

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

Jonatas Ferri Dariva

**DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM PONTES:
INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE E NAS
CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS**

Porto Alegre
novembro 2009

JONATAS FERRI DARIVA

**DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM PONTES:
INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE E NAS
CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS**

Trabalho de Diplomação a ser 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

JONATAS FERRI DARIVA

**DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM PONTES:
INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE E NAS
CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS**

Porto Alegre, dezembro de 2009

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

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Maia Rocha (UFRGS)
Dr. techn., Universität Innsbruck/Áustria

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

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza (UFRGS)
Ph.D. pela University of Western Ontario/Canadá

Dedico este trabalho a minha família, Gilberto, Jureci, Jaciara, Laura e Gustavo, e a minha namorada, Denise, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado, especialmente durante o período do meu Curso de Graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Acir Mércio Loredo-Souza, orientador deste trabalho, por todo o tempo dedicado.

Agradeço também a Prof.^a Carin Maria Schmitt pela dedicação e orientação durante todo o trabalho, que contribuiu muito para o avanço do mesmo.

Agradeço a meus pais, Gilberto e Jureci, pelo apoio, dedicação e incentivo que sempre me deram.

Agradeço aos meus irmãos, Jaciara, Laura e Gustavo, pela paciência e compreensão durante toda a Graduação.

Agradeço a minha namorada, Denise, pela compreensão, incentivo, paciência e apoio durante a execução deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, por todo apoio e companheirismo durante toda a Graduação.

Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes.

É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.

Leonardo da Vinci

RESUMO

DARIVA, J. F. **Dispositivos aerodinâmicos em pontes:** influência na estabilidade e nas características aerodinâmicas. 2009. 72 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Com o incremento tecnológico que a Engenharia tem sofrido nos últimos anos, tem se permitido, para o desenvolvimento de projetos de pontes e viadutos, concepções mais arrojadas, as quais se mostram com tabuleiros bem mais esbeltos. A partir daí, tem-se a preocupação com a ação do vento, que tem influência significativa para estes tipos de pontes e viadutos, tornando-se um dos principais contribuintes da carga atuante, além de seus efeitos dinâmicos. Este trabalho trata do estudo da utilização de dispositivos aerodinâmicos em pontes para que as ações adversas do vento sobre seus tabuleiros possam ser minimizadas, colaborando para a estabilidade da mesma. Serão realizadas, além das análises dos trabalhos feitos no túnel de vento da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, análises de resultados obtidos em outros centros de pesquisa, visando-se verificar a influência dos dispositivos nas seções transversais do ponto de vista das características aerodinâmicas. Este trabalho é desenvolvido para fins teóricos e práticos, tanto para auxiliar profissionais de projeto de pontes quanto os estudiosos da área. Com resultados baseados principalmente em estudos do túnel de vento Professor Joaquim Blessmann da UFRGS, o trabalho pretende reproduzir de forma satisfatória todos os resultados obtidos. Este trabalho conta com a revisão de conceitos básicos do escoamento, como, por exemplo, noções de viscosidade, turbulência, número de Reynolds, camada limite, além de utilizar gráficos e tabelas para as análises, o que faz com que no decorrer do mesmo sejam introduzidos conceitos de pressão, medidores de pressão, coeficientes de pressão e aerodinâmicos, efeitos estáticos e dinâmicos do vento, para que os resultados possam ser melhor interpretados.

Os resultados obtidos mostram a importância da utilização de dispositivos aerodinâmicos em pontes, para que a estabilidade das mesmas seja garantida, principalmente em obras de grandes vãos, onde os efeitos do vento são de maiores amplitudes.

Palavras-chave: efeitos do vento; coeficientes aerodinâmicos; dispositivos aerodinâmicos; pontes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama das etapas da pesquisa	16
Figura 2: camada limite	21
Figura 3: tubo de Pitot	24
Figura 4: definição de coeficientes de pressão externa	24
Figura 5: coeficiente de pressão	27
Figura 6: seção esquemática de tabuleiro para os coeficientes aerodinâmicos	29
Figura 7: circuito aerodinâmico do túnel de vento da UFRGS.....	31
Figura 8: multimanômetros do túnel de vento	31
Figura 9: construção e colapso de pontes entre 1800 e 1900	33
Figura 10: dispositivos aerodinâmicos	38
Figura 11: ponte Jomon (a); seção transversal original com e sem dispositivo (b, c); seções transversais modificadas com borda semi-circular e semi-elíptica (d, e)	39
Figura 12: amortecimento aerodinâmico versus a velocidade do vento para a ponte Jomon com e sem dispositivos (a, b) e com as bordas semi-circular e semi- elíptica (c, d)	41
Figura 13: seção transversal do tabuleiro da Ponte Longs Creek	43
Figura 14: efeitos dos dispositivos de borda (esquerda) e das perfurações na alma da viga sem lâmina d'água	44
Figura 15: efeitos dos dispositivos aerodinâmicos com lâmina d'água	44
Figura 16: seção transversal do tabuleiro da Ponte Severn	46
Figura 17: seção proposta para a Travessia da Enseada Burrard	46
Figura 18: seção transversal do tabuleiro da Ponte Lillebaelt	47
Figura 19: seção transversal do tabuleiro da Ponte Papineau	47
Figura 20: seção transversal do tabuleiro da Ponte Skarnsund	48
Figura 21: seção transversal do tabuleiro da Ponte Pasco-Kennewick	49
Figura 22: dispositivos de borda para a Ponte Lions' Gate	49
Figura 23: efeitos dos dispositivos cobrindo parcialmente o vão	50
Figura 24: campos de escoamento e valores de Ca , Cs^{RMS} e St	51
Figura 25: seção transversal correspondente à configuração I	52
Figura 26: seção transversal correspondente à configuração II	52
Figura 27: coeficiente de arrasto	53
Figura 28: coeficiente de sustentação	53
Figura 29: coeficiente de torção	54
Figura 30: deslocamento para vento na borda inferior com ângulo de -4°	55

Figura 31: rotação para vento na borda inferior com ângulo de -4°	56
Figura 32: deslocamento para vento na borda superior com ângulo de $+4^\circ$	56
Figura 33: rotação para vento na borda superior com ângulo de $+4^\circ$	57
Figura 34: configurações para o tabuleiro da Ponte Seo Hae	58
Figura 35: coeficientes de arrasto para a configuração A	59
Figura 36: coeficientes de arrasto para a configuração T	59
Figura 37: coeficientes de sustentação para a configuração A	60
Figura 38: coeficientes de sustentação para a configuração T	60
Figura 39: coeficientes de torção para a configuração A	61
Figura 40: coeficientes de torção para a configuração T	61
Figura 41: modelos ensaiados	64
Figura 42: coeficientes de arrasto do modelo III	67
Figura 43: coeficientes de sustentação do modelo III	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: viscosidade da água e do ar para algumas temperaturas	19
Quadro 2: efeitos do vento em pontes	33
Quadro 3: resumo dos resultados das configurações I e II	54
Quadro 4: resultados dos deslocamentos para a Ponte Seo Hae	62
Quadro 5: coeficientes aerodinâmicos do Modelo I	65
Quadro 6: coeficientes aerodinâmicos do Modelo II	65
Quadro 7: coeficientes aerodinâmicos do Modelo III	65
Quadro 8: coeficientes aerodinâmicos do Modelo IV	65
Quadro 9: coeficientes aerodinâmicos do Modelo V	66
Quadro 10: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VI	66
Quadro 11: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VII	66
Quadro 12: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VIII	66

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 Objetivos secundários	14
2.3 PRESSUPOSTO	15
2.4 DELIMITAÇÕES	15
2.5 LIMITAÇÕES	15
2.6 DELINEAMENTO	15
2.6.1 Pesquisa bibliográfica	16
2.6.2 Resultados de testes em túneis de vento	16
2.6.3 Análise dos dispositivos aerodinâmicos	17
2.6.4 Comparação dos resultados	17
2.6.5 Análise final	17
3 VENTO EM PONTES	18
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS	18
3.1.1 Viscosidade	18
3.1.2 Compressibilidade	19
3.1.3 Turbulência	19
3.1.4 Número de Reynolds	20
3.1.5 Camada limite	21
3.1.6 Vórtices de Kármán	22
3.2 PRESSÃO	22
3.3 COEFICIENTES PRESSÃO	24
3.4 COEFICIENTES AERODINÂMICOS	27
3.5 SEMELHANÇA E SIMULAÇÃO DO VENTO EM TÚNEL DE VENTO	29
3.5.1 Semelhança	29
3.5.2 Simulação do vento natural em túneis de vento	30
3.6 COLAPSO DE PONTES PELA AÇÃO DO VENTO	32
3.7 EFEITOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS NAS PONTES	33
3.7.1 Efeitos dos valores médios dos esforços do vento	34
3.7.2 Divergência torcional	34

3.7.3 Efeitos dinâmicos	34
3.7.3.1 Galope	35
3.7.3.2 Drapejamento	35
3.7.3.3 Excitação por desprendimento de vórtices	35
3.7.3.4 Martelamento	35
4 DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM PONTES	37
4.1 ESTUDOS DE YOSHIMURA et al. (1997)	38
4.2 ESTUDOS DE WARDLAW E COLABORADORES	42
4.2.1 Pontes tipo placa	42
4.2.1.1 Ponte Longs Creek	42
4.2.1.2 Ponte Kessock	45
4.2.2 Pontes de seção caixão	45
4.2.2.1 Ponte Severn	45
4.2.2.2 Travessia da Enseada Burrard	46
4.2.2.3 Ponte Lillebaelt	47
4.2.2.4 Ponte Papineau	47
4.2.2.5 Ponte Skarnsund	48
4.2.2.6 Ponte Pasco-Kennewick	48
4.2.3 Pontes treliçadas	49
4.3 ESTUDOS DE LARSEN (1998)	50
4.4 ESTUDOS DE ROCHA et al. (2003)	52
4.5 ESTUDOS DE LOREDO-SOUZA et al. (2007)	55
4.6 ESTUDOS DE KING E DAVENPORT (1992)	57
4.7 ESTUDOS DE LIMAS (2003)	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução das tecnologias e o crescimento exponencial do conhecimento tecnológico moderno, a Engenharia como ciência, fazendo parte deste contexto, cada vez mais utiliza materiais mais leves e esbeltos para a construção de suas grandes obras. A construção de pontes, onde os vãos são cada vez maiores e mais esbeltos, exigem conhecimento que permitam seu desenvolvimento com base em projetos bem fundamentados. Para este tipo de estrutura, o vento é um dos principais agentes de carga, o qual além de causar efeitos de ordem estática, causa ainda efeitos de ordem dinâmica.

No decorrer dos tempos, há um longo histórico de problemas causados pelo vento em pontes, como os incidentes ocorridos com a Ponte Tay e a Ponte Wheeling no século XIX. Porém, somente no século XX, com o famoso desastre de Tacoma, deu-se início a estudos para esclarecimento do complexo comportamento de pontes submetidas à ação do vento.

Hoje em dia, a exigência dos profissionais da área de Engenharia impulsiona a busca por resultados confiáveis e representativos da ação do vento. Estes resultados são alcançados tanto com a utilização da teoria já consagrada do assunto como, principalmente, para projetos mais complexos, com ensaios em túneis de simulação do vento natural. Através de um rigoroso controle dos parâmetros de semelhança, os ensaios garantem crédito aos seus resultados e análises.

Levando em conta estes fatos, buscou-se neste trabalho, a investigação e a mitigação dos efeitos do vento sobre as pontes, através da utilização de dispositivos aerodinâmicos que diminuam os efeitos causados pelo vento. O objetivo desse trabalho é, considerando algumas seções transversais de tabuleiros já consagradas entre os profissionais, fazer a apresentação de como os dispositivos aerodinâmicos se comportam para determinadas seções, a partir da análise de seus coeficientes aerodinâmicos.

Com base nisto, este trabalho está organizado de forma que no capítulo 2 é apresentado o método de pesquisa utilizado para a elaboração do mesmo. No capítulo 3 é realizada a revisão bibliográfica, retomando conceitos importantes para o entendimento do trabalho. No capítulo 4, intitulado dispositivos aerodinâmicos em pontes, é feito o estudo e a análise de diversos

dispositivos, onde o capítulo está subdividido pelos autores estudados. No último capítulo, o qual corresponde ao capítulo 5, são realizadas as considerações finais deste trabalho.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual a influência da aplicação de dispositivos aerodinâmicos em seções transversais de tabuleiros de pontes sobre suas características aerodinâmicas?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

São apresentados os objetivos deste trabalho classificados em objetivo principal e objetivos secundários.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a descrição da influência de dispositivos aerodinâmicos em seções transversais de tabuleiros de pontes sobre suas características aerodinâmicas.

2.2.2 Objetivos secundários

São objetivos secundários deste trabalho:

- a) descrição dos dispositivos aerodinâmicos utilizados em pontes;
- b) comparação dos coeficientes de arrasto dos dispositivos analisados;
- c) comparação dos coeficientes de sustentação dos dispositivos analisados;
- d) comparação dos coeficientes de torção dos dispositivos analisados.

2.3 PRESSUPOSTO

É admitido o pressuposto de que os resultados obtidos em ensaios em túnel de vento de modelos seccionais de pontes em escala reduzida representam suficientemente bem o comportamento aerodinâmico das estruturas reais.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho se restringe a tratar das forças aerodinâmicas estáticas atuando sobre o tabuleiro das pontes, não se aprofundando em efeitos de instabilização dinâmica mais complexos, como o drapejamento e a excitação por desprendimento de vórtices.

2.5 LIMITAÇÕES

A abrangência do trabalho está ligada à variedade de geometrias de seções de pontes disponíveis para análise, que estão limitados aos modelos já ensaiados no Túnel de Vento Joaquim Blessmann e a disponibilidade de informações sobre estudos realizados em outros centros de pesquisa.

2.6 DELINEAMENTO

As etapas para a realização da pesquisa são as seguintes:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) pesquisa específica sobre resultados em túnel de vento;
- c) análise dos dispositivos aerodinâmicos;
- d) comparação dos resultados com a bibliografia disponível;
- e) análise final.

O diagrama da figura 1 apresenta como as etapas se relacionam entre si e, nos próximos itens, estas etapas são detalhadas.

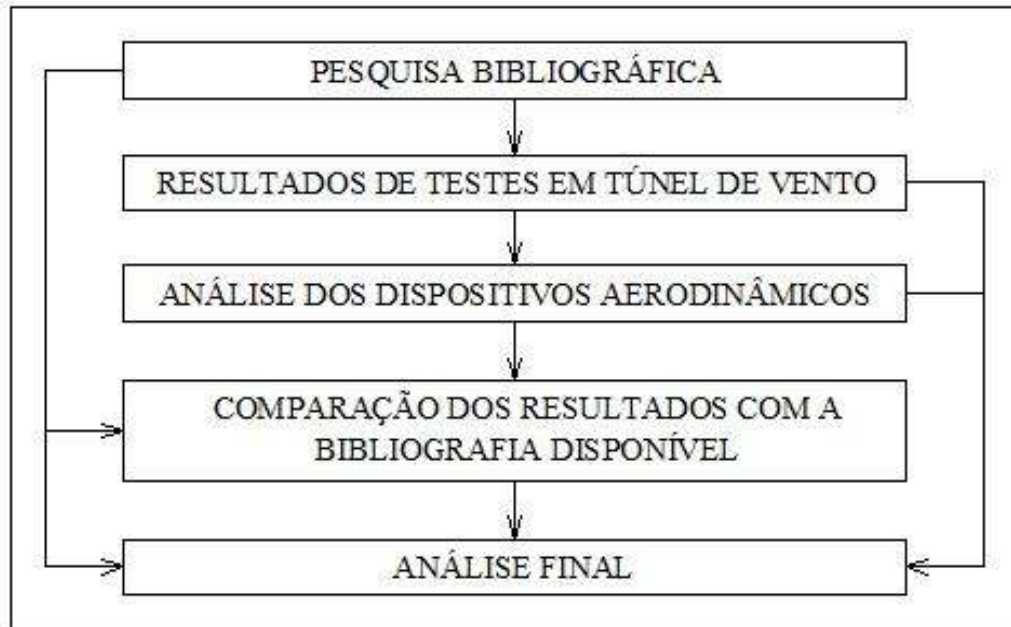


Figura 1: diagrama das etapas da pesquisa

2.6.1 Pesquisa bibliográfica

Nesta etapa foi realizada a pesquisa bibliográfica sobre os efeitos do vento em pontes através da utilização de trabalhos científicos, resultados de testes realizados em túnel de vento, além de bibliografia consagrada sobre o assunto, dispendo de figuras, esquemas, gráficos e tabelas de análise para a compreensão dos resultados.

2.6.2 Resultados de testes em túnel de vento

Pesquisa específica em busca de resultados de testes em túnel de vento de alguns modelos de dispositivos aerodinâmicos em determinadas seções transversais de pontes, realizados, principalmente, no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAC/UFRGS).

2.6.3 Análise dos dispositivos aerodinâmicos

Com base na pesquisa bibliográfica e nos resultados de testes em túnel de vento, foi realizada a análise dos dispositivos aerodinâmicos para tabuleiros das pontes relacionando as geometrias das seções com os respectivos coeficientes aerodinâmicos.

2.6.4 Comparação dos resultados

Após a realização das análises, foi realizada a comparação dos resultados obtidos com as informações constantes em bibliografia disponível.

2.6.5 Análise final

A análise final para conclusão de como os dispositivos influenciam em cada seção transversal estudada foi embasada nas etapas anteriores e aqui se estabeleceram as conclusões deste trabalho de diplomação.

3 VENTO EM PONTES

Pelo trabalho tratar dos dispositivos aerodinâmicos para a redução dos efeitos do vento em pontes, tão importante quanto analisar estes dispositivos é estudar também como o vento, agente das ações aerodinâmicas, se comporta na natureza, além de discutir alguns conceitos básicos mais relevantes aplicados ao escoamento.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

Retomar alguns conceitos básicos aplicados ao escoamento tornará o entendimento do trabalho mais fácil, considerando-se isso, a seguir são esclarecidos alguns dos principais, como: viscosidade, compressibilidade, turbulência, número de Reynolds, camada limite e vórtices de Kármán. A seguir serão expostos estes conceitos.

3.1.1 Viscosidade

A viscosidade é a propriedade do fluido que controla sua velocidade de deformação, ou seja, um fluido muito viscoso leva mais tempo para se deformar do que um fluido com baixa viscosidade. Calculando-se a resistência devido às forças de inércia em um fluido sem viscosidade, conclui-se que esta resistência é nula. Porém, na realidade, a viscosidade altera o campo aerodinâmico e estas alterações provocam uma resultante diferente de zero para as forças de pressão. Portanto, segundo Blessmann (1990, p. 94), pode-se desconsiderar a resistência causada pela viscosidade, mas não as alterações do campo aerodinâmico, como alterações da camada limite, formação de esteiras, turbilhões, etc. No quadro 1 são mostrados alguns valores de viscosidade para a água e o ar, mostrando a dependência destes com a temperatura.

Fluido à pressão de 1atm = 760mm de mercúrio = 1,033kgf/cm ² = 101325N/m ²	T (°C)	Valores de		
		Viscosidade absoluta 10 ⁶ μ		Viscosidade cinemática 10 ⁶ v
		Ns/m ²	kgf s/m ²	m ² /s
Água	0	1795	183	1,79
	15	1147	117	1,15
	30	799	81,5	0,8
	50	549	56	0,56
	100	283	28,9	0,3
	140	195	19,9	0,21
Ar de composição normal	-50	14,4	1,47	9,1
	0	16,9	1,72	13,1
	15	17,8	1,81	14,5
	30	18,5	1,89	15,9
	50	19,5	1,99	17,9
	100	22,1	2,25	23,4
	140	23,7	2,42	27,8

Quadro 1: viscosidade da água e do ar para algumas temperaturas
(BLESSMANN, 1990, p. 21)

3.1.2 Compressibilidade

Chama-se de compressibilidade de um fluido a variação do volume desse quando submetido a determinada variação de pressão. Líquidos e gases apresentam comportamento muito distinto quando submetidos à variação de pressão, pois os gases são muito mais sensíveis a estas alterações. No entanto, como afirma Blessmann (1990, p. 24), a massa específica do ar varia de 1,35% para uma alteração de 200 kgf/m² na pressão atmosférica, a qual é perfeitamente tolerável sem que seja necessário levar em conta a compressibilidade.

3.1.3 Turbulência

Uma característica importante de escoamentos naturais é a turbulência, a qual, conforme indica Blessmann (1995, p. 101), é a agitação que origina flutuações na velocidade do escoamento médio, causada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre. A turbulência é uma importante característica dos ventos naturais, sendo fundamental nas

simulações dos ensaios. Sua simulação é obtida, normalmente, por dispositivos acoplados ao chão do túnel. A turbulência causa no escoamento os conhecidos turbilhões, os quais podem ter sua ordem de grandeza da altura da camada limite da atmosfera até a ordem de milímetros. Durante muito tempo, o conhecimento que se teve da turbulência era inteiramente empírico. Porém, Blessmann (1990, p. 32) indica que Theodore Von Kármán tenha sido o primeiro a obter um conceito matemático para o fenômeno. O autor afirma ainda que as irregularidades das flutuações não permitem ao estudo da turbulência um tratamento determinístico, conduzindo os estudos a se basearem em teorias estatísticas e probabilísticas. Logo, segundo Blessmann (1995, p. 105-106), importantes propriedades devem ser levadas em conta para o estudo matemático da turbulência, como por exemplo, a distribuição de probabilidade, intensidade da turbulência, correlações espaciais, o espectro de potência e o espectro cruzado.

3.1.4 Número de Reynolds

O número de Reynolds pode ser descrito como a razão entre as forças de inércia e as devido à viscosidade do fluido. Pode ser expresso pela equação 1:

$$R_e = \frac{V \times D}{\nu} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

R_e = número de Reynolds;

V = velocidade do escoamento;

D = dimensão característica;

ν = viscosidade cinemática.

3.1.5 Camada limite

Conforme Blessmann (1990, p. 71-73), camada limite é o nome que se dá à fina camada nas proximidades da superfície de um corpo, que sofre a influência da viscosidade. Para os fluidos com pequena viscosidade, como o ar e a água, os efeitos desta são relevantes apenas sobre uma fina camada acima da superfície do sólido, sendo desprezível sua ação acima dessa. Desta forma, o escoamento pode ser estudado como se o fluido fosse ideal, obtendo-se mesmo assim um alto grau de exatidão nos resultados. A camada limite pode ser distinguida em três zonas características: laminar, de transição e turbulenta.

Ainda segundo Blessmann (1990), na camada limite laminar, as linhas de corrente se inclinam muito pouco, independente do escoamento a barlavento ser laminar ou turbulento (desde que a turbulência não seja exageradamente grande). A segunda zona é conhecida como camada limite de transição, na qual começam a aparecer as variações da velocidade com o tempo em cada ponto, aumentando conforme se desloca para pontos mais a sotavento. Nesta região a espessura da camada limite aumenta rapidamente, porém é a menor das três regiões. A última zona é a camada limite turbulenta, na qual a turbulência está plenamente desenvolvida, o escoamento é turbulento e a espessura da camada limite é ainda maior. Em circunstâncias em que a superfície não se altera e a pressão estática é constante, esta camada prolonga-se indefinidamente. A figura 2 mostra as três zonas características da camada limite.

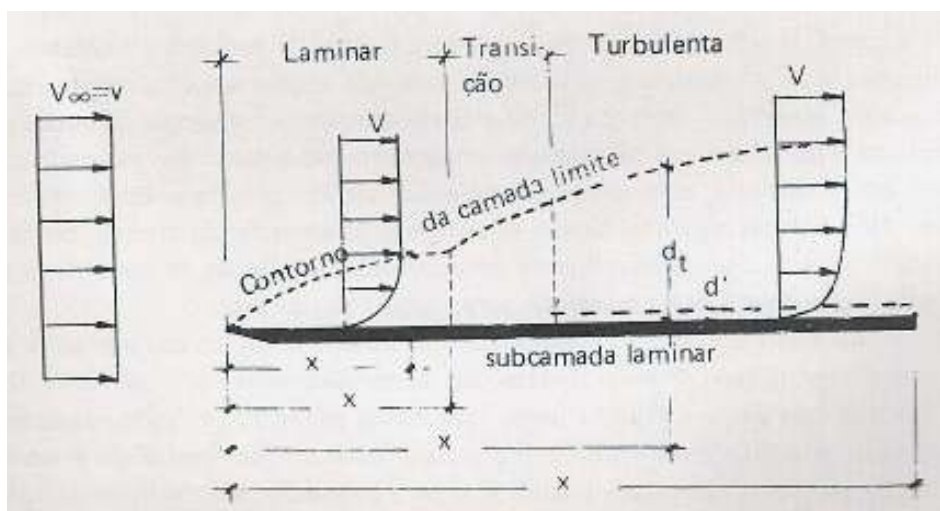


Figura 2: camada limite (BLESSMANN, 1990)

3.1.6 Vórtices de Kármán

Quando o número de Reynolds atinge um determinado valor, turbilhões destacam-se do corpo de ambos os lados. Às vezes estes desprendimentos são aleatórios, outras vezes eles ocorrem alternadamente e ordenadamente, formando os conhecidos vórtices de Kármán. Conforme indica Blessmann (1990, p. 89-90), o desprendimento destes vórtices do corpo provoca o aparecimento de forças periódicas. Estas forças alternadas ocorrem na mesma frequência do desprendimento. Porém, na direção transversal ao vento, ocorre a formação de forças e oscilações causadas pelo desprendimento de vórtices que podem entrar em ressonância com a frequência natural do sólido, originando oscilações transversais de grande valor que levarão a estrutura ou o sólido ao colapso, como será exposto mais adiante.

3.2 PRESSÃO

Como indica Blessmann (1990, p. 39) a pressão em determinado fluido pode ser obtida pelo teorema de Bernoulli que, para o caso de compressibilidade desprezível, é enunciado na equação 2:

$$\frac{1}{2}\rho \times u^2 + p + \rho \times g \times z = cte \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

ρ = massa específica do fluido;

u = velocidade do escoamento;

p = pressão estática;

g = aceleração da gravidade;

z = altura (cota).

Quando o fluido for um gás, como o ar, as forças de massa podem ser desprezadas, e o terceiro termo da equação 2 será nulo.

Desta forma, tem-se a equação 3:

$$q + p = p_t \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

q = pressão dinâmica;

p = pressão estática;

p_t = pressão total.

Resumindo equação 3, a pressão total resulta da soma da pressão estática e dinâmica.

A pressão estática é medida, conforme Blessmann (1990), considerando-se o fluido em repouso e pode ser medida por aparelhos como manômetros ou transdutores elétricos de pressão. Porém, na maioria das vezes a pressão estática no escoamento é medida por medidores fixos, que para o caso de tomada de pressão por um orifício, exige a adoção de alguns procedimentos. Para a obtenção da pressão estática em um fluido que escoar dentro de um túnel, por exemplo, um dos processos consiste em se realizar um orifício na parede do túnel e ligá-lo a um aparelho que faça a medição da pressão estática no fluido em repouso dentro do orifício. Já para a medição da pressão estática na edificação real ou no modelo reduzido, são escolhidos pontos convenientes para as tomadas de pressão, que se ligam aos aparelhos medidores, normalmente manômetros. Para edificações reais indicam-se transdutores elétricos de pressão.

Quando um sólido está submerso em um escoamento constante, algumas linhas de corrente poderão incidir normalmente a superfície deste corpo. Neste ponto, conforme afirma Blessmann (1990, p. 43), tem-se o chamado ponto de estagnação, onde a velocidade do fluido é zero e, conseqüentemente, a pressão dinâmica também o é. Assim, toda a pressão dinâmica é transformada em pressão estática e, medindo-se esta pressão nesse ponto, obtém-se a pressão total do fluido. É mostrado, na figura 3, um dos aparelhos utilizados para a obtenção da pressão total, o conhecido tubo de Pitot, empregado pela primeira vez por Pitot, em 1732, para tomada de medidas hidrodinâmicas.

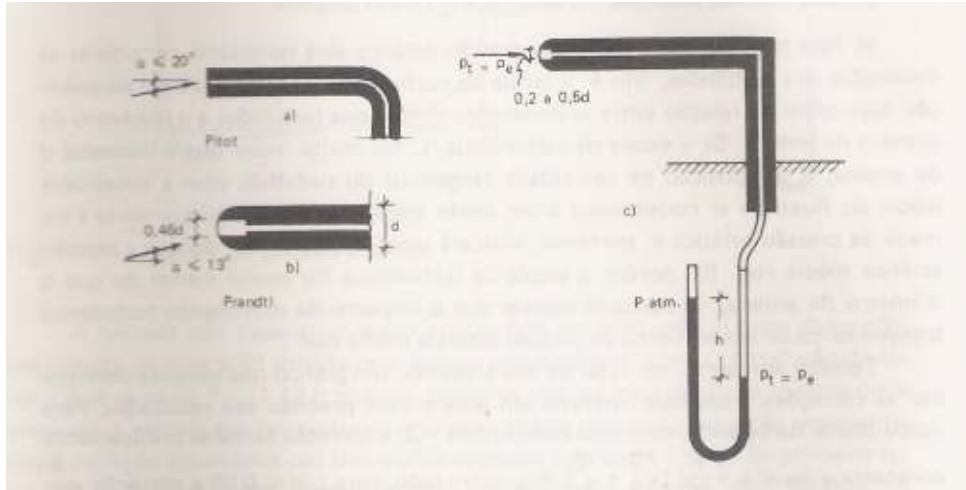


Figura 3: tubo de Pitot (BLESSMANN, 1990)

3.3 COEFICIENTES DE PRESSÃO

Segundo o proposto por Blessmann (1990, p. 46-50), a pressão estática efetiva externa (p_e), ou simplesmente pressão efetiva externa, é a diferença de pressões estáticas entre um **ponto m** qualquer sobre a superfície de um corpo sólido e a pressão em p_o (à barlavento do sólido sem a influência deste no escoamento). O que pode ser visualizado na figura 4 e representado matematicamente pela equação 4.

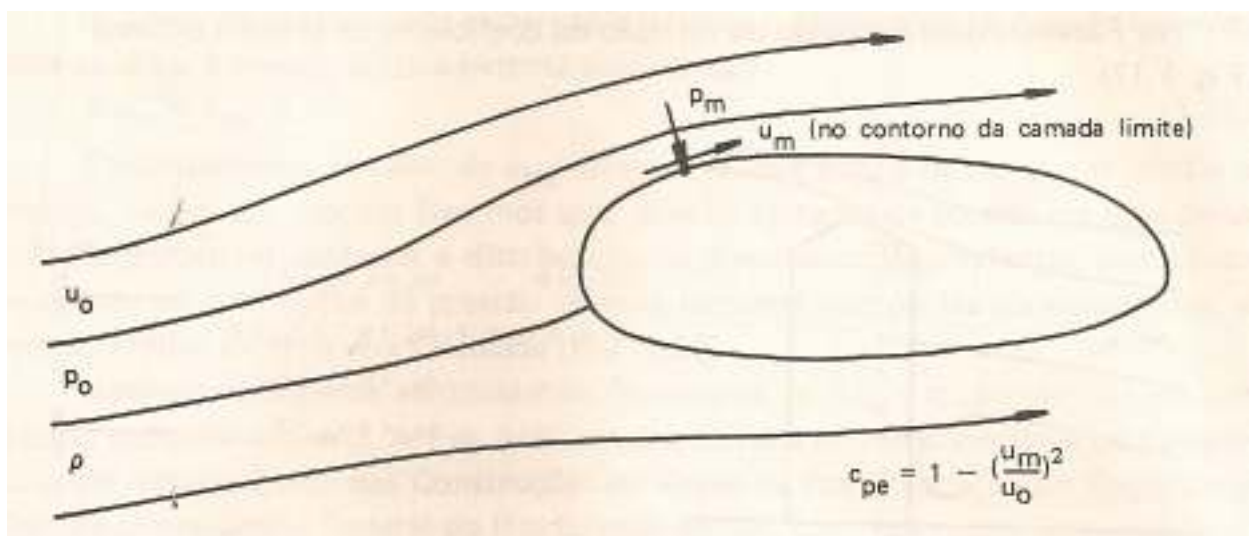


Figura 4: definição de coeficiente de pressão externa (BLESSMANN, 1990)

A equação 4 mostra o cálculo para obtenção da pressão efetiva externa:

$$\Delta p_e = p_m - p_o = \frac{1}{2} \rho u_o^2 - \frac{1}{2} \rho u_m^2 = \frac{1}{2} \rho u_o^2 [1 - (u_m/u_o)^2] \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

Δp_e = pressão efetiva externa;

p_o = pressão estática a barlavento sem a influência do sólido submerso;

p_m = pressão estática num ponto m qualquer da superfície do sólido;

u_o = velocidade a barlavento sem a influência do sólido submerso;

u_m = velocidade num ponto m qualquer da superfície do sólido;

ρ = massa específica do fluido.

De onde, na equação 4, o termo que representa o coeficiente de pressão externo é dado pela equação 5:

$$c_{pe} = 1 - (u_m/u_o)^2 \quad (\text{equação 5})$$

Uma discussão deste coeficiente pode ser feita através da análise da velocidade no **ponto m**. O maior valor positivo para a pressão efetiva externa, como indicado por Blessmann (1990), é obtido quando o valor da velocidade no **ponto m** é zero, ou seja, num ponto de estagnação. Neste caso, na equação 4 se obtém um valor de coeficiente de pressão externa de +1, com o sinal positivo indicando sobrepessão no sólido, o qual é o maior valor possível de uma pressão positiva. Para pontos em que a velocidade do fluido sobre o corpo se iguala a velocidade a barlavento, o coeficiente será zero, não havendo pressão efetiva. Já nos pontos onde a velocidade for maior que a velocidade u_o , haverá valores negativos para a pressão efetiva externa e, conseqüentemente, o coeficiente de pressão também será negativo, indicando sucção no **ponto m**.

Com base em Blessmann (1990, p. 50), verifica-se que a força externa atuando sobre o sólido pode ser calculada pela resultante das pressões externas sobre as áreas planas, sendo esta normal a superfície. A mesma pode ser calculada pela equação 6:

$$F = \int_A c_{pe} \cdot q \cdot dA \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

F = força resultante das pressões externas;

c_{pe} = coeficiente de pressão externa;

q = pressão dinâmica;

A = área da superfície do sólido.

Desta maneira, se em um modelo for feita uma série de tomadas de pressão, poder-se-á calcular a distribuição de pressões no sólido, bem como os respectivos coeficientes e, conseqüentemente, a força resultante externa no modelo. Analogamente, procedimentos semelhantes podem ser realizados para a obtenção dos coeficientes de pressões internos. A partir destes valores, podem ser obtidos os coeficientes de forma externos, internos e o coeficiente de forma C, chegando-se, as correspondentes forças. Na figura 5 são mostradas algumas representações de coeficientes de pressão para determinadas formas de edificações.

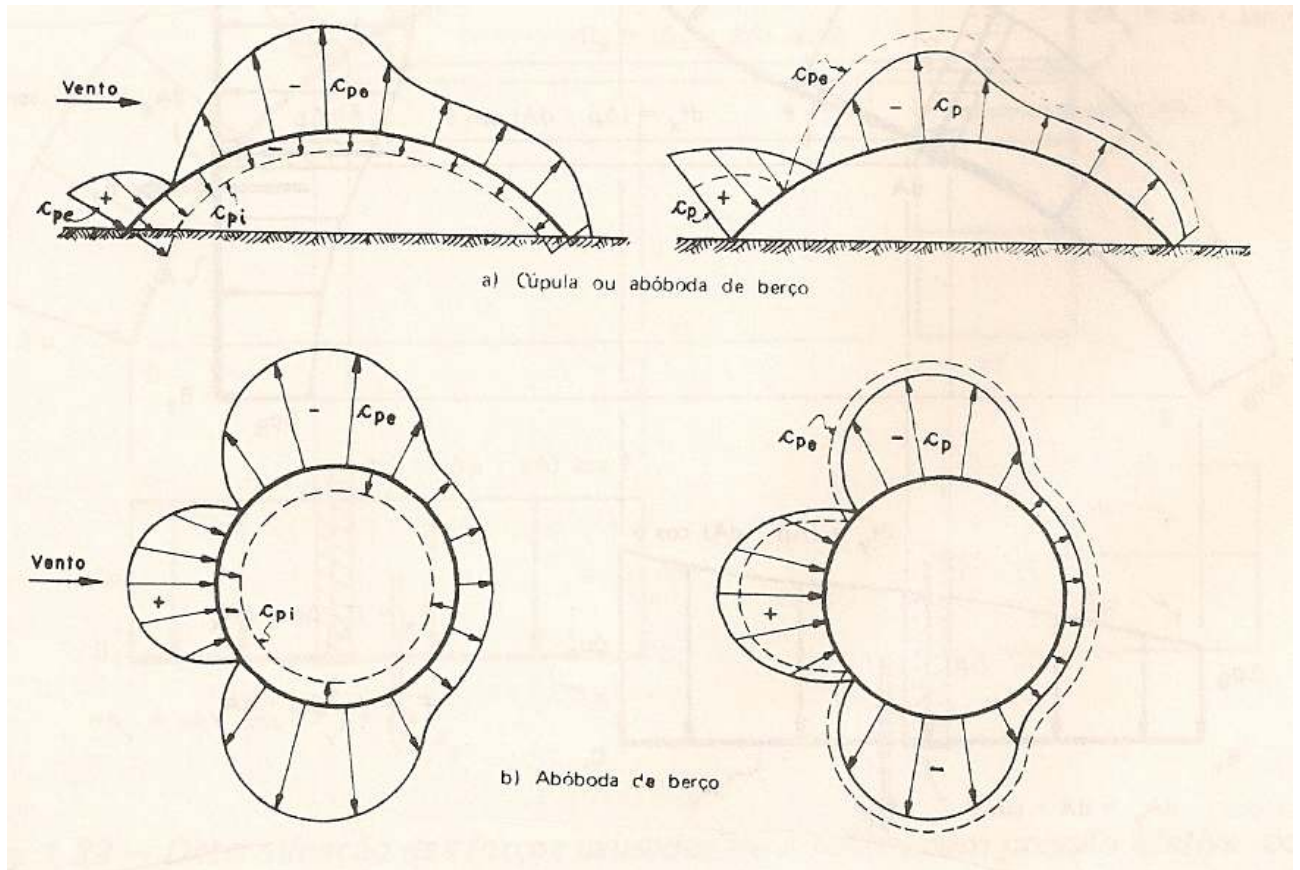


Figura 5: coeficiente de pressão (BLESSMANN, 1990)

3.4 COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Segundo Rocha et al. (2003), os coeficientes aerodinâmicos são adimensionais e dependem de vários fatores, como seção transversal do tabuleiro para o caso de pontes, ângulo de incidência do vento, além de características do escoamento como turbulência e número de Reynolds. Os coeficientes aerodinâmicos são divididos em três definições principais, segundo os autores: coeficiente de arrasto, coeficiente de sustentação e coeficiente de torção. Abaixo são descritas tais definições com suas respectivas equações.

O coeficiente de arrasto, conforme Rocha et al. (2003), está relacionado com a força de arrasto, a qual consiste na componente na direção do escoamento da força global causada pelo vento. O coeficiente de arrasto pode ser definido pela equação 7:

$$C_a = F_a / (q \times B) \quad (\text{equação 7})$$

O coeficiente de sustentação, conforme Rocha et al. (2003), está relacionado com a força de sustentação, a qual consiste na componente perpendicular à direção do escoamento da força global causada pelo vento. O coeficiente de sustentação pode ser definido pela equação 8:

$$C_s = F_s / (q \times B) \quad (\text{equação 8})$$

O coeficiente de torção, conforme Rocha et al. (2003), está relacionado à torção causada pela excentricidade das forças de arrasto e de sustentação em relação ao eixo de torção da estrutura. O coeficiente de torção pode ser definido pela equação 9:

$$C_t = M_t / (q \times B^2) \quad (\text{equação 9})$$

Onde, para as equações 7,8 e 9, tem-se que:

F_a = força de arrasto média por unidade de comprimento;

F_s = força de sustentação média por unidade de comprimento;

M_t = momento tissor médio por unidade de comprimento;

B = largura do tabuleiro da ponte;

q = pressão dinâmica.

A figura 6 apresenta uma seção esquemática de tabuleiro para os coeficientes aerodinâmicos.

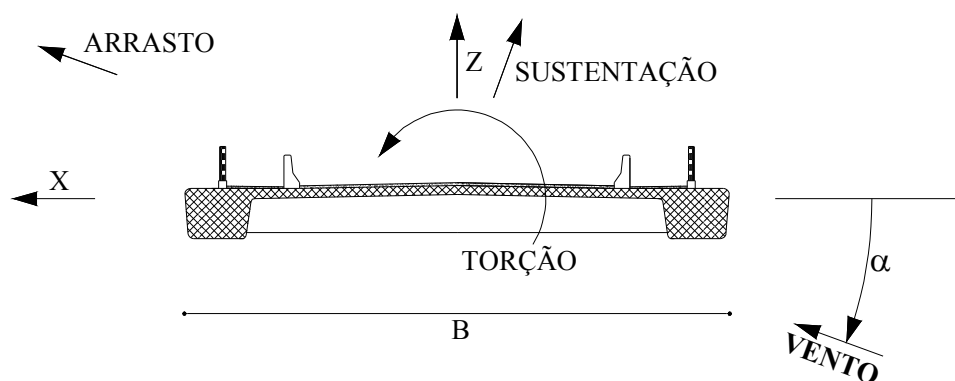


Figura 6: seção esquemática de tabuleiro para os coeficientes aerodinâmicos (ROCHA et al., 2003)

3.5 SEMELHANÇA E SIMULAÇÃO DO VENTO EM TÚNEL DE VENTO

Neste item são descritas duas etapas de importância fundamental nos estudos experimentais realizados em túneis de vento: a semelhança entre modelos reduzidos e reais e a simulação do vento natural nos túneis.

3.5.1 Semelhança

Segundo Blessmann (1990, p. 62), estudos teóricos são necessários para a avaliação das características do escoamento em torno de um sólido imerso em um fluido. Porém, todas as características não podem ser determinadas por tais estudos, o que faz com que seja necessária a realização de estudos experimentais. O autor ainda recomenda que, mesmo tendo-se base teórica para resultados de edificações, o estudo experimental dos resultados é fundamental para a confirmação dos mesmos, verificando a veracidade das informações obtidas através de propostas matemáticas.

Para o ensaio destas verificações, na maioria dos casos, a adoção de um modelo reduzido é explicada pela rapidez da obtenção dos resultados, além de economia, estudos prévios de mudança do projeto, etc. Tais estudos exigem condições fundamentais para que os resultados estejam o mais próximo possível da realidade, condições estas conhecidas como condições de semelhança. São elas:

- a) semelhança geométrica: deve-se manter constante a relação entre as dimensões do sólido, ou seja, devem-se manter as formas semelhantes, inclusive as proporções de rugosidades e detalhes na forma;
- b) semelhança cinemática: deve-se manter constante a relação de velocidade média e as características da turbulência do escoamento;
- c) semelhança dinâmica: devem-se manter constantes as relações entre as forças, tanto as de pressão quanto as de viscosidade, inércia, etc., ou seja, deve-se manter constante o número de Reynolds.

3.5.2 Simulação do vento natural em túneis de vento

Blessmann (1990, p. 112-114) afirma que para se obter uma escala apropriada da estrutura do vento natural deve-se cobrir um comprimento considerável do piso do túnel com um material de rugosidade adequada. Este dispositivo corresponde à principal fonte de turbulência na atmosfera à baixa altitude, em ventos em condições de estabilidade neutra. Outra linha de simulação de uma ou mais características do vento natural emprega obstáculos colocados bem a barlavento do modelo, em geral no início da câmara de ensaios, como telas, barras horizontais ou grelhas. Conforme o dispositivo usado, são reproduzidas uma ou algumas das características da turbulência, como intensidade, escala, espectro, etc. Uma outra técnica procura reproduzir a estrutura do vento natural por meios puramente aerodinâmicos, mais precisamente com jatos de ar lançados perpendicularmente ao vento gerado no túnel a partir de seu piso.

O túnel de vento Professor Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, será a principal fonte de informações deste trabalho. Segundo Blessmann (1990), o túnel opera desde 1972 e permite desenvolver de forma satisfatória análises dos efeitos estáticos e dinâmicos sobre construções civis em geral. O túnel conta com quatro mesas giratórias para fixação de modelos, utilizadas em ensaios estáticos ou dinâmicos.

As principais características de cada mesa são:

- a) M-I: aplicada para ensaios do tipo aeronáutico, com camada limite pouco espessa e baixa turbulência;
- b) M-II: aplicada para ensaios da construção civil em geral, com blocos colocados no túnel e geradores de turbulência na câmara de simuladores;

- c) M-III: aplicada para ensaios de estruturas altas, como chaminés, pilares de viadutos, torres e mastros;
- d) M-IV: aplicada a ensaios de dissipação de fumaça e gases industriais, influência de topografia sobre os ventos, modelos de pontes, etc.

Na figura 7 tem-se um esquema do circuito aerodinâmico do túnel de vento Joaquim Blessmann e, na figura 8, um multimanômetro utilizado para a obtenção dos valores de pressão.

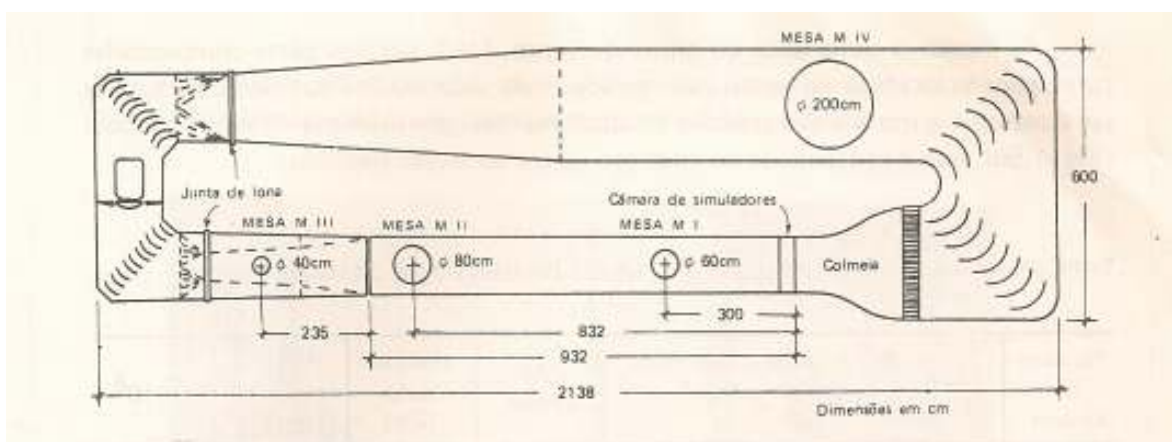


Figura 7: circuito aerodinâmico do túnel de vento da UFRGS (BLESSMANN, 1990)



Figura 8: multimanômetros do túnel de vento (LIMAS et al., 2004)

3.6 COLAPSO DE PONTES PELA AÇÃO DO VENTO

Um problema clássico de acidentes com pontes é o famoso caso da ponte de Tacoma. Até então, apenas a carga estática de pontes era levada em consideração. Segundo Limas (2003, p. 4), a partir daí estudos começaram a ser realizados e, então, se descobriu que o que levou a estrutura ao colapso não foi a ação estática do vento nem o desprendimento de vórtices na mesma frequência da ponte, e sim um outro fenômeno, conhecido por drapejamento, o qual será apresentado neste trabalho posteriormente.

A figura 9 indica a ocorrência de acidentes com pontes devido ao vento, entre as construídas entre 1800 e 1900. Ainda segundo Limas (2003, p. 5), os incidentes com pontes ao longo do tempo devido a ação do vento motivaram os profissionais e teóricos a cada vez mais procurar entender os fenômenos e as causas destes acidentes.

Dentre estes incidentes, o primeiro a que se tem referência foi o da ponte ferroviária de Tay, que foi aberta em 1877 ao tráfego e em 1879 por causa de uma grande tempestade teve seus treze maiores vãos jogados à água (LIMAS, 2003, p. 5). O vento foi a causa do acidente segundo o que foi declarado. Este incidente contribuiu para que as pressões causadas pelo vento em pontes fossem levadas mais a sério. Outro acidente, já descrito anteriormente, fez com que os estudiosos se voltassem para uma outra influência do vento sobre os corpos, a influência dinâmica, até então desconsiderada pelos profissionais da época. Incidente este ocorrido na ponte de Tacoma Narrows.

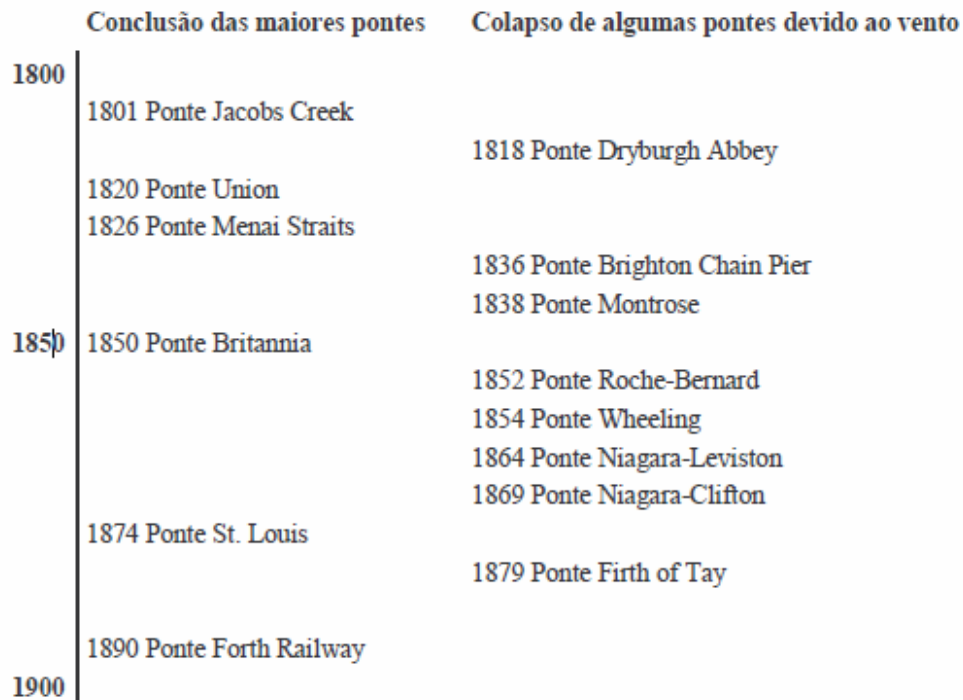


Figura 9: construção e colapso de pontes entre 1800 e 1900 (LIMAS, 2003)

3.7 EFEITOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS NAS PONTES

Para que se possa realizar um cálculo satisfatório da influência do vento em pontes, deve-se levar em conta duas classificações de respostas fundamentais: estáticas e dinâmicas. Cada uma destas respostas pode se manifestar através dos fenômenos que serão listados no quadro 2 e descritos nos próximos itens.

Estático	Efeitos dos valores médios dos esforços do vento	
	Instabilidade Estática	Divergência Torsional
	Fambagem Lateral	
Dinâmico	Instabilidade Dinâmica	Galope
		Drapejamento
		Excitação por Vórtices
	Resposta devido à turbulência (rajadas, martelamento)	

Quadro 2: efeitos do vento em pontes (ROCHA et al., 2003)

3.7.1 Efeitos dos valores médios dos esforços do vento

Conforme afirmam Rocha et al. (2003), os efeitos estáticos do vento podem ser estimados através de cálculos teóricos obtidos através dos valores médios dos esforços aerodinâmicos de arrasto, sustentação e torção. Esses valores são obtidos através de ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos, produzindo os coeficientes aerodinâmicos já discutidos anteriormente que facilitam a interpretação dos resultados.

Para o caso da Ponte sobre o Rio Guamá, Rocha et al. (2003) realizou ensaios para a obtenção dos coeficientes de arrasto, sustentação e torção baseados nos efeitos dos valores médios. O resumo de tal ensaio será apresentado em um capítulo específico do trabalho.

3.7.2 Divergência torsional

Sobre a resposta estática que se manifesta na forma de divergência torsional, Rocha et al. (2003) afirmam que o tabuleiro de uma ponte sob a ação do vento estará sujeito e tenderá a reagir a uma força de arrasto, uma força de sustentação e um momento de torção. Com o aumento da velocidade do vento, há um aumento do momento de torção, fazendo com que o tabuleiro aumente ainda mais o ângulo efetivo de ataque do vento e, conseqüentemente, aumente ainda mais o momento de torção. Neste ritmo, atinge-se uma velocidade na qual a rigidez de torção modal estrutural será idêntica à rigidez de torção modal aerodinâmica. Linearizando-se a curva do coeficiente de torção se obtém a velocidade de divergência, a qual, quando superada pelos ventos incidentes na ponte, entrará em colapso devido às oscilações excessivas.

3.7.3 Efeitos dinâmicos

Apesar do enfoque do trabalho estar voltado para os efeitos estáticos do vento, a seguir são conceituados os principais efeitos dinâmicos do mesmo, para que seja reforçada ao leitor a sua importância sobre as pontes e os viadutos.

3.7.3.1 Galope

Segundo Limas (2003, p. 30), normalmente o fenômeno de galope refere-se a vibração da estrutura em um único grau de liberdade, transversal ao escoamento. É um fenômeno de instabilidade típica de corpos esbeltos, leves e flexíveis. Estas estruturas podem sofrer oscilações transversais de grandes amplitudes, que aumentam com o aumento da velocidade do escoamento. Embora o galope envolva fenômenos dinâmicos de vibração da estrutura, pode-se ter uma descrição satisfatória do fenômeno através dos coeficientes médios de arrasto e sustentação, concluindo assim que se trata de um fenômeno quase-estático.

3.7.3.2 Drapejamento

Ainda segundo Limas (2003, p. 31), o drapejamento diferencia-se do galope basicamente por possuir dois graus de liberdade, enquanto o galope possui apenas um. Este fenômeno envolve dois modos de movimento, sendo normalmente um de torção e o outro de translação. O drapejamento se refere basicamente à estrutura em que a dimensão transversal é pequena comparada a dimensão longitudinal. Ele pode ocorrer em movimentos oscilatórios do tipo característico de golfinho, levando tabuleiros de pontes de vãos longos ao colapso.

3.7.3.3 Excitação por desprendimento de vórtices

Conforme Limas (2003, p. 32), a excitação por desprendimento de vórtices ocorre quando corpos não-aerodinâmicos estão imersos num escoamento e, a partir de certos números de Reynolds, inicia-se um desprendimento alternado de vórtices. Conhecidos como vórtices de Von Kármán, estes apresentam frequências bem definidas e produzem forças oblíquas à direção do vento. Caso a frequência dos desprendimentos dos vórtices aconteça na frequência natural da estrutura, os deslocamentos poderão causar sérios danos à mesma.

3.7.3.4 Martelamento

Como afirma Blessmann (2005, p. 129), uma edificação a sotavento de diversos obstáculos estará imersa na esteira gerada por eles. Quando a edificação estiver situada na esteira de somente uma ou poucas destas edificações, com tamanhos relativamente semelhantes, ela poderá sofrer a influência de turbilhões gerados nas edificações a barlavento, este fenômeno é conhecido como martelamento. Logo, haverá forças excitadoras periódicas que poderão causar efeitos dinâmicos de maior ou menor intensidade. Quando a frequência do martelamento e a frequência da estrutura coincidirem, tem-se o chamado martelamento ressonante. Desta maneira conclui-se que o efeito de martelamento é tanto maior quanto menor for a rugosidade do terreno, ou seja, uma edificação a beira mar sofrerá mais com este fenômeno do que uma edificação no centro de uma grande cidade.

4 DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM PONTES

O projeto de uma ponte só é satisfatório do ponto de vista aerodinâmico quando as excitações causadas na estrutura pelo vento não acarretarem nenhum dano, tanto estrutural quanto funcional. Para isto, a ponte deve ter sua concepção baseada na idéia de que as velocidades críticas da estrutura devem estar sempre a uma margem segura acima da velocidade de projeto de vento esperado. Caso a ponte apresente uma solução estrutural economicamente atrativa, mas pouco aerodinâmica, será necessário a utilização de artifícios ou dispositivos que melhorem as condições frente à ação do vento. Tais dispositivos ou artifícios podem ser classificados, segundo Limas (2003, p. 41), em mecânicos ou aerodinâmicos. Um dos métodos mecânicos utilizados para a otimização de pontes é o aumento da rigidez da estrutura, porém pouco atraente do ponto de vista econômico. Outro dispositivo mecânico bastante empregado é a utilização de amortecedores de massa sintonizados, os quais têm massa aproximada de um por cento da estrutura, mas impactos significantes do ponto de vista da resposta dinâmica.

Outro modo de fazer com que as pontes sejam menos sensíveis às ações do vento é transformar sua seção transversal, através da utilização de dispositivos aerodinâmicos, os quais podem ser acoplados à estrutura ou terem a estrutura modificada para se tornar mais aerodinâmica caso seja possível. Alguns exemplos de dispositivos básicos são mostrados por Limas (2003, p. 42), tais como:

- a) munir o tabuleiro de dispositivos aerodinâmicos triangulares laterais na ordem de melhorar a conduta aerodinâmica;
- b) diferentes inclinações para os dispositivos aerodinâmicos laterais;
- c) dispositivos aerodinâmicos internos com o intuito de limitar a formação de vórtices, uma das principais causas de instabilidades.

Alguns dispositivos transversais usados em pontes estaiadas que foram indicados por Ito e Nakamura (1982 apud LIMAS, 2003) são mostrados na figura 10.

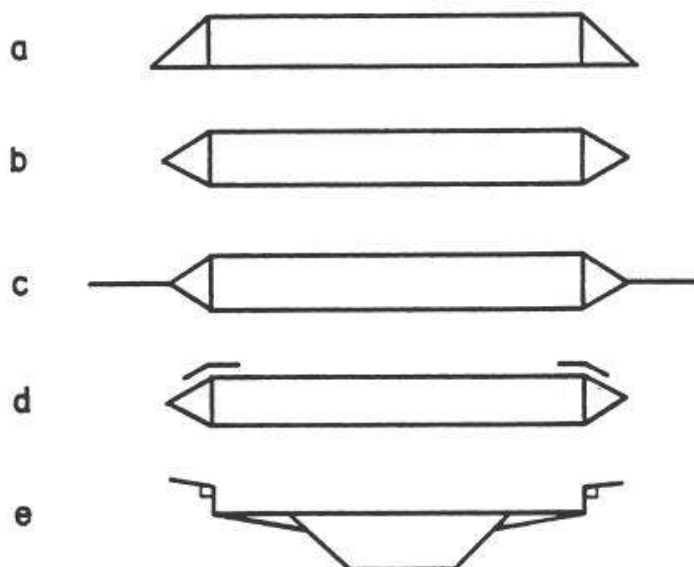


Figura 10: dispositivos aerodinâmicos
(ITO; NAKAMURA, 1982 apud LIMAS, 2003)

Para que seja realizada a análise dos dispositivos aerodinâmicos e a descrição de suas influências nas seções transversais dos tabuleiros de pontes foram realizados vários estudos, tanto de artigos de pesquisadores consagrados da literatura, quanto de ensaios de modelos reduzidos realizados no túnel de vento da UFRGS. Tais ensaios e estudos são demonstrados e comentados ao longo deste capítulo.

4.1 ESTUDOS DE YOSHIMURA et al. (1997)

Na tentativa de fazer com que as edificações em geral, e no caso deste estudo, as pontes, sofram menos com a influência das ações do vento, estudiosos e profissionais da área buscam por modelos de seções e dispositivos que contribuam para tal propósito. A seguir discute-se o caso da passarela de pedestre Jomon, construída no Japão, e estudada por Yoshimura et al. (1997).

Segundo Yoshimura et al. (1997, p. 861-870), muitos comportamentos aerodinâmicos ainda não foram compreendidos, por isso foi realizado um estudo no túnel de vento para verificar a estabilidade aerodinâmica das passarelas atirantadas com referência especial à ponte Jomon. Foram estudadas modificações de borda semi-circulares e semi-elípticas. A figura 11 mostra a

seção transversal original com e sem o dispositivo cilíndrico semi-circular (B, C) e seções transversais modificadas com bordas semi-circulares e semi-elípticas (D, E).

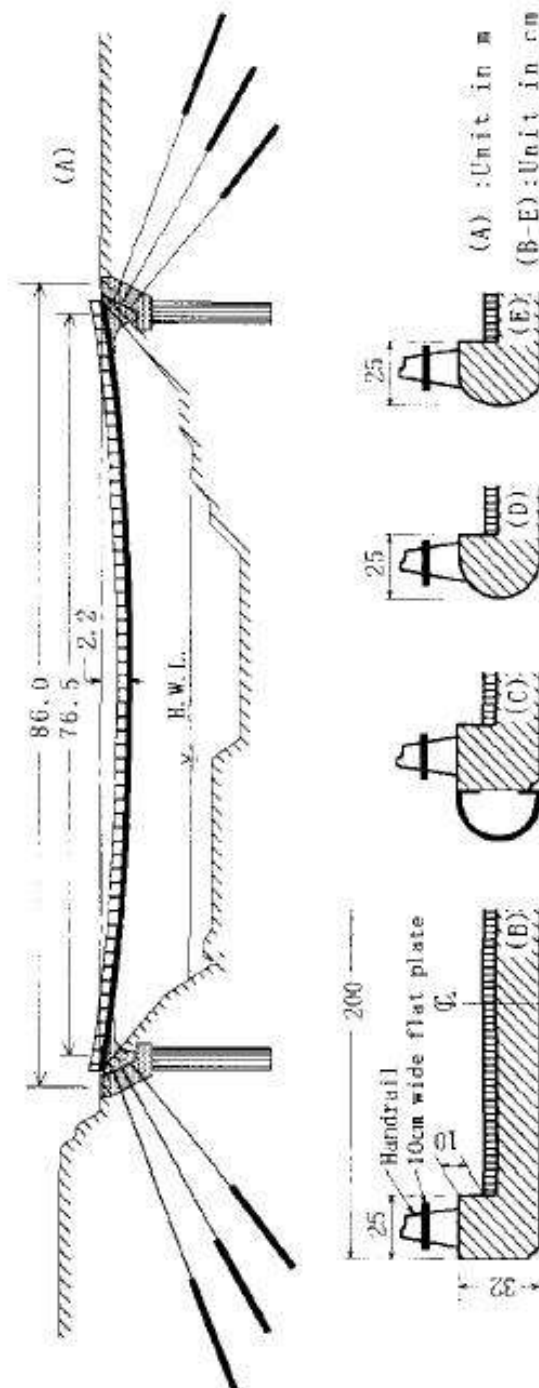


Figura 11: Ponte Jomon. (A); seção transversal original com e sem dispositivo (B, C); seções transversais modificadas com borda semi-circular e semi-elíptica (D, E) (YOSHIMURA et al., 1997)

Conforme explica Yoshimura et al. (1997), o dispositivo semi-circular foi primeiramente examinado em estudos da estabilidade aerodinâmica da Nova Ponte de Tacoma. Porém, a configuração foi insatisfatória e um tipo de dispositivo triangular tem sido frequentemente utilizado nas pontes atuais, seguindo a construção da Ponte Seven. Isso ocorreu pela falta de estudos do comportamento aerodinâmico de tabuleiros com dispositivos circulares e elípticos. Por isso foi realizado um estudo em túnel de vento baseado no modelo de teste da ponte Jomon para examinar se a estabilidade aerodinâmica do tabuleiro original aumenta com as modificações de borda ou dispositivos circulares.

Foi demonstrado por Yoshimura et al. (1997) que quaisquer tipos de modificações de borda são aplicáveis ao tabuleiro da Ponte Jomon. Dentre elas, a semi-elíptica parece ser uma boa alternativa, pois houve uma pequena mudança na forma e na área de seção transversal da ponte. No entanto, o dispositivo semi-circular foi aplicado na ponte atual pelas seguintes razões: os segmentos com a seção transversal convencional foram estimados como os mais econômicos e quase prontos para fabricação quando os testes em túnel de vento foram terminados. Além disso, depois da finalização da ponte, o espaço dentro do dispositivo cilíndrico contribuirá para o controle de vibração da mesma.

Portanto, o estudo conclui que qualquer uma das modificações de borda ou dispositivos cilíndricos circulares são efetivos para incrementar a estabilidade aerodinâmica da ponte Jomon, aumentando o amortecimento aerodinâmico e suprimindo os deslocamentos provocados por desprendimento de vórtices e drapejamento. A figura 12 mostra o amortecimento aerodinâmico em função da velocidade do vento para a ponte Jomon com e sem os dispositivos (A, B) e com as bordas semi-circulares e semi-elípticas (C, D).

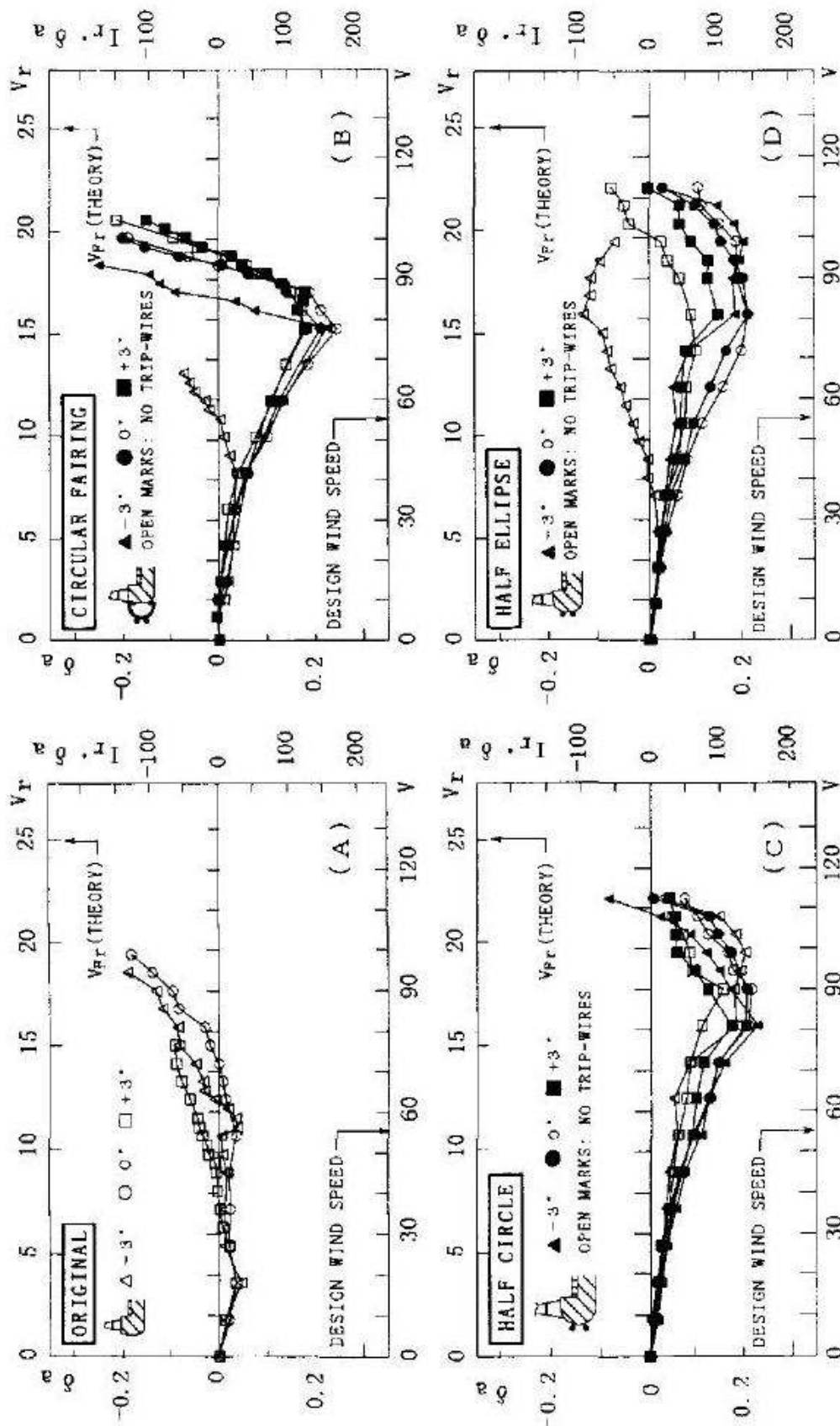


Figura 12: amortecimento aerodinâmico versus a velocidade do vento para a ponte Jomon com e sem os dispositivos (A, B) e com as bordas semi-circular e semi-elíptica (C, D) (YOSHIMURA et al., 1997)

4.2 ESTUDOS DE WARDLAW E COLABORADORES

Wardlaw realizou inúmeros estudos sobre a ação do vento em várias pontes. Junto com seus colaboradores, reuniu trabalhos sobre o comportamento de pontes tipo placa, caixão e treliçada. Alguns de seus trabalhos e conclusões estão expostos a seguir.

4.2.1 Pontes tipo placa

Segundo Wardlaw (1994, p. 308), as seções rombudas de tabuleiros tipo placa foram testadas em modelos experimentais e em escala real e observou-se pelos resultados que são propensas à oscilações causadas pelo desprendimento de vórtices e por instabilidade torsional. Desde 1930, observações de oscilações tem sido feitas em oito grandes pontes, das quais seis são de tabuleiro tipo placa. Destas seis pontes, duas eram estaiadas, a Ponte Longs Creek e a Ponte Kessock. A Ponte Longs Creek foi corrigida por dispositivos aerodinâmicos. A Ponte Kessock foi corrigida com a instalação de oito amortecedores de massa sintonizados de 200 kg colocados abaixo da parte central do tabuleiro.

4.2.1.1 Ponte Longs Creek

Segundo o trabalho de Wardlaw e Goettler (1968 apud WARDLAW, 1994), a Ponte Longs Creek é uma ponte estaiada com vão principal de 217 m entre as duas torres. A seção transversal do tabuleiro é mostrada na figura 13. A ponte encontra-se a 4,60 m do nível d'água. A largura do tabuleiro é de 10 m e o vão possui duas vigas de borda com 2,4 m de altura.

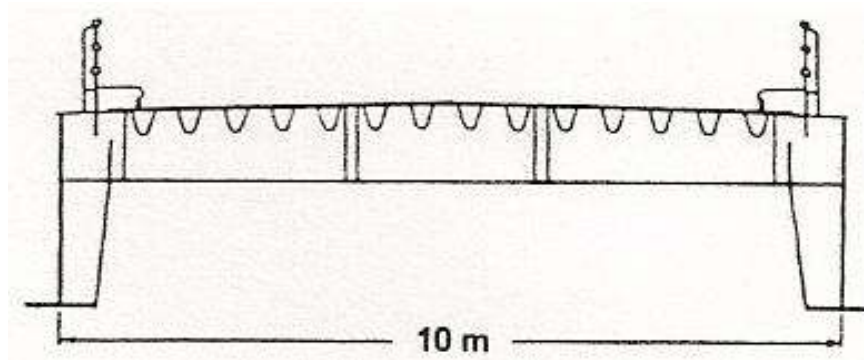


Figura 13: seção transversal do tabuleiro da Ponte Longs Creek (WARDLAW; GOETTLER, 1968 apud WARDLAW, 1994)

As oscilações verticais causadas pela excitação por desprendimento de vórtices foram observadas com amplitudes de até 20 cm para o caso dos guarda-corpos cobertos de neve. A velocidade do vento na região alcança velocidades entre 40 km/h e 50 km/h.

Dadas as circunstâncias, conforme Wardlaw e Goettler (1968 apud WARDLAW, 1994), vinte e duas modificações para amenizar o efeito do vento na ponte foram avaliadas utilizando-se modelos seccionais em escoamento laminar. Isto inclui a adição de uma placa de fundo, uma variedade de dispositivos de borda, perfurações na alma das vigas, etc. Os testes foram realizados para diversas alturas da seção em relação ao nível d'água. Na figura 14 são mostrados resultados para alguns dispositivos ensaiados para a consideração da seção isolada, ou seja, sem altura de nível d'água.

Desconsiderando-se o nível d'água, como indicado por Wardlaw e Goettler (1968 apud WARDLAW, 1994), as amplitudes alcançadas para a forma básica da seção eram 10 cm, e de 18 cm para os guarda-corpos cobertos por neve. Três das configurações testadas reduziram a amplitude para níveis insignificantes. São elas:

- a) dispositivos triangulares de borda com 2,4 m de largura em combinação com uma placa de fundo. A resposta do dispositivo é mostrada na figura 14 (esquerda);
- b) perfurações em 30% da área da alma das vigas. A resposta é mostrada na figura 14 (direita) para três taxas de abertura, 10%, 20% e 30%;
- c) placas triangulares chatas projetadas horizontalmente para fora da viga e abaixo dos cabos de sustentação da ponte. Possuem largura de 2,30 m e espaçadas de 4,60 m de eixo a eixo.

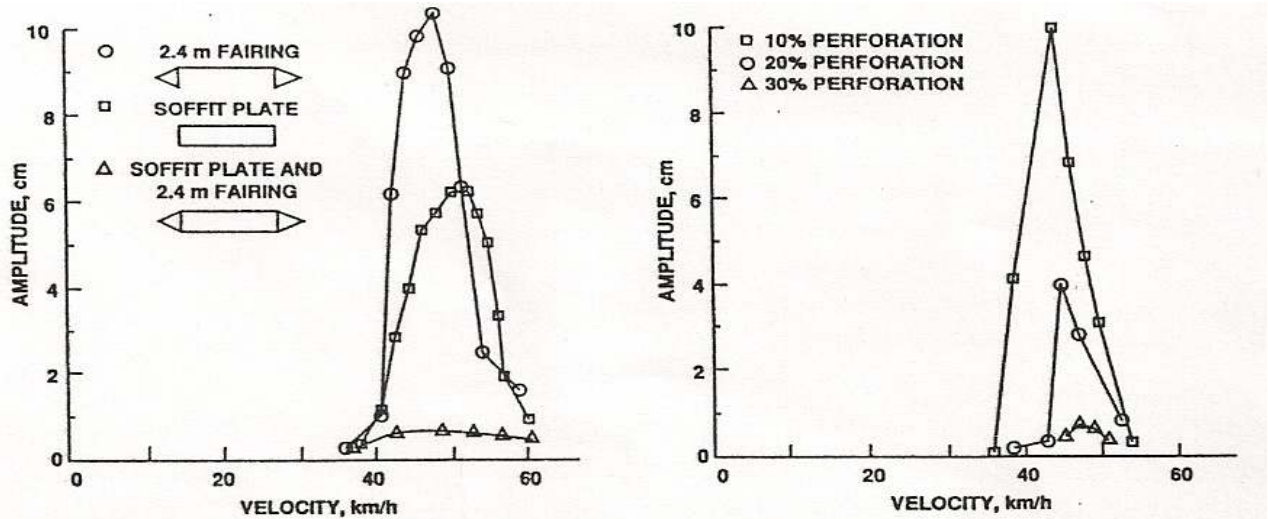


Figura 14: efeitos dos dispositivos de borda (esquerda) e das perfurações na alma da viga sem lâmina d'água (WARDLAW; GOETTLER, 1968 apud WARDLAW, 1994)

Quando o modelo foi testado com a lâmina d'água, segundo Wardlaw e Goettler (1968 apud WARDLAW, 1994), notou-se que os dispositivos triangulares simétricos, os quais funcionavam com sucesso sem a lâmina, tornaram-se menos efetivos. Porém, utilizando dispositivos triangulares assimétricos com o ápice externo do triângulo alinhado com o fundo da viga de borda, o bom desempenho foi restabelecido. A resposta para diferentes larguras de dispositivos é mostrada na figura 15. A modificação selecionada e instalada na atual ponte é a combinação de dispositivos triangulares com 3 m de largura e uma placa de fundo localizada apenas no vão principal.

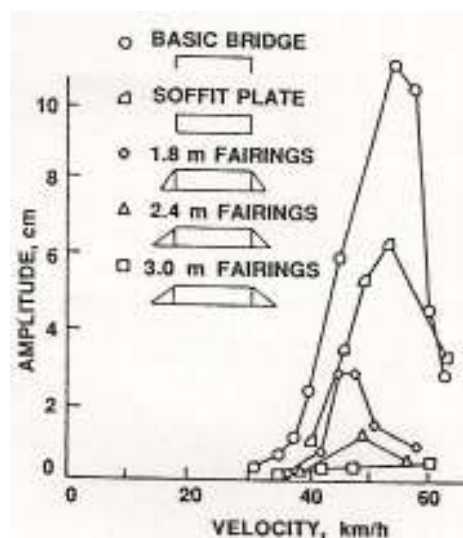


Figura 15: efeitos dos dispositivos aerodinâmicos com lâmina d'água (WARDLAW; GOETTLER, 1968 apud WARDLAW, 1994)

4.2.1.2 Ponte Kessock

De acordo com Wardlaw (1994), várias soluções aerodinâmicas para melhorar o desempenho da Ponte Kessock foram propostas em testes de túnel de vento da Universidade de Glasgow. Um arranjo satisfatório de dispositivos de trinta placas de 2 m x 2 m foi estudado para ser adicionado ao vão principal da ponte. Porém, esta solução foi substituída pela proposta dos amortecedores de massa sintonizados, o qual já foi citado acima.

4.2.2 Pontes de seção caixão

Como comentado por Wardlaw (1994, p. 312), do ponto de vista aerodinâmico, a experiência com pontes já construídas tem sido positiva para as pontes com seção caixão. Com a grande rigidez torsional alcançada por pontes em caixão, o risco de instabilidade torsional pode ser eliminado. As seções caixões são frequentemente projetadas em concreto, e sua grande massa reduz a sensibilidade ao vento. Existem três categorias de seção caixão: o caixão em toda a largura, o caixão central e o caixão com vigas nas extremidades.

Caixão central estreito com grande envergadura tem excitação por vórtices mínima. Mas com maior largura, caixões centrais têm o desempenho aerodinâmico favorecido com a introdução de abas inclinadas. Para o caixão em toda a largura, é normal a introdução de algum dispositivo de borda para suprimir a excitação por vórtices. As configurações de caixões de vigas de borda têm se mostrado satisfatórias, principalmente quando introduzido algum dispositivo de borda. Porém, para vigas de borda mais altas, o tabuleiro se torna propício a excitação por vórtices.

4.2.2.1 Ponte Severn

Como indicado por Frazer e Scruton (1952 apud WARDLAW, 1994), pesquisas inovadoras sobre a Ponte Severn iniciaram logo após as investigações aerodinâmicas da Ponte de Tacoma Narrows. Usando tanto modelo seccional quanto aeroelástico, uma seção caixão estável e fechada foi desenvolvida e incorporada ao projeto final. Esta pesquisa introduziu o conceito de estabilidade alcançada por dispositivos aerodinâmicos. Construída em 1960, foi a primeira

ponte suspensa em caixão. Os passeios prolongados além das bordas do caixão contribuem de maneira positiva para a estabilidade aerodinâmica da estrutura. A seção da ponte Severn pode ser vista na figura 16.

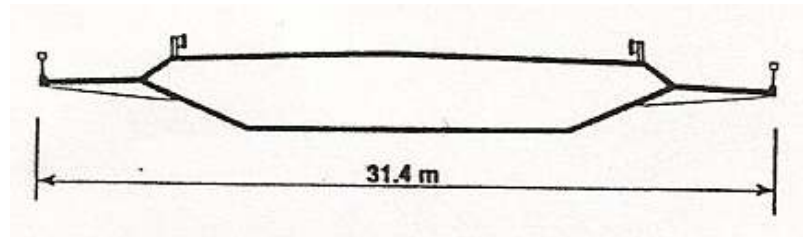


Figura 16: seção transversal do tabuleiro da Ponte Severn (FRAZER; SCRUTON, 1952 apud WARDLAW, 1994)

4.2.2.2 Travessia da Enseada Burrard

Conforme afirma Wardlaw (1969 apud WARDLAW, 1994), várias configurações de tabuleiro foram investigadas para uma proposta Travessia da Enseada Burrard, Canadá. Entre estas estava uma seção caixão similar a da Ponte Severn, mas sem os passeios laterais. Um bom desempenho foi alcançado, mas percebeu-se que a seção era sensível às pequenas mudanças em detalhes da borda. Uma seção particularmente estável é mostrada na figura 17, onde um nariz não estrutural foi adicionado à borda da seção caixão.

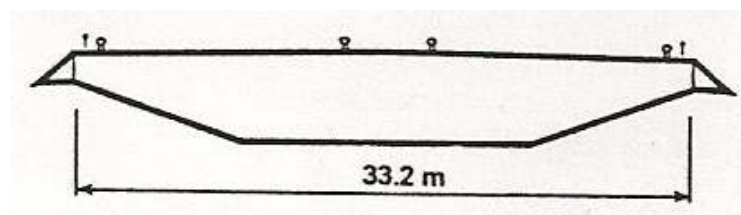


Figura 17: seção proposta para a Travessia da Enseada Burrard (WARDLAW, 1969 apud WARDLAW, 1994)

4.2.2.3 Ponte Lillebaelt

A seção inovadora em caixão de aço é mostrada na figura 18. Conforme Ostefeld et al. (1966 apud WARDLAW, 1994) uma característica incomum deste projeto é a transição encurvada da pista do tabuleiro para as abas inclinadas da borda, combinado com abas de vento sobre o tabuleiro para melhorar o escoamento e minimizar a excitação por desprendimento de vórtices. O uso de abas de vento para melhorar o desempenho aerodinâmico tem recebido considerável atenção no Japão.

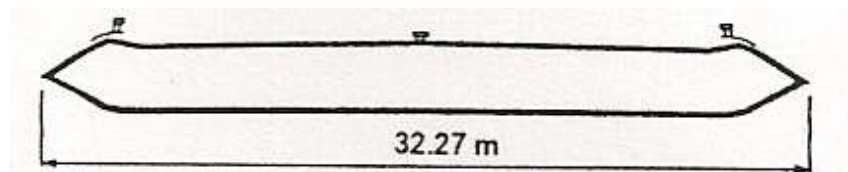


Figura 18: seção transversal do tabuleiro da Ponte Lillebaelt (OSTENFELD et al., 1966 apud WARDLAW, 1994)

4.2.2.4 Ponte Papineau

A Ponte Papineau, mostrada na figura 19, é um exemplo de caixão de aço, o qual mesmo sendo retangular e estreito, com a grande envergadura dos passeios laterais, foi testado em túnel de vento e seu desempenho aerodinâmico teve um comportamento aceitável mesmo sem modificações (WARDLAW, 1968 apud WARDLAW, 1994).

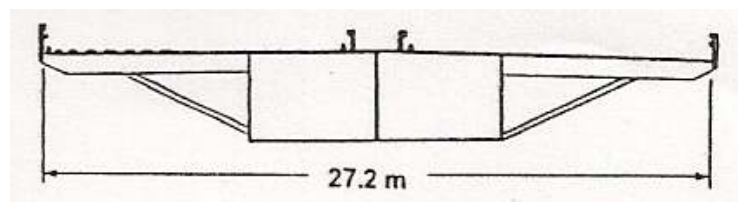


Figura 19: seção transversal do tabuleiro da Ponte Papineau (WARDLAW, 1968 apud WARDLAW, 1994)

4.2.2.5 Ponte Skarnsund

Hoje, no mundo, existem muitos exemplos de pontes com caixões em toda a largura, tanto em concreto como em aço, os quais incorporam abas inclinadas e têm tabuleiros com a parte inferior em ângulo variável. A figura 20 ilustra esta configuração incomum recentemente acabada, com 910 m de vão, caixão triangular de concreto e uma pequena envergadura do tabuleiro. Desempenho satisfatório foi demonstrado em testes de túnel de vento (FERRARO; IRWIN, 1989 apud WARDLAW, 1994).

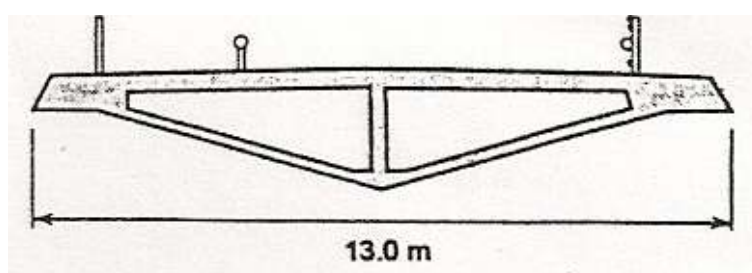


Figura 20: seção transversal do tabuleiro da Ponte Skarnsund (FERRARO; IRWIN, 1989 apud WARDLAW, 1994)

4.2.2.6 Ponte Pasco-Kennewick

A Ponte Pasco-Kennewick atravessa o rio Columbia. É uma ponte estaiada com comprimento total de 757 m e vão central de 299 m entre as torres. O tabuleiro de concreto mostrado na figura 21 possui vigas de borda triangulares, com guarda-corpos e guarda-rodas abertos. Os testes em túnel de vento foram feitos com ângulos de vento entre -4° e $+4^\circ$ (WARDLAW, 1974 apud WARDLAW, 1994). Não foram observadas excitações por desprendimento de vórtices e a instabilidade torsional ocorreu apenas para velocidades do vento muito maiores do que a de projeto. Os testes foram realizados para alturas de nível d'água entre 14 m e 20 m, e foi verificado que o nível da água tem pequeno efeito no desempenho aerodinâmico da ponte.

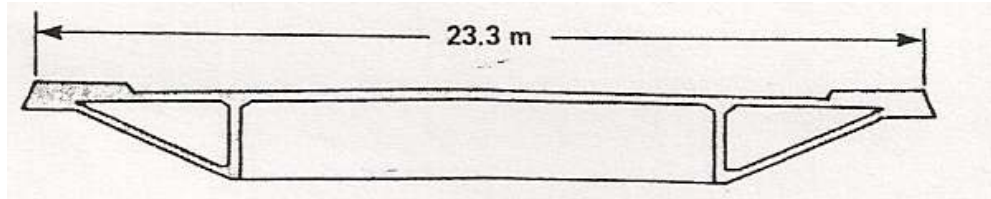


Figura 21: seção transversal do tabuleiro da Ponte Pasco-Kennewick (WARDLAW, 1974 apud WARDLAW, 1994)

4.2.3 Pontes treliçadas

Os tabuleiros treliçados são menos propensos a oscilações causadas pelo vento do que tabuleiros tipo placa. A instabilidade torsional pode ser um problema, mas adequada rigidez torsional pode forçar a velocidade crítica a valores seguros. Como indicado por Irwin e Wardlaw (1976 apud WARDLAW, 1994), testes em modelo seccional da Ponte Lions' Gate demonstraram que o dispositivo da figura 22 usado em combinação com guarda-rodas abertos, melhoraram substancialmente a velocidade crítica para instabilidade torsional. Testes com dispositivos dispostos parcialmente no vão mostraram que quando foram instalados em 12,8% do vão central, a instabilidade foi eliminada, pelo menos para os intervalos de velocidade do vento testados. Porém, para apenas 5,8% do vão coberto, o efeito foi pequeno.

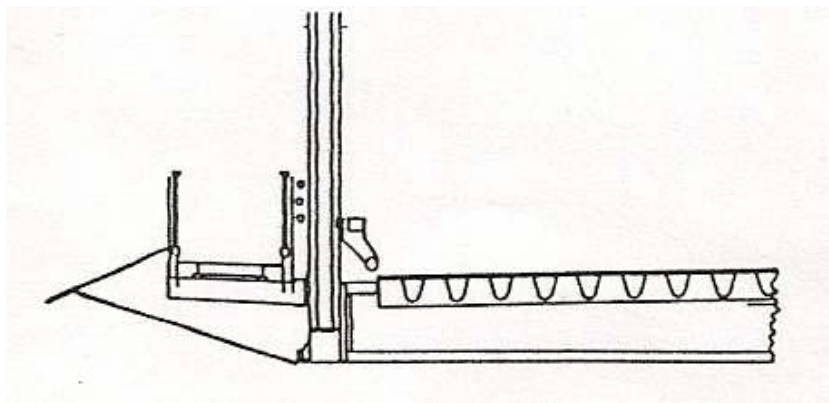


Figura 22: dispositivos de borda para a Ponte Lions' Gate (IRWIN; WARDLAW, 1976 apud WARDLAW, 1994)

A resposta para dispositivos cobrindo parcialmente o vão é apresentado na figura 23 (IRWIN; SCHUYLER, 1977 apud WARDLAW, 1994).

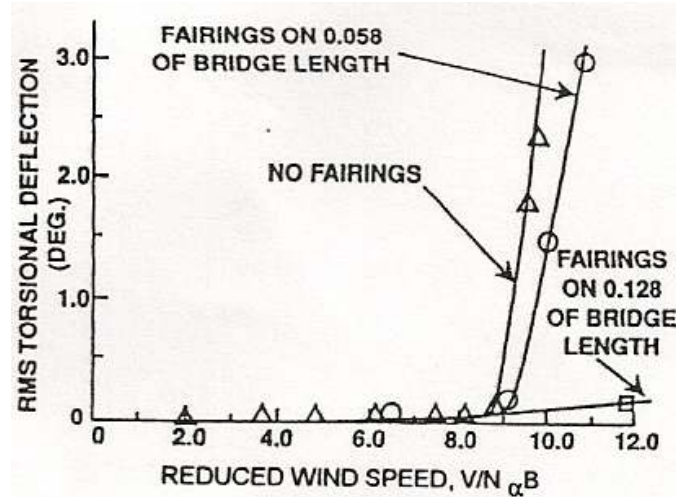


Figura 23: efeitos dos dispositivos cobrindo parcialmente o vão (IRWIN; SCHUYLER, 1977 apud WARDLAW, 1994)

4.3 ESTUDOS DE LARSEN (1998)

De acordo com Larsen (1998), foram ensaiadas cinco seções transversais genéricas em simulação computacional. A primeira seção da figura 24 abaixo é uma seção transversal tipo H, similar a primeira Ponte de Tacoma. A seção tipo C (calha) é a mesma que a tipo H, acrescida de uma placa na parte superior. Observando-se a seção R (retangular), verifica-se que se trata da seção C com a adição de uma placa na parte inferior. A seção tipo CE (calha/extremidade) é obtida acrescentando um dispositivo aerodinâmico de extremidade triangular. Por fim, a seção B (caixão) trata-se da seção CE acrescida de fechamento da superfície inferior. O escoamento simulado apresentou número de Reynolds da ordem de 10^5 . Estas simulações proporcionaram os valores de coeficiente de arrasto das seções (C_a), coeficiente de sustentação RMS (C_s^{RMS}) e o número de Strouhal.

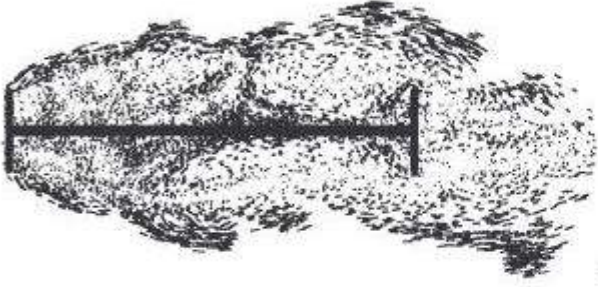
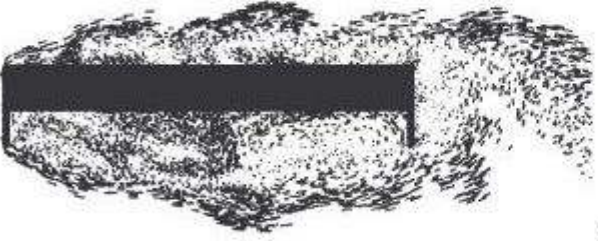
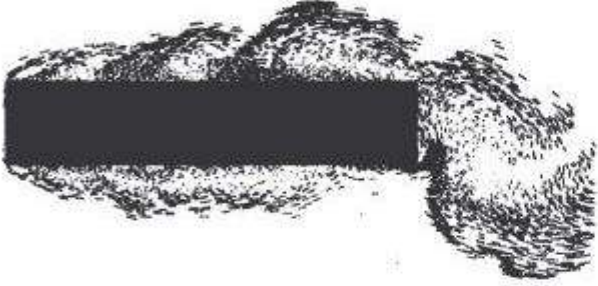
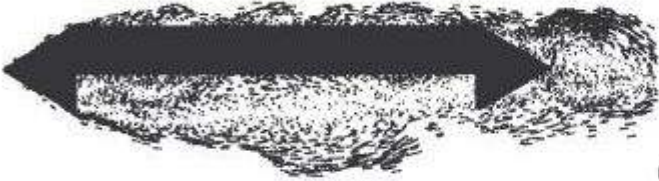

Escoamento em torno das seções transversais	C_a	C_s^{RMS}	St
 H	0.28	0.37	0.11
 C	0.23	0.33	0.11
 R	0.23	0.24	0.09
 CE	0.16	0.34	0.09
 B	0.11	0.17	0.13

Figura 24: campos de escoamento e valores de C_a , C_s^{RMS} e St (LARSEN, 1998)

Analisando-se os valores obtidos por Larsen (1998) para as seções estudadas, observa-se que houve reduções consideráveis para os valores de coeficientes de arrasto e de sustentação. Comparando-se a seção mais rombuda (H) com a seção mais aerodinâmica (B), a redução do coeficiente de arrasto foi de cerca de 60%, e a redução do coeficiente de sustentação de aproximadamente 55%. Estes resultados mostram a importância da utilização de dispositivos aerodinâmicos como narizes de vento e placas de fundo.

4.4 ESTUDOS DE ROCHA et al. (2003)

Para o caso da ponte estaiada sobre o rio Guamá, duas configurações transversais de tabuleiros foram ensaiadas por Rocha et al. (2003). As configurações I e II, as quais se diferem pelos guarda-corpos e guarda-rodas, são mostradas nas figuras 25 e 26.

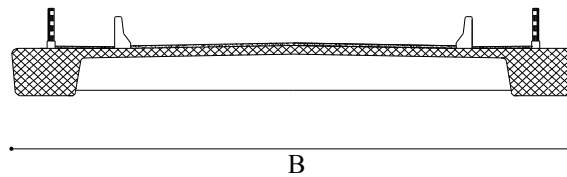


Figura 25: seção transversal correspondente à configuração I (ROCHA et al., 2003)

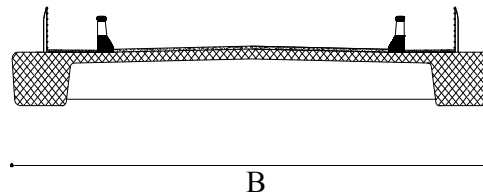


Figura 26: seção transversal correspondente à configuração II (ROCHA et al., 2003)

Os ensaios realizados pelos autores levaram aos resultados para os coeficientes aerodinâmicos apresentados nas figuras 27 a 29. Nestas figuras são mostrados os valores obtidos para o escoamento turbulento e o escoamento suave, para que as comparações pudessem ser feitas. Os valores foram medidos para ângulos de incidência do vento entre -8° e $+8^\circ$, com intervalos de 1° .

Nota-se pela figura 27 que os coeficientes de arrasto para a configuração I são sempre maiores que para a configuração II. Porém, para os coeficientes de sustentação na figura 28, os resultados mudam de acordo com o ângulo de incidência do vento, apresentando valores ligeiramente mais altos para a configuração II. Já para a torção na figura 29, os valores apresentaram pequenas diferenças de comportamento em função do ângulo, indicando a influência do tipo do guarda-corpo e guarda-rodas.

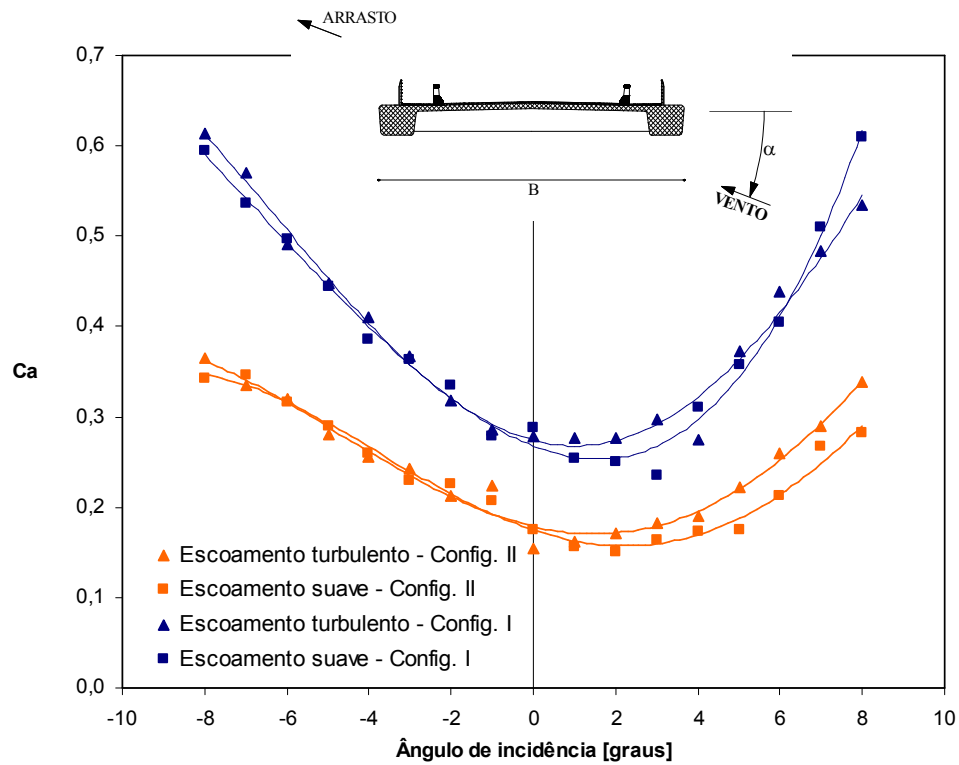


Figura 27: coeficiente de arrasto (ROCHA et al., 2003)

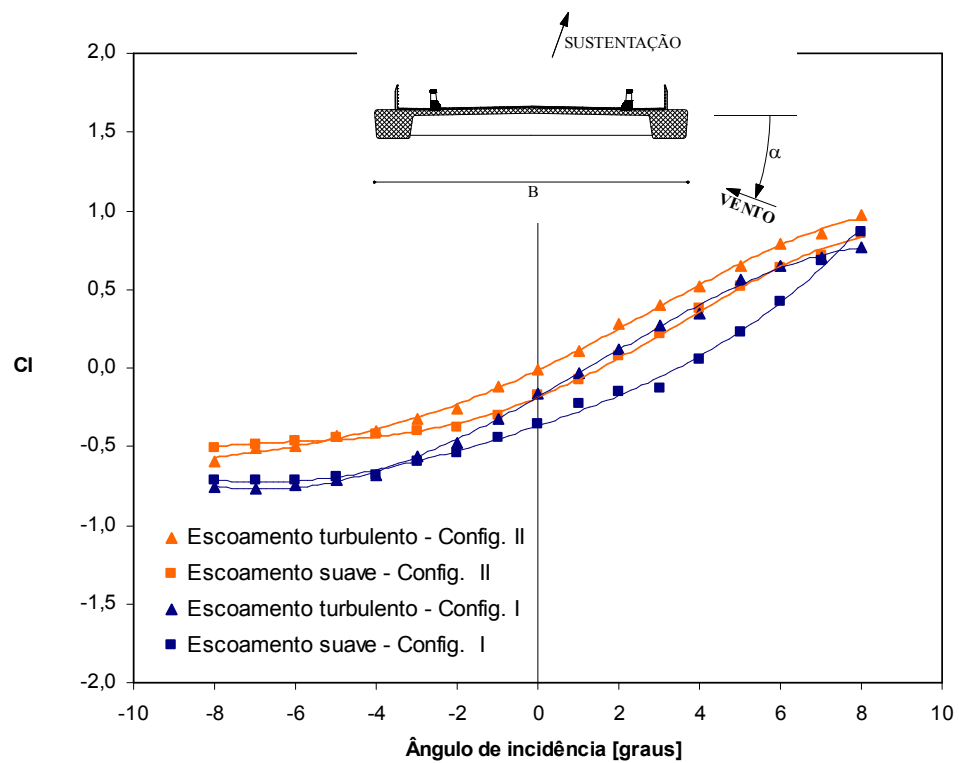


Figura 28: coeficiente de sustentação (ROCHA et al., 2003)

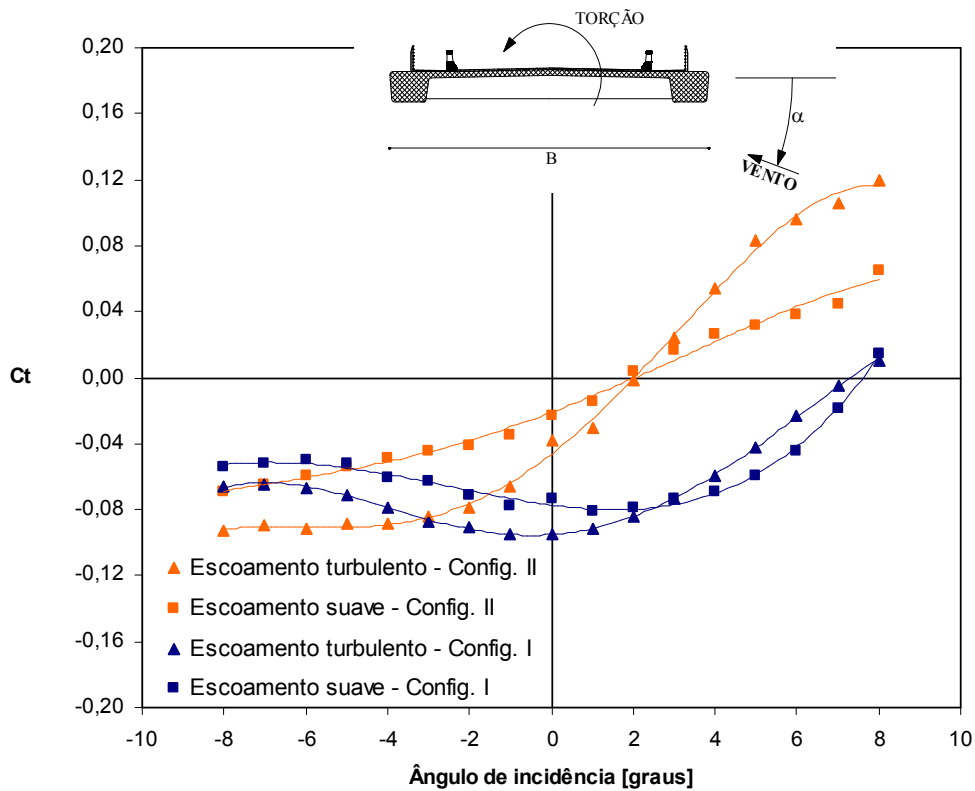


Figura 29: coeficiente de torção (ROCHA et al., 2003)

O quadro 3 abaixo mostra um resumo dos coeficientes de arrasto, sustentação e torção obtidos para escoamento suave e turbulento, para ambas as configurações e ângulo de ataque do vento de 0° .

	Configuração I		Configuração II	
	Suave	Turbulento	Suave	Turbulento
$C_a (0^\circ)$	0,239	0,231	0,175	0,155
$C_s (0^\circ)$	-0,299	-0,134	-0,176	-0,006
$C_t (0^\circ)$	-0,061	-0,079	-0,023	-0,038

Quadro 3: resumo dos resultados das configurações I e II (ROCHA et al., 2003)

4.5 ESTUDOS DE LOREDO-SOUZA et al. (2007)

Segundo Loredo-Souza et al. (2007), os estudos em túnel de vento do Complexo Viário Jornalista Roberto Marinho para a determinação das velocidades críticas de drapejamento e desprendimento de vórtices foram realizados para duas configurações distintas de seção transversal do tabuleiro. A primeira configuração refere-se ao tabuleiro original, e a segunda, ao original acrescido de dispositivo aerodinâmico tipo nariz de vento nas bordas. Para a realização dos ensaios para a obtenção dos deslocamentos (vertical e rotacional) foram adotados modelos reduzidos seccionais na escala 1:50. Nas figuras 30 a 33 são mostrados os resultados obtidos para escoamento suave. Os gráficos mostram resultados de deslocamento e rotação, em pico e rms, para as duas seções estudadas, para ângulos de incidência do vento de -4° e $+4^\circ$, além de duas situações de amortecimento mecânico, natural e para 1%.

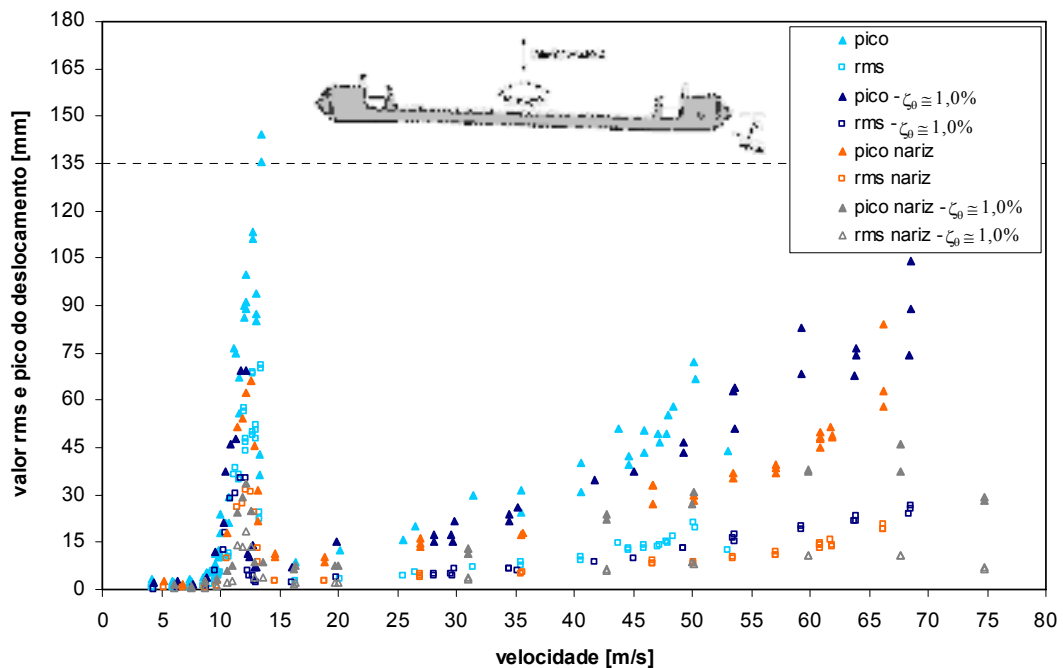


Figura 30: deslocamento para vento na borda inferior com ângulo de -4°
(LOREDO-SOUZA et al., 2007)

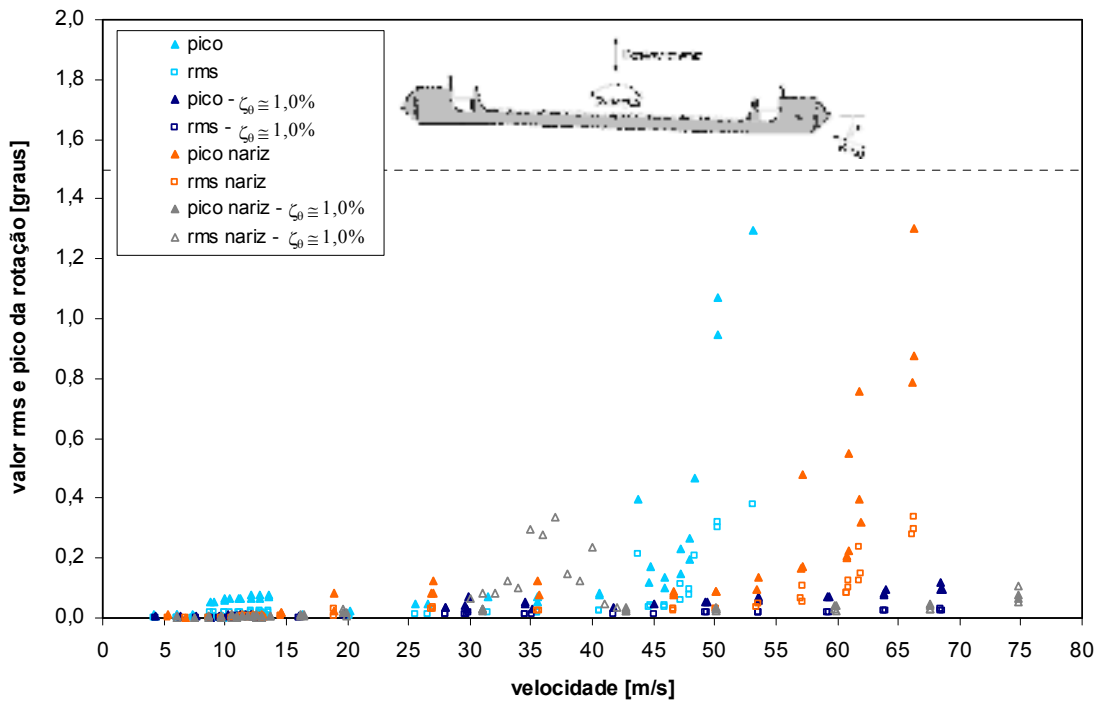


Figura 31: rotação para vento na borda inferior com ângulo de -4°
(LOREDO-SOUZA et al., 2007)

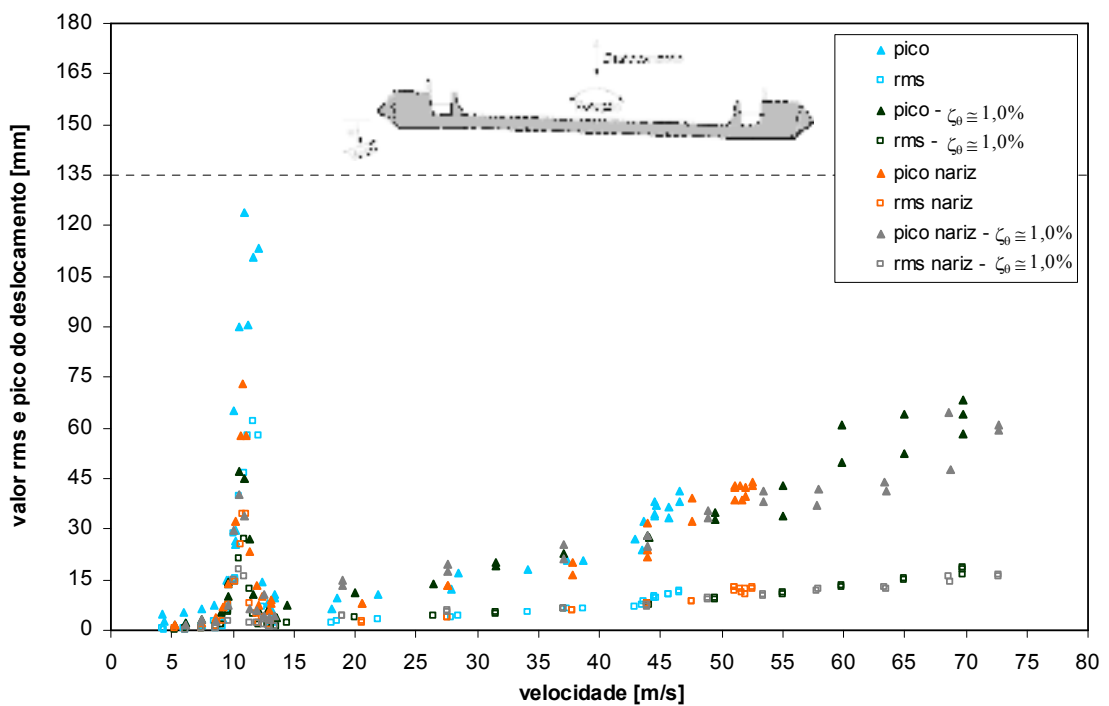


Figura 32: deslocamento para vento na borda superior com ângulo de $+4^\circ$
(LOREDO-SOUZA et al., 2007)

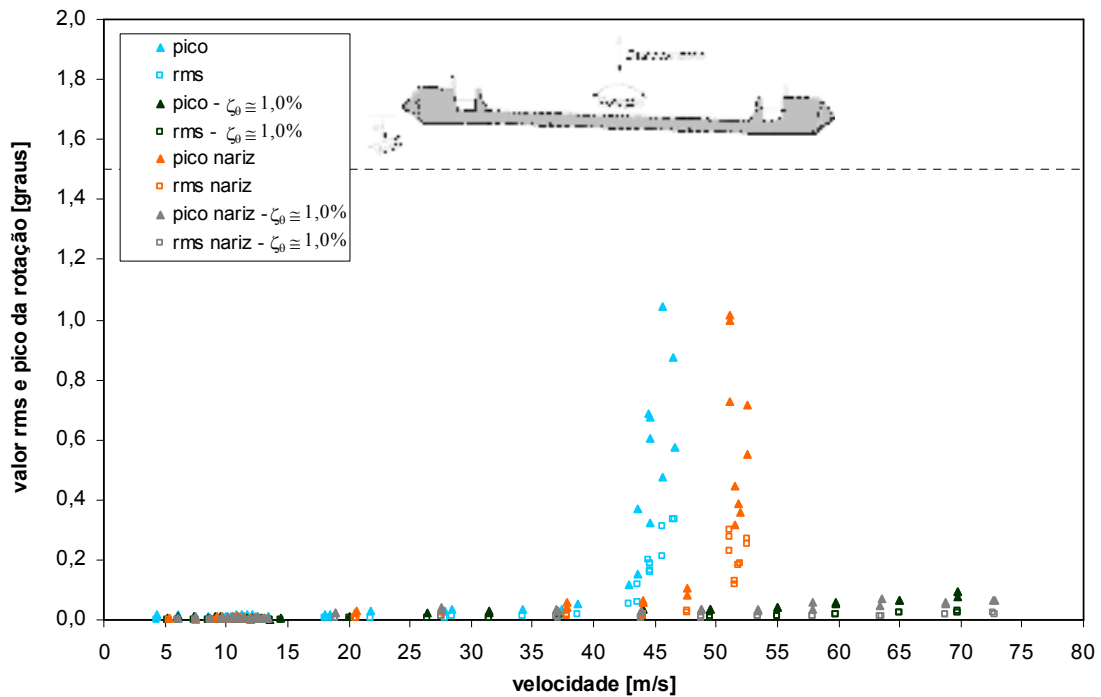


Figura 33: rotação para vento na borda superior com ângulo de $+4^\circ$
(LOREDO-SOUZA et al., 2007)

Observando os resultados dos gráficos, os valores dos deslocamentos devidos ao desprendimento de vórtices foram eliminados ou reduzidos em mais de 50% quando o amortecimento mecânico foi aumentado. Já para o drapejamento, o amortecimento eliminou o fenômeno para as velocidades até 75 m/s. O nariz de vento causou melhorias substanciais no desempenho da ponte, tanto em termos das amplitudes dos deslocamentos devido ao desprendimento de vórtices, quanto para as velocidades críticas de drapejamento. As melhorias devido ao nariz de vento para o desprendimento de vórtices são da mesma magnitude das melhorias alcançadas graças ao incremento do amortecimento mecânico.

4.6 ESTUDOS DE KING E DAVENPORT (1992)

Segundo King e Davenport (1992), foram realizados estudos dos efeitos do vento para a Ponte de Seo Hae, na Coreia. Além da configuração original do tabuleiro, mais doze configurações com dispositivos aerodinâmicos foram testadas. As seções transversais testadas são mostradas na figura 34.

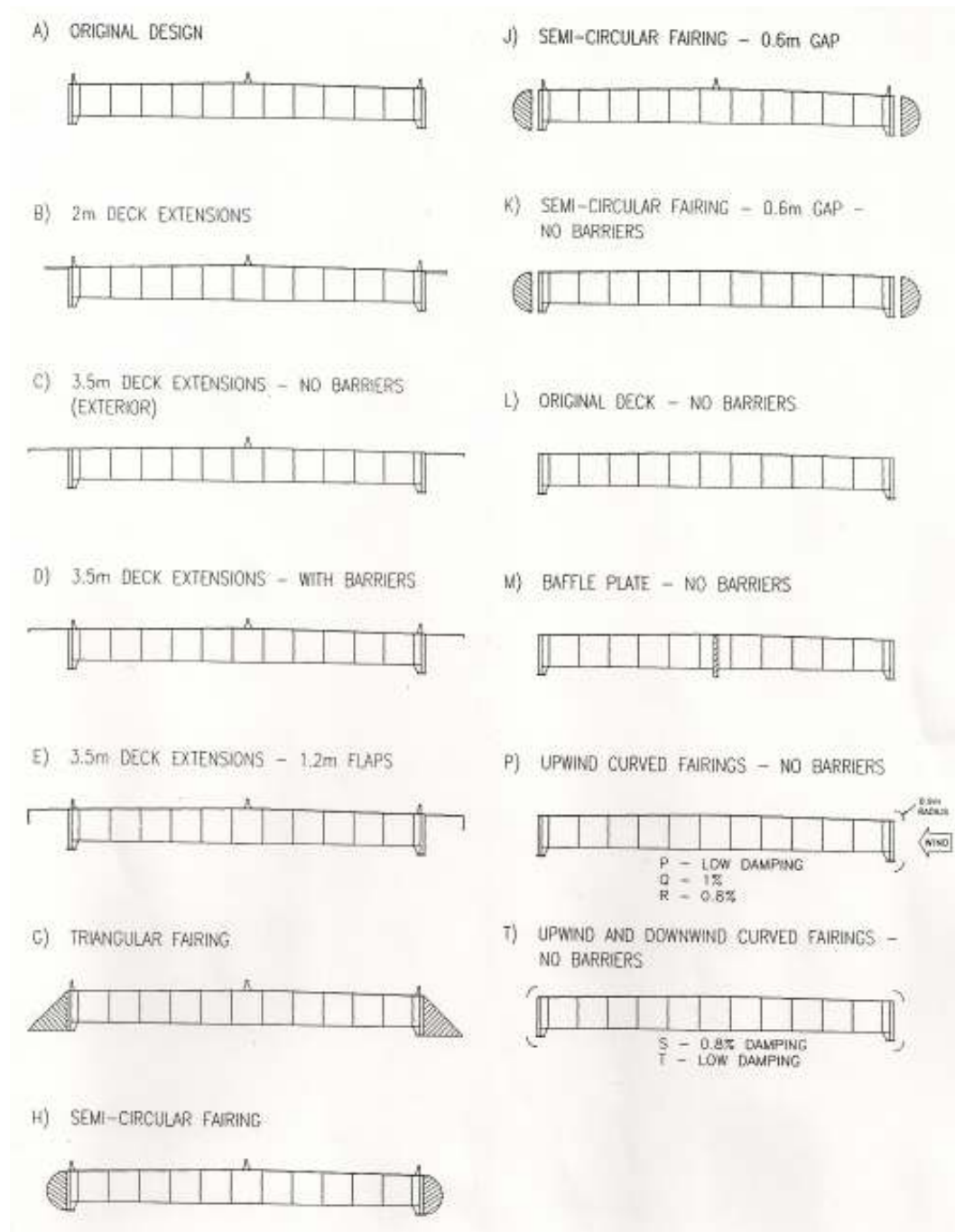


Figura 34: configurações para o tabuleiro da Ponte Seo Hae (KING; DAVENPORT, 1992)

Os resultados mostrados nas figuras 35 a 40 referem-se às configurações A (projeto original) e T (dispositivos curvos superiores e inferiores) para coeficientes de arrasto, sustentação e torção. A configuração T foi a configuração que apresentou o melhor desempenho frente à ação do vento.

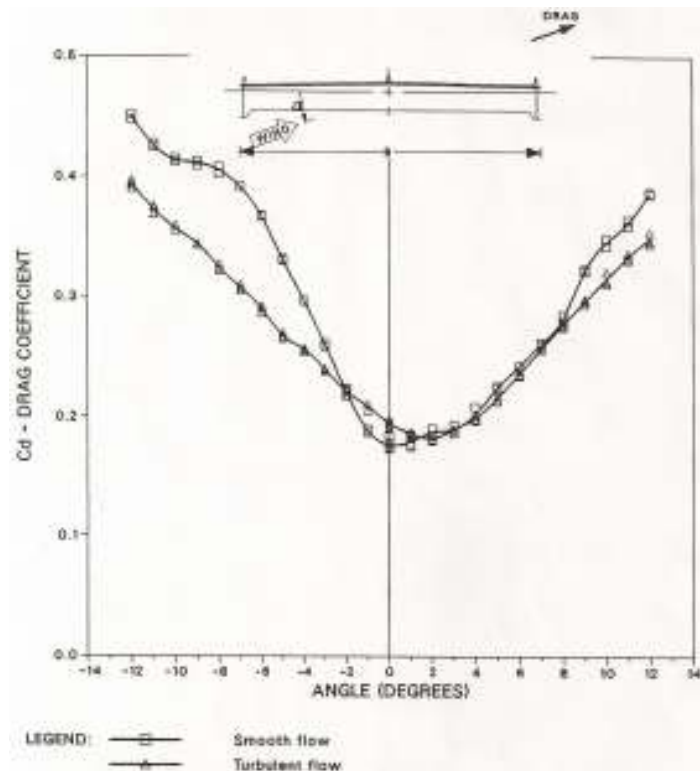


Figura 35: coeficientes de arrasto para a configuração A (KING; DAVENPORT, 1992)

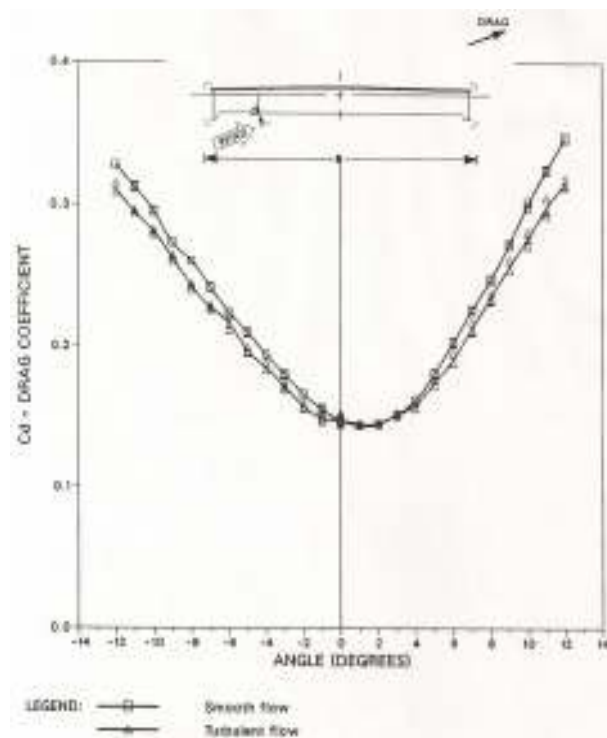


Figura 36: coeficientes de arrasto para a configuração T (KING; DAVENPORT, 1992)

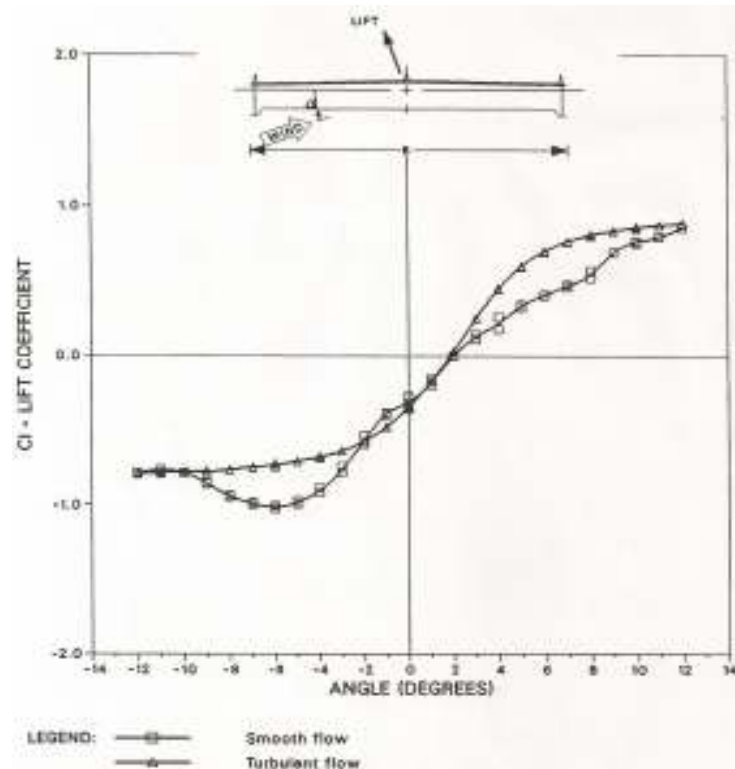


Figura 37: coeficientes de sustentação para a configuração A (KING; DAVENPORT, 1992)

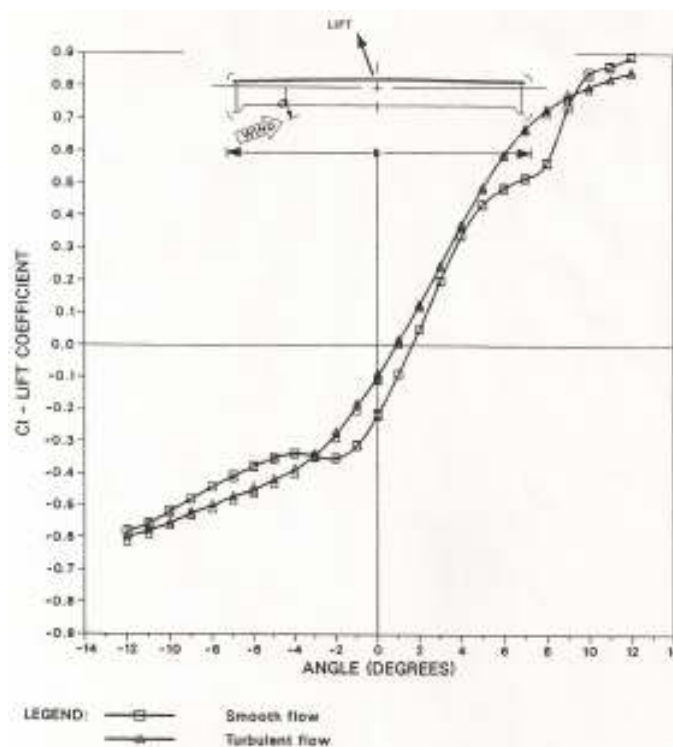


Figura 38: coeficientes de sustentação para a configuração T (KING; DAVENPORT, 1992)

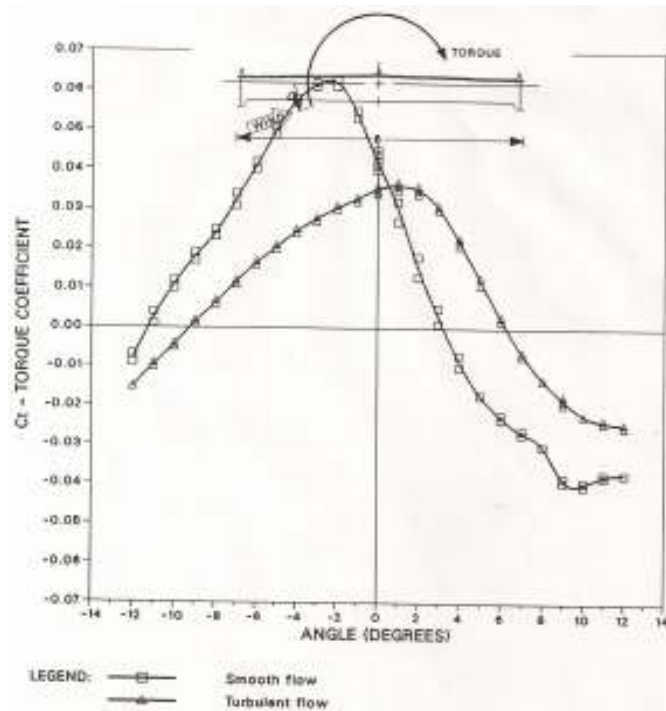


Figura 39: coeficientes de torção para a configuração A (KING; DAVENPORT, 1992)

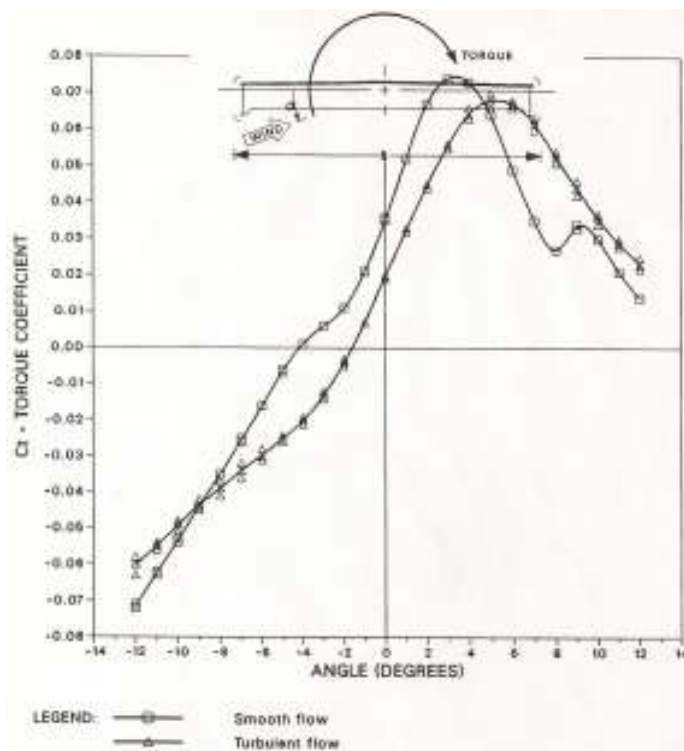


Figura 40: coeficientes de torção para a configuração T (KING; DAVENPORT, 1992)

Observando os gráficos das figuras 35 e 36, percebe-se que a redução do coeficiente de arrasto pode chegar até cerca de 25% para determinados ângulos de incidência do vento. Para os gráficos das figuras 37 e 38, percebe-se que os coeficientes de sustentação para valores positivos de ângulos de incidência do vento não apresentaram diferenças significativas. Já para ângulos negativos, houve redução de até 60% para -6° em escoamento suave. Para os coeficientes de torção, pelas figuras 39 e 40 percebe-se que a seção original apresenta melhores resultados que a seção com dispositivos curvos, pois apesar de valores mais baixos de coeficientes de torção, a seção T pode ser considerada mais estabilizadora.

O quadro 4 apresenta um resumo dos picos de amplitudes de deslocamento e rotação alcançados para desprendimento de vórtices pelas treze configurações estudadas.

Configuração	Picos para Desprendimento de Vórtices			Velocidade Crítica de Drapejamento
	Desloc. Vertical (v=8m/s)	Desloc. Vertical (v=17m/s)	Torsional (v=8m/s)	
A	0,05m	0,44m	não observado	52m/s
B	0,25m	0,55m	não observado	45m/s
C	0,15m	0,65m	não observado	> 65m/s
D	0,15m	0,90m	> 2°	-
E	0,10m	0,60m	> 2°	> 65m/s
G	0,15m	0,75m	não observado	50m/s
H	0,28m	0,54m	não observado	45m/s
J	0,30m	0,35m	não observado	50m/s
K	0,20m	0,50m	não observado	48m/s
L	0,10m	0,55m	não observado	40m/s
M	0,10m	0,40m	não observado	48m/s
P	0,10m	0,15m	não observado	52m/s
T	0,12m	0,30m	não observado	47m/s

Quadro 4: resultados dos deslocamentos para a Ponte Seo Hae (KING; DAVENPORT, 1992)

Os melhores valores são obtidos com as configurações P e T, as quais possuem dispositivos curvos nas bordas do tabuleiro. Além dos valores para desprendimento de vórtices, tem-se também a velocidade crítica de drapejamento para todas as configurações.

4.7 ESTUDOS DE LIMAS (2003)

Segundo Limas (2003), foram ensaiadas em túnel de vento as formas mais usuais de seções transversais de pontes. Para a realização do ensaio foram considerados variações do tipo de escoamento, ou seja, suave ou turbulento, variação do ângulo de ataque do vento, e a velocidade do escoamento para os diversos modelos ensaiados. Através dos modelos seccionais reduzidos foi possível obter os valores de pressão média e a partir destes determinados os coeficientes de pressão e os coeficientes aerodinâmicos estáticos, como o coeficiente de arrasto, o coeficiente de sustentação e o coeficiente de torção. Os modelos ensaiados por Limas tinham como objetivo obter resultados para as formas de seções de pontes mais usuais entre os projetistas. Para tal, foi adotado um modelo padrão de seção caixão retangular, ao qual foram acoplados dispositivos aerodinâmicos que levaram ao total de cinco seções estudadas, as quais foram nomeadas pelos algarismos romanos entre I e V. Além destes, mais três modelos foram ensaiados por Limas (2003). O modelo VI é semelhante ao modelo I, porém mais esbelto, criando um efeito de placa. O modelo VII tem como finalidade comparar os valores para o modelo VI com as dimensões dobradas, para se obter as diferenças em escala. O modelo VIII é uma seção típica H, de mesma forma que a Ponte de Tacoma, os quais serviram de parâmetros devido aos dados obtidas da bibliografia existente. As dimensões dos modelos foram determinadas a partir da Ponte de Tacoma, na escala de 1:60. Com isto, o modelo padrão tipo H ficou com dimensões de comprimento igual a 1200 mm, largura da seção transversal (B) de 200 mm e altura de $0,2B$, ou seja, 40 mm. Os outros modelos foram construídos a partir das dimensões do modelo padrão e podem ser conferidos na figura 41 abaixo.

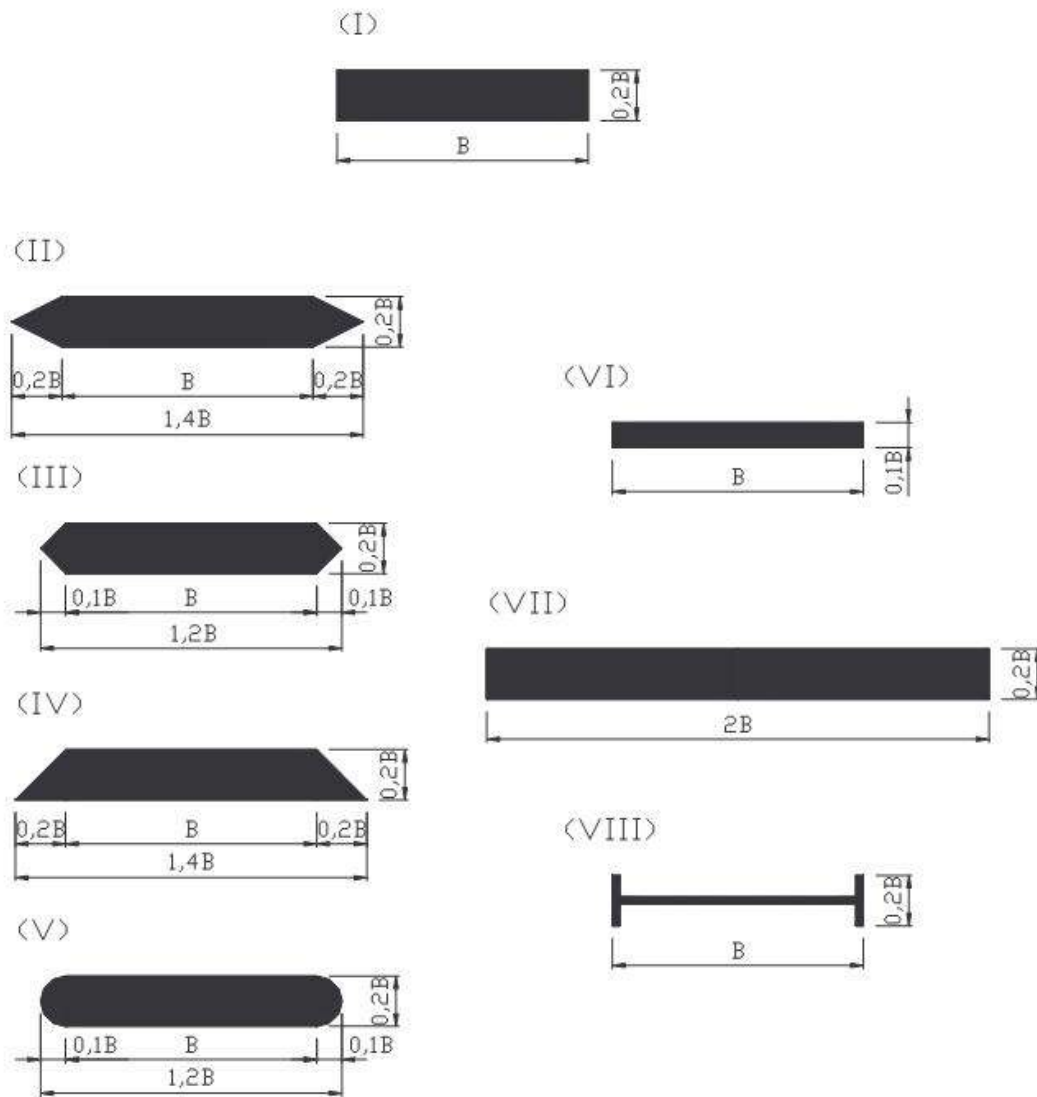


Figura 41: modelos ensaiados (LIMAS, 2003)

Para a medição das pressões ao longo de toda a seção transversal do tabuleiro foram utilizados manômetros a álcool, os quais fornecem os valores médios de pressão na superfície do corpo. A distribuição das tomadas ao longo de toda a seção permitiu o levantamento das pressões para ângulo de incidência do vento variando de -8° a $+8^\circ$, com intervalos de 1° .

Os resultados completos obtidos por Limas (2003) podem ser encontrados no referido trabalho. Neste trabalho, serão apresentados apenas quadros com resumos dos valores obtidos, e gráficos exemplificando os resultados dos ensaios no túnel de vento. Os resultados resumidos obtidos foram passados para os quadros de 4 a 11 a seguir.

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb	Ct suave	Ct turb.
-8	0,41	0,37	-0,63	-0,74	0,03	-0,02
-4	0,31	0,27	-0,55	-0,63	0,06	-0,05
0	0,22	0,22	-0,01	-0,02	0,00	0,00
4	0,29	0,26	0,38	0,52	-0,06	0,05
8	0,40	0,35	0,59	0,74	-0,04	0,02

Quadro 4: coeficientes aerodinâmicos do Modelo I (LIMAS, 2003)

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb	Ct suave	Ct turb.
-8	0,05	0,07	-0,73	-0,63	-0,23	-0,20
-4	0,05	0,06	-0,28	-0,27	-0,1	-0,09
0	0,06	0,06	0,06	0,05	-0,02	-0,02
4	0,11	0,08	0,49	0,4	0,05	0,07
8	0,10	0,11	0,85	0,8	0,2	0,19

Quadro 5: coeficientes aerodinâmicos do Modelo II (LIMAS, 2003)

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb	Ct suave	Ct turb.
-8	0,21	0,17	-0,76	-0,88	-0,10	-0,17
-4	0,13	0,10	-0,58	-0,4	-0,12	-0,09
0	0,12	0,10	-0,01	-0,01	0,00	0,00
4	0,15	0,12	0,62	0,46	0,10	0,09
8	0,22	0,19	0,75	0,89	0,06	0,14

Quadro 6: coeficientes aerodinâmicos do Modelo III (LIMAS, 2003)

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb	Ct suave	Ct turb.
-8	0,29	0,27	-0,72	-0,80	-0,08	-0,18
-4	0,17	0,16	-0,61	-0,40	-0,10	-0,15
0	0,11	0,11	0,03	0,02	-0,07	-0,06
4	0,14	0,11	0,50	0,53	-0,02	0,04
8	0,20	0,18	0,39	0,76	-0,03	0,04

Quadro 7: coeficientes aerodinâmicos do Modelo IV (LIMAS, 2003)

α [°]	Ca suave 1	Ca suave 2	Ca turb.	Cs suave 1	Cs suave 2	Cs turb.	Ct suave 1	Ct suave 2	Ct turb.
-8	0,22	0,17	0,10	-0,67	-0,91	-0,85	-0,06	-0,20	-0,21
-4	0,12	0,11	0,09	-0,67	-0,54	-0,44	-0,11	-0,13	-0,12
0	0,11	0,14	0,09	0,07	0,07	0,05	0,00	0,00	-0,01
4	0,13	0,12	0,10	0,72	0,63	0,52	0,09	0,11	0,11
8	0,21	0,21	0,15	0,91	0,96	0,89	0,12	0,15	0,19

Quadro 8: coeficientes aerodinâmicos do Modelo V (LIMAS, 2003)

O modelo V foi ensaiado em duas situações distintas para o escoamento suave, sendo classificadas em escoamento suave tipo 1 e escoamento suave tipo 2, com números de Reynolds respectivamente iguais a 6×10^4 e $9,1 \times 10^4$.

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb.	Ct suave	Ct turb.
-8	0,22	0,25	-0,55	-0,91	-0,01	-0,10
-4	0,16	0,15	-0,62	-0,56	-0,02	-0,11
0	0,11	0,12	0,00	0,01	0,00	0,00
4	0,17	0,15	0,62	0,52	0,03	0,10
8	0,22	0,25	0,54	0,90	0,01	0,12

Quadro 9: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VI (LIMAS, 2003)

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb.	Ct suave	Ct turb.
-8	0,24	0,24	-0,62	-0,86	-0,01	-0,10
-4	0,16	0,15	-0,65	-0,53	-0,02	-0,10
0	0,13	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,16	0,14	0,65	0,50	0,03	0,10
8	0,23	0,26	0,62	0,97	0,01	0,12

Quadro 10: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VII (LIMAS, 2003)

α [°]	Ca suave	Ca turb.	Cs suave	Cs turb.	Ct suave	Ct turb.
-8	0,44	0,46	-0,66	-0,85	0,05	0,07
-4	0,33	0,36	-0,38	-0,57	0,02	0,06
0	0,28	0,34	-0,04	-0,03	0,01	0,00
4	0,34	0,40	0,44	0,66	-0,04	-0,05
8	0,49	0,49	0,79	0,83	-0,04	-0,08

Quadro 11: coeficientes aerodinâmicos do Modelo VIII (LIMAS, 2003)

Além dos quadros com resumos, os ensaios utilizam-se de gráficos para melhor compreensão e análise dos resultados. Nas figuras 42 e 43 abaixo há dois gráficos exemplificados para o modelo III, os quais facilitam estas análises.

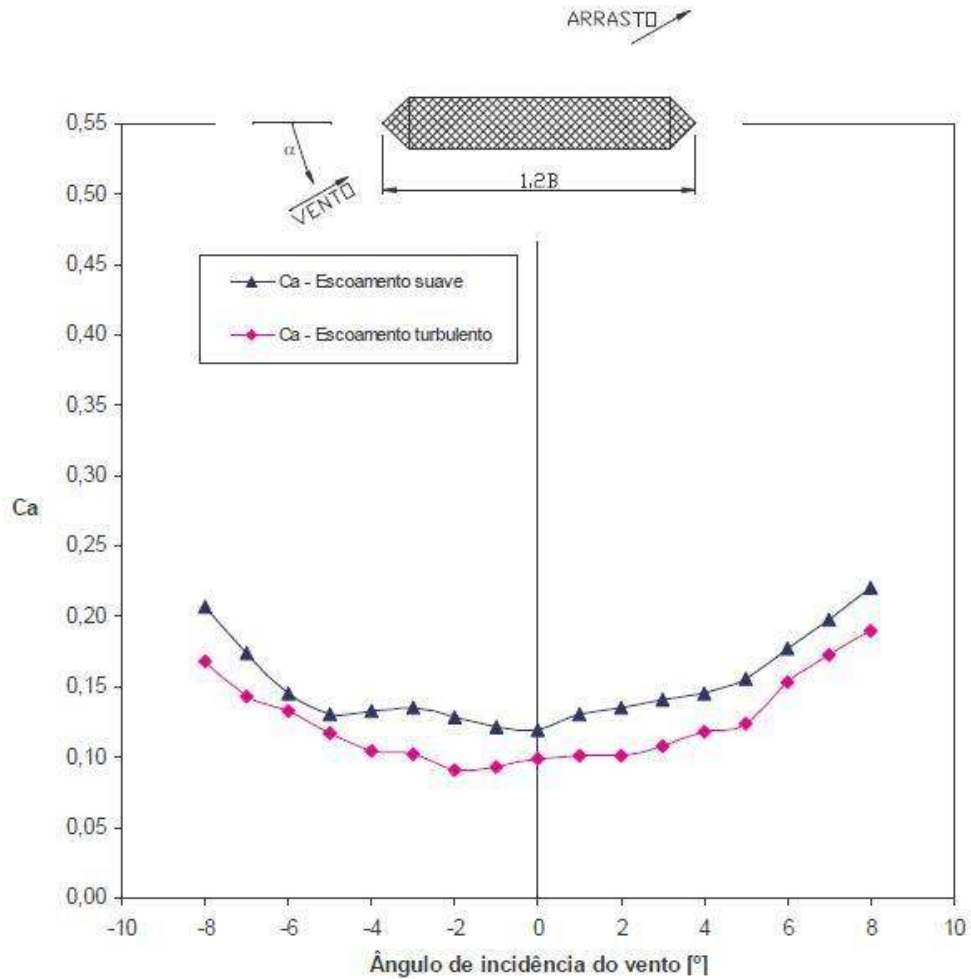


Figura 42: coeficientes de arrasto do modelo III (LIMAS, 2003)

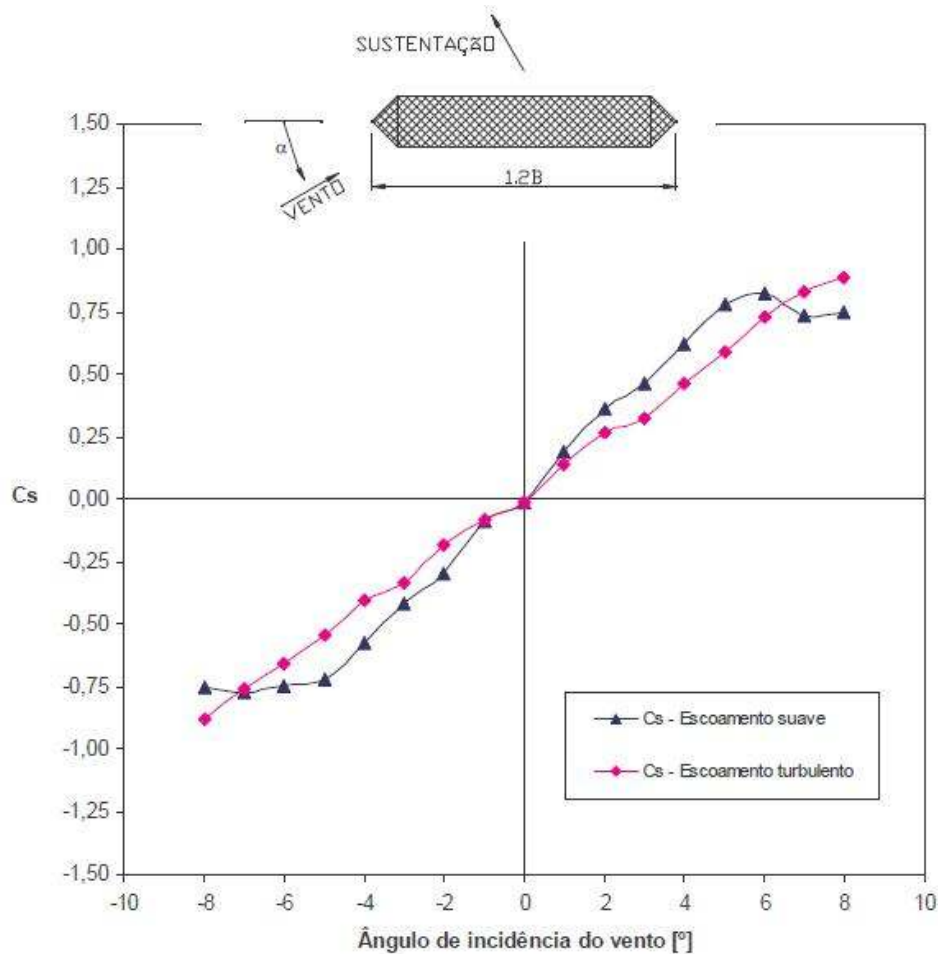


Figura 43: coeficientes de sustentação do modelo III (LIMAS, 2003)

Ainda segundo Limas (2003), a seção rombuda tipo H, não aerodinâmica, conforme já esperado por embasamento na literatura existente, apresentou coeficientes de arrasto elevados para o modelo VIII, o que também foi verificado para o modelo I, o qual também apresenta seção rombuda. Os modelos III, IV, e V apresentaram valores aproximadamente 50% menores para o coeficiente de arrasto, pois os modelos receberam melhorias significativas devido ao implemento dos dispositivos aerodinâmicos. As seções dos modelos VI e VII tiveram seus coeficientes de arrasto melhorados devido à mudança de dimensões da seção e consequente diminuição da área de obstrução do vento. Os melhores coeficientes de arrasto foram observados para o modelo II, com características altamente aerodinâmicas, apontando valores da ordem de 25% dos valores mais desfavoráveis.

Para os coeficientes de sustentação, os resultados variam bruscamente conforme o ângulo de incidência do vento e o regime de escoamento, apresentando os melhores resultados para o modelo II.

Já para o coeficiente de torção, apesar do bom desempenho do modelo II frente aos coeficientes de arrasto e sustentação, apresentou, junto com o modelo V, os piores resultados dos ensaios se comparados aos valores obtidos para os outros modelos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a evolução tecnológica e o crescimento exponencial do conhecimento moderno, materiais mais leves e esbeltos passaram a ser utilizados na construção de grandes pontes. Com isso o vento passou a ser uma das principais cargas atuantes, à qual deve ser dada a devida importância. Considerando-se estes fatos, busca-se neste trabalho entender a influência que os dispositivos aerodinâmicos podem causar nas pontes.

Foram analisados no trabalho variados tipos de dispositivos normalmente aplicados, tais como: narizes de vento, bordas circulares, guarda-rodas diferenciados, perfurações de chapa, placas de fundo, etc.

Analisando-se os estudos mostrados, percebe-se as significativas alterações que os dispositivos proporcionam aos coeficientes aerodinâmicos. Para os coeficientes de arrasto, os valores foram reduzidos em até 75% para determinadas seções quando comparados à seção original, sendo o coeficiente de arrasto o de maior sensibilidade aos dispositivos.

Tais alterações podem ser percebidas também para os coeficientes de sustentação, com reduções de mesma ordem que para os coeficientes de arrasto. Porém para estes, as alterações apresentam uma característica mais linear de variação em função do ângulo de ataque do vento. Já para os coeficientes de torção, os valores são mais aleatórios, significando que mesmo para o caso em que o dispositivo proporciona melhorias dos coeficientes de arrasto e sustentação, não acontecerá necessariamente o mesmo para a torção.

Nota-se que para as seções tipo caixão, devido à grande rigidez torsional normalmente apresentada, o risco de instabilidade torsional pode ser praticamente eliminado com modificações de borda da seção ou mesmo a aplicação de dispositivos, tornando-a ainda mais aerodinâmica.

Conclui-se, portanto, que é de extrema importância a utilização de dispositivos ou modificações de bordas que melhorem o desempenho aerodinâmico das estruturas, diminuindo ou até mesmo eliminando as instabilidades causadas pelo vento, evitando desta

maneira, medidas futuras que talvez sejam necessárias para correções de instabilidade, muitas vezes com alto custo financeiro.

REFERÊNCIAS

- BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra, 1990.
- _____. **O Vento na Engenharia Estrutural**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995.
- _____. **Introdução ao Estudo das Ações Dinâmicas do Vento**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- KING, J. P. C.; DAVENPORT, A. G. **A study of wind effects for the Seo Hae Grand Bridge, Korea. Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory. Final Report**. Dec. 1992.
- LARSEN, A. Advances in aeroelastic analyses of suspension and cable-stayed bridges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 74-76, p. 73-90, Apr. 1998.
- LIMAS, L. F. **Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LIMAS, L. F. ; LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. ; PALUCH, M. J. Determinação das características aerodinâmicas de seções transversais de pontes em túnel de vento. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza. **Anais...** Mendoza; XXXI JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 2004, 1 CD.
- LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M.; NÚÑEZ, G. J. Z.; CARPEGGIANI, E. A.; PALUCH, M. J. Estudo em túnel de vento da resposta dinâmica do complexo viário jornalista Roberto Marinho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2007, 1 CD.
- ROCHA, M. M.; LOREDO-SOUZA, A. M.; PALUCH, M. J.; NÚÑEZ, G. J. Z. Aspectos aerodinâmicos a serem considerados no projeto de pontes estaiadas - estudo de caso: ponte sobre o Rio Guamá. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo; EPUSP, 2003, 1 CD.
- WARDLAW, R. L. Flutter and torsional instability. **Wind-Excited Vibrations of Structures. CISM Courses and Lectures 335**, Springer – Verlag, 1994.
- YOSHIMURA, T.; MIZUTA, Y.; SAVAGE, M.G.; LIU, G. Half-circular and half-elliptic edge modifications for increasing aerodynamic stability of stress-ribbon pedestrian bridges. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 69-71, p. 861-870, Oct. 1997.