

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ARRASTO PARA PERFIL DE PONTE

Vanessa Curto Menconi ¹; Sander David Cardoso Junior ²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. Os cálculos das ações decorrentes do vento atuante em estruturas envolvem interações complexas entre o escoamento do fluido e a própria estrutura. Uma maneira de contornar esta dificuldade é através da análise auxiliada por modelos experimentais com a utilização de túnel de vento. Esta técnica permite obter resultados em termos de coeficientes de pressão e de arrasto, que correlacionam o vento atuante com a força exercida sobre a estrutura. Atualmente, a norma técnica de projeto de pontes (ABNT NBR 7187/2003) estabelece que a ação do vento em pontes deve ser considerada de acordo com a norma ABNT NBR6123/1988, que é uma norma específica de vento para edificações e não contentam considerações e coeficientes para a ação do vento em tabuleiros de pontes. Desta forma, este projeto pretende elaborar um estudo sobre os ação do vento em pontes com a auxílio do túnel de vento da Escola de Engenharia Mauá.

Introdução

A ação do vento em estruturas é obtida através de coeficientes de resistência aerodinâmica, também conhecido como coeficientes de arrasto ou de pressão. Estes coeficientes correlacionam a ação exercida em um corpo com a pressão dinâmica exercida sobre ele. A norma ABNT NBR 6123 (Forças devido ao vento em edificações) apresenta resultados destes coeficientes para geometrias usuais, como por exemplo edificações paralelepípedicas, galões, cilindros, barras, etc. Já para o caso de pontes, são inúmeras as formas das seções transversais que os tabuleiros podem apresentar, sendo que para cada uma delas diferentes coeficientes de são obtidos.

A forma da seção transversal é fator imprescindível para a determinação da força atuante devido ao vento, consequentemente. Este estudo pretende avaliar o valor numérico destes coeficientes para seções transversais usuais de pontes.

O experimento consistiu na análise em túnel de vento das forças exercidas pelo vento em um modelo reduzido da seção de ponte.

Material e Métodos

Descrição dos materiais

O primeiro impasse do experimento foi utilização do túnel de vento do Instituto Mauá de Tecnologia, que tem a característica de gerar turbulência, além da impossibilidade de obter as forças resultantes do vento diretamente. O túnel somente possibilitava a medição da pressão exercida.

Para solução do problema foram utilizados sensores de força e um suporte com roldanas para os modelos, sendo assim, com a ação do vento o suporte se deslocaria, pressionaria o sensor, e então obteria a força exercida pelo vento.

Os suportes e roldanas foram feitos em alumínio, em formato de caixote, conforme Figura 1. Os modelos feitos em madeira e presos às roldanas que tem livre movimentação na direção do vento em cima do suporte.

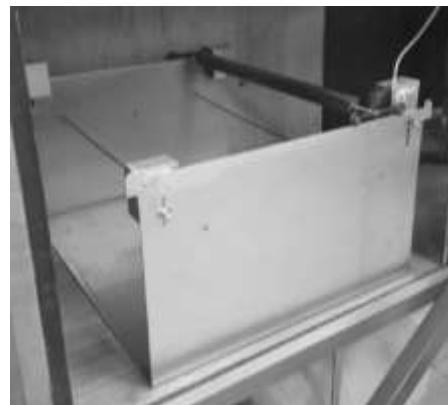


Figura 1 - Suportes de alumínio e roldanas

Os sensores utilizados foram dois sensores PASCO PS-2189, Figura 2, que fazem parte do Laboratório de Física do IMT-Mauá. Tais sensores são utilizados para medir pequenas forças, até 50 N, com alta precisão. Foram utilizados à compressão e interligados em computadores via USB, o que possibilitou análise dos valores obtidos, incluindo obtenção de gráficos e tabelas. A escolha do posicionamento dos sensores, colocados atrás dos modelos de estudo, trabalhando à compressão, foi devida a não perturbação do vento nessa localidade.



Figura 2 - Sensores PASCO PS-2189

Para garantir que os sensores estavam calibrados foram feitos testes com pesos de massas previamente verificadas em balança de boa precisão, exemplificado na Figura 3.

Para isso, foram colocados pesos apoiados no sensor, tracionando-o com o efeito da gravidade. Como o valor a ser medido era o peso da massa, era simples de ser calculado, e, portanto, uma forma simples de verificar o valor do sensor. Tal experimento nos demonstrou estar trabalhando com sensores calibrados e com medidas corretas.



Figura 3 - Teste nos sensores com cargas conhecidas

Descrição dos experimentos iniciais

Antes de efetuar os testes no túnel de vento para a seção da ponte, foram realizados testes iniciais para verificação da velocidade exercida no túnel de vento, e em seções de coeficientes de arrasto conhecidos, como, seção quadrada, retangular e circular.

Foram feitos testes afim de verificar a velocidade do vento conforme frequência imposta no túnel. No local onde estava posicionado o suporte metálico, utilizamos um Tubo de Pitot, Figura 4.



Figura 4 - Tubo de Pitot

Impomos diversos valores de frequência no túnel de vento, e, para cada valor foram analisadas as pressões obtidas pelo Tubo de Pitot, e, assim, obtivemos os valores de velocidades. Com isso, foi possível analisar qual seria a melhor frequência, referente à uma velocidade adequada, a ser utilizada nos experimentos.

Foi determinado onde o modelo da ponte estaria localizada e nesta posição foram medidas as velocidades.

Com a velocidade determinada os experimentos iniciais com seções geométricas, de coeficientes de arrasto conhecidos, foram realizados.

Os primeiros testes foram feitos afim de verificar os valores obtidos experimentalmente e poder estabelecer uma relação entre tais valores e os teóricos, já que eram esperados erros devido à turbulência gerada pelo túnel.

Para isso, realizamos os primeiros experimentos com seções já conhecidas, circular, quadrada e retangular.

A seção circular, referente a um cilindro, tem diâmetro de 2,5 cm e comprimento de 54 cm. A seção quadrada tem lados de 2,5 cm e comprimento de 54 cm. E a seção retangular, também tem comprimento de 54 cm, com altura 3,5 cm e base 11 cm.

Os modelos eram colocados no caixote com os sensores devidamente posicionados e ligados ao computador. O túnel de vento era então ligado e colocado numa rotação com a velocidade determinada em 15 km.h^{-1} . Cada experimento foi analisado no programa computacional, gerando tabelas e gráfico.

Para cada seção fizemos um ensaio com 4 minutos de duração. Durante tal período obtivemos o valor da velocidade, massa específica, força e área da seção, e assim foi possível especificar o valor do coeficiente de arrasto exercido no objeto em estudo.

Descrição dos experimentos na ponte

Após as determinações dos experimentos iniciais, foi feito o experimento principal e objetivo do estudo: a seção da ponte.

A seção da ponte foi confeccionada na marcenaria do Instituto Mauá de Tecnologia, com madeira maciça. A ponte escolhida para ensaio foi a caixão. A seção utilizada tem comprimento de 50 cm, 2,2 cm de altura e 12 cm de largura.

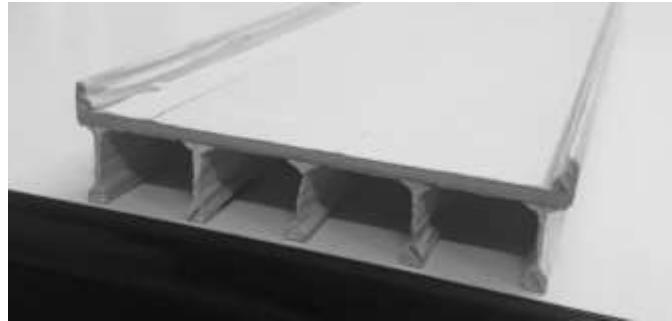


Figura 5 - Protótipo da ponte

A seção foi encaixada no suporte de alumínio com as roldanas e todo procedimento dos primeiros experimentos foram feitos para a ponte em três inclinações diferentes, 0°, 8° e -8°.

Para a inclinação 0°, ou seja, simulando um vento perpendicular à lateral da ponte, foram feitos testes com cinco velocidades diferentes, afim de verificar sua influência no coeficiente de arrasto. Já simulando ventos inclinados em relação à ponte, 8° e -8°, mantivemos uma única velocidade, 15 m.s⁻¹, afim de verificar a influência da direção do vento no coeficiente de arrasto.

Resultados e Discussão

Experimento da velocidade

Os primeiros dados coletados foram referentes à velocidade. Utilizando o Tubo de Pitot, e analisando as rotações do túnel de vento, obtivemos uma relação entre rotação e a velocidade do fluxo de ar, onde $v = 0,0121r + 0,9962$, obtido pelo Gráfico 1. Assim mantivemos uma velocidade de 15 m.s⁻¹ com aproximados 1150 em rotação (rpm). As relações entre as velocidades e pressões foram obtidas pela Equação (1), relativa à Equação de Bernoulli, Equação (2) e Equação (3).

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z = 0 \quad (1)$$

$$\frac{P_o}{\gamma} + \frac{V_o^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} \quad (2)$$

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_o)}{\rho}} \quad (3)$$

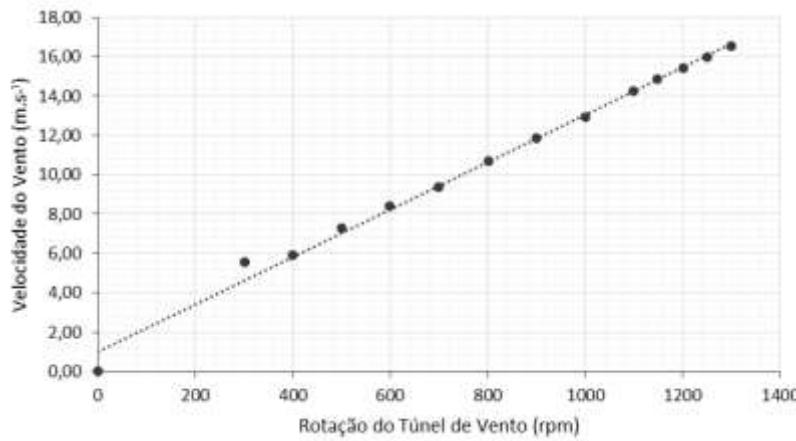


Gráfico 1 - Variação da velocidade do vento em função da rotação do túnel

Experimentos com as seções de coeficiente de arrasto conhecidos

Nos experimentos iniciais, com seções conhecidas, obtivemos os resultados para as forças e coeficientes de arrasto exercidos pelo vento e determinadas pela Equação (4), assim como o número de Reynolds para a velocidade analisada

$$Ca = \frac{Fa}{0,5\rho VA} \quad (4)$$

A seção circular nos forneceu, com ventos a 15 m.s^{-1} , um valor para o número de Reynolds de 23297,47.

Através dos sensores, encontramos uma força atuante do vento no cilindro de 1,686 N, resultante da somatória das forças nos sensores obtidas na Figura 6.

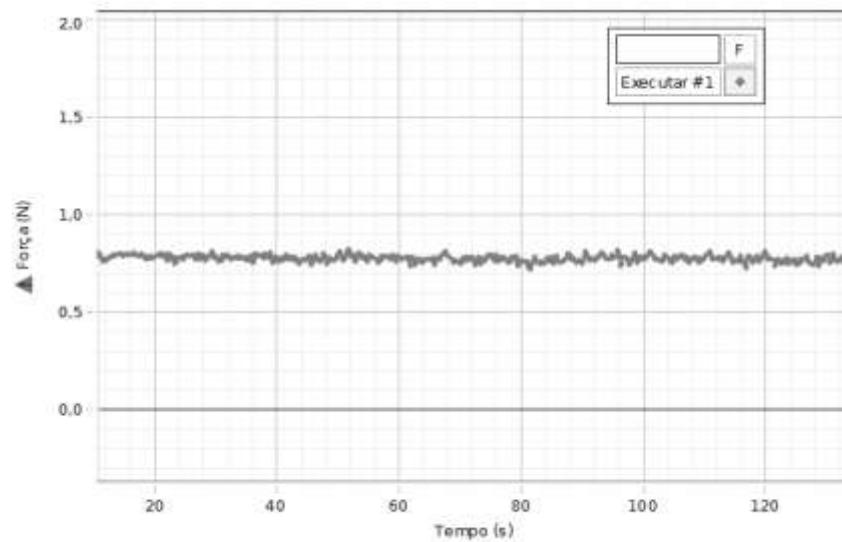
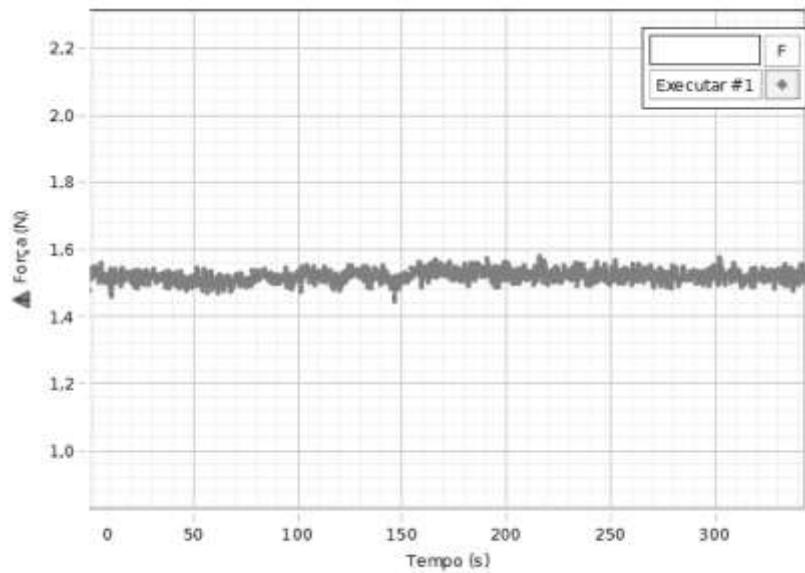


Figura 6 - Exemplo de um gráfico gerado por um dos sensores ensaiando o cilindro

Os valores teóricos para o coeficiente de arrasto do cilindro são 1,2, ou seja, o valor encontrado no experimento, 0,977, teve uma variação de 22% aproximadamente.

Na seção quadrada, com 15 m.s^{-1} , obtivemos um valor para o número de Reynolds em 23297,47.

E através dos sensores, encontramos uma força atuante do vento na seção quadrada de 2,884 N, resultante da somatória das forças nos sensores obtidas na Figura 7.



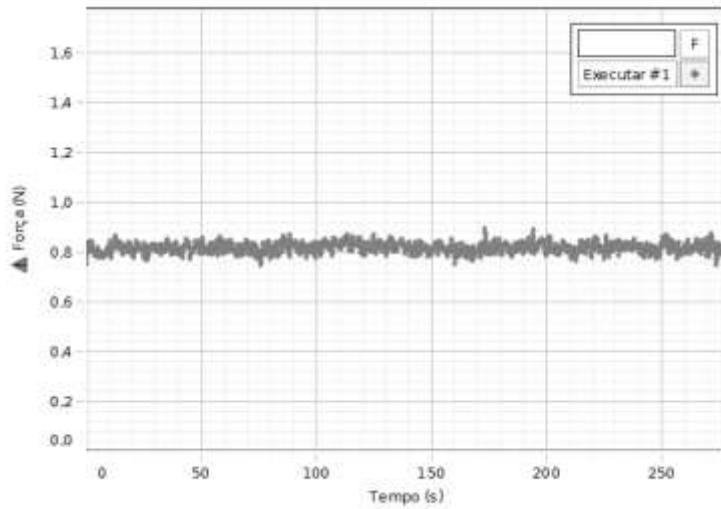
Seção Quadrada

Figura 7 - Exemplo de um gráfico gerado por um dos sensores ensaiando a seção quadrada

Os valores teóricos encontrados para o coeficiente de arrasto da seção quadrada foi 2,1, ou seja, o valor encontrado no experimento, 1,683, teve uma variação de 20% aproximadamente.

A seção retangular, onde a base do retângulo é o triplo da altura, nos forneceu, com 15 m.s^{-1} , um valor para o número de Reynolds de 23297,47.

Através dos sensores, encontramos uma força atuante do vento na seção retangular de 1,046 N, obtida na Figura 8.



Seção Retangular

Figura 8 - Exemplo de um gráfico gerado por um dos sensores ensaiando a seção retangular

Os valores teóricos encontrados para o coeficiente de arrasto de uma seção retangular com base o triplo da altura foi 1,3, ou seja, o valor encontrado no experimento, 1,046, tive uma variação de 24% aproximadamente.

Analizando todos experimentos, notamos uma repetição de erro numa média de 22%. Tal erro era esperado devido à turbulência causada no túnel de vento.

Como o erro se mantém constante comparado aos valores teóricos, para cada experimento podemos adotar um coeficiente de ajuste aos valores encontrados a fim de anular tal discrepância. Assim, podemos adotar um coeficiente multiplicador “K” com valor 1,22, que ajusta os valores de coeficiente de arrasto para valores próximos aos teóricos.

Experimentos com a seção de ponte

O experimento da seção de ponte foi realizado com cinco valores de velocidade, 11 m.s^{-1} , 12 m.s^{-1} , 13 m.s^{-1} , 14 m.s^{-1} e 15 m.s^{-1} , e cada velocidade foi analisada graficamente pelos sensores, conforme Figura 9.

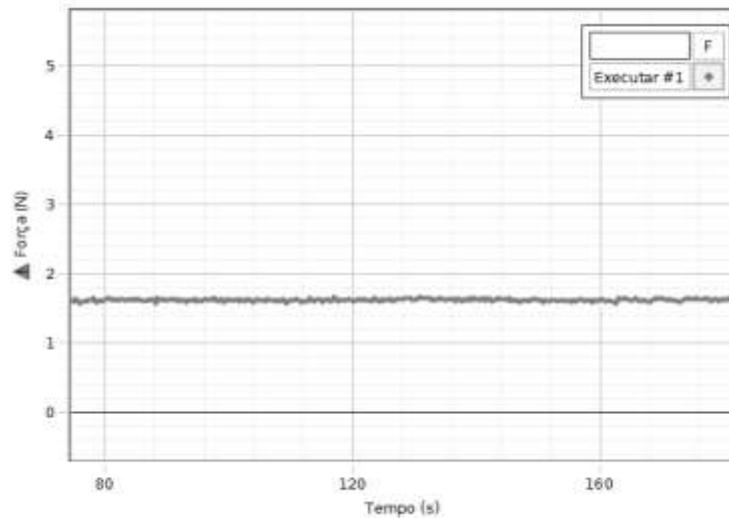


Figura 9 - Exemplo de um gráfico gerado por um dos sensores ensaiando a ponte

Para cada velocidade foram calculados os valores do número de Reynolds e coeficientes de arrasto corrigidos pelo coeficiente “K”, da mesma forma que nos experimentos iniciais, demonstrados na Tabela 1.

Velocidade (m/s)	Força Arrasto (N)	Coeficiente Arrasto	Re	K (Coeficientes Arrasto)
11	0,834	1,120	82007,1	1,367
12	1,015	1,146	89462,3	1,398
13	1,192	1,147	96917,5	1,399
14	1,391	1,154	104373	1,408
15	1,598	1,155	111828	1,409

Tabela 1 - Relação entre os valores obtidos no experimento da ponte (velocidade, força de arrasto, coeficiente de arrasto e número de Reynolds)

Tais valores possibilitaram obter uma relação entre a variação do número de Reynolds para cada velocidade aplicada e o respectivo coeficiente de arrasto encontrado, demonstrado no Gráfico 2.

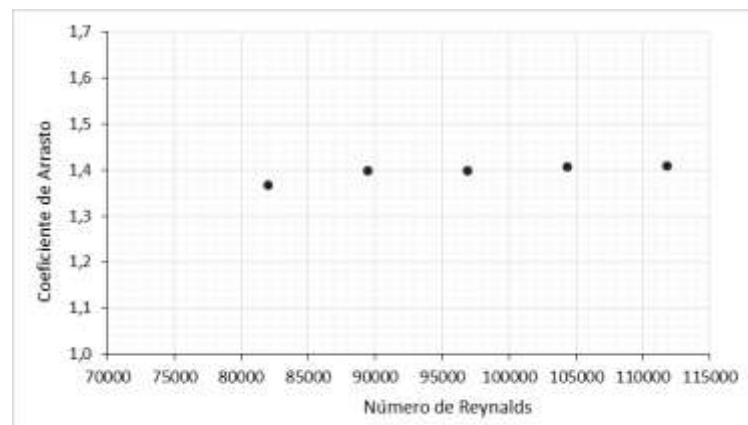


Gráfico 2 - Variação do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds

Nos experimentos referentes à inclinação, repetimos o procedimento feito nos experimentos anteriores mantendo a velocidade em 15 m.s^{-1} , variando a inclinação em 8° e -8° .

Obtivemos gráficos, como na Figura 10, que nos possibilitaram os resultados para força e coeficiente de arrasto dados na Tabela 2.

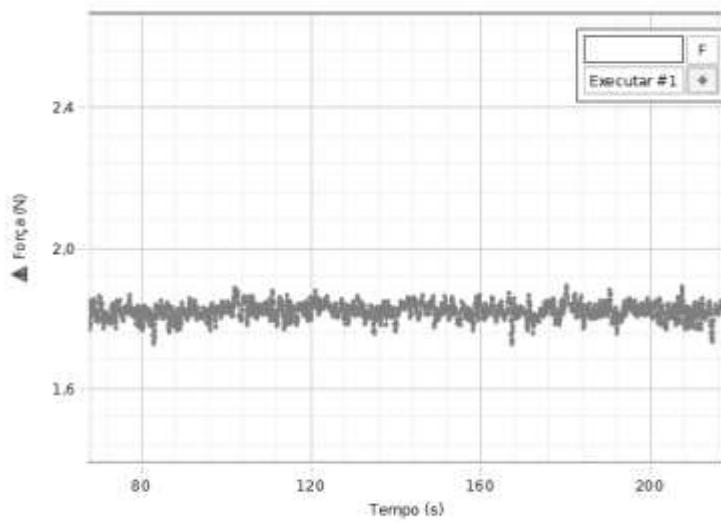


Figura 10 - Exemplo de um gráfico gerado por um dos sensores ensaiando a ponte inclinada -8°

Graus	Força Arrasto (N)	Coeficiente Arrasto	K (Coeficientes Arrasto)
8	2,214	1,853	2,260
-8	1,788	1,496	1,825
0	1,598	1,155	1,409

Tabela 2 - Relação entre os valores obtidos no experimento da ponte inclinada (força de arrasto e coeficiente de arrasto)

Haviam duas possibilidades de áreas a serem utilizadas para encontrar o coeficiente de arrasto para a ponte inclinada. A primeira seria descobrir uma área projetada perpendicular à direção do vento. A segunda seria utilizar a mesma área usada para a ponte 0° , ou seja, a área lateral da ponte. Como a inclinação adotada foi relativamente baixa, foi notado que adotar uma área projetada não faria diferenças significativas para o coeficiente de arrasto, e, portanto, foi utilizada a área lateral para análise do coeficiente de arrasto.

Conclusões

O valor do coeficiente de arrasto para a ponte na posição horizontal se mostrou coerente ao compará-lo com o resultado obtido na seção retangular, pois teve valor superior. Como se é esperado, uma ponte tem maior resistência aerodinâmica que uma seção retangular devido à presença das vigas.

Os valores encontrados no experimento da ponte inclinada nos possibilitaram confirmar o que já era esperado. Quando o vento não atua perpendicularmente na ponte causa um coeficiente de arrasto maior, ou seja, a resistência aerodinâmica da ponte com ventos inclinados é maior em relação aos ventos perpendiculares, sendo maior não importando o sentido do vento. Pois a ponte inclinada tem maiores áreas resistentes aerodinamicamente ao vento, como, por exemplo, a existência das vigas.

O fato da ponte estar inclinada produz um coeficiente de sustentação que influencia nas forças atuantes na estrutura, mas que não foi possível ser avaliado.

O experimento também nos mostrou que a ponte quando é rotacionada tendendo a deixar sua pista de rolamento na direção do vento tem um coeficiente de arrasto maior comparado quando é rotacionada tendendo a deixar suas vigas na direção do vento.

O Gráfico 2 nos permitiu concluir que o coeficiente de arrasto é aproximadamente estável para número de Reynolds da faixa analisada no experimento.

Referências Bibliográficas

Standerski, R. *Ação Estática do Vento em Tabuleiros de Pontes: Caracterização Aerodinâmica em Túnel de Vento.* p.134. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Fox R.W.; McDonald A.T.; Pritchard P.J. *Introdução a Mecânica dos Fluidos.* 6^a edição. LTC, 2006. p.844.

Munson B.R.; Young D.F.; Okiishi T.H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos. 4^a edição. Blucher, 2004. p.571.

Associação Brasileira das Normas Técnicas. (1988). NBR 6128. *Forças devidas ao vento em edificações.*

Associação Brasileira das Normas Técnicas. (2003). NBR 7187. *Projeto de Pontes de Concreto Armado e de Concreto Protendido.*