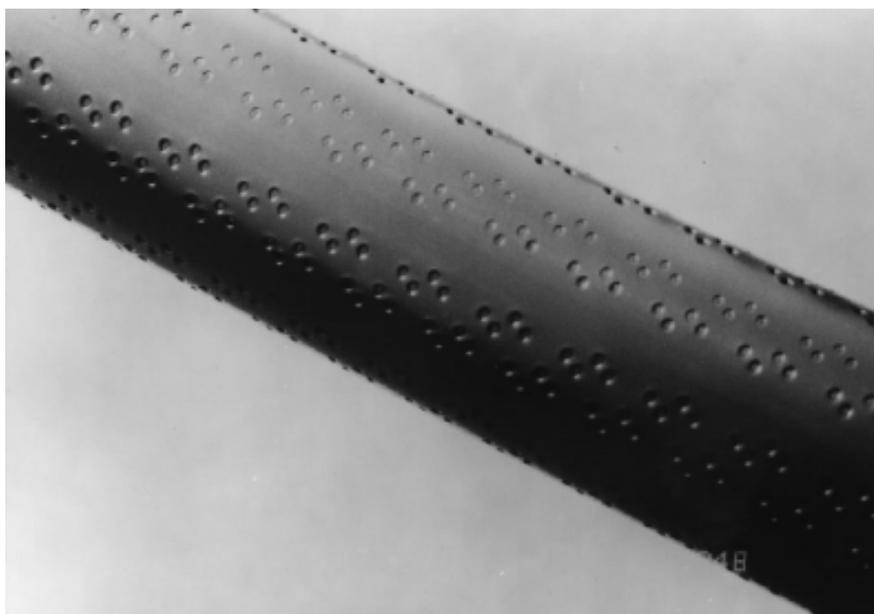


Figura 3.30 – Pequenas mossas ao longo da superfície dos dutos dos cabos da ponte de Tatara (Virlogeux, 1999).

3.7.4 Anéis espaçados

Phelan et al. (2006) ensaiaram modelos de cabos de 1GDL (vertical) com dispositivos mitigadores de vibração do tipo, fios espirais, anéis elípticos e anéis circulares (Figura 3.31).

Os anéis circulares com diâmetros de $D/8$ a $D/20$ com espaçamento entre anéis de $1,5D$ a $3D$ ao longo dos cabos mostraram maior efetividade na redução das vibrações entre todos os outros dispositivos testados. Phelan et al. (2006) concluem que anéis circulares são completamente efetivos na redução das vibrações induzidas por chuva e vento. Este dispositivo é utilizado para impedir a formação do filete superior e conseqüentemente eliminar as vibrações (Figura 3.31).



Figura 3.31 – Cabo com anéis circulares como dispositivo mitigador de vibrações (Phelan et al., 2006).

Phelan et al. (2006) também realizaram medições em cabos da Ponte Veteran. A Figura 3.32 mostra resultados da utilização de anéis com o objetivo de reduzir as vibrações induzidas por chuva e vento. A Figura 3.32 apresenta o RMS da aceleração variando com o RMS da velocidade do vento para o protótipo antes e depois da instalação dos anéis.

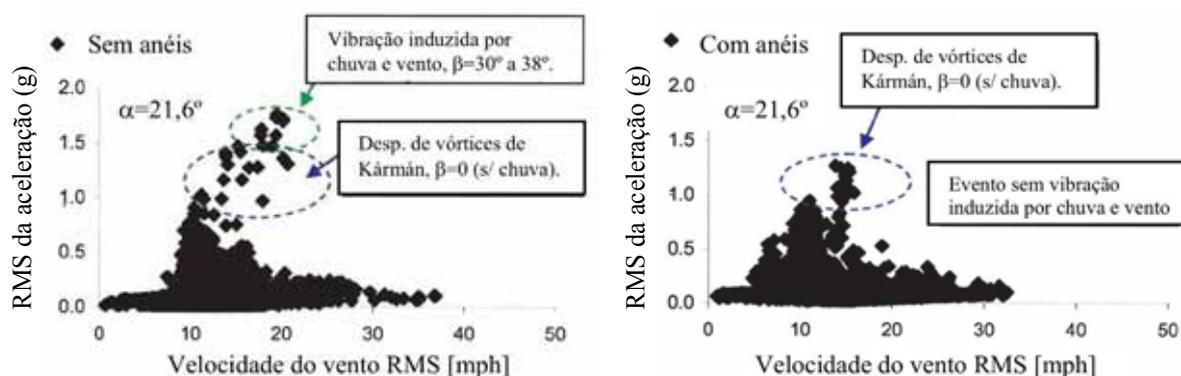


Figura 3.32 – Diagrama do RMS aceleração (1 min.) variando com o RMS da velocidade do vento (1 min.) (a) antes e (b) depois da instalação de anéis nos cabos (Phelan et al., 2006).

Observa-se na Figura 3.32 que a eliminação das vibrações induzidas por chuva e vento a partir da utilização de anéis num cabo da Ponte Veteran é efetiva (Phelan et al., 2006).

3.8 MODELOS MATEMÁTICOS

Modelos teóricos têm sido desenvolvidos com o objetivo de determinar a resposta de cabos de pontes estaiadas submetidos ao efeito combinado de chuva e vento. São apresentados neste capítulo, modelos que se baseiam em dados obtidos a partir de ensaios em túnel de vento. É apresentado também um modelo para determinação da posição e forma dos filetes d'água sobre a superfície dos cabos.

3.8.1 Modelos de 1 grau de liberdade

3.8.1.1 Método aproximado para estimativa das amplitudes de vibrações induzidas por chuva e vento em cabos, Verwiebe (1998)

Foi desenvolvido por Verwiebe (1998), um método aproximado para estimativa da máxima amplitude induzida pela ação combinada de chuva e vento. O modelo é baseado num sistema generalizado massa-mola-amortecedor com uma força excitante harmônica agindo em ressonância sobre um sistema discreto de uma massa. O método pode ser dividido em duas etapas: obtenção de dados através de ensaios com modelos em túnel de vento e transferência das características para o cabo ou barra original.

Os ensaios em túnel de vento consistem na obtenção dos seguintes dados:

- a) rigidez de mola generalizada, k_{mod} ;
- b) decremento logarítmico do modelo, δ_{mod} ;
- c) determinação da máxima amplitude dinâmica de vibração do modelo, A_{mod} .

A partir dos dados obtidos em túnel de vento, determina-se o deslocamento estático equivalente do modelo, $A_{e,\text{mod}}$, levando-se em conta a função de amplificação dinâmica do modelo.

$$A_{e,\text{mod}} = A_{\text{mod}} \frac{\delta_{\text{mod}}}{\pi} \quad (3.1)$$

Em seguida, determina-se a força estática generalizada, $F_{e,\text{mod}}$, através da rigidez da mola:

$$F_{e,\text{mod}} = k_{\text{mod}} \cdot A_{e,\text{mod}} \quad (3.2)$$

A transferência das características para o protótipo ocorre através da extrapolação da força estática equivalente generalizada no modelo para força estática equivalente generalizada no cabo original, considerando as diferentes formas modais e comprimentos dos filetes relevantes, l , onde ϕ é o fator que leva em conta a forma modal.

$$F_e = F_{e,\text{mod}} \frac{l}{l_{\text{mod}}} \phi \quad (3.3)$$

Onde, F_e é a força estática no cabo original, $F_{e,\text{mod}}$ é a força estática equivalente no modelo e l_{mod} é o comprimento do filete relevante no modelo.

Determina-se o deslocamento estático equivalente, A_e , devido à ação da força estática equivalente, F_e , através da rigidez do cabo original k .

$$A_e = \frac{F_e}{k} \quad (3.4)$$

Por fim, determina-se a amplitude de vibração dinâmica, A , considerando a função de amplificação dinâmica do cabo. Para isto, é necessária a obtenção do decremento logarítmico do cabo original, δ , através de medição ou estimativa deste valor.

$$A = A_e \times \frac{\pi}{\delta} \quad (3.5)$$

3.8.1.2 Modelo estocástico para resposta de cabos com filete d'água em movimento, Cao et al., (2003)

O modelo matemático de 1GDL (estimativa de resposta transversal à direção do vento) proposto por Cao et al. (2003) descreve uma seção de cabo estaiado montada sobre molas e amortecedores onde coeficientes de força aerodinâmicos são modificados pela dinâmica do movimento de filetes d'água (Figura 3.33a).

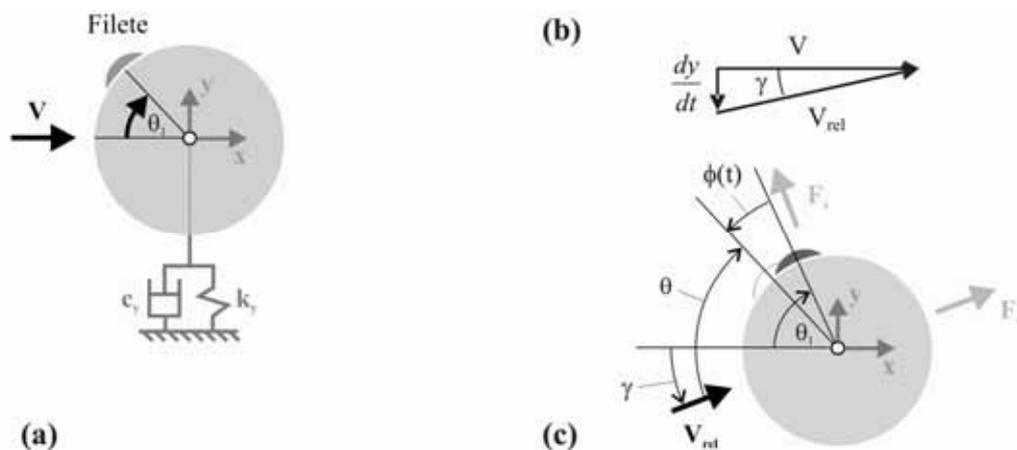


Figura 3.33 – (a) Localização do filete sobre a superfície do cabo; (b) ângulo dinâmico da velocidade relativa; (c) diagrama esquemático das forças aerodinâmicas.

O filete é descrito por um processo estocástico simples, que, junto com forças aerodinâmicas, modelam a interação fluido-estrutura. O modelo baseia-se em medições de coeficientes de arrasto, de sustentação e localização do filete estático realizadas em túnel de vento. Foi considerado no modelo apenas o efeito do filete superior, pois acredita-se que este seja o dominante na indução das vibrações induzidas por chuva e vento. Portanto, foi considerada a influência de um único filete em movimento sobre a superfície do cabo, sobre influência das forças do vento, gravitacional e de atrito. Será modelado por uma pequena massa em movimento sobre a seção transversal do cabo.

As forças aerodinâmicas são moduladas por uma seção transversal efetiva variável determinada pelo cabo e pelo movimento do(s) filete(s).

3.8.1.2.1 Modelo estocástico da seção do cabo com um filete

Se a seção (Figura 3.33a) translada na vertical com velocidade dy/dt no tempo t , então a velocidade efetiva do vento mostrada na Figura 3.33b pode ser derivada conforme a Equação (3.6).

$$V_{rel}^2 = V^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2, \quad \tan \gamma = \frac{1}{V} \frac{dy}{dt} \quad (3.6)$$

θ é o ângulo do vento relativo ao filete, medido no sentido horário a partir do vento relativo a localização do filete, Figura 3.33 e Equação (3.7).

$$\theta = \theta_1 - \phi + \gamma \quad (3.7)$$

Onde, θ_1 é o ângulo estático do filete e $\phi = \phi(t)$ é o ângulo de flutuação que descreve o movimento do filete sobre o perímetro do cabo.

As forças de sustentação e de arrasto por unidade de comprimento mostradas na (Figura 3.33) são dados pelas Equações (3.8) e (3.9).

$$F_s = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V_{rel}^2 C_s \quad (3.8)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V_{rel}^2 C_a \quad (3.9)$$

Onde, ρ_{ar} é a densidade do ar, D é o diâmetro do cabo, $C_s = C_s(\theta)$ e $C_a = C_a(\theta)$ são os coeficientes adimensionais de sustentação e de arrasto respectivamente, que podem ser medidos através de ensaios em túnel de vento para um dado número de Reynolds. A força vertical aerodinâmica sobre o modelo por unidade de comprimento é dada por:

$$F_y = F_s \cos \gamma + F_a \sin \gamma = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V_{rel}^2 (C_s \cos \gamma - C_a \sin \gamma) \quad (3.10)$$

A equação do movimento vertical é dada por:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F_y \quad (3.11)$$

Onde, m , c e k representam a massa, coeficiente de amortecimento e a constante de rigidez do cabo, respectivamente.

Introduzindo o deslocamento adimensional $Y = \left(\frac{\omega_n}{V} \right) y$ e o tempo $T = \omega_n t$, a Equação

(3.11) pode ser escrita:

$$\ddot{Y} + 2\zeta \dot{Y} + Y = \frac{1}{mV\omega_n} F_y \quad (3.12)$$

Onde, o amortecimento estrutural é dado por $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ é a frequência fundamental do sistema sem amortecimento e os pontos significam diferenciação em relação a T. A força dinâmica F_y pode ser escrita:

$$F_y(\phi, \gamma) = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V^2 (1 + \tan^2 \gamma) (C_s(\theta) \cos \gamma + C_a(\theta) \sin \gamma) \quad (3.13)$$

A dependência dos coeficientes C_s e C_a sobre o ângulo θ pode ser determinada através de medições em túnel de vento. Para exemplificar, a Figura 3.34 mostra os coeficientes aerodinâmicos de arrasto e de sustentação, obtidos por Gu et al. (1999), variando com a distância relativa entre o ponto de estagnação do vento e a posição do filete.

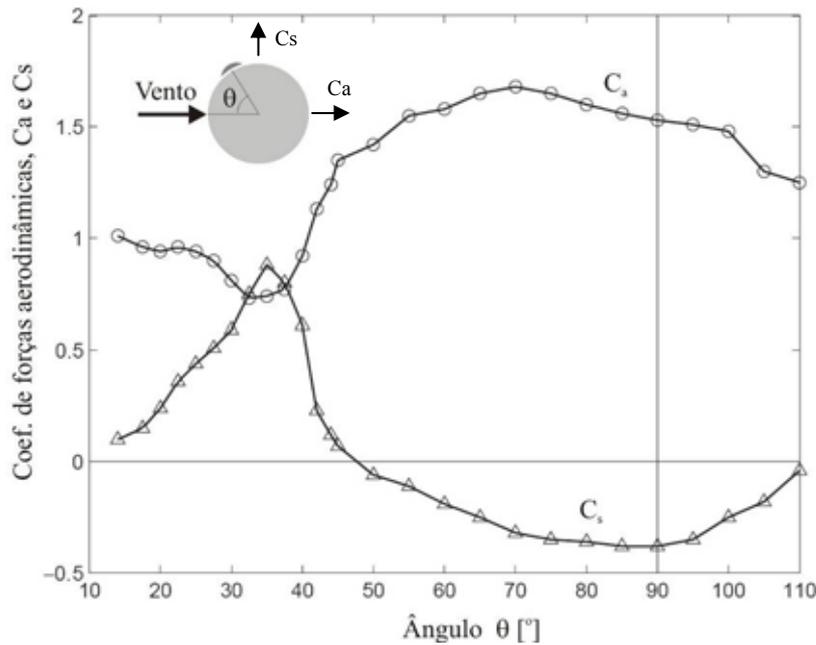


Figura 3.34 - Variação dos coeficientes aerodinâmicos com o ângulo de ataque (adaptado de Gu et al., 1999).

θ é função de ϕ e γ conforme Equação (3.7). Expandindo a Equação (3.13) em séries de Taylor com relação à variável ϕ e γ sobre $\phi=0$ e $\gamma=0$, torna-se:

$$F_y(\phi, \gamma) = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V^2 \left(C_s(\theta_1) + C_s'(\theta_1) \phi + \left(C_s'(\theta_1) + C_a(\theta_1) \right) \gamma \right) + \dots \quad (3.14)$$

Onde ' denota a diferenciação com respeito ao ângulo θ . Se a máxima velocidade do cabo é muito menor que a do vento, então:

$$\frac{1}{V} \frac{dy}{dt} = \frac{1}{V} \frac{V}{\omega_n} \frac{dY}{dT} \omega_n = \dot{Y} \ll 1 \quad (3.15)$$

Portanto, da Equação (3.6), $\gamma \approx \dot{Y}$. Negligenciando, portanto os termos de alta ordem da Equação (3.14), a Equação (3.12) torna-se:

$$\ddot{Y} + 2\zeta_o \dot{Y} + Y = \frac{\rho_{ar} DV}{2m\omega_n} \left(C_s(\theta_1) + C_s'(\theta_1)\phi(T) + \left(C_a(\theta_1) + C_s'(\theta_1) \right) \dot{Y} \right) \quad (3.16)$$

$$b_o = \frac{\rho_{ar} DV}{2m\omega_n} C_s(\theta_1), \quad b_1 = \frac{\rho_{ar} DV}{2m\omega_n} C_s'(\theta_1)$$

$$\zeta_{total} = \zeta + \frac{\rho_{ar} DV}{4m\omega_n} \left(C_s'(\theta_1) + C_a(\theta_1) \right) \quad (3.17)$$

O termo b_o provoca deslocamento constante, um deslocamento na coordenada, portanto, não afeta o comportamento dinâmico do sistema. Fazendo $\bar{Y} = Y - b_o$, a Equação (3.16) pode ser escrita:

$$\ddot{\bar{Y}} + 2\zeta_{total} \dot{\bar{Y}} + \bar{Y} = b_1 \phi(T) \quad (3.18)$$

Considerando que os filetes d'água oscilam na mesma frequência de vibração lateral do cabo. Cao et al. (2003) utilizaram equações de movimento estocásticas para o movimento do filete que foi descrito por processo estocástico de banda estreita. Os autores introduziram então uma equação de filtro de banda estreita com uma fonte estocástica Gaussiana para descrever o movimento. Quando excitado por uma entrada de ruído branco, retorna um espectro de potência estacionário.

$$\ddot{\phi} + 2\zeta_f \omega_f \dot{\phi} + \omega_f^2 \phi = \sqrt{S_o} \eta(T) \quad (3.19)$$

Onde as constantes $\omega_f \approx 1$, ζ_f e S_o serão escolhidas de forma a minimizar a diferença entre o espectro de potência de $\phi(T)$ e o efetivo espectro de potência do movimento do filete medido através de teste em túnel de vento ou medições de campo. A fonte de ruído branco $\eta(T)$ tem média zero, ex. o espectro de potência de $\eta(T)$ e a função de correlação correspondente são, respectivamente,

$$S_\eta(\omega) = 1, \quad R_\eta(\tau) = 2\pi\delta(\tau) \quad (3.20)$$

Onde, δ é o delta de Dirac.

3.8.1.2.2 Resposta estocástica

Quando o fator de amortecimento for negativo, a Equação (3.18) retorna à solução instável. Isto sugere, que o cabo com o filete superior possa se tornar instável de acordo com o mecanismo de Den Hartog, dependendo da posição do filete na seção do cabo. Se $\zeta \leq 0$, o

comportamento dinâmico de grandes amplitudes do cabo pode ser determinado pelos termos altos da expansão da forças aerodinâmicas. Desta forma, deve ser desenvolvido um modelo estocástico não linear para analisar propriamente o comportamento não linear do cabo. Na prática, o valor absoluto de $C_s'(\theta)$ é esperado ser baixo para filetes de tamanho relativamente pequeno ao diâmetro do cabo. Isso provocará amortecimento positivo, e o mecanismo de Den Hartog não será diretamente útil na explicação das vibrações induzidas por chuva e vento. Em caso de amortecimento positivo, desde que o processo de excitação $\eta(T)$ seja assumido estacionário e Gaussiano, o processo de resposta do sistema linear será também estacionário e Gaussiano. Portanto, ambos os processos de entrada e de saída são completamente especificados pelas suas médias e funções de correlação, ou funções de espectro de potência.

Das Equações (3.18) e (3.19), segue que as funções de transferência de frequência complexa são:

$$H_{\bar{Y}}(\omega) = \frac{b_1}{(1 - \omega^2 + 2i\zeta\omega)}, \quad H_{\bar{\phi}}(\omega) = \frac{\sqrt{S_o}}{(\omega_f^2 - \omega^2 + 2i\zeta_f\omega\omega_f)} \quad (3.21)$$

O espectro de potência do ângulo de flutuação $\phi(T)$ pode ser obtido como:

$$S_{\phi}(\omega) = H_{\phi}(\omega)H_{\phi}^*(\omega)S_{\eta}(\omega) = \frac{S_o}{\left((\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2\omega^2\omega_f^2\right)} \quad (3.22)$$

Onde * representa conjugação complexa. Além disso, o espectro de potência da resposta $\bar{Y}(T)$ é dado por:

$$\begin{aligned} S_{\bar{Y}}(\omega) &= H_{\bar{Y}}(\omega)H_{\bar{Y}}^*(\omega)S_{\phi}(\omega) = H_{\bar{Y}}(\omega)H_{\bar{Y}}^*(\omega)H_{\phi}(\omega)H_{\phi}^*(\omega)S_{\eta}(\omega) \\ &= \frac{S_o b_1^2}{\left((1 - \omega^2)^2 + 4\zeta_{total}^2\omega^2\right)\left((\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2\omega^2\omega_f^2\right)} \end{aligned} \quad (3.23)$$

A função de correlação $R_{\phi}(\tau)$ pode ser determinada diretamente por:

$$R_{\phi}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\phi}(\omega)e^{i\omega\tau} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_o e^{i\omega\tau}}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2\omega^2\omega_f^2} d\omega \quad (3.24)$$

Fazendo $\tau=0$, a integral pode ser avaliada pelo método padrão para a obtenção do quadrado do desvio padrão do ângulo de flutuação $\phi(T)$. Da Equação (3.24).

$$\sigma_{\phi}^2 = R_{\phi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_o}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega^2 \omega_f^2} d\omega = \frac{\pi S_o}{2\zeta_f \omega_f^3} \quad (3.25)$$

Analogamente, da Equação (3.23), a variância da resposta estocástica $\bar{Y}(T)$ é:

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{Y}}^2 = R_{\bar{Y}}(0) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{S_o b_1^2}{\left((1 - \omega^2)^2 + 4\zeta_{total}^2 \omega^2 \right) \left((\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega^2 \omega_f^2 \right)} d\omega \\ &= \frac{\pi S_o b_1^2}{2\omega_f^3} \frac{\left((\zeta_{total} + \zeta_f \omega_f) (1 + \omega_f^2 + 4\zeta_{total} \zeta_f \omega_f) - \omega_f (\zeta_f + \zeta \omega_f) \right)}{\left((\zeta_{total} + \zeta_f \omega_f) (\zeta_f + \zeta \omega_f) (1 + \omega_f^2 + 4\zeta_{total} \zeta_f \omega_f) - \omega_f \left((\zeta_{total} + \zeta_f \omega_f)^2 + (\zeta_f + \zeta \omega_f)^2 \right) \right)} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Da Equação (3.25):

$$\frac{\sigma_{\bar{Y}}^2}{\sigma_{\phi}^2} = \frac{\left(\zeta_{total} (1 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2) + \zeta_f \omega_f (\omega_f^2 + 4\zeta_{total}^2) \right) b_1^2}{\left(\zeta_{total} \left((1 - \omega_f^2)^2 + 4\zeta_f^2 \omega_f^2 \right) + 4\zeta_{total}^2 \omega_f (\zeta_f + \zeta_f \omega_f^2 + \zeta_{total} \omega_f) \right)} \quad (3.27)$$

A média da resposta $\bar{Y}(T)$ e o ângulo de flutuação $\phi(T)$ pode ser obtido diretamente pelas Equações (3.11) e (3.12):

$$\text{Erro! Não é possível criar objetos a partir de códigos de campo de edição., Erro! Não é possível criar objetos a partir de códigos de campo de edição.} \quad (3.28)$$

Então $m_Y = m_{\bar{Y}} + b_o = b_o$ e $\sigma_Y = \sigma_{\bar{Y}}$.

O espectro de velocidade $\dot{\bar{Y}}$ pode ser encontrado através do uso da relação $S_{\dot{\bar{Y}}}(\omega) = \omega^2 S_{\bar{Y}}(\omega)$. A resposta estocástica descrita acima torna possível executar estudos paramétricos e avaliar respostas de amplitude de cabos estaiados em condições de chuva e vento.

3.8.1.3 Modelo analítico de Xu e Wang (2003)

Neste modelo de estimativa de resposta, um cilindro inclinado é considerado suportado por molas e amortecedores no seu plano vertical (1GDL) (Figura 3.35). Algumas considerações foram feitas para o desenvolvimento do modelo:

- o papel do filete inferior é negligenciado no modelo sustentando a idéia de que o filete inferior tenha influência desprezível sobre as vibrações do cabo.

- b) é assumido que o filete superior é distribuído uniformemente ao longo do eixo longitudinal do cilindro e vibra na direção circunferencial da seção do cilindro;
- c) não foram considerados os efeitos de turbulência e escoamento axial devido à falta de informações a respeito destes efeitos nas vibrações do cabo com filetes;
- d) não foi considerado o efeito da componente de velocidade média do vento ao longo do eixo cilindro;
- e) a oscilação do filete é considerada harmônica e a frequência de vibração do filete é assumida ser a mesma da oscilação do cabo.

A posição do filete (superior) devido à velocidade média quando o cilindro está estacionário é definida como θ_1 e o deslocamento angular do filete quando o cilindro vibra é definido por $\phi(t)$ (Figura 3.35). A componente da velocidade média perpendicular ao cilindro é dada por:

$$V_{ef} = V \sqrt{\cos^2 \beta + \text{sen}^2 \alpha \times \text{sen}^2 \beta} = V \sqrt{\text{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \quad (3.29)$$

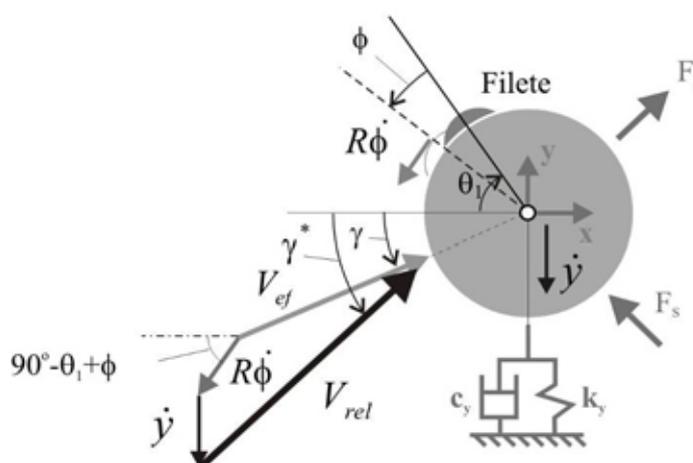


Figura 3.35 – Velocidade relativa no cabo com movimento do filete.

O ângulo de ataque da componente de velocidade média do vento, V_{ef} , é definido com o ângulo de ataque γ , que indica o ponto de estagnação do vento incidente sobre a superfície do cabo. A posição do ponto de estagnação depende de vários fatores, tais como forma da seção transversal do cilindro com filete, rugosidade da superfície do cilindro e turbulência do vento e movimento do cabo. Portanto, o ângulo de ataque neste modelo é definido como o ângulo de ataque ideal (sem a presença de filetes) multiplicado por um fator de influência, ε .

$$\gamma = \varepsilon \times \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \alpha \text{sen} \beta}{\sqrt{\cos^2 \beta + \text{sen}^2 \alpha \text{sen}^2 \beta}} \right) \quad (3.30)$$

Para valor de $\varepsilon=1$, o ângulo, γ , representa a posição de V_{ef} no cilindro sem filete.

Considerando a vibração transversal do cabo, $\dot{y}(t)$, e a vibração angular do filete de velocidade, $\dot{\phi}(t)$, a velocidade média relativa do vento com relação ao cabo com o filete em movimento é, portanto:

$$V_{rel} = \sqrt{\left(V_{ef} \cos \gamma + R \dot{\phi} \cos(90^\circ - \theta_1 + \phi) \right)^2 + \left(V_{ef} \text{sen} \gamma + \dot{y} + R \dot{\phi} \text{sen}(90^\circ - \theta_1 + \phi) \right)^2} \quad (3.31)$$

O ângulo entre a velocidade relativa do vento e o eixo horizontal (Figura 3.35) é definido por γ^* e expresso por:

$$\gamma^* = \tan^{-1} \frac{V_{ef} \text{sen} \gamma + \dot{y} + R \dot{\phi} \text{sen}(90^\circ - \theta_1 + \phi)}{V_{ef} \cos \gamma + R \dot{\phi} \cos(90^\circ - \theta_1 + \phi)} \quad (3.32)$$

Onde, R é o raio do cilindro.

$R \dot{\phi}$ é considerado pequeno comparado com a velocidade média, V_{ef} . Então, os ângulos γ e $\gamma^*(t)$ são limitados num certo alcance, a Equação (3.32) pode então ser escrita:

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \frac{V_{ef} \text{sen} \gamma + \dot{y} + R \dot{\phi} \text{sen}(90^\circ - \theta_1 + \phi)}{V_{ef} \cos \gamma} \\ &= \frac{V_{ef} \text{sen} \gamma + \dot{y} + R \dot{\phi} \left((90^\circ - \theta_1 + \phi) - \frac{1}{6} (90^\circ - \theta_1 + \phi)^3 \right)}{V_{ef} \cos \gamma} \end{aligned} \quad (3.33)$$

A força vertical no cilindro por unidade de comprimento na direção y é, portanto:

$$F_y = \frac{\rho_{ar} D V_{rel}^2}{2} (C_s(\theta) \cos \gamma^* + C_a(\theta) \text{sen} \gamma^*) \quad (3.34)$$

Onde, ρ_{ar} é a densidade do ar, D é o diâmetro do cilindro, C_s e C_a são os coeficientes aerodinâmicos de sustentação e arrasto, respectivamente. Medições de coeficientes aerodinâmicos em túnel de vento são realizadas freqüentemente para diversas posições do filete superior em relação a velocidade relativa.

A relação entre os ângulos γ^* e θ é dada por:

$$\theta = \gamma^* + \theta_1 - \phi = \frac{V_{ef} \operatorname{sen} \gamma + \dot{y} + R \dot{\theta} \left((90^\circ - \theta_1 + \phi) - \frac{1}{6} (90^\circ - \theta_1 + \phi)^3 \right)}{V_{ef} \cos \gamma} + \theta_1 - \phi \quad (3.35)$$

A equação do movimento vertical do cilindro pode ser escrita:

$$\ddot{y} + \omega_n^2 y + 2\zeta \omega_n \dot{y} + \frac{F_y}{m} = 0 \quad (3.36)$$

Onde ω_n é a frequência circular natural, ζ é a relação de amortecimento estrutural e m é a massa por unidade de comprimento, todos esses parâmetros relativos ao cabo.

Utilizando os primeiros três termos da série de Taylor, os coeficientes de sustentação e de arrasto com respeito à θ podem ser escritos:

$$C_s(\theta) = A_o + A_1 \theta + \frac{A_2}{2} \theta^2 + \frac{A_3}{6} \theta^3 \quad (3.37)$$

$$C_a(\theta) = B_o + B_1 \theta + \frac{B_2}{2} \theta^2 + \frac{B_3}{6} \theta^3 \quad (3.38)$$

Fazendo a substituição das Equações (3.37) e (3.38) e realizando a expansão dos termos de seno e co-seno com respeito à γ^* , a Equação (3.34) pode ser escrita:

$$F_y = \frac{\rho_{ar} D V_{rel}^2}{2} \left(\left(A_o + A_1 \theta + \frac{A_2}{2} \theta^2 + \frac{A_3}{6} \theta^3 \right) \left(1 - \frac{\gamma^{*2}}{2} \right) + \left(B_o + B_1 \theta + \frac{B_2}{2} \theta^2 + \frac{B_3}{6} \theta^3 \right) \left(\gamma^* - \frac{\gamma^{*3}}{6} \right) \right) \quad (3.39)$$

Com a substituição das Equações (3.29), (3.31), (3.33) em (3.39), temos:

$$F_y = \frac{\rho_{ar} D}{2} (\Gamma_1 R V \dot{\phi} + \Gamma_2 V \dot{y} + \Gamma_3 V^2 \phi) \quad (3.40)$$

Onde, Γ_1 , Γ_2 e Γ_3 são funções da inclinação do cabo, ângulo de incidência do vento, ponto de estagnação do vento, velocidade média do vento, posição estática do filete, do movimento do cabo e movimento do filete, que pode alterar os coeficientes de arrasto e sustentação. Γ_1 , Γ_2 e Γ_3 são encontrados no Anexo A.

A partir das Equações (3.36) e (3.40), obtém-se:

$$\ddot{y} + \omega^2 y + \left(2\zeta\omega + \frac{\rho_{ar} D \Gamma_2 V}{2m} \right) \dot{y} = \frac{\rho_{ar} D}{2m} (\Gamma_1 R V \dot{\phi} + \Gamma_3 V^2 \phi) \quad (3.41)$$

Considerando que a oscilação do filete é harmônica e a frequência do movimento deste é quase a mesma do movimento do cabo, assume-se que a oscilação do filete é dada por:

$$\phi = a \sin \hat{\omega} t \quad (3.42)$$

A amplitude a do movimento do filete é também obtida através de medições em túnel de vento. Substituindo (3.41) em (3.42), temos:

$$\ddot{y} + \omega^2 y + 2\zeta_{total}\omega\dot{y} = \frac{\rho_{ar} D}{2m} (\Gamma_1 R V \hat{\omega} \cos \hat{\omega} t + \Gamma_3 V^2 \sin \hat{\omega} t) = \tilde{F}(t) \quad (3.43)$$

Onde:

$$\zeta_{total} = \zeta + \frac{\rho_{ar} D \Gamma_2 V}{4m\omega} = \zeta + \zeta_a \quad (3.44)$$

e ζ_{total} é a razão de amortecimento total do cilindro, ζ_a é a razão de amortecimento aerodinâmico e $\tilde{F}(t)$ é a força normalizada devido ao movimento do filete.

Os autores consideram que o modelo analítico é capaz de prever as vibrações de cilindros inclinados com filete em movimento a partir da aplicação do modelo para alguns ensaios de modelos de cabos com filetes reais e artificiais.

3.8.1.4 Modelo de Wilde e Witkowski (2003)

O modelo de 1GDL de Wilde e Witkowski (2003) estima as amplitudes de vibrações induzidas por chuva e vento em cabos de pontes estaiadas com a consideração do efeito do filete superior apenas. Este modelo tem o mesmo princípio do modelo de Wang e Xu (2003), no entanto, uma consideração é diferenciada neste caso: o modelo é descrito por uma função que demonstra a dependência da amplitude do filete sobre a velocidade do vento, portanto, a amplitude do filete, pode ser escrita:

$$a(V) = a_1 e^{\left(-\frac{(V-V_{max})^2}{a_2} \right)} \quad (3.45)$$

Onde, a_1 , a_2 e $V_{m\acute{a}x}$ são constantes a serem determinadas para dado cabo. $V_{m\acute{a}x}$ é a velocidade onde observa-se a maior relação oscilação do filete / oscilação do cabo. Yamaguchi (1990) mostrou que o pico da oscilação desta relação coincide com o pico de oscilação do cabo. Observe que para $V = V_{m\acute{a}x}$ a amplitude do filete a é igual a a_1 e para outros valores de V , este gradualmente desaparece.

No modelo descrito acima não é possível avaliar as componentes de força excitante e de amortecimento aerodinâmicos. Portanto, a fórmula de força aerodinâmica é expandida e expressa em termos da velocidade do cabo \dot{y} . São considerados a seguir três modelos. O modelo 1 assume linearização de todas as funções trigonométricas e o modelo 2 assume linearização dos coeficientes de força variável.

3.8.1.4.1 Modelo 1

A expansão é baseada nas considerações seguintes e em simulações numéricas preliminares.

- a) a segunda e mais alta potência da amplitude do filete, a , é pequena em comparação com a e então são negligenciados;
- b) o termo $R\dot{\phi}\cos(90^\circ - \theta_1 + \phi)$ nas Equações (3.32) e (3.33) é muito menor que $V\cos\gamma$ e considerável desprezível;
- c) a função da Equação (3.32) é expandida em séries de Taylor retendo somente o termo linear. Da mesma forma a função sen e cos na Equação (3.34) é expandida sobre γ retendo somente os termos lineares.

Como resultado, temos:

$$V_{rel} = \sqrt{(V_{ef}\cos\gamma)^2 + (V_{ef}\text{sen}\gamma + \dot{y} + R\dot{\phi}\text{sen}(90^\circ - \theta_1 + \phi))^2} \quad (3.46)$$

$$\gamma^* \cong \tan^{-1}(\gamma) + \frac{V_{ef}\text{sen}\gamma + \dot{y} + R\dot{\phi}\text{sen}(90^\circ - \theta_1 + \phi)}{(V_{ef}\cos\gamma - \gamma)(1 + \gamma^2)} \quad (3.47)$$

$$F_y = \frac{\rho_{ar}DV_{rel}^2}{2} (C_s(\theta)(\cos\gamma - \text{sen}\gamma(\gamma^* - \gamma)) + C_a(\theta)(\text{sen}\gamma + \cos\gamma(\gamma^* - \gamma))) \quad (3.48)$$

Substituindo as Equações (3.46) e (3.47) em (3.48) obtém-se o polinômio de terceira ordem com respeito a \dot{y} . A Equação linearizada parcialmente torna-se:

$$\ddot{y} + \omega^2 y + 2\zeta\omega\dot{y} = \frac{1}{m}(F_{amort}(t) + F_{exc}(t)) \quad (3.49)$$

Onde as forças, aerodinâmica e de excitação são escritas:

$$F_{amort}(t) = \dot{y}(Z_1 + aZ_2(t)) \quad (3.50)$$

$$F_{exc}(t) = F_1 + aF_2(t) \quad (3.51)$$

Os coeficientes das Equações (3.50) e (3.51) são dados no Anexo B. Dividindo-se o lado direito da Equação (3.50) por $2\dot{y}m\omega$, obtém-se a fórmula para razão de amortecimento aerodinâmico.

$$\zeta_{aero} = \frac{Z_1 + aZ_2(t)}{2m\omega} \quad (3.52)$$

A análise de Z_1 e Z_2 indica que a razão de amortecimento depende do tempo. Ao contrário do cabo sem filete, o que terá razão de amortecimento dependendo apenas do coeficiente de arrasto. Aqui, devido a presença e oscilação do filete, o amortecimento aerodinâmico será função de C_a , C_s e do tempo. O modelo 1 é aplicável a problemas com coeficientes ligeiramente variáveis com o ângulo instantâneo θ .

3.8.1.4.2 Modelo 2

Diferente dos modelos anteriores, este assume que as funções de C_a e C_s podem ser representadas com uma função linear dos ângulos θ .

$$C_a = A_1\theta + A_2 \quad (3.53)$$

$$C_s = S_1\theta + S_2 \quad (3.54)$$

Onde os coeficientes são definidos por:

$$A_1 = \left. \frac{dC_a}{d\theta} \right|_{\theta=\theta^{eq}} ; A_2 = C_a(\theta^{eq}) \quad (3.55)$$

$$S_1 = \left. \frac{dC_s}{d\theta} \right|_{\theta=\theta^{eq}} ; S_2 = C_s(\theta^{eq}) \quad (3.56)$$

Sendo,

$$\theta^{eq} = \gamma + \theta_1 \quad (3.57)$$

A Equação (3.57) é dada uma vez que o ponto de equilíbrio do ângulo γ^* dado por (3.47), pode ser assumido como γ , e desde que γ seja uma função da inclinação e do ângulo de ataque, θ^{eq} dependerá apenas da velocidade V . Os coeficientes A_1 , A_2 , S_1 , S_2 e θ^{eq} são determinados para cada valor de V . O termo $\dot{\theta} \text{sen}(90^\circ - \theta_1 + a \text{sen}(\omega t))$ na Equação (3.47), na expansão de Taylor, é substituído pelo termo $a \omega \cos(\omega t) \sin(90^\circ - \theta_1)$. Então a expressão para a força aerodinâmica torna-se:

$$F_y = \frac{\rho_{ar} D V_{rel}^2}{2} \left((S_1 \theta + S_2) (\cos \gamma - \text{sen} \gamma (\gamma^* - \gamma)) + (A_1 \theta + A_2) (\text{sen} \gamma + \cos \gamma (\gamma^* - \gamma)) \right) \quad (3.58)$$

Agrupando a fórmula acima em termos de força de amortecimento e força de excitação, temos:

$$F_{amort}(t) = \dot{y}(Z_3 + A_{amort} \text{sen}(\omega t + \theta_{amort})) \quad (3.59)$$

$$F_{exc}(t) = F_3 + A_{exc} \text{sen}(\omega t + \theta_{exc}) \quad (3.60)$$

Onde, os coeficientes (3.59) e (3.60) são funções de γ , A_1 , A_2 , S_1 , S_2 , θ^{eq} e a e são definidos no Anexo B. Simulações numéricas, baseadas nas Equações (3.59) e (3.60), revelam que a parte da oscilação da força de amortecimento e o termo constante F_3 na expressão para força de excitação tem um efeito desprezível sobre a resposta do cabo, portanto:

$$F_{amort}(t) = Z_3 \ddot{y} \quad (3.61)$$

$$F_{exc}(t) = A_{exc} \text{sen}(\omega t + \theta_{exc}) \quad (3.62)$$

A fórmula da razão de amortecimento aerodinâmico é então:

$$\zeta_{aero} = \frac{Z_3}{2m\omega} \quad (3.63)$$

A Equação do movimento então resulta:

$$\ddot{y} + \omega^2 y + \dot{y} \left(2\zeta\omega + \frac{Z_3}{m} \right) = \frac{1}{m} A_{exc} \text{sen}(\omega t + \theta_{exc}) \quad (3.64)$$

As Equações para os coeficientes de amplitude, A_{exc} e de fase, θ_{exc} são dadas no Anexo B.

3.8.2 Modelos de 2 graus de liberdade

3.8.2.1 Mecanismo torsional, Yamaguchi (1990)

3.8.2.1.1 Formulação de galope de 2GDL.

O modelo considera o filete superior como um pequeno cilindro de diâmetro d movendo-se na direção circunferencial da seção transversal do cilindro maior de diâmetro D (Figura 3.36).

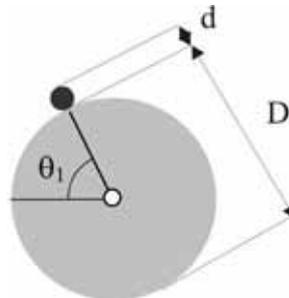


Figura 3.36 – Modelo analítico de cabo com filete superior (adaptado de Yamaguchi, 1990).

Os 2 graus de liberdade considerados são o de translação vertical (perpendicular ao escoamento) e de rotação (representando o movimento do filete superior). Não é considerada no modelo a presença do filete inferior. A equação do movimento vertical é mostrada abaixo:

$$m\ddot{y} + ky = F_y \quad (3.65)$$

Onde, m é a massa do cabo por unidade de comprimento e k é a constante de rigidez da mola. A massa do filete é negligenciada em relação à massa do cabo e o termo da força de amortecimento do cabo é omitida na (3.65) por simplificação.

Para o movimento do filete superior na direção circunferencial do cilindro, somente a força de inércia é considerada no equilíbrio com o momento aerodinâmico variável. Portanto, a equação do movimento do filete superior é dada por:

$$I\ddot{\phi} = M \quad (3.66)$$

Onde I é o momento polar de inércia por unidade de comprimento de filete sobre o cabo e M é o momento aerodinâmico variável por unidade de comprimento.

O cabo translada verticalmente com velocidade \dot{y} e o filete se move na direção circunferencial sobre a seção do cabo com velocidade angular $\dot{\phi}$ conforme Figura 3.37.

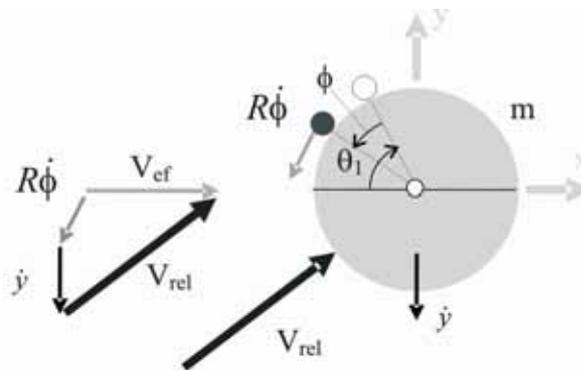


Figura 3.37 – Velocidade relativa para translação do cabo com rotação do filete (adaptado de Yamaguchi, 1990).

Onde R é dado por $R=(d+D)/2$. A velocidade relativa, $\dot{\phi}$, e o ângulo de ataque relativo do vento, γ^* , são dados por:

$$V_{rel} = \frac{V_{ef} R \dot{\phi} (90^\circ - \theta_1 + \phi)}{V_{ef} \cos \gamma^*} \quad (3.67)$$

$$\gamma^* = \tan^{-1} \frac{\dot{y} + R \dot{\phi} \sin(90^\circ - \theta_1 + \phi)}{V_{ef} + R \dot{\phi} \cos(90^\circ - \theta_1 + \phi)} \quad (3.68)$$

As forças aerodinâmicas são expressas em função da velocidade relativa do vento e ângulo de ataque relativo como se pode ver nas equações abaixo.

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_{ar} V_{rel}^2 (d + D) (C_s(\theta) \cos \gamma^* - C_a(\theta) \sin \gamma^*) \quad (3.69)$$

$$M = \frac{I}{2} \rho_{ar} V_{rel}^2 (d + D)^2 C_M(\theta) \quad (3.70)$$

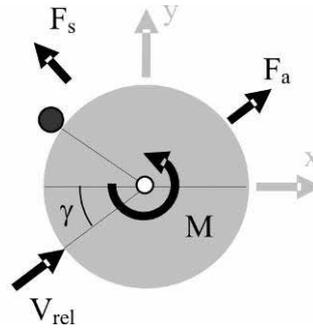


Figura 3.38 – Ação das forças quasi-permanente (adaptado de Yamaguchi, 1990).

3.8.2.1.2 Freqüência natural e amortecimento aerodinâmico modal de modelo de 2GDL

Se as máximas velocidades do cabo e do filete são muito menores comparadas às velocidades do escoamento, então, $\dot{y}/V_{ef} \ll 1$ e $R\dot{\phi}/V_{ef} \ll 1$, pode ser dito que, $V_{rel} \approx V_{ef}$:

Para pequenas alterações do ângulo de ataque relativo, γ^* , as funções (3.69) e (3.70) são expandidas em torno de $\theta = \phi = 0$. A equação linearizada do movimento do sistema de 2GDL é escrita:

$$[M] \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + [C] \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{Bmatrix} + [K] \begin{Bmatrix} y \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.71)$$

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, [K] = \begin{bmatrix} \omega^2 & \frac{1}{m} \frac{1}{2} \rho_{ar} (d + D) V_{ef}^2 \frac{dC_s}{d\theta} \\ 0 & -\frac{1}{I} \frac{1}{2} \rho_{ar} (d + D)^2 V_{ef}^2 \frac{dC_M}{d\theta} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$[C] = \frac{1}{2} \rho_{ar} (d + D) V_{ef} \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} \left\{ C_{a+} \frac{dC_s}{d\theta} \right\} & -\frac{(d + D) \text{sen}(\theta_1 - 90^\circ)}{2m} \left\{ C_{a+} \frac{dC_s}{d\theta} \right\} \\ \frac{(d + D) dC_M}{I d\theta} & \frac{(d + D)^2 \text{sen}(\theta_1 - 90^\circ) dC_M}{2I d\theta} \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Através da análise de autovalores, calculam-se as freqüências e os coeficientes de amortecimento aerodinâmico associados.

3.8.3 Modelos para determinação das características dos filetes

3.8.3.1 Modelo de estimativa de posição de filetes d'água ao redor de cilindros, Lemaitre et al. (2006)

3.8.3.1.1 Dinâmica de um filete sobre carregamento do vento

Este modelo investiga as condições para o aparecimento de filetes d'água e a relação entre a posição dos filetes e parâmetros físicos do sistema como, velocidade do vento, tensão superficial, viscosidade da água, espessura dos filetes, diâmetro e inclinação do cabo. Propõe-se um critério de estimativa da posição dos filetes d'água sobre a superfície de cilindros, onde o número de Froude é o parâmetro de controle. Para análise da formação dos filetes d'água é considerado que estes fluem ao longo da superfície do cabo na direção de seu eixo. A forma do filete é influenciada pelos efeitos da gravidade, da tensão superficial e do carregamento do vento. É considerada uma configuração simples do cabo onde o cilindro encontra-se inclinado contra a direção do vento ($\beta = 90^\circ$).

As forças que agem sobre o filete são: gravidade, de magnitude $g \cos \alpha$, e carregamento do vento de velocidade uniforme, de magnitude $V \sin \alpha$, ambas decompostas na direção do vento e no plano da seção transversal do cabo. A resultante do vento é definida como pressão normal local, $p(\theta_1)$ e pressão tangencial local, $\tau(\theta_1)$, agindo respectivamente na direção normal e tangencial á superfície do filete (Figura 3.39).

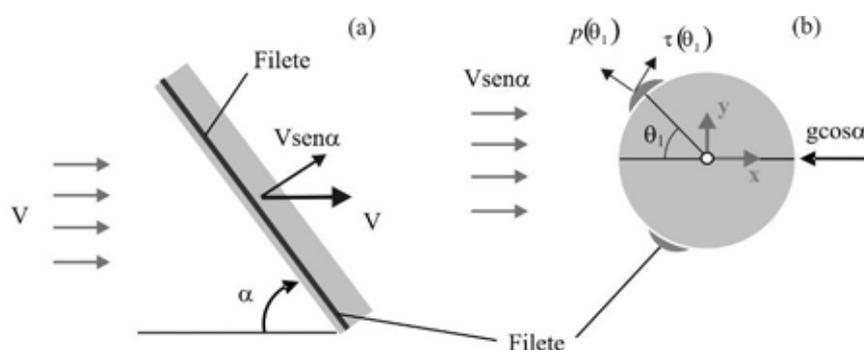


Figura 3.39 – Filete fluindo ao longo do cilindro sujeito ao vento (a) vista lateral; (b) seção transversal (adaptada de Lemaitre et al., 2006).

Lemaitre et al. (2006) basearam-se num modelo utilizado por Reisfeld e Bankoff (1992). Estes autores derivaram a equação do movimento de um filete líquido sobre um cilindro sujeito à ação da gravidade e tensão superficial. No modelo atual, de Lemaitre et al. (2006) acrescentaram na análise as pressões e forças de atrito causadas pelo ar. Foi negligenciado o efeito da velocidade da água na direção do eixo do cilindro, normal ao plano da Figura 3.39b. Apresentam-se a seguir as quantidades adimensionais necessárias para o entendimento do modelo:

$$G = \frac{gh_0^3}{3\nu^2}; S = \frac{\sigma_s h_0^4}{3\rho_{\text{agua}} \nu^2 R^3}; \rho^* = \frac{\rho_{\text{ar}}}{\rho_{\text{agua}}}; P = \frac{V^2 h_0^3}{6\nu^2 R}; c_p = \frac{2p}{\rho_{\text{ar}} V^2}; C_\tau = \frac{2\tau}{\rho_{\text{ar}} V^2}; T = \frac{\nu}{Rh_0} \quad (3.74)$$

$$\varepsilon = \frac{h_0}{R}, H = \frac{h}{h_0}$$

Onde, h_0 é uma referência da espessura do filete, σ_s é a tensão superficial, ρ_{agua} é a massa específica da água, c_p é o coeficiente de pressão, C_τ é o coeficiente de atrito.

A equação que governa a dinâmica do filete é dada por:

$$H_{,T} = G \cos \alpha [H^3 \text{sen} \theta]_{, \theta} - S [H^3 (H_{, \theta} + H_{, \theta \theta \theta})]_{, \theta} + \rho^* P \left[H^3 C_{p, \theta} - H^2 \frac{3}{2\varepsilon} C_\tau \right]_{, \theta} \quad (3.75)$$

Onde, (,) significa diferenciação. Outra forma da Equação (3.75) e de uso mais prático pode ser escrita, fazendo-se $T^* = GT \cos \alpha$:

$$H_{,T^*} = [H^3 \text{sen} \theta]_{, \theta} - B_0^{-1} [H^3 (H_{, \theta} + H_{, \theta \theta \theta})]_{, \theta} + \frac{1}{2} \rho^* Fr^2 \left[H^3 C_{p, \theta} - H^2 \frac{3}{2\varepsilon} C_\tau \right]_{, \theta} \quad (3.76)$$

Onde, o número de Bond é dado por $B_0 = G/S = \rho_{\text{agua}} g R^3 \cos \alpha / (\sigma_s h_0)$ e $Fr^2 = P/G = V^2 / (gR \cos \alpha)$ é o número de Froude.

3.8.3.1.2 Posição dos filetes

Se um filete uniforme sobre o cilindro está sujeito ao efeito de gravidade e carregamento do vento, sua evolução é governada pela Equação (3.76). Para estimar a

localização dos filetes, pode-se simplesmente comparar a razão de crescimento local da espessura do filete, como definido pelo lado direito da Equação (3.76), sobre todos os pontos do cilindro. A razão de crescimento, sobre um filete de espessura uniforme $H=1$ reduz-se a:

$$r(\theta) = \cos \theta + \frac{1}{2} \rho^* Fr^2 \left[C_{p,\theta\theta} - \frac{3}{2\varepsilon} C_{\tau,\theta} \right] \quad (3.77)$$

Assumimos que o filete crescerá e estabilizará a através de efeitos de não linearidade a localização denominada de θ_{\max} , onde a razão de crescimento local do filete uniforme, $r(\theta)$, é máxima.

Utilizando-se da Equação (3.77) a razão de crescimento é plotada em função da posição em volta do cilindro, para vários valores de número de Froude. Para valores de $\rho^* Fr^2 \ll 1$, a gravidade domina, para valores de $\rho^* Fr^2 \gg 1$, a ação do vento domina. Na Figura 3.40a, $\rho^* Fr^2 = 0$, portanto, o filete resulta da gravidade, crescimento a $\theta_{\max} = 0$. Na Figura 3.40b, $\rho^* Fr^2 = 0,01$ e Figura 3.40c, o filete resulta da ação do vento, crescimento a $\theta_{\max} = 68,4^\circ$.

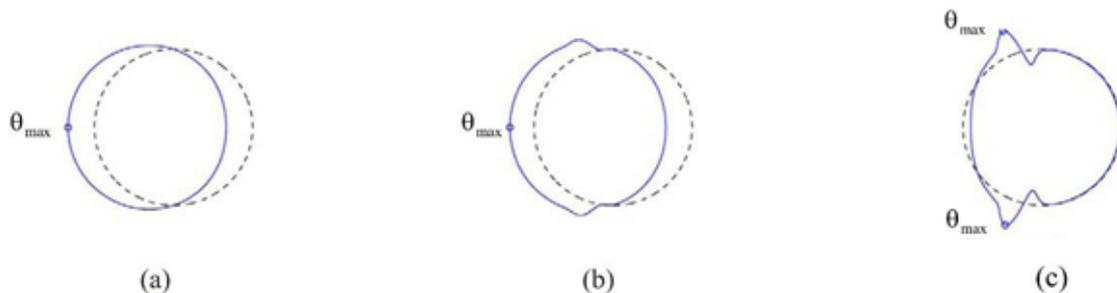


Figura 3.40 – Comparação da razão de crescimento local de um filete uniforme em volta do cilindro sob ação combinada de gravidade e vento (a) $\rho^* Fr^2 = 0$, (b) $\rho^* Fr^2 = 0,01$ e (c) $\rho^* Fr^2 = 10$ (Lemaitre et al., 2006).

3.8.4 MODELOS TEÓRICOS DE CABOS ESTAIADOS 3D

3.8.4.1 Modelo de estimativa de resposta de cabos em três dimensões (Li e Gu, 2007)

Este modelo teórico não considera um segmento rígido, o qual apenas simula a resposta do cabo para um modo de vibração. Em adicional, a variação da velocidade do vento

ao longo do comprimento do cabo não pode ser levada em consideração para um segmento rígido de cabo. Vibração induzida por chuva e vento de cabo estaiado contínuo tridimensional com filete em movimento senoidal é desenvolvido neste modelo. A seguir estão listadas algumas considerações sobre o modelo:

- a) é considerada a variação da velocidade do vento ao longo do cabo, ou seja, o perfil de velocidades média do vento;
- b) é utilizada a teoria quase-permanente para as forças do vento;
- c) apenas o filete superior é considerado;
- d) o filete oscila seguindo uma lei senoidal;
- e) o efeito do escoamento axial é negligenciado;
- f) a rigidez a flexão e torção são negligenciadas;
- g) as relações constitutivas do cabo estaiado seguem a lei de Hook, e as tensões na seção do cabo são uniformes.

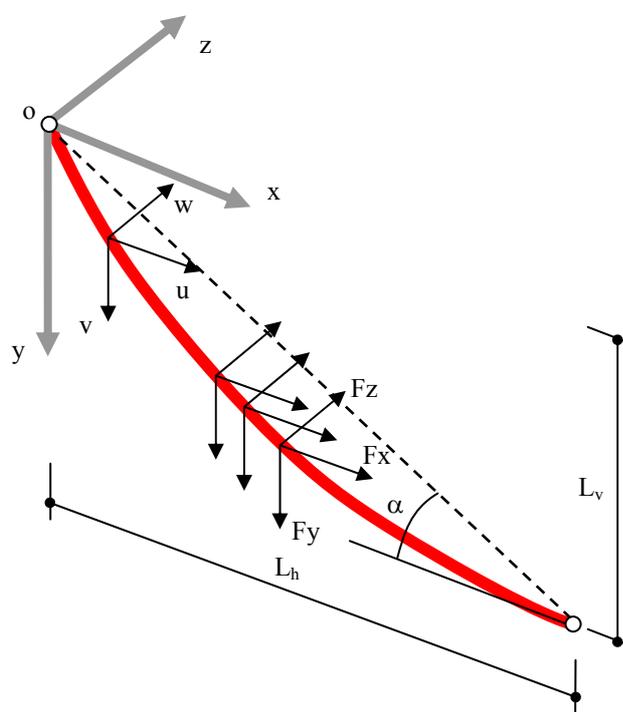


Figura 3.41 – Representação do cabo estaiado contínuo em três dimensões (Li e Gu, 2007).

A Figura 3.41 mostra o sistema de coordenadas x e y no perfil estático do cabo estaiado tendo como origem do sistema cartesiano o suporte do cabo no topo da torre, portanto, as equações de movimento do cabo podem ser escritas:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dx}{ds} + \frac{\partial u}{\partial s} \right) \right] + F_x(x, t) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.78)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{dy}{ds} + \frac{\partial v}{\partial s} \right) \right] + F_y(x, t) = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial v}{\partial t} - mg \quad (3.79)$$

$$\frac{\partial}{\partial s} \left[(T + \tau) \left(\frac{\partial w}{\partial s} \right) \right] + F_z(x, t) = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.80)$$

Onde, T e τ são, respectivamente, a tensão estática e dinâmica do cabo, u , v e w são as componentes de deslocamento dinâmico nas direções, x , y e z , respectivamente, y é o perfil estático do cabo, s é a coordenada curvilínea, $F_x(x, t)$, $F_y(x, t)$ e $F_z(x, t)$ são as forças aerodinâmicas por unidade de comprimento do cabo nas direções, x , y e z , respectivamente, m é a massa por unidade de comprimento, c_1 e c_2 são, respectivamente, os coeficientes de amortecimento estrutural do cabo no plano e fora do plano xy e g é a aceleração da gravidade.

Introduzindo as seguintes transformações:

$$\frac{\partial}{\partial s} \frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x}, H = T \frac{dx}{ds}, h = \tau \frac{dx}{ds}, \frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) = -mg \quad (3.81)$$

e considerando as equações de equilíbrio estático, as Equações (3.78), (3.79) e (3.80) tornam-se:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left[(H + h) \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + F_x(x, t) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.82)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left[(H + h) \frac{\partial v}{\partial x} + h y_x \right] + F_y(x, t) = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.83)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left[(H + h) \frac{\partial w}{\partial x} \right] + F_z(x, t) = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.84)$$

Onde, H é a componente horizontal da tensão estática no cabo no plano xy , h é a componente horizontal da tensão dinâmica no cabo, y_x é a derivada da configuração estática

y em relação à x . A relação entre tensão dinâmica no cabo e deslocamento dinâmico no cabo em coordenadas Lagrangianas pode ser expressa por:

$$\tau = EA \frac{\overline{ds}^2 - ds^2}{2ds^2} \quad (3.85)$$

Onde, E é o módulo de elasticidade do cabo, A é a área da seção transversal do cabo, \overline{ds} e ds são os comprimentos de arco dos segmentos de cabo deformados e indeformados, referindo-se ao perfil estático do cabo e perfil dinâmico do cabo, respectivamente. De acordo com a relação geométrica vista em H. Max Irvine (1981) *apud* Li e Gu (2007), temos:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (3.86)$$

$$\overline{ds}^2 = (dx + \partial u)^2 + (dy + \partial v)^2 + \partial w^2$$

Combinando as Equações (3.81) e (3.86), a tensão horizontal no cabo pode ser escrita por:

$$h = \frac{EA}{(1 + y_x^2)^{\frac{3}{2}}} \times \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} + y_x \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.87)$$

Como no estudo são consideradas pequenas amplitudes de vibração, os termos de mais alta ordem da Equação (3.87) pode ser negligenciados. Portanto, a Equação (3.87) torna-se:

$$h = \frac{EA}{(1 + y_x^2)^{\frac{3}{2}}} \times \left[\frac{\partial u}{\partial x} + y_x \frac{\partial v}{\partial x} \right] \quad (3.88)$$

Substituindo a Equação (3.87) nas Equações (3.82), (3.83) e (3.84), tem-se:

$$\frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(H + \frac{EA}{(1 + y_x^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{EA y_x}{(1 + y_x^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{\partial v}{\partial x} \right] + F_x(x, t) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.89)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(H + \frac{EA y_x}{(1 + y_x^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{EA y_x}{(1 + y_x^2)^{\frac{3}{2}}} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + F_y(x, t) = m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.90)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + y_x^2}} \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial w}{\partial x} \right] + F_z(x, t) = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial w}{\partial t} \quad (3.91)$$

Para o cabo inclinado com pequena amplitude, o perfil estático pode ser aproximado por uma curva parabólica, conforme Equação (3.92) e Figura 3.42.

$$y = -\frac{mg}{2H} \sec \alpha x^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{mgL_h}{H} \sec \alpha + 2 \tan \alpha \right) x \quad (3.92)$$

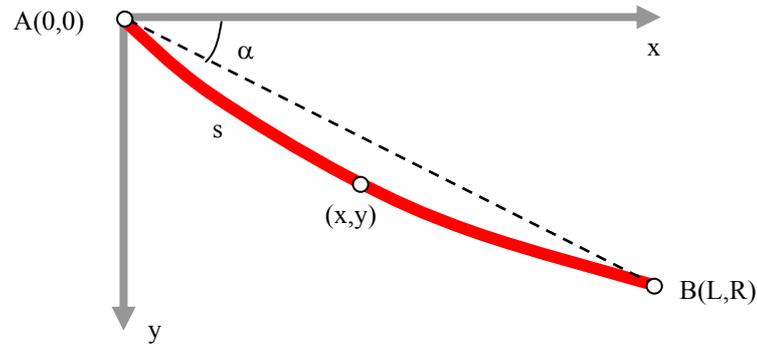


Figura 3.42 – Perfil estático do cabo (Li e Gu, 2007).

Baseado na Figura 3.33, as forças aerodinâmicas são expressas então:

$$F_x(x,t) = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V^2 [C_s(\theta) \cos(\gamma^*) + C_a(\theta) \sin(\gamma^*)] \sin \alpha \quad (3.93)$$

$$F_y(x,t) = -\frac{1}{2} \rho_{ar} D V^2 [C_s(\theta) \cos(\gamma^*) + C_a(\theta) \sin(\gamma^*)] \cos \alpha \quad (3.94)$$

$$F_z(x,t) = \frac{1}{2} \rho_{ar} D V^2 [-C_s(\theta) \sin(\gamma^*) + C_a(\theta) \cos(\gamma^*)] \quad (3.95)$$

Onde,

$$\gamma^* = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{v} + V \sin \gamma}{V \cos \gamma} \right) \quad (3.96)$$

θ , V_{ef} e γ são definidos conforme Equações (3.7), (3.29) e (3.30).

Li e Gu (2007) utilizaram a curva de coeficientes de arrasto e de sustentação para cabo inclinado a $\alpha = 30^\circ$ e $\beta = 35^\circ$ encontrados na literatura.

A variação da posição do filete superior com a velocidade do vento para cabo a $\alpha = 30^\circ$ e $\beta = 35^\circ$ pode ser expressa através da Equação (3.97).

$$\theta_1 = 90 - \left(365,4807 \times e^{\left(\frac{-V}{2,3186} \right)^{+6,9787}} \right) \quad (3.97)$$

A oscilação do filete em torno da posição de equilíbrio é dada pela Equação (3.41), onde:

$$a(V) = a_1 \times e^{\left(\frac{-(V-V_{m\acute{a}x})^2}{a_2} \right)} \quad (3.98)$$

Li e Gu (2007) utilizaram o Método das Diferenças Finitas para solução das equações de movimento e determinação da resposta das vibrações induzidas por chuva e vento no cabo A20 da ponte nº 2 de Nanjing sobre o rio Yangtze.

3.8.5 Método probabilístico de ocorrência de vibrações induzidas por chuva e vento

Xu et al. (2007a) propuseram um método probabilístico que incorpora a análise estatística da velocidade do vento, direção do vento e intensidade de chuva no local da ponte com a análise teórica do intervalo de ocorrência de vibrações induzidas por chuva e vento. O método avalia probabilidade e risco anual de estais de pontes estaiadas sujeitos às vibrações induzidas por chuva e vento. Pode-se, portanto, a partir dos resultados obtidos com este método, determinar a necessidade de se utilizar sistemas mitigadores de vibrações.

A estrutura proposta consiste de quatro passos básicos:

- a) determinar a junção da função densidade de probabilidade (FDP) da velocidade e direção do vento no local da ponte através de análise estatística de dados do vento;
- b) determinar a FDP da intensidade de chuva para o local da ponte através de análise estatística de dados da chuva;
- c) realizar análise teórica das vibrações induzidas por chuva e vento utilizando modelos teóricos desenvolvidos para determinação de intervalos de velocidade e direção do vento em que ocorrem grandes vibrações nos cabos;
- d) estimar a probabilidade de ocorrência e risco baseado na teoria da probabilidade.

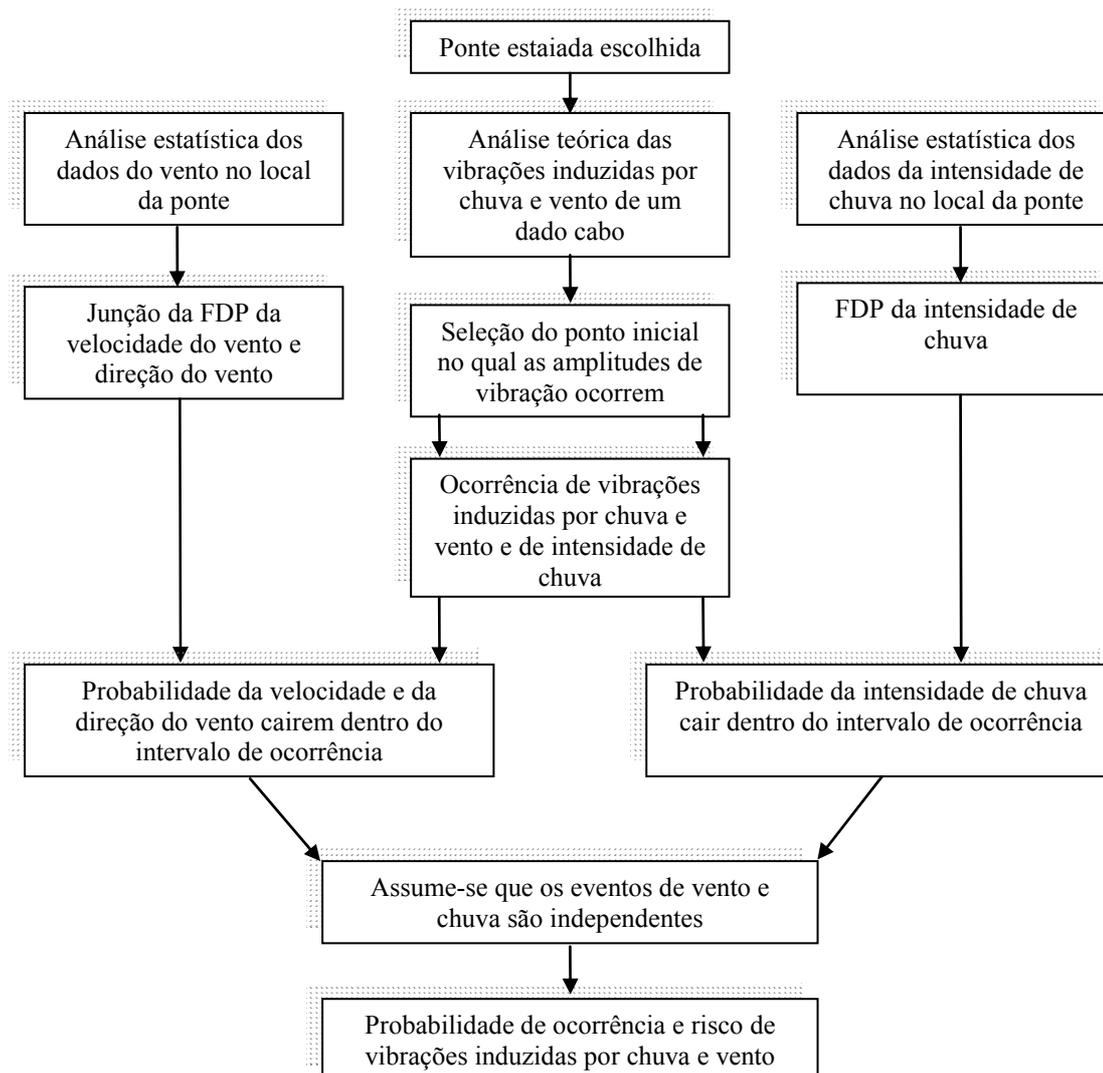


Figura 3.43 – Fluxograma do método probabilístico proposto (Xu et al, 2007).

3.8.6 Junção da FDP da velocidade do vento e direção do vento

Uma junção de FDP é adotada para uma população completa de velocidade do vento e direção do vento baseada em duas considerações:

- a) a distribuição da componente de velocidade do vento para uma dada direção do vento segue a distribuição de Weibull²;

² Na teoria da probabilidade e na estatística, a distribuição de Weibull é uma distribuição contínua da probabilidade com a função da densidade de probabilidade. A distribuição de Weibull é uma das distribuições mais utilizadas na vida da engenharia da confiabilidade.

b) a interdependência da distribuição do vento em diferentes direções do vento pode ser refletida pela frequência relativa de ocorrência do vento.

$$P_{V,\beta}(V, \beta) = P_\beta(\beta) \left\{ 1 - e^{-\left[\frac{V}{\eta(\beta)}\right]^{\kappa(\beta)}} \right\} = \iint f_\beta(\beta) f_{V,\beta}(V, \kappa(\beta), \eta(\beta)) dV d\beta \quad (3.99)$$

$$f_{V,\beta}(V, \kappa(\beta), \eta(\beta)) = \frac{\kappa(\beta)}{\eta(\beta)} \left(\frac{V}{\eta(\beta)} \right)^{\kappa(\beta)-1} \times e^{-\left[\frac{V}{\eta(\beta)}\right]^{\kappa(\beta)}} \quad (3.100)$$

$$P_\beta(\beta) = \int_0^\beta f_\beta(\beta) d\beta \quad (3.101)$$

Onde, V é a velocidade do vento, $P_\beta(\beta)$ é a frequência relativa de ocorrência do vento na direção β ; $0 \leq \beta < 180^\circ$, η (>0) é o parâmetro de escala com a mesma unidade da velocidade do vento, κ (>0) é o parâmetro de forma adimensional. A frequência de ocorrência $P_\beta(\beta)$ bem como os parâmetros de distribuição $\eta(\beta)$ e $\kappa(\beta)$, podem ser estimados utilizando dados de registros de vento no local da ponte.

3.8.7 FDP da intensidade de chuva

A análise estatística dos dados de chuva no local da ponte é necessária para determinar a FDP da intensidade de chuva, pela qual a probabilidade do intervalo de ocorrência de chuva a qual as vibrações do cabo aumentam pode ser identificada.

$$f_i(i) = \frac{\kappa}{\eta} \left(\frac{i}{\eta} \right)^{\kappa-1} \times e^{-\left[\frac{i}{\eta}\right]^\kappa} \quad (3.102)$$

Onde, i é a intensidade de chuva.

3.8.8 Intervalo de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento

O intervalo de ocorrência da velocidade e direção do vento em que ocorrerá vibração dos cabos com grandes amplitudes, pode ser calculado com base em modelos teóricos desenvolvidos. Calculam-se os valores de pico de amplitudes, $A(V, \beta)$, para várias velocidades médias e direção do vento. Com $A(V, \beta)$ definido, determina-se um valor A_s , o

qual as vibrações induzidas por chuva e vento são consideradas inaceitáveis. O intervalo de ocorrência da velocidade do vento e direção do vento o qual as vibrações induzidas por chuva e vento excedem A_s pode ser escrito:

$$\Omega_{V,\beta}^{A_s} = \{V \in [V_1, V_2] \cap \beta \in [\beta_1, \beta_2] \mid A(V, \beta) \geq A_s\} \quad (3.103)$$

Onde, V_1 e V_2 , β_1 e β_2 , são os limites inferior e superior do intervalo da velocidade e da direção do vento, respectivamente, as quais ocorrem vibrações acima de A_s .

3.8.9 Probabilidade de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento

A probabilidade da velocidade e direção do vento caírem no intervalo de ocorrência $\Omega_{V,\beta}^{A_s}$ é calculada da seguinte forma:

$$P_{V,\beta}\{(V, \beta) \in \Omega_{V,\beta}^{A_s}\} = \int_{\Omega_{V,\beta}^{A_s}} \int f_\beta(\beta) f_{V,\beta}(V, \kappa(\beta), \eta(\beta)) dV d\beta \quad (3.104)$$

Ω_i representa o intervalo de ocorrência da intensidade de chuva para as vibrações induzidas por chuva e vento. A probabilidade da intensidade de chuva no intervalo de ocorrência Ω_i é calculada por:

$$P_i(B \mid A) = P_i(B \in \Omega_i) = \int_{\Omega_i} f_i(i) di \quad (3.105)$$

A probabilidade de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento com amplitudes acima de A_s são calculadas:

$$P\{(V, \beta) \in \Omega_{V,\beta}^{A_s} \cap B \in \Omega_i\} = P_i(A) P_i(B \in \Omega_i) P_{V,\beta}\{(V, \beta) \in \Omega_{V,\beta}^{A_s} \mid B \in \Omega_i\} \quad (3.106)$$

Assumindo que a ocorrência dos eventos de chuva e vento são independentes a Equação (3.106) pode ser escrita:

$$P\{(V, \beta) \in \Omega_{V,\beta}^{A_s} \cap B \in \Omega_i\} = P_i(A) P_i(B \in \Omega_i) P_{V,\beta}\{(V, \beta) \in \Omega_{V,\beta}^{A_s}\} \quad (3.107)$$

Em termos de FDP da velocidade do vento, direção do vento e intensidade de chuva, a Equação (3.107) pode então ser escrita:

$$P\{(V, \beta) \in \Omega_{V, \beta}^{A_s} \cap B \in \Omega_i\} = P_i(A) \int_{\Omega_i} f_i(i) di \int_{\Omega_{V, \beta}^{A_s}} f_\beta(\beta) f_{V, \beta}(V, \kappa(\beta), \eta(\beta)) dV d\beta \quad (3.108)$$

Em Xu et al. (2007a) encontra-se exemplo prático para um cabo estaiado de todos os passos apresentados anteriormente.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA

Semelhança em um sentido geral é a indicação de uma relação conhecida entre dois fenômenos. Na mecânica dos fluidos, esta é usualmente a relação entre o escoamento em escala natural e outro em escala reduzida, mas com contornos geometricamente semelhantes (Shames, 1973)

É fundamental que o modelo e o protótipo apresentem correspondência no comportamento de ambos. É necessário que sejam satisfeitas as condições de semelhança as quais são descritas a seguir (Blessmann, 1990):

- a) Semelhança geométrica: corpos que possuem contornos de geometria análoga, ex.: formas semelhantes, posicionadas da mesma forma em relação ao escoamento, semelhança de detalhes e rugosidade;
- b) Semelhança cinemática: distribuição de velocidades e turbilhonamento análogos. Dois escoamentos que possuem linhas de corrente geometricamente semelhantes;
- c) Semelhança dinâmica: as forças sobre dois pontos correspondentes do escoamento possuem uma relação constante, como por exemplo o número de Reynolds.

4.2 MODELOS REDUZIDOS DE PONTES

A determinação das características do escoamento em volta de estruturas em túnel de vento se faz necessária quando não se tem estudos teóricos suficientes para se prever o comportamento dessas estruturas. Podem ser utilizados modelos em escala natural ou modelos em escala reduzida dependendo do espaço disponível no interior do túnel.

Para obtenção do comportamento aerodinâmico de estruturas de pontes em túnel de vento pode-se utilizar três tipos de ensaios. São conhecidos como ensaios de modelo completo, modelo seccional e modelo de segmentos tensionados.

- a) Modelo completo: modelo similar geometricamente a uma ponte completa. A construção de um modelo completo é difícil e de custo relativamente elevado. Com este tipo de modelo os efeitos tridimensionais de rajadas podem ser observados, como também os efeitos em toda a fase de construção da ponte podem ser estudados;
- b) Modelo seccional: Este tipo permite a representação de uma porção rígida do elemento estrutural da ponte a ser estudado separadamente. Estes modelos são relativamente baratos e podem ser construídos em escala reduzida ou em escala real.
- c) Modelo de segmentos tensionados: Este modelo consiste em segmentos da seção transversal do elemento estrutural a ser estudado, sendo que estes devem cumprir as condições de semelhança através da distribuição de massa e de inércia.

4.3 ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

Diversos túneis têm sido construídos ou adaptados por laboratórios com a finalidade de aplicação na construção civil. Podemos citar os túneis para fins aeronáuticos e os que simulam a camada limite atmosférica (CLA) para estudar os efeitos do vento em edificações. Os túneis aerodinâmicos, para fins aeronáuticos, geram ventos uniformes de muito baixa turbulência e de velocidades mais altas que os túneis de vento aplicados à construção civil (Blessmann, 1990). Além disso, os túneis aeronáuticos são muito curtos para desenvolverem boas simulações de camada limite (Loredo-Souza et al., 2004).

Neste trabalho, os ensaios serão realizados no túnel vento de camada limite Professor Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

4.3.1 TÚNEL DE VENTO PROFESSOR JOAQUIM BLESSMANN

O Túnel de Vento Professor Joaquim Blessmann é um túnel de camada limite e circuito fechado e está em operação desde 1977 (Blessmann, 1990). A (Figura 4.1) mostra uma foto recente do laboratório. O túnel tem viabilizado ao longo destes anos, o

desenvolvimento de estudos de efeitos estáticos e dinâmicos em construções civis em geral, além de determinar características de ventos simulados entre outras pesquisas como: efeitos sobre usuários, efeitos sobre transeuntes (veículos e plantas), dispersão de poluentes, estudo de características da camada limite, ventilação interna, estudos hidráulicos por via aerodinâmica, etc.



Figura 4.1 - Vista da parte externa da câmara de ensaios do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS.

4.3.1.1 Características do túnel de vento

A seção de altas velocidades do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann apresenta as características a seguir:

- a) relação comprimento/ altura $\cong 10,3$;
- b) dimensões médias = 1,30m x 0,90m x 9,32 (largura x altura x comprimento);

- c) velocidade máxima do escoamento com vento uniforme e suave sem a presença de modelos $\cong 44\text{m/s}$ (160 km/h);
- d) número de Reynolds do túnel = $2,6 \times 10^6$;
- e) motor elétrico que acionam as hélices do ventilador = 100HP.

4.3.1.2 Mesas para fixação dos modelos

O túnel de vento dispõe atualmente de quatro mesas giratórias (cada uma com suas aplicações específicas) para fixação dos modelos (Figura 4.2):

- a) Mesa I,
 - ensaios do tipo aeronáutico no piso do túnel, em camada limite de pequena espessura e escoamento de baixa turbulência; ensaios para a indústria da construção com geradores de turbulência na câmara de simuladores. Na Mesa I o modelo pode ser colocado tanto na vertical como na horizontal;
- b) Mesa II,
 - ensaios do tipo aeronáutico no eixo do túnel, ensaios para a indústria da construção civil com blocos colocados no piso e/ou geradores de turbulência na câmara de simuladores ou com jatos transversais;
- c) Mesa III,
 - esta mesa possui grande rigidez e foi construída especificamente para estudos dinâmicos em estruturas de grande alteamento, tais como torres, chaminés, mastros, etc.
- d) Mesa IV,
 - mesa utilizada para ensaios de modelos que necessitam ser reproduzidos em maior escala, ensaios para baixas velocidades do vento. Recentemente foi testado um modelo completo de ponte nesta mesa.

Mais informações sobre o túnel podem ser encontradas em (Blessmann, 1990).

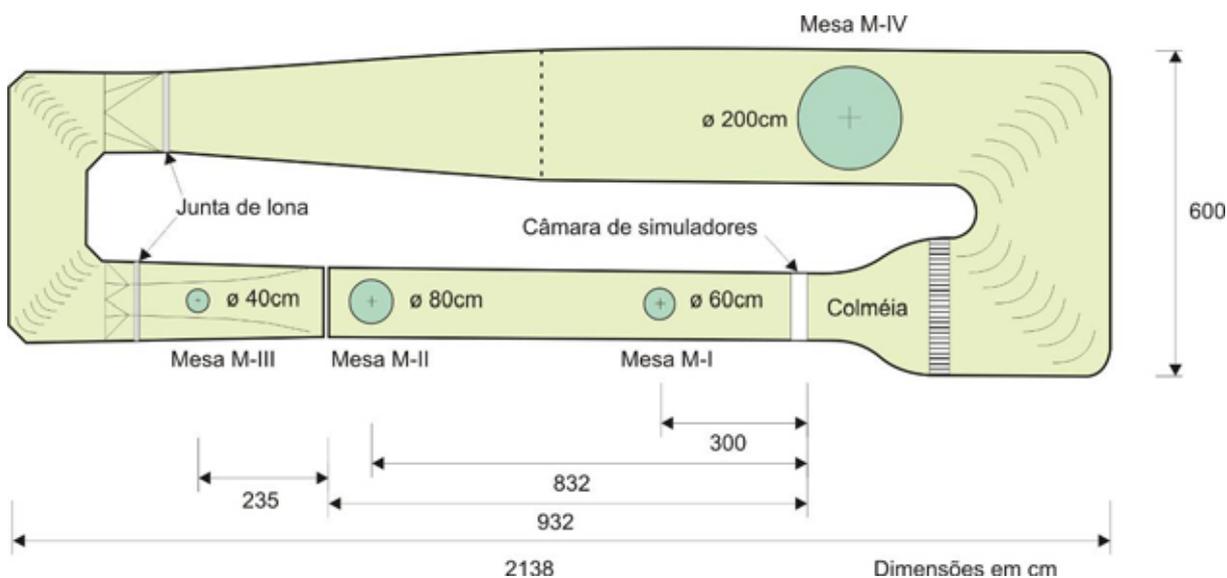


Figura 4.2 - Planta baixa do circuito aerodinâmico do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da UFRGS.

4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO NO TÚNEL

A velocidade do vento no túnel pode ser determinada através do diferencial de pressão, Δp_a , obtido da leitura de dois anéis piezométricos situados na entrada da seção de trabalho. As leituras podem ser feitas com a utilização de um micromanômetro à água tipo Betz, por um multimanômetro, por transdutores de pressão (Manoair ou Scanivalve (Sistema de Aquisição de Dados de Pressão)). Neste trabalho utilizou-se para a medição dos valores de Δp_a o Scanivalve acompanhado de um micromanômetro Schiltknecht Manoair 500. A Figura 4.3 mostra os transdutores de pressão do Sistema Scanivalve e o Manoair.

São determinados coeficientes k_o , que relacionam a pressão dinâmica q , em um determinado local do túnel e a diferença de pressão entre os anéis piezométricos do convergente do túnel. Para o cálculo da velocidade do escoamento ou pressão dinâmica em qualquer ponto do escoamento, basta fazer a leitura da pressão de referência no ponto da seção desejado.

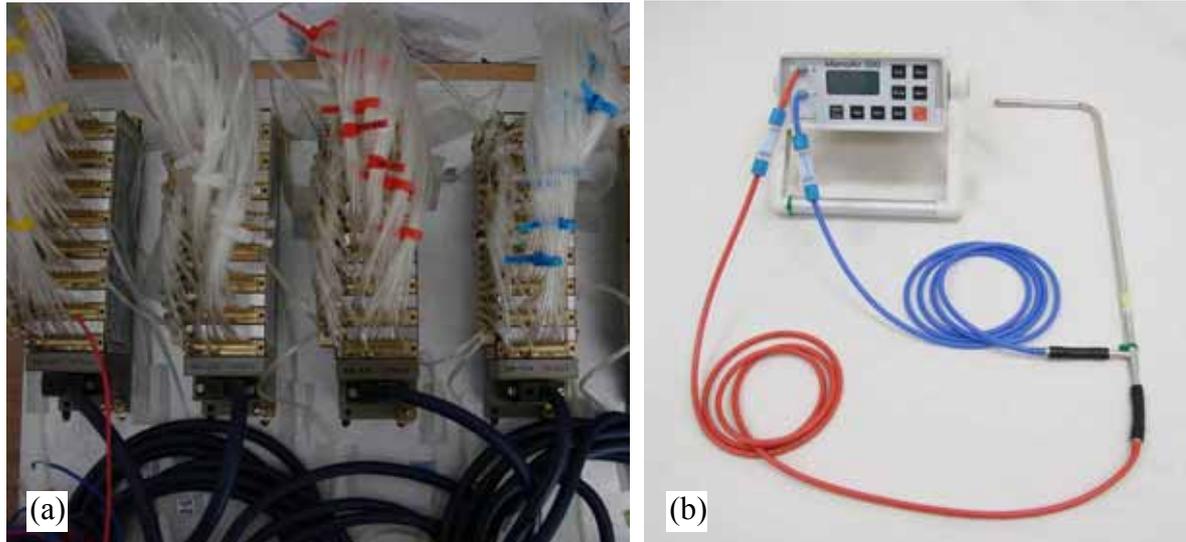


Figura 4.3 - (a) Vista superior dos transdutores de 64 canais do Scanivalve; (b) Manóair e mangueiras de conexão aos anéis piezométricos.

A velocidade do escoamento é dada por:

$$V = \sqrt{\frac{2q}{\rho_{ar}}} \quad (4.1)$$

Onde:

$$q = k_o \Delta p_a \quad (4.2)$$

$$\rho_{ar} = 0,0474 \frac{P_{atm}}{T} \left[\frac{kgf \cdot s^2}{m^2} \right] \quad (4.3)$$

q é a pressão dinâmica ao longe = $\frac{1}{2} \rho_{ar} V^2$ [mmHg];

ρ_{ar} é a massa específica do ar;

T é a temperatura [K];

P_{atm} é a pressão atmosférica [mmHg];

Δp_a é a variação de pressão entre os dois anéis piezométricos do convergente [mmH₂O];

k_o é a relação entre a pressão dinâmica entre um determinado ponto do túnel e a variação da pressão entre os anéis piezométricos (k_o , na mesa MI, no eixo do túnel, corresponde a 1,011 para vento suave e 1,088 para vento turbulento).

4.5 SIMULAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO VENTO NATURAL

Para se obter uma escala apropriada do vento natural em túnel de vento pode-se cobrir certo comprimento do piso com materiais que representem o efeito de rugosidade adequada (simulando a rugosidade das edificações) ao escoamento. Conforme Blessmann (1990), esta técnica corresponde à principal fonte de turbulência em baixa altitude. Diversos dispositivos podem ser combinados para melhor reproduzirem as características do vento natural (Figura 4.4).

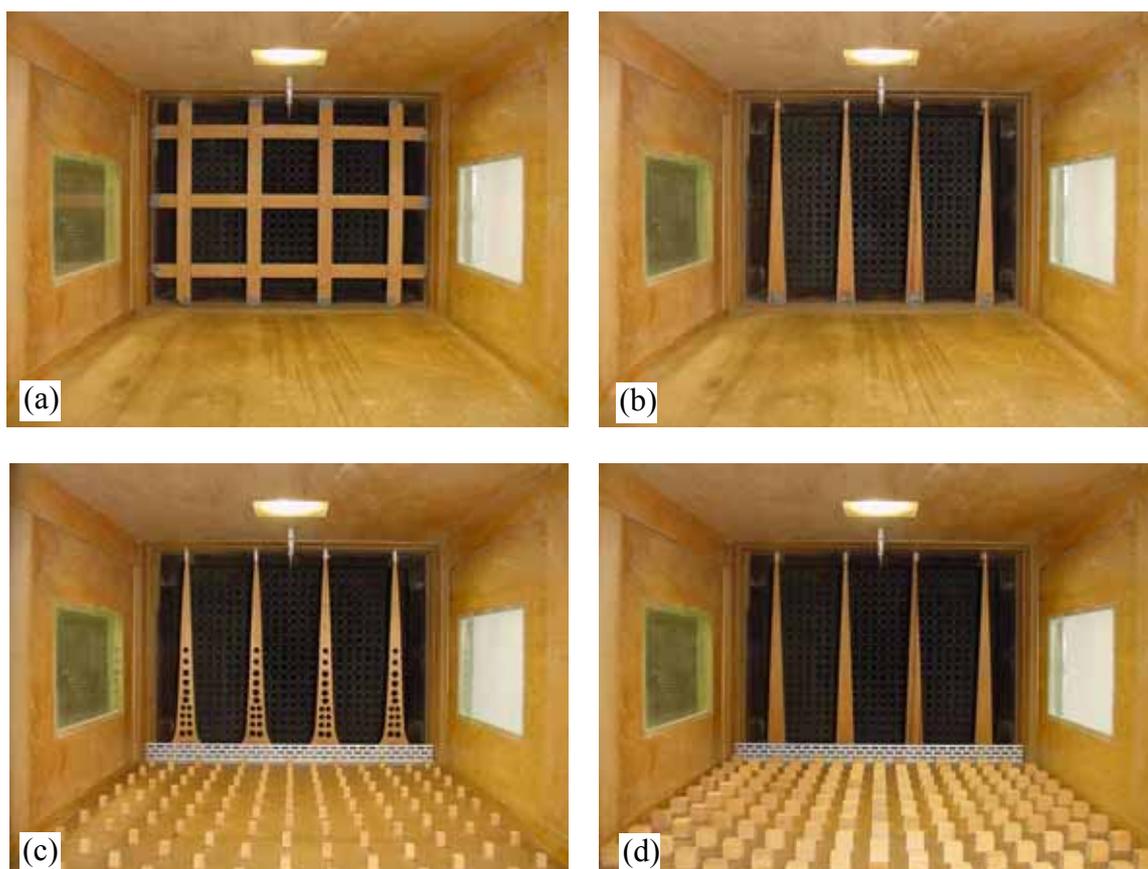


Figura 4.4 - Alguns dispositivos de geração das diferentes camadas limites do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. (a) grelha; (b) $p=0,11$; (c) $p=0,23$; (d) $p=0,34$ (Loredo-Souza et al., 2004)

Os dispositivos acima podem ser utilizados para simular uma ou mais características do vento natural, por exemplo, intensidade de turbulência, escala de turbulência, espectro, curva de autocorrelação, etc. Tais dispositivos podem ser telas curvas ou telas planas de malha variável, grelhas de malha quadrada ou retangular, grelha única de malha variável ou diversas grelhas superpostas, telas uniformes e triângulos de diversas formas geométricas.

Outra técnica constitui-se na pela injeção de ar, paralelamente, perpendicularmente ou obliquamente à direção do escoamento, através de jatos de ar. Ao contrário das técnicas citadas acima que diminuem cerca de 80% (em casos extremos) a velocidade média do escoamento, a técnica da injeção de ar não provoca perdas na velocidade média.

As principais características dos escoamentos uniformes e turbulentos simulados gerados pela grelha (Figura 4.4a) podem ser vistas na Figura 4.5: perfil vertical das velocidades médias, em porcentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), intensidade (I_1) e macroescala (L_1) da componente longitudinal da turbulência.

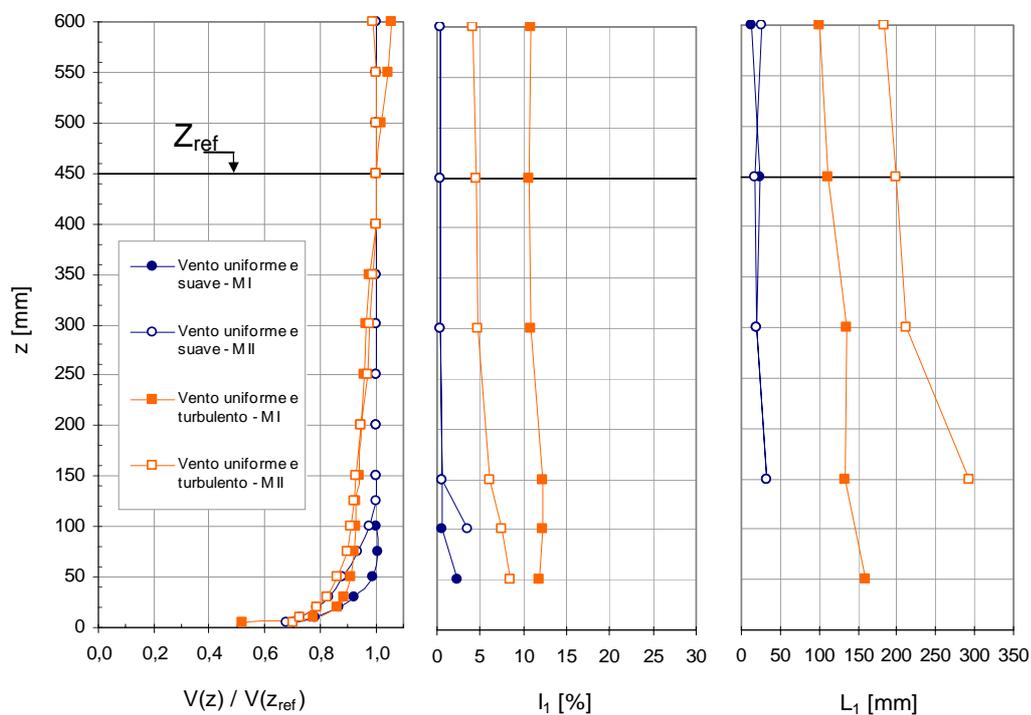


Figura 4.5 - Perfis de velocidade média, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do túnel de vento. Vento uniforme e suave (sem simuladores) e vento uniforme e turbulento (gerado por grelha).

4.6 DEFINIÇÃO DO MODELO

Foram construídos três modelos seccionais estáticos de cabo de ponte estaiada com filetes artificiais em escala geométrica de 1:1 (escala real) identificados como M1, M2 e M3. Neste trabalho foi possível utilizar os modelos em escala natural, pois o diâmetro dos modelos seccionais do cabo é compatível com as dimensões do túnel. No modelo em escala natural não foi necessária a aplicação das condições de semelhança geométrica.

Os modelos representam o duto de proteção contra corrosão da cordoalha de aço que compõe um sistema típico de cabo de pontes estaiadas. A Figura 4.6 apresenta esquema de uma seção transversal de cabo submetida à ação de chuva e vento e o modelo correspondente.

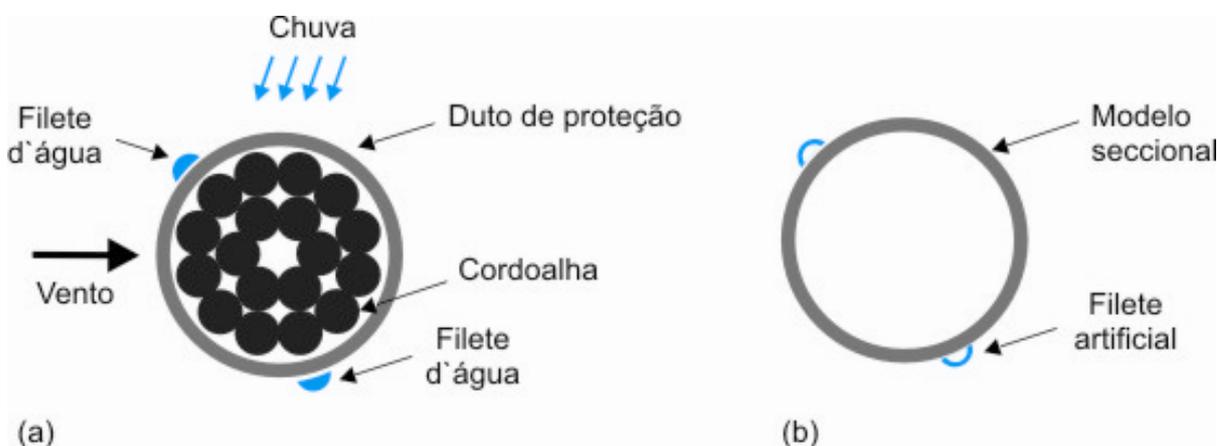


Figura 4.6 – (a) Esquema de seção transversal de cabo de ponte estaiada e (b) exemplo de modelo seccional para ensaio.

Os modelos são idênticos no que diz respeito ao material, diâmetro externo, número de tomadas de pressão e posicionamento destas, diferenciando-se apenas no comprimento devido ao posicionamento no interior do túnel. Tais modelos foram construídos na Oficina Paulo Francisco Bueno do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A Figura 4.7 apresenta as características geométricas dos modelos seccionais.

Foram utilizados tubos de PVC de diâmetro de 110 mm e comprimentos de 1230 mm, 1484 mm e 1383 mm para os modelos M1, M2 e M3, respectivamente. As extremidades de cada modelo foram cortadas de forma que obtivesse a correta fixação nas paredes internas do túnel e garantisse o posicionamento desejado.



Figura 4.7 - Modelo seccional de cabo.

Os filetes artificiais têm seção transversal em forma de uma semi-elipse ($b_{fil}=13\text{ mm}$ e $h_{fil}=5\text{ mm}$) e foram confeccionados com o uso de um tubo de CPVC cortado no sentido longitudinal (Figura 4.8). Os comprimentos dos filetes são semelhantes aos comprimentos dos respectivos modelos.

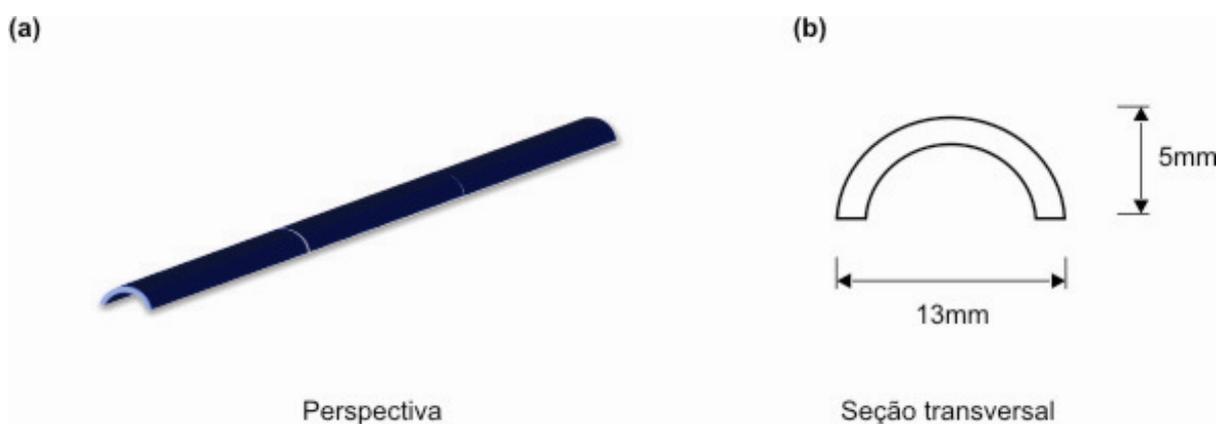


Figura 4.8 – Perspectiva e seção transversal dos filetes artificiais (a) perspectiva e (b) seção transversal.

A escolha de se construir filetes artificiais se deve à impossibilidade de se utilizar filetes naturais que possam comprometer a estrutura interna do túnel de vento. A utilização de água nos experimentos também impediria a medição das pressões externas. A escolha do formato e dimensões do filete foi baseada em experimentos realizados por outros autores, a partir da observação de filetes reais. Os filetes, superior e inferior, foram fixados por parafusos de forma que fosse possível a mudança da posição ao longo da direção circunferencial da seção do modelo, bem como a remoção dos filetes para a realização de testes nos modelos lisos (sem filetes).

Cada modelo foi instrumentado com 36 tomadas de pressão distribuídas a cada 10° e fixadas na seção situada na metade do vão do cabo para evitar que uma eventual perturbação do escoamento próximo às paredes do túnel interfira nas medições. Cada filete foi instrumentado com uma tomada de pressão localizada na seção central do modelo. As tomadas foram conectadas através de mangueiras de PVC de diâmetro externo de $\phi_{ext} = 1,5$ mm, diâmetro interno $\phi_{int} = 1$ mm e comprimento de 1,2 m que foram ligadas ao Sistema Scanivalve, que registram pressões instantâneas e as enviam diretamente ao computador.

A Figura 4.9 mostra a distribuição das tomadas na seção transversal no centro do vão do modelo e sobre os filetes.

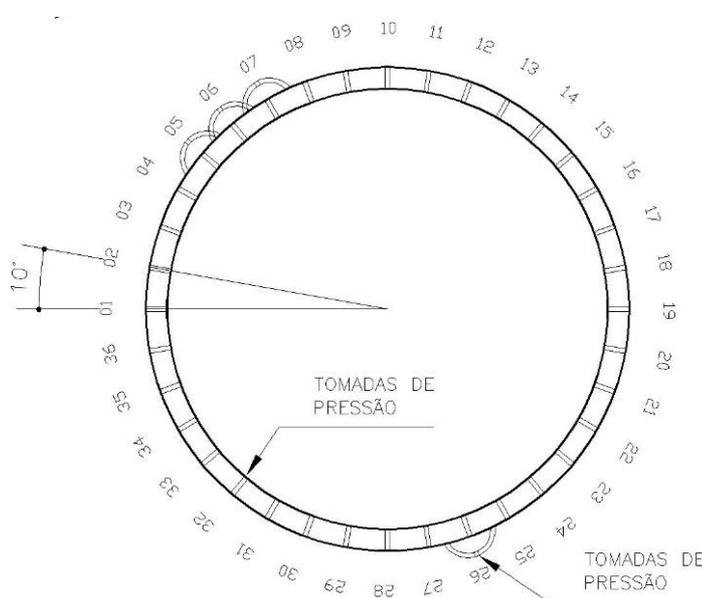


Figura 4.9 - Localização e distribuição das tomadas de pressões no modelo.

4.7 EXPERIMENTOS

Foram medidas pressões externas instantâneas ao redor da seção central do modelo com a presença dos filetes para entender o mecanismo das vibrações induzidas por chuva e vento.

4.7.1 Procedimento dos ensaios

Para a realização dos ensaios, diversos parâmetros foram variados: velocidade média, ângulo de incidência do vento, inclinação do modelo, posição dos filetes superior e inferior e intensidade de turbulência do escoamento. Todos os modelos foram ensaiados para os mesmos parâmetros também sem a presença de filetes à nível de comparação dos resultados. O modelo M1 foi posicionado na horizontal ($\alpha = 0^\circ$) e com ângulo de incidência do vento ($\beta = 0^\circ$). O modelo M2 foi posicionado na horizontal ($\alpha = 0^\circ$), porém com ângulo de incidência do vento ($\beta = 30^\circ$). O modelo M3 foi posicionado inclinado em relação à horizontal ($\alpha = 45^\circ$) e com ângulo de incidência do vento ($\beta = 30^\circ$). A Figura 4.10 mostra o posicionamento dos modelos na câmara de ensaio do túnel de vento.

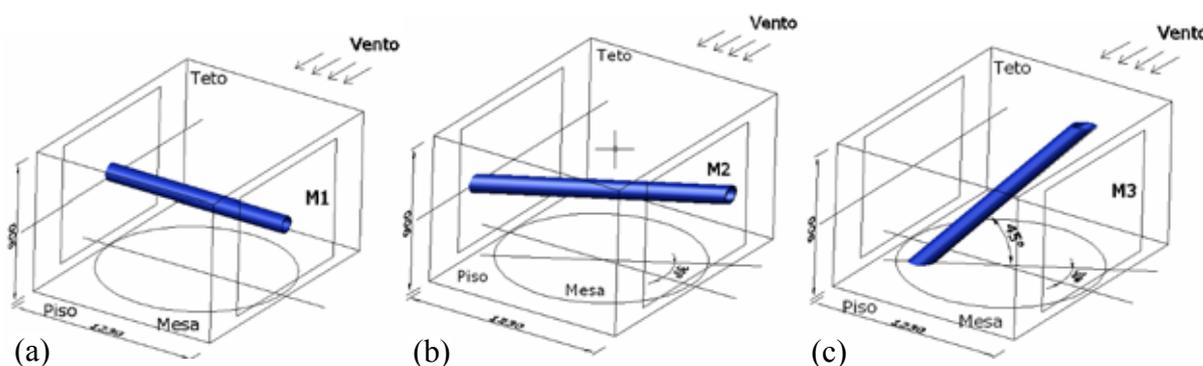


Figura 4.10 - Posicionamento dos modelos M1 à M3 na câmara de ensaios.

A posição dos três modelos foi escolhida com o intuito de identificar a semelhança entre cabos inclinados e cabos horizontais com vento normal e oblíquo em relação ao vento com a presença de filetes. A utilização de cabos horizontais no estudo das vibrações induzidas por chuva e vento pode tornar a análise mais clara devido a estes tipos de cabo não apresentarem efeitos adicionais que aparecem em cabos inclinados (Figura 4.10c).

Para a geração do vento turbulento (10,5%), foi utilizada uma grelha de malha quadrada, 0,3 m x 0,3 m de eixo a eixo, formada por barras de madeira de seção retangular com 0,06 m de largura (no plano da grelha). A Figura 4.11 apresenta estas dimensões em milímetros.

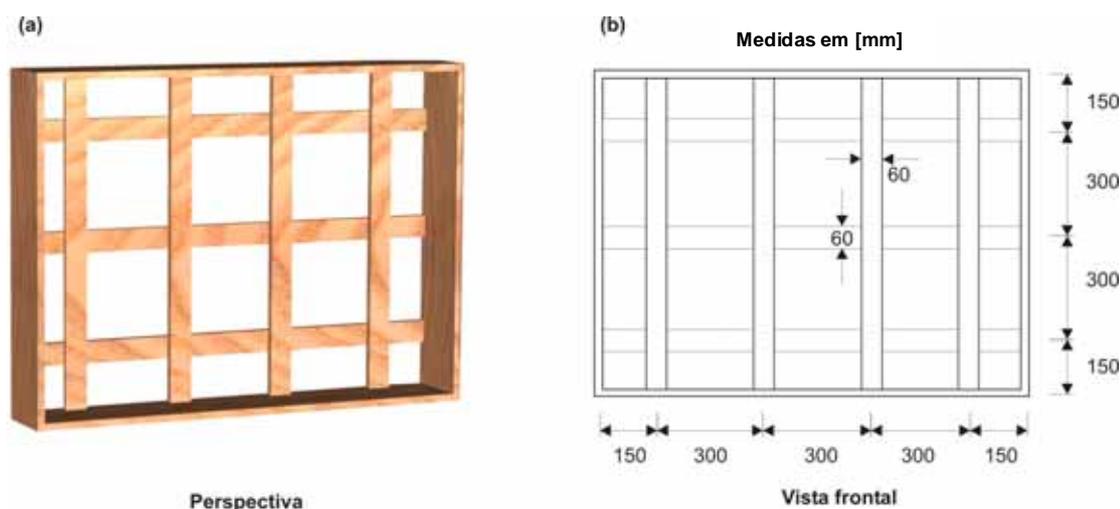


Figura 4.11 – Grelha para geração da turbulência (a) perspectiva e (b) vista frontal.

Com o M1 posicionado na mesa M-I no túnel de vento, seguiu-se o seguinte procedimento para as medições das pressões variando os parâmetros apresentados na Tabela 4.1:

1. Para o modelo sem filetes executaram-se todas as velocidades para o vento suave e em seguida para o vento turbulento.
2. Para o modelo com a primeira posição dos filetes executaram-se novamente todas as velocidades para vento suave e em seguida para o vento turbulento. Repetiu-se então, os mesmos ensaios para as outras posições dos filetes.

Após o termino dos ensaios com o modelo M1, o mesmo procedimento foi aplicado para os modelos M2 e M3.

Os parâmetros relativos à inclinação, velocidade do vento, ângulo de ataque e posição dos filetes, foram escolhidos através da determinação de um intervalo crítico. Neste intervalo foram observados por outros pesquisadores picos máximos de vibrações induzidas por chuva e vento.

O diâmetro de 110 mm foi escolhido baseado nos ensaios de Bosdogianni e Olivari (1996) os quais encontraram picos de amplitude máximos utilizando modelo inclinado com características semelhantes ao deste trabalho.

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros variáveis dos ensaios.

Modelos	Escoamento	Velocidades aproximadas do vento [m/s]	Posição dos filetes [°]	Número de Reynolds
M1, M2 e M3	Suave e turbulento	5, 10, 15, 20, 25 e 30	$\theta_1 = 40, 50, 60$ $\theta_2 = 110^3$	$3,9 \times 10^4$ à $2,3 \times 10^5$

4.7.2 Medição de pressões médias no cilindro

Foram medidas pressões instantâneas ao redor da seção transversal localizada no centro do vão do modelo para entender o mecanismo de distribuição de pressões com a presença dos filetes variando os parâmetros como já descrito anteriormente. Utilizou-se para isto o Sistema de Aquisição de Dados de Pressões instantâneas - Scanivalve Pressure System

A partir dos registros das séries temporais das pressões devidas ao vento, foram calculados os coeficientes de pressão externa nas faces do modelo, definidos por:

$$\bar{c}_p = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}{q} \quad (4.4)$$

$$\tilde{c}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (p(t) - \bar{p})^2 dt}}{q} \quad (4.5)$$

$$\hat{c}_p = \frac{P_{max}}{q} \quad (4.6)$$

$$\tilde{c}_p = \frac{P_{min}}{q} \quad (4.7)$$

Onde:

$p(t)$ é pressão instantânea, na superfície da edificação, medida em relação à pressão estática de referência;

³ A posição do filete inferior é único para todos os ensaios apesar de constar seu valor na tabela.

\bar{p} é o valor médio de $p(t)$ para o período de amostragem T ;

p_{max} é valor máximo de $p(t)$ para o período de amostragem T ;

p_{min} é valor mínimo de $p(t)$ para o período de amostragem T ;

A Figura 4.12 mostra a convenção adotada para a os sinais dos coeficientes de pressão.

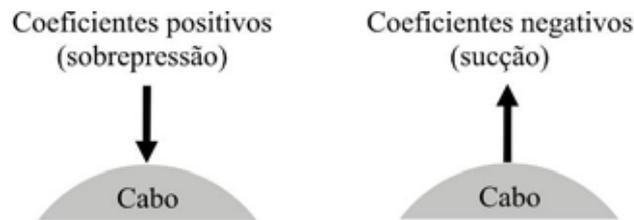


Figura 4.12 – Convenção de sinais para a análise dos coeficientes de pressão.

Os coeficientes de arrasto e de sustentação instantâneos foram calculados a partir das seguintes expressões:

$$C_a(t) = \frac{\pi}{n} \sum_1^n c_p(t) \cos(\theta_s + \gamma) \quad (4.8)$$

$$C_s(t) = \frac{\pi}{n} \sum_1^n c_p(t) \text{sen}(\theta_s + \gamma) \quad (4.9)$$

Onde,

n é o número de tomadas na seção transversal do modelo;

$c_p(t)$ é o valor do coeficiente de pressão instantânea externa;

θ_s é o ângulo que representa a posição da tomada (em radianos);

γ tem valor nulo para os modelos M1 e M2 e 0,3876 radianos para o M3, que equivale a 22,21°.

Os coeficientes de arrasto e de sustentação médios podem ser calculados a partir das equações (4.8) (4.9) substituindo os coeficientes de pressões instantâneas pelos coeficientes de pressões médias.

4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para os três modelos ensaiados foram realizados 132 ensaios de pressões instantâneas. A partir das pressões obtidas em torno do modelo em túnel de vento puderam-se construir para todas as configurações como instrumento de análise:

- a) séries temporais dos coeficientes de pressão externa para cada tomada de pressão;
- b) espectros de potência dos sinais instantâneos de coeficientes de pressão externa para cada tomada;
- c) distribuições polares e cartesianas de coeficientes de pressões externas;
- d) valores RMS dos coeficientes de pressões externas;
- e) coeficientes médios de arrasto e sustentação variando com Re ;
- f) séries temporais dos coeficientes de arrasto e sustentação;
- g) espectros de potencia dos sinais instantâneos de coeficientes de arrasto e de sustentação.

Alguns dos itens anteriores estão nos Apêndices desta dissertação enquanto que os resultados mais importantes são apresentados e comentados nesta seção:

Para tornar o texto mais claro e menos repetitivo, as configurações ensaiadas serão citadas no texto da seguinte forma:

F₁: filete superior;

F₂: filete inferior;

SF: modelo sem filetes;

F40: modelo com filetes nas posições $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$;

F50: modelo com filetes nas posições $\theta_1 = 50^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$;

F60: modelo com filetes nas posições $\theta_1 = 60^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$.

A razão de bloqueio para os modelos M1 e M2 foi 12,2% e para M3 foi 11,8%.

4.8.1 Análise da distribuição de pressões

Para todos os modelos, os resultados de C_a (coeficiente de arrasto), C_s (coeficiente de sustentação) e a distribuição de pressões em volta do modelo confirmaram a uniformidade do escoamento, o correto alinhamento do cilindro dentro do túnel bem como a correta localização das tomadas de pressão. A faixa de Re trabalhada variou de $3,9 \times 10^4$ a $2,3 \times 10^5$ para escoamento suave e $3,9 \times 10^4$ a $1,9 \times 10^5$ para escoamento turbulento. Por motivos de segurança não foi possível atingir velocidades mais altas para escoamento turbulento, pois se atingiu o limite máximo de trabalho de velocidade do túnel para este tipo de escoamento.

Modelo M1: o modelo apresentou oscilações para as velocidades acima de 20 m/s para os dois tipos de escoamento. Para o modelo sem filetes todos os valores de \bar{C}_s apresentaram-se nulos para todos os valores de Re , o que é esperado.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam dados de \bar{C}_a variando com Re para escoamento suave e para turbulento, respectivamente.

Observa-se que na Figura 4.13 que para $Re \cong 3,9 \times 10^4$ o modelo SF apresentou \bar{C}_a próximo a 1,2 e a partir de $Re \cong 1,0 \times 10^5$ ocorreu queda dos valores de \bar{C}_a . Este comportamento é confirmado pelo encontrado por Ribeiro (1989) (Figura 2.4). Para escoamento turbulento (Figura 4.14) os valores de \bar{C}_a do modelo SF foram menores que os encontrados para o modelo em escoamento suave. Este comportamento é confirmado através dos ensaios realizados por Cheung e Melbourne (Núñez, 2001) que mostram queda do \bar{C}_a à medida de que se aumenta a turbulência do escoamento (Figura 4.15).

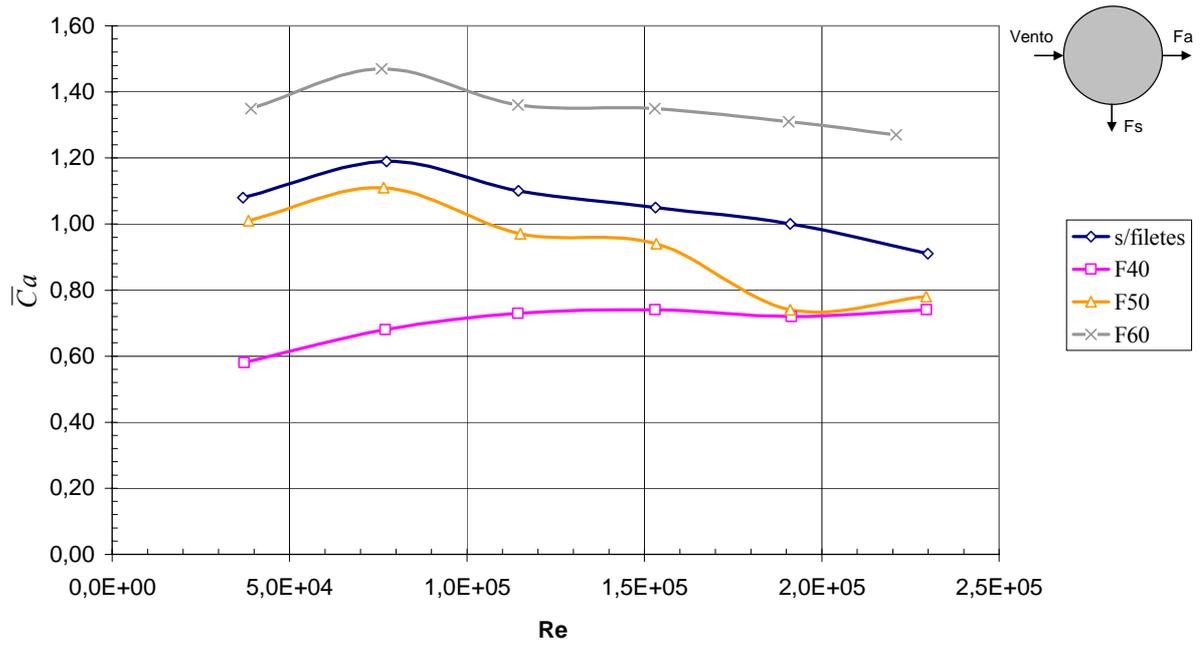


Figura 4.13 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M1).

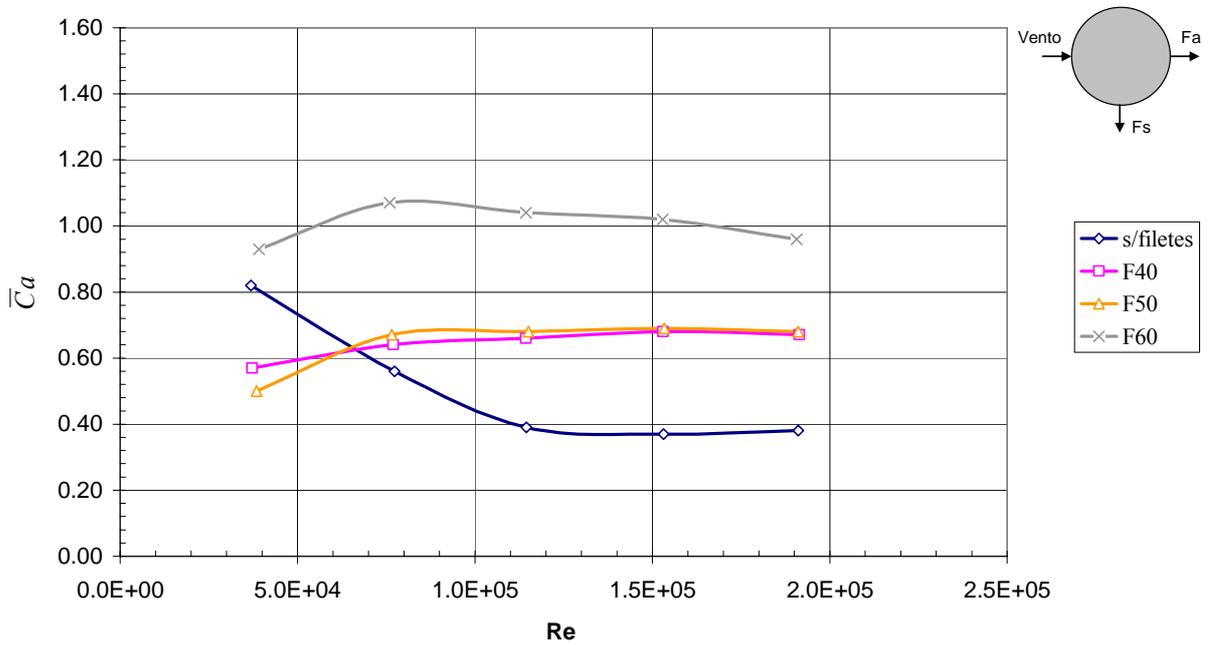


Figura 4.14 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M1).

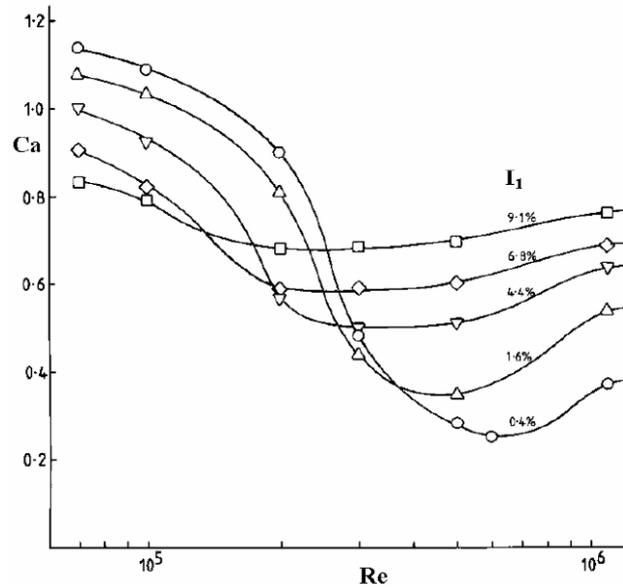


Figura 4.15 – Coeficiente de arrasto médio em função do número de Reynolds e de diferentes intensidades da turbulência (Núñez, 2001).

Comparando-se o modelo com filetes com a configuração SF, observa-se que para escoamento suave o maior acréscimo do \bar{C}_a ocorreu para a configuração F60, enquanto que para F40 e F50 o \bar{C}_a diminuiu. Para escoamento turbulento a configuração F60 continuou apresentando aumento do \bar{C}_a enquanto que os \bar{C}_a das configurações F40 e F50 continuaram mais baixos apenas para $Re \cong 3,9 \times 10^4$. As maiores sucções médias ocorridas sobre o filete superior podem ter causado o decréscimo do \bar{C}_a para as configurações F40 e F50 (Figura 4.16).

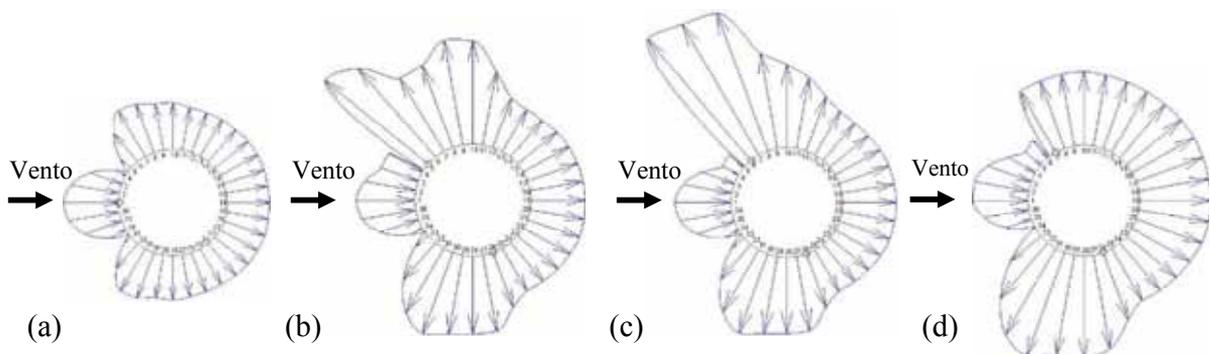


Figura 4.16 – Distribuição de pressões externas obtidas em escoamento uniforme e suave para $Re \cong 2,3 \times 10^5$ (a) SF, (b) F40, (c) F50 e (d) F60.

Para o escoamento turbulento, a configuração F60 também apresentou maior acréscimo do \bar{C}_a sendo ainda maior que o acréscimo obtido em escoamento suave para a mesma configuração (Figura 4.13). O maior decréscimo de \bar{C}_a ocorreu para este modelo, com a configuração F40 em escoamento suave. Na maioria dos casos as sucções sobre o filete superior são maiores quando o filete superior está na posição $\theta_1 = 40^\circ$, e diminui à medida que o valor de θ_1 aumenta.

Para a análise dos \bar{C}_s serão utilizados os valores em módulo e os símbolos (sentido para cima \uparrow) e (sentido para baixo \downarrow) para representar o sentido da força de sustentação. De acordo com a Figura 4.17 o \bar{C}_s para a configuração F40 aumentou em média 0,5 (\uparrow) para os valores de $Re \cong 3,9 \times 10^4$ e $7,7 \times 10^4$ enquanto que acima de $Re \cong 1,2 \times 10^5$ o valor de \bar{C}_s aumentou em média 0,3 (\uparrow).

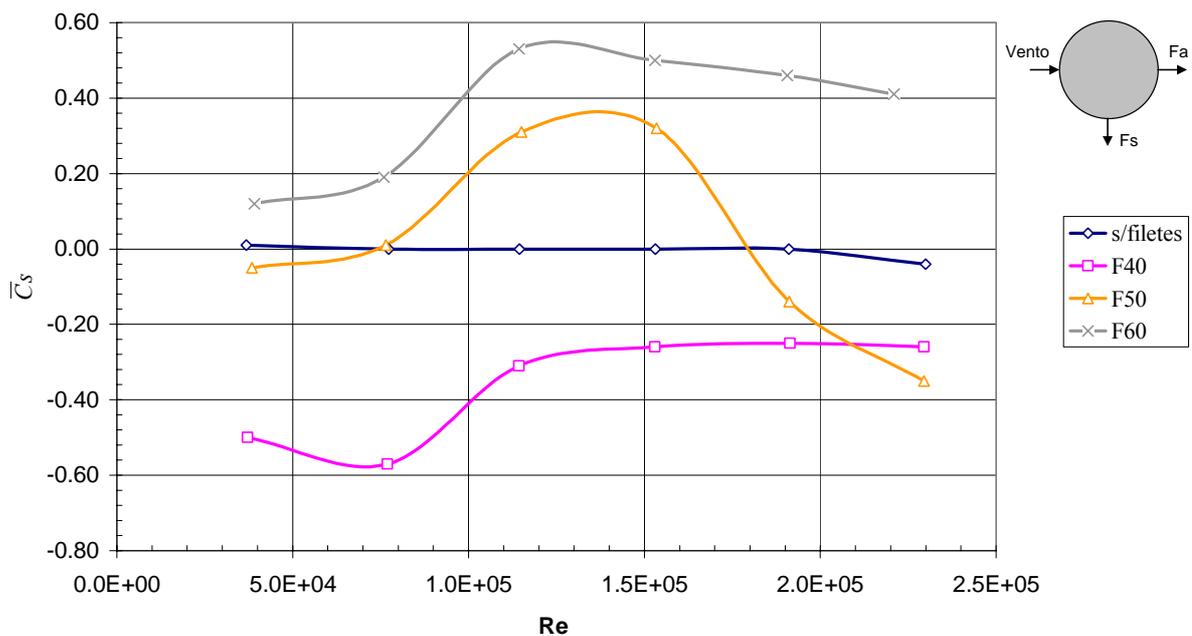


Figura 4.17 – Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M1).

A redução do \bar{C}_s deve-se ao aumento das sucções sobre e a barlavento do filete inferior a partir de $Re \cong 1,2 \times 10^5$. Para $Re < 1,2 \times 10^5$ o filete inferior não tem influência sobre o escoamento. A partir de $Re > 1,2 \times 10^5$ o filete inferior passa a afetar nitidamente o escoamento em torno do cilindro. A influência do filete inferior ocorre devido a transição entre o regime subcrítico e crítico em $Re \cong 1,2 \times 10^5$ quando a espessura da esteira torna-se

mais estreita, e a separação do escoamento (em modelos liso sem filetes) aumenta para a posição $\theta_s = 140^\circ$ (Figura 2.4). Para a configuração F50 em escoamento suave o valor de \bar{C}_s permanece próximo de zero e aumenta (\downarrow) aproximadamente 0,3 entre de $Re \cong 7,7 \times 10^4$ e $1,5 \times 10^5$ e inverte o sentido do \bar{C}_s a partir de $Re \cong 1,9 \times 10^5$ chegando a 0,4 (\uparrow). Para a configuração F60 os \bar{C}_s predominam para o sentido (\downarrow). Percebe-se que para pequena variação de Re o sentido do \bar{C}_s altera de baixo para cima ou vice-versa. Imaginando-se que o filete superior está em movimento, nota-se que para qualquer valor de Re o \bar{C}_s pode inverter o sentido quando o F_1 se move de 40° a 60° (Figura 4.17).

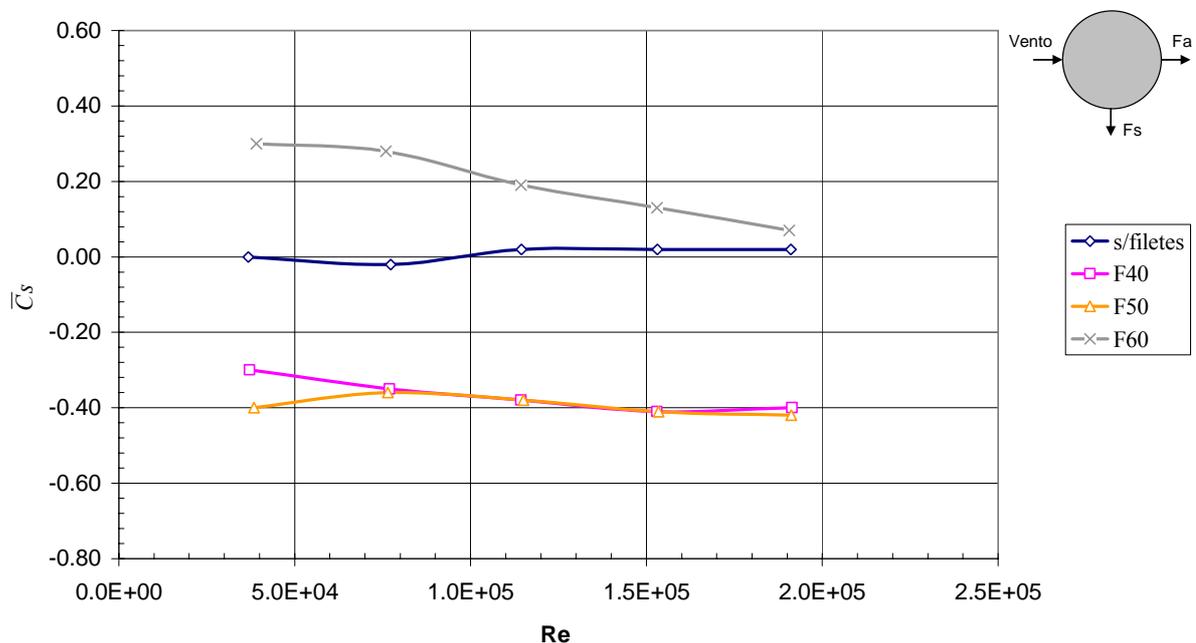


Figura 4.18 – Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M1).

De acordo com a Figura 4.18, para o modelo em escoamento turbulento o \bar{C}_s permanece aproximadamente constante variando-se o Re . Os valores de \bar{C}_s para as configurações F40 e F50 coincidem em 0,4 (\uparrow) enquanto que para F60 inverteu-se o \bar{C}_s , em média 0,2 (\downarrow). Imaginando-se que o filete superior está em movimento, nota-se que para qualquer valor de Re o \bar{C}_s pode inverter o sentido quando o F_1 se move de 40° a 60° (Figura 4.18).

Modelo M2: Para o modelo sem filetes em escoamento suave todos os valores de \bar{C}_s apresentaram-se nulos para Re entre $3,9 \times 10^4$ a $1,2 \times 10^5$ e diferentes de zero para Re entre

$1,5 \times 10^5$ e $2,3 \times 10^5$. Para escoamento turbulento todos os valores de \overline{C}_s apresentaram-se nulos.

De acordo com a Figura 4.19 para o modelo sem filetes em escoamento suave pode-se ver que a distribuição de pressões é assimétrica para $Re \cong 1,5 \times 10^5$. Pode estar ocorrendo a formação de borbulhas em um dos lados do modelo devido à faixa de Re encontrar-se na transição de regime de escoamento. O mesmo ensaio foi repetido para confirmação desta instabilidade e a borbulha ocorreu novamente só que desta vez no outro lado do modelo (Figura 4.19).

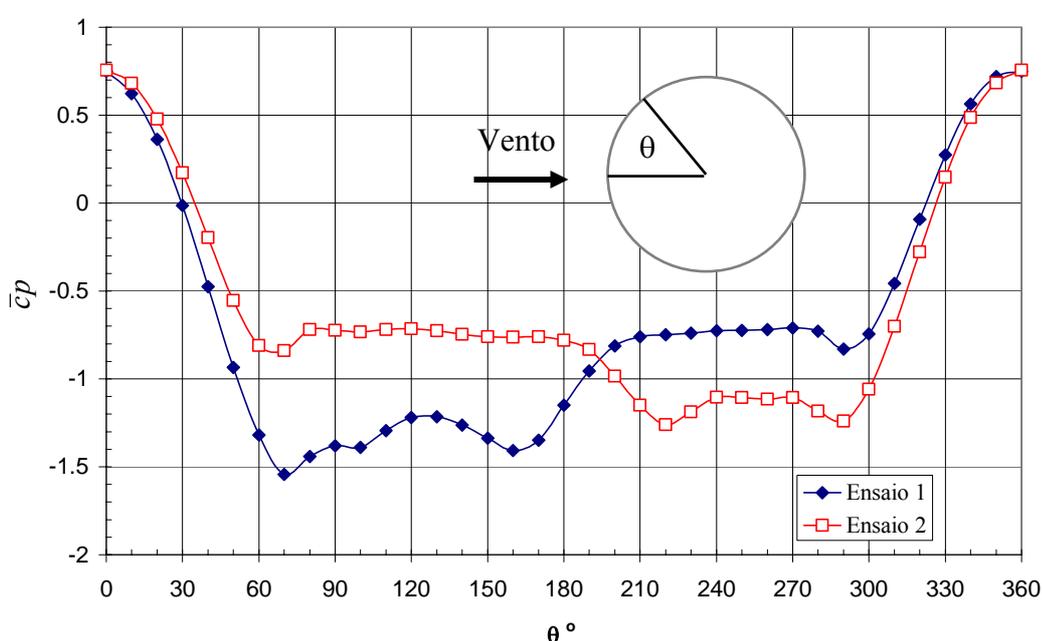


Figura 4.19 - Distribuição circunferencial dos coeficientes de pressão externa, obtidos em escoamento uniforme e suave para dois ensaios idênticos, $Re \cong 1,5 \times 10^5$ (M2, sem filetes).

A Figura 4.20 mostra o aumento da borbulha à medida que se aumenta o valor de Re de $1,5 \times 10^5$ a $2,3 \times 10^5$.

A formação de borbulhas é confirmada pelo estudo de Farell e Blessmann (1983). Estes autores estudaram as características do escoamento em volta de cilindro com vento incidindo perpendicularmente ao eixo longitudinal na região de transição de regimes. Através de medições de pressões externas instantâneas Farell e Blessmann (1983) observaram a formação uma borbulha que alternava de uma lado para o outro do cilindro para $Re = 3,44 \times 10^5$ acompanhada de queda brusca do coeficiente de arrasto. Para o modelo M2 as borbulhas

apareceram para $Re = 1,9 \times 10^5$ e $2,3 \times 10^5$. Este intervalo foi anterior ao citado por Farell e Blessmann (1983).

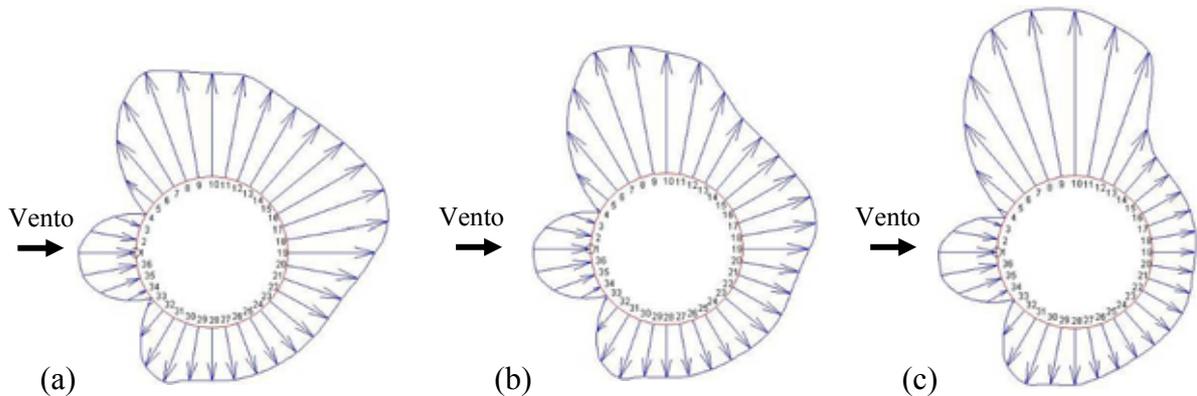


Figura 4.20 – Formação de borbulhas na face superior do M2 sem filetes para (a) $Re \cong 1,5 \times 10^5$, (b) $Re \cong 1,9 \times 10^5$ e (c) $Re \cong 2,3 \times 10^5$

De acordo com a Figura 4.21, comparando-se o modelo com filetes com a configuração SF observa-se que o \bar{C}_a diminuiu para as configurações F40 e F50 em escoamento suave e para F60 o \bar{C}_a apresentou trechos com valores mais altos e outros mais baixos que o modelo SF dependendo do valor do Re . O maior acréscimo do \bar{C}_a ocorreu para a configuração F60 em escoamento turbulento.

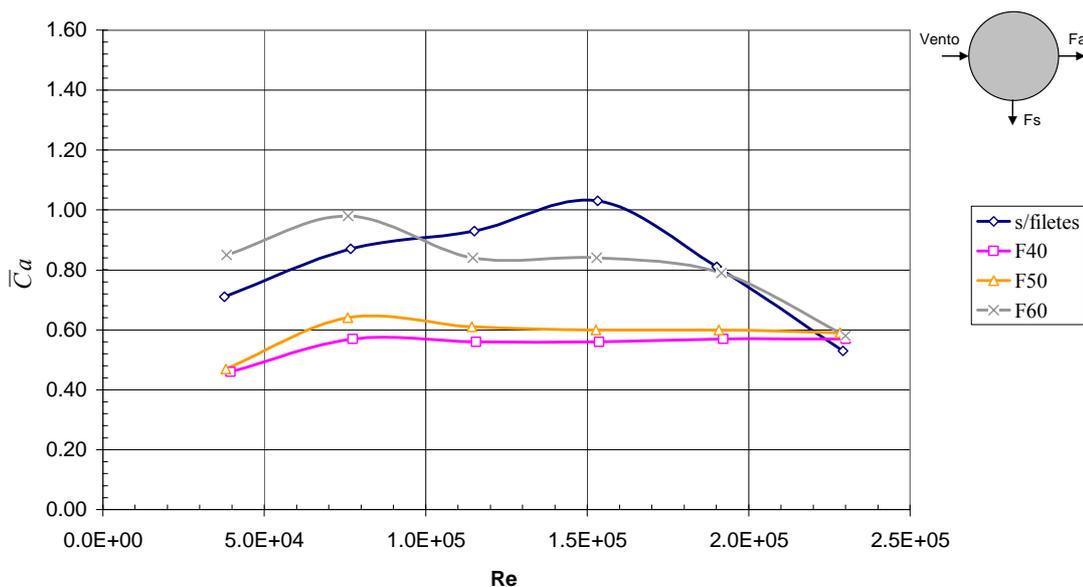


Figura 4.21 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M2).

Para escoamento turbulento a configuração F60 continuou apresentando aumento do \bar{C}_a enquanto que os \bar{C}_a das configurações F40 e F50 continuaram mais baixas apenas para $Re \cong 3,9 \times 10^4$. Este comportamento foi semelhante ao modelo M1 (Figura 4.22).

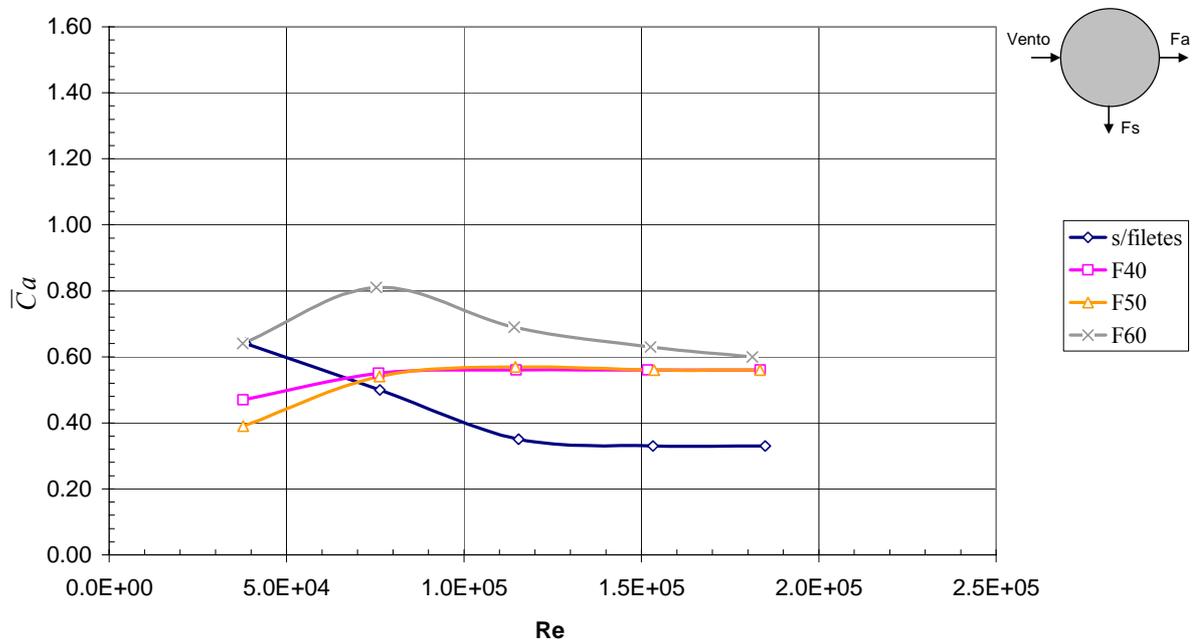


Figura 4.22 – Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M2).

Para a análise dos \bar{C}_s serão utilizados os valores em módulo e os símbolos (sentido para cima \uparrow) e (sentido para baixo \downarrow) para representar o sentido da força de sustentação. Nota-se na Figura 4.23 para a configuração SF que o \bar{C}_s aumenta (\uparrow) a partir de $Re = 1,2 \times 10^5$ devido as borbulhas formadas neste lado do modelo. Para as configurações F40 e F50 em escoamento suave os valores de \bar{C}_s apresentaram aumento de 0,4 (\uparrow) para Re entre $3,9 \times 10^4$ a $7,7 \times 10^4$ e diminuindo para 0,2 (\uparrow) a partir de $Re \cong 1,2 \times 10^5$. Para a configuração F60 em escoamento suave o \bar{C}_s apresentou aumento em média 0,4 (\downarrow) para os valores de Re entre $7,7 \times 10^4$ e $1,9 \times 10^5$. Imaginando-se que o filete superior está em movimento, nota-se que para certa faixa de Re o vetor \bar{C}_s pode inverter o sentido quando o F_1 se move de 40° a 60° , considerando que os valores \bar{C}_s são nulos e não sofrem influência das borbulhas (Figura 4.23).

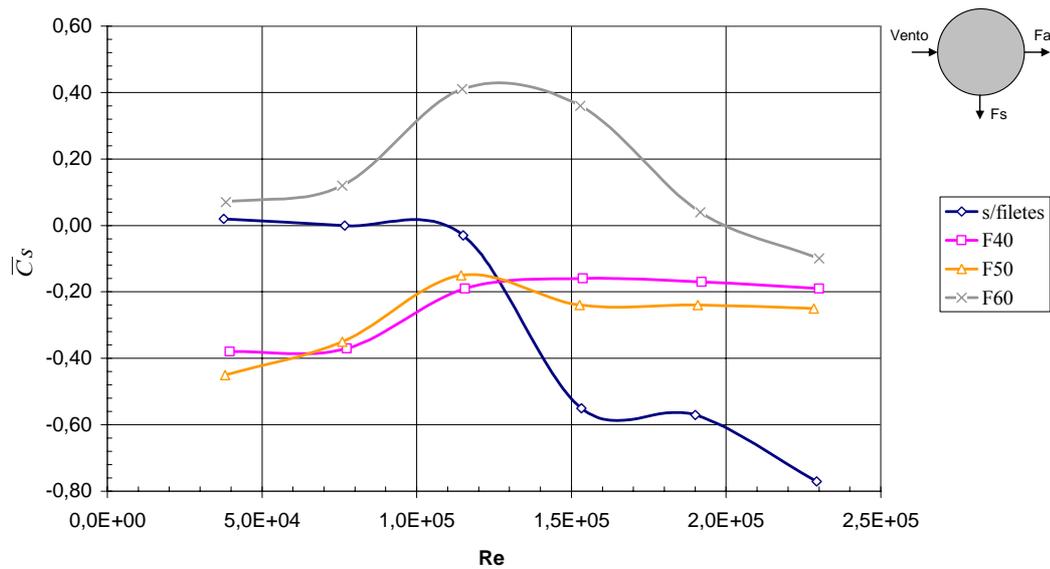


Figura 4.23 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M2).

Para escoamento turbulento as configurações F40 e F50 coincidiram apresentando $\bar{C}_s \cong 0,3$ (\uparrow). A configuração F60 apresentou aumento de $\bar{C}_s \cong 0,2$ (\downarrow) para Re entre $3,9 \times 10^4$ e $7,7 \times 10^4$ e invertendo o sentido para Re entre $1,2 \times 10^5$ e $2,3 \times 10^5$ com $\bar{C}_s \cong 0,2$ (\uparrow).

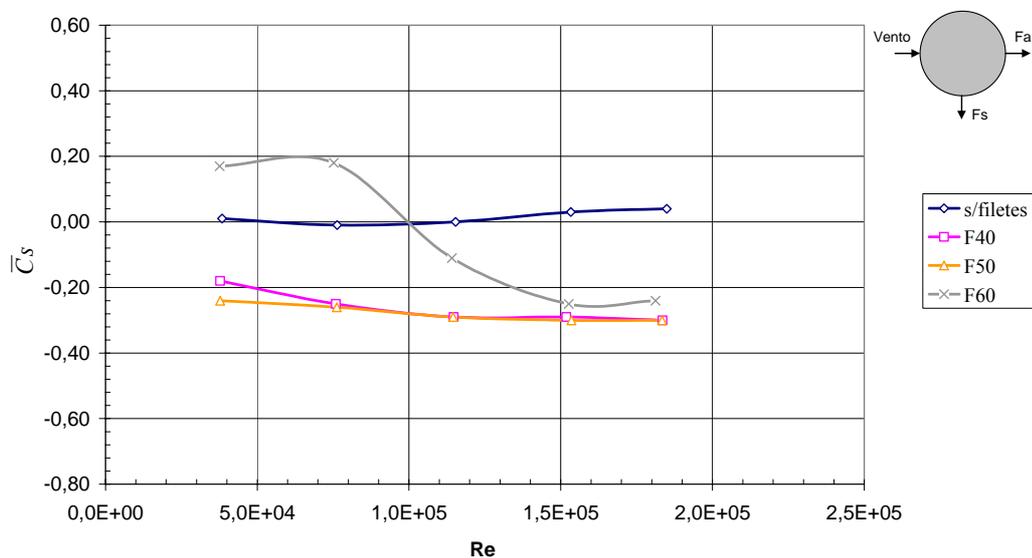


Figura 4.24 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M2).

Quando os filetes superiores estão localizados à 40° ou 50° não apresentam diferenças significativas nos coeficientes de arrasto e de sustentação médios para qualquer um dos dois tipos de escoamento.

Modelo M3: Para o modelo, qualquer uma das posições do filete apresentou o mesmo aumento de aproximadamente 0,25 no valor de \bar{C}_a (Figura 4.25).

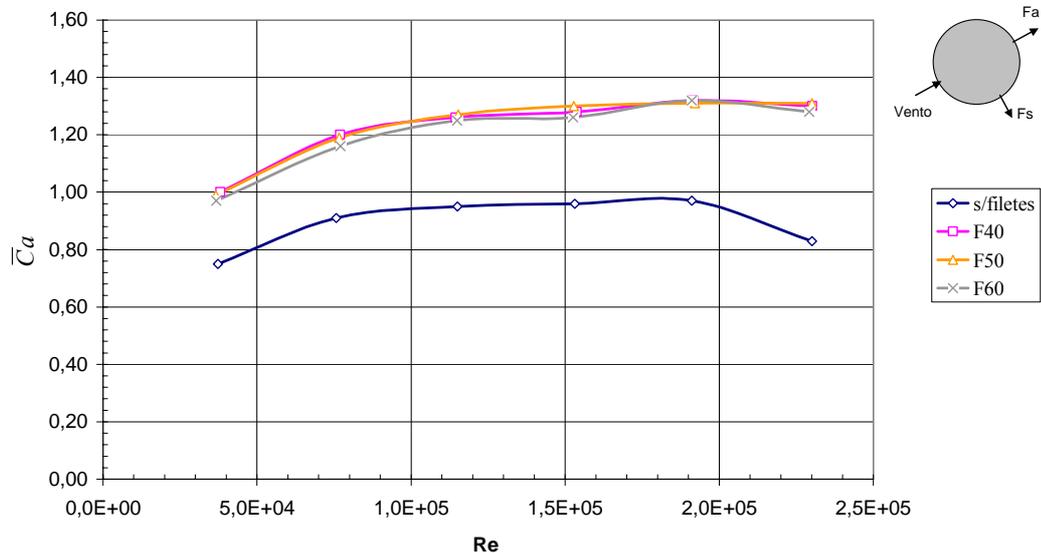


Figura 4.25 - Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M3).

Para escoamento turbulento o aumento de \bar{C}_a para todas as posições dos filetes foi mais acentuado (Figura 4.26).

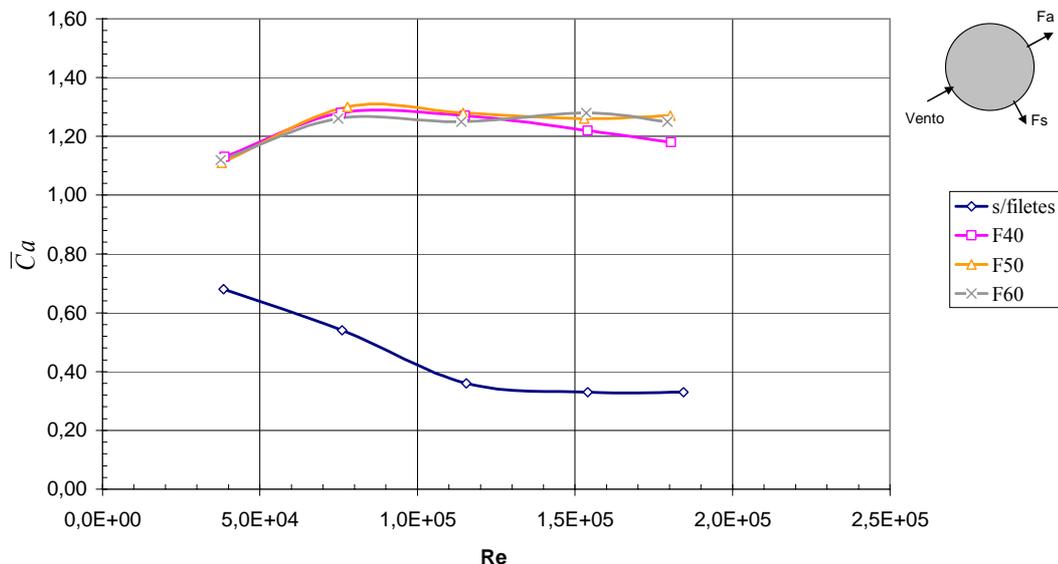


Figura 4.26 - Coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e turbulento (M3).

Na Figura 4.27 nota-se claramente o aumento das sucções na esteira do modelo causado pelos filetes superior e inferior. O aumento das pressões na esteira do modelo e a

semelhança da distribuição de pressões para todas as posições do filete justifica o aumento do \bar{C}_a e a semelhança dos valores encontrados.

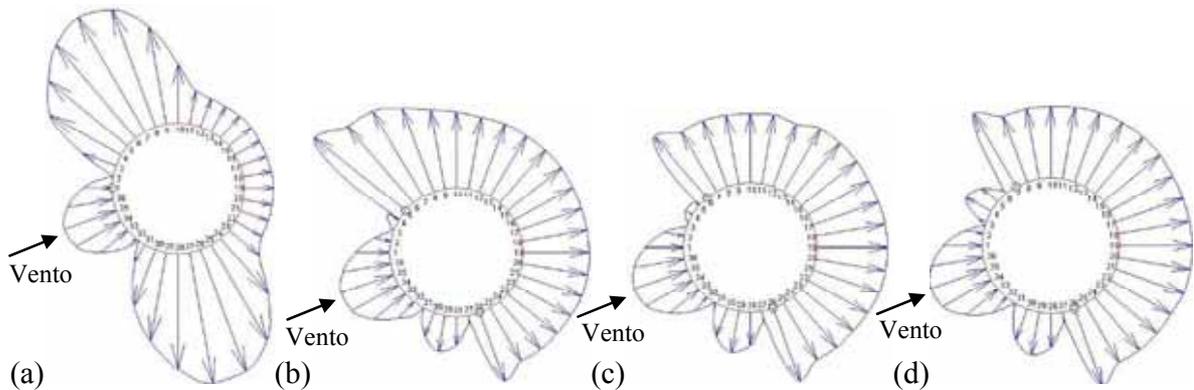


Figura 4.27 – Distribuição de pressões externas obtidos em escoamento uniforme e turbulento para $Re \cong 1,9 \times 10^5$ (a) SF, (b) F40, (c) F50 e (d) F60.

Para a análise dos \bar{C}_s serão utilizados os valores em módulo e os símbolos (sentido para cima \uparrow) e (sentido para baixo \downarrow) para representar o sentido da força de sustentação. Para o modelo sem filetes em escoamento suave todos os valores de \bar{C}_s apresentaram-se nulos para Re entre $3,9 \times 10^4$ a $1,5 \times 10^5$ e diferentes de zero acima de $Re \cong 1,5 \times 10^5$. A partir da análise dos coeficientes de sustentação médios qualquer posição dos filetes apresenta valor de \bar{C}_s nulo (Figura 4.28).

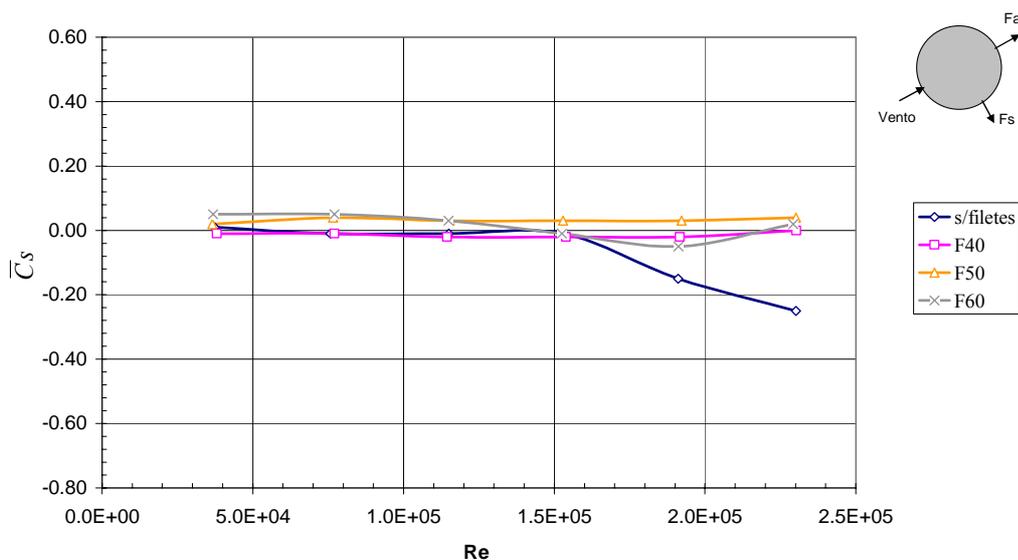


Figura 4.28 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M3).

Para escoamento turbulento todos os valores de \bar{C}_s apresentaram-se aproximadamente nulos, exceto a configuração F40 (Figura 4.29). Nesta posição as sucções sobre o F_1 são maiores, portanto aumentando o valor do \bar{C}_s (Figura 4.27).

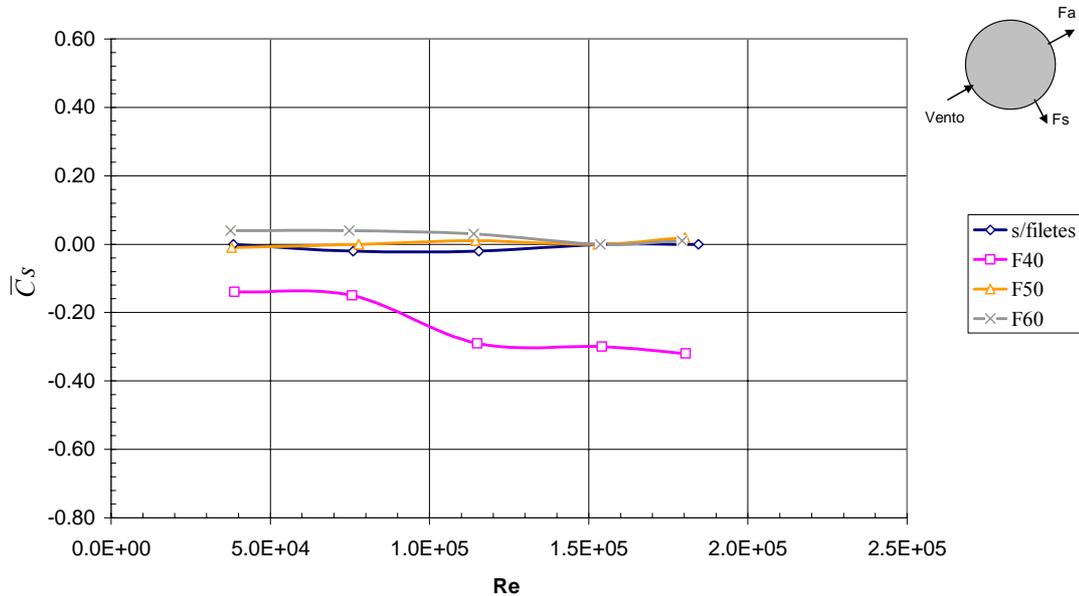


Figura 4.29 - Coeficientes de sustentação em função do número de Reynolds, obtidos em escoamento uniforme e suave (M3).

Considerações gerais: o maior acréscimo de \bar{C}_a ocorreu para todos os modelos quando o filete superior estava localizado a 60° em escoamento turbulento. Observam-se grandes variações nos valores de \bar{C}_a para pequenas alterações das posições dos filetes. Em escoamento turbulento, nenhum dos modelos apresentou indícios de formação de borbulhas. A distribuição de pressões médias para os modelos M1 e M2 apresentaram-se semelhantes para as mesmas configurações e condições de ensaio, enquanto que para o M3 a distribuição de pressões médias foi diferenciada dos outros modelos.

Nota-se para todos os modelos que tanto o filete superior quanto o inferior a qualquer uma das posições ensaiadas causam um aumento da pressão imediatamente a barlavento do filete e forte sucção sobre o filete e a sotavento deste. Este efeito é maximizado no escoamento turbulento. Nota-se também pequena maximização com o aumento do Re. Em escoamento turbulento cada modelo apresentou distribuição de pressões sem alterações perceptíveis para qualquer valor de Re. Em escoamento suave a distribuição apresenta-se mais acentuada para valores de Re mais altos. O F_2 só apresenta influência no descolamento junto ao modelo M1 e M2 para valores de Re a partir de $1,2 \times 10^5$ quando a espessura da esteira

torna-se mais estreita. O M3 apresentou influência do F_2 para todos os valores de Re . Para todos os ensaios com os modelos M1 e M2 nota-se que para certa faixa de Re o \bar{C}_s pode inverter o sentido quando o F_1 se move de 40° a 60° .

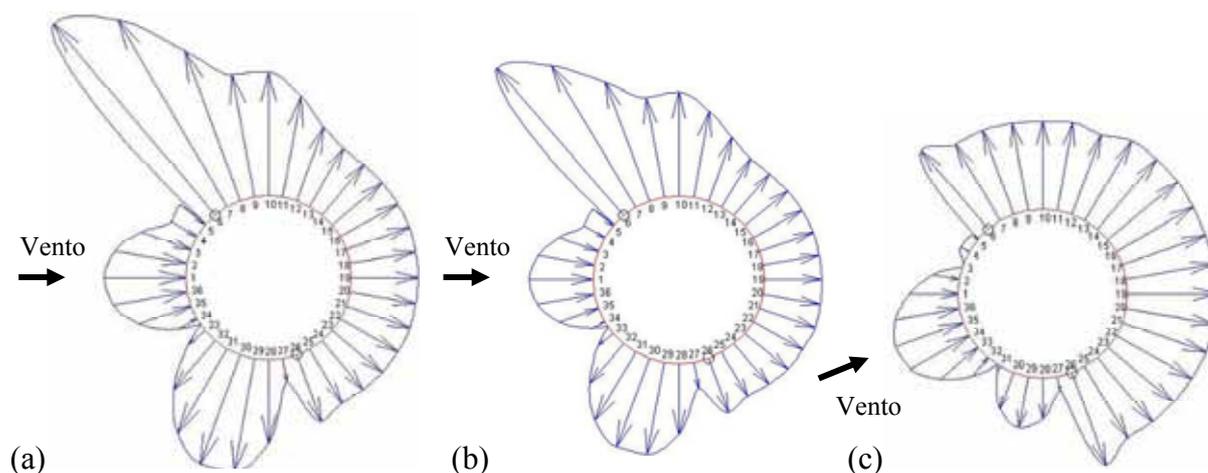


Figura 4.30 – Distribuição de pressões externas obtidos em escoamento uniforme e turbulento para $Re \cong 1,9 \times 10^5$ (a) M1, (b) M2 e (c) M3.

Para os três modelos ensaiados sem a presença de filetes nota-se um primeiro pico elevado nos valores RMS dos coeficientes de pressões externas na posição 70° em escoamento suave e 110° em escoamento turbulento. Estes picos podem representar o descolamento do escoamento sobre o cilindro. A Figura 4.31 apresenta o gráfico RMS dos coeficientes em questão para cada configuração de posição de filetes. Observe que o descolamento ocorre sempre sobre os filetes.

De acordo com a Figura 4.32 o descolamento só é identificado sobre o F_2 na faixa de Re a partir de $1,2 \times 10^5$. Para as velocidades altas, portanto o F_2 passaria a influenciar no escoamento gerando componentes de pressões que tenderiam a anular as componentes geradas pelo F_1 amortecendo o efeito chuva e vento. Pode ser que o F_2 suprima as vibrações induzidas por chuva e vento para valores de Re altos.

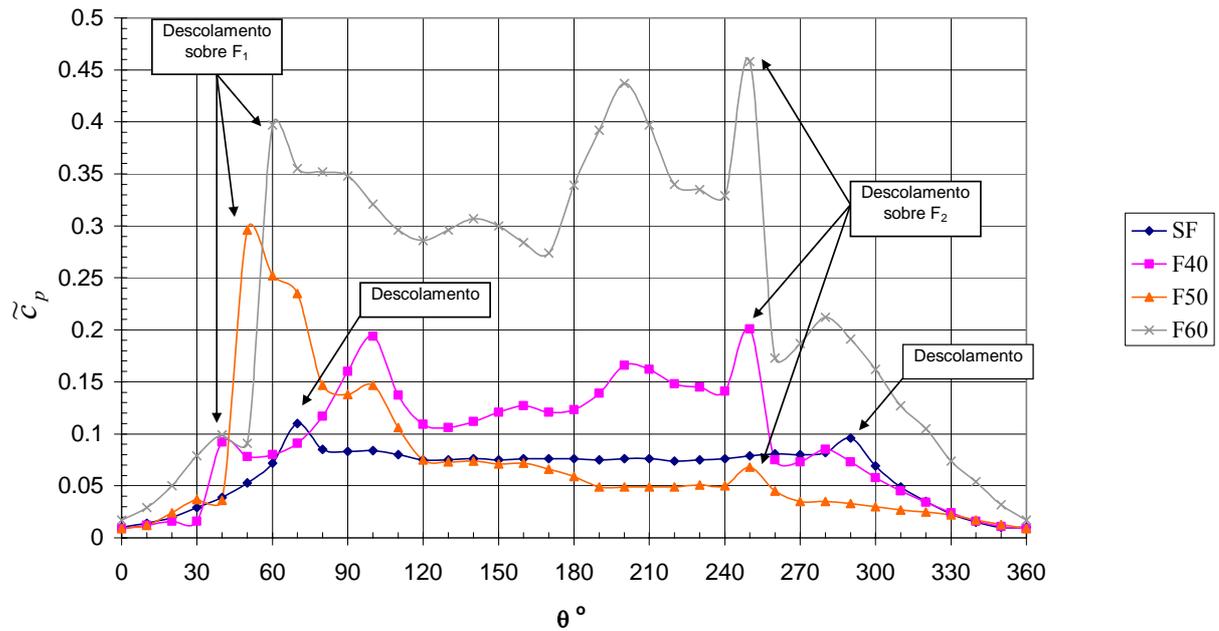


Figura 4.31 – RMS dos coeficientes de pressão externa para o modelo M1, obtidos em escoamento uniforme e suave, $Re \cong 1,9 \times 10^5$, para as configurações SF, F40, F50 e F60.

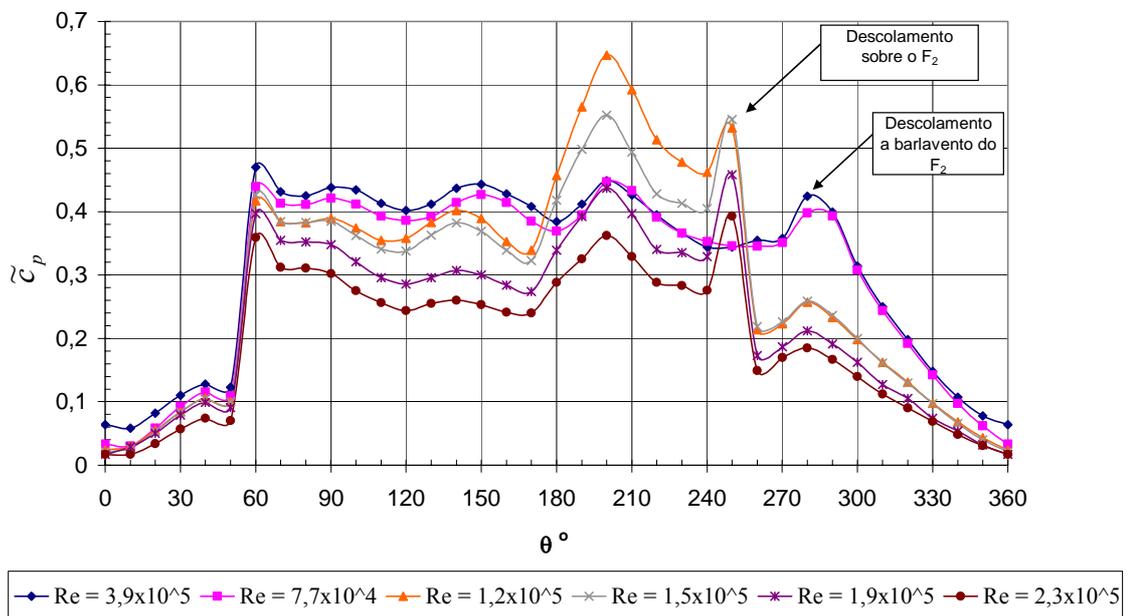


Figura 4.32 – RMS dos coeficientes de pressão externa para o modelo M1, obtidos em escoamento uniforme e suave para a configuração F60.

4.8.2 Análise espectral

Foram determinados espectros de potência⁴ das séries temporais dos coeficientes de arrasto e sustentação instantâneos e das pressões externas em cada tomada. As séries temporais dos coeficientes de arrasto e de sustentação foram obtidas a partir do cálculo das resultantes para cada instante do sinal instantâneo dos coeficientes de pressão externa. Os espectros serão apresentados nas ordenadas como $S(f) \times 1000$ [1/Hz] e nas abscissas como fD/V para maior clareza na análise. A seguir são feitas observações a partir dos resultados obtidos.

Modelo M1: O modelo apresentou pequena oscilação durante o ensaio para as velocidades do vento de 20 e 25m/s. Pode ser que a frequência de desprendimento de um par de vórtices tenha coincidido ou ficado próximo de uma das frequências naturais do modelo.

Os valores de fD/V (frequência reduzida) encontrados para o modelo estão em torno das frequências de Strouhal ($St = 0,2$) para o modelo SF na faixa de Re estudada. A Figura 4.33 apresenta valores de St variando com Re e espectros caracterizando as flutuações na esteira de um cilindro rígido com vento incidindo perpendicularmente ao eixo longitudinal.

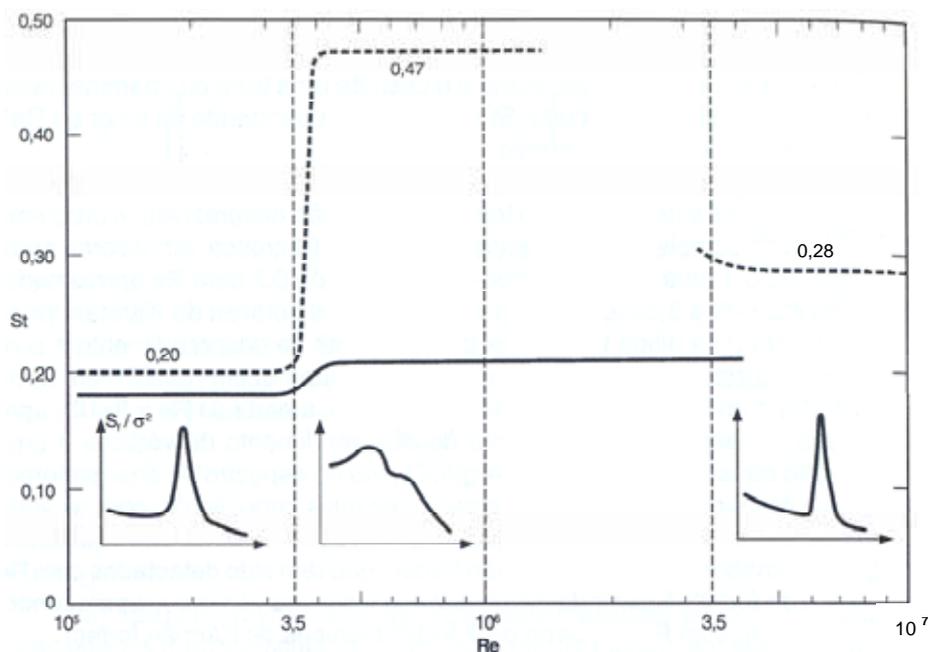


Figura 4.33 – $St \times Re$ e espectros (Blessmann, 2005).

⁴ O espectro de potência de um fenômeno indica a distribuição, nas diversas frequências, da energia contida neste fenômeno.

Observou-se para o modelo SF que com o aumento de Re os picos dos espectros se tornaram pouco pronunciados e a base do espectro cada vez mais larga. Os espectros de potência do sinal do coeficiente de arrasto apresentaram picos pronunciados com frequências 2 vezes os valores das frequências obtidas nos espectros do C_s para os respectivos Re . Este comportamento caracteriza o desprendimento de vórtices de Kármán. As forças na direção transversal ao vento ocorreram na frequência do desprendimento de cada par de vórtices enquanto que na direção do vento ocorreram na frequência de desprendimento individual dos vórtices. Na direção do vento as forças são menores quando comparadas com as causadas na direção transversal. Blessmann (2005) explica com mais detalhes o fenômeno do desprendimento de vórtices e as características dos espectros de potência para o fenômeno. Observou-se que com o aumento do Re os vórtices foram se tornando mais fracos. Este enfraquecimento dos vórtices foi caracterizado qualitativamente em Ribeiro (1989) (Figura 2.4).

As Figuras Figura 4.34 e 4.35 apresentam os espectros de potência dos sinais de C_a e de C_s para o escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$ para todas as configurações, SF, F40, F50 e F60. Para as análises seguintes será utilizado o valor de $Re \cong 7,7 \times 10^4$, para o qual foram observadas amplitudes máximas causadas pela ação combinada de chuva e vento em ensaios realizados por outros autores.

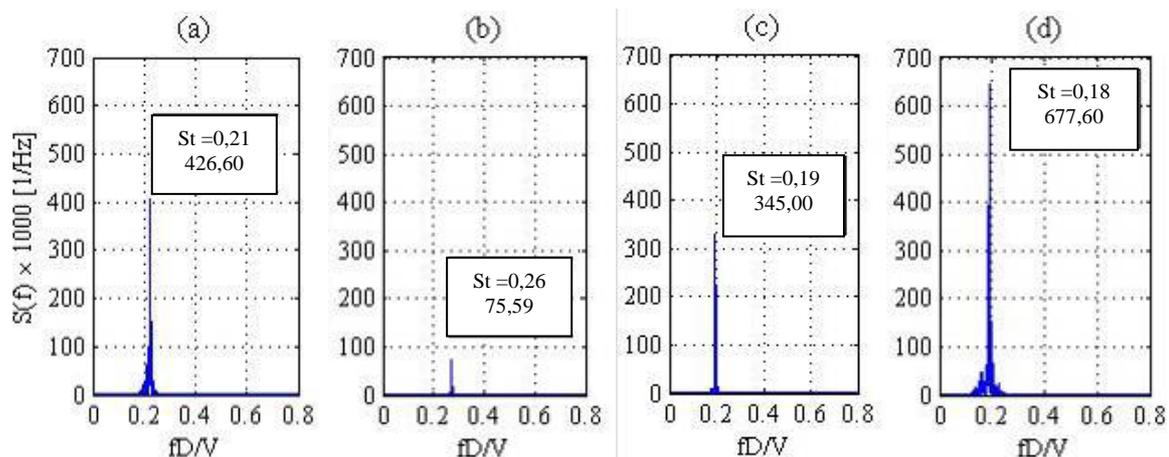


Figura 4.34 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1.

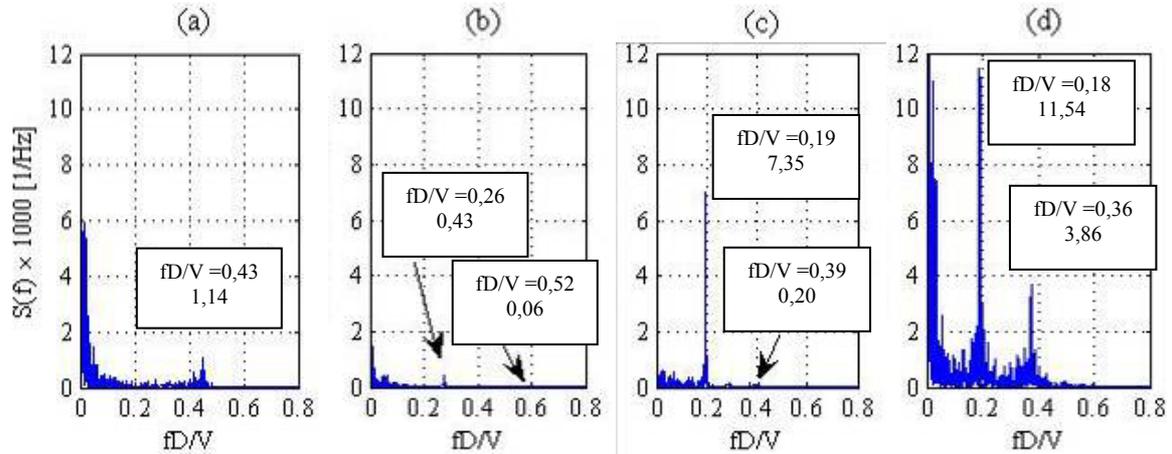


Figura 4.35 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de arrasto (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1.

Os valores de St encontrados a partir da análise da Figura 4.34 apresentam comportamento semelhante ao encontrado por Matsumoto et al. (2007). A Figura 4.36 apresenta o resultado da variação do número de Strouhal para um modelo de cabo com filete superior artificial horizontal com ângulo de incidência igual a zero, escoamento suave e $Re \cong 2,9 \times 10^4$.

Observe na Figura 4.34 que para as posições do filete superior entre 40° e 60° os valores de St no $S(f)$ do Cs apresentam queda brusca, semelhante ao comportamento observado na (Figura 4.36).

Para o modelo em escoamento turbulento não foi possível identificar picos pronunciados. Provavelmente as contribuições aleatórias geradas pela turbulência do escoamento mascararam a frequência de desprendimento de vórtices.

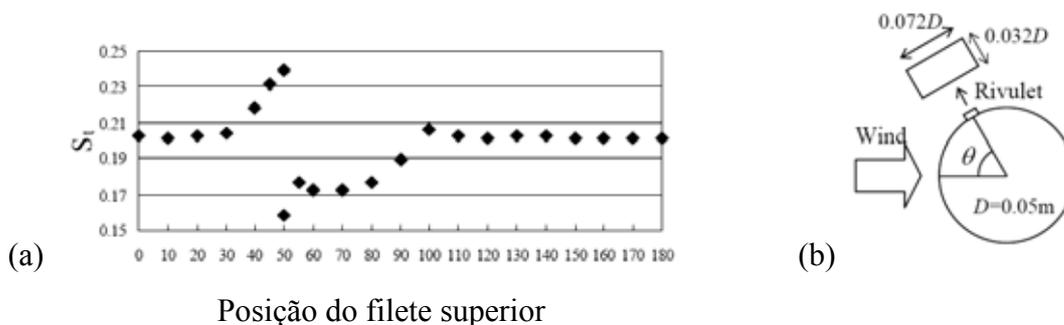


Figura 4.36 – (a) Número de Strouhal variando com a posição do filete superior e (b) a configuração utilizada no ensaio (Matsumoto, 2007).

A Figura 4.37 apresenta os espectros de potência dos coeficientes de pressões externas das tomadas de pressão que apresentaram picos de energia representativos para o modelo M1 sem filetes em escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

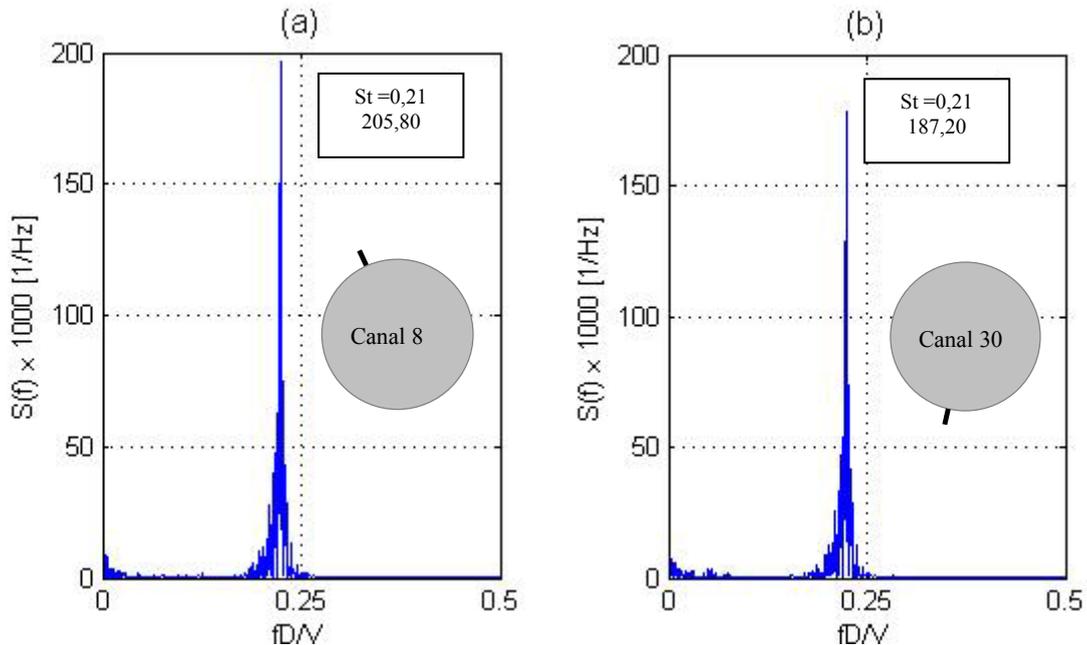


Figura 4.37 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 8, (b) canal 30, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1, SF.

A Figura 4.37 apresenta os maiores picos de energia que ocorreram nas tomadas 8 e 30, que são simétricas em relação ao eixo horizontal da seção. Estas posições devido a maior energia atingida representam o local do desprendimento de vórtices no modelo sem filetes.

A Figura 4.38 apresenta os espectros de potência dos coeficientes de pressões externas das tomadas de pressão que apresentaram picos de energia representativos para o modelo M1 para a configuração F40 em escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

Observe na Figura 4.38 que a intensidade do pico do espectro sobre a tomada 5 (F_1) é maior que a tomada 4; na tomada 7 diminui novamente e depois volta a aumentar na tomada 11. Pode estar ocorrendo o desprendimento de vórtices sobre o filete superior (intensidade mais forte) e o escoamento recolando sobre a tomada 7 (intensidade mais fraca) e novo desprendimento sobre a tomada 11 (intensidade mais forte). Na parte inferior do modelo o desprendimento ocorre sobre as tomadas 29.

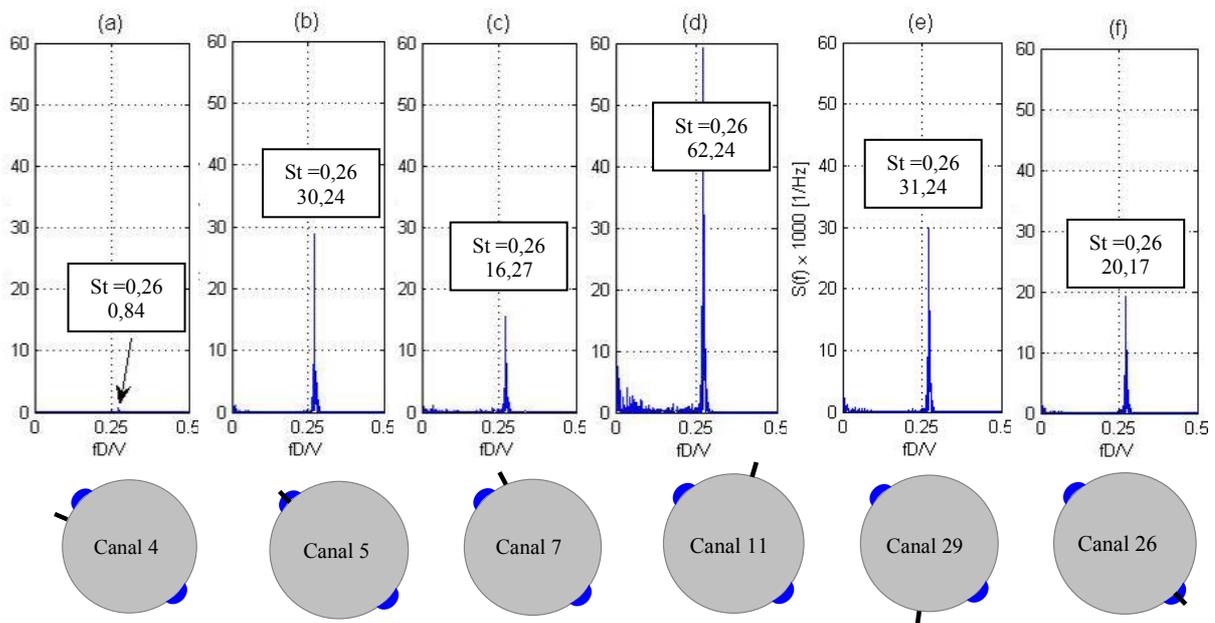


Figura 4.38 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 4, (b) canal 5, (c) canal 7, (d) canal 11, (e) canal 29, (f) canal 26, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F40.

A Figura 4.39 apresenta os espectros de potência dos coeficientes de pressões externas das tomadas de pressão que apresentaram picos de energia representativos para o modelo M1 para a configuração F50 em escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$. Observa-se o desprendimento de vórtices sobre o filete superior (canal 6). Na parte inferior do cabo o desprendimento ocorre no canal 30.

A Figura 4.40 apresenta os espectros de potência dos coeficientes de pressões externas das tomadas de pressão que apresentaram picos de energia representativos para o modelo M1 para a configuração F60 em escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

Observa-se na Figura 4.40 que o desprendimento de vórtices ocorre sobre o filete superior (canal 7). Na parte inferior do cabo o desprendimento ocorre no canal 30.

De acordo com as Figuras 4.35 a 4.41 foram feitas as seguintes análises: para a configuração F40 o valor de fD/V aumentou em relação a configuração SF enquanto que para as configurações F50 e F60 os valores de fD/V diminuíram em relação ao SF. Para a configuração F40 nota-se menor intensidade dos picos em relação às outras configurações. Nota-se também o aparecimento de um segundo pico no $S(f)$ do Ca (Figura 4.35b) de mesma frequência do desprendimento de vórtice identificado no $S(f)$ do Cs (Figura 4.34b). Esta configuração pode estar reduzindo a intensidade dos vórtices em um dos lados do cilindro. O

aumento de fD/V sugere estar ocorrendo a formação de pequenos vórtices sobre o filete superior. Para a configuração F50 nota-se aumento da intensidade do desprendimento dos vórtices e diminuição da frequência reduzida em relação às configurações SF e F40. Observa-se que no $S(f)$ do Ca (Figura 4.35c) que o segundo harmônico quase desaparece. O filete superior parece suprimir os vórtices em um dos lados do modelo fazendo com que o $S(f)$ do Cs (Figura 4.34c) coincida com o $S(f)$ do Ca. A resposta na direção do vento tem a mesma frequência da resposta transversal, porém com intensidade menor. Para a configuração F60, tanto para o $S(f)$ do Ca quanto para o $S(f)$ do Cs, os picos apresentaram maior intensidade que o modelo sem filetes. Quando o filete superior está na posição $\theta_1 = 60^\circ$ pode ocorrer aumento da intensidade dos vórtices sobre o filete. Os picos com diferentes frequências reduzidas em $S(f)$ do Ca (Figura 4.35d) indicam diferentes intensidades do desprendimento dos vórtices em cada lado do modelo.

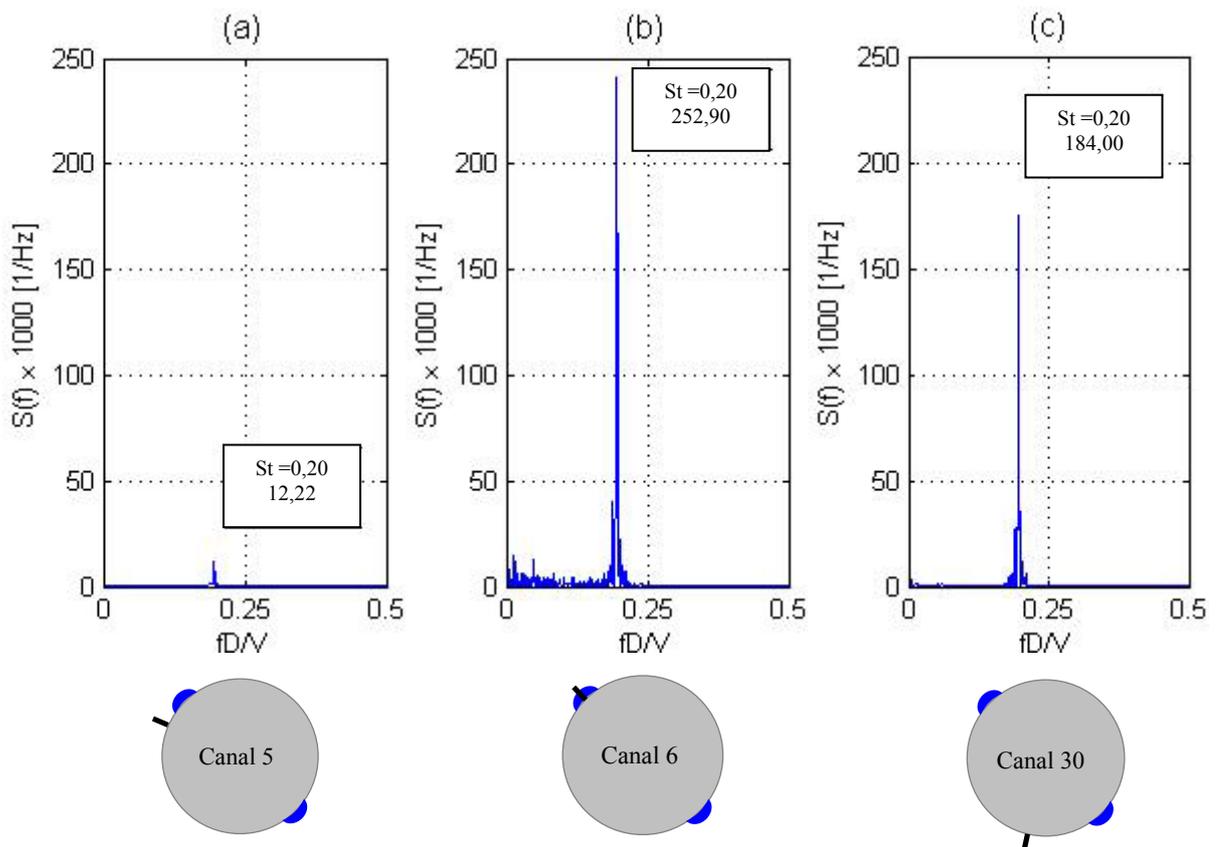


Figura 4.39 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 5, (b) canal 6, (c) canal 30, para escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F50.

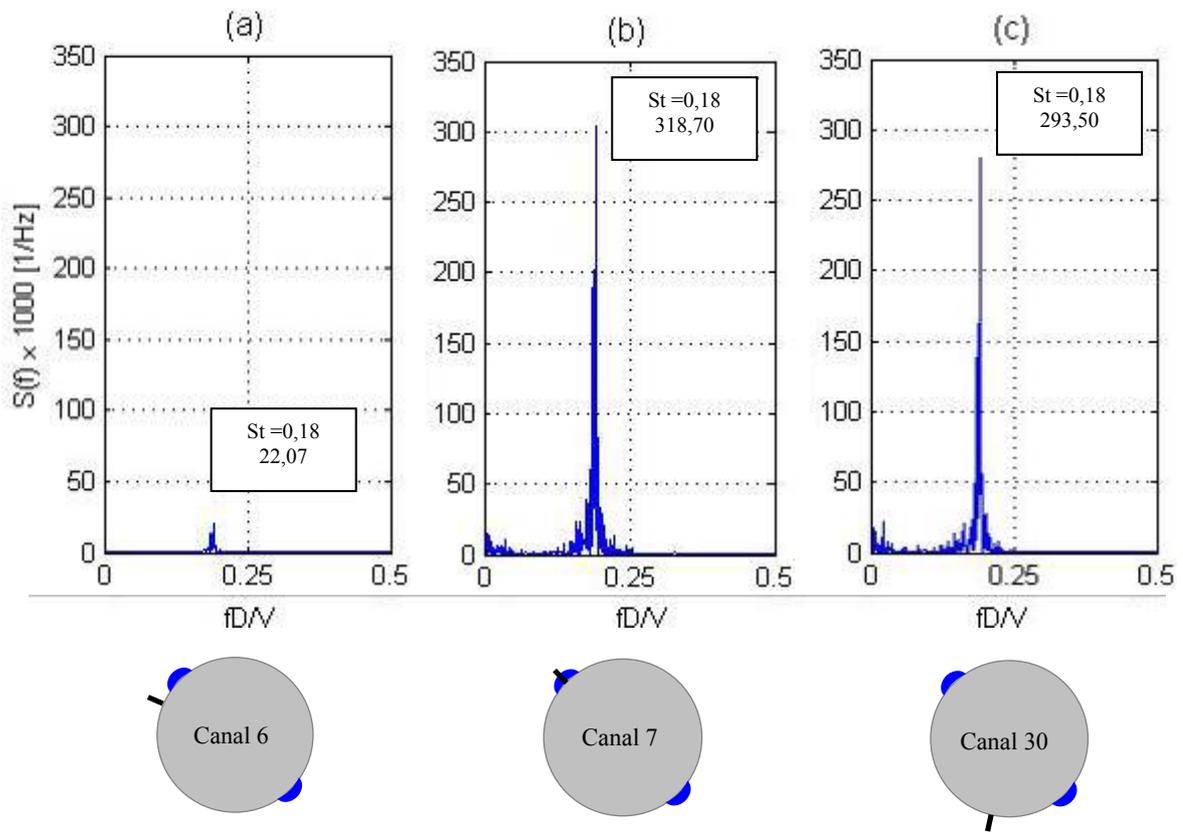


Figura 4.40 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 6, (b) canal 7, (c) canal 30, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F60.

A Figura 4.41 esquematiza o desprendimento de vórtices no modelo M1 para as configurações, SF, F40, F50 e F60. Na Figura, os vórtices esquematizam onde ocorreram as maiores intensidades dos picos no espectro de potência dos coeficientes de pressão, com os respectivos valores de $S(f) \times 1000$.

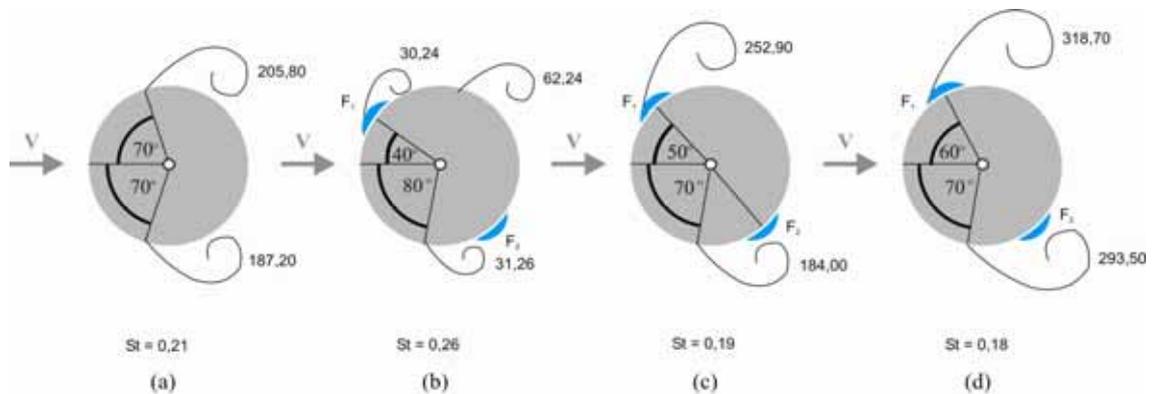


Figura 4.41 – Esquema do desprendimento de vórtices no modelo M1 para todas as configurações.

Para valores de Re maiores que $Re \cong 7,7 \times 10^4$ é possível identificar a influência do filete inferior no desprendimento de vórtices.

Os resultados apresentados acima estão de acordo com os resultados qualitativos do estudo numérico realizado por Liu et al. (2007) utilizando LES (Large Edge Simulation) (Figura 4.42).

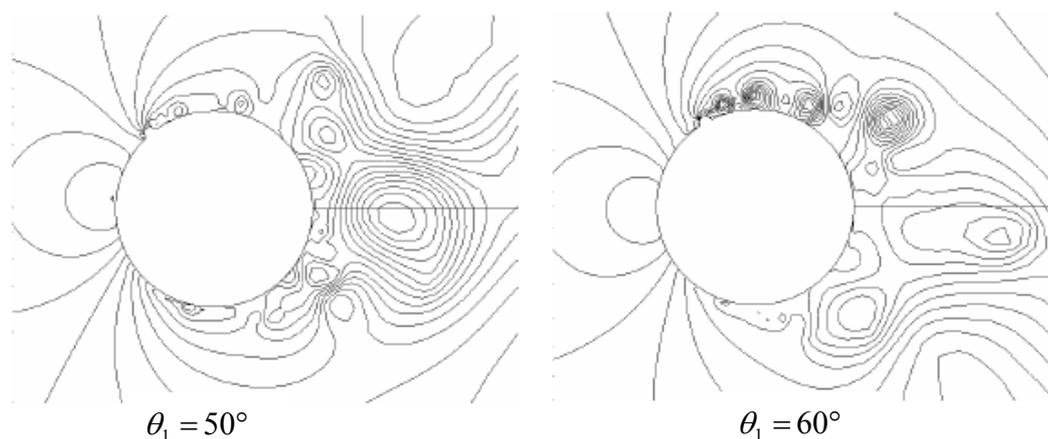


Figura 4.42 – Isolinhas de pressões para dois casos de posições dos filetes para $Re \cong 1 \times 10^4$ (Liu et. al, 2007).

Na Figura 4.42 nota-se a ocorrência de pequenos vórtices fortes para a posição de $\theta_1 = 60^\circ$.

Modelo M2: Para o modelo M2 só foi possível identificar picos mesmo que pouco definidos para Re entre $3,9 \times 10^4$ e $1,2 \times 10^5$, tanto para escoamento suave como turbulento. Para valores de Re mais altos, os sinais de arrasto e de sustentação apresentaram espectro com base larga de picos pouco definidos. Para as configurações com a presença de filetes os picos dos espectros se apresentam mais definidos, porém mais baixos comparando-se ao modelo sem filetes. Para o $S(F)$ do Ca não foi possível identificar picos pronunciados. Para o modelo em escoamento turbulento com a presença de filetes, os picos no $S(F)$ do C_s foram mais altos que o do modelo em escoamento suave. Para o modelo sem filetes em escoamento turbulento, os picos foram mais baixos que em escoamento suave. Mais adiante serão feitas análises comparativas dos espectros para os três modelos em escoamento turbulento $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

Modelo M3: Para o modelo vale as mesmas observações feitas para o modelo 2 no parágrafo anterior.

Considerações gerais: Para comparação dos resultados dos três modelos foi escolhido o valor de $Re \cong 7,7 \times 10^4$ por apresentar picos mais definidos para os modelos M2 e M3 e por este valor pertencer a uma faixa em que ocorrem fortes vibrações induzidas por chuva e vento. As Figuras 4.43 a 4.45 apresentam os espectros de potência (com os respectivos valores de St e $S(f)$) para os sinais de coeficientes de sustentação para todos os modelos e configurações, em escoamento turbulento e $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

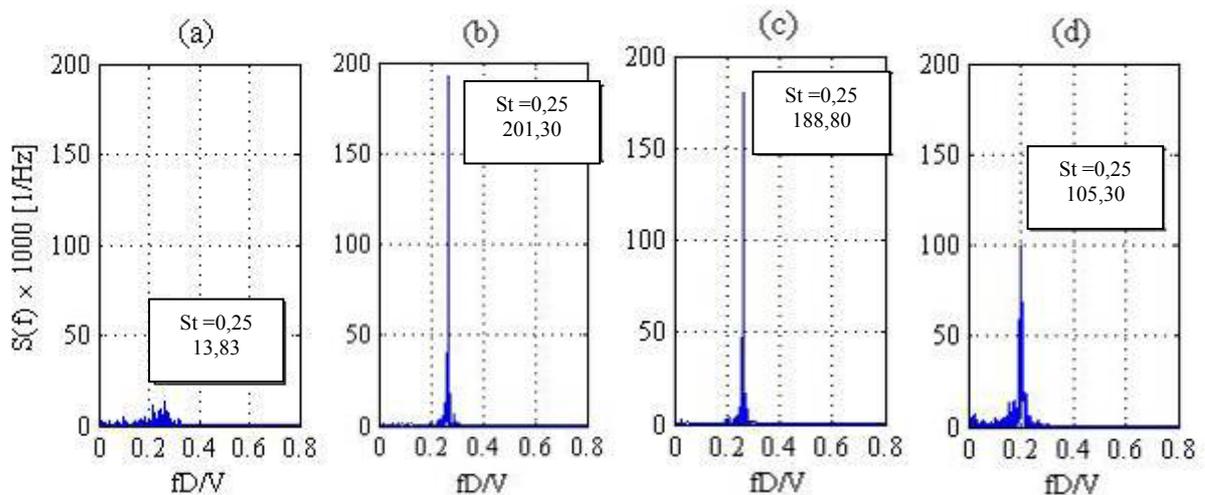


Figura 4.43 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M1 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

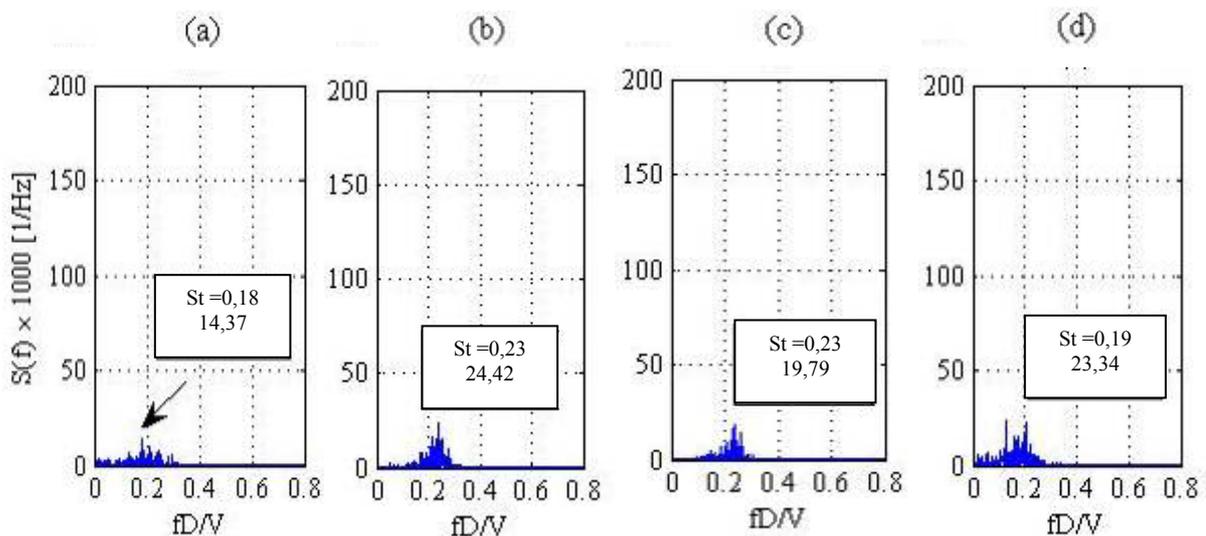


Figura 4.44 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M2 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

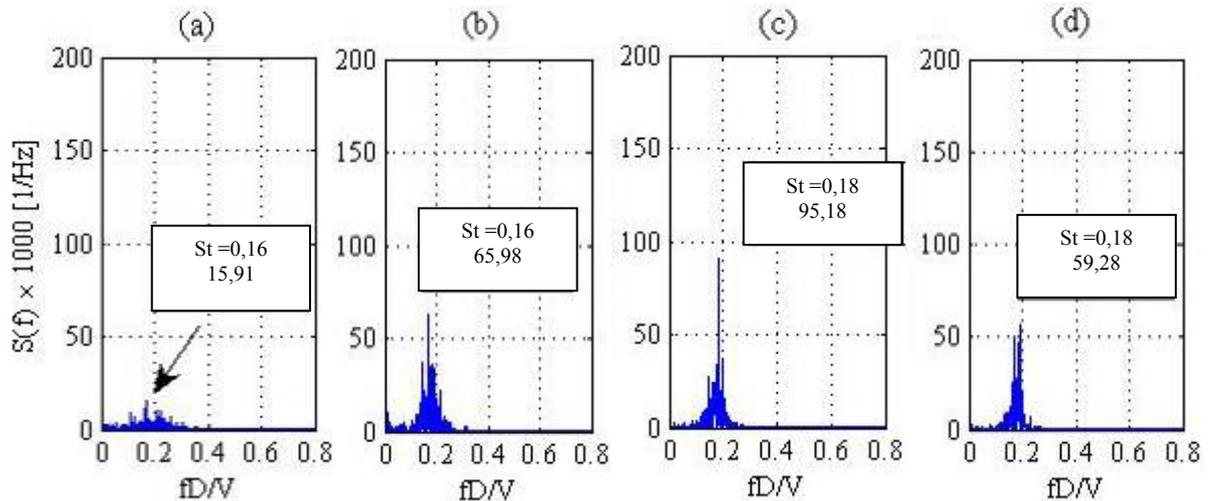


Figura 4.45 – Espectro de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M3 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

Nota-se que para o modelo M1 na configuração F40 apresentam picos mais fortes que as configurações SF, F50 e F60 (Figura 4.43a, b, c, d) ao contrário do escoamento suave em que F60 apresentou os picos mais altos (Figura 4.35d). As frequências reduzidas diminuem a medida que a posições dos modelos no túnel mudam de M1 para M2 para M3. O modelo M3 apresentou maior pico na configuração F50, no entanto as configurações F40 e F60 apresentaram também picos com intensidades semelhantes. A maior intensidade dos vórtices para a configuração F50 no M3 pode estar relacionada com os ensaios de Bosdogianni e Olivari (1996) onde encontraram as maiores amplitudes para um modelo semelhante ao deste trabalho (Figura 3.13).

Nota-se que as frequências reduzidas para o modelo M3 foram mais baixas que as obtidas para os outros modelos. O baixo valor de fD/V pode ser causado pelo efeito dos vórtices axiais que se desprendem em cabos inclinados com frequências mais baixas que o desprendimento de vórtices de Kármán. Observa-se que a presença dos filetes para o modelo representativo de cabo de ponte estaiada, modelo M3, aumenta a força de desprendimento de vórtices principalmente quando o modelo apresenta as configurações F50 e F60.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados foi possível determinar as características aerodinâmicas de cabos de pontes estaiadas submetidos à ação combinada de chuva e vento no que diz respeito à influência dos filetes sobre as forças aerodinâmicas (arrasto e sustentação) e no desprendimento de vórtices nos modelos seccionais. Foram medidas pressões externas instantâneas em volta de três modelos seccionais reduzidos de um cabo típico de uma ponte estaiada com e sem a presença de filetes artificiais.

A partir dos sinais de pressões externas foi possível determinar a distribuição e o valor RMS dos coeficientes de pressões médias externas, séries temporais dos coeficientes de pressão externa para cada tomada de pressão, séries temporais dos coeficientes de arrasto e sustentação e espectro de potencia dos sinais instantâneos de coeficientes de pressão externa para cada tomada e dos coeficientes de arrasto e sustentação instantâneos.

Os três modelos foram escolhidos com o intuito de identificar a semelhança entre cabos inclinados (M3) e cabos horizontais com a presença de filetes com vento incidente normal (M1) e oblíquo ao eixo do cabo (M2).

A partir da análise dos resultados pode-se tirar a seguintes conclusões:

- O filete na posição $\theta_1 = 60^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$ aumenta as sucções na esteira do modelo M3 consideravelmente;
- A separação do escoamento para cabos inclinados ocorre sobre os filetes;
- Para qualquer posição dos filetes no M3 não ocorreram mudanças nos coeficientes de sustentação. O coeficiente de arrasto aumentou com a presença dos filetes, mas não apresentaram mudanças com a variação da posição dos filetes. Pode ser que o fenômeno seja dinâmico caracterizado pela dinâmica da interação do vento, filete e cabo.
- Em modelos horizontais, a presença dos filetes pode causar supressão ou amplificação da intensidade do desprendimento de vórtices dependendo da localização dos filetes;

- Para o M3 notou-se aumento da intensidade do desprendimento de vórtices para qualquer posição dos filetes, no entanto a maior intensidade ocorreu para F50. A maior intensidade dos vórtices para a configuração F50 no M3 pode estar relacionada com os ensaios de Bosdogianni e Olivari (1996) onde encontraram as maiores amplitudes para mesmas posições de filetes e modelo semelhante com ao deste trabalho (Figura 3.13);
- Para todos os modelos com filetes o desprendimento de vórtices é mais forte em escoamento turbulento;
- Independente da presença dos filetes o modelo inclinado (M3) apresentou frequências de desprendimento de vórtices mais baixas que as obtidas por vórtices de Kármán convencional. Verifica-se, portanto o efeito de vórtice axial;
- Para os modelos horizontais, o filete inferior não tem influência sobre o escoamento para Re abaixo de $1,2 \times 10^4$. Para Re acima de $1,2 \times 10^4$ o filete inferior influencia nitidamente no escoamento. Para o modelo inclinado o filete inferior apresentou influência no escoamento para todos os valores de Re .

TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios com anemômetro de fio quente na esteira dos modelos para entender melhor o fenômeno de desprendimento de vórtices sobre os filetes artificiais.
- Realizar ensaios de dispositivos mitigadores de vibrações.
- Realizar outras técnicas de análise de forma que permita identificar o comportamento do escoamento ao longo do eixo longitudinal de modelos inclinados.
- Realizar ensaios utilizando modelos dinâmicos com filetes d'água reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1990. 263p.
- BLESSMANN, J. **Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2005. 282p.
- BOSDOGIANNI, A., OLIVARI, D. *Wind- and rain-induced oscillations of cables of stayed bridges*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 1996. v.64, p.171-185.
- BURGH, A. H. P., HARTONO, J. *Rain-wind-induced vibrations of a simple oscillator*. **International Journal of Non-Linear Mechanics**. Elsevier Science Publisher, 2004. v.39, p.93-100.
- BURGH, A. H. P., HARTONO, J., ABRAMIAN, A. K. *A new model for study of rain-wind-induced vibrations of a simple oscillator*. **International Journal of Non-Linear Mechanics**. Elsevier Science Publisher, 2006. v.41, p.345-358.
- BURTON, D., CAO, D. Q., TUCKER, R. W., WANG, C. *On the stability of stay cables under light wind and rain conditions*. **Journal of Sound and Vibration**. Elsevier Science Publisher, 2005. v.279, p.89-117.
- CAO, D. Q., TUCKER, R. W., WANG, C. *A stochastic approach to cable dynamics with moving rivulets*. **Journal of Sound and Vibration**. Elsevier Science Publisher, 2003. v.268, v.291-304.
- CHEN, Z. Q., WANG, X. Y., KO, J. M., NI, Y. Q., SPENCER, B. F., JR. YANG, G. *MR damping system on dongting lake cable-stayed bridge (Resumo)*. **Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures**. Liu, Shih-Chi, 2003, v.5057, p. 229-235. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- CHEN, Z. Q., WANG, X. Y., KO, J. M., NI, Y. Q., SPENCER, B. F., YANG, G., HU, J. H. *MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge(Resumo)*. **Wind & Structures**. Techno Press, 2004. v.7, n° 5, p.293-304. Disponível em: <<http://technopress.kaist.ac.kr>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- CONSETINO, N., CECCOLI, C., FLAMAND, O. *Rain-wind induced vibration of stay cables: experimental results and numerical interpretation (Resumo)*. **International Journal of Fluid Mechanics Research**. Begellhouse, 2002. v.29. Disponível em: <<http://www.edata-center.com/journals>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- DENOËL V., HORTMANN, M., SEDLACEK, G. *Praktisches verfahren zur bemessung von brückenseilen und -hängern zur vermeidung regen-wind-induzierter schwingungen (Resumo)*. **Stahlbau**. John Wiley & Sons, 2007, v.76, p. 126-130.

Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/114112926>>.
Acesso em: 7 maio 2007.

- DREYER, O. **Regen-wind induzierte seil-schwingungen in laminarer und turbulenter strömung**. Tese de Doutorado, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2004, 103p.
- FARELL, C., BLESSMANN, J. *On critical flow around smooth circular cylinders*. **Journal of Fluid Mechanics**. Cambridge University Press, 1983. v.136, p.375-391.
- FLAMAND, O. *Rain-wind induced vibration of cables*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 1995. v.57, p.353-362.
- GU, M., LIU, C., XU, Y., XIANG, H. *Response characteristics of wind excited cables with artificial rivulet*. **Applied Mathematics and Mechanics**. Shanghai University, 2002, v.23, p.1176-1187.
- GU, M., DU, X. *Experimental investigation of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2005. v.93, p.79-95.
- GU, M. *Study on wind-rain induced vibration of stay cables of cable-stayed bridges based on quasi-steady assumption*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007. pp.17-40.
- HIKAMI, Y., SHIRAISHI, N. *Rain-wind induced vibrations of cables in cable stayed bridges*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 1988. v.29, p.409-418.
- HORTMANN, M., KRAUS, O., SEDLACEK, G. *Simulation of rain-wind-induced vibrations in wind tunnel tests using a dry model with fluctuating position of the rivulet*. In: **Fourth International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications**. September, 2000. pp.11-14.
- LEMAITRE, C., ALAM, M. M., HÉMON, P., LANGRE, E., ZHOU, Y. *Rainwater rivulets on a cable subject to wind*. **Comptes Rendus Mécanique**. Elsevier SAS, 2006. v.334, p.158-163.
- LEMAITRE, C., HÉMON, P., DE LANGRE, E. *Thin water film around cable subject to wind*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2007. v.95, p.1259-1271.
- LI, W e LIN, Z. *Experimental study on rain-wind induced vibration of cables in cable-stayed bridge (Resumo)*. **Wind & Structures**. Techno Press, Jan-Mar, 2005. v.26, p.33-37.
Disponível em: <<http://technopress.kaist.ac.kr/>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- LI, S. Y., CHEN Z. Q., GU, M., LIU, G. D. *Theoretical analysis of rain-wind induced vibration of stay cable: a coupled two-mass oscillator with three degrees-of-freedom*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007a. pp.887-894.

- LI, Y., XU, Y. L., SHUM, K. M., CHEN, B. *Mechanism and prediction of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007b. pp.911-918.
- LI, S. Y., GU, M. *A theoretical model of rain-wind induced vibration of 3-D stay cable with given moving rivulet*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007. pp.2543-2550.
- LIMAS, L. F. **Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. 150p.
- LIU, Q., MATSUMOTO, M., YAGI, T., HORI, K. *LES study on the mechanism of rain-wind induced vibration of cable-stayed bridge*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007. pp.895-902.
- LOREDO-SOUZA, A. M., SCHETTINI, E. B. C., PALUCH, M. J. *Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento*. In: Sergio Viçosa Möler; Jorge Hugo Silvestrini. **Turbulência**. : ABCM, 2004. v. 4, p. 137-163.
- MATSUMOTO, M., SHIRAISHI, N., SHIRATO, H. *Rain-wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 1992. v.41-44, p.2011-2022.
- MATSUMOTO, M., SAITOH, T., KITAZAWA, M., SHIRATO, H., NISHIZAKI, T. *Response characteristics of rain-wind induced vibration of stay-cables of cable-stayed bridges*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 1995, v.57, p.323-333.
- MATSUMOTO, M., YAGI, T., SHIGEMURA, Y., TSUSHIMA, D. *Vortex-induced cable vibration of cable-stayed bridges at high reduced wind velocity*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2001, v.89, p.633-647.
- MATSUMOTO, M., YAGI, T., GOTO, M., SAKAI, S. *Rain-wind-induced vibration of inclined cables at limited high reduced wind velocity region*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2003a. v.91, p.1-12.
- MATSUMOTO, M., SHIRATO, H., YAGI, T., GOTO, M., SAKAI, S., OHYA, J. *Field observation of the full-scale wind-induced cable vibration*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2003b. v.91, p.13-26.
- MATSUMOTO, M., SHIRATO, H., YAGI, T., HAYASHI, T., SAKAI, S., OHYA, J., OKADA, T., OISHI, T. *Investigations on wind-induced vibrations of stay-cables based on field observations and wind tunnel tests (Resumo)*. **Kyoto Daigaku Bosai Kenkyujo nenpo**. Kyoto University, 2003c. v.46, p.319-329. Disponível em: <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=15476451>>. Acesso em: 7 maio 2007.

- MATSUMOTO, M., SHIRAISHI, N., KITAZAWA, M., KNISELY, C., SHIRATO, H., KIM, Y., TSUJII, M. *Aerodynamic behavior of inclined circular cylinders-cable aerodynamics*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier, 1990. v.33, p.63-72.
- MATSUMOTO, M., YAGI, T., ADACHI, Y., HATSUDA, H., SHIMA, T. *Karman vortex effects on aerodynamic instabilities of inclined stay-cables*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007. pp.175-182.
- NAHRATH, N. **Modellierung regen-wind-induzierter schwingungen**. Tese de Doutorado, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2003, 118p.
- NI, Y. Q., SHIRATO, H., YAGI, T., GOTO, M., SAKAI, S., OHYA, J. *Field observation of rain-wind-induced cable vibration in cable-stayed Dongting Lake bridge*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2007, v.95, p.303-328.
- NÚÑEZ, G. J. Z. **Determinação experimental e teórica da resposta de uma torre de telecomunicações de concreto armado**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. 119p.
- PEIL, U., DREYER, O. *Rain-wind induced vibrations of cables in laminar and turbulent flow*. **Wind and Structures**. Technopress, 2007. v.10, nº1, p. 83-97.
- PEIL, U., STEILN, O. *Regen-wind-induzierte schwingungen – ein State-of-the-Art*. **Stahlbau**. Technopress, 2007. v.76, nº1, p. 34-46.
- PER, U., NAHRATH, N. *Modeling of rain-wind induced (Resumo)*. **Wind & Structures**. Techno Press, 2003. v.6, nº 1, p.41-52. Disponível em: <<http://md1.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=200304220147CE&q=rain+wind+induced+vibrations&uid=789784856&setcookie=yes>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- PHELAN, R. S., SARKAR, P. P., MEHTA, K. C. *Full-scale measurements to investigate rain-wind induced cable-stay vibration and its mitigation*. **Journal of Bridge Engineering**. American Society of Civil Engineering, 2006. v.11, p. 293-304.
- PODOLNY, W., SCALZI, J. B. **Construction and design of cable-stayed bridges**. New York: Wiley & Sons, 1976. 506p.
- RIBEIRO, J. L. D. **Efeitos da rugosidade superficial sobre as pressões médias e flutuantes em cilindros circulares fixos em fluxo bidimensional**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989. 199p.

- ROBERTSON, A., TAYLOR, I. J. *Effect of rivulets on a circular cylinder using a 2D discrete vortex method*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007. pp.863-870.
- RUSCHEWEYH, H., VERWIEBE, C. *Rain-wind-induced vibrations of steel bars*. In: **International Association for Wind Engineering, papers for Ninth International Conference**. 1995. pp.69-71.
- SARKAR, P. P., GARDNER, T. B. *Model tests to study rain/wind-induced vibration of stay cables*. In: **Proceedings of Structures Congress 2000, ASCE**. Philadelphia, PA, May, 2000. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=ASCECP000103040492000045000001&idtype=cvips&gifs=yes>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- SHAMES, I. H. **Mecânica dos fluidos. Vol. 1 Princípios básicos**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1973. 532p.
- SIMIU, E.; SCANLAN, R. **Wind Effects on Structures**. 3^a ed. USA: A Wiley-Interscience Publication, 1996. 450p.
- SCHWARZKOPF, D., SEDLACEK, G. *Regen-wind-induzierte schwingungen - ein berechnungsmodell auf der grundlage der neuesten erkenntnisse (Resumo)*. **Stahlbau**. John Wiley & Sons, 2005, v.74, p. 901-907. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/112217769>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- SEIDEL, C., DINKLER, D. *Rain-wind induced vibrations – phenomenology, mechanical modeling and numerical analysis*. **Computers & Structures**. Elsevier Science Publisher, 2006, v.84, p.584-1595.
- SEIDEL, C., DINKLER, D. *Mode switching of rain-wind induced vibrations*. In: **XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics**. Warsaw, Poland. August, 2004. pp.1584-1595.
- SEIDEL, C., DINKLER, D. *Schwingungsformwechsel bei regen-wind induzierten schwingungen (Resumo)*. **PAMM**. John Wiley & Sons, 2004, v.4, p. 372-373. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- SEIDEL, C., DINKLER, D. *Regen-wind-induzierte schwingungen - Ursache und Beschreibung (Resumo)*. **PAMM**. John Wiley & Sons, 2003, v.2, p. 76-77. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com>>. Acesso em: 7 maio 2007.
- TORNERI, P. **Comportamento estrutural de pontes estaiadas: comparação de alternativas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 272p.
- TROITSKY, M. S. **Cable-stayed bridges: theory and design**. London: Crosby Lockwood Staples, 1977. 385p.

- VERWIEBE, C., RUSCHEWEYH, H. *Rain-wind-induced vibrations of very steep or vertical steel bars*. In: **Third International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications**, Blacksburg, Virginia, USA. July, 1996. pp.CVIII 13- CVIII 14.
- VERWIEBE, C., RUSCHEWEYH, H. *Recent research results concerning the exciting mechanisms of rain-wind-induced vibrations*. In: **2nd European and African Conference on Wind Engineering**, Genova, Italy. June, 1997. pp.1783-1789.
- VERWIEBE, C. *Rain-wind-induced vibrations of cables and bars*. In: **Proceedings of International Symposium on advances in bridge aerodynamics**. Copenhagen, Denmark. May, 1998. pp.255-263.
- VIRLOGEUX, M. *Recent evolution of cable-stayed bridges*. **Engineering of Structures**. Elsevier Science Publisher, 1999. v.21, p.737-755.
- WANG, L., XU, Y. L. *Wind-rain-induced vibration of cable: an analytical model (1)*. **International Journal of Solids and Structures**. Elsevier Science Publisher, 2003. v.40, p.1265-1280.
- WANG, Z. J., ZHOU, Y., HUANG, J. F., XU, Y. L.. *Fluid dynamics around an inclined cylinder with running water rivulets*. **Journal of Fluids and Structures**. Elsevier Science Publisher, 2005. v.21, p.49-64.
- WILDE, K., WITKOWSKI, W. *Simple model of rain-wind-induced vibrations of stayed cables*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2003. v.91, p.873-891.
- XU, Y. L., WANG, L. Y. *Analytical study of wind-rain-induced cable vibration: SDOF model*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier Science Publisher, 2003. v.91, p.27-40.
- XU, Y. L., CHEN, J., NG, C. L., ZHOU, H.J. *Occurrence probability estimation of wind-rain-induced stay cable vibration*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007a. pp.199-206.
- XU, Y. L., SHUM, K. M., ZHAN, S., ZHOU, H. J. *Experimental study of wind-rain-induced cable vibration using a new test setup*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007b. pp.919-926.
- YAMAGUCHI. *Analytical study on growth mechanism of rain vibration of cables*. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. Elsevier, 1990. v.33, p.73-80.
- ZHOU, H. J., XU, Y. L. *Wind-rain-induced vibration and control of stay cables in a cable-stayed bridge*. **Structural Control and Health**. John Wiley & Sons, 2006. v.14, p.1013-1033.
- ZUO, D., CARACOGLIA, L., JONES, N. P. *Assessment of cross-tie performance in mitigating wind and rain-wind-induced stay cable vibration*. In: **Twelfth International Conference on Wind Engineering**. Cairns, Australia. July, 2007. pp.903-910.

APÊNDICE A – FOTOS DOS MODELOS

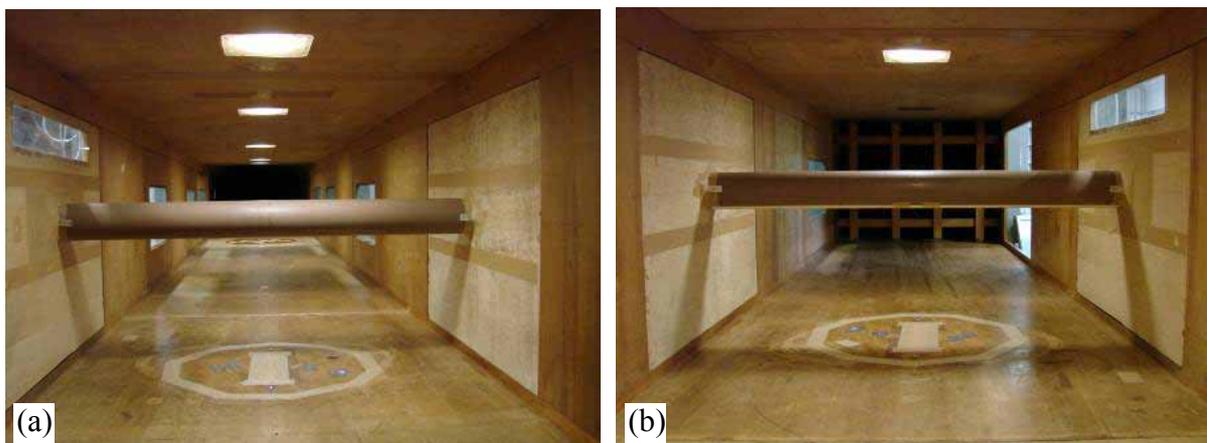


Figura A.1 – Modelo 1 (a) sem filetes visto de barlavento (b) com filetes visto de sotavento.

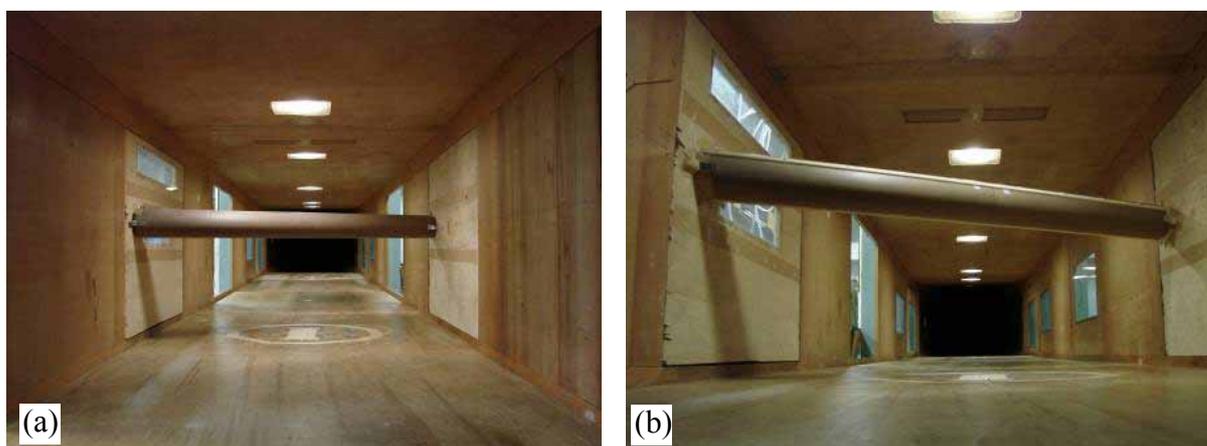


Figura A.3 – Modelo 2 (a) sem filetes visto de barlavento (b) com filetes visto de barlavento

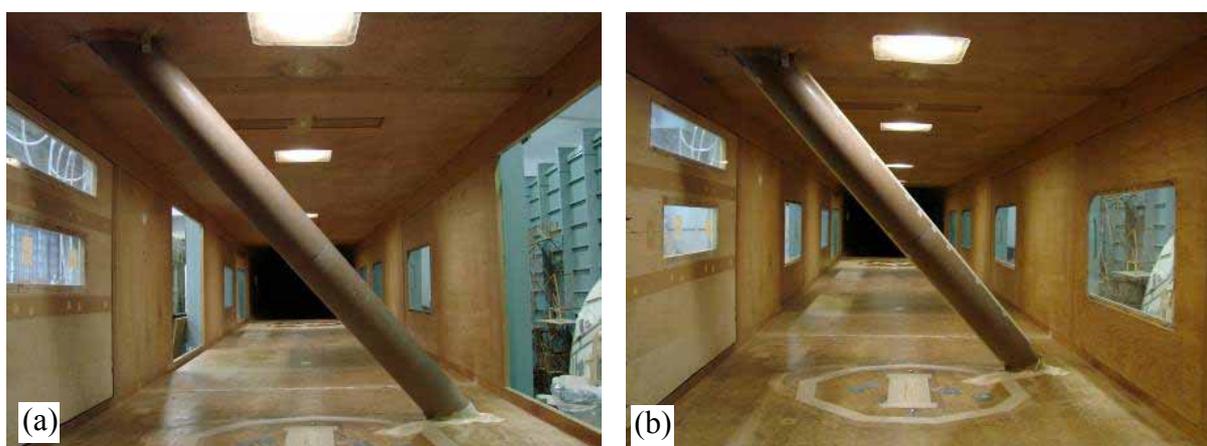


Figura A.5 – Modelo 3 (a) sem filetes visto de barlavento (b) com filetes visto de barlavento

ANEXO A - PARÂMETROS AERODINÂMICOS, Γ_1 , Γ_2 E Γ_3 . (MODELO ANALÍTICO DE XU E WANG, 2003)

$$c_0 = \cos^2 \beta + \text{sen}^2 \alpha \text{sen}^2 \beta \quad (\text{A.1})$$

$$c_1 = [2 - (\gamma - \theta_1)^2] \sqrt{c_0} \quad (\text{A.2})$$

$$c_2 = 2 \text{sen} \gamma \sqrt{c_0} \quad (\text{A.3})$$

$$c_3 = \frac{1}{\sqrt{c_0} \cos \gamma} \quad (\text{A.4})$$

$$c_4 = \frac{\theta_1 - \frac{\theta_1^3}{6}}{\sqrt{c_0} \cos \gamma} \quad (\text{A.5})$$

$$c_5 = \tan \gamma \quad (\text{A.6})$$

$$c_6 = c_5 - \theta_1 \quad (\text{A.7})$$

$$\Gamma_3 = -c_0 c_5 \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) \left(B_1 + B_2 c_6 + \frac{1}{2} B_3 c_6^2\right) - c_0 \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) \left(A_1 + A_2 c_6 + \frac{1}{2} A_3 c_6^2\right) \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned} \Gamma_1 = & \left[c_0 c_4 \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) + c_1 c_5 \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) \right] B_0 \\ & + \left[c_0 c_4 c_5 \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) + c_0 c_4 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) + c_1 c_5 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) \right] B_1 \\ & + \left[c_0 c_4 c_5 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) + \frac{c_0 c_4 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) + \frac{c_1 c_5 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) \right] B_2 \\ & + \left[\frac{c_0 c_4 c_5 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) + \frac{c_0 c_4 c_6^3}{6} \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) + \frac{c_1 c_5 c_6^3}{6} \left(1 - \frac{c_5^2}{6}\right) \right] B_3 \\ & + \left[c_1 \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) - c_0 c_4 c_5 \right] A_0 + \left[c_0 c_4 \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) + c_1 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) - c_0 c_4 c_5 c_6 \right] A_1 \\ & + \left[c_0 c_4 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) - \frac{c_0 c_4 c_5 c_6^2}{2} + \frac{c_1 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) \right] A_2 \\ & + \left[\frac{c_0 c_4 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) - \frac{c_0 c_4 c_5 c_6^3}{6} + \frac{c_1 c_6^3}{6} \left(1 - \frac{c_5^2}{2}\right) \right] A_3 \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$$\begin{aligned}
\Gamma_2 = & \left[c_0 c_3 \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) + c_2 c_5 \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) \right] B_0 \\
& + \left[c_0 c_3 c_5 \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) + c_0 c_3 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) + c_2 c_5 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) \right] B_1 \\
& + \left[c_0 c_3 c_5 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) + \frac{c_0 c_3 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) + \frac{c_2 c_5 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) \right] B_2 \\
& + \left[\frac{c_0 c_3 c_5 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) + \frac{c_0 c_3 c_6^3}{6} \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) + \frac{c_2 c_5 c_6^3}{6} \left(1 - \frac{c_5^2}{6} \right) \right] B_3 \\
& + \left[c_2 \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) - c_0 c_3 c_5 \right] A_0 + \left[c_0 c_3 \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) + c_2 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) - c_0 c_3 c_5 c_6 \right] A_1 \\
& + \left[c_0 c_3 c_6 \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) - \frac{c_0 c_3 c_5 c_6^2}{2} + \frac{c_2 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) \right] A_2 \\
& + \left[\frac{c_0 c_3 c_6^2}{2} \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) - \frac{c_0 c_3 c_5 c_6^3}{6} + \frac{c_2 c_6^3}{6} \left(1 - \frac{c_5^2}{2} \right) \right] A_3
\end{aligned} \tag{A.10}$$

ANEXO B - PARÂMETROS AERODINÂMICOS (MODELO ANALÍTICO DE WILDE E WITKOWSKI, 2003)

Coeficientes para o Modelo 1

Força de amortecimento aerodinâmico

$$Z_1 = \frac{DV\rho_{ar}}{2c_5}(C_a c_7 + C_s c_8) \quad (B.1)$$

$$Z_2 = \frac{DR\omega\rho_{ar} \cos(\omega t)\text{sen}(90^\circ - \theta_1 + a\text{sen}(\omega t))}{c_5} \left[\begin{array}{l} C_a (c_2(4 + \gamma^2) + c_1(c_4 c_5 - \gamma c_6)) + \\ C_s (c_1 c_5 - c_2(3c_3 + c_4 - 2\gamma + c_4 \gamma^2 - \gamma^3)) \end{array} \right] \quad (B.2)$$

Força excitante

$$F_1 = \frac{DV^2\rho_{ar}}{2c_5} \left[\begin{array}{l} C_a ((c_1^2 + c_2^2)(c_2 c_6 + c_1(c_4 c_5 - \gamma c_6))) \\ + C_s (c_1 c_2^2 \gamma^2 + c_1^3 c_5 - c_2^3 (c_3 + c_4 - 2\gamma + c_4 \gamma^2 - \gamma^3)) \\ + c_1^2 c_2 (-c_4 c_5 + \gamma c_6) \end{array} \right] \quad (B.3)$$

$$F_2 = \frac{DVR\omega\rho_{ar} \cos(\omega t)\text{sen}(90^\circ - \theta_1 + a\text{sen}(\omega t))}{2c_5} (C_a c_7 + C_s c_8) \quad (B.4)$$

Onde,

$$c_1 = \cos(\gamma) \quad (B.5)$$

$$c_2 = \text{sen}(\gamma) \quad (B.6)$$

$$c_3 = \tan(\gamma) \quad (B.7)$$

$$c_4 = \arctan(\gamma) \quad (B.8)$$

$$c_5 = 1 + \gamma^2 \quad (A.9)$$

$$c_6 = 2 + \gamma^2 \quad (B.10)$$

$$c_7 = c_1^2 + c_2^2(5 + 2\gamma^2) + 2c_1 c_2 (c_4 c_5 - \gamma c_6) \quad (B.11)$$

$$c_8 = c_2(c_1 + 2c_1 \gamma^2 + c_2(-3c_4 - 2c_4 + 4\gamma - 2c_4 \gamma^2 + 2\gamma^3)) \quad (B.12)$$

Coeficientes para o Modelo 2

Força de amortecimento aerodinâmico

$$Z_3 = \frac{1}{R\omega \text{sen}(90^\circ - \theta_1)} (A_1 c_{11} + A_2 c_{12} + S_1 c_{13} + S_2 c_{14}) \quad (\text{B.13})$$

Força excitante

$$A_{exc} = a \sqrt{(A_1 c_9 + S_1 c_{10})^2 + (A_1 c_{11} + A_2 c_{12} + S_1 c_{13} + S_2 c_{14})^2} \quad (\text{B.14})$$

$$\theta_{exc} = \arctan \left(\frac{A_1 c_{11} + A_2 c_{12} + S_1 c_{13} + S_2 c_{14}}{A_1 c_9 + S_1 c_{10}} \right) \quad (\text{B.15})$$

$$c_9 = - \frac{RV^2 \rho_{ar} (c_1^2 + c_2^2) c_2 (1 + c_5) + c_1 (c_4 c_5 - (1 + c_5) \gamma)}{c_5} \quad (\text{B.16})$$

$$c_{10} = - \frac{RV^2 \rho_{ar} (c_1 c_2^2 (-1 + c_5)) + c_1^3 c_5 + c_1^2 c_2 (-c_4 c_5 + \gamma + c_5 \gamma) + c_2^3 (-c_3 - c_4 c_5 + \gamma + c_5 \gamma)}{c_5} \quad (\text{B.17})$$

$$c_{11} = \frac{1}{c_5^2} V \omega \rho_{ar} \text{sen}(90^\circ - \theta_1) \left(R^2 \left(\begin{array}{l} c_1^2 (2c_4 c_5 - 2\gamma - c_5 \gamma - c_5 (90^\circ - \theta_1)) \\ + c_2^2 \left(\begin{array}{l} 6c_4 c_5 + 2c_4 c_5^2 + c_3 (4 + 3c_5) \\ - 6\gamma - 5c_5 \gamma - 3c_5 (90^\circ - \theta_1) - 2c_5^2 (90^\circ - \theta_1) \end{array} \right) \\ + c_1 c_2 \left(\begin{array}{l} 2(1 + \gamma^2) + 2c_5^2 (c_4 - \gamma) (c_4 - (90^\circ - \theta_1)) \\ + c_5 (1 - 4c_4 \gamma + 2\gamma^2 + 2\gamma (90^\circ - \theta_1)) \end{array} \right) \end{array} \right) \right) \quad (\text{B.18})$$

$$c_{12} = \frac{R^2 V \omega \rho_{ar} \text{sen}(90^\circ - \theta_1) (c_1^2 + c_2^2 (3 + 2c_5) + 2c_1 c_2 (c_4 c_5 - (1 + c_5) \gamma))}{c_5} \quad (\text{B.19})$$

$$c_{13} = \frac{R^2 V \omega \rho_{ar} \text{sen}(90^\circ - \theta_1)}{c_5^2} \left(\begin{array}{l} c_1^2 c_5 + c_1 c_2 \left(\begin{array}{l} 2c_4 (-1 + c_5) c_5 + 2\gamma - c_5 \gamma + c_5 (90^\circ - \theta_1) \\ - 2c_5^2 (90^\circ - \theta_1) \end{array} \right) \\ + c_2^2 \left(\begin{array}{l} -2 - 4c_3^2 + 3c_5 - 2c_4^2 c_5^2 + 4c_4 c_5 \gamma + 2c_4 c_5^2 \gamma - 2\gamma^2 \\ - 2c_5 \gamma^2 - 2c_4 c_5^2 (90^\circ - \theta_1) - 2c_5 \gamma (90^\circ - \theta_1) \\ - 2c_5^2 \gamma (90^\circ - \theta_1) + c_3 (-6c_4 c_5 + 6\gamma + 3c_5 \gamma + 3c_5 (90^\circ - \theta_1)) \end{array} \right) \end{array} \right) \quad (\text{B.20})$$

$$c_{14} = \frac{R^2 V \omega \rho_{ar} \text{sen}(90^\circ - \theta_1) c_2 (c_1 (-1 + 2c_5) + c_2 (-3c_3 + 2(-c_4 c_5 + \gamma + c_5 \gamma)))}{c_5} \quad (\text{B.21})$$

ANEXO C – TABELAS DE RESUMOS DE ENSAIOS E MODELOS MATEMÁTICOS DESENVOLVIDOS POR PESQUISADORES

Tabela C.1 – Ensaios experimentais relevantes realizados por pesquisadores

Posição dos filetes[°]	Tamanho [mm] e forma dos filetes	Número de Reynolds	Turbulência	Intensidade de chuva [mm/h]	Velocidade do vento no ensaio [m/s]	GDL do modelo	Ângulo de incidência do vento [°],	Ângulo de inclinação [°]	Simulação da chuva	Número de Strouhal	Massa linear [kg/m]	Amortecimento estrutural [%]	Frequência natural [Hz]	Material da superfície do cabo	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Tipo de ensaio	Pesquisador
-	-	-	-	0,3 l/min	5 a 17	Horizontal, vertical e rotacional	SSE, NNE, MMW, MW	-	Chuva real	-	51	0,11 a 0,45	-	-	65 a 200	-	Ensaio de campo (ponte Meikonishi)	Hikami e Shiraishi (1988)
-	-	Acima de $1,5 \times 10^5$	-	-	-	Vertical	0 a 45	0,30 e 42,5	Chuva real	-	-	-	-	PE, alumínio, meta-acrílico vinil, rede de fios	1,6	160	Modelo em TV (0,7mx1,0m)	Matsumoto et al. (1990)
-	-	Acima de $1,5 \times 10^5$	-	-	-	-	0 a 45	0,30 e 42,5	Chuva real	-	-	-	-	PE, alumínio, meta-acrílico vinil, rede de fios	1,5	50		

Posição dos filetes[°]	Tamanho [mm] e forma dos filetes	Número de Reynolds	Turbulência	Intensidade de chuva [mm/h]	Velocidade do vento no ensaio [m/s]	GDL do modelo	Ângulo de incidência do vento [°],	Ângulo de inclinação [°]	Simulação da chuva	Número de Scruton	Massa linear [kg/m]	Amortecimento estrutural [%]	Frequência natural [Hz]	Material da superfície do cabo	Comprimento [m]	Dímetro [mm]	Tipo de ensaio	Pesquisador
$\theta_1=0$ a 120	$d/D=0,1, 0,2$ e 0,4 (circular)	$10^4 - 10^5$	-	-	-	cilindro estacionário	0	0	Filete artificial	-	-	-	-	Alumínio com superfície suave	-	-	Ensaio de campo	Yamaguchi (1990)
$\theta_1=81, 72, 63, 58$	7x1,2 (retangular)	-	Suave / turbulento	-	-	-	35,45	0	Filete artificial	-	-	-	-	Alumínio	-	50	Modelo (AI-50) em TV (1,0mx0,75m)	Matsumoto, Shiraishi e Shirato (1992)
-	-	-	Suave / turbulento	-	-	-	45	40	Chuva artificial	-	-	-	-	PE	-	150	Modelo (PE-150) em TV (1,0mx0,75m)	
$\theta_1=50$ $\theta_2=110$	35x5 (semi-elíptico)	-	-	--	-	Horizontal, vertical	40	25	Filete artificial	6	16	0,1	1	PP e PE (cobertos com fuligem)	-	165	Modelo em TV	Flamand (1995) (modelo de cabo dinâmico)
-	35x5 (semi-elíptico)	-	4 a 12%	0 a 300	0 a 20	Horizontal, vertical	0 a 90	25	Chuva artificial	6	16	0,1	1	PP e PE (cobertos com fuligem)	-	165		
-	-	-	-	-	0 a 15	Vertical	-	-	Chuva artificial	-	-	-	-	PE	9,5	140 a 160	Ensaio de protótipo em TV-L 10mx3m(Industries Heavy Mitsubishi) e	Matsumoto et al. (1995)

Posição dos filetes[°]	Tamanho [mm] e forma dos filetes	Número de Reynolds	Turbulência	Intensidade de chuva [mm/h]	Velocidade do vento no ensaio [m/s]	GDL do modelo	Ângulo de incidência do vento [°],	Ângulo de inclinação [°]	Simulação da chuva	Número de Scruton	Massa linear [kg/m]	Amortecimento estrutural [%]	Frequência natural [Hz]	Material da superfície do cabo	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Tipo de ensaio	Pesquisador
-	-	-	-	-	-	cilindro em balanço	-	-	Chuva artificial (3 a 5 chuvinhos)	-	-	-	> 8,9Hz	Acrílico (superfície lisa)	-	Real	Modelo em TV (2,7mx1,8m)	Verwiebe e Ruschewey h (1997)
-	-	-	-	-	-	cilindro em balanço	-	-	Chuva artificial (3 a 5 chuvinhos)	-	-	-	> 8,9Hz	Acrílico (superfície lisa)	-	Real	Modelo em TV (2,7mx1,8m)	Verwiebe (1998)
-	-	-	-	-	-	cilindro em balanço	-	-	Chuva artificial (3 a 5 chuvinhos)	-	-	-	> 8,9Hz	Acrílico	-	real		Verwiebe e Ruschewey h (1998)
-	-	-	-	-	-	Vertical e rotacional	-	-	Filete artificial (balsa)	5,5		0,06	3,3	pastboard	-	30	Modelo em TV (0,4mx0,4m)	Hortmanns et al. (2000)
$\theta_1 = 43$ a 75	14,5x5 – semi-elíptico	-	< 1%	-	3 a 16 (inc. 1)	vertical	0 a 45	0	Filete artificial (madeira)	9,72	3,48 a 10,44	0,14 a 1,8	0,968 a 2,590	Polyvinyl chloride	2,5	120	Modelo TV TJ2 CLA de Tongji University	Gu et al. (2002)
-	-	-	8,3, 14,5, 18,3%	0,0 e 34	12,28 15,54 e 15,14	Horizontal, vertical e rotacional	SUD, NOR, SU-SUD.	52	Vento e chuva naturais	$Sc_1=6,534$ $Sc_3=3,722$	6,94	$\zeta_1=0,126; \zeta_2=0,072$	$f_1=1,37$ e $f_2=2,44$	Tubo de alumínio coberto de PE	30	110 (1:1)	Ensaio de campo (Laboratório de Efeitos do Vento Shionomisaki, Kyoto) $V_{max}=30m/s$	Matsumoto et al. (2003b) (modelo em tamanho real construído no campo)

Posição dos filetes[°]	Tamanho [mm] e forma dos filetes	Número de Reynolds	Turbulência	Intensidade de chuva [mm/h]	Velocidade do vento no ensaio [m/s]	GDL do modelo	Ângulo de incidência do vento [°],	Ângulo de inclinação [°]	Simulação da chuva	Número de Scruton	Massa linear [kg/m]	Amortecimento estrutural [%]	Frequência natural [Hz]	Material da superfície do cabo	Comprimento [m]	Diâmetro [mm]	Tipo de ensaio	Pesquisador
-	-	-	-	-	-	Horizontal, vertical e rotacional	37	0	-	7,6	-	-	-	Espirais, anéis elípticos e anéis circulares	0,97	102	Modelo em TV meteorológico da Univ. do Estado do Texas	Phelan et al. (2006)
$\theta_1 = 30$ a 90 (inc. 2)	37,6x8,5 (semi-elipse) e 47,4x17 (semi-circulo)	$7,04 \times 10^4$ a $2,35 \times 10^5$	-	-	3 a 10	(modelo rígido)	0 a 45 (inc. 5)	0	Filete artificial (tubo)	-	-	-	-	Material semelhante ao acrílico	3,5	350	Modelo em TV TJ3 BLWT em Tongji University (15mx2m)	Gu (2007)
Zuo, Caracoglie e Jones (2007) Ensaio de campo (ponte Fred Hartman) Realizaram ensaios para avaliação do desempenho de cabos transversais (cross-tie) na redução das vibrações induzidas por chuva e vento em cabos de pontes estaiadas.																		
-	-	-	7	-	0 a 10	Horizontal, vertical e rotacional	35	30	Sem chuva (S=0,153)	-	11,92	$\zeta_x = 0,040$; $\zeta_y = 0,025$	$f_{rx} = 1,060$; $f_{ry} = 1,209$	Tubo de aço coberto de PEAD	2,13	140 (1:1)	Modelo em TV CLP – Universidade de Ciência e Tecnologia Hong Kong (2mx3m)	Xu et al. (2007)
$\theta_1 = 40, 50$ e 55	6x6 (seção quadrada)	-	7	-	0 a 16	Horizontal, vertical e rotacional	35	30	Filete artificial	-	11,92	$\zeta_x = 0,040$; $\zeta_y = 0,025$	$f_{rx} = 1,060$; $f_{ry} = 1,209$	Tubo de aço coberto de PEAD	2,13	140 (1:1)		Xu et al. (2007)
-	-	-	7	0,16 a 1,4 l/min	0 a 16	Horizontal, vertical e rotacional	30, 35, 40	25, 30	Fluxo d'água	-	11,92	$\zeta_x = 0,040$; $\zeta_y = 0,025$	$f_{rx} = 1,060$; $f_{ry} = 1,209$	Tubo de aço coberto de PEAD	2,13	140 (1:1)		Xu et al. (2007)

Tabela C.2 – Modelos matemáticos relevantes desenvolvidos por pesquisadores para vibrações induzidas por chuva e vento

Pesquisador	GDL	Filetes considerados no modelo	Síntese
Yamaguchi (1990)	-	Superior apenas	Possibilidade do mecanismo de Den Hartog
	2GDL (vertical do cabo e rotacional do filete)	Superior apenas	Possibilidade de mecanismo torsional - formulação de galope de 2GDL, frequência natural e amortecimento aerodinâmico de modelo de 2GDL.
Verwiebe (1998)	1GDL	Ambos os filetes	Estimativa de amplitude máxima de oscilação do cabo. O modelo é baseado num sistema generalizado massa-mola-amortecedor com uma força excitante harmônica agindo sobre um sistema de uma massa.
Cao, Tucker e Wang (2003)	1GDL (vertical)	Superior apenas	Estimativa de resposta transversal do cabo à direção do vento. O modelo baseia-se em medições de coeficientes de arrasto, de sustentação e localização do filete estático realizadas em túnel de vento.
Xu e Wang (2003); Wang e Xu (2003)	1GDL (vertical)	Superior apenas	Estimativa de resposta transversal de cabo inclinado à direção do vento. O modelo baseia-se em medições de coeficientes de arrasto, de sustentação e localização do filete estático realizadas em túnel de vento.
Wilde e Witkowski (2003)	1GDL (vertical)	Superior apenas	O modelo é baseado na análise de um modo que descreve oscilações acopladas do cabo e do filete. A linearização do modelo permite avaliar o amortecimento aerodinâmico e forças de excitação e fornece uma fórmula simples para estimação das amplitudes de vibração no cabo.
Lemaitre et al. (2006)	-	Ambos os filetes	Propõe-se um critério de estimativa da posição dos filetes d'água sobre a superfície de cilindros, onde o número de Froude é o parâmetro de controle. É considerada uma configuração simples do cabo onde o cilindro encontra-se declinado na direção do vento, ou seja, qualquer inclinação, porém, ângulo de ataque igual a 90 graus.
Li et al. (2007a)	3GDL (horizontal e vertical do cabo e circunferencial do filete superior)	Superior apenas	O modelo teórico assume que a interação entre forças do filete superior e superfície do cabo inclui força de amortecimento de Coulomb e força de amortecimento linear. O modelo utiliza coeficientes aerodinâmicos do cabo e do filete obtidos a partir de medições em cabo inclinado de 30° e ângulo de ataque de 35°.

Pesquisador	GDL	Filetes considerados no modelo	Síntese
Li e Gu (2007)	Cabo estaiado contínuo tri-dimensional	Superior apenas	O modelo teórico considera estai contínuo tri-dimensional com filete movendo-se segundo lei senoidal, portanto, oscilação forçada deste. Pode-se obter a resposta de todos os modos, efeitos do perfil de velocidades do vento, frequência do filete e distribuição deste ao longo do cabo.
Li et al. (2007b)	1GDL (Vertical)	Superior apenas	O modelo analítico considera coeficientes aerodinâmicos medidos diretamente do modelo de cabo espacila em escoamento tri-dimensional.
Gu (2007)	2GDL (Vertical) – modelo bidimensional / Cabo estaiado contínuo tri-dimensional – modelo tridimensional	Superior apenas em ambos os modelos	O estudo foi dividido em duas partes. O primeiro modelo teórico considera um modelo seccional rígido 2-D com um filete em movimento e um critério de instabilidade é proposto. O segundo 3-D de cabos contínuos se baseiam em medições de forças aerodinâmicas em cabo com ângulo de inclinação e de incidência do vento diferentes de zero.
Xu et al. (2007)	-	-	Método que estimatima da probabilidade de ocorrência das vibrações induzidas por chuva e vento em cabos de pontes estaiadas. O método se baseia na análise estatística da velocidade e direção do vento e da intensidade de chuva. Esta análise torna-se importante para auxiliar profissionais na determinação da necessidade de programar sistemas mitigadores de vibrações.