

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM**  
**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE**  
**CONCRETO ARMADO E AÇO**

**EFEITOS AERODINÂMICOS EM CABOS DE PONTES ESTAIADAS**

**RODOLFO ALVES CARVALHO**

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE  
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO

**EFEITOS AERODINÂMICOS EM CABOS DE PONTES ESTAIADAS**

RODOLFO ALVES CARVALHO

Trabalho Final apresentado ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Especialista em Análise e Dimensionamento de Estruturas de Concreto Armado e Aço".

Comissão Examinadora:

---

Prof. Hermes Carvalho, D.Sc.  
DEES – UFMG (Orientador)

---

Prof. Fernando Amorim de Paula, D.Sc.  
DEES – UFMG

Belo Horizonte, 07 de fevereiro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, a priori, a minha amada mãe que sempre me proporcionou incondicional amor, condição sine qua non para o meu desenvolvimento.

Agradeço a meu pai por todo amor e por cada valiosa lição.

Agradeço as minhas irmãs por todo o apoio e amizade.

Agradeço a minha namorada, Letícia Barros, por todo carinho a mim dedicado.

Agradeço ao ilustre professor Hermes Carvalho pelos valiosos conhecimentos transmitidos e por relevante apoio, sempre, de modo espontâneo e paciente.

Agradeço a todos os demais professores e funcionários do DEES-UFMG pela disponibilização no atendimento as minhas demandas como aluno.

## **Resumo**

No período pós segunda guerra mundial, a implementação de pontes estaiadas cresceu acentuadamente em função de suas peculiaridades técnicas, estéticas e econômicas. A evolução das técnicas de análise estrutural e dos materiais de engenharia têm conduzido a utilização dessas pontes com estruturas mais flexíveis e vãos cada vez maiores. Vários danos causados pela ação do vento têm sido reportados com frequência ao redor do mundo, muitos associados a vibração dos estais. Apesar de todo o esforço dos pesquisadores, os mecanismos de vibração dos estais devido à ação do vento ainda não foram completamente compreendidos. Grande preocupação por parte dos projetistas tem sido direcionada aos efeitos do vento nos estais e no tabuleiro da ponte. Uma melhor compreensão do estado da arte dos fenômenos aerodinâmicos associados aos estais pode ser útil na prevenção de situações indesejáveis nos projetos desses elementos estruturais. No presente trabalho apresenta-se uma revisão bibliográfica do estado da arte dos efeitos aerodinâmico nos estais de pontes estaiadas, algumas recomendações de projeto para evitá-los e também dois exemplos de aplicação com fulcro em prescrições normativas.

**Palavras-chave:** Ponte estaiada, forças de vento, aerodinâmica de cabos estais.

# SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS .....	8
	LISTA DE TABELAS .....	10
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Pontes Estaiadas .....	11
1.1.1	Definição .....	11
1.1.2	Breve histórico.....	12
1.1.3	Danos Causado pelo vento estais de pontes estaiadas .....	17
1.2	Relevância Do Problema.....	18
1.3	Metodologia do Trabalho.....	19
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>21</b>
3.1	Conceitos Gerais da Aerodinâmica .....	21
3.1.1	Coefficiente de pressão .....	21
3.1.2	Coefficiente de força e de momento .....	21
3.1.3	Coefficiente de arrasto .....	22
3.1.4	Coefficiente de sustentação ou de força lateral .....	22
3.1.5	Coefficiente de torção .....	22
3.1.6	Número de Reynolds, $Re$ .....	23
3.1.7	Número de Strouhal, $St$ .....	23
3.1.8	Número de Scruton, $Sc$ .....	23
3.1.9	Turbulência.....	23
3.1.10	Escoamento bidimensional.....	24

3.2	Aerodinâmica de Cilindros Circulares.....	24
3.2.1	Comportamento de um cilindro circular longo com eixo vertical em escoamento laminar.....	26
3.2.2	Comportamento de um cilindro circular longo com eixo vertical em escoamento turbulento.....	28
3.2.3	Comportamento de um cilindro circular longo, móvel, com eixo vertical, em escoamento turbulento.....	28
3.2.4	Amortecimento aerodinâmico .....	29
3.2.5	Aerodinâmica de cilindros circulares inclinados.....	29
3.3	Oscilações em Cabos Estais Causadas Pelo Vento .....	29
3.3.1	Martelamento ( <i>Buffeting</i> ).....	30
3.3.1.1	Martelamento ressonante ( <i>Resonant Buffeting</i> ) .....	30
3.3.2	Vibrações por vórtices .....	31
3.3.2.1	Vibrações por vórtice para cabos na esteira de um elemento estrutural .....	34
3.3.2.2	Vibrações por vórtice para cabos próximos .....	34
3.3.3	Galope ( <i>Galloping</i> ).....	35
3.3.3.1	Galope de cabos secos inclinados ( <i>Dry inclined galloping</i> ).....	37
3.3.3.2	Galope por interferência ( <i>Interference Galloping</i> ou <i>Wake Galloping</i> ).....	37
3.3.4	Vibrações induzidas por chuva e vento .....	38
3.3.4.1	Avaliação da influência de parâmetros relevantes na vibração induzida por chuva e vento .....	41
3.4	Medidas Mitigatórias .....	44
3.4.1	<i>Cross ties</i> (modificação estrutural).....	45
3.4.2	Amortecedores mecânicos (medida mecânica) .....	46
3.4.3	Modificação na Seção Transversal (Medida Aerodinâmica) .....	47

<b>4</b>	<b>PRESCRIÇÕES DO POST-TENSIONING INSTITUTE (2008) PARA CABOS DE PONSTES ESTAIADAS SUBMETIDOS A AÇÃO DO VENTO</b>	<b>48</b>
4.1	Considerações Relativas aos Mecanismos de Excitação Aerodinâmica.....	48
4.1.1	Martelamento e desprendimento de vórtices.....	48
4.1.2	Galope e vibrações induzidas por chuva e vento.....	49
4.2	Recomendações de Projeto.....	49
4.2.1	Medidas contingenciais.....	49
4.2.2	Vibrações induzidas por chuva e vento .....	49
4.2.3	Galope .....	50
4.2.4	Contorno aerodinâmico do cabo.....	50
4.2.5	Amortecimento .....	50
4.2.6	Cabos estabilizadores.....	50
4.2.7	Ruídos .....	51
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>52</b>
5.1	Exemplo de Aplicação 1 .....	52
5.2	Exemplo de Aplicação 2 .....	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1- Representação de uma ponte estaiada com seus principais componentes (Ilustrações..., 2008).....	11
Figura 1-2 Ponte Strömsund (Strömsund... ,2016).....	14
Figura 1-3- Ponte Friedrich Ebert (FRIEDRICH..., 20..) .....	15
Figura 1-4 Ponte Pasco-Kennewick (PASCO–KENNEWICK... ,20..) .....	15
Figura 1-5 - Comprimento do vão x Ano de Construção das principais pontes estaiadas do mundo (CAETANO, 2007). .....	16
Figura 3-1 Escoamento em torno de um cilindro circular (MACHADO, 2008).....	25
Figura 3-2-Regimes característicos do fluxo em torno de cilindros (os valores de Re são apenas ilustrativos) (MACHADO, 2008).....	27
Figura 3-3 Variação do coeficiente de arrasto em função de Re e da intensidade da turbulência (CAETANO, 2007).....	28
Figura 3-4 - Evolução da frequência de desprendimento de vórtice com a velocidade do vento em uma estrutura elástica (CAETANO, 2007).....	32
Figura 3-5 - Risco de vibrações induzidas por vórtice de cilindros circulares em função de Sc e da escala da turbulência. (CAETANO, 2007) .....	33
Figura 3-6 - Amplitude máxima de deslocamento provocado por vibração por vórtice na região de sincronização versus número de Sc (CAETANO, 2007).....	33
Figura 3-7 Desprendimento de vórtice na esteira de um pilar de ponte (CAETANO, 2007) ...	34
Figura 3-8 - Possíveis arranjos para grupos de estais (CAETANO, 2007).....	35
Figura 3-9 Ângulo de ataque efetivo de um corpo rombudo oscilante (CAETANO, 2007) ....	36
Figura 3-10 - Escoamento axial secundário a sotavento de um cabo inclinado (MACHADO, 2008) .....	36
Figura 3-11- Intensidade do fluxo axial para cabos inclinados (CAETANO, 2007) .....	37
Figura 3-12 Representação da posição dos filetes em um estai característico de ponte estaiada.(MACHADO, 2008).....	38
Figura 3-13- Posição dos filetes superior e inferior (MACHADO, 2008).....	39



Figura 3-14 (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 (MACHADO, 2008). .....	40
Figura 3-15 Efeito da tração no cabo sobre a resposta do primeiro modo de vibração (XU, 2013). .....	42
Figura 3-16- Efeito do coeficiente de potência na resposta do cabo (a) para o primeiro modo de vibração e (b) para o segundo modo de vibração (XU, 2013). .....	43
Figura 3-17 - Efeito do amortecimento estrutural na resposta do cabo para o primeiro modo de vibração (XU, 2013). .....	44
Figura 3-18 - Cross-ties na ponte Normandy (CAETANO, 2007). .....	46
Figura 3-19 - Amortecedores hidráulicos instalados nas pontes (a) Iroise e (b) Aratsu (CAETANO, 2007). .....	47
Figura 3-20 Modificação na seção transversal do cabo para evitar vibrações induzidas por chuva e vento (GIMSING; GEORGAKIS, 2012). .....	47
Figura 5-1- Ponte Normandy, França (SVENSSON, 2012) .....	53
Figura 5-2- Destaque dos amortecedores nas extremidades dos cabos da ponte Normandy, França (SVENSSON, 2012). .....	53
Figura 5-3- Modificações aerodinâmicas efetuadas em diferentes pontes do mundo(SVENSSON, 2012). .....	55

## **LISTA DE TABELAS**

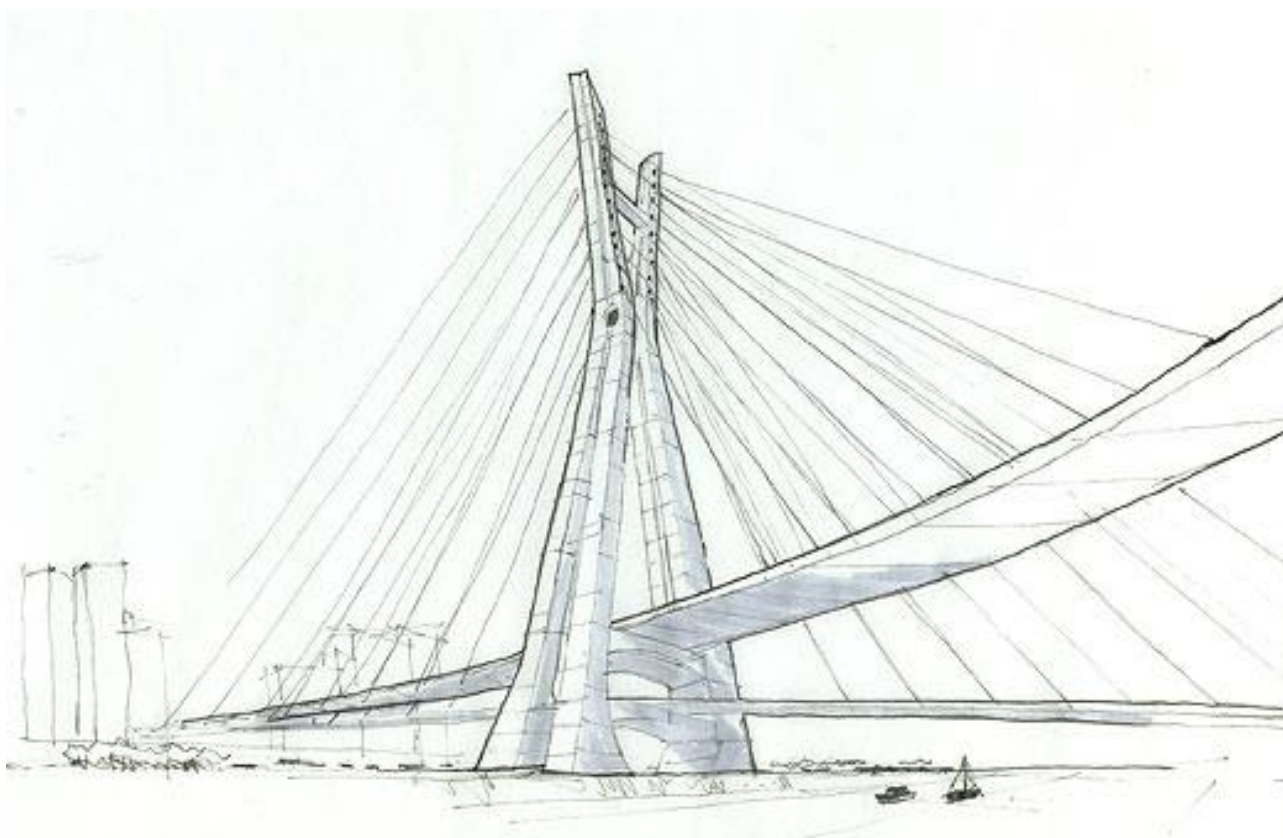
Tabela 1-1- As dez maiores pontes estaiadas do mundo (XU, 2013). .....	17
Tabela 1-2 – Exemplos de pontes estaiadas com relato de vibrações induzidas por vento (GIMSING; GEORGAKIS, 2012). .....	18

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Pontes Estaiadas

### 1.1.1 Definição

As pontes estaiadas constituem uma categoria de ponte suspensa por cabo que se caracterizam por possuírem um ou mais pilares de elevada rigidez que recebem os estais – cabos de alta resistência, pré-tensionados e submetidos a elevados níveis de tensão – cuja função é suportar o tabuleiro da ponte (YOU-LIN XU, 2013), conforme esquematicamente representado na Figura 1-1.



*Figura 1-1- Representação de uma ponte estaiada com seus principais componentes (Ilustrações..., 2008)*

### 1.1.2 Breve histórico

O conceito das pontes estaiadas têm origem no século XVII através de proposições atribuídas a Verantius (Itália, 1617) e Loscher (Alemanha, 1784). (CAETANO, 2007)

Várias aplicações por meio do uso de correntes de ferro e cordoalhas metálicas são referenciadas na literatura ao longo do século XIX. As limitações tecnológicas daquele período impossibilitou uma utilização segura dessa solução e conduziu a variados acidentes, implicando no seu desuso – consideraram-na demasiadamente flexível e insegura.

O desenvolvimento das pontes estaiadas modernas datam da segunda metade do século XX, tendo como protagonistas:

- a. Dischinger, percebeu que elevada rigidez e estabilidade poderiam ser obtidas com a utilização de cabos de alta resistência pré-tensionados.
- b. Desenvolvimento das ferramentas analíticas que permitiram uma melhor avaliação e controle de toda a estrutura

Considerada como a primeira ponte estaiada da era moderna, a ponte Strömsund (Figura 1-2), aberta ao tráfego em 1956, é composta de três vãos (o principal com 182,6m) e comprimento total de 332m. Após a segunda guerra mundial, por razões técnicas, econômicas e estéticas, essas pontes foram amplamente empregadas. É válido destacar que as pontes estaiadas sofreram uma considerável evolução em um curto período inferior a 50 anos. Mathivat as classificou em três distintas gerações que caracterizam os principais aspectos desenvolvidos. (CAETANO, 2007)

I. Primeira geração: caracteriza-se pelo uso limitado de estais distantes de grande monta, entre 30m e 80m, que condicionavam o uso de um tabuleiro com elevada rigidez a flexão. Os cabos, submetidos a níveis expressivos de tensão, implicavam em grandes concentrações de tensão e complicavam os pontos de ancoragem.

II. Segunda geração: caracteriza-se pela adoção de um sistema de suspensão parcial cujo tabuleiro é parte suportado por um grande número de cabos e parte pelo pilar. O uso de um maior número de estais resulta em duas grandes vantagens: a adoção de um tabuleiro com moderada rigidez a flexão e a redução dos esforços concentrados, simplificando o sistema de ancoragem dos cabos. A ponte Friedrich Ebert, primeira desta geração, foi construída na Alemanha em 1967 (Figura 1-3).

III. Terceira geração: corresponde a atualidade, as pontes caracterizam-se por um grande número de estais, não muito espaçados, que suportam o tabuleiro. Consegue-se, com esta forma de suspensão, um novo tipo de comportamento estrutural: o tabuleiro atua como uma corda comprimida de treliça pendurada pelo pilar por meio dos estais. Os momentos fletores de pequena monta implicam em um dimensionamento das longarinas governado por segurança contra a flambagem e limites de deformação. A ponte Pasco-Kennewick (Figura 1-4), EUA, 1978, foi a primeira a ser desenvolvida com suspensão completa por cabos. (CAETANO, 2007)



*Figura 1-2 Ponte Strömsund (Strömsund... ,2016)*



*Figura 1-3- Ponte Friedrich Ebert (FRIEDRICH..., 20..)*



*Figura 1-4 Ponte Pasco-Kennewick (PASCO-KENNEWICK..., 20..)*



Ao longo do seu desenvolvimento, as pontes estaiadas se tornaram mais esbeltas e com vãos cada vez maiores. A Figura 1-5 mostra o incremento do comprimento dos vãos ao longo do tempo para as mais relevantes pontes estaiadas do mundo. (CAETANO, 2007)

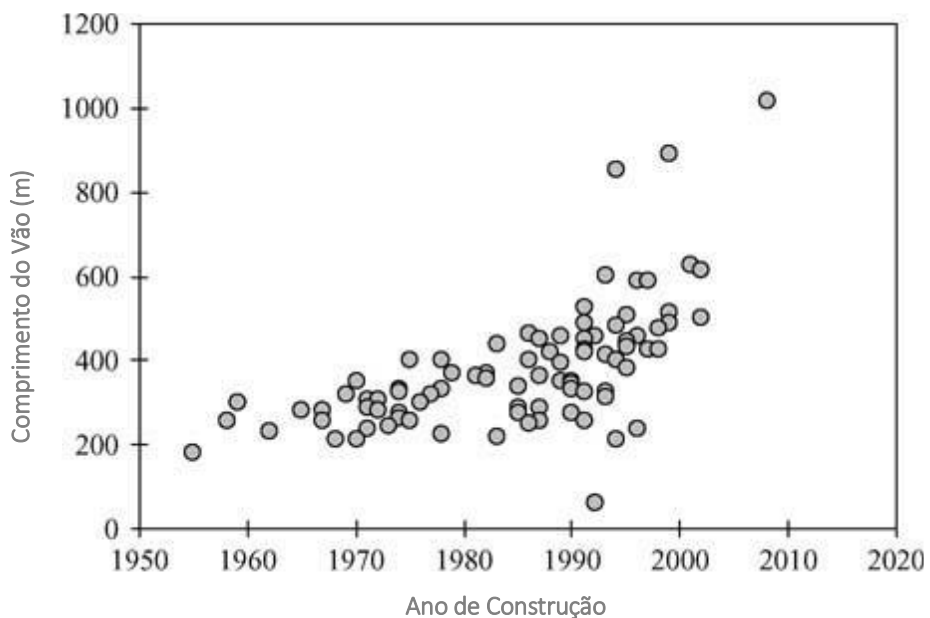


Figura 1-5 - Comprimento do vão x Ano de Construção das principais pontes estaiadas do mundo (CAETANO, 2007).

A Tabela 1-1 elenca, em ordem crescente, as dez maiores pontes estaiadas do mundo (até setembro de 2012) datando o ano e o local de cada construção.



Tabela 1-1- As dez maiores pontes estaiadas do mundo (XU, 2013)

Nº.	Nome	Vão Principal(m)	País/Região	Ano
1	Russky Bridge	1104	Rússia	2012
2	Sutong Bridge	1088	China	2008
3	Stonecutters Bridge	1018	Hong Kong	2009
4	Edong Bridge	926	China	2010
5	Tatara Bridge	890	Japão	1999
6	Pont de Normandie	856	França	1995
7	Jingyue Bridge	816	China	2010
8	Incheon Bridge	800	Coreia do Sul	2009
9	Zolotoy Rog Bridge	737	Rússia	2012
10	Shanghai Yangtze River Bridge	730	China	2009

### 1.1.3 Danos Causado pelo vento estais de pontes estaiadas

Os estais são elementos estruturais lateralmente flexíveis com reduzida frequência natural. O tamanho progressivo dos cabos implica em um vasto espectro de frequências naturais, acarretando em maior probabilidade de interação dinâmica ressonante. Ainda, os cabos apresentam baixo amortecimento estrutural intrínseco e pequena capacidade de dissipação da energia de excitação, tornando-os susceptíveis a elevadas amplitudes oscilatórias. (XU, 2013)

Ocorrência de elevadas amplitudes de deslocamentos têm sido observadas, principalmente durante a etapa de construção, na presença de ventos (fracos e fortes) e na atuação conjunta de vento e chuva. Deslocamentos com amplitudes de até 2m foram relatadas e valores típicos de deslocamento de aproximadamente 60 cm são correntes. (XU, 2013)

Em março de 2001, vibrações de 2m foram reportadas na ponte Storebaelt, Dinamarca. As origens dessas vibrações são atualmente bem compreendidas, contudo, os mecanismos de excitação ainda estão sendo estudados. A Tabela 1-2 contempla alguns casos emblemáticos de vibração dos estais. A partir dela, observa-se que as maiores amplitudes são provenientes do galope a seco (*dry galloping*) ou galope induzido por vento e chuva (*Raind-wind-induced galloping*), cujo fenômeno compreende aproximadamente 95% dos casos relatados e medidos

(GIMSING; GEORGAKIS, 2012). A ponte de Shanghai apresentou oscilações tão expressivas que os tubos que protegiam os cabos de aço no nível da laje quebraram. (MACHADO, 2008)

Tabela 1-2 – Exemplos de pontes estaiadas com relato de vibrações induzidas por vento (GIMSING; GEORGAKIS, 2012).

<b>Ponte</b>	<b>Local</b>	<b>Vão Principal (m)</b>	<b>Mecanismo</b>	<b>Desloc. (m)</b>
Normandy	França	856	Desp. de Vórtice	1.0
Øresund	Dinamarca	490	Chuva/Vento	3.0
Second Severn	Reino Unido	456	Galope a seco	1.5
Kap Shui Mun	Hong Kong	430	Chuva/Vento	1.5
Meiko-Nishi	Japão	406	Chuva/Vento	0.6
Fred Hartman	EUA	381	Chuva/Vento	2.0
Tenpozan	Japão	350	Chuva/Vento	1.0
Dongting	China	310	Chuva/Vento	N/A
Franjo Tadjman	Croácia	304	Chuva/Vento	2.0
Erasmus	Holanda	284	Chuva/Vento	0.7
Veterans Memorial	EUA	195	Chuva/Vento	0.3
Ponte del Mare	Itália	172	N/A	2.0

## 1.2 Relevância Do Problema

Numerosos relatos ocorridos ao redor do mundo referenciando problemas nos componentes estruturais em função da vibração nos cabos de pontes estaiadas têm destacado a importância de uma adequada compreensão do fenômeno. Os movimentos provenientes da ação do vento são os mais recorrentes e seus mecanismos ainda estão sendo estudados. A baixa relação de amortecimento estrutural intrínseco e demasiada flexibilidade, fazem desses estais susceptíveis a grandes deslocamentos ainda que na ocorrência de ventos medianos. Oscilações expressivas podem conduzir a redução da vida útil dos cabos, problema locais de fadiga, danos localizados e desconforto aos usuários.

Um estudo sobre o estado da arte do problema de vibração dos estais de pontes estaiadas adequadamente desenvolvido pode auxiliar os engenheiros e demais interessados em uma melhor compreensão do fenômeno.

### **1.3 Metodologia do Trabalho**

Apresenta-se uma revisão bibliográfica para compreensão do estado da arte do fenômeno de vibração dos estais associados ao vento e a posteriori aplica-se, com base nas recomendações do Post-Tensioning Institute (2008), a teoria estudada a um caso concreto de uma ponte estaiada.

## **2 OBJETIVO**

É objetivo principal:

- I. Analisar o estado da arte dos efeitos aerodinâmicos dos cabos de sustentação das pontes estaiadas.

São objetivos secundários:

- I. Estudo das ações mitigatórias para as vibrações dos cabos; e
- II. Análise de um cabo de uma ponte estaiada com base nas recomendações do Post-Tensioning Institute (2008).

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo serão apresentados conceitos de mecânica dos fluídos relevantes para este estudo, definições relativas a aerodinâmica dos cabos, os fenômenos correlacionados a ação do vento sobre os estais e algumas medidas mitigatórias.

#### 3.1 Conceitos Gerais da Aerodinâmica

##### 3.1.1 Coeficiente de pressão

São coeficientes adimensionais obtidos da razão entre a pressão efetiva,  $\Delta p$ , provocada na superfície de um corpo e a pressão dinâmica do vento,  $q$ , conforme equação 3-1.

$$C_p = \frac{\Delta p}{q} \quad (3-1)$$

Onde  $C_p$  é o coeficiente de pressão, e  $q$  pressão dinâmica atmosférica ao longe dada pela equação 3-2.

$$q = \frac{1}{2} \rho_{ar} V^2 \quad (3-2)$$

Sendo  $V$  a velocidade média de referência do vento conforme ABNT NBR6123 (1988) [m/s] e  $\rho_{ar}$  é a massa específica do ar em [kg/m<sup>3</sup>].

##### 3.1.2 Coeficiente de força e de momento

São coeficientes adimensionais e dependem, principalmente, da forma da seção transversal e do ângulo de incidência do escoamento,  $\beta$ . Para seções circulares, sofrem grande influência do número de Reynolds,  $Re$ .

### 3.1.3 Coeficiente de arrasto

Coeficiente relacionado a componente da força global na direção do escoamento, denominada força de arrasto. Pode ser obtido pela equação 3-3.

$$C_a = \frac{F_a}{qD} \quad (3-3)$$

Onde  $C_a$  é o coeficiente de arrasto,  $F_a$  é a força de arrasto média por unidade de comprimento [N/m] e  $D$  é o diâmetro característico da seção transversal [m].

### 3.1.4 Coeficiente de sustentação ou de força lateral

Coeficiente relacionado a componente da força global na direção perpendicular ao escoamento, denominada força de sustentação ou lateral. Pode ser obtido pela equação 3-4.

$$C_s = \frac{F_s}{qD} \quad (3-4)$$

Onde  $C_s$  é o coeficiente de sustentação ou de força lateral,  $F_s$  é a força de sustentação ou lateral média por unidade de comprimento [N/m] e  $D$  é o diâmetro característico da seção transversal [m].

### 3.1.5 Coeficiente de torção

Coeficiente relacionado o momento torçor existente caso a força global apresente excentricidade em relação ao eixo de torção da estrutura. Pode ser obtido pela equação 3-5.

$$C_t = \frac{M_t}{qD^2} \quad (3-5)$$

Onde  $C_t$  é o coeficiente de torção,  $M_t$  é o momento torçor médio por unidade de comprimento [N.m/m] e  $D$  é o diâmetro característico da seção transversal [m].

### 3.1.6 Número de Reynolds, $Re$

É uma relação entre as forças de inércia e as forças devido a viscosidade cinemática do fluido. Obtido pela equação 3-6.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (3-6)$$

Onde,  $\nu$  é a viscosidade cinemática do ar.

### 3.1.7 Número de Strouhal, $St$

Parâmetro que estabelece a relação entre a frequência de desprendimento de um par de vórtices,  $f_s$  [Hz], o diâmetro característico da seção transversal,  $D$  [m] e a velocidade de referência  $V$ . Dado pela equação 3-7.

$$St = \frac{f_s D}{V} \quad (3-7)$$

### 3.1.8 Número de Scruton, $Sc$

Parâmetro estrutural massa-amortecimento, adimensional, para avaliação da susceptibilidade estrutural da estrutura a vibrações ou fenômenos de instabilidade. Conforme critério do Post-tensioning Institute (2008), o número de Scruton pode ser obtido pela equação 3-8, onde  $m$  corresponde a massa por unidade de comprimento e  $\xi$  a relação de amortecimento crítico referentes ao cabo.

$$Sc = \frac{m\xi}{\rho_{ar} \cdot D^2} \quad (3-8)$$

### 3.1.9 Turbulência

O conceito matemático da turbulência foi definido por Theodore von Kármán como “flutuações irregulares da velocidade do vento, governadas por equilíbrio estatístico”. Trata-se

de um fenômeno aleatório tratado por meio da teoria da probabilidade e de médias estatísticas. Adotam-se as seguintes hipóteses:

- I. A velocidade no decorrer do tempo é dada por uma parcela média e outra flutuante em torno da média, e
- II. As flutuações em torno do valor médio do fenômeno constituem um processo aleatório estacionário ergódico, ou seja, os parâmetros estatísticos determinados sobre a totalidade dos registros possíveis são invariantes para qualquer deslocamento da origem dos tempos.

A caracterização da turbulência é dada, em geral, pelos parâmetros:

- a. Intensidade da turbulência: medida adimensional da energia cinética contida nas componentes das flutuações da velocidade. Esta energia é proporcional a variância da parcela flutuante de velocidade do vento.
- b. Escala longitudinal da turbulência: representa o comprimento médio dos maiores turbilhões, na direção do vento incidente, presentes no escoamento.

### **3.1.10 Escoamento bidimensional**

O escoamento bidimensional caracteriza-se pela condição de que todas as propriedades do escoamento são independentes da direção vertical, ou seja, dependem apenas das coordenadas cartesianas no plano e do tempo. Estruturas com comprimento idealmente infinito, caso dos cilindros longos, definem-se em escoamento bidimensional

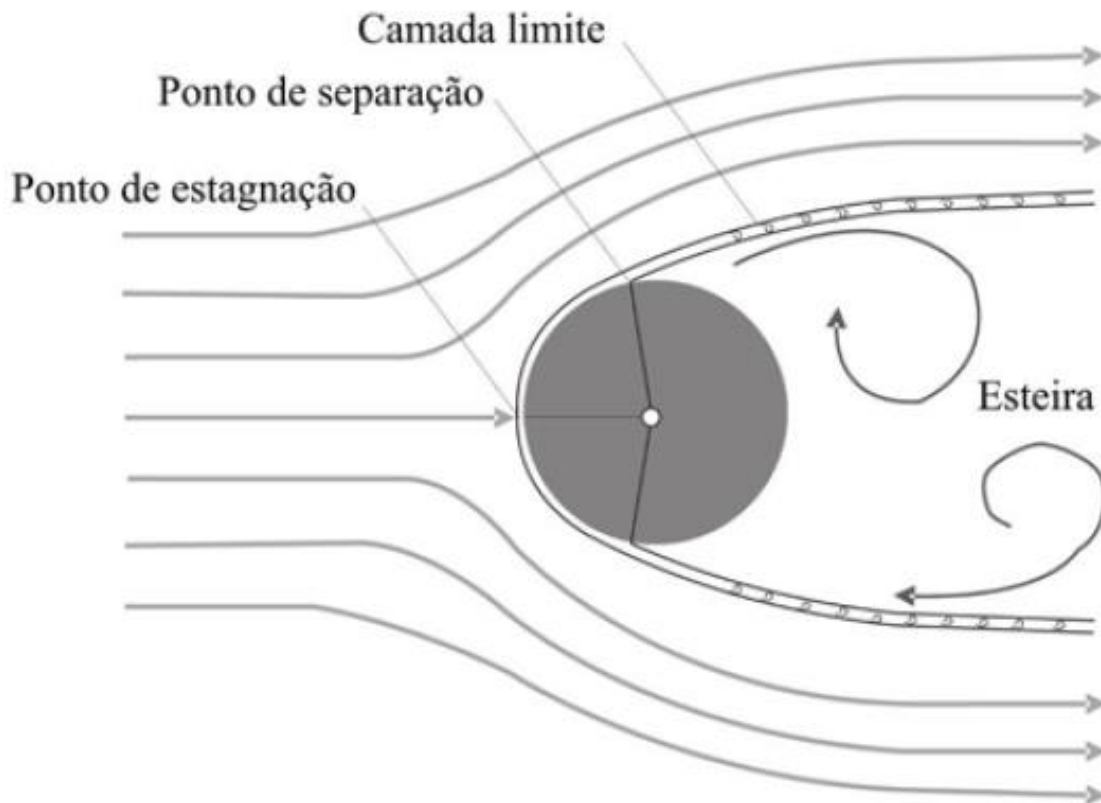
## **3.2 Aerodinâmica de Cilindros Circulares**

Faz-se, na literatura, analogia do comportamento aerodinâmico dos cabos com o de cilindros circulares.

Quando um fluido escoar sobre um corpo imerso, forma-se uma fina camada próxima à sua superfície devido à influência da viscosidade. Prandtl, em 1904, a denominou camada limite



(BLESSMANN, 2011). A Figura 3-1 mostra as características de escoamento sobre um cilindro estacionário definido a camada limite, ponto de estagnação, ponto de separação e esteira.



*Figura 3-1 Escoamento em torno de um cilindro circular (MACHADO, 2008)*

Gera-se, na região da esteira, pressões negativas que são parcialmente responsáveis pelo coeficiente de arrasto. As forças laterais, de sustentação, são provocadas pelo despreendimento de um par de vórtices. Blessmann (2011) destaca que as forças na direção do vento são pequenas em comparação com as que atuam em sua direção transversal.

### 3.2.1 Comportamento de um cilindro circular longo com eixo vertical em escoamento laminar

O número de Reynolds exerce expressiva influência sobre o fluxo e, conseqüentemente, sobre sua forma. Não há variação contínua da forma do fluxo, mas para certos intervalos de  $Re$ , determinados zonas de transição, ocorrem alterações substanciais. (BLES Mann, 2011)

Em um cilindro, a força global é função dos coeficientes de força de arrasto, sustentação e de torção, cujos valores variam em função de  $Re$ . Destaca-se alguns fenômenos descritos em Caetano (2007), são eles:

- Para  $Re < 1$ , o campo aerodinâmico tem sua forma definida quase exclusivamente devido à influência direta da viscosidade.
- Para  $1 < Re < 5$ , a camada limite torna-se progressivamente mais espessa sem que ainda haja separação. O fluido assume a forma de um fluido ideal, porém com velocidades e pressões não correspondentes.
- Para valores maiores de  $Re$  até um limite de 30 ocorre a separação e formam-se dois grandes turbilhões estacionários cujos praticamente todo fluxo da esteira participa.
- Para  $30 < Re < 5000$  esse par de turbilhões desfaz-se dando origem a uma esteira mais agitada. Forma-se uma dupla fila de turbilhões alternados, denominados vórtices de Kármán.
- Para  $5000 < Re < 200000$  o fluxo a barlavento do ponto de separação permanece laminar ao passo que a esteira se encontra em transição para fluxo turbulento.
- Para  $Re > 200000$  ocorre um estreitamento da esteira, implicando em redução das forças atuantes no cilindro.

Blesmann (2011) ressalva que os valores característicos de  $Re$  experimentam expressiva influência da rugosidade superficial e também das características da turbulência. A Figura 3-2 resume os regimes característicos do fluxo em torno de cilindros para faixas características de  $Re$ . Evidencia-se, na Figura 3-2, a queda súbita do coeficiente de arrasto na região crítica e a variação de seu valor, maior para menor  $Re$ ; a variação do ponto de separação,  $\Theta_s$ ,

deslocando-se a sotavento com o aumento de  $Re$ ; a presença de borbulha para determinados valores de  $Re$ ; e, por fim, a variação irregular do número de Strouhal com  $Re$ .

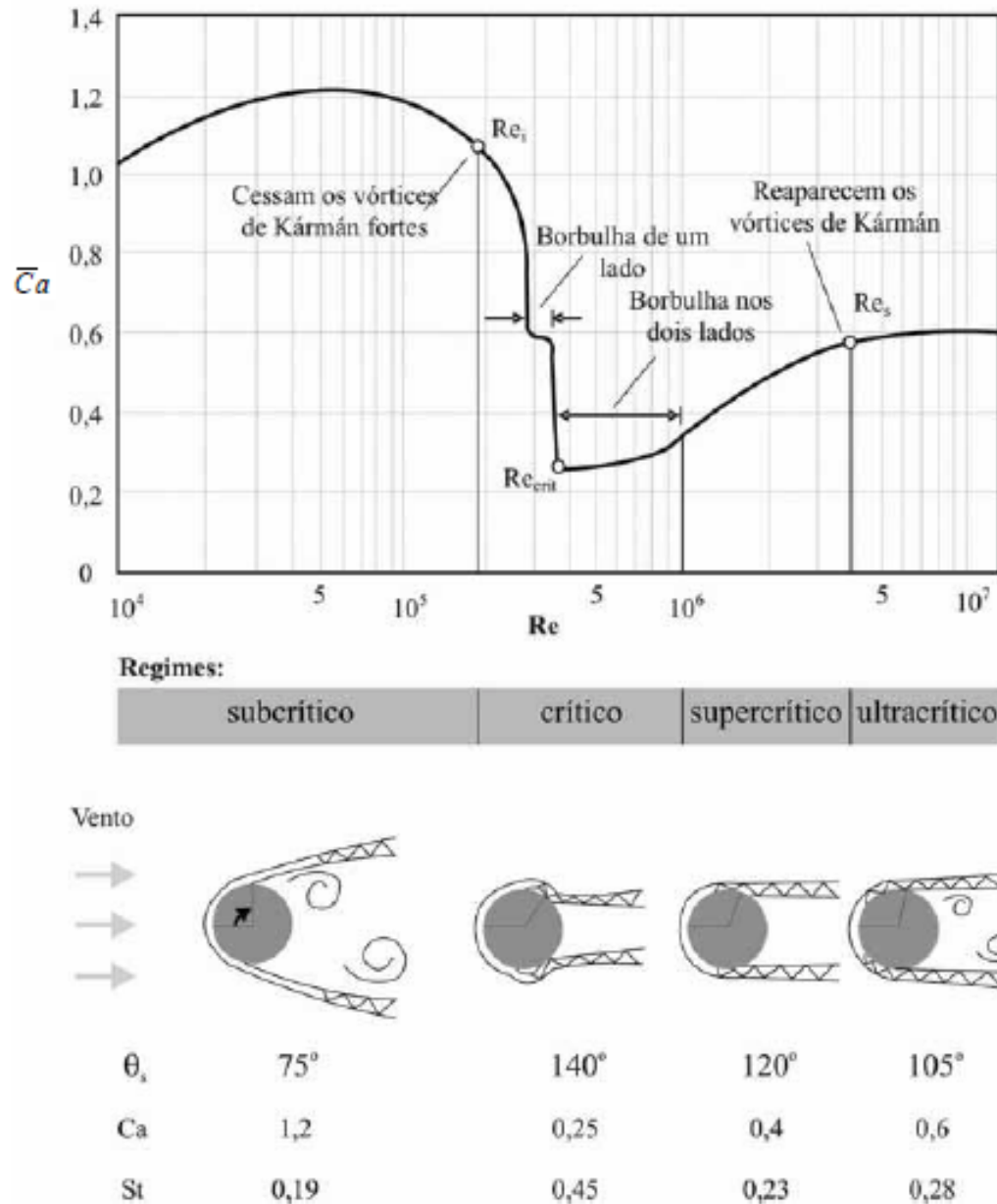


Figura 3-2-Regimes característicos do fluxo em torno de cilindros (os valores de  $Re$  são apenas ilustrativos) (MACHADO, 2008)

### 3.2.2 Comportamento de um cilindro circular longo com eixo vertical em escoamento turbulento

Em fluxo turbulento as componentes flutuantes da velocidade induzem variação dos esforços solicitantes no tempo. Caetano (2007) ressalta que os coeficientes de força tendem a ser menores na presença da turbulência. Na Figura 3-3 (A ordenada representa o coeficiente de arrasto e a abscissa o valor de Log Re) tem-se diferentes escalas de turbulência e os respectivos valores de Ca. Nota-se que para maiores valores de intensidade de turbulência se tem menores coeficientes de arrasto.

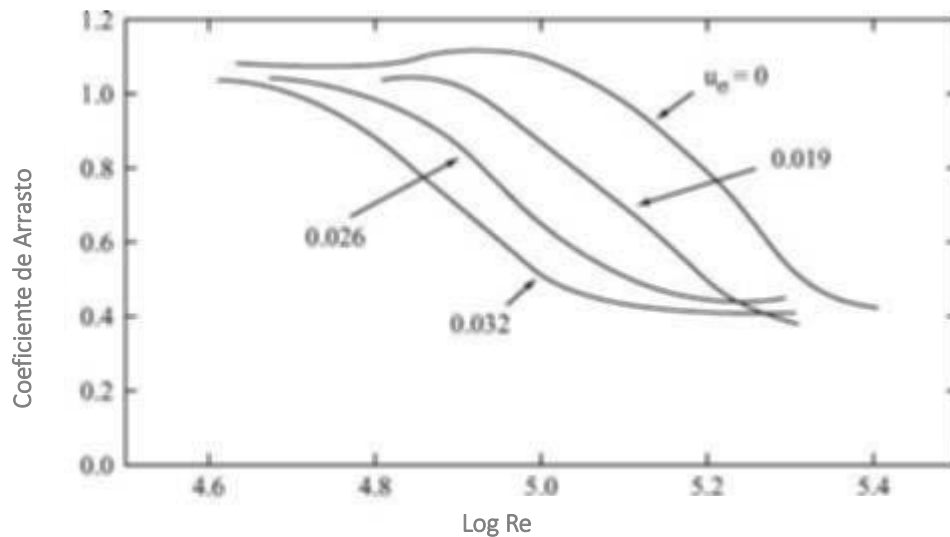


Figura 3-3 Variação do coeficiente de arrasto em função de Re e da intensidade da turbulência (CAETANO, 2007)

### 3.2.3 Comportamento de um cilindro circular longo, móvel, com eixo vertical, em escoamento turbulento

Devido a variação da posição do cilindro no tempo, tem-se duas componentes adicionais de força flutuantes que são geradas pela deslocamento, translação e rotação, e velocidade do cilindro. Estas forças são denominadas forças aeroelásticas e estão correlacionadas a maior inércia da massa original do corpo com o movimento no fluido (devido a massa aparente).

### **3.2.4 Amortecimento aerodinâmico**

O amortecimento aerodinâmico,  $\xi_{aer}$ , tem sua origem no movimento relativo entre o cilindro e o ar, ou seja, está associado a alterações na velocidade relativa do ar em relação ao cilindro quando ele oscila. Está intrinsecamente correlacionado com as forças correspondentes à massa aparente resultante do movimento do cilindro no fluido.

Blessmann (2005) destaca que para oscilações na direção do vento  $\xi_{aer}$  é praticamente positivo, ou seja, seus efeitos se somam ao do amortecimento estrutural em favor de atenuar as vibrações. Por outro lado, para oscilações na direção transversal ao vento,  $\xi_{aer}$  é negativo em muitos casos e tende a amplificar os efeitos dinâmicos do vento. É ainda possível uma situação instável, basta que  $\xi_{aer}$  somado ao amortecimento estrutural seja inferior a zero. Esse fenômeno é típico em estruturas leves e flexíveis, a exemplo dos estais, e conduz a instabilidades de amplitudes crescentes e por vezes abruptas.

### **3.2.5 Aerodinâmica de cilindros circulares inclinados**

As características do fluxo e dos esforços sobre um cilindro circular inclinado diferem daquele com eixo vertical. Em cilindros com eixo não perpendicular ao escoamento surgem efeitos adicionais instabilizadores, como por exemplo o escoamento axial.

Em sua pesquisa publicada, Matsumoto et al. (1990) destaca 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 Kármán. (CAETANO, 2007)

## **3.3 Oscilações em Cabos Estais Causadas Pelo Vento**

Embora seja corrente uma abordagem estática dos efeitos do vento em torno de uma velocidade de projeto, este fenômeno tem natureza intrinsecamente dinâmica (variável no tempo). A resposta da estrutura ante a ação do vento pode ser idealmente estática ou dinâmica.

Estruturas com baixa frequência fundamental natural e elevada flexibilidade são mais susceptíveis a apresentarem um comportamento dinâmico sob ação de um fluxo atmosférico.

### **3.3.1 Martelamento (*Buffeting*)**

Este fenômeno está associado a variação das forças provocadas pelo vento no decorrer do tempo. Caracteriza-se por movimentos alternados aleatórios dos estais, contudo, não é um efeito aeroelástico instável. Com baixas velocidades de vento pode-se ter um efeito ressonante não crítico devido à baixa energia cinética do mecanismo. Para maiores velocidades do vento, embora se tenha uma elevada energia cinética, o efeito é minimizado pelo crescimento do amortecimento aeroelástico. O significativo aumento no amortecimento em altas velocidades de vento previne, em muitos casos, a ocorrência de oscilações acentuadas devido ao martelamento (CAETANO, 2007)

#### **3.3.1.1 Martelamento ressonante (*Resonant Buffeting*)**

Esse efeito ocorre para pontes com dois planos de cabos paralelos separados por período de tempo  $B/V$  ( $B$  é a distância entre dois planos de cabos) coincidentes com meio período de vibração  $T_t$  associado ao modo torcional do tabuleiro. A velocidade crítica do vento,  $V_{cr}$ , para esse fenômeno pode ser obtida pela equação 3-9.

$$V_{cr} = \frac{2 \cdot B}{T_t} \quad (3-9)$$

Caetano (2007) aplicou a equação para a Ponte Vasco da Gama e concluiu que a velocidade crítica é de 26 m/s –  $T_t$  igual 2,3 s e  $B$  igual a 30m. A autora destaca que nenhuma ocorrência do fenômeno foi relatada ou esperada para essa ponte, visto que para tal velocidade crítica se tem um amortecimento aerodinâmico do modo torcional positivo em favor da estabilização do sistema estrutural.

### 3.3.2 Vibrações por vórtices

Corpos aerodinamicamente rombudos estão sujeitos ao fenômeno de desprendimento de vórtices cujo efeito induz forças transversais intermitentes que acarretam em oscilações dos estais. O desprendimento alternado de vórtices conduz a um efeito ressonante caso sua frequência coincida com a frequência natural dos estais. A velocidade em que essa interação ocorre é definida através da equação 3-10, adotando  $St$  igual a 0,2 (valor típico para estais) e  $f_n$  é a frequência natural do  $n$ -ésimo modo de vibração.

$$V = \frac{f_n D}{St} \quad (3-10)$$

Xu (2013) destaca que a amplitude da oscilação é inversamente proporcional ao número de Scruton e que uma estimativa realista para o amortecimento intrínseco dos estais está na faixa de 0,001 a 0,005. Ressalva ainda que este fenômeno dificilmente será o maior problema para os estais.

Caetano (2007) adverte quanto a existência de uma faixa de velocidades para as quais ocorre o efeito de sincronização (*synchronisation* ou *lock-in*), pois, conforme explica Blesmann (2005), o número de Strouhal refere-se a uma frequência predominante, ou seja, há um espectro de frequências das quais surgem as forças flutuantes. A Figura 3-4 demonstra a ocorrência desse fenômeno em uma estrutura elástica.

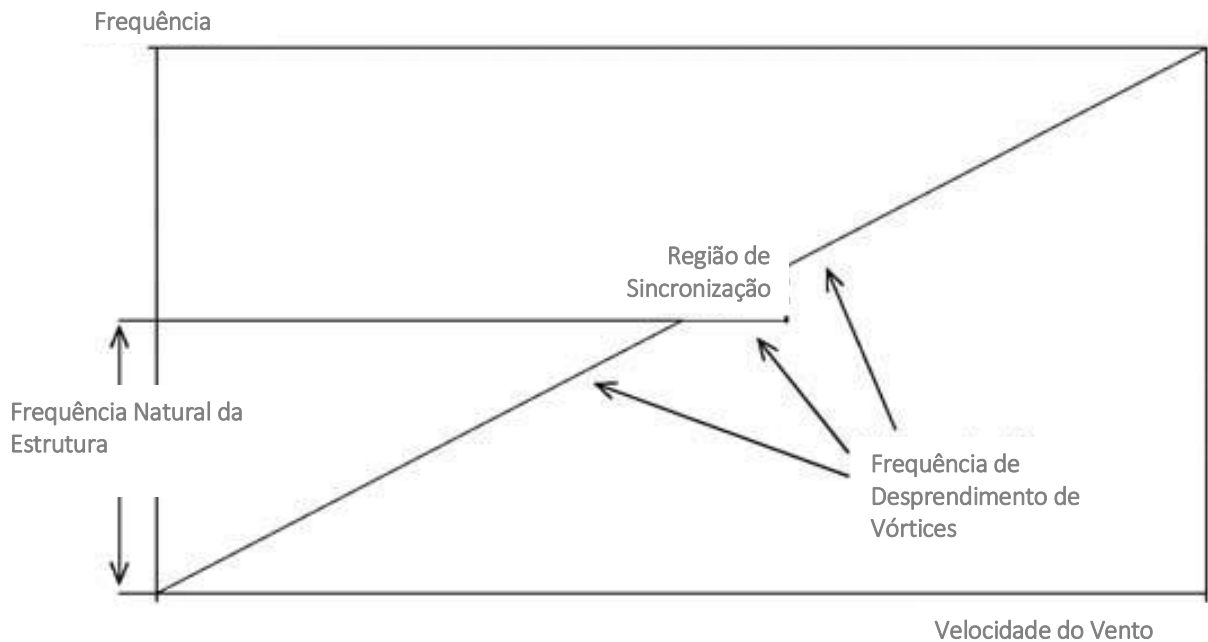


Figura 3-4 - Evolução da frequência de desprendimento de vórtice com a velocidade do vento em uma estrutura elástica (CAETANO, 2007)

Dyrbye e Hansen denotam duas condições que podem aumentar o risco das vibrações por vórtices: locais com escoamento suave e uma turbulência de pequena escala aumentada. A primeira condição ocorre tipicamente para estruturas isoladas localizadas em encostas marinhas. A segunda condição ocorre para estruturas localizadas na esteira de outras estruturas similares. Turbulências de larga escala e elevado número de Scruton têm uma tendência de atenuar as vibrações. Pode-se constatar na Figura 3-5 que, em um cilindro circular,  $Sc$  inferior a 10 torna a estrutura susceptível a esse fenômeno. Dyrbye e Hansen concluíram que não há risco de sincronização para  $Sc$  superior a aproximadamente 20. (CAETANO, 2007)



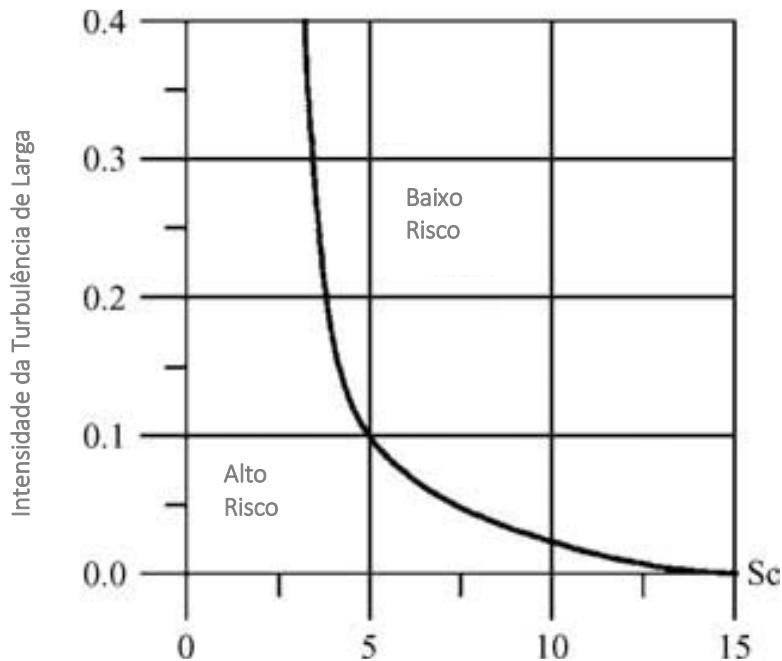


Figura 3-5 - Risco de vibrações induzidas por vórtice de cilindros circulares em função de  $Sc$  e da escala da turbulência. (CAETANO, 2007)

Caetano (2007), utilizando a fórmula de Griffin et al., plotou o gráfico da Figura 3-6 de amplitude máxima de deslocamento provocado por vibração por vórtice na região de sincronização versus número de  $Sc$ . A autora, então, conclui que esse fenômeno conduz a vibrações muito pequenas e aponta a declaração de Davenport de que o esse efeito raramente conduz a movimentos com amplitude superior a meio diâmetro do cabo.

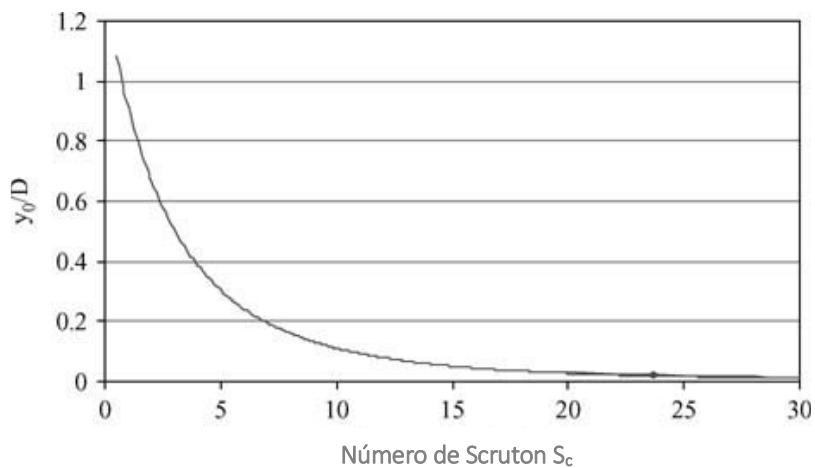


Figura 3-6 - Amplitude máxima de deslocamento provocado por vibração por vórtice na região de sincronização versus número de  $Sc$  (CAETANO, 2007)

### 3.3.2.1 Vibrações por vórtice para cabos na esteira de um elemento estrutural

Este fenômeno ocorre para elementos a sotavento de um pilar ou outro componente construtivo. Estais submetidos a esteira de um pilar, por exemplo, podem sofrer esse fenômeno caso tenham frequência natural próxima a do desprendimento de vórtices do pilar. A velocidade crítica para esse fenômeno,  $V_{cr}$ , pode ser obtida pela equação 3-11 onde  $f_n$  corresponde a frequência natural do n-ésimo modo de vibração do estai,  $H$  a dimensão do pilar perpendicular ao vetor velocidade média do vento e  $S_t$  o número de strouhal referente ao pilar.

$$V_{cr} = \frac{f_n H}{S_t} \quad (3-11)$$

A Figura 3-7 permite melhor visualização do fenômeno ocorrendo em um pilar com vento inclinado em relação a seus eixos principais de inércia.

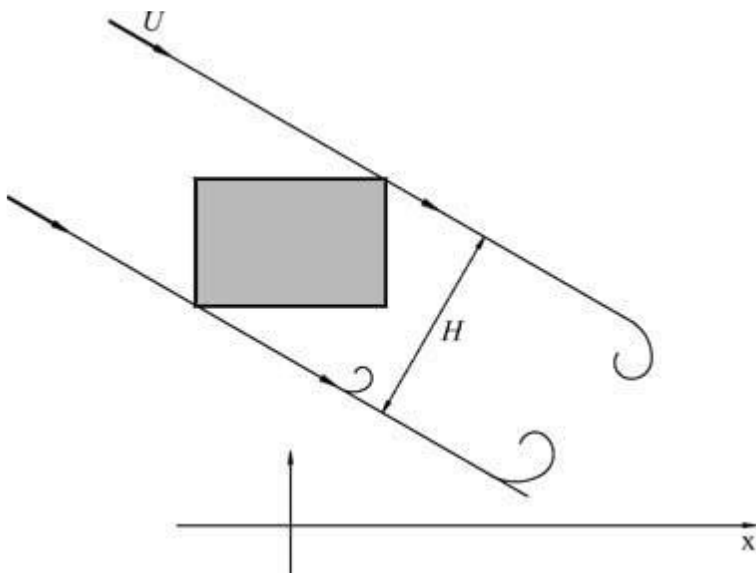


Figura 3-7 Desprendimento de vórtice na esteira de um pilar de ponte (CAETANO, 2007)

### 3.3.2.2 Vibrações por vórtice para cabos próximos

A tendência de se reduzir o esforço em um só estai conduz a soluções com estais agrupados. A Figura 3-8 apresenta possíveis arranjos para grupos de cabos, onde “a” é a distância entre dois

cabos. Condições particulares de agrupamento podem estar sujeito a vibrações devido a ressonância por vórtices provenientes da esteira de um outro estai.

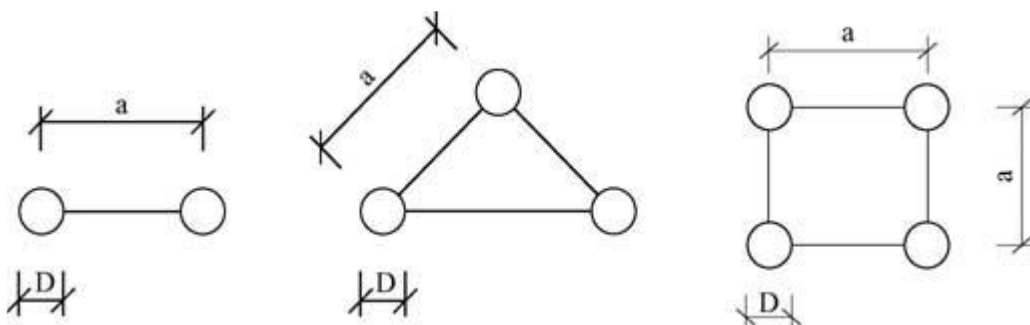


Figura 3-8 - Possíveis arranjos para grupos de estais (CAETANO, 2007)

### 3.3.3 Galope (*Galloping*)

O galope é uma instabilidade aerodinâmica que apresenta, conforme ressalta Blessmann (2005), as seguintes características principais:

- a. Intensidade violenta;
- b. Aparecimento súbito;
- c. Amplitude de vibração crescente com o aumento da velocidade do vento, e
- d. Movimento oscilatório simples, não acoplado, perpendicular ao vetor de velocidade média do vento.

Caetano (2007) afirma que o galope ocorre para velocidades próximas a alguma das frequências naturais do estai. Estruturas leves e flexíveis, com pequeno amortecimento estrutural, são susceptíveis a este fenômeno. Carvalho (2015) destaca que são oscilações de frequência muito baixa (0,1 a 1 Hz) e alta amplitude. Para pontes têm sido reportados dois tipos do fenômeno: galope a seco (*dry galloping*) e galope por interferência (*interference galloping*). Caetano (2007) destaca que para a ocorrência do galope, uma condição necessária para instabilidade é o atendimento a inequação 3-12.

$$\left(\frac{dC_s}{d\beta} + C_a\right)_{\beta=0} < 0 \quad (3-12)$$

A inequação 3-10 é conhecida como o critério de Glauert-Den Hartog, onde  $\beta$  é o ângulo de ataque efetivo de um corpo rombudo oscilante, conforme Figura 3-9.

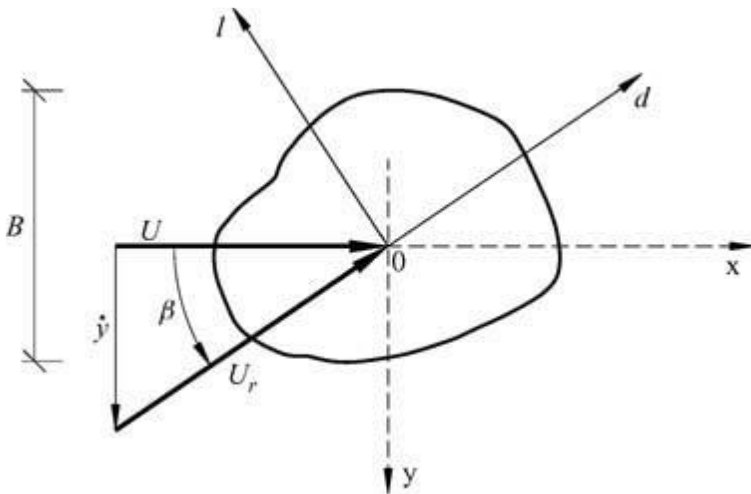


Figura 3-9 Ângulo de ataque efetivo de um corpo rombudo oscilante (CAETANO, 2007)

Pelo critério, extrai-se que seções circulares não estarão sujeitas a galope por sua simetria. Contudo Shiragashi et al. (1986) apud Matsumoto et al. (1990) apontaram que, para certas inclinações, aparece um fluxo aerodinâmico axial a sotavento do cilindro circular que favorecem a instabilidade. A Figura 3-10 mostra a ocorrência deste fluxo para um cabo inclinado. (CAETANO, 2007)

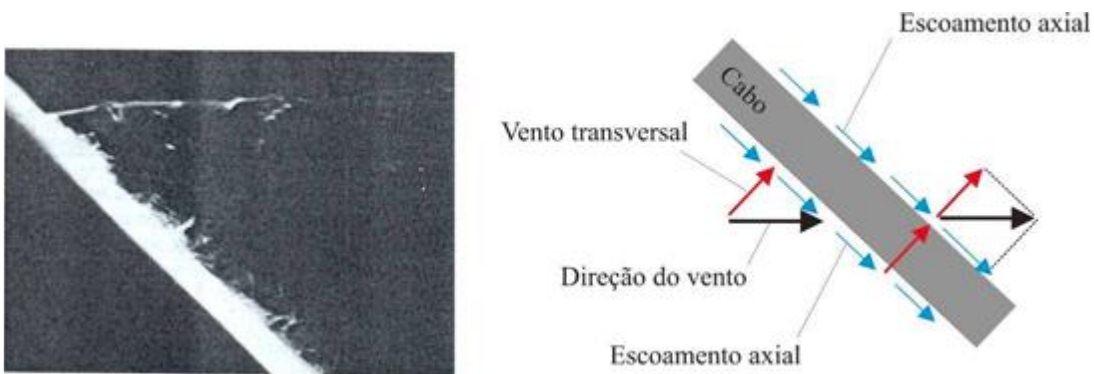


Figura 3-10 - Escoamento axial secundário a sotavento de um cabo inclinado (MACHADO, 2008)

### 3.3.3.1 Galope de cabos secos inclinados (*Dry inclined galloping*)

A ocorrência do fluxo axial torna-se condição necessária para a ocorrência desse fenômeno em cabos com seção circular. Xu (2013) destaca que, para um cabo inclinado, o vento atua como se fosse uma seção transversal elíptica. Consta-se na Figura 3-11 que a velocidade do fluxo axial,  $U_a$ , varia de modo crescente com o aumento da velocidade média do vento,  $U$ , e com o aumento do ângulo de inclinação do cabo,  $\beta$ .

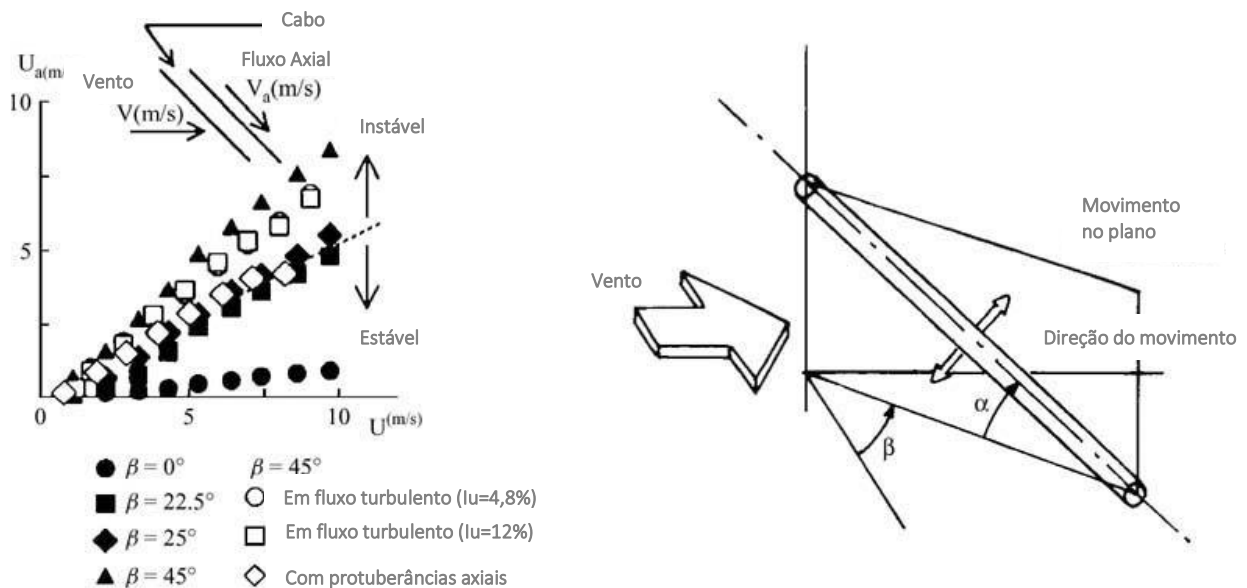


Figura 3-11- Intensidade do fluxo axial para cabos inclinados (CAETANO, 2007)

A Figura 3-11 mostra que o fenômeno instável ocorre para velocidade axiais maiores que 30% da velocidade média do vento e inclinações de cabo maiores que  $25^\circ$  com o plano horizontal. Consta-se, ainda, que a turbulência tem um papel estabilizador.

### 3.3.3.2 Galope por interferência (*Interference Galloping ou Wake Galloping*)

Este fenômeno está associado a ocorrência de um movimento elíptico do cabo causado pela variação de seus coeficientes de força devido ao efeito da esteira de outro elemento estrutural. Ocorre em altas velocidades do vento e conduz a oscilações de amplitude elevada. O número de Scruton é relevante para ocorrência desse fenômeno e a equação 3-13 foi proposta para estimativa da velocidade crítica do vento. (XU, 2013)

$$V_{crit} = c \cdot f_n \cdot D \cdot \sqrt{S_c} \quad (3-13)$$

Onde  $c$  é uma constante que varia conforme a montagem dos cabos, sendo 25 para pequenos espaçamentos (2D a 6D de espaçamento) e 80 para cabos normalmente espaçados (10D). Todavia, o valor de  $c$  deve ser aplicado conservadoramente devido a seu alto grau de incerteza. (XU, 2013)

### 3.3.4 Vibrações induzidas por chuva e vento

São vibrações de elevada amplitude, predominantemente transversais à direção do vento, que ocorrem sob condições simultâneas de chuva leve e moderada velocidade do vento.

Caetano (2007) destaca que apesar dos extensos estudos, o mecanismo das vibrações induzidas por chuva e vento ainda não é completamente compreendido. Contudo, ela ressalta os principais aspectos: combinação de vento com ângulos de ataque específicos e chuva de intensidades características que permitem a formação de filetes de chuva no cabo em suas superfícies inferior e superior, conforme Figura 3-12.

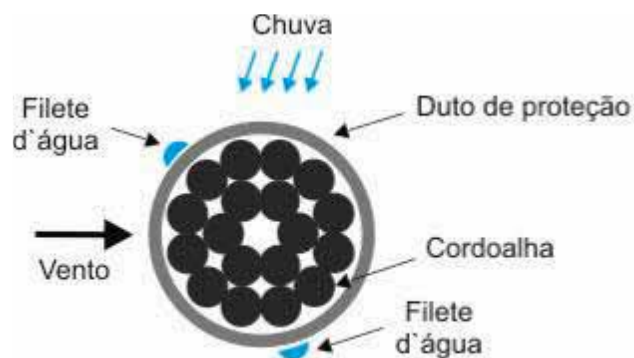


Figura 3-12 Representação da posição dos filetes em um estai característico de ponte estaiada. (MACHADO, 2008)

Estes filetes são resultado do equilíbrio das forças gravitacionais, aerodinâmicas e de capilaridade superficial e conduzem a perda de simetria da seção transversal com consequente variação das forças aerodinâmicas no cabo. Pode ocorrer uma instabilidade de galope do tipo Den Hartog (inequação 3-12) caso haja um decréscimo no coeficiente de arrasto associado a

uma tangente negativa do coeficiente de sustentação com pequena variação do ângulo de ataque do vento. Tais fatores conduzem a um amortecimento aerodinâmico negativo e acarretam o início da oscilação que, uma vez começada, causa a oscilação circunferencial dos filetes com a mesma frequência. O acoplamento destes movimentos conduz a uma instabilidade aerodinâmica e provavelmente intensificam as vibrações. (CAETANO, 2007)

Machado (2008) apresenta as posições dos filetes superior e inferior, respectivamente, em função de  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , conforme Figura 3-13.

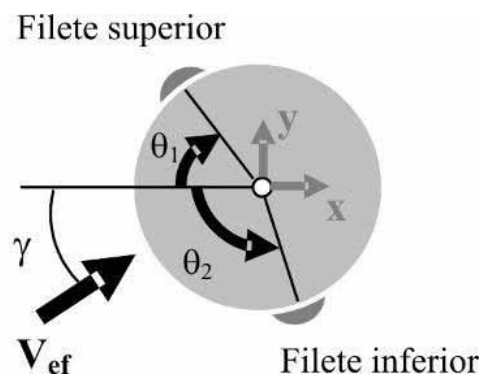


Figura 3-13- Posição dos filetes superior e inferior (MACHADO, 2008)

Hikami e Shiraishi (1988, apud Machado, 2008) encontrou os resultados apresentados nas figuras 3 14-a e 3 14-b em um ensaio de campo de um cilindro inclinado submetido a ação combinada de chuva e vento, conforme figuras Figura 3-14-a e Figura 3-14-b.

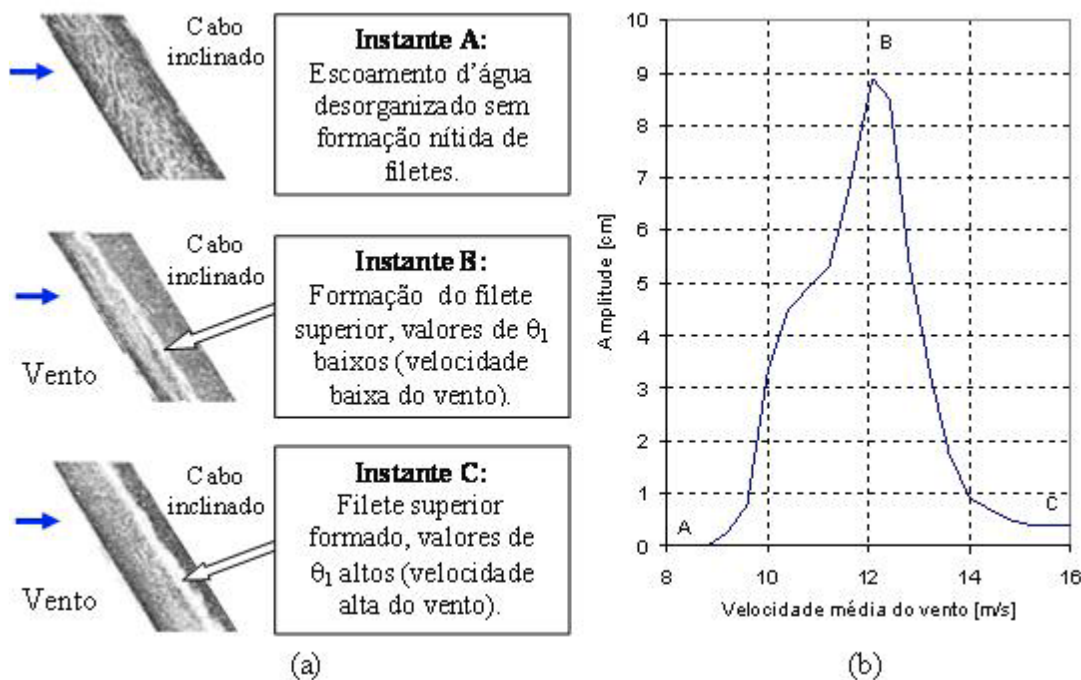


Figura 3-14 (a) Processo de formação do filete superior em um cabo inclinado em três instantes: A, B e C; (b) Resposta do cabo inclinado com velocidades e amplitudes correspondentes a cada um dos instantes (MACHADO, 2008).

A Figura 3-14-a mostra a posição característica do filete em três instantes distintos com diferentes valores de velocidade média do vento e a Figura 3-14-b apresenta, para cada um dos três instantes, o valor da velocidade média do vento e a amplitude do deslocamento do estai.

Phelan destaca que a posição do filete depende do equilíbrio das forças de gravidade, pressão do vento e tensão de superfície e água agindo sobre os filetes. Pela análise da figura Figura 3-14-b constata-se que este fenômeno ocorre para velocidades moderadas de vento. Xu (2013) afirma que as vibrações por chuva e vento são altamente problemáticas e de ocorrência frequente.

Conforme Gimsing e Georgakis (2012), as vibrações por chuva e vento podem ocorrer para velocidades médias do vento entre 5-18 m/s, principalmente em cabos lisos com baixo amortecimento estrutural e inclinados na direção do vento e para frequências modais entre 0,5-3,3 Hz. O autor destaca que velocidades de vento inferiores a 5m/s não têm energia cinética



suficiente para excitar o cabo e que velocidades muito altas (maiores que 18 m/s) não permitem que os filetes permaneçam na zona crítica para a ocorrência do fenômeno.

#### **3.3.4.1 Avaliação da influência de parâmetros relevantes na vibração induzida por chuva e vento**

Para melhor compreensão dos mecanismos da vibração induzida por chuva e vento, Xu (2013) investigou os efeitos da tensão no cabo, do perfil de velocidade do vento e, por fim, do amortecimento estrutural do estai. Neste estudo, apresentado a seguir, enquanto uma variável é alterada, as demais permanecem constantes.

##### **a) Tração no cabo**

Inicialmente, mediu-se qual seria a resposta do cabo variando-se apenas sua força de tração. Para uma estai característico, avaliou-se três valores de tração, sendo:  $0,765 \times 10^6$  N (2/3 do valor original de tração, T),  $1,147 \times 10^6$  N (o valor original de tração, T) e  $1,529 \times 10^6$  N (4/3 do valor original de tração, T).

A Figura 3-15 computa os resultados da análise. O autor conclui que um menor nível de tensão torna o cabo mais flexível e, conseqüentemente, se tem maior amplitude de deslocamento. Todavia, não houve variação no espectro de velocidades para a ocorrência do fenômeno. Similares resultados foram encontrados para os demais modos de vibração.

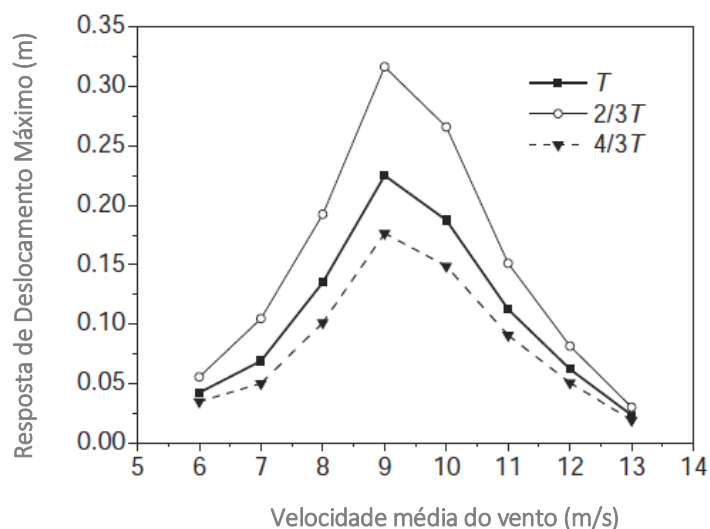
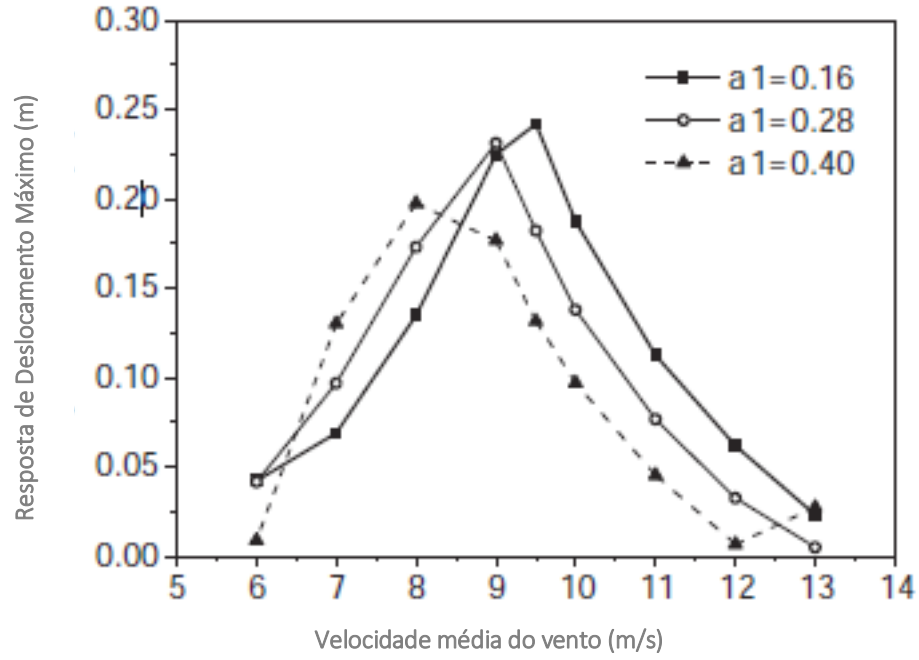


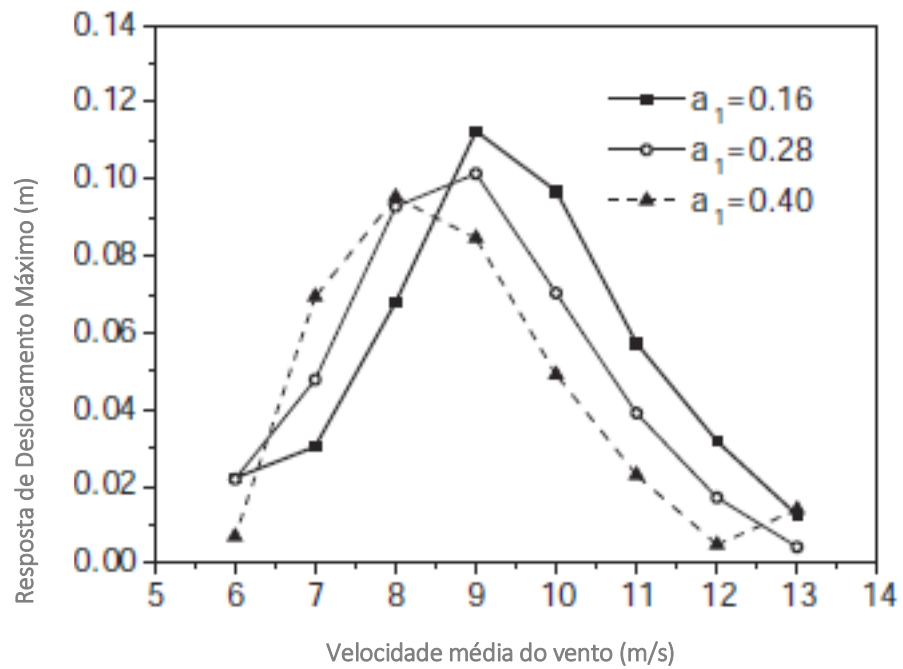
Figura 3-15 Efeito da tração no cabo sobre a resposta do primeiro modo de vibração (XU, 2013).

#### b) Perfil da velocidade do vento

Agora, mantendo-se as demais variáveis constantes, avaliou-se a mudança do perfil de velocidade média do vento através da adoção de diferentes coeficientes de potência,  $a_1$  (o que corresponde a diferentes tipos de terreno). Um aumento de  $a_1$  corresponde a uma mudança, por exemplo, de ambiente marinho para urbano. Três valores desse coeficiente foram avaliados (0,16, 0,28 e 0,40) para vibrações nos primeiro e segundo modos fundamentais do estai. A Figura 3-16 mostra os máximos deslocamentos na resposta do cabo para os primeiro e segundo modos de vibração do estai em função de três diferentes coeficientes de potência ( $a_1$ ). O autor destaca que tanto a amplitude da vibração quanto a faixa de velocidades de ocorrência do fenômeno sofrem pequena influência do coeficiente e ainda ressalta que o fenômeno permanece restrito a uma faixa de velocidades características e amplitude limitada de deslocamento.



(b) Primeiro modo de vibração



(a) Segundo modo de vibração

Figura 3-16- Efeito do coeficiente de potência na resposta do cabo (a) para o primeiro modo de vibração e (b) para o segundo modo de vibração (XU, 2013).

### c) Amortecimento estrutural do estai

Por fim, permanecendo os demais parâmetros inalterados, varia-se o amortecimento estrutural dos cabos com os seguintes valores: 0,0011 (0,11%), 0,0065 (0,65%) e 0,0111 (1,11%). Os resultados são computados na Figura 3-17 onde são representados os deslocamentos máximos para três diferentes níveis de amortecimento estrutural em função da velocidade média do vento. O autor conclui que um pequeno incremento no amortecimento estrutural pode praticamente suprimir as vibrações causadas por chuva e vento e, com isso, que o aumento do amortecimento estrutural é uma eficiente medida mitigatória.

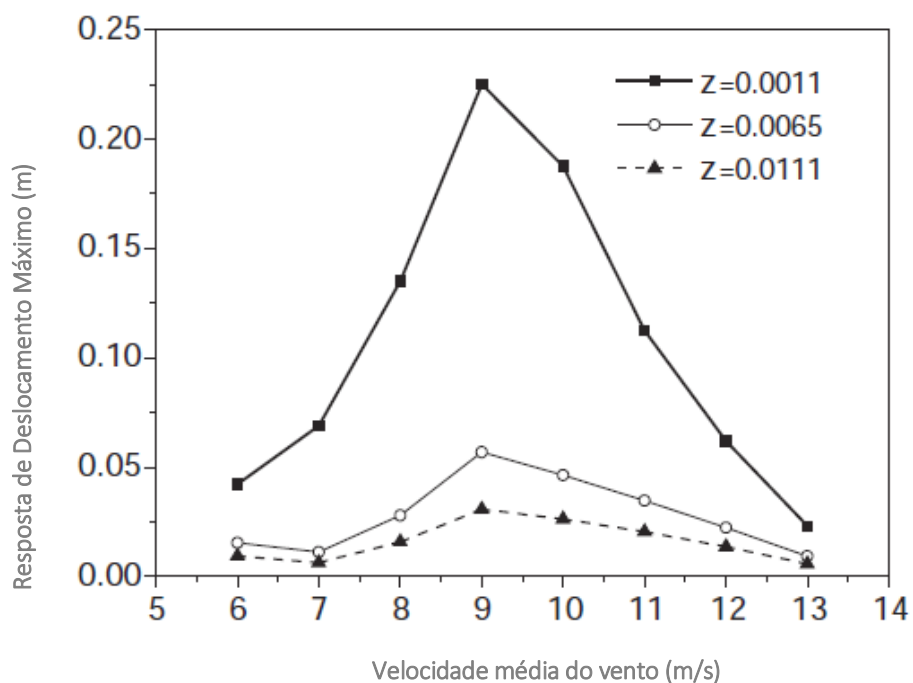


Figura 3-17 - Efeito do amortecimento estrutural na resposta do cabo para o primeiro modo de vibração (XU, 2013).

### 3.4 Medidas Mitigatórias

Sendo identificado algum mecanismo de vibração, deve-se adotar medidas mitigatórias afim de se atenuar ou eliminar o problema. Xu (2013) divide os métodos de controle das vibrações

em três categorias principais (cada categoria é subdividida em solução passiva, ativa e semiativa):

- Modificação estrutural;
- Medidas mecânicas; e
- Medidas aerodinâmicas.

Destaca-se que há várias proposições para mitigação dos efeitos aerodinâmicos nos estais, contudo, devido a extensão e complexidade do tema, o presente trabalho restringe-se a algumas soluções correntes.

#### **3.4.1 *Cross ties* (modificação estrutural)**

Gimsing e Georgakis (2012) descrevem a técnica de *cross ties* (também denominada *stabilizing rope*) como bem-sucedida no controle das vibrações. São feitas de materiais resistentes a fadiga e de diâmetro significativamente inferior ao dos estais. O autor destaca que o uso desta técnica pode conduzir a uma alteração drástica nos modos de vibração dos estais-tabuleiro e que, embora na maior parte dos casos tem um efeito benéfico, há relatos de uma influência negativa na vibração do tabuleiro.

Estes dispositivos adicionados aos estais funcionam como suportes intermediários para eles e, como consequência, aumentam sua frequência natural para vibrações verticais. Além disso, constata-se um aumento do amortecimento estrutural dos estais com a instalação dos *cross ties*. Na Figura 3-18 pode-se perceber os *cross ties* adicionados aos estais da ponte Normandy – destaca-se o pequeno diâmetro dos cabos secundários.



*Figura 3-18 - Cross-ties na ponte Normandy (CAETANO, 2007).*

### **3.4.2 Amortecedores mecânicos (medida mecânica)**

Os amortecedores mecânicos são frequentemente utilizados para suprimir vibrações por vento e chuva. São variados tipos de solução existentes, tais como: amortecedores viscosos, hidráulicos ou de massa sincronizada. (GIMSING; GEORGAKIS, 2012)

Caetano (2007) ressalta que a instalação de amortecedores viscosos ou hidráulicos próximos a ancoragem dos estais é uma solução clássica e eficiente para suprimir a vibração dos cabos. A Figura 3-19 mostra amortecedores hidráulicos instalados nas pontes Iroise e Aratsu.

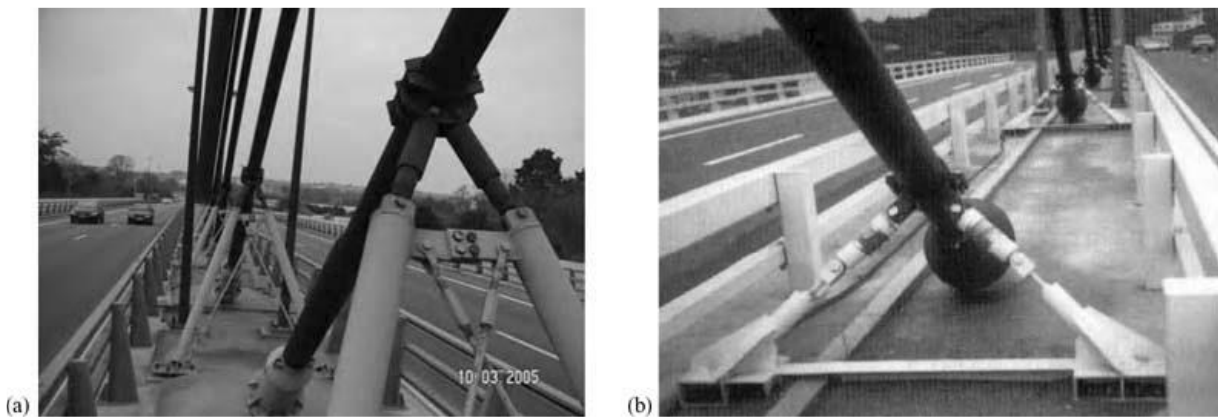


Figura 3-19 - Amortecedores hidráulicos instalados nas pontes (a) Iroise e (b) Aratsu (CAETANO, 2007).

### 3.4.3 Modificação na Seção Transversal (Medida Aerodinâmica)

Oscilações por desprendimento de vórtices e vibrações causadas por chuva e vento têm sido prevenidas por diversas alterações na forma da seção transversal do cabo. A Figura 3-20 mostra algumas das medidas mais comumente adotadas, sendo que na América e Europa é corrente a adoção da forma com filete helicoidal.



Figura 3-20 Modificação na seção transversal do cabo para evitar vibrações induzidas por chuva e vento (GIMSING; GEORGAKIS, 2012).

Caetano (2007) elucida que a implementação de superfícies não lisas que consigam impedir a formação dos filetes (que amplificam as oscilações) é uma solução eficiente para prevenção das vibrações induzidas por chuva e vento, causa de aproximadamente 95% das vibrações relatadas em pontes estaiadas.

## **4 PRESCRIÇÕES DO POST-TENSIONING INSTITUTE (2008) PARA CABOS DE PONSTES ESTAIADAS SUBMETIDOS A AÇÃO DO VENTO**

Devido ao seu posicionamento de destaque na área da engenharia estrutural, adotaram-se as prescrições normativas do Post-Tensioning Institute (2008), anunciadas na quinta edição do documento *Recommendations For Stay Cable: Design, Testing And Installation* (Recomendações para cabos estais: Projeto, Teste e Instalação).

O documento supracitado tem uma abordagem extensiva que compreende não somente considerações de projeto, mas também aspectos relativos à construção, instalação, inspeção e manutenção dos estais. Prescrições que não estejam incluídas no escopo do presente trabalho não serão abordadas, devendo-se, em necessidade, consultá-las diretamente na referida publicação. De mesmo modo, aquelas prescrições de projeto que fogem aos objetivos deste trabalho não são abordadas. Apresenta-se, assim, tão somente o conteúdo que se enquadre aos fins preteridos.

### **4.1 Considerações Relativas aos Mecanismos de Excitação Aerodinâmica**

Deve-se considerar o potencial da ocorrência de vibrações tanto durante a construção da ponte quanto após seu término. Deve ser avaliada a possibilidade de ocorrência dos mecanismos de excitação aerodinâmica e, caso necessário, adotadas soluções adequadas.

Recomenda-se como critério aeroelástico para a os cabos em situação de serviço que a amplitude de deslocamento máximo não supere uma vez o seu diâmetro externo do estai. Evita-se, assim, solicitações excessivas no sistema estrutural.

#### **4.1.1 Martelamento e desprendimento de vórtices**

Vibrações induzidas por martelamento e por desprendimento de vórtices não conduzem a uma instabilidade aeroelástica, mas tão somente a vibrações de amplitude limitadas que podem ocorrer para qualquer faixa de velocidade do vento.



#### **4.1.2 Galope e vibrações induzidas por chuva e vento**

Vibrações por galope e aquelas induzidas por chuva e vento têm início abrupto e constituem um mecanismo instável que conduz a oscilações de elevada amplitude. Para que se iniciem basta que o valor crítico de velocidade do vento seja atingido.

#### **4.2 Recomendações de Projeto**

Apresentam-se as prescrições não somente quantitativas, relacionadas ao número de Scruton, mas também os aspectos qualitativos. As situações omissas devem ser objeto de avaliação do responsável pelo projeto.

##### **4.2.1 Medidas contingenciais**

Os mecanismos de excitação ainda não foram completamente compreendidos e também a modelagem de forças induzidas pela vibração dos cabos nos demais elementos são de difícil realização. Com isso recomenda-se que, havendo possibilidade, medidas contingenciais para vibrações inesperadas sejam adotadas.

##### **4.2.2 Vibrações induzidas por chuva e vento**

Caso as vibrações por chuva e vento sejam prováveis, devem-se adotar medidas mitigatórias. O número de Scruton, dado pela equação 3-8, deve ser maior ou igual a 10 para superfície externa dos cabos circulares e lisas e, caso se tenha uma forma diferente, esse critério pode ser alterado. Para estais com superfície externa contendo um filete em espiral ou com ondulações na superfície (Figura 3-20), um limite inferior para o número de Scruton de 5 pode ser adotado.

### **4.2.3 Galope**

O galope a seco de cabos inclinados não é um fenômeno recorrente em situação de serviço. Os estudos recentes têm sido conduzidos com base nos poucos relatos existentes. Recomenda-se consultar os experimentos atuais para utilização como guia de projeto.

### **4.2.4 Contorno aerodinâmico do cabo**

A seção transversal do cabo deve ser circular, todavia, utilizando-se outra forma ou havendo possibilidade de alterações na seção durante a vida útil do estai, deve-se considerar a possibilidade de galope. Caso se modifique a seção transversal para melhorar o comportamento dinâmico do cabo sob a ação do vento, as variações no coeficiente de arrasto e nos modos de excitação dinâmica devem ser consideradas.

### **4.2.5 Amortecimento**

O amortecimento estrutural do cabo deve ser suficiente para prevenir grandes oscilações e instabilidades aeroelásticas. É recomendada a consideração de material dissipativo nos espaços vazios, não ocupados pelo cabo nas ancoragens com o tabuleiro e com o pilar.

O amortecimento estrutural intrínseco dos cabos ainda não é bem conhecido e deve ser verificado após sua instalação. As instabilidades aeroelásticas e os mecanismos de martelamento e desprendimento de vórtices sofrem expressiva influência do amortecimento estrutural.

### **4.2.6 Cabos estabilizadores**

A frequência natural dos cabos estais pode ser aumentada (consequentemente sua resistência à excitação dinâmica) com o uso de cabos estabilizadores. Esses elementos tanto aumentam a velocidade crítica do vento para as instabilidades aeroelásticas, por elevarem a frequência natural dos estais, quanto os conferem amortecimento adicional. As ligações entre os estais e os cabos estabilizadores devem ser apropriadas para evitar qualquer fenômeno indesejável como fadiga ou corrosão.

#### **4.2.7 Ruídos**

Permite-se o uso de tubos para revestimento de cordoalhas desde que não contenham preenchimentos ocos. Caso os apliquem, deve-se considerar a possibilidade de ruídos devido ao contato entre a parede dos tubos e os fios da cordoalha.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Exemplo de Aplicação 1

Considera-se um cabo estai de uma ponte suspensa com as seguintes características:

$$m = 76 \text{ kg/m}$$

$$D = 160 \text{ mm}$$

$$\xi = 0,10\%$$

Aplicando-se o critério de Scruton (equação 3.8) superior a 10, com o valor de  $\rho_{\text{ar}}$  igual a 1,20 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C, tem-se:

$$\frac{m\xi}{\rho_{\text{ar}} \cdot D^2} > 10$$

$$\frac{76 * \xi}{1,20 \cdot 0,16^2} > 10$$

$$\xi > 0,40\%$$

Devem ser adotadas medidas complementares para aumentar o amortecimento estrutural do cabo ou efetuar alterações estruturais que permitam um valor inferior para  $Sc$ . Uma solução seria o aumento do amortecimento dos cabos por meio do acréscimo de amortecedores mecânicos em suas extremidades, como foi realizado nos cabos mais longos da ponte Normandy na França (Figuras 5-1 e 5-2).



*Figura 5-1- Ponte Normandy, França (SVENSSON, 2012)*



*Figura 5-2- Destaque dos amortecedores nas extremidades dos cabos da ponte Normandy, França (SVENSSON, 2012)*

## 5.2 Exemplo de Aplicação 2

Considera-se um cabo de uma ponte estaiada com as seguintes características:

$$m = 189 \text{ kg/m}$$

$$D = 279 \text{ mm}$$

$$\xi = 0,50\%$$

Aplicando-se o critério de Scruton (equação 3.8) superior a 10, com o valor de  $\rho_{\text{ar}}$  igual a 1,20 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C, tem-se:

$$\frac{m\xi}{\rho_{\text{ar}} \cdot D^2} > 10$$

$$\frac{189 * \xi}{1,20 \cdot 0,279^2} > 10$$

$$\xi > 0,49\%$$

O amortecimento estrutural é adequado para prevenir a ocorrência de vibrações de amplitude superior a um diâmetro do cabo. Elucida-se que é recomendável adotar medidas adicionais visando eliminar quaisquer incertezas não previstas. O uso de modificação aerodinâmica na superfície externa do cabo tem sido eficaz na eliminação de vibrações por chuva e vento, cujas ocorrências correspondem a 95% dos casos relatados de vibrações em estais. A figura 5-3 mostra diferentes pontes no mundo e suas respectivas soluções para o contorno aerodinâmico dos cabos.



Figura 5-3- Modificações aerodinâmicas efetuadas em diferentes pontes do mundo. (SVENSSON, 2012)

## 6 CONCLUSÃO

Apresentou-se o estado da arte do estudo das respostas dinâmicas dos estais associados à ação do vento. Pode-se perceber que, embora numerosos estudos tenham sido realizados recentemente, ainda há um relevante grau de incerteza quanto aos mecanismos de excitação dos cabos.

Importantes aspectos preponderantes à ocorrência de certos fenômenos foram evidenciados, dentre eles, citam-se: a presença do filete de água para ocorrência de vibrações por vento e chuva e a inclinação dos cabos com vento incidindo obliquamente a seu eixo para ocorrência do galope a seco de cabos inclinados.

Diante do estado de da arte do assunto, os engenheiros são providos de maiores recursos para auxílio na detecção e na prevenção de situações indesejáveis no projeto dos cabos das pontes estaiadas. Todavia, ainda existem consideráveis incertezas quanto aos mecanismos de excitação que não permitem uma avaliação plenamente confiável das vibrações na etapa de projeto.

Frente às prescrições do Post-Tensioning Institute (2008) e dos exemplos de aplicação, pôde-se perceber a importância de uma avaliação adequada do amortecimento estrutural dos cabos na análise dos fenômenos. Embora toda análise tenha se dado em torno do número de Scruton de modo relativamente simples, não se deve prescindir de sua importância como parâmetro norteador do projeto dos cabos para supressão de vibrações de elevada amplitude. Conhecendo-se o número de Scruton pode-se avaliar a susceptibilidade do estai a uma instabilidade e também a vibrações de grande amplitude. O parâmetro massa-amortecimento deve ser cuidadosamente analisado para cada cabo da ponte levando-se em consideração a dificuldade de avaliação do amortecimento intrínseco. Acrescenta-se que experimentos recentes do comportamento de cabos em túnel de vento têm sido feitos com a simulação de chuva e vento para melhor compreensão de seu comportamento nessas circunstâncias.



Ressalta-se que o projeto dos cabos estais envolve um espectro de variáveis que devem ser cuidadosamente avaliadas para que situações indesejadas durante a construção ou vida útil da ponte não ocorram. Importantes medidas mitigatórias e práticas adequadas de projeto devem ser consideradas visando-se tanto prevenir a ocorrência de situações indesejáveis previsíveis quanto eventos inesperados.

## 7 REFERÊNCIAS

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 3ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2011. 264p.

BLESSMANN, Joaquim. **Introdução Ao Estudo Das Ações Dinâmicas Do Vento**. 2. ed. Porto Alegre: Ufrgs, 2005. 282 p.

CAETANO, Elsa de Sá (Ed.). **Cable Vibrations in Cable-Stayed Bridges**. Zurique, Suíça: IABSE, 2007. 188 p.

CARVALHO, Hermes. **Avaliação dos efeitos de vento em linhas de transmissão**. 2015. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FRIEDRICH Ebert Bridge. [20..]. Disponível em: <<https://structurae.net/structures/friedrich-ebert-bridge>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

GIMSING, Niels J.; GEORGAKIS, Christos T. **Cable Supported Bridges: Concept and Design**. 3. ed. Dinamarca: Wiley, 2012. 590 p.

ILUSTRAÇÕES do desenvolvimento do projeto arquitetônico da ponte estaiada. 2008. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/132/artigo286485-1.aspx>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

MACHADO, Daniel de Souza. **Caracterização Aerodinâmica de Cabos de Pontes Estaiadas Submetidos à Ação Combinada de Chuva e Vento**. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PASCO–KENNEWICK Bridge (1922). 20... Disponível em: <[https://structurae.net/structures/Pasco-Kennewick\\_Bridge\\_\(1922\)](https://structurae.net/structures/Pasco-Kennewick_Bridge_(1922))>. Acesso em: 31 jan. 2017.

POST-TENSIONING INSTITUTE. **Recommendations for Stay Cable: Design, Testing and Installation**. 5. ed. Eua: Post-tensioning Institute, 2008. 112 p.

STRÖMSUND Bridge. 2016. Disponível em: <<https://structurae.net/structures/stromsund-bridge>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

SVENSSON, Holger. **Cable-stayed bridges: 40 years of experience worldwide**. Alemanha: The Deutsche Nationalbibliothek, 2012. 545 p.

XU, You-lin. **Wind Effects On Cable-Supported Bridges**. Hong Kong, China: Wiley, 2015. 742 p.