

Aerodynamics of Bridge Stay Cables Under Simultaneous Action of Rain and Wind – Part I: Vortex Shedding

Aerodinâmica de Cabos de Pontes Estaiadas Sob a Ação Simultânea de Chuva e Vento – Parte I: Desprendimento de Vórtices

D. S. MACHADO ^a
lac@ufrgs.br

A. M. LOREDO-SOUZA ^b
acir@ufrgs.br

Abstract

Simultaneous occurrence of cable vibrations under the 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. These vibrations, which are predominantly cross-wind, were observed only under conditions of light rain and low wind speed occurring simultaneously. This paper presents the main results of an experimental wind tunnel study on three sectional cable models, set to investigate the influence of rivulets on the vortex shedding mechanism. 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 was a typical inclined cable of cable-stayed bridges. For the M3 model, the vortex shedding intensity increases for all rivulets positions. The greatest intensity occurred when the upper and lower rivulets were at 50° and 110°, respectively. For turbulent flow, the vortex shedding is stronger in the models with rivulets. For $Re < 1.2 \times 10^5$ the lower rivulets has no influence on the flow. However, for $> 1.2 \times 10^5$ the lower rivulets have a clear influence on the flow around the cylinder. For the inclined model (M3) the lower rivulet affected the flow for all the Re range.

Keywords: cable-stayed bridges, rain, wind, water rivulets.

Resumo

Simultâneas ocorrências de vibrações de cabos de pontes estaiadas sob ação combinada de chuva e 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. 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. Este trabalho apresenta os principais resultados de um programa experimental em túnel de vento, realizado com o intuito de investigar a influência dos filetes d'água formados na superfície dos cabos 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. Para o M3 notou-se aumento da intensidade do desprendimento de vórtices para qualquer posição dos filetes. A maior intensidade ocorreu para os filetes superior e inferior localizados a 50° e 110°. Para escoamento turbulento, o desprendimento de vórtices é mais intenso nos modelos com filetes. 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, vento, filetes d'água.

^a Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lac@ufrgs.br, Caixa Postal 15.035 – CEP 91.501-970, Porto Alegre, Brasil;

1. Introdução

Os cabos de pontes estaiadas atualmente apresentam grande flexibilidade, massa e amortecimento extremamente baixos. Portanto, este tipo de cabo apresenta susceptibilidade às vibrações causadas por vários mecanismos aerodinâmicos de excitação, dentre eles, um novo tipo de fenômeno conhecido como vibrações induzidas pelo efeito combinado de chuva e vento. Simultâneas ocorrências de vibrações de cabos de pontes estaiadas sob ação combinada de chuva e vento têm sido observadas ao redor do mundo nos últimos 20 anos. Neste trabalho são apresentados resultados obtidos através da medição de 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. Foi possível determinar a influência da localização dos filetes sobre a posição e intensidade do desprendimento de vórtices em modelos com filetes artificiais e determinar a influência do tipo de escoamento sobre o modelo com a presença de filetes. Os ensaios experimentais foram realizados no túnel de vento Professor Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1.1 Justificativa

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. É necessário que se entendam os mecanismos de vibrações induzidas por chuva e vento através de ensaios experimentais realizados em campo ou em túnel de vento. Os resultados apresentados a seguir servem como subsídio para o aprimoramento do projeto de pontes estaiadas.

2. Aerodinâmica de cilindros circulares

2.1 Fundamentos

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 (1).

$$c_p = \frac{\Delta p}{q} \quad (1)$$

Onde, c_p é o coeficiente de pressão, $q = \frac{1}{2} \rho_a V^2$ em $[\text{N/m}^2]$ é

a pressão dinâmica do vento correspondente à velocidade média de referência medida no centro da seção transversal do modelo de cabo, V é a velocidade média do vento ao nível da seção do cabo $[\text{m/s}]$ e ρ_a é a massa específica do ar em $[\text{kg/m}^3]$.

2.1.2 Coeficientes de força

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 (Equação 2);

$$C_a = \frac{F_a}{qD} \quad (2)$$

b) Coeficiente de sustentação: coeficiente relacionado à força de sustentação que consiste na componente da força global na direção transversal ao escoamento (Equação 3);

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

Onde, F_a é a força de arrasto média por unidade de comprimento $[\text{N/m}]$, F_s é a força de sustentação média por unidade de comprimento $[\text{N/m}]$ e D é o diâmetro do cabo $[\text{m}]$.

2.1.3 Número de Reynolds, Re

É uma relação entre as forças de inércia e as forças devidas à viscosidade do fluido (Equation 4).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (4)$$

Onde, ν é a viscosidade cinemática do ar.

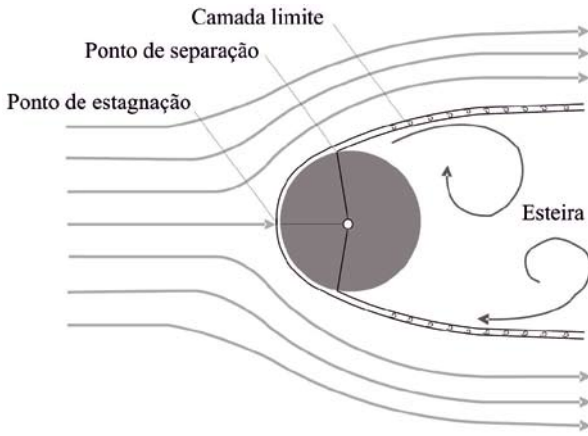
2.1.4 Número de Strouhal, St

Pode-se prever a ocorrência de efeitos dinâmicos através do número de Strouhal (Equation 5), que depende em geral da geometria da estrutura e do número de Reynolds.

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

$$St = \frac{f_s D}{V} \quad (5)$$

Figura 1 - Escoamento em torno de um cilindro circular



2.1.5 Excitação por vórtices

Em corpos de forma não aerodinâmica, o despreendimento de pares de vórtices ocorre em uma determinada gama de números de Reynolds. Conhecidos como vórtices de Kármán, originam forças transversais ao sentido do escoamento e conseqüentemente movimentos nesta direção (Blessmann [1]). A Figura 1 mostra as características do escoamento em torno de um cilindro estacionário definindo a camada limite, ponto de estagnação, ponto de separação e esteira.

3. Aerodinâmica de cabos inclinados

Diferentemente de cilindros com eixo perpendicular ao escoamento, em cilindros oblíquos em relação ao vento aparecem efeitos instabilizantes adicionais, como por exemplo, escoamento axial, despreendimento de vórtices de baixa frequência e vibrações induzidas por chuva e vento. A posição do cabo em relação ao vento é definida aqui conforme Figura 2. 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

Figura 2 - (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. (7))

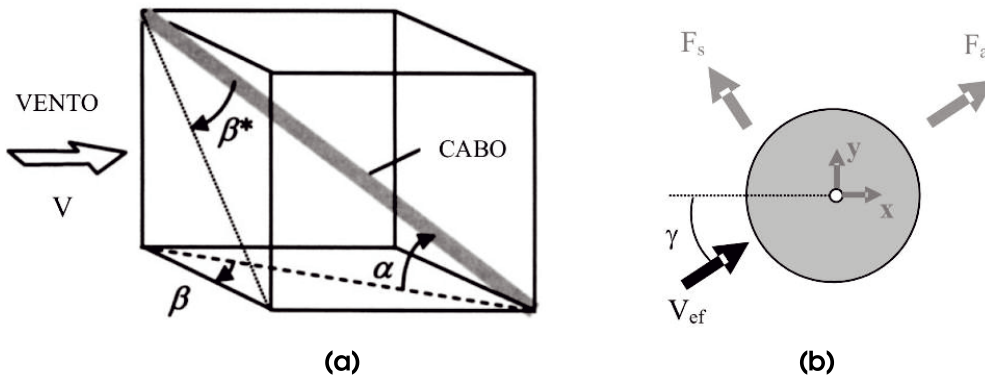


Figura 3 - Escoamento secundário axial a sotavento do cabo inclinado (Matsumoto (3))

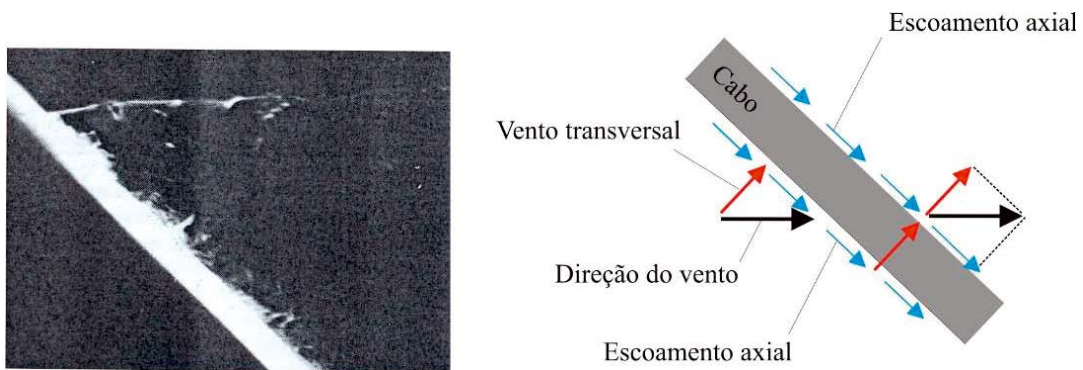
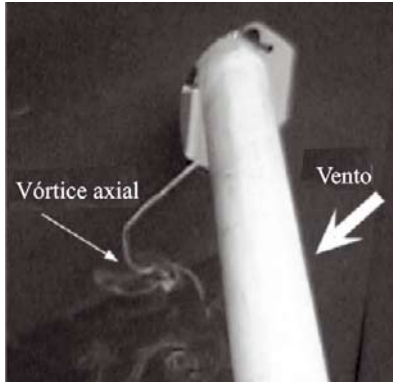


Figura 4 - Visualização de vórtice axial na esteira de cabo inclinado ($\alpha=0^\circ$ e $\beta=45^\circ$, $V=0,5m/s$, escoamento suave) (Matsumoto et al (5))



sobre o plano horizontal e o plano vertical perpendicular à direção do vento) são definidos pelas letras gregas α e β , respectivamente.

3.1 Escoamento axial

Matsumoto et al. [3] 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 3 mostra o escoamento em volta de um cilindro com $\alpha = 0^\circ$ e $\beta = 45^\circ$.

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. (Matsumoto [3]).

3.2 Vórtices de baixa frequência

O desprendimento de vórtices de baixa frequência 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.

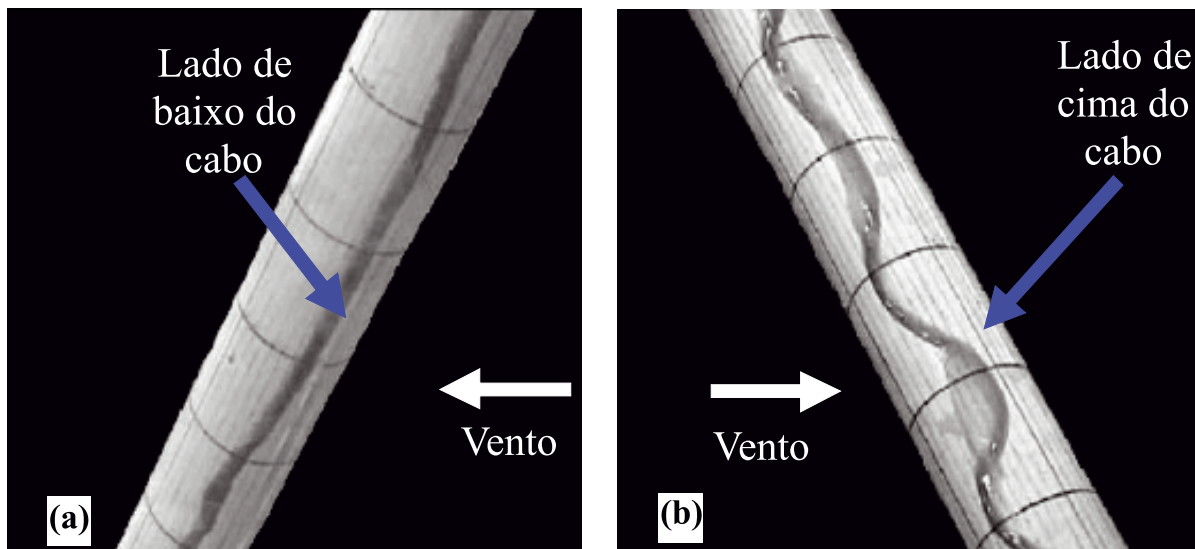
Matsumoto et al. [5] verificaram a existência do vórtice axial através de ensaio utilizando filete de fumaça para visualizar a formação dos vórtices na esteira do cabo conforme mostra a Figura 4.

3.3 Vibrações induzidas por chuva e vento

Estas vibrações constituem-se em um novo tipo de fenômeno de instabilidade (Matsumoto et al. [4]). 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 pela formação de dois 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. Matsumoto et al. [4] observaram amplitudes duplas (de pico a pico) na ponte Farø (Dinamarca) de até 2m devido ao efeito combinado de chuva e vento. Cada filete d'água é formado por um filamento de água da chuva resultante da precipitação sobre os cabos (Figura 5). São denominados filete inferior (Figura 5a) e filete superior (Figura 5b). A formação do filete superior pode seguir a forma de uma onda senoidal (Wang et al. [9]). A posição dos filetes d'água superior e inferior é definida neste trabalho por θ_1 e θ_2 , respectivamente na Figura 6, onde V_{ef}^1 é a velocidade no plano normal ao cabo e γ é o ângulo de ataque normal ao eixo do cabo.

A posição dos filetes d'água varia quase linearmente com a velocidade do vento. Hikami e Shiraiishi [2] mostraram que a ocorrência de vibrações induzidas por chuva e vento está limitada a cabos geometricamente inclinados contra a direção do vento. As maiores amplitudes de vibração induzida por chuva e vento ocorrem para inclinações do cabo entre 25° e 45° e ângulos de

Figura 5 - Filetes d'água vistos no sentido longitudinal (a) filete inferior (a sotavento) e (b) filete superior (a barlavento) (Wang et al. (9))



¹ Um cabo sobre ação do vento com velocidade V , terá uma inclinação α com a horizontal e ângulo de incidência β . Por definição geométrica tem-se que a velocidade efetiva – função de V , α e β – age perpendicularmente ao cabo com um ângulo de ataque do vento γ em relação a seção normal do cabo. Para detalhes do cálculo de V_{ef} e γ ver Phelan et al. [7].

Figura 6 – (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

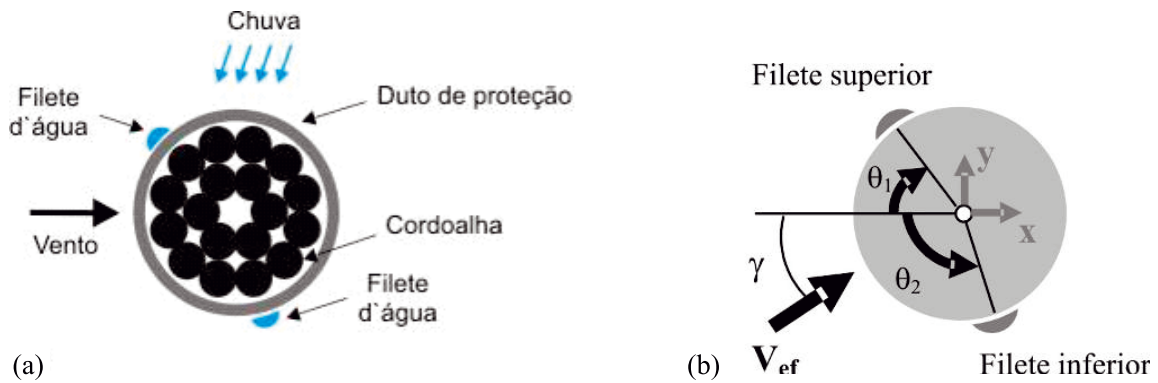
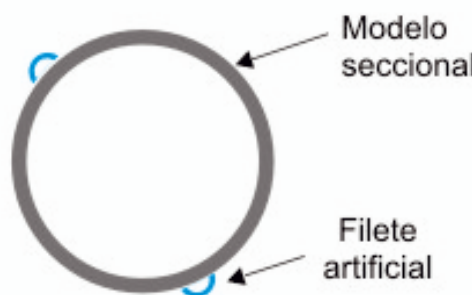


Figura 7 – Exemplo de modelo seccional para ensaio



incidência do vento entre 30° e 45° . As vibrações que atingem grandes amplitudes ocorrem apenas na presença de chuva leve a moderada (intensidade de chuva em torno de 8 mm/h (Ni et al. [6]). Os filetes d'água podem oscilar sobre a superfície de

cabos na direção circunferencial, oscilação esta, causada principalmente pela aceleração momentânea da seção transversal. O movimento dos filetes é influenciado pela interação 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 [8]). Os filetes oscilam com a mesma frequência do movimento do cabo (Hikami e Shiraishi [2]).

3.3.1 Programa experimental

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. Os modelos representam o duto de proteção contra corrosão das cordoalhas de aço que compõem um sistema típico de cabo de pontes estaiadas. A Figura 7 apresenta o esquema de uma seção transversal do modelo correspondente. A Figura 10 apresenta uma perspectiva esquemática do posicionamento dos três modelos ensaiados em túnel de vento.

Figura 8 – Perspectiva e seção transversal dos filetes artificiais (a) perspectiva e (b) seção transversal

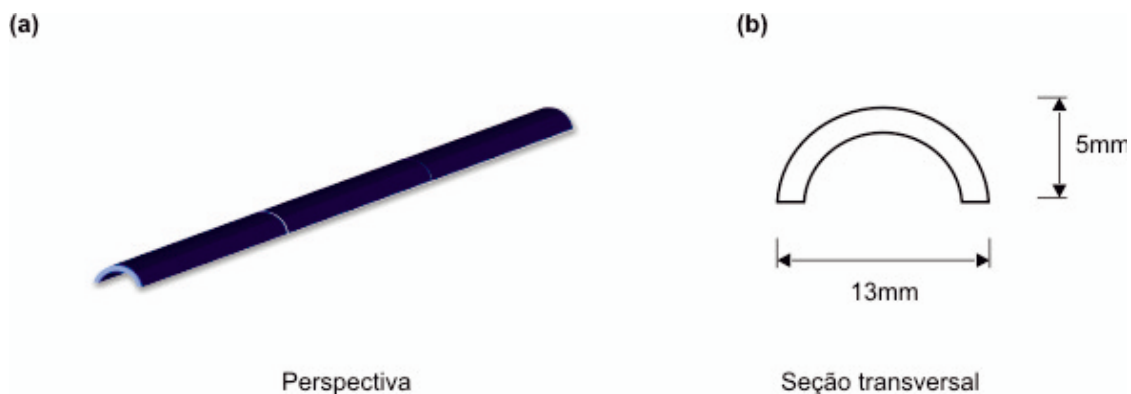
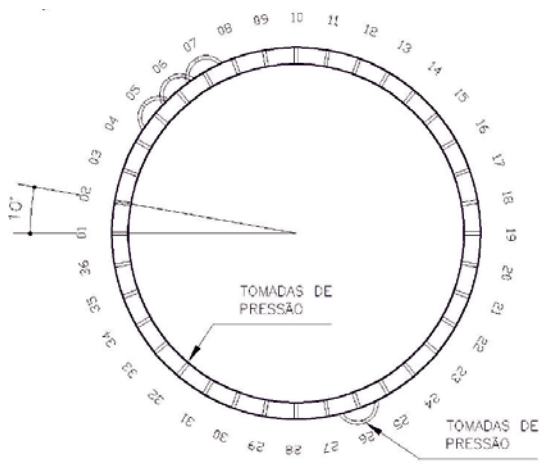


Figura 9 – Localização e distribuição das tomadas de pressões no modelo



Os filetes artificiais têm seção transversal em forma de uma semi-elipse (largura do filete $b_{fil}=13$ mm e altura do filete $h_{fil}=5$ mm) e foram confeccionados com o uso de um tubo de CPVC cortado no sentido longitudinal (Figura 8). Os comprimentos dos filetes são semelhantes aos comprimentos dos respectivos modelos.

A Figura 9 mostra a distribuição das tomadas de pressão na seção transversal no centro do vão do modelo e sobre os filetes.

Foram medidas pressões instantâneas ao redor da seção transversal localizada no centro do vão do modelo com a presença dos filetes, variando os parâmetros como será descrito em seguida. Utilizou-se para isto o Sistema de Aquisição de Dados de Pressões Instantâneas - Scani-valve Pressure System. 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 10 mostra o posicionamento dos modelos na câmara de ensaio do túnel de vento.

Figura 10 – Posicionamento dos modelos M1, M2 e M3 na câmara de ensaios

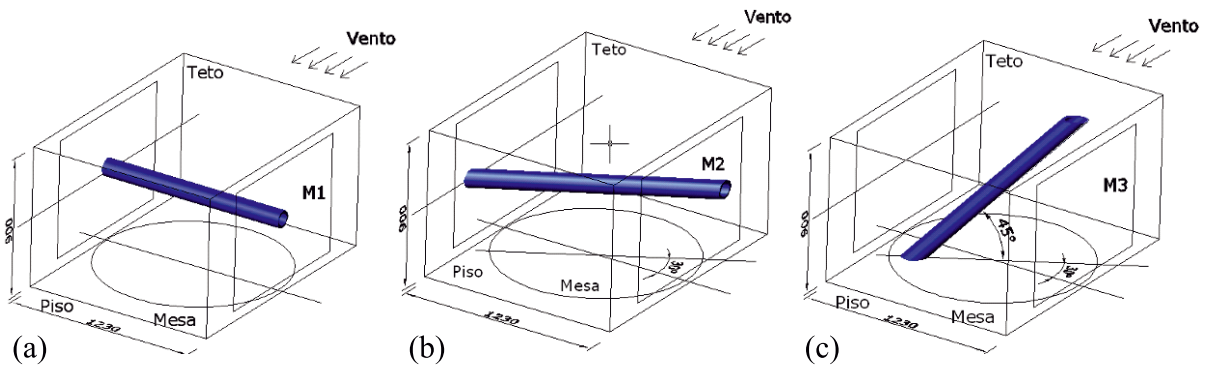


Figura 11 – Espectros de potência para os sinais de coeficientes de sustentação (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1

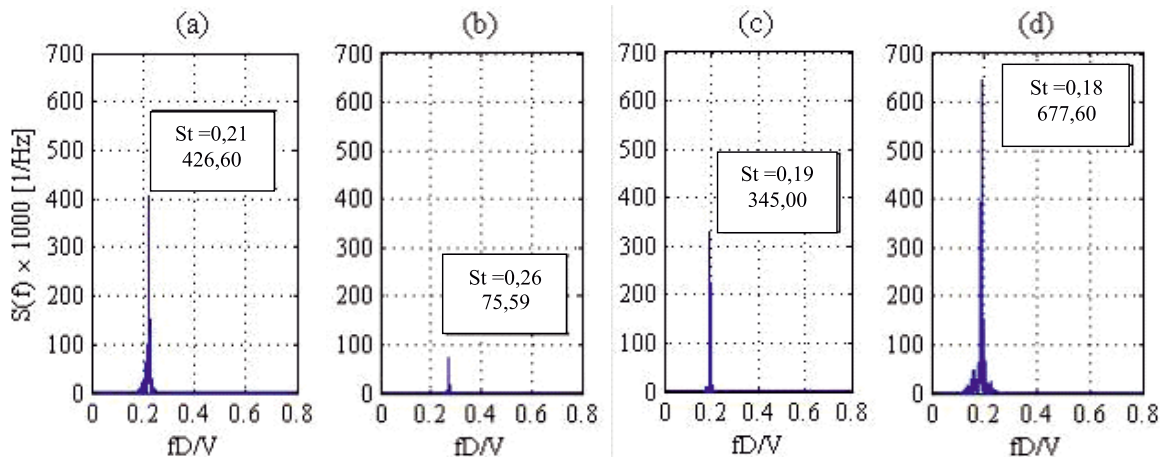
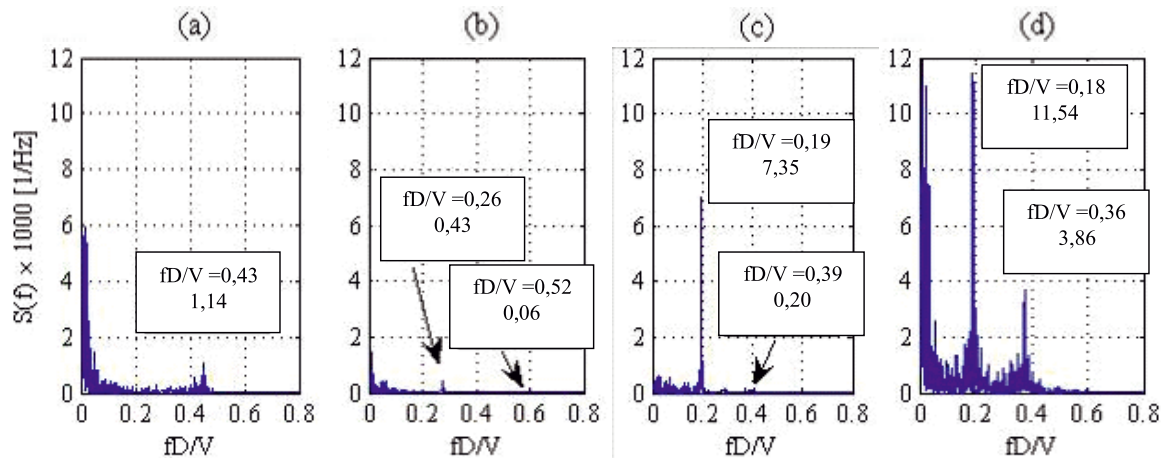


Figura 12 – Espectros de potência para os sinais de coeficientes de arrasto (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$, escoamento suave, M1



Para a geração do vento turbulento foi utilizada uma grelha capaz de gerar intensidade de turbulência de 10,5%. Foram determinados espectros de potência 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 da integração 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: As Figuras 11 e 12 apresentam os espectros de potência dos sinais de C_a (coeficiente de arrasto) e de C_s (coeficiente de sustentação) para o escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$ para todas as configurações, SF (cabo sem filetes), F40 (cabo com filetes em $\theta_1 = 40^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$), F50 (cabo com filetes em $\theta_1 = 60^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$) e F60 (cabo com filetes em $\theta_1 = 60^\circ$ e $\theta_2 = 110^\circ$). Para as

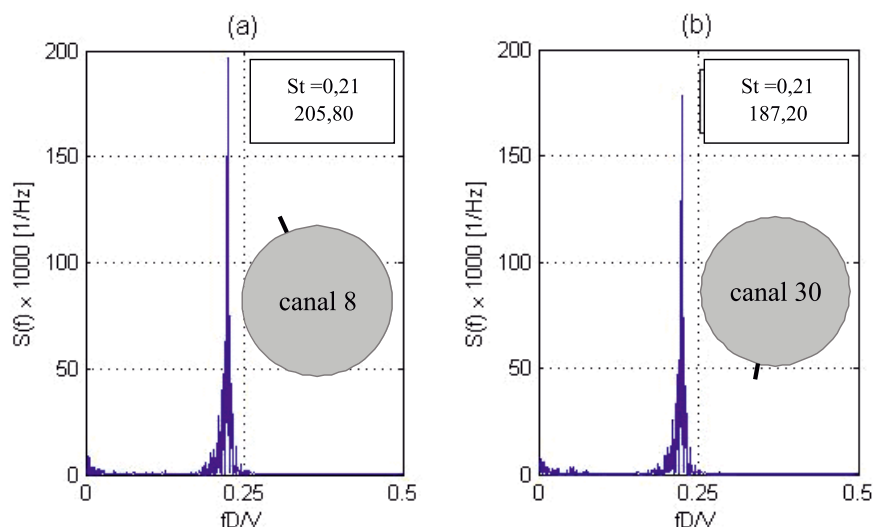
análises foi utilizado o valor de $Re \cong 7,7 \times 10^4$, para o qual foram observadas amplitudes máximas causadas pela ação combinada de chuva e vento em ensaios realizados por outros autores.

A Figura 13 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, $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

A Figura 13 apresenta os maiores picos de energia que ocorreram nas tomadas 8 e 30 (vide figura 10), 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 14 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 confi-

Figura 13 – Espectros 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



guração F40 em escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$. Observe na Figura 14 que a intensidade do pico do espectro sobre a tomada 5 (filete superior) 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

Figura 14 – Espectros 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

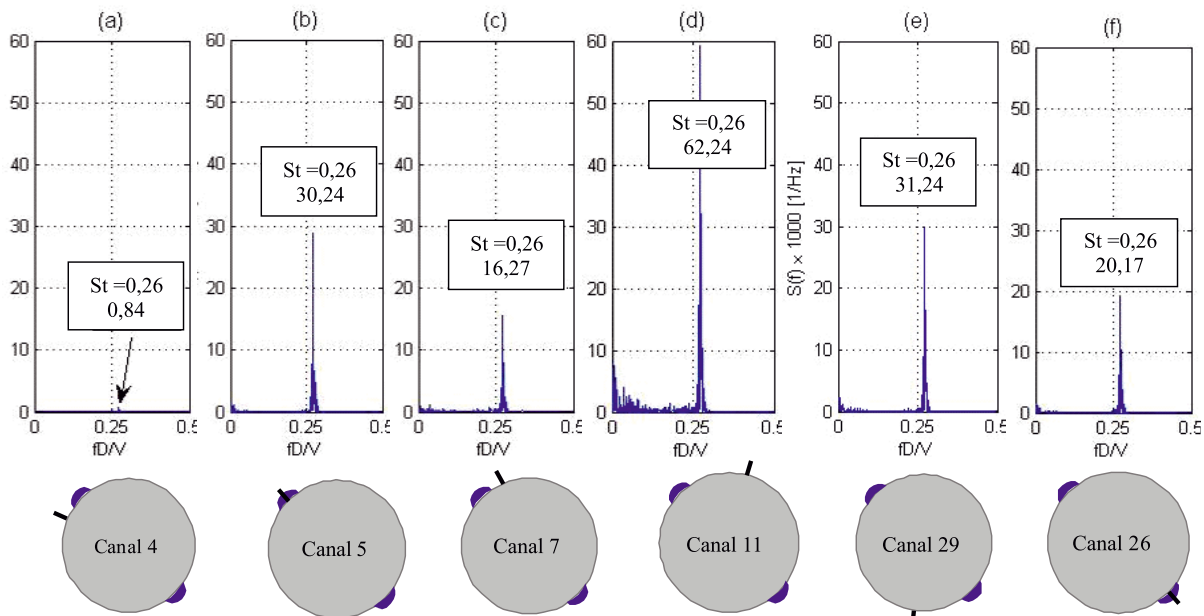
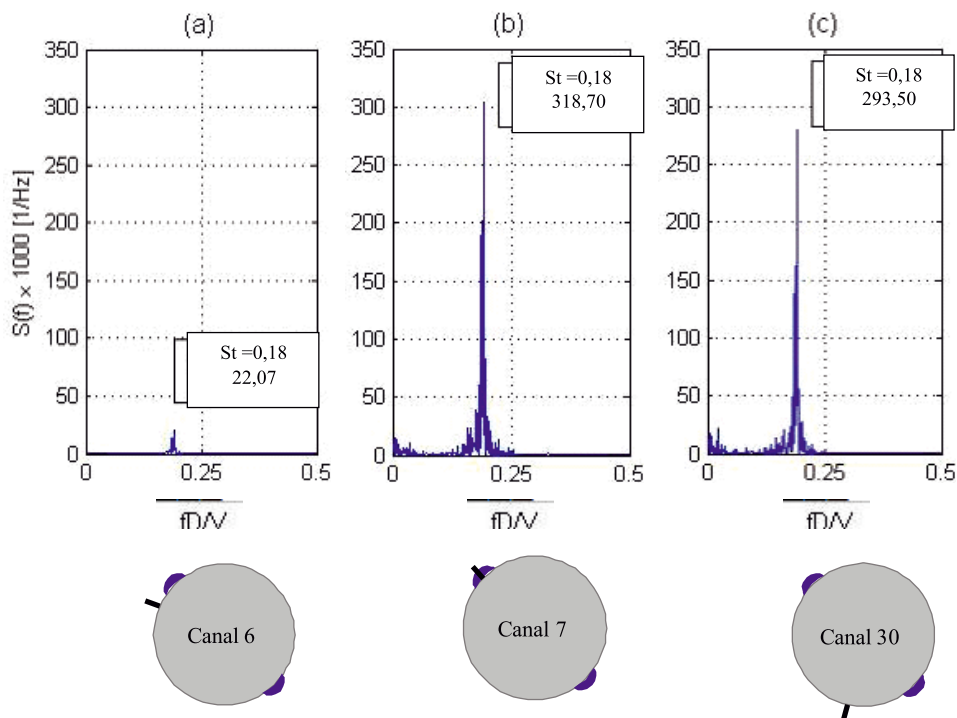


Figura 15 – Espectros de potência para os sinais de coeficientes de pressão externa (a) canal 5, (b) canal 6, (c) canal 30, para escoamento suave, $Re \cong 7,7 \times 10^4$, M1, F50



11 (intensidade mais forte). Na parte inferior do modelo o desprendimento ocorre sobre as tomadas 26 e 29.

A Figura 15 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 16 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 16 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 11 a 16 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

Figura 16 – Espectros 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

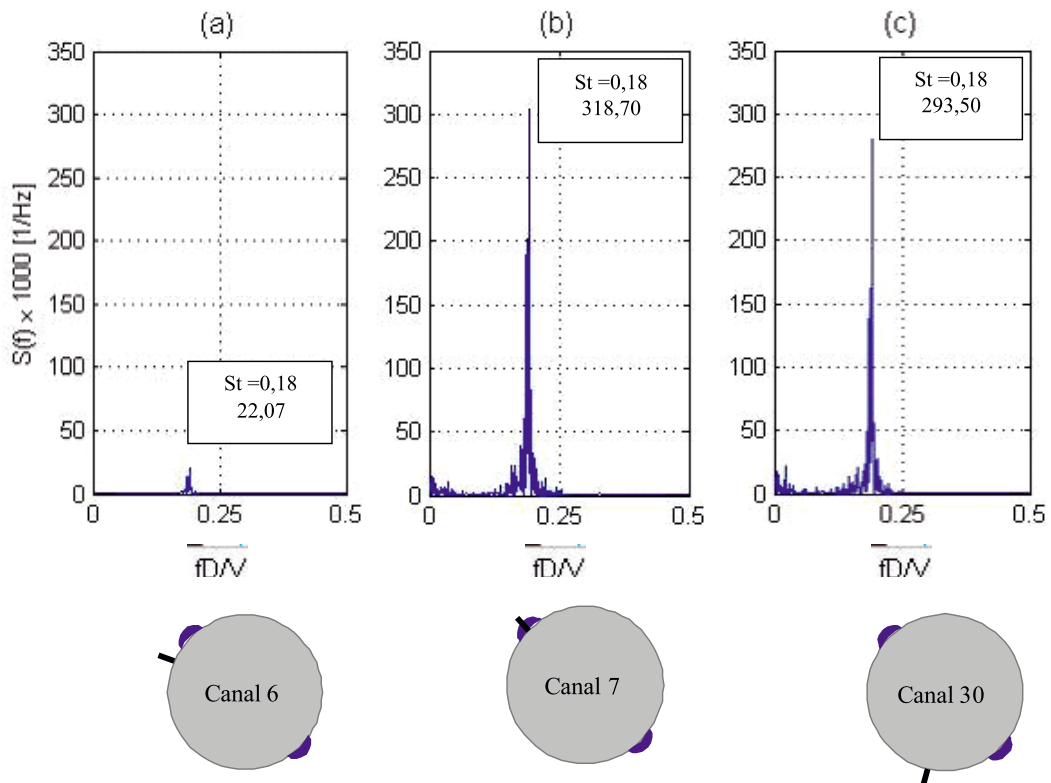
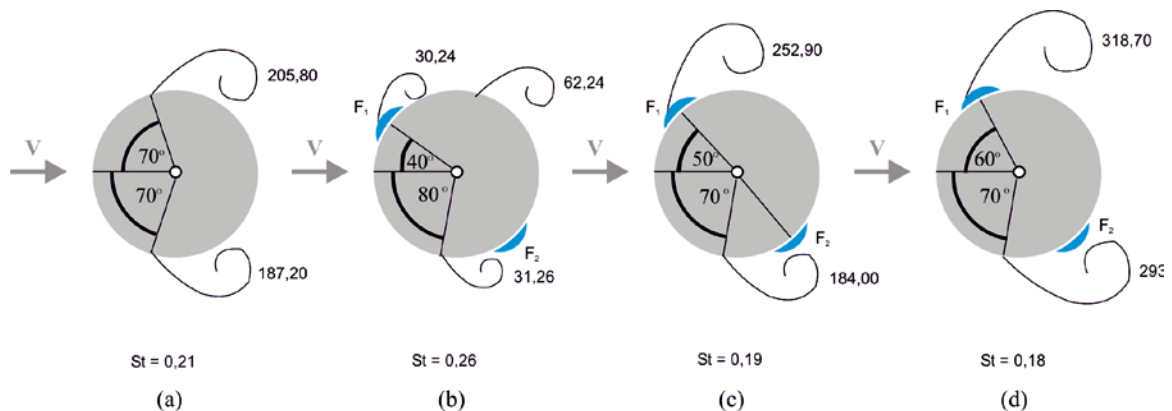


Figura 17 – Esquema do desprendimento de vórtices no modelo M1 para todas as configurações



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 12b) de mesma frequência do desprendimento de vórtice identificado no $S(f)$ do Cs (Figura 11b). 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 no $S(f)$ do Ca (Figura 12c) 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 (Fi-

gura 11c) 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 12d) indicam diferentes intensidades do desprendimento dos vórtices em cada lado do modelo. A Figura 17 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 18 – Espectros de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M1 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$

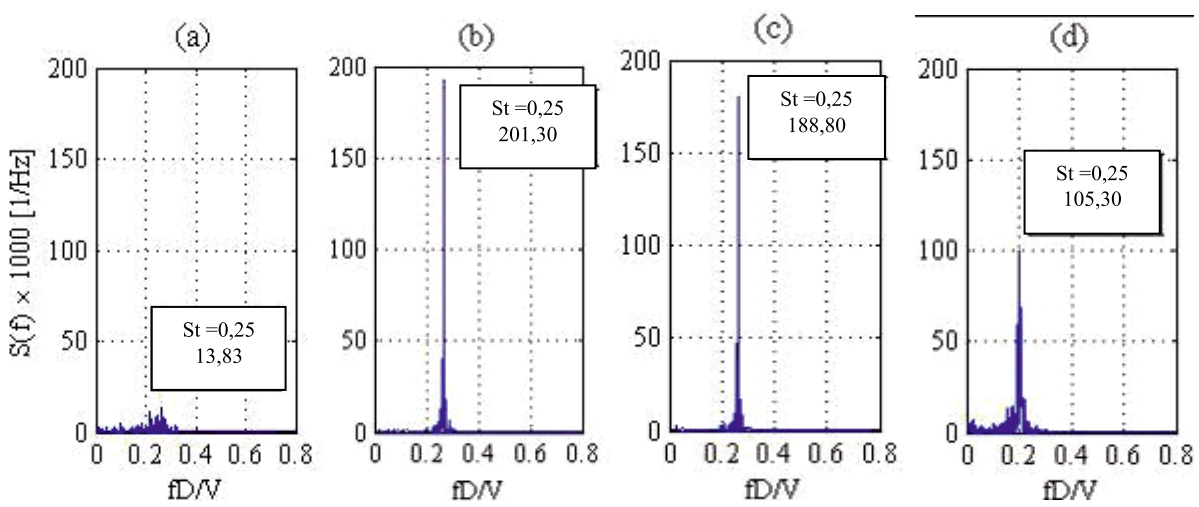


Figura 19 – Espectros de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M2 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$

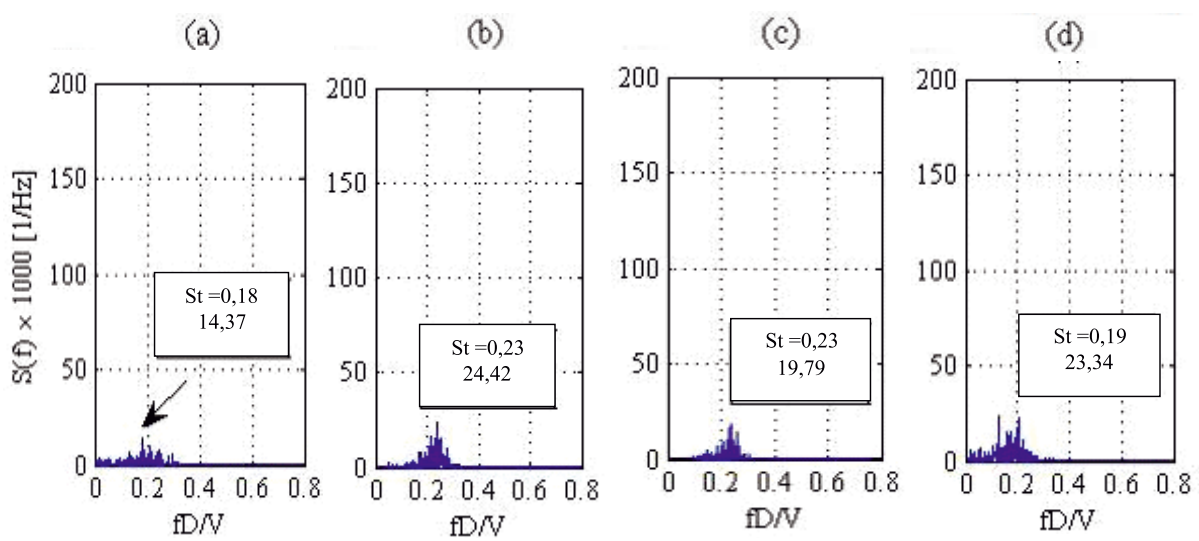
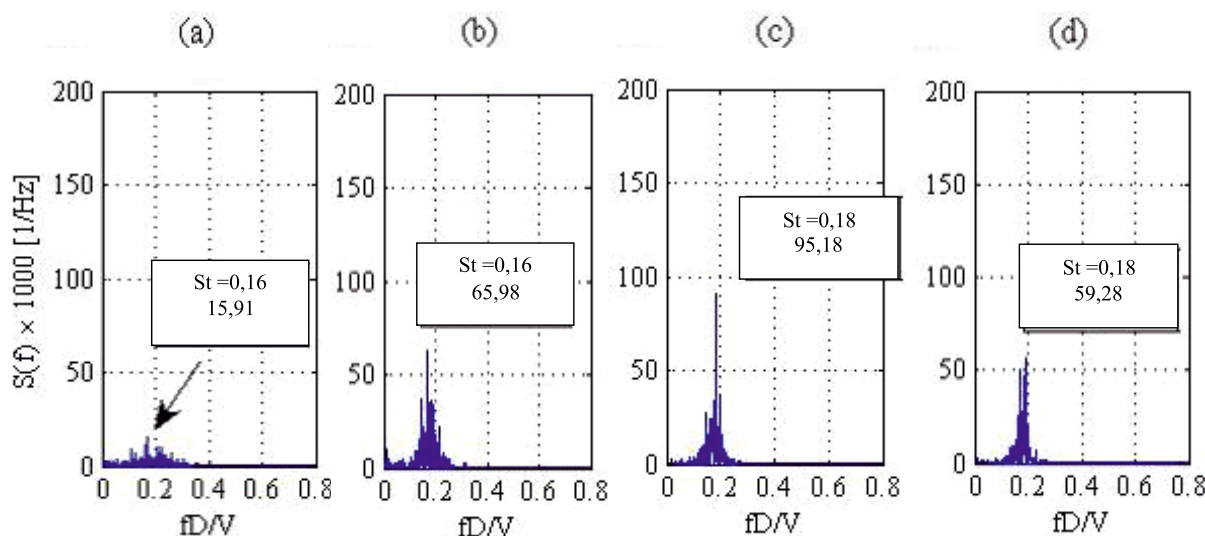


Figura 20 – Espectros de potência para os sinais de coeficientes de sustentação em escoamento turbulento, modelo M3 (a) SF, (b) F40, (c) F50, (d) F60, para $Re \cong 7,7 \times 10^4$



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.

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 apresentaram-se 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 Cs foram mais altos que o do modelo em escoamento suave.

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

Considerações gerais: As Figuras 18 a 20 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 $Re \cong 7,7 \times 10^4$.

Nota-se que para o modelo M1 as configurações F40 e F50 apresentam picos mais fortes que as configurações SF e F60 (Figura 18) ao contrário do escoamento suave em que F60 apresentou os picos mais altos (Figura 12d). As frequências reduzidas diminuem à medida que as posições dos modelos no túnel alteram-se de M1 a M3. O modelo M3 apresentou maior pico na configuração F50, no entanto as configurações F40 e F60 apresentaram também picos com intensidades semelhantes. 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.

4. Conclusões

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

- a separação do escoamento para cabos inclinados ocorre sobre os 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, no entanto a maior intensidade ocorreu para F50;
- para todos os modelos com filetes o desprendimento de vórtices é mais forte em escoamento turbulento;
- independentemente 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.

5. Agradecimentos

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos, indispensável para a realização do curso de mestrado, o qual deu origem a este trabalho. Ao Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde foram realizados os ensaios.

6. Referências bibliográficas

- [01] BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2005. 282p.
- [02] HIKAMI, Y., SHIRAIISHI, 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.
- [03] MATSUMOTO, M., SHIRAISHI, N., KITAZAWA, M., KNISELY, C., SHIRATO, H., KIM, Y., TSUJJI, M. Aerodynamic behavior of inclined circular cylinders-cable aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Elsevier, 1990. v.33, p.63-72.
- [4] 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.
- [05] 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.
- [06] 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.
- [07] 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.
- [08] 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.
- [09] 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.