

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

Lorenzo Campello Beneduzi

**AERODINÂMICA DE PONTES ESTAIADAS:
INFLUÊNCIA DA CHUVA E DO VENTO NOS CABOS**

Porto Alegre
novembro 2009

LORENZO CAMPELLO BENEDEZI

**AERODINÂMICA DE PONTES ESTAIADAS:
INFLUÊNCIA DA CHUVA E DO VENTO NOS CABOS**

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

Orientador: Acir Mércio Loredou-Souza

Porto Alegre
novembro 2009

LORENZO CAMPELLO BENEDEUZI

**AERODINÂMICA DE PONTES ESTAIADAS:
INFLUÊNCIA DA CHUVA E DO VENTO NOS CABOS**

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

Porto Alegre, 23 de novembro de 2009

Prof. Acir Mércio Loredou-Souza
Ph.D., University of Western Ontario, Canada
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Acir Mércio Loredou-Souza (UFRGS)
Ph.D. pela University of Western Ontario/Canada

Elvis Antônio Carpegiani (UFRGS)
M. Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Mário Gustavo Klaus Oliveira (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, José e Andréa, ao meu irmão, Walter, e aos meus amigos que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho pela ajuda e apoio que sempre me disponibilizou quando preciso.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt, pelo comprometimento e cobrança para que este trabalho pudesse ser completado.

A dúvida é o princípio da sabedoria.

Aristóteles

RESUMO

BENEDUZI, L. C. **Aerodinâmica de Pontes Estaiadas**: influência da chuva e do vento nos cabos. 2009. 50 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Uma das grandes dificuldades ao se projetar pontes estaiadas é a consideração da influência do efeito do vento sobre estas, e este fenômeno, quando ocorre simultaneamente com a chuva, torna-se uma parte muito importante no dimensionamento destas estruturas. Assim, este trabalho tem como objetivo verificar a influência da ação do vento combinada com a chuva em cabos de pontes estaiadas quanto à determinação do coeficiente de arrasto e da amplitude de deslocamentos dos cabos. Foram utilizados dados obtidos tanto no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como em estudos realizados no exterior. Foram verificadas as influências da velocidade e do ângulo de incidência do vento para a determinação das posições dos filetes d'água formados sobre os cabos, assim como a influência da velocidade do vento sobre estas posições. O coeficiente de arrasto foi testado para diversas posições dos filetes d'água e para a determinação da amplitude máxima de vibração, foram alterados o ângulo de incidência e a velocidade do vento, a posição dos filetes d'água, a frequência natural dos cabos e a intensidade da chuva. Foram vistos também alguns dispositivos mitigadores para a vibração, como protuberâncias longitudinais, fios entrelaçados e mossas superficiais. Conclui-se desde trabalho que a influência da chuva atuando simultaneamente com o vento influi consideravelmente sobre a amplitude de deslocamento dos cabos, podendo aumentar a amplitude em quase 5 vezes da que ocorreria sem a presença da chuva.

Palavras-chave: pontes estaiadas; vento; chuva; coeficiente de arrasto; amplitude de deslocamento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama das etapas de trabalho	15
Figura 2: configuração do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann	21
Figura 3: vórtices de Kármán	23
Figura 4: corpos afilados ou aerodinâmicos	25
Figura 5: corpos rombudos angulosos	25
Figura 6: corpos rombudos arredondados	26
Figura 7: características do escoamento em torno de um cilindro circular	27
Figura 8: escoamento em cilindros: $Re < 1$	27
Figura 9: escoamento em cilindros: $1 < Re < 5$	28
Figura 10: escoamento em cilindros: $5 < Re < 40$	28
Figura 11: escoamento em cilindros: $40 < Re < 10^5$	29
Figura 12: escoamento em cilindros: $10^5 < Re < 5 \times 10^5$	29
Figura 13: escoamento em cilindros: $Re > 5 \times 10^5$	29
Figura 14: fenômenos característicos do escoamento em torno de cilindros lisos	30
Figura 15: distribuição de pressão em cilindros	31
Figura 16: distribuição de pressões em cilindros longos lisos	32
Figura 17: filetes d'água vistos no sentido longitudinal (a) filete inferior (a sotavento) e (b) filete superior (a barlavento)	34
Figura 18: definição da posição dos filetes superior e inferior	34
Figura 19: (a) formação do filete d'água em 3 instantes, A, B e C; (b) amplitude encontrada em função da velocidade média do vento	35
Figura 20: variação da posição dos filetes superior (F_1) e inferior (F_2) com a velocidade	36
Figura 21: variação da posição dos filetes superior (F_1) e inferior (F_2) com o ângulo de incidência do vento)	36
Figura 22: distribuição de pressões externas obtidos em escoamento uniforme e turbulento para $Re \approx 1,9 \times 10^5$ (a) sem filete, (b) filete superior à 40° , (c) filete superior à 50° e (d) filete superior à 60°	36
Figura 23: variação dos filetes superior (a) e inferior (b) com a velocidade do vento	37
Figura 24: variação do coeficiente de arrasto com a posição do filete superior	38
Figura 25: amplitude variando com o vento com algumas posições de filetes d'água	39
Figura 26: variação da amplitude com a velocidade média do vento com e sem a presença de chuva	40
Figura 27: variação da amplitude com a velocidade do vento para diversos valores de frequência natural dos cabos	41

Figura 28: variação da amplitude com a intensidade da chuva, para velocidade média do vento de 10,66m/s	42
Figura 29: cabo com protuberâncias longitudinais (a); e ilustração da ponte Higashi Kobe	43
Figura 30: efeito do diâmetro dos fios na amplitude	44
Figura 31: efeito do sentido das espirais na amplitude	45
Figura 32: efeito do passo na mitigação da amplitude	46
Figura 33: mossas superficiais distribuídas longitudinalmente ao longo do cabo	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: amplitudes máximas devido à vibração em cabos de pontes estaiadas	33
Quadro 2: faixa de variação da velocidade para a formação de filetes d'água	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.2.1 Objetivo Principal	14
2.2.2 Objetivo Secundário	14
2.3 PRESSUPOSTO	14
2.4 DELIMITAÇÕES	14
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	15
3 SOBRE O VENTO	16
3.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO	16
3.2 AÇÃO DO VENTO	18
3.2.1 Coeficientes de Pressão	18
3.2.2 Coeficientes de Forma	18
3.2.3 Número de Reynolds	19
3.3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL	19
4 AÇÃO DO VENTO EM SÓLIDOS	22
4.1 SEPARAÇÃO	22
4.2 RESISTÊNCIA DE FORMA	24
4.2.1 Corpos Afilados ou Aerodinâmicos	24
4.2.2 Corpos Rombudos Angulosos	25
4.2.3 Corpos Rombudos Arredondados	25
4.3 AERODINÂMICA DE CILINDROS	26
5 AÇÃO DO VENTO COMBINADA COM CHUVA EM CABOS	33
5.1 FORMAÇÃO DOS FILETES D'ÁGUA	33
5.2 VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DO FILETE	35
5.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO NA POSIÇÃO DO FILETE	37
5.4 COEFICIENTE DE ARRASTO NA PRESENÇA DE VENTO E CHUVA	38
5.5 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO FILETE NA AMPLITUDE	38
5.6 INFLUÊNCIA DO VENTO COM CHUVA NA AMPLITUDE	39
5.7 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NATURAL NA AMPLITUDE	40
5.8 INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DA CHUVA NA AMPLITUDE	41

6 DISPOSITIVOS MITIGADORES	43
6.1 PROTUBERÂNCIAS LONGITUDINAIS	43
6.2 FIOS ENTRELAÇADOS EM ESPIRAIS	44
6.3 MOSSAS SUPERFICIAIS	46
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento da Engenharia no Brasil e da tecnologia que esta utiliza, tem-se cada vez mais a necessidade de aprimorar o conhecimento nas mais diversas áreas. No projeto de pontes não é diferente. A partir do desenvolvimento da ponte estaiada sobre o rio Guamá, no estado do Pará, o Brasil ingressou em uma era na qual domina totalmente a construção de pontes estaiadas, pois esta foi uma obra que contou somente com a força brasileira para a sua construção, desde a fase de projeto até a sua construção.

Porém, apesar de se dominar todas as fases construtivas de pontes estaiadas, existem ainda muitos assuntos pouco detalhados. Isto leva projetistas a utilizarem coeficientes de segurança muito maiores do que o necessário a fim de evitarem problemas futuros devidos às incertezas existentes. Um desses problemas no projeto de pontes estaiadas são os efeitos aerodinâmicos nestas estruturas: efeitos estes que são de extrema importância em pontes com vãos muitos longos e pilares muito altos. Entre os efeitos aerodinâmicos, o conhecimento não é muito desenvolvido sobre o efeito da chuva e do vento atuando simultaneamente sobre os cabos. Desconhecimento este que motivou a execução deste trabalho, com o intuito de elucidar um pouco a incerteza sobre este assunto.

Este trabalho está organizado de forma que no capítulo 2 está apresentada o método utilizado para a sua execução. No capítulo 3, intitulado Sobre o Vento, foi apresentado um resumo das características importantes deste fenômeno necessárias para o entendimento deste trabalho. No capítulo 4, Ação do Vento em Sólidos, foi descrito o que acontece quando o vento encontra obstáculos à sua frente, como a separação, e também inclui informações sobre a resistência de forma dos obstáculos, assim como a aerodinâmica de cilindros. O capítulo 5, denominado Ação do Vento Combinada com Chuva em Cabos, contém dados sobre a formação dos filetes d'água e a influência da velocidade do vento sobre a posição destes, assim como qual a influência de diversas variáveis, como a posição dos filetes, a ação do vento com chuva e a intensidade da chuva atuando sobre os cabos e a frequência natural dos cabos, na amplitude destes. No capítulo 6, denominado Dispositivos Mitigadores, foram apresentados alguns dispositivos capazes de diminuir ou eliminar a vibração dos cabos devido

ao vento atuando com a chuva. No capítulo 7 foram feitas as considerações finais deste trabalho.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a influência nos valores de coeficiente de arrasto da chuva e do vento atuando simultaneamente nos cabos de pontes estaiadas?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é a análise da influência da chuva e do vento atuando simultaneamente sobre os cabos de pontes estaiadas no coeficiente de arrasto.

2.2.2 Objetivo Secundário

O objetivo secundário deste trabalho é a influência nas amplitudes de deslocamento da chuva e do vento atuando simultaneamente sobre os cabos de pontes estaiadas.

2.3 PRESSUPOSTO

É admitido o pressuposto que a posição e a forma dos filetes de água da chuva descritos na dissertação de Machado (2008) estão corretas.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho se restringe a tratar de forças aerodinâmicas estáticas atuando nos cabos de pontes estaiadas, não se aprofundando a assuntos mais complexos, como os efeitos dinâmicos.

2.5 LIMITAÇÕES

Este trabalho se limita a estudar o coeficiente de arrasto atuando nos cabos de pontes estaiadas, utilizando resultados de pontes já ensaiadas, e as amplitudes de deslocamentos.

2.6 DELINEAMENTO

As etapas para a realização da pesquisa são as seguintes:

- a) pesquisa bibliográfica sobre o efeito do vento em estruturas e ensaios em túnel de vento para obtenção de embasamento teórico;
- b) pesquisa específica sobre o coeficiente de arrasto em cabos de pontes estaiadas devido à ação simultânea de vento e chuva e busca de resultados de testes no túnel de vento, realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e em outros centros de pesquisa;
- c) obtenção dos coeficientes de arrasto em cabos de pontes estaiadas;
- d) análise final e conclusões sobre os resultados obtidos.

O diagrama da figura 1 demonstra como as etapas se relacionam entre si.

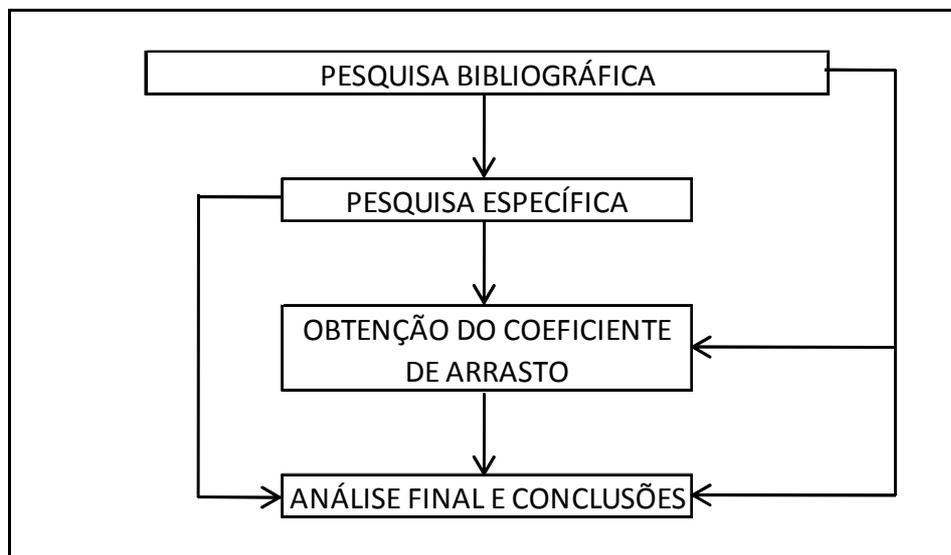


Figura 1: diagrama das etapas de trabalho

3 SOBRE O VENTO

3.1 CARACTERÍSTICAS DO VENTO

Antes de estudar o efeito do vento sobre os cabos de pontes estaiadas, é preciso conhecer um pouco as características do vento natural. Uma característica importante dos fluidos é a compressibilidade, mas líquidos e gases apresentam comportamentos bem distintos quanto a essa característica. Enquanto sobre a ação de uma sobrepressão os líquidos apresentam variação muito pequena de volume, os gases se caracterizam pelas notáveis alterações de volume. Blessmann (1990, p. 24) demonstra que, para as velocidades dos ventos naturais e pressões do ar na proximidade do solo, o volume do ar varia muito pouco, podendo ser considerado incompressível.

Outra característica importante no escoamento de fluidos é a viscosidade, que é a propriedade que controla sua velocidade de deformação. Quando, na presença de um gradiente de velocidades, surgem tensões tangenciais no fluido e, enquanto houver esforço externo no fluido, a deformação continua. Este comportamento é diferente daquele que acontece nos sólidos, nos quais, uma vez alcançado o equilíbrio entre esforços internos e externos, cessa a deformação. Essa tensão tangencial, que é função do gradiente de velocidade do fluido, é proporcional a viscosidade, que é uma propriedade inerente ao fluido. Essa relação simples entre o gradiente de velocidade e a viscosidade é válida para fluidos em escoamento laminar, para escoamento turbulento a relação é mais complexa (PERRONE, 2008).

Apesar de ser a característica que é responsável pelo comportamento do fluido, segundo Blessmann (1990, p. 29), os efeitos da viscosidade podem ser desprezados frente a outro efeito, a turbulência. Em escoamentos turbulentos, as partículas de fluido se deslocam de forma desordenada e caótica. Com grandes gradientes de velocidade, ocorrerá a formação de redemoinhos intensos, que perambulam pelo fluido. As camadas do fluido, que no escoamento laminar trocavam moléculas individuais entre si, agora no escoamento turbulento trocam grupos inteiros de moléculas, e a viscosidade ficará muito aumentada por conta dessas trocas.

Conforme Blessmann (1990, p. 31), com a turbulência, parte da energia do escoamento é retirada do movimento principal, manifestando-se sobre a forma de redemoinhos e distúrbios locais de velocidade. Os gradientes de velocidade então resultantes fazem com que apareçam os efeitos da viscosidade, que tendem a diminuir a intensidade destes distúrbios. A energia retirada do escoamento aparece em forma de calor, sendo muito maior o aumento de entropia no regime turbulento do que no laminar.

No caso do vento natural, Blessmann (1990, p. 31) indica que as principais origens da turbulência são os movimentos circulatorios da atmosfera, causados por transformações termodinâmicas e pela força de Coriolis, e a rugosidade superficial, constituída tanto por obstáculos naturais, como rochas, árvores e morros, como criados pelo homem, como plantações e edificações. Os turbilhões gerados por rugosidade superficial originam as rajadas de vento, que ocorrem de forma aleatória, tanto em frequência como intensidades. Rajadas mais velozes têm uma duração pequena, da ordem da fração de segundo, e atuam sobre pequenas regiões. Devido a essa forma aleatória do escoamento do vento, por muito tempo o estudo da turbulência foi inteiramente empírico, o que se deve ao fato da dificuldade de se tratar matematicamente um fenômeno tão complexo e aleatório. Foi então que von Kármán iniciou um estudo estatístico da turbulência.

A abordagem estatística da turbulência pode ser descrita por parâmetros como a média, a variância, o desvio padrão e a autocorrelação, que, se analisados com um grande número de amostras, podem apresentar certa regularidade. Segundo Blessmann (1990, p. 33), a variância e o desvio padrão constituem medidas da dispersão das flutuações em torno da média e estão ligados à energia cinética contida nas flutuações da velocidade. A função de autocorrelação descreve a dependência geral entre o valor do fenômeno em um instante e em outro logo após o primeiro.

Outras propriedades estatísticas da turbulência interessantes apontadas por Blessmann (1990, p. 37) são:

- a) a intensidade da turbulência, que é definida pelo quociente entre o desvio padrão das flutuações e uma velocidade de referência e é uma medida adimensional da energia cinética contida nas componentes das flutuações da velocidade;
- b) a correlação cruzada, que mede a relação existente entre as flutuações em dois pontos distintos, o que permite determinar as dimensões médias dos maiores redemoinhos, através do conceito de escala espacial da turbulência;

- c) o espectro de potência, que indica a distribuição, em frequência, da energia cinética contida em uma componente das flutuações;
- d) a distribuição de probabilidade, que fornece indicações sobre como se distribuem as velocidades das flutuações.

3.2 AÇÃO DO VENTO

Serão vistos a seguir alguns conceitos básicos importantes para compreensão do assunto estudado, como por exemplo, os coeficientes de pressão e de forma e o número de Reynolds.

3.2.1 Coeficientes de pressão

Os coeficientes de pressão, c_p , são parâmetros adimensionais obtidos pela razão entre a variação de pressão efetiva, Δp , pela pressão dinâmica do vento, q , como na equação 1 (BLESSMANN, 1990, p. 50):

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

Segundo Machado (2008), estes coeficientes variam com a inclinação do cabo, ângulo de ataque, velocidade do vento, regime de escoamento e forma da seção transversal do cabo. A variação da seção transversal dos cabos de pontes estaiadas pode ocorrer devido à formação dos filetes d'água.

3.2.2 Coeficientes de forma

Os coeficientes de forma são obtidos pela razão entre a força resultante normal sobre a superfície plana em estudo, F , pela pressão dinâmica do vento, q , e por uma área de referência (equação 2) (BLESSMANN, 1990, p. 50):

$$C = \frac{F}{qA} \quad (\text{equação 2})$$

3.2.3 Número de Reynolds

O número de Reynolds, R_e , fornece uma indicação da relação entre as forças de inércia e de viscosidade. (equação 3):

$$R_e = \frac{VD}{\mu} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

V = a velocidade média do vento na seção do cabo;

D = o diâmetro do cabo;

μ = o coeficiente de viscosidade do ar.

Números de Reynolds muito baixos indicam que as forças de viscosidade são extremamente grandes em presença das forças de inércia, podendo-se desprezar estas últimas. Por outro lado, números de Reynolds muito altos não indicam que as forças de viscosidade possam ser desprezadas, como será visto adiante (BLESSMANN, 1990, p. 69).

3.3 SIMULAÇÃO DO VENTO NATURAL

Os ensaios de estruturas em túnel de vento servem como ferramenta para a obtenção de resultados muito próximos da realidade, já que são reproduzidas em escala as estruturas estudadas. Os primeiros túneis de vento, segundo Blessmann (1990, p. 110) foram construídos no final do século XIX com a principal finalidade de estudo de modelos de construção e de sólidos geometricamente simples. Porém, com o crescimento da aviação, o desenvolvimento

dos túneis de vento foi feito de maneira a atender as necessidades deste meio de transporte. A Engenharia Aeronáutica está interessada no estudo de aviões em atmosfera calma, sem turbulência. Essa situação não corresponde às condições normais a que estão submetidas as estruturas construídas pela Engenharia Civil, que ocorrem principalmente em escoamento turbulento, devido a grande rugosidade superficial existente nas proximidades destas. Até pouco tempo, os modelos da construção civil eram ensaiados nestes túneis, entretanto, em alguns casos, os resultados obtidos através destes ensaios se afastavam bastante dos reais.

Davenport e Surry (1974 apud BLESSMANN, 1990, p. 111) afirmam que:

Os túneis de vento disponíveis e as técnicas de ensaio lamentavelmente foram os desenvolvidos para fins aerodinâmicos. Nestes é importante notar que quase sem exceção o fluxo de ar era tão suave quanto possível; nisto ele diferia do vento natural, que não é apenas turbulento e em rajadas, mas também contém importantes variações de velocidade com a altura.

O túnel de vento de camada limite Prof. Joaquim Blessmann, localizado no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que está em operação desde 1977, procura representar este escoamento turbulento, para melhor representar o vento natural. O estudo detalhado de como se obtém este vento natural não faz parte deste trabalho, portanto serão somente citados alguns métodos, segundo Perrone (2008):

- a) a cobertura do piso do túnel com material de rugosidade adequada, simulando o principal mecanismo de formação da camada limite atmosférica, que é a rugosidade do terreno;
- b) colocação de obstáculos a barlavento do modelo, como grelhas de barras horizontais, telas de malha variável e barras circulares, com o objetivo de introduzir turbulência no escoamento e de controlar o perfil de velocidades.

Na figura 2 pode ser visto a configuração do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann.

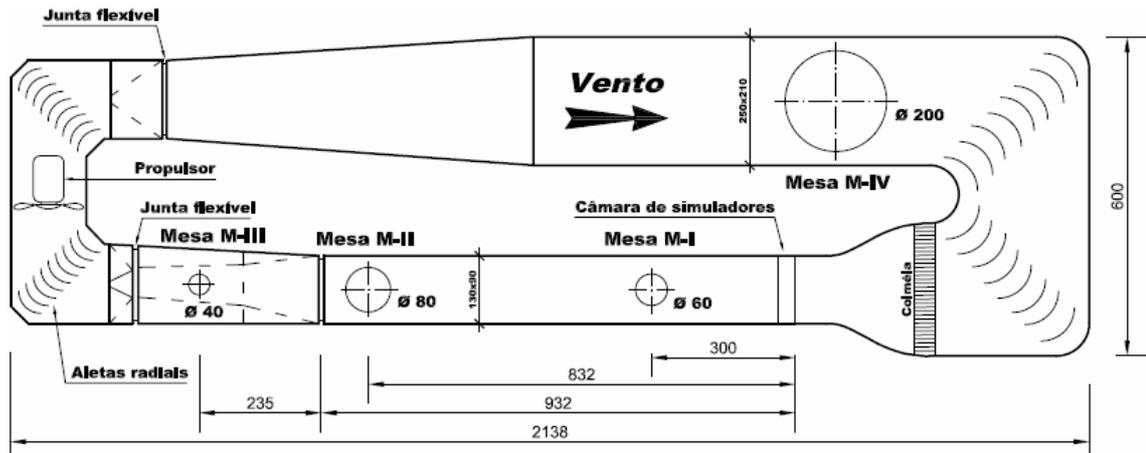


Figura 2: configuração do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2009)

4 AÇÃO DO VENTO EM SÓLIDOS

Este capítulo trata sobre a separação do vento em sólidos, sobre a resistência de forma em diversos corpos, como por exemplo, os corpos aerodinâmicos e os corpos rombudos angulosos e arredondados. Trata também sobre a aerodinâmica de cilindros e como varia a posição do descolamento do vento com a variação do número de Reynolds.

4.1 SEPARAÇÃO

Separação do escoamento em sólidos é o fenômeno que ocorre quando o vento se descola da superfície do sólido. Isto altera a distribuição de pressões, ocasionando a formação de vórtices. Blessmann (1990, p. 85) afirma que a separação é causada pela ação combinada das pequenas velocidades existentes na camada limite, próximo à superfície, e de um gradiente adverso de pressão. Estas duas condições são essenciais para a separação e, se não houver gradiente adverso de pressão, não ocorrerá separação. Formam-se em geral grandes e lentos redemoinhos depois do ponto de separação, nos quais ocorre uma grande degradação de energia em calor. Estes redemoinhos dão origem a uma grande turbulência no fluido a sotavento do objeto, diminuindo ainda mais a energia da corrente. Normalmente, a separação ocorrerá em zonas de alta velocidade, onde a pressão é reduzida, e com isso, a pressão estática estará abaixo da existente, o que ocasionará sucções.

Quando o objeto apresenta arestas vivas, pode-se determinar facilmente a posição do descolamento do vento, pois este ocorrerá em uma destas arestas. Porém, para o caso de contornos suaves, a posição sofre notavelmente a influência da camada limite em que aparece: laminar ou turbulenta. Segundo Blessmann (1990, p. 86), em um cilindro circular, o ponto de separação encontra-se a cerca de 80° do ponto de estagnação, quando ocorre em camada limite laminar. Se ocorrer em turbulenta, este ponto recua, podendo chegar a 130° ou mais. Neste caso, a zona ocupada pelos redemoinhos é muito menor.

A sotavento do ponto de separação, junto à superfície do sólido, o escoamento tem sentido inverso e caracteriza-se pela formação de turbilhões que se enrolam e geralmente se desprendem, sendo arrastados na direção da corrente e substituídos por outros que se formam da mesma maneira junto ao contorno. Quanto maior o número de Reynolds, mais rapidamente

se formam e com maior velocidade giram estes turbilhões. A linha de separação delimita duas zonas distintas: uma de escoamento normal e outra turbilhonar. Os turbilhões formados ao longo da linha de separação transmitem seus movimentos ao fluido de ambos os lados, em virtude da viscosidade. Do lado do escoamento normal, este movimento, compondo-se com o movimento geral, pouca alteração lhe causa, a não ser uma leve perturbação na trajetória das partículas. Já do outro lado, como o fluido tem movimento menos rápido, a influência é maior, formando-se turbilhões característicos dessa zona: é a chamada **esteira**. Em geral, a separação se dá em zonas de baixa pressão (pouco após o ponto de maior estrangulamento das linhas de corrente, isto é, máxima velocidade e mínima pressão) e, portanto, a pressão na esteira será também baixa. Em outras palavras, na esteira tem-se sucção, na maioria dos casos (BLESSMANN, 1990, p. 88). Quando o número de Reynolds atinge certo valor, os turbilhões destacam-se alternadamente de ambos os lados do corpo. Em alguns casos, este desprendimento é aleatório; em outros casos, destacam-se alternada e ordenadamente, constituindo duas filas de turbilhões: são os **vórtices de Kármán** (figura 3) (BLESSMANN, 1990, p. 89).

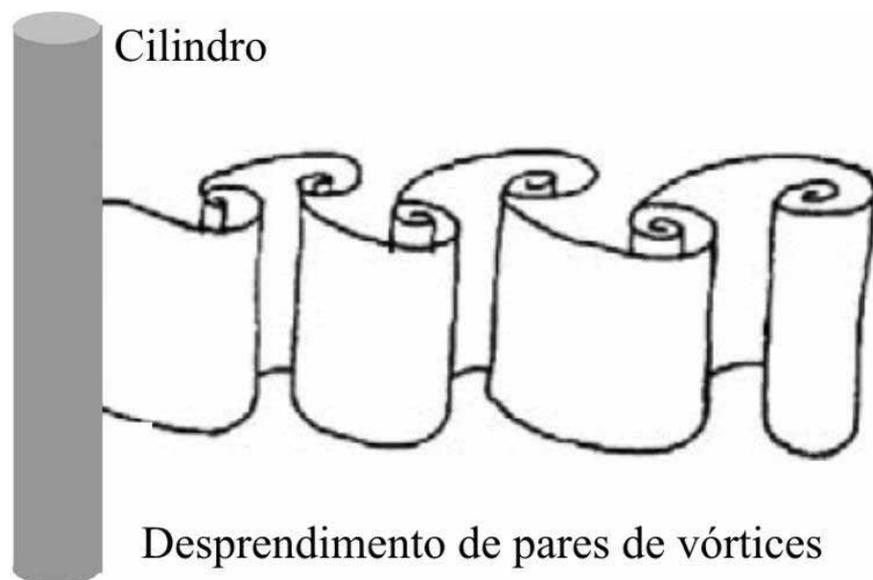


Figura 3: vórtices de Kármán (MACHADO, 2008)

4.2 RESISTÊNCIA DE FORMA

Segundo Blessmann (1990, p. 97):

Euler e D'Alembert provaram que um sólido imerso em uma corrente de fluido ideal não oferece resistência alguma à passagem da mesma. De fato, se o fluido não tem viscosidade, não teremos resistência de atrito. O estudo teórico mostra que no caso ideal o escoamento é potencial (irrotacional) e que as pressões sobre o corpo se desequilibram, não havendo nenhuma força resultante que se oponha ao movimento.

A esteira que aparece nos fluidos reais faz com que na zona de escoamento descolado as pressões adquiram valores mais baixos que os teóricos, geralmente sucções. Também a zona a barlavento da separação é afetada, porém em escala muito menor. As pressões não mais se equilibram e sua resultante é denominada **resistência de forma**.

A resistência (ou força) de forma é função das características da esteira, que causa o desequilíbrio de pressões. Sob esse ponto de vista, é interessante a seguinte classificação dos corpos: corpos **afilados** ou **aerodinâmicos**; corpos rombudos **arredondados**; e corpos rombudos **angulosos** (BLESSMANN, 1990, p. 97).

4.2.1 Corpos afilados ou aerodinâmicos

Nos corpos aerodinâmicos, os gradientes de pressão são suaves: o escoamento se dá sem separação, nas condições normais de uso. A esteira, que pode ser laminar ou turbulenta, é muito estreita, sendo um prolongamento da camada limite e o local onde esta descarrega sua vorticidade. Sua espessura é da ordem de grandeza do corpo. A distribuição de pressões na superfície do corpo é praticamente a do escoamento teórico, não viscoso. Em outras palavras, a resistência de forma é muito pequena. A resistência é causada diretamente pelo atrito na camada limite e depende do número de Reynolds, do turbilhonamento da corrente e da rugosidade da superfície. A resistência de forma é muito pequena, da mesma ordem de grandeza da resistência de atrito. A figura 4 mostra como ocorre a separação nos corpos aerodinâmicos (BLESSMANN, 1990, p. 98).

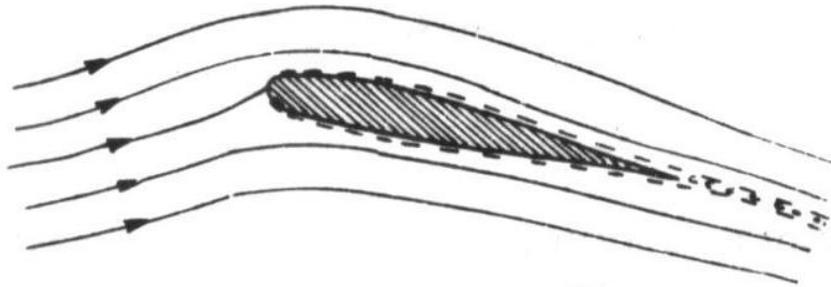


Figura 4: corpos afilados ou aerodinâmicos (BLESSMANN, 1990)

4.2.2 Corpos rombudos angulosos

Nos corpos rombudos angulosos, o deslocamento dá-se em pontos definidos, invariáveis: em arestas. O número de Reynolds influi muito pouco ou nada, a não ser para valores muito pequenos de Re , pois então a viscosidade é um fator importante (para o estudo do vento este caso não aparece, pois para que a viscosidade seja importante precisar-se-ia, por exemplo, de um pequeno modelo de menos de 1 cm de altura colocado em vento forte). A figura 5 mostra como ocorre a separação nos corpos rombudos angulosos (BLESSMANN, 1990, p. 98).

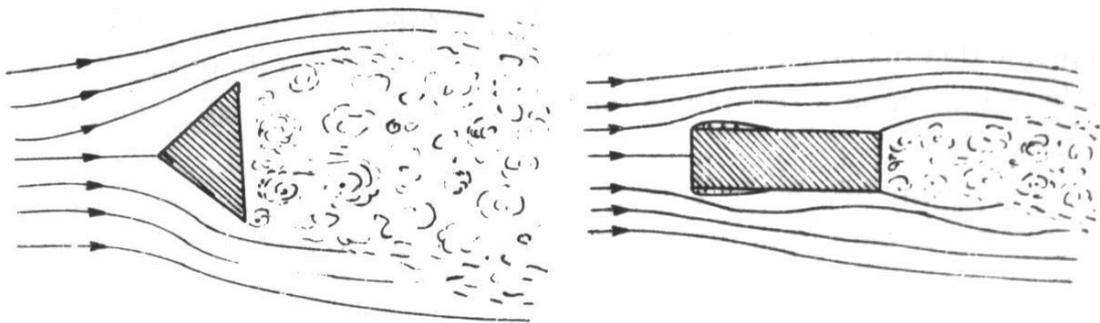


Figura 5: corpos rombudos angulosos (BLESSMANN, 1990)

4.2.3 Corpos rombudos arredondados

Nos corpos rombudos arredondados, o deslocamento pode variar dentro de certos limites relativamente amplos, dependendo das condições do escoamento (velocidade, turbulência, viscosidade cinemática), das características da camada limite, do acabamento da superfície do corpo e do terreno (para corpos sobre ou próximos ao terreno), das dimensões, forma e orientação do corpo no escoamento. Isto é, depende de Re , da estrutura do escoamento e do

acabamento superficial. Variando a localização do deslocamento varia a esteira e, conseqüentemente, a distribuição de pressões e a resistência de forma. Os cabos estão incluídos nesta categoria. A figura 6 mostra como ocorre a separação nos corpos rombudos arredondados (BLESSMANN, 1990, p. 99).

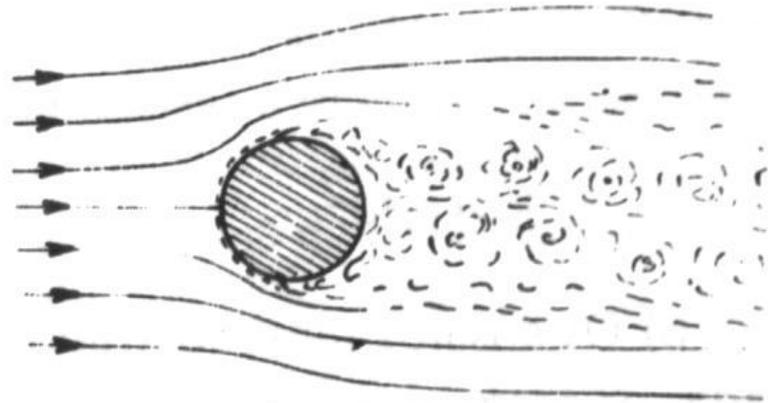


Figura 6: corpos rombudos arredondados (BLESSMANN, 1990)

4.3 AERODINÂMICA DE CILINDROS

As características aerodinâmicas de cabos podem ser estudadas analogamente à aerodinâmica de cilindros circulares. A figura 7 mostra as características do escoamento em torno de um cilindro circular, na qual se pode observar o ponto de estagnação, os pontos de separação, a camada limite e a esteira (MACHADO, 2008).

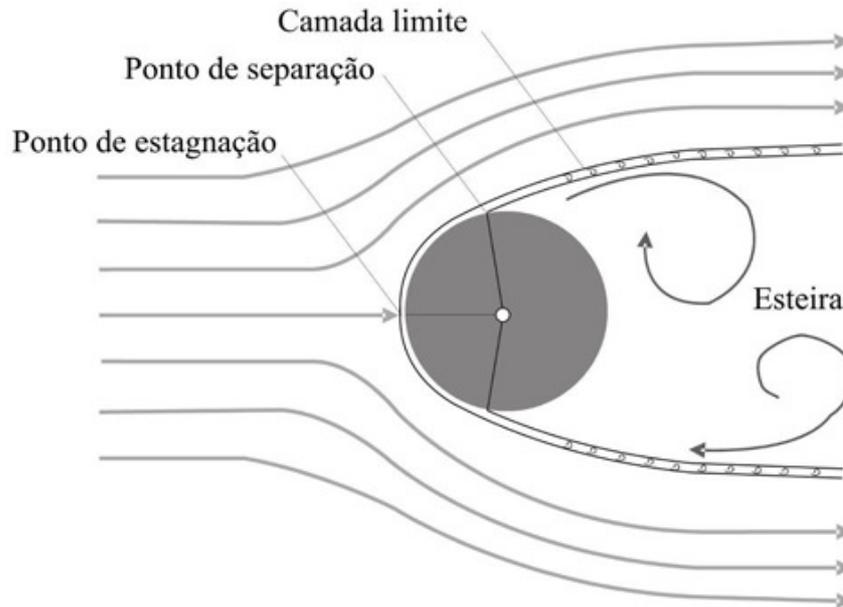


Figura 7: características do escoamento em torno de um cilindro circular (MACHADO, 2008)

A forma do escoamento em torno de cilindros circulares não é constante, variando em intervalos de número de Reynolds. Esta variação não se faz em intervalos bem definidos, e sim em zonas de transição as quais podem ter seus limites alterados dependendo de condições particulares de cada caso. Para números de Reynolds inferiores a 1, a forma do campo aerodinâmico deve-se quase que exclusivamente a viscosidade do fluido, possuindo linhas de corrente bem definidas e com escoamento laminar (figura 8) (BLESSMANN, 1990, p. 147).

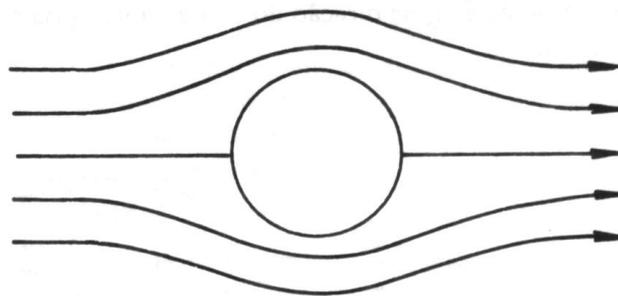


Figura 8: escoamento em cilindros: $Re < 1$ (BLESSMANN, 1990)

Para Reynolds entre a unidade e 5, a forma do campo deve-se principalmente ao atrito entre o fluido e o cilindro, e possui linhas de corrente muito parecidas com o caso anterior, porém com o aparecimento da camada limite, mas sem desprendimento do fluido (figura 9). Aumentando-se mais o Reynolds, aparece a separação do fluido, surgindo então a esteira e, com isso, as pressões a barlavento e sotavento tornam-se diferentes. Para Reynolds entre 5 e 40, forma-se dois grandes turbilhões simétricos, estacionários (figura 10). Inicialmente a separação do escoamento se dá com um ângulo maior que 90° , porém na situação final este se estabiliza com um ângulo inferior a 90° (BLESSMANN, 1990, p. 147).

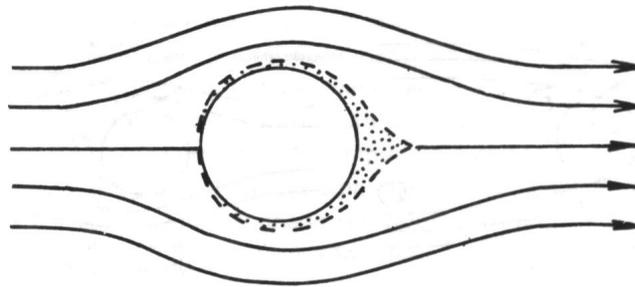


Figura 9: escoamento em cilindros: $1 < R_e < 5$ (BLESSMANN, 1990)

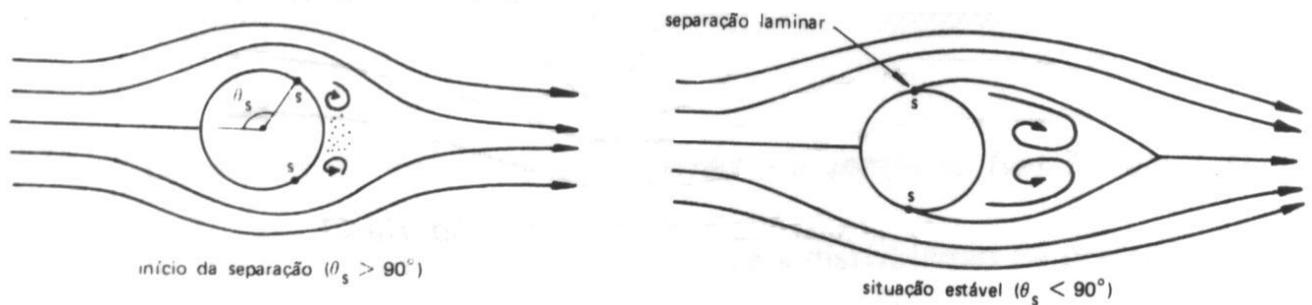


Figura 10: escoamento em cilindros: $5 < R_e < 40$ (BLESSMANN, 1990)

Com o número de Reynolds variando entre 40 e 10^5 , forma-se uma dupla fila de turbilhões alternados, os vórtices de Kármán e a esteira apresenta uma largura superior ao diâmetro do cilindro. O descolamento se dá em torno dos 80° . Esta região é denominada região **subcrítica** (figura 11) (BLESSMANN, 1990, p. 148).

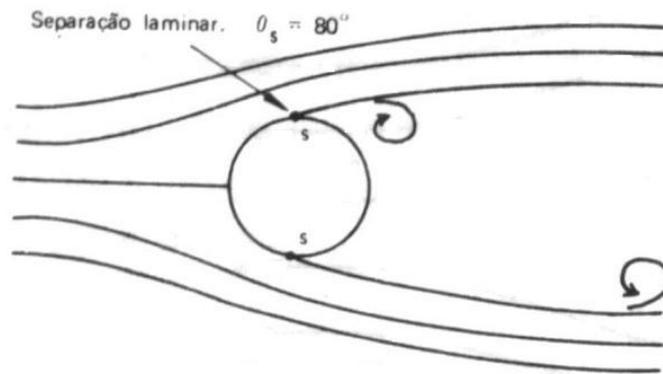


Figura 11: escoamento em cilindros: $40 < R_e < 10^5$ (BLESSMANN, 1990)

Para valores de Reynolds entre 10^5 e 5×10^5 , a esteira se torna mais estreita, com largura inferior à largura do cilindro, tem-se o surgimento de borbulhas no cilindro e cessam os vórtices de Kármán. A separação ocorre aproximadamente a 105° e esta região é chamada de região **crítica** (figura 12). Crescendo o número de Reynolds ressurgem os vórtices de Kármán, e o desprendimento, que antes acontecia com uma frequência bem definida, torna-se desorganizado (figura 13) (BLESSMANN, 1990, p. 148).

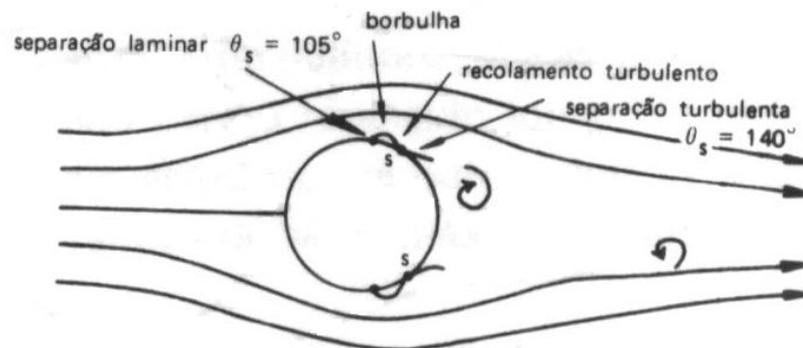


Figura 12: escoamento em cilindros: $10^5 < R_e < 5 \times 10^5$ (BLESSMANN, 1990)

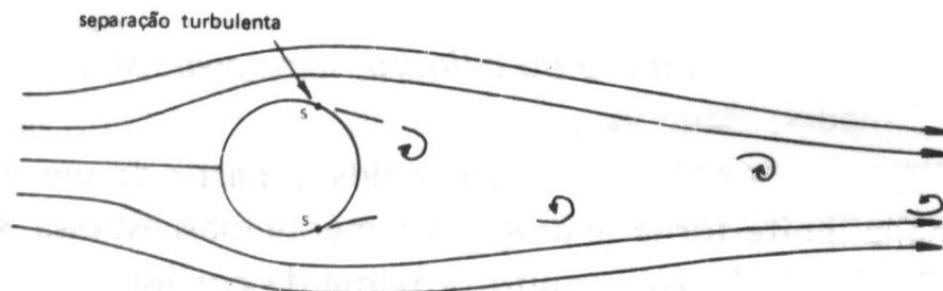


Figura 13: escoamento em cilindros: $R_e > 5 \times 10^5$ (BLESSMANN, 1990)

A figura 14 resume os fenômenos característicos citados anteriormente, definindo os limites aproximados dos regimes.

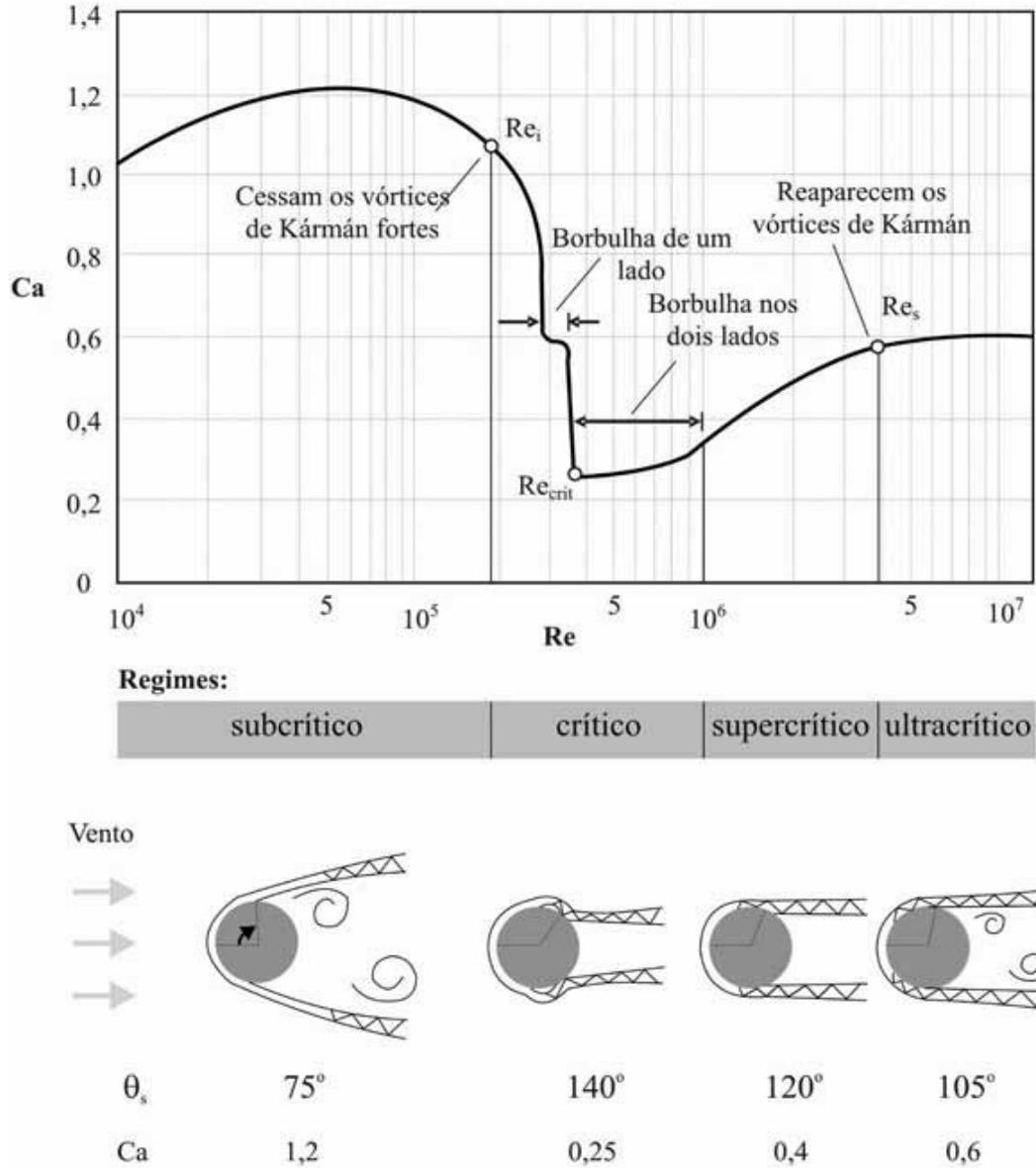


Figura 14: fenômenos característicos do escoamento em torno de cilindros lisos (MACHADO, 2008)

A figura 15 mostra a distribuição de pressões em cilindros longos lisos.

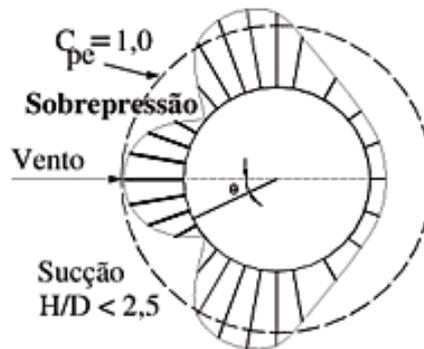


Figura 15: distribuição de pressão em cilindros (MACHADO, 2008)

A figura 16 mostra a variação do coeficiente de arrasto com o ângulo de incidência do vento, comparando dados obtidos em túneis de vento com dados obtidos teoricamente.

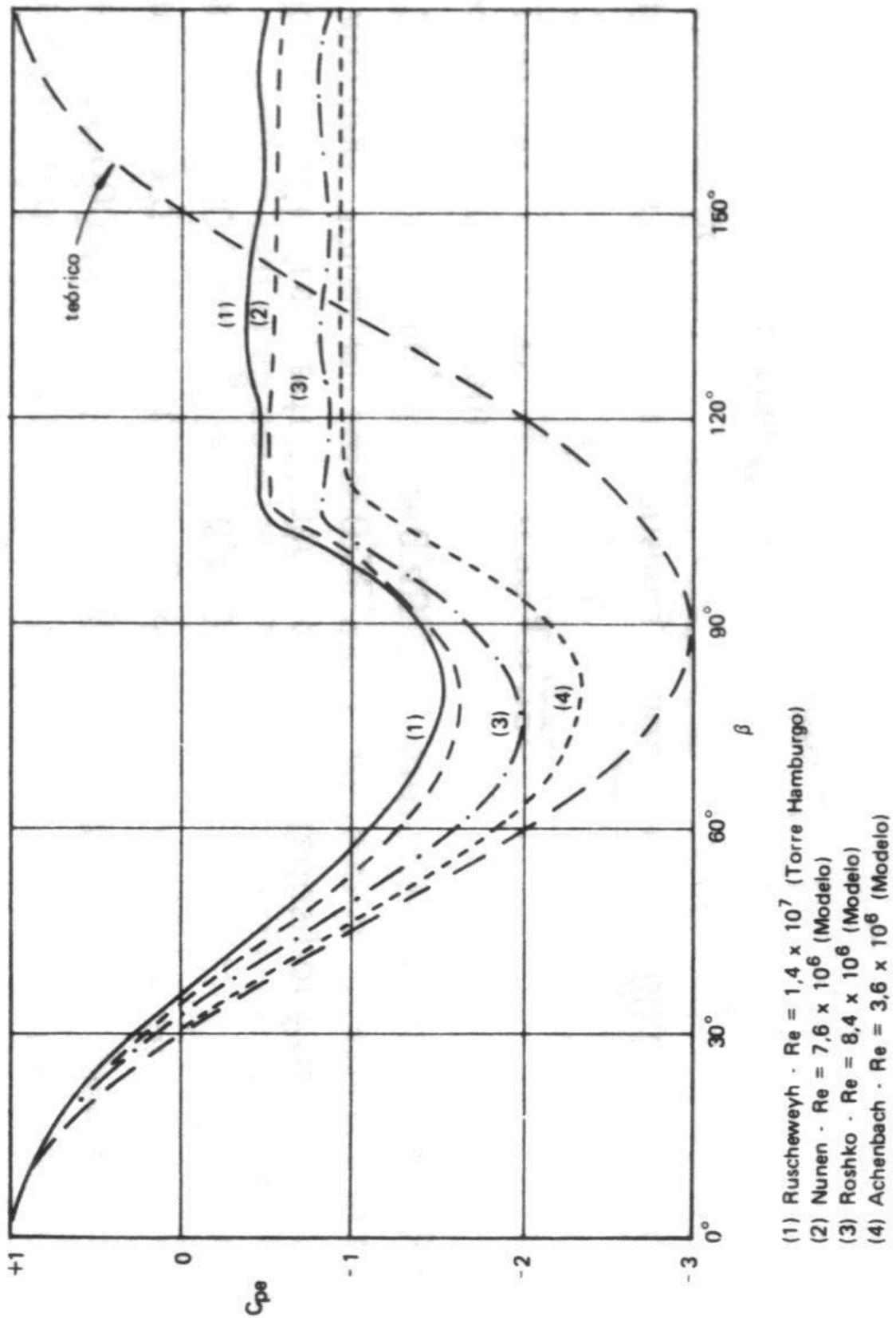


Figura 16: distribuição de pressões em cilindros longos lisos (BLESSMANN, 1990)

5 AÇÃO DO VENTO COMBINADA COM CHUVA EM CABOS

A ação combinada de vento e chuva atuando sobre cabos resulta em vibrações que são ocasionadas principalmente pelas constantes variações de pressão devido às alterações de seção transversal dos cabos. Machado (2008) afirma que:

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

Matsumoto et al. (1992 apud MACHADO, 2008) reuniram algumas amplitudes de cabos de pontes estaiadas onde foram observadas vibrações provenientes da ação do vento e da chuva simultaneamente. Estas amplitudes que podem ser vistas no quadro 1.

PONTE	AMPLITUDE [cm]
Brotonne	60
Koehlbrant	100
Faroe	200
Mikoh West	26
Aratsu	60
Tenpohzan	195

Quadro 1: amplitudes máximas devido à vibração em cabos de pontes estaiadas (MATSUMOTO et al., 1992 apud MACHADO, 2008)

5.1 FORMAÇÃO DOS FILETES D'ÁGUA

Quando ocorrem certas velocidades de vento, atuando simultaneamente com algumas intensidades específicas de chuva, têm-se a formação de filetes d'água, resultantes da precipitação da chuva sobre os cabos (figura 17).

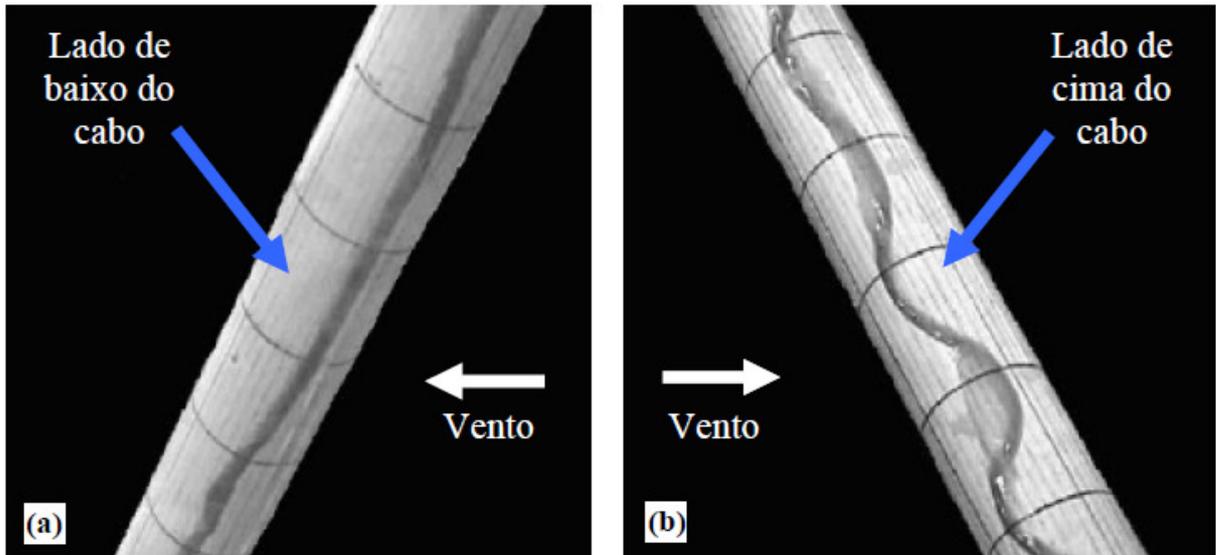


Figura 17: filetes d'água vistos no sentido longitudinal (a) filete inferior (a sotavento) e (b) filete superior (a barlavento) (WANG et al., 2005 apud MACHADO, 2008)

Normalmente ocorre a formação de ambos os filetes, o superior a barlavento e o inferior a sotavento. A posição dos filetes superior e inferior será definido por Θ_1 e Θ_2 , respectivamente (figura 18).

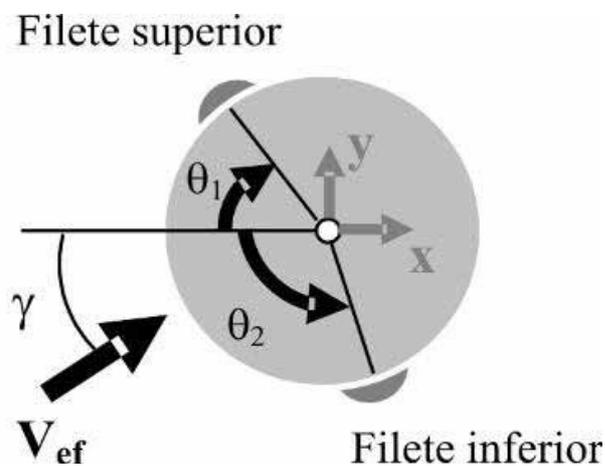


Figura 18: definição da posição dos filetes superior e inferior (MACHADO, 2008)

Hikami e Shiraishi (1988 apud MACHADO, 2008) realizaram ensaios de campo em um cabo inclinado com a presença de chuva e vento. A figura 19a ilustra o processo de formação do filete superior no cabo em três instantes, A, B e C. A figura 19b apresenta a resposta do cabo inclinado com as velocidades e amplitudes correspondentes a cada um dos instantes.

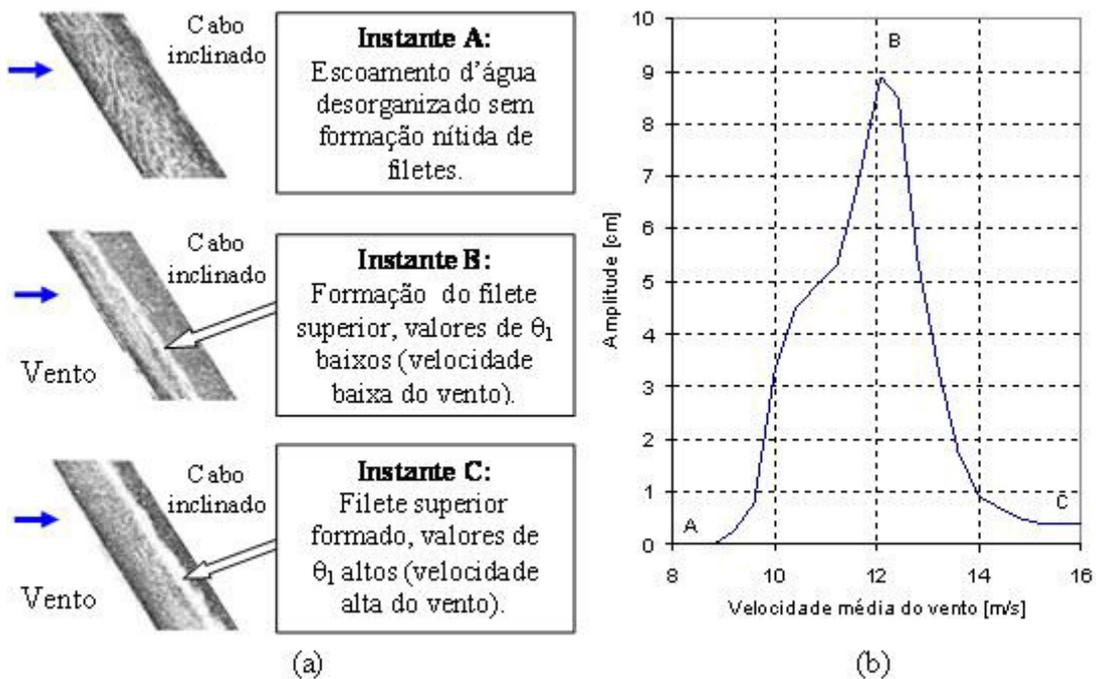


Figura 19: (a) formação do filete d'água em 3 instantes, A, B e C (b) amplitude encontrada em função da velocidade média do vento (HIKAMI; SHIRAIISHI, 1988 apud MACHADO, 2008)

Quando a velocidade é mais baixa que a velocidade de disparo (instante A, na figura 19a e $V \cong 9\text{m/s}$ na figura 19b) as gotas d'água que caem sobre a superfície do cabo apresentam-se desorganizadas em torno do cabo sem formação perceptível do filete superior. No instante A, as gotas d'água podem deslocar-se para a face inferior do cabo dando início à formação do filete inferior. Para velocidades maiores que a velocidade de disparo, a força de arrasto agindo sobre o filete supera as forças de gravidade e atrito, deslocando-o desta forma para a parte mais alta da superfície, constituindo o filete superior. O filete continua deslocando-se para cima à medida que a velocidade do vento aumenta (instante B, na figura 19a e $V \cong 12\text{m/s}$ na figura 19b). À velocidade correspondente ao instante C, as vibrações cessam ($V \cong 16\text{m/s}$ na figura 19b) (HIKAMI; SHIRAIISHI, 1988 apud MACHADO, 2008). Phelan et al. (2006 apud MACHADO, 2008) menciona que a posição dos filetes depende do equilíbrio da força da gravidade, pressão do vento, e força de tensão entre superfície e água agindo sobre os filetes.

5.2 VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DO FILETE

A posição do filete d'água varia conforme a velocidade e incidência do vento no cabo. Quanto maior a velocidade, dentro da faixa limite para a ocorrência dos filetes, mais a sotavento

estarão os filetes (figura 20). Já com o ângulo de incidência do vento, há uma variação da posição dos filetes conforme o ângulo deste com a horizontal. Quanto maior este ângulo, menor será o valor de θ_1 e maior o de θ_2 (figura 21).

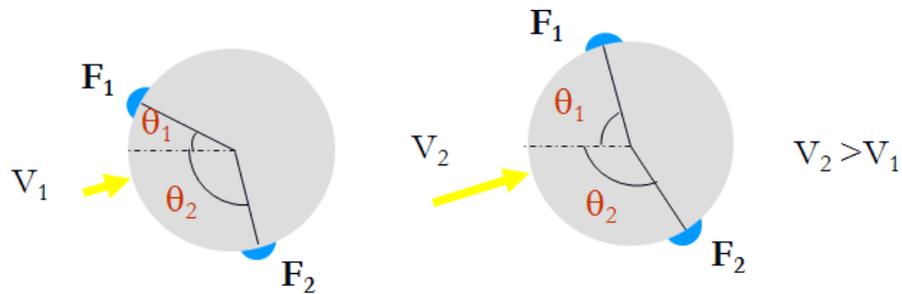


Figura 20: variação da posição dos filetes superior (F_1) e inferior (F_2) com a velocidade (MACHADO, 2008)

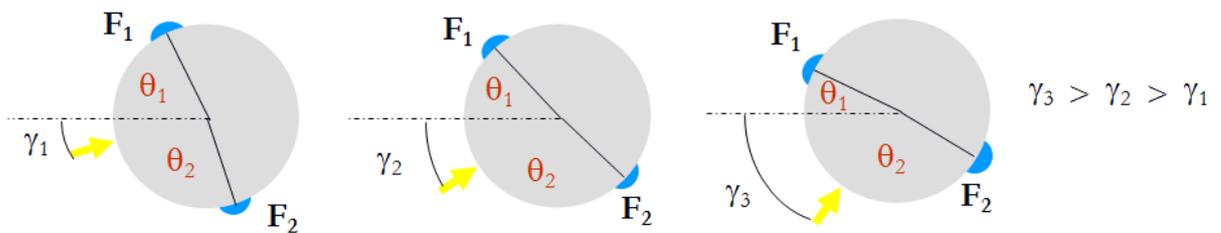


Figura 21: variação da posição dos filetes superior (F_1) e inferior (F_2) com o ângulo de incidência do vento (MACHADO, 2008)

Na figura 22 pode ser vista a variação da distribuição de pressões sobre o cabo alterando-se a posição dos filetes d'água.

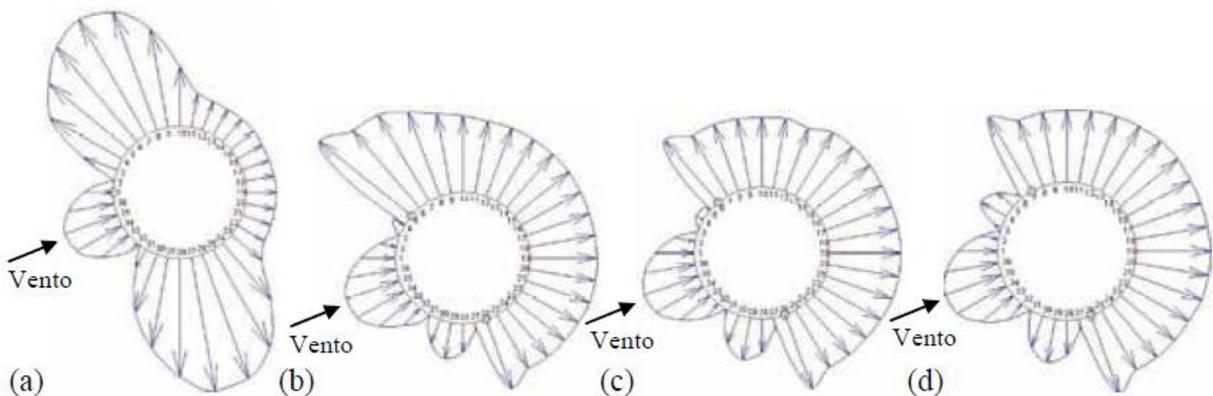


Figura 22: distribuição de pressões externas obtidos em escoamento uniforme e turbulento para $Re \approx 1,9 \times 10^5$ (a) sem filete, (b) filete superior à 40° , (c) filete superior à 50° e (d) filete superior à 60° (MACHADO, 2008)

5.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO VENTO NA POSIÇÃO DO FILETE

Machado (2008) afirma que um entendimento da influência da velocidade do vento nas vibrações é importante, pois como isso, pode-se determinar a que velocidade ocorre o início e termino das oscilações. Bosdogianni e Olivari (1996 apud MACHADO, 2008) mostraram através de ensaios seccionais em túnel de vento que o início e o final da formação dos filetes ocorrem para velocidades entre 7 m/s e 16 m/s, com os filetes tendo a se deslocarem para a parte mais alta do cabo, a sotavento (figura 23).

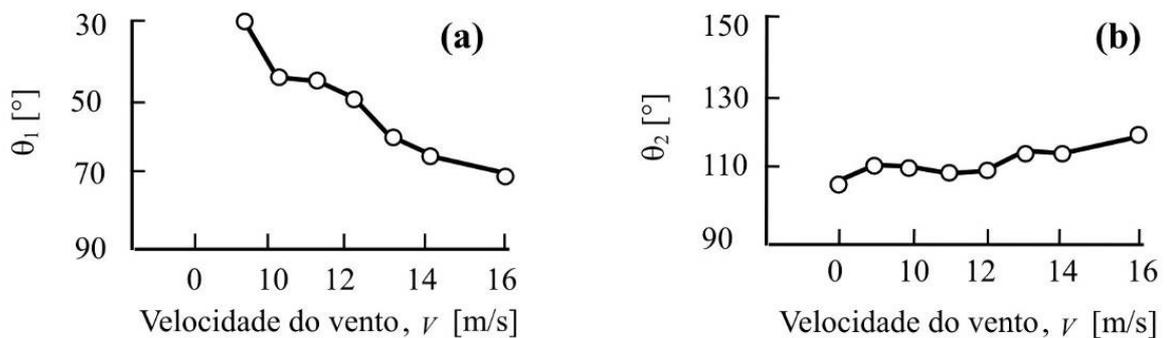


Figura 23: variação dos filetes superior (a) e inferior (b) com a velocidade do vento (HIKAMI; SHIRAISHI, 1988 apud MACHADO, 2008)

O quadro 2 mostra as faixas de velocidades onde ocorre a formação dos filetes encontradas por diversos autores obtidos em modelos e protótipos de cabos de pontes estaiadas.

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

Quadro 2: faixa de variação da velocidade para a formação de filetes d'água (MACHADO, 2008)

5.4 COEFICIENTE DE ARRASTO NA PRESENÇA DE VENTO E CHUVA

A figura 23 mostra a variação do coeficiente de arrasto com a posição do filete superior (Θ_1).

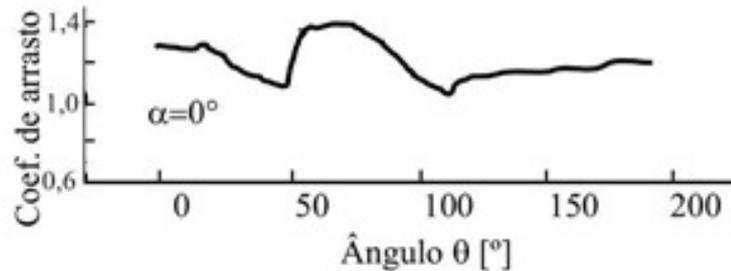


Figura 24: variação do coeficiente de arrasto com a posição do filete superior (GU et al., 2002 apud MACHADO, 2008)

Pode ser observado na figura 24 que para ângulos variando entre 0° e 50° aproximadamente, o coeficiente de arrasto decresce, quase que linearmente, de 1,3 até 1,1. Quando o ângulo ultrapassa os 50° , tem-se um rápido aumento do coeficiente de arrasto, chegando ao seu pico de 1,4 quando $\Theta_1 \cong 65^\circ$; o coeficiente de arrasto decresce novamente, quase que linearmente, até seu valor mínimo, de aproximadamente 1,0 quando a posição do filete superior é de 110° . O valor do coeficiente de arrasto aumenta novamente até chegar em 1,2 quando $\Theta_1 \cong 200^\circ$.

5.5 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO FILETE NA AMPLITUDE

Devido às variações do coeficiente de arrasto e, conseqüentemente, às mudanças de pressões no cabo ocasionadas pela presença de filetes d'água, o cabo começa a vibrar, e com isso têm-se deslocamentos máximos que variam com a posição dos filetes no cabo. Na figura 25, pode-se ver gráficos de amplitudes de deslocamentos adimensionalizadas pela velocidade média do vento, com várias posições diferentes de filetes no cabo em estudo feito por Bosdogianni e Olivari (1996 apud MACHADO, 2008).

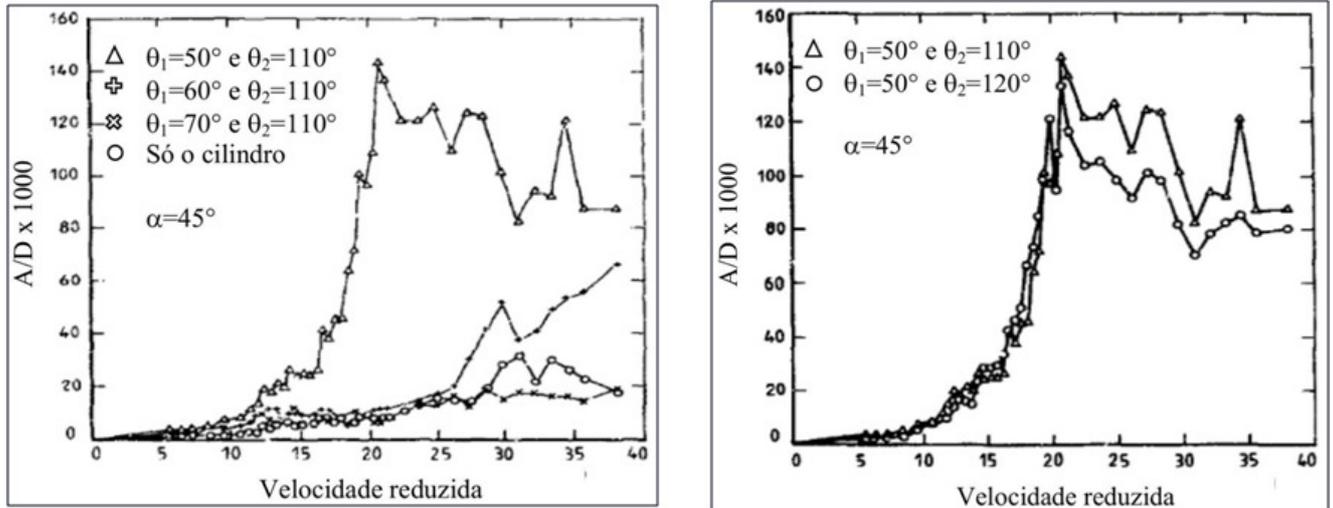


Figura 25: amplitude variando com o vento com algumas posições de filetes d'água (BOSDOGIANNI; OLIVARI, 1996 apud MACHADO, 2008)

Pode-se observar que, variando somente a posição do filete superior (primeiro gráfico), têm-se amplitudes consideravelmente maiores para $\Theta_1=50^\circ$ e do mesmo modo, alterando-se somente a posição do filete inferior (segundo gráfico) a maiores amplitudes, se encontram para $\Theta_2=110^\circ$, e com $\Theta_2=120^\circ$, as amplitudes já começam a baixar.

5.6 INFLUÊNCIA DO VENTO COM CHUVA NA AMPLITUDE

Em estudos realizados por Gu e Du (2005) foram obtidos resultados que permitem comparar o que acontece com a amplitude de deslocamentos de cabos na presença do vento sozinho e do vento com chuva. Resultados esses que podem ser observados na figura 26 a seguir.

Na figura 26 pode-se observar que a amplitude dos deslocamentos dos cabos, como é previsto, na presença de chuva é muito maior do que sem chuva. Enquanto que sem chuva a amplitude máxima foi de pouco mais de 6 cm com velocidade do vento de 11 m/s, na presença de chuva a amplitude máxima foi de aproximadamente 28 cm, ocorrendo em velocidades mais baixas de vento, 9 m/s, ou seja, mais frequentes.

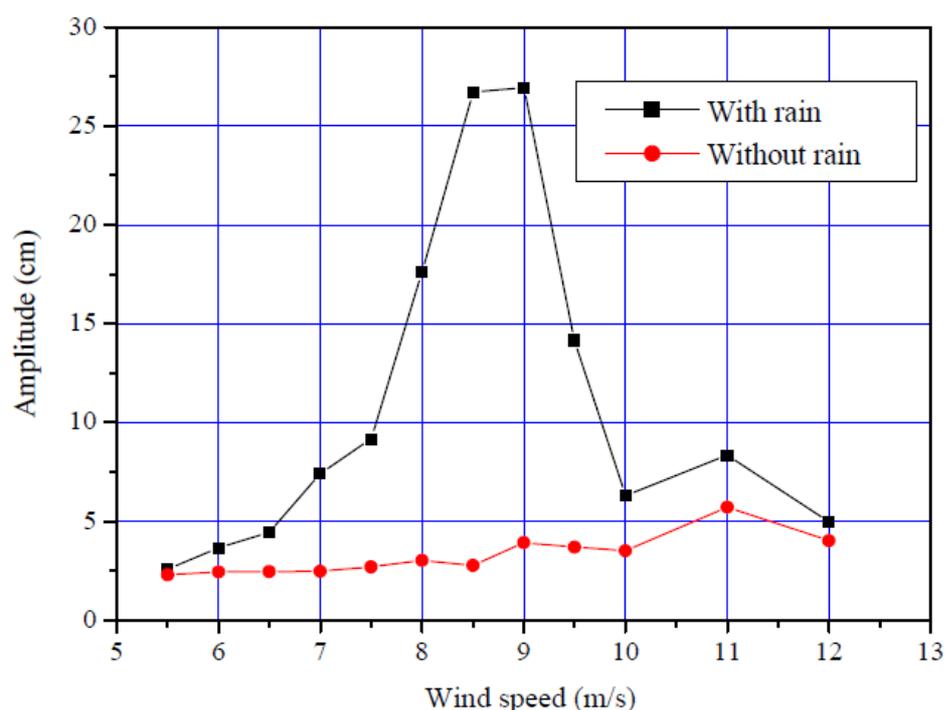


Figura 26: variação da amplitude com a velocidade média do vento com e sem a presença de chuva (GU; DU, 2005)

5.7 INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NATURAL NA AMPLITUDE

Outra característica importante que faz com que varie a amplitude de deslocamento dos cabos é a frequência natural dos cabos. Segundo Gu e Du (2005), com o aumento da frequência natural dos cabos a amplitude de vibrações se reduz drasticamente, sendo que a amplitude máxima para uma frequência de 1,7 Hz é de apenas 1/6 da amplitude encontrada com frequência natural de 1,0 Hz e, quando a frequência passa para 2,6 Hz, a vibração quase que se extingue. A figura 27 mostra a variação da amplitude com a velocidade do vento para diversas frequências naturais.

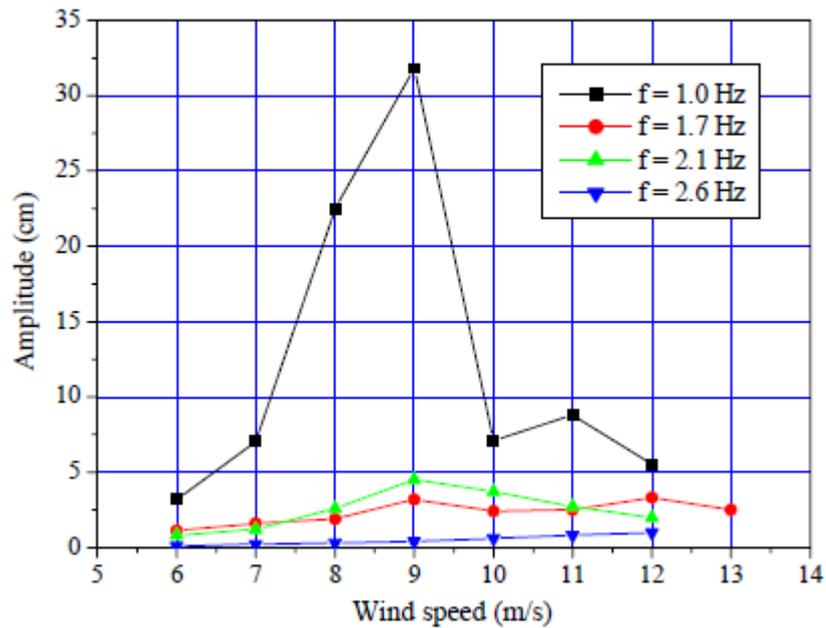


Figura 27: variação da amplitude com a velocidade do vento para diversos valores de frequência natural dos cabos (GU; DU, 2005)

Observando-se o gráfico da figura 27 conclui-se que, a frequência natural tem uma grande influência na amplitude de vibrações de cabos de pontes. Enquanto que para $f=1,0$ Hz encontra-se amplitudes de quase 33 cm, para frequências de 2,6 Hz a amplitude não chega a 3 cm.

5.8 INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DA CHUVA NA AMPLITUDE

A intensidade da chuva também tem um papel importante no valor da amplitude nos cabos e, ao contrário do que muitos pensam, uma intensidade mais elevada de chuva não causa amplitudes maiores, e sim o contrário. Para intensidades baixas de chuva têm-se amplitudes muito elevadas, e estas decrescem rapidamente com o aumento da intensidade da chuva, por exemplo, para uma chuva de $0,3$ L/min/m² encontra-se amplitudes superiores a 15 cm, e dobrando-se a intensidade da chuva, chegando a $0,6$ L/min/m², a amplitude reduz para quase 1/3 do valor. Após esse valor as amplitudes dos deslocamentos decrescem linearmente com o aumento da intensidade, como pode ser observado na figura 28.

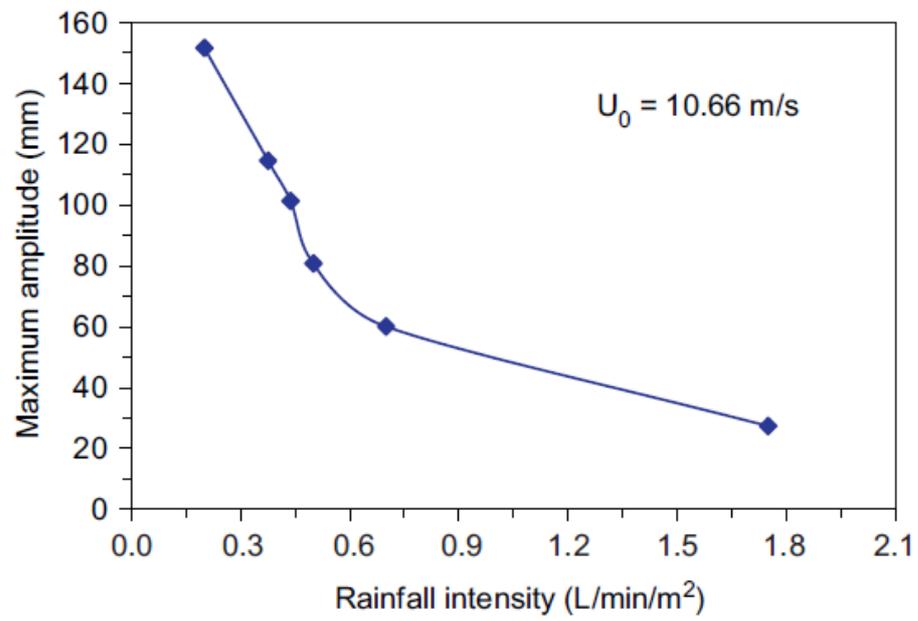


Figura 28: variação da amplitude com a intensidade da chuva, para velocidade média do vento de 10,66m/s (XU et al., 2008)

6 DISPOSITIVOS MITIGADORES

A vibração nos cabos devido ao vento atuando conjuntamente com a chuva, apesar de não causar o colapso da ponte, tem um efeito muito negativo sobre os amortecedores dos cabos, devido à fadiga, o que diminui em muito a vida útil deste. Existem muitos dispositivos no mercado que objetiva diminuir esta vibração, o que resulta em maior durabilidade dos amortecedores. Neste capítulo serão mostrados alguns tipos destes dispositivos.

6.1 PROTUBERÂNCIAS LONGITUDINAIS

O primeiro dispositivo que será visto são protuberâncias longitudinais para suprir os efeitos da chuva e do vento nos cabos. Machado (2008) afirma que este dispositivo reduz o escoamento axial em cabos inclinados e aparentemente, interrompe a formação dos filetes d'água em posições aerodinâmicas instáveis (figura 29). Segundo Virlogeux (1999, apud MACHADO, 2008) a primeira aplicação deste dispositivo foi na ponte Higachi Kobe, localizada no Japão, e teve sucesso na eliminação das vibrações induzidas por chuva e vento, no entanto, as protuberâncias aumentaram o coeficiente de arrasto de 1,35.

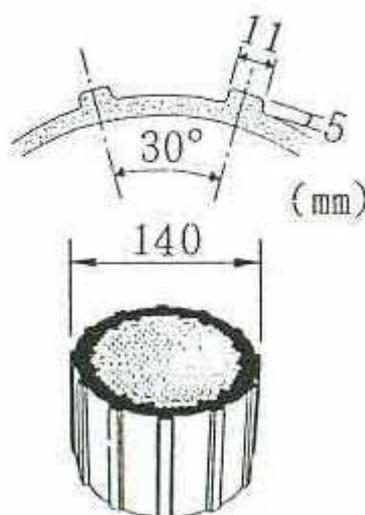


Figura 29: cabo com protuberâncias longitudinais
(MATSUMOTO et al., 1992 apud MACHADO, 2008)

6.2 FIOS ENTRELAÇADOS EM ESPIRAIS

Gu e Du (2005) realizaram testes em cabos com fios entrelaçados em espirais duplos de diâmetro 0,5, 1, 3 e 7 mm dispostos em sentido horário e anti-horário com passo de 15, 30 e 60cm. A figura 30 mostra os resultados dos ensaios para $\alpha = 30^\circ$ e $\beta = 35^\circ$, com fios de diâmetro 0,5 e 1 mm com passo de 30cm dispostos em sentido horário.

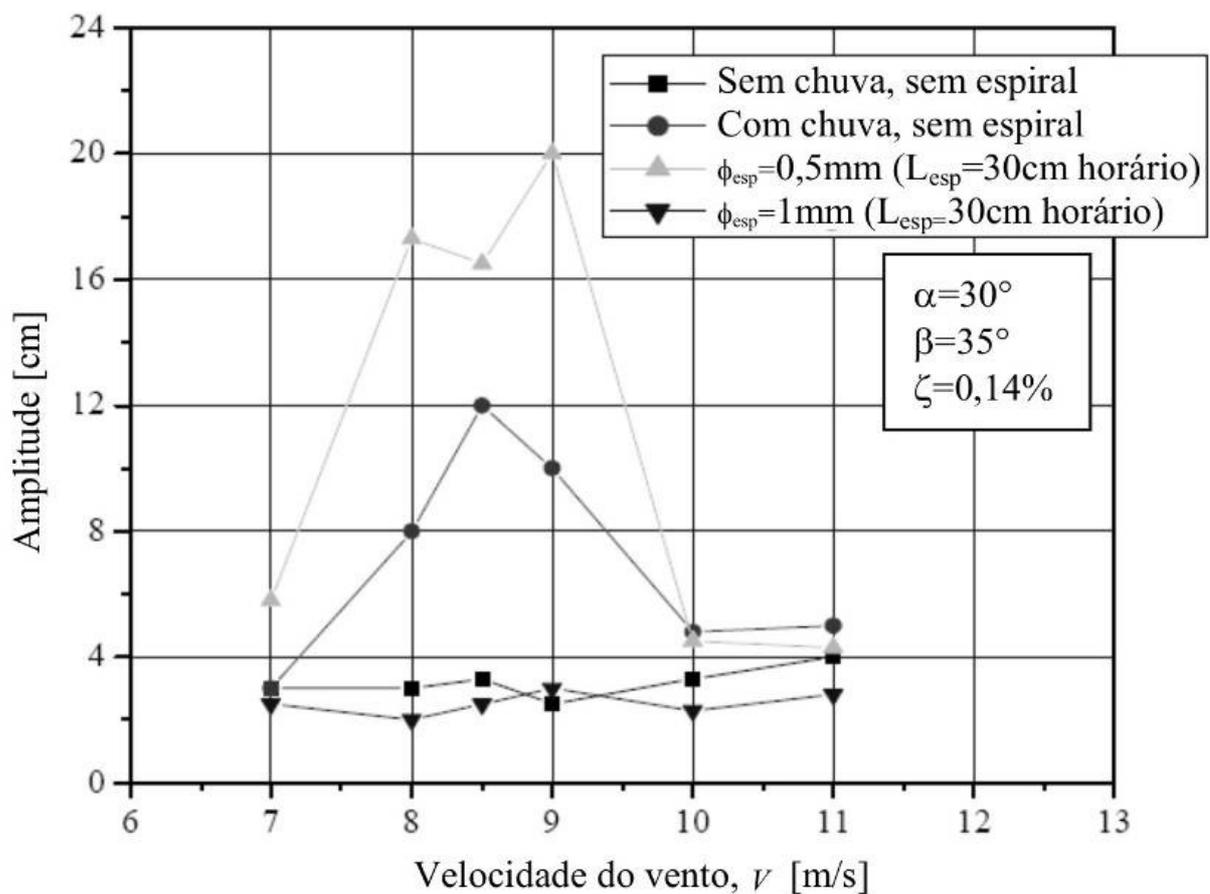


Figura 30: efeito do diâmetro dos fios na amplitude (GU; DU, 2005 apud MACHADO, 2008¹)

Conclui-se ao analisar a figura 30 que o diâmetro do fio tem grande influência na resposta que o dispositivo dará. Enquanto que para o fio de 1 mm de diâmetro o resultado foi parecido com a vibração do cabo sem chuva, para o fio de 0,5 mm de diâmetro o resultado foi muito pior do

¹ O trabalho de Gu e Du (2005) foi consultado diretamente mas essa figura está reproduzida como Machado (2008) apresenta em seu trabalho.

que o vento atuando junto com a chuva. Portanto a escolha do diâmetro do fio para as espirais é de suma importância, para que não aconteça do dispositivo piorar o efeito causado pela vibração ao invés de eliminá-lo ou diminuí-lo.

Gu e Du (2005) testaram também a influência da direção do entrelaçamento dos fios, horário ou anti-horário, na resposta da vibração para fios de diâmetro igual a 1 mm com passo de 15 e 30 cm (figura 31).

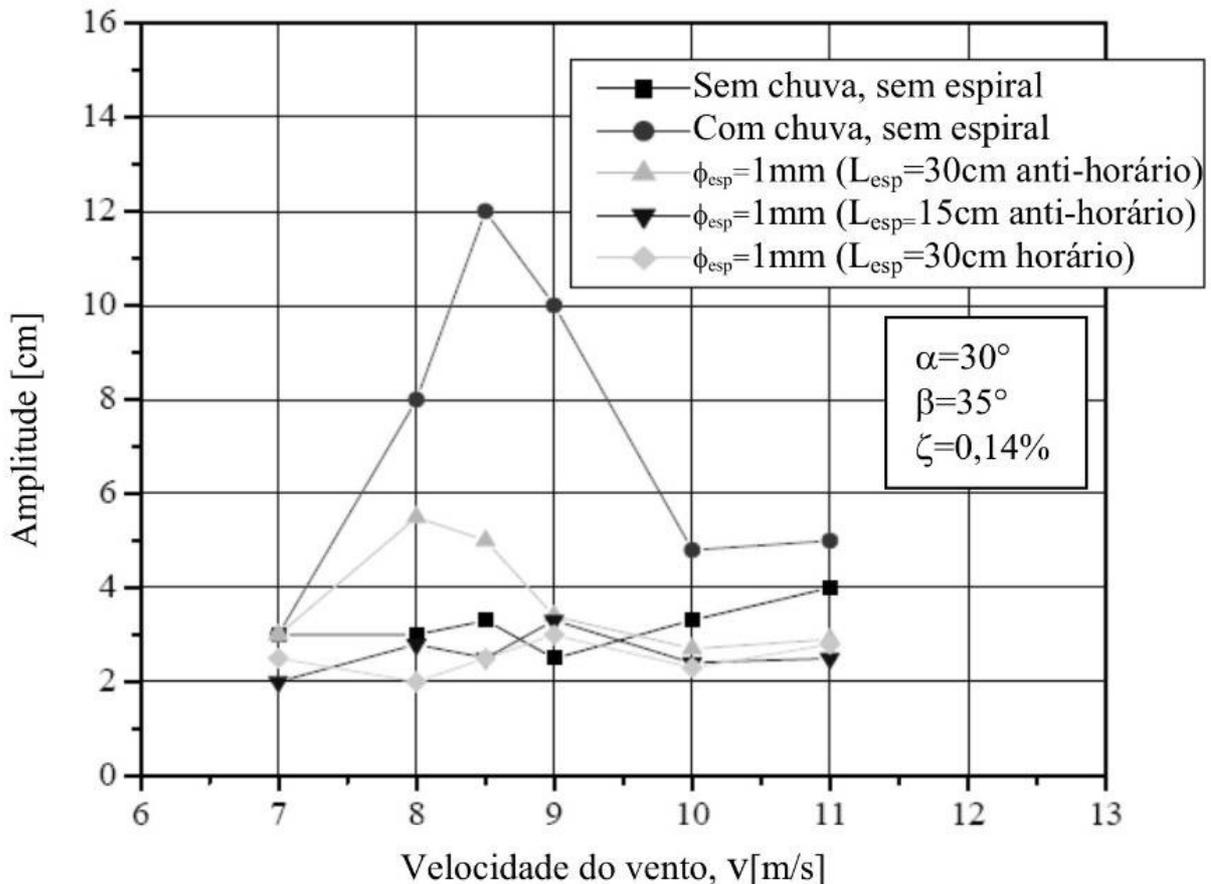


Figura 31: efeito do sentido das espirais na amplitude (GU; DU, 2005 apud MACHADO, 2008²)

Observa-se na figura 31 que todos os dispositivos testados foram bem sucedidos em reduzir os efeitos do vento com a chuva. Porém o fio de 1 mm amarrado em sentido horário com passo de 30 cm obteve uma eficiência maior do que os outros, mesmo que pequena.

² O trabalho de Gu e Du (2005) foi consultado diretamente mas essa figura está reproduzida como Machado (2008) apresenta em seu trabalho.

O efeito do passo também foi testado por Gu e Du (2005) utilizando um fio de 1 mm, entrelaçado em sentido horário com passos de 30 e 60 cm (figura 32). Observa-se que o efeito do dispositivo só apareceu quando o passo diminuiu para 30cm, o que indica que somente um passo apropriado pode evitar o surgimento de filetes d'água.

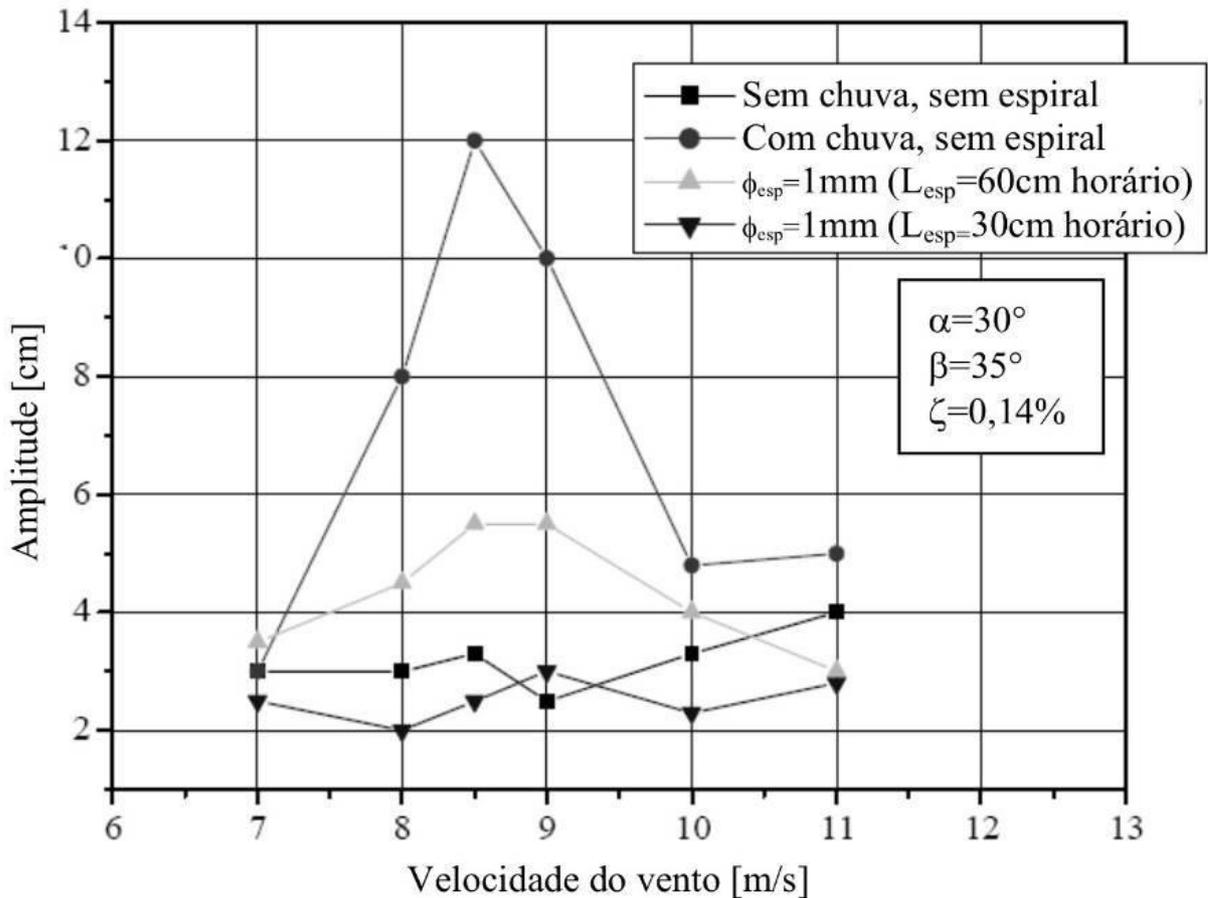


Figura 32: efeito do passo na mitigação da amplitude (GU; DU, 2005 apud MACHADO³)

6.3 MOSSAS SUPERFICIAIS

Para a ponte Tataru, engenheiros japoneses distribuíram mossas sobre a superfície do duto de proteção dos cabos. Desde a instalação do dispositivo, nenhuma vibração transversal foi observada. (figura 33) (VIRLOBEUX, 1999 apud MACHADO, 2008).

³ O trabalho de Gu e Du (2005) foi consultado diretamente mas essa figura está reproduzida como Machado (2008) apresenta em seu trabalho.

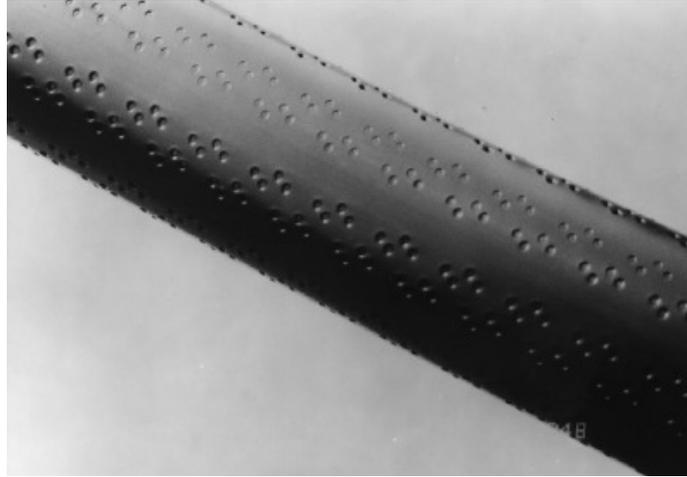


Figura 33: mossas superficiais distribuídas longitudinalmente ao longo do cabo
(VIRLOBEUX, 1999 apud MACHADO, 2008)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a realização deste trabalho foi possível constatar que a presença da chuva em determinadas intensidades piora muito a resposta dos cabos de pontes estaiadas ao vento, como pode ser observado no trabalho de Gu e Du (2005) (figura 26), no qual a presença da chuva aumentou em quase 5 vezes a amplitude máxima de deslocamento do cabo para determinadas velocidades do vento, (variando de 7 a 10 m/s aproximadamente). Pode-se observar também que em função da posição dos filetes d'água nos cabos a influência sobre a amplitude do deslocamento varia consideravelmente. Enquanto que para certas posições os filetes influenciam muito pouco, para outras, por exemplo, posição do filete superior a 50° e a do filete inferior a 110° , a amplitude aumenta consideravelmente. Além disso, no estudo de Bosdogianni e Olivari (1996 apud MACHADO, 2008) (figura 25) pode-se verificar que o filete que mais influencia é o superior, uma vez que se mudado o filete inferior melhora-se muito pouco a resposta do cabo.

Nos dados apresentados, foi possível observar que a intensidade da chuva influi na amplitude do deslocamento: para intensidades pequenas, a amplitude pode chegar a quase 6 vezes mais do que para intensidades de chuva grandes.

Verifica-se também, que a utilização de dispositivos ajuda muito para a redução da vibração dos cabos. A utilização de protuberâncias longitudinais nos cabos pode extinguir a vibração, porém, paga-se um preço adicional, que é o aumento do coeficiente de arrasto. Já a utilização de fios entrelaçados em espirais, quando bem dimensionados, pode eliminar a vibração nos cabos.

Com isso, conclui-se que ao analisar o efeito do vento sobre os cabos de uma ponte estaiada, deve-se levar em conta também o efeito da presença da chuva que, para certas velocidades do vento, pode aumentar muito a vibração dos cabos. Isso pode levar a um desgaste mais acentuado dos aparelhos de amortecimento, diminuindo sua vida útil, e acarretando em uma manutenção mais frequente dos aparelhos, além da fadiga nos próprios cabos. Porém, com o avanço da Engenharia, ao se buscar um melhor aproveitamento dos materiais e das estruturas, sem um gasto muito elevado, diminuir a vida útil de um material por não levar-se em conta detalhes durante sua fase de projeto é incabível atualmente. Por outro lado, não realizar

manutenção é mais grave ainda, já que mais do que buscar economia e aproveitamento, a Engenharia busca preservar a vida humana.

REFERÊNCIAS

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.

GU, M.; DU, X. Experimental investigation of rain–wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 93, n. 1, p. 79-95, Jan 2005.

MACHADO, D. S. **Caracterização Aerodinâmica de Cabos de Pontes Estaiadas Submetidos à Ação Combinada de Chuva e Vento**. 2008. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

PERRONE, V. C. **Estudo da Influência da Geometria da Seção Transversal de Pontes sobre seus Coeficientes Aerodinâmicos**. 2008. 57 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Configuração geral do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann**. Disponível em < <http://www.ufrgs.br/lac/>>. Acesso em 18 nov. 2009.

XU, Y. L., SHUM, K. M., ZHAN, S., ZHOU, H. J. Experimental study of wind-rain-induced cable vibration using a new test setup. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Elsevier, v. 96, n. 12, p. 2438-2451, Dec 2008.