

# Uso do Túnel de Vento como Ferramenta de Projeto no Design Aerodinâmico

G.J.Z. Núñez<sup>a,b</sup>, A.M. Loredo-Souza<sup>c</sup>, M.M. Rocha<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*gustavo.javier@ufrgs.br*

<sup>b</sup>*Departamento de Design e Expressão Gráfica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

<sup>c</sup>*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Lab. de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*

## Resumo

*O sucesso de um projeto de produto que irá interagir com escoamentos de fluidos requer o conhecimento de sua eficiência aerodinâmica. Na fase de projeto, a possibilidade de otimização de sua performance aerodinâmica tem papel fundamental para que o produto possa ser validado. Este trabalho tem foco principalmente nas interações de escoamentos de ar (vento) com os objetos nele imersos. Na etapa de planejamento e especificações prévias, a utilização do túnel de vento como ferramenta auxiliar para o desenvolvimento de produtos suscetíveis aos efeitos do vento, é extremamente adequada. O estudo do comportamento aerodinâmico de um determinado corpo imerso em um escoamento pode ser realizado mediante a medição de diferentes parâmetros. Como sugestão de ferramenta disponível é apresentado o Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em operação a mais de 35 anos. São mostrados, dentre os diversos estudos já realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções, alguns trabalhos representativos das diversas áreas de pesquisa desenvolvidas. Finalmente, destaca-se a importância da utilização do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico, que pode ser utilizado como ferramenta de design aerodinâmico numa ampla gama de produtos que necessitem avaliação de suas características aerodinâmicas.*

**Palavras-chave:** Túnel de Vento, Design Aerodinâmico.

## The use of wind tunnel as project tool on the aerodynamic design

### Abstract

*The success of the design of a product that will interact with fluid flows requires the knowledge of its aerodynamic efficiency. In the design phase, the optimization possibilities of its aerodynamic performance play a fundamental role in the product validation procedure. This paper main focus is in the interactions of air flows (wind) with the objects which are immersed in it. At the planning stage and previous specifications, the use of the wind tunnel as an auxiliary tool for the development of wind sensitive products is extremely adequate. The study of the aerodynamic behavior of a certain body immersed in a fluid flow may be performed through the measurement of distinct parameters. As an example of an available tool, the Universidade Federal do Rio Grande do Sul Prof. Joaquim Blessmann wind tunnel, in operation for over 35 years, is introduced. Examples are shown, among several studies already performed at the Laboratório de Aerodinâmica das Construções, of representative studies from the diverse research areas dealt with. Finally, the use of the wind tunnel as a design tool is highlighted, where it may be used as an aerodynamic design tool in a broad range of aerodynamic sensitive products.*

**Keywords:** Wind Tunnel, Aerodynamic Design.

## 1. INTRODUÇÃO

O sucesso de um projeto de produto que irá interagir com escoamentos de fluidos, ou seja, que estará sujeito à ação deste escoamento, requer o conhecimento de sua eficiência aerodinâmica. Na fase de projeto, a possibilidade de otimização de sua performance aerodinâmica tem papel fundamental para que o produto possa ser validado. Este trabalho tem foco principalmente nas interações de

escoamentos de ar (vento) com os objetos nele imersos.

A gama de produtos cujos aspectos aerodinâmicos são fundamentais para seu correto desempenho e funcionalidade pode ser assim dividida:

- Aerodinâmica das construções (edifícios, casas, coberturas, pontes, torres, etc.);
- Aerodinâmica de veículos (automóveis, motocicletas, aviões, foguetes, etc.);

- Aerodinâmica de dispositivos especiais (aerogeradores, paraquedas, bicicletas, equipamentos esportivos, velas, etc.).

Como exemplos de outras interações, que não se aplicam ao tema específico do desenvolvimento de produtos, podem-se citar o conforto de pedestres, erosão eólica (agricultura), dispersão de poluentes, ventilação, etc.

### 1.1 Contextualização e justificativa

De acordo com Baxter (2000), podem ser delineados, de forma simplificada, três elementos fundamentais para obtenção do sucesso no desenvolvimento de um novo produto:

- Orientação do mercado:** Têm mais chances de sucesso os produtos que são especificados à partir de necessidades que se identifica no mercado. Em especial, são bem sucedidos os que surpreendem positivamente seus consumidores, oferecendo vantagens claras sobre os produtos concorrentes.
- Planejamento e especificações prévias:** Em geral são mais bem sucedidos os produtos cuidadosamente planejados – viabilidade técnica e econômica do projeto, capital necessário para realizá-lo, como será produzido e com que equipamentos, qual será o argumento de venda, entre outros fatores. Além disso, costumam atingir mais plenamente seus objetivos os que foram bem especificados desde o início (que funções vai atender, tamanhos, potência, materiais e outros aspectos).
- Qualidade do desenvolvimento:** São maiores as chances de sucesso quando a equipe responsável pelo projeto possui as qualificações necessárias para o desenvolvimento do produto e trabalha em cooperação com o pessoal da produção e do marketing.

Na etapa de planejamento e especificações prévias, a utilização do túnel de vento como ferramenta auxiliar para o desenvolvimento de produtos suscetíveis aos efeitos do vento, é extremamente adequada.

Um dos aspectos mais influentes no estudo da aerodinâmica é a forma do objeto, ou seja, se é constituído por arestas vivas ou por superfícies arredondadas. A possibilidade de realizar interferências na forma e verificar rapidamente se tal alteração é benéfica do ponto de vista aerodinâmico é altamente desejável ao projetista. Outros fatores que tem importante papel são a velocidade do escoamento pois, nem sempre as maiores velocidades serão as mais críticas, a rugosidade superficial dos objetos, características próprias dos corpos (frequências naturais, amortecimento, etc.) entre outras.

Numa condição ideal, é razoável que o designer tenha noções de aerodinâmica de tal forma que possa projetar seus produtos adequadamente, norteando assim seu desenho a uma condição satisfatória. Segundo Heskett (2006), a aerodinâmica marcou estilo de diversos tipos de produtos que tem seu desenho baseado em formas aerodinâmicas principalmente devido às suas propriedades simbólicas e sem justificativas funcionais. Popularizada pelo visionário designer *Norman Bel Geddes*, a aerodinâmica foi por vezes considerada sinônimo de desenho industrial americano entre os anos 30 e 40. Um exemplo desta tendência é o gram-

peador *Hotchkiss*, projetado por *Orlo Heller* em 1936 e mostrado na Figura 1.

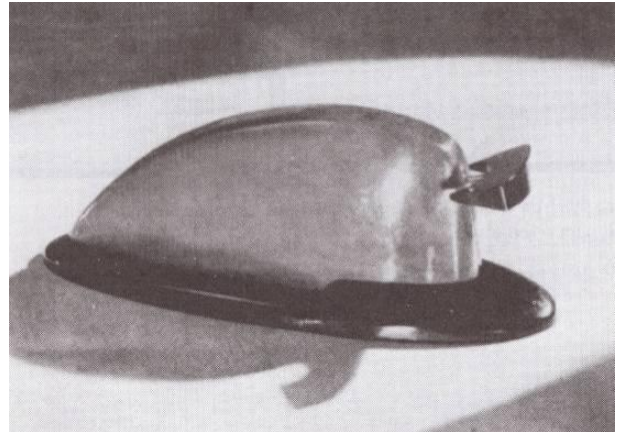


Figura 1: O grampeador Hotchkiss, 1936 (Heskett, 2006).

Um exemplo de influência do design com impacto direto em aspectos aerodinâmicos é o famoso exemplo da ponte de *Tacoma* que, devido à ação do vento, entrou em colapso em 1941. A “mais bela do mundo”, assim designou seu projetista *Leon Moisseiff* em 1938. As palavras de *Moisseiff* representavam uma importante tendência arquitetônica nos anos 30, assim como causou reflexos nos projetos de pontes pênseis nas três décadas seguintes (Scott, 2001). Certas características da ponte de *Tacoma Narrows* estão diretamente relacionadas à tradição *Art Deco*. Detalhes das torres e de seu tabuleiro são mostrados na Figura 2.



Figura 2: Fotografias da ponte de Tacoma Narrows: detalhes do tabuleiro e torre (Scott, 2001).

O processo de design automotivo, de acordo com Heskett (2006), desenvolveu-se tanto na América do Norte como na Europa. Inicialmente a “lágrima” havia sido aceita como a forma de menor resistência aerodinâmica, influenciando o design de automóveis. A Itália é origem de uma brilhante escola de construtores de carros, aonde nomes como *Pininfarina*, *Bertone*, *Ghia* e *Michelotti*, exerceram grande influência. A influência do design do cupê *Cisitalia* 202 de 1948 (Figura 3), da *Pininfarina*, incorporava consideráveis avanços tecnológicos e exibiu um refinamento da forma aerodinâmica, com a pureza e elegância de linhas sendo a característica mais notável. Este modelo pode ser considerado um marco no mundo dos *carrozieri* (designers de automóveis), onde o grau de personalização “tornava” o

carro uma escultura móvel, servindo como plataforma para a evolução e teste de novos conceitos de forma (HESKETT, 2006). Informações sobre aerodinâmica de veículos podem ser obtidas em Hucho (1998).



Figura 3: Cupé Cisitalia 202 – Pininfarina 1948.

Atualmente, a melhor ferramenta disponível para o estudo das ações e efeitos do vento durante a fase de projeto e desenvolvimento de um produto é o túnel de vento. De acordo com Gorecki (1998) o primeiro túnel de vento, que se tem notícias, foi construído por um grupo de engenheiros aeronáuticos pertencentes a *Aeronautical Society of Great Britain*, em 1871. A partir de 1930 os túneis de vento passam a realizar experimentos fora do campo aeroespacial, atuando nas diversas áreas da engenharia. Atualmente, os inúmeros túneis de vento existentes são utilizados para a solução / prevenção de problemas diversos e no projeto de produtos,

cuja funcionalidade depende diretamente de sua performance frente à ação do vento. Os túneis de vento industriais e particularmente os que simulam a camada limite natural apresentam centenas de aplicações (Gorecki, 1998) dentre as quais incluem-se as citadas na introdução deste trabalho.

Embora existam importantes ferramentas computacionais que também podem servir de subsídio para a análise aerodinâmica de produtos, nem todas as situações de projeto podem ser atendidas, principalmente àquelas nas quais existe a interação de diversos outros objetos. Esta é a situação de uma simulação envolvendo o estudo de uma edificação imersa numa região densamente construída como é o caso de centros de grandes cidades. Neste caso, a melhor maneira de estudar os efeitos do vento no novo produto, a edificação, é através da utilização de modelos reduzidos que levam em consideração toda a vizinhança existente num determinado raio limite da simulação. Cabe salientar que os modelos computacionais tem como ponto de partida, coeficientes aerodinâmicos obtidos em estudos experimentais em túneis de vento.

## 2. CONCEITOS GERAIS

O estudo do comportamento aerodinâmico de um determinado corpo imerso em um escoamento pode ser realizado mediante a medição de diferentes parâmetros. De acordo com Ito e Nakamura (1982) os fenômenos relacionados à ação induzida pelo vento em estruturas flexíveis são inúmeros e alguns deles são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Classificação dos efeitos do vento em estruturas.

		Efeitos do vento médio (pressões e forças)		
Estáticos	Instabilidade Estática	Divergência torcional		
		Flambagem lateral		
Dinâmicos	Instabilidade Dinâmica	Galope	1 grau de liberdade	Resposta com amplitudes divergente
		Flutter torcional		
		Flutter acoplado		
	Desprendimento de vórtices, flutter a baixas velocidades		Resposta com amplitudes limitadas	
Excitação devido às rajadas do vento - buffeting				

Nem todos os corpos submetidos à ação do vento apresentarão resposta dinâmica relevante, ou seja, devido características próprias (frequências naturais e amortecimento) não estarão sujeitos à excitação ocasionada pelo vento. A investigação de possíveis efeitos dinâmicos é fundamental para que o produto apresente um desempenho esperado.

Os efeitos estáticos do vento são observados em todos os corpos submetidos a um escoamento de ar. A correspondente resposta estática, em termos de efeitos do vento médio, será caracterizada pela distribuição de pressões que irá gerar forças. Estas forças decompostas em direções especifi-

cas dão origem aos coeficientes aerodinâmicos. A forma mais básica de avaliar o desempenho aerodinâmico de um determinado produto é através da medição de seus coeficientes aerodinâmicos. As forças aerodinâmicas que atuam sobre um corpo imerso em um escoamento são as de arrasto (eixo longitudinal – na direção do vento incidente), lateral (eixo transversal – perpendicular ao vento incidente), de sustentação (eixo vertical – perpendicular ao vento incidente). As forças que geram os correspondentes coeficientes aerodinâmicos são mostradas na Figura 4 (obs.: A força lateral é perpendicular ao plano da figura).

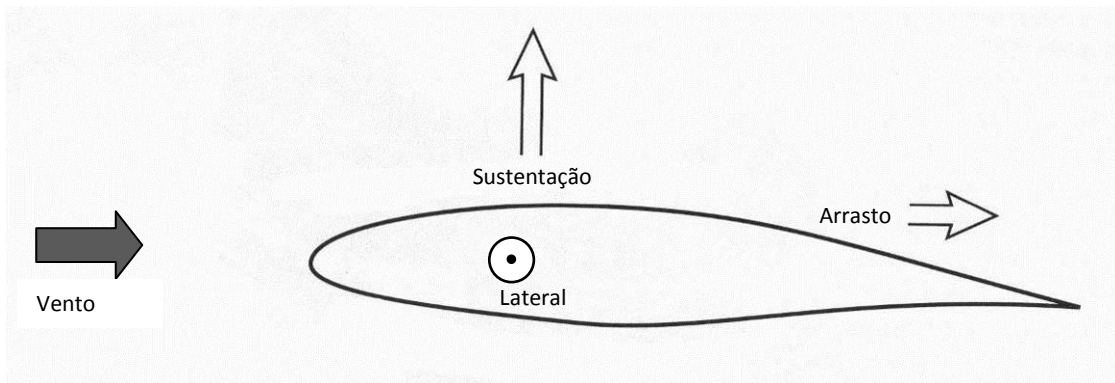


Figura 4: Referência para os coeficientes aerodinâmicos em torno de um perfil genérico (Katz, 1995).

A definição dos coeficientes aerodinâmicos é mostrada na equação (1):

$$C_{aerod.} = \bar{F}_{aerod.} / q \times A_{ref.} \quad (1)$$

Sendo:

$C_{aerod.}$  coeficiente aerodinâmico (arrasto,  $C_a$ , sustentação,  $C_s$  e lateral,  $C_l$ ) [adimensional];

$\bar{F}_{aerod.}$  força aerodinâmica (arrasto, sustentação ou lateral) média [N];

$q = 1/2 \rho \bar{V}^2$  pressão dinâmica [ $N/m^2$ ] correspondente à velocidade média de referência do vento ( $\rho$  = massa específica do fluido (ar) [ $kg/m^3$ ]);

$A_{ref.}$  área de referência [ $m^2$ ].

De uma maneira geral, os projetistas desejam que a forma proposta para o seu novo produto tenha o menor coeficiente de arrasto possível. No caso de uma edificação, quanto menores forem as forças de arrasto, menores serão os esforços atuantes na estrutura e menor será o consumo de ferragens, menor será a resistência requerida para o concreto, gerando maior economia. O conjunto bicicleta / ciclista, de melhor performance aerodinâmica é aquele que apresenta o coeficiente de arrasto mais baixo. No caso de veículos, baixos valores de coeficientes de arrasto são sempre desejados (associados a um baixo consumo de combustível), entretanto, os coeficientes de sustentação devem ser tais que ofereçam estabilidade. Nas aeronaves são esperados baixos coeficientes de arrasto garantindo assim maior autonomia de voo e os valores de coeficientes de sustentação devem ser suficientemente elevados para garantir que voem. O sentido do coeficiente de sustentação para o caso dos automóveis deve ser de cima para baixo – garantindo maior “aderência” ao solo. Entretanto, o sentido das forças de sustentação no caso de aeronaves deve ser de baixo para cima para permitir o voo (Figura 4). De acordo com Pires e Oliveira (2010) para se otimizar a operação de aerogeradores o perfil das pás deve apresentar uma adequada relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto.

Os ensaios para determinação das forças aerodinâmicas devem ser realizados para diferentes velocidades, com o objetivo de se atingir distintos regimes de escoamento para

que seja verificado o efeito do número de Reynolds na determinação dos coeficientes aerodinâmicos (Blessmann, 1990).

### 3. ENSAIOS EM TÚNEL DE VENTO

#### 3.1 Requisitos de semelhança

Testes em túnel de vento de modelos reduzidos geralmente envolvem a forte interação entre a estrutura do modelo e o escoamento. O significado imediato desta é que não apenas a estrutura deve ser corretamente modelada, mas também o escoamento, suas características próprias de acordo com o ambiente no qual será utilizada.

Uma modelagem correta implica que os parâmetros adimensionais de semelhança sejam exatamente os mesmos na estrutura real e no modelo. Entretanto, quase que invariavelmente, a duplicação completa desses parâmetros é impraticável ou na maioria das vezes impossível. Realmente, os requisitos de semelhança só podem ser completamente satisfeitos se o modelo e a estrutura real são idênticos.

A decisão mais importante durante o processo de modelagem consiste na determinação de quais relações de semelhança devem ser atendidas de tal forma que, aquelas que deixarem de ser cumpridas causem o menor prejuízo aos testes. Essa decisão deve ser tomada com base no conhecimento dos principais parâmetros envolvidos, ou seja, na identificação dos parâmetros dominantes. Dessa forma os menos importantes podem deixar de ser considerados. Maiores detalhes sobre técnicas de modelagem e requisitos de semelhança podem ser vistos em Núñez (2008).

#### 3.2 Modelos reduzidos

A determinação experimental das características do escoamento em torno de um corpo rombudo imerso em um fluido em movimento se faz necessária sempre que um estudo teórico não é capaz de fornecer resultados confiáveis ou quando não há informação disponível na literatura. Em determinados casos são empregados modelos em escala natural, por exemplo, em certos testes em modelos de carros. Os estudos realizados em modelos reduzidos (estruturas civis em geral) implicam na determinação das condições que devem ser satisfeitas para que o escoamento em torno de corpos geometricamente semelhantes seja também semelhante.

O projeto de um modelo reduzido requer a avaliação interativa entre os requisitos do modelo e as limitações impostas pelo túnel de vento (dimensões da câmara de ensaios, gama de velocidades, etc.). Uma vez definida a escala geométrica do modelo e após uma criteriosa definição

dos parâmetros de semelhança é possível então elaborar o projeto de um modelo reduzido, de acordo com a finalidade e das respostas a serem medidas. Quando for constatado que o produto a ser estudado apresenta características dinâmicas, por exemplo, alta esbeltez e flexibilidade, o modelo a ser utilizado será do tipo aeroelástico. Neste tipo de modelagem devem ser reproduzidas a rigidez, a massa, frequências naturais e o amortecimento do sistema estrutural real. Entretanto, se o produto apresenta características que permitem considerá-lo como não suscetível aos efeitos dinâmicos do vento o modelo utilizado será do tipo estático. O modelo deve ser rígido e deve reproduzir, o mais fielmente possível, a geometria externa do produto bem como a riqueza de detalhes.

#### 4. O TÚNEL DE VENTO DA UFRGS

##### 4.1 Características do Túnel de Vento

O Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (BLESSMANN, 1982), mostrado na Figura 5, é pioneiro na América Latina, estando em operação a mais de 35 anos. Trata-se de um túnel de vento de circuito fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais, ou seja, simula a camada limite atmosférica. Sua secção de altas velocidades tem relação comprimento / altura da câmara principal de ensaios superior a 10, e dimensões 1,30m x 0,90m x 9,32m (largura x altura x comprimento). A velocidade do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e suave, sem modelos, ultrapassa 46m/s.

A simulação das principais características de ventos naturais, tais como os perfis de velocidades médias (mostrados na Figura 6), intensidade de turbulência e macroescala da turbulência, são reproduzidas através da

colocação de determinados elementos (rugosidades) devidamente posicionados no piso e no início da câmara de ensaios (LOREDO-SOUZA et al., 2004).

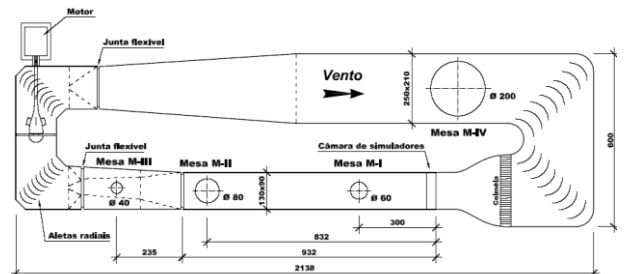


Figura 5: Vista externa do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann e circuito aerodinâmico (BLESSMANN, 1990).

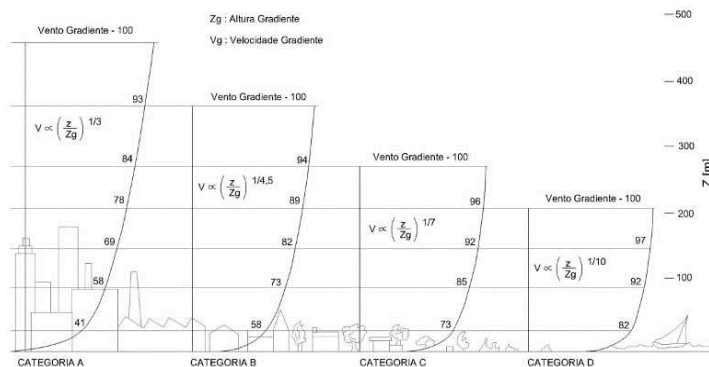


Figura 6: Características de perfis verticais de velocidades médias do vento de acordo com a rugosidade superficial.

Além de permitir a simulação das principais características de ventos naturais, o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann também pode ser utilizado para estudos que exijam escoamentos com baixíssimos índices de intensidade de turbulência – escoamento uniforme e suave. Atualmente, o túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann está em processo de acreditação para calibração de anemômetros junto a um órgão Alemão (DEWI – Deutsches Windenergie-Institut) atendendo aos requisitos da NBR ISO/ IEC 17025: 2005 / Measnet (1997), devido às excelentes características do escoamento uniforme e suave simulado.

Exemplos das principais características dos ventos deslizantes e turbulentos simulados podem ser vistos na

Figura 7: perfil vertical das velocidades médias, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), intensidade ( $I_1$ ) e macroescala ( $L_1$ ) da componente longitudinal da turbulência.

As principais características dos escoamentos uniformes simulados podem ser vistas na Figura 8: perfil vertical das velocidades médias, em percentagem da velocidade média no eixo longitudinal do túnel (pontos experimentais e curva potencial teórica), intensidade ( $I_1$ ) e macroescala ( $L_1$ ) da componente longitudinal da turbulência.

A realização de testes em condições de baixos níveis de intensidade de turbulência são ideais para medidas de

coeficientes aerodinâmicos em produtos que não estão submetidos aos efeitos ocasionados pela camada limite

terrestre. Estas são, geralmente, as condições para a realização de testes em modelos de automóveis e aeronaves.

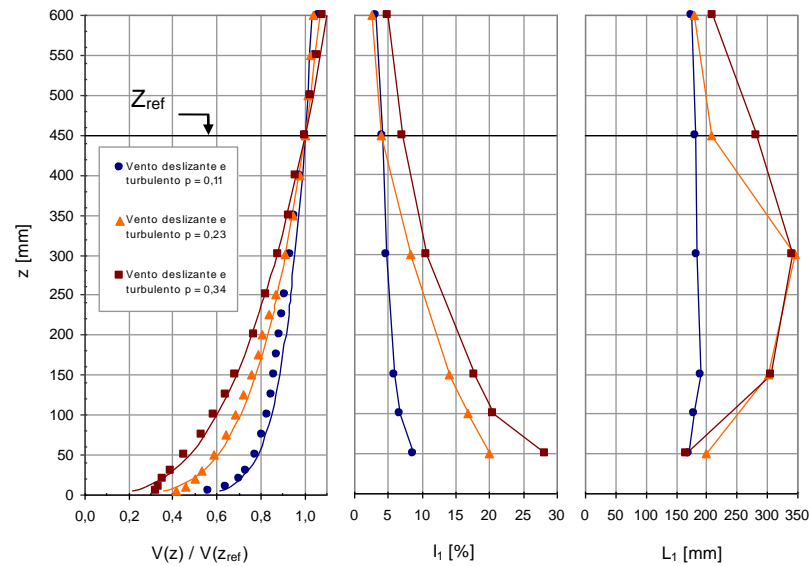


Figura 7: Perfis de velocidade média, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do túnel de vento. Ventos deslizantes e turbulentos (Loredo-Souza et al., 2004).

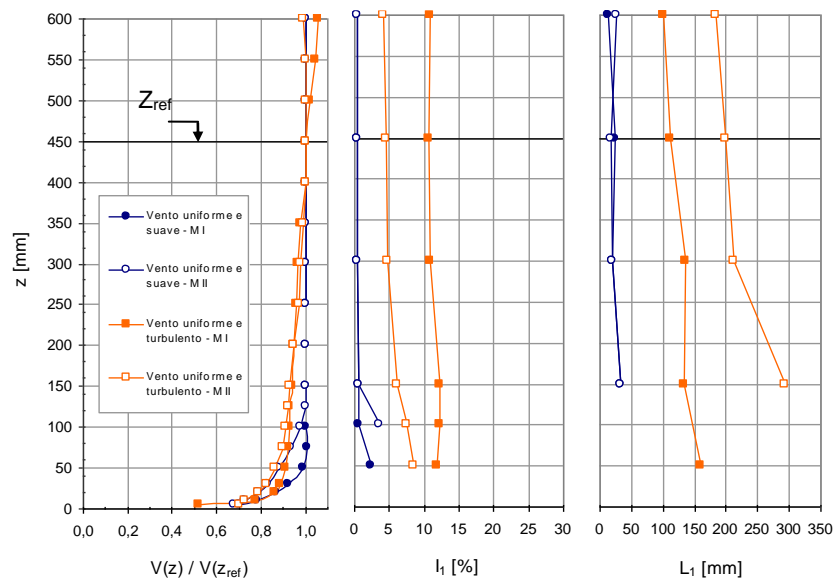


Figura 8: Perfis de velocidade média, intensidade e macroescala da componente longitudinal da turbulência, para o eixo vertical de duas seções de ensaio do túnel de vento. Vento uniforme e suave e vento uniforme e turbulento (Loredo-Souza et al., 2004).

#### 4.2 Estudos realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann

Dentre os diversos estudos já realizados no Laboratório de Aerodinâmica das Construções, no Túnel de Vento Prof. Joaquim Blessmann, ao longo dos seus mais de 35 anos em operação, são apresentados estudos representativos das diversas áreas de pesquisa desenvolvidas.

##### 4.2.1 Edifícios

Os estudos realizados para a determinação dos carregamentos em edifícios ocorrem principalmente quando não existem coeficientes aerodinâmicos disponíveis em normas, ou seja, quando a forma da edificação não se enquadra nas formas mais convencionais. Outros estudos

ocorrem principalmente devido às condições de topografia e/ou vizinhança imediata da nova edificação a ser construída.

Na Figura 9, são mostradas uma perspectiva artística e fotografia do modelo estático do empreendimento *Prosperitas*, cuja altura é de 146,72m, construído em São Paulo – SP. A forma do edifício e o detalhamento arquitetônico apresentado (entrâncias, vãos, etc.) não se enquadram nos padrões disponíveis em normas. Por esta razão foi realizado um estudo específico em Túnel de Vento, com modelo reduzido em escala 1/400 da referida estrutura para a medição das pressões devidas ao vento e obtenção dos coeficientes aerodinâmicos de força. Além do fator forma do edifício, sua altura bastante elevada para padrões nacionais, contribuiu para a necessidade de estudos específicos. Percebe-se na Figura 9 a simulação da vizinhança existente num determinado raio de abrangência.



Figura 9: Perspectiva artística e modelo reduzido no interior do Túnel de Vento - Empreendimento Prosperitas (LOREDO-SOUZA, 2007).

Observa-se, na Figura 10, uma perspectiva artística e fotografia do modelo estático do empreendimento *Mandarin*, cuja altura é de 63,5m, construído no Rio de Janeiro – RJ.



Figura 10: Perspectiva artística e modelo reduzido no interior do Túnel de Vento. empreendimento *Mandarin* (LOREDO-SOUZA et al., 2009).

A forma do edifício, em “U”, com complexo e escalonado detalhamento arquitetônico apresentado não se enquadram nos padrões disponíveis em normas.

Muitas vezes a existência de vizinhança (prédios e edificações) no entorno de uma nova a ser projetada não ocasiona um efeito de proteção. A Figura 11 apresenta uma comparação dos valores dos momentos torçores  $M_t$  obtidos no túnel de vento e dos obtidos pela norma brasileira, em função da incidência do vento. Percebe-se claramente a influência da vizinhança, por vezes majorando, por vezes minorando o carregamento devido ao vento em relação ao prédio isolado (LOREDO-SOUZA et al., 2009).

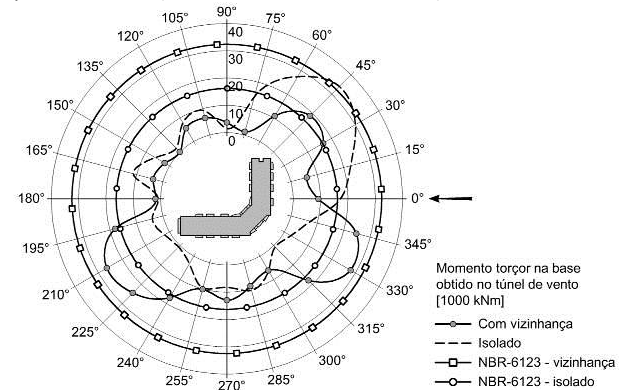


Figura 11: Comparação dos valores do momento torçor  $M_t$  obtido no túnel de vento e do obtido pela norma brasileira, em função da incidência do vento, para o empreendimento Mandarin (LOREDO-SOUZA et al., 2009).

Exemplos de edificações nas quais foram utilizados modelos dinâmicos para simular características dinâmicas das estruturas reais são mostrados na Figura 12: em (a) é mostrado o edifício *Plaza Centenário* – São Paulo – SP, em (b) e (c) edifício *Manhattan Tower* – Rio de Janeiro – RJ e respectivo modelo aeroelástico no interior do Túnel de Vento.

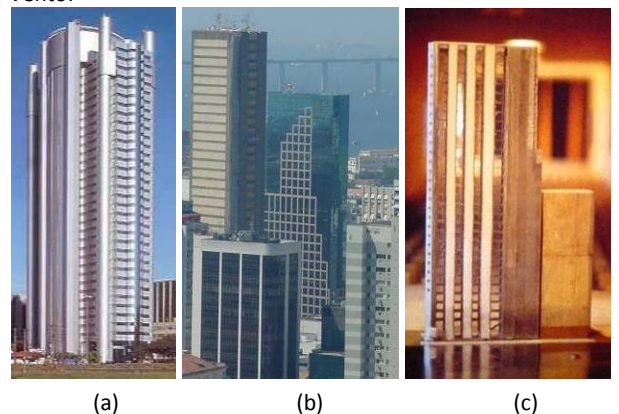


Figura 12: Fotografias de prédios e foto de modelo aeroelástico no interior do túnel de vento.

Mais informações sobre estudos de edifícios em túnel de vento contendo comparações dos resultados obtidos com valores fornecidos por normas de vento podem ser obtidas em Carpeggiani (2004).

#### 4.2.2 Torres de telecomunicações e linhas de transmissão

Estudos de vento em torres são muito freqüentes pois estas estruturas além de flexíveis são, em geral, muito esbeltas. Na Figura 13 são mostrados (a) Torre de telecomunicações da

Claro – Porto Alegre – RS com 90,2m de altura e modelos (b) estático e (c) aeroelástico utilizado nos ensaios em túnel de vento. Informações detalhadas do estudo realizado podem

ser obtidas em Núñez (2001). Na mesma Figura 13 (d) e (e) são mostradas Torre de telecomunicações – Petrópolis – RJ e modelo aeroelástico, respectivamente.



Figura 13: Fotografias de torres de telecomunicações e modelos reduzidos no interior do túnel de vento.

Na Figura 14, são mostrados modelos reduzidos utilizados em estudos para a determinação dos coeficientes de arrasto em torres treliçadas de linhas de transmissão de energia elétrica. Os modelos reduzidos de trechos das referidas torres foram colocados sobre balança de força para a medição direta das forças devidas ao vento e possuem escalas entre 1/8 e 1/17. Maiores detalhes sobre este estudo podem ser obtidos no trabalho de Loredo-Souza et al. (2006).

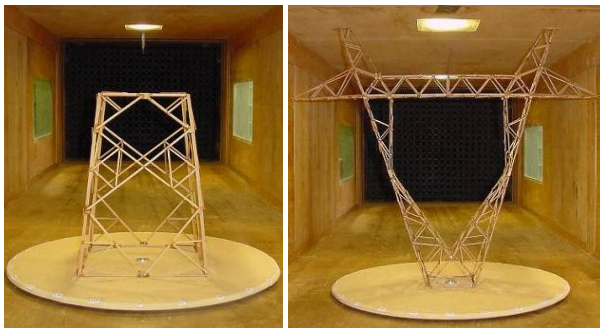


Figura 14: Modelos reduzidos de trechos de torres de transmissão no interior do túnel de vento.

#### 4.2.3 Pontes

O conhecimento do comportamento aerodinâmico do tabuleiro de uma ponte é um fator determinante em projetos de pontes e na resolução de problemas práticos de engenharia associados. Os efeitos do vento neste tipo de estrutura são preponderantes e podem ser considerados como o carregamento mais importante e o que envolve maiores dificuldades na sua estimativa. Na Figura 15 é mostrada uma vista da ponte estaiada sobre o rio *Guamá* (LOREDO-SOUZA et al., 2005a).

Neste trabalho, foram realizados ensaios para diferentes configurações de guarda-corpo e guarda-rodas e verificadas

tanto a resposta em termos de coeficientes estáticos como a resposta dinâmica para a determinação das velocidades críticas para drapejamento (*flutter*). Na Figura 16, são mostradas diferenças entre as configurações testadas e fotografias dos modelos seccionais em escala 1:50 no interior do túnel de vento.

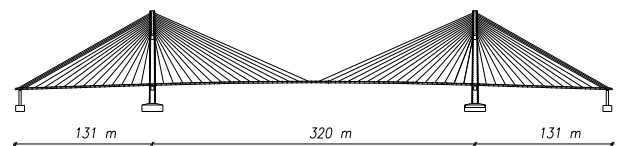
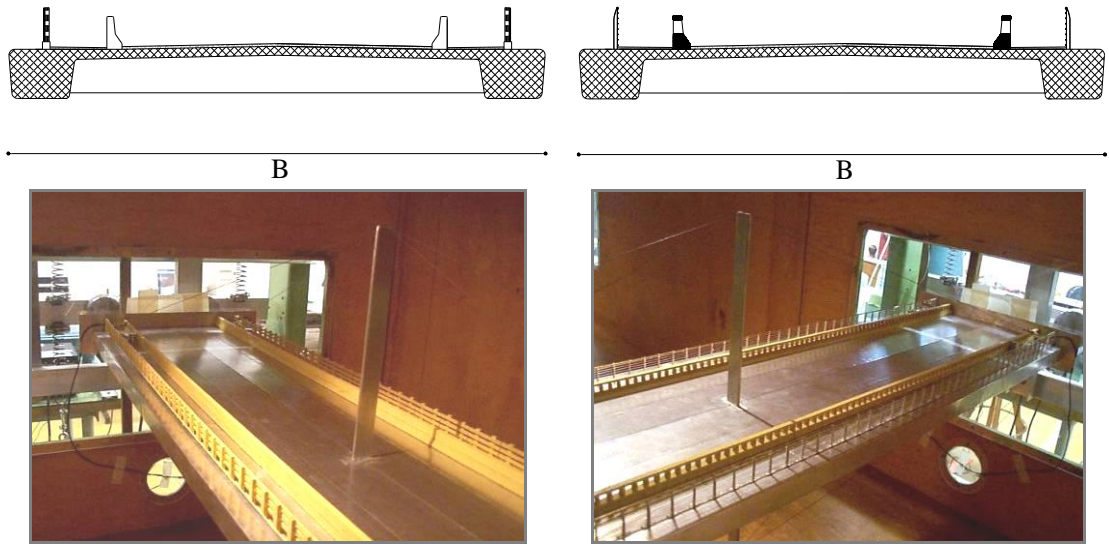


Figura 15: Projeto da ponte estaiada sobre o rio *Guamá* (LOREDO-SOUZA ET AL., 2005a).

Na Figura 17, são mostrados os resultados em termos de coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação para as configurações testadas e diferentes tipos de escoamento do vento.

Recentemente, uma obra de arte da engenharia brasileira foi concluída em São Paulo capital. Trata-se da ponte estaiada Octavio Frias de Oliveira do *Complexo Viário Real Parque* (LOREDO-SOUZA et al., 2007 e NÚÑEZ, 2008). A superestrutura é composta por duas pontes transpondo o canal do Rio Pinheiros, com aproximadamente 1200m de comprimento cada uma delas (290m de trecho estaiado cada), sustentadas por um único mastro com 138m de altura. As pontes estaiadas possuem traçado com geometria horizontal em curva e o cruzamento das vias ocorre na base do mastro. Neste estudo, além do uso da técnica de modelagem com modelos seccionais, foi construído um modelo aeroelástico completo da ponte em escala 1:125. Na Figura 18, são mostradas fotografias da estrutura já concluída e outra do modelo aeroelástico no interior do túnel de vento.

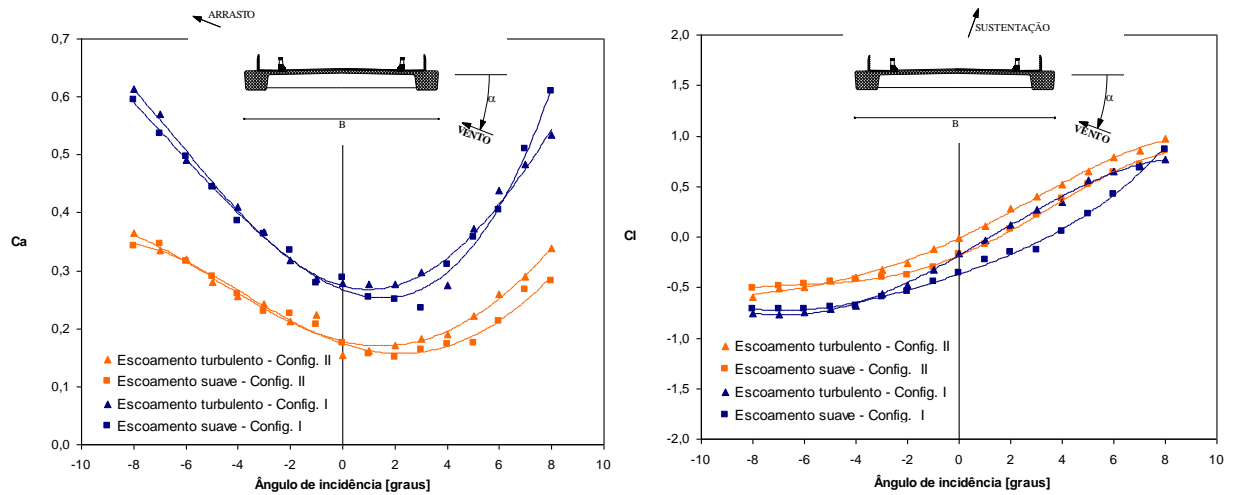




Configuração I

Configuração II

Figura 16: Projeto da ponte estaiada sobre o rio *Guamá* (Loredo-Souza et al., 2005a).



Coefficientes de arrasto

Coefficientes de sustentação

Figura 17: Coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de incidência do vento para as configurações I e II da ponte estaiada sobre o rio *Guamá* (LOREDO-SOUZA et al., 2005a).



Figura 18: Fotografias da ponte estaiada Octávio Frias, do Complexo Viário Real Parque: estrutura concluída e modelo aerológico no interior do túnel de vento em escala 1:125. (LOREDO-SOUZA et al., 2007).

Maiores detalhes sobre o estudo da ponte estaiada Octávio Frias do *Complexo Viário Real Parque* podem ser encontrados nos trabalhos de Loredou-Souza et al. (2007) e de Núñez (2008).

#### 4.2.4 Coberturas

No trabalho de Loredou-Souza et al. (2010), é apresentado o estudo sobre a ação estática do vento sobre a Nova cobertura do *Estádio Beira-Rio* a ser construída em Porto Alegre – RS, mostrada em perspectiva artística na Figura 19. A geometria bastante particular da referida estrutura é fator preponderante na realização do estudo específico em túnel de vento. Na Figura 20, são mostradas fotografias do modelo reduzido no interior do túnel de vento com simulação da topografia no entorno da cobertura.



Figura 19: Perspectiva artística da Nova Cobertura do Estádio Beira-Rio (Loredou-Souza et al., 2010).



Figura 20: Fotografias do modelo reduzido da nova cobertura do Estádio Beira-Rio no interior do túnel de vento em escala 1:500. (Loredou-Souza et al., 2010).

Um exemplo de carregamento estático devido ao vento obtido através da medida de pressões na superfície do

modelo da Nova Cobertura do *Estádio Beira-Rio* é mostrado na Figura 21.

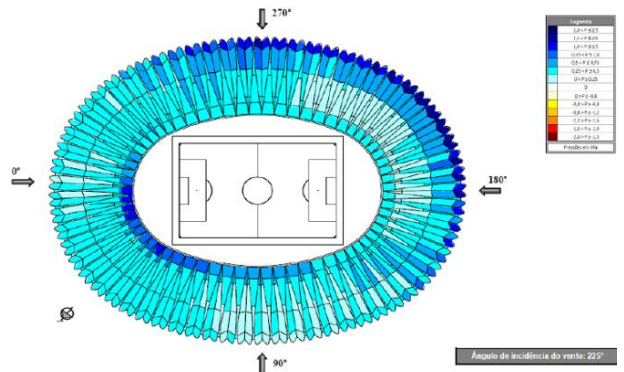


Figura 21: Exemplo de diagrama com distribuição de pressões [kPa] (Loredou-Souza et al., 2010).

Na Figura 22, é mostrada uma perspectiva artística da cobertura do Estádio Olímpico *Luis Ramos* construída em Puerto La Cruz – Venezuela. Tal cobertura tem arco principal com 270m e trecho da cobertura com 166,7m. Também na Figura 22 é mostrado o modelo reduzido para a medida de pressões na superfície do modelo, instrumentado com tomadas de pressão para a medida das pressões na superfície interna (LOREDO-SOUZA E ROCHA, 2007).



Figura 22: Perspectiva artística e modelo reduzido da cobertura do Estádio Olímpico Luis Ramos (Loredou-Souza e Rocha, 2007).

#### 4.2.5 Estudos diversos

Além dos estudos descritos nos itens anteriores, outras linhas de pesquisa do Laboratório de Aerodinâmica das Construções contemplam estudos sobre a ação do vento em pedestres, erosão eólica, dispersão de poluentes, operação de helipontos, etc.

Na Figura 23, são mostradas fotografias do modelo do empreendimento *Rochaverá* no interior do túnel de vento para a medida de velocidades na altura equivalente de pedestres. Estes estudos visam fornecer aos profissionais responsáveis pelo projeto informações sobre os efeitos do vento sobre as pessoas baseadas em critérios de conforto, destacando assim locais potencialmente perigosos ou desconfortáveis. Maiores detalhes sobre estes estudos podem ser obtidos em (Loredo-Souza e Schettini, 2001).



Figura 23: Modelo reduzido do empreendimento *Rochaverá* no interior do túnel de vento (Loredo-Souza e Schettini, 2001).

No estudo realizado para a *Companhia Vale do Rio Doce*, o objetivo era resolver o problema de emissão de material particulado das pilhas de carvão do pátio de armazenamento. Este material particulado, uma vez colocado em suspensão, era transportado pelo vento a quilômetros de distância desde o porto de *Tubarão* até a capital Vitória. Na Figura 24, é mostrado o momento da erosão eólica no topo de uma pilha de carvão e modelo reduzido (escala 1:125) de uma pilha no interior do túnel de vento. Maiores detalhes deste estudo podem ser obtidos no trabalho de Loredo-Souza et al. (2005b).



Figura 24: Emissão de material particulado no topo de uma pilha de carvão e modelo reduzido da pilha no interior do túnel de vento (Loredo-Souza et al., 2005b).

Outro problema ocasionado pelo vento no topo de edificações é o da operação de helipontos. Devido ao detalhamento arquitetônico do topo dos edifícios as características do escoamento nesta região pode ocasionar severos efeitos sobre as aeronaves no momento do pouso / decolagem. Na Figura 25 é mostrado um esquema da camada de vórtices gerada pela separação do escoamento no topo dos edifícios e foto do modelo do empreendimento *SP Wellness* no interior do túnel de vento com sonda posicionada para a medição desta camada (Loredo-Souza et al., 2002).

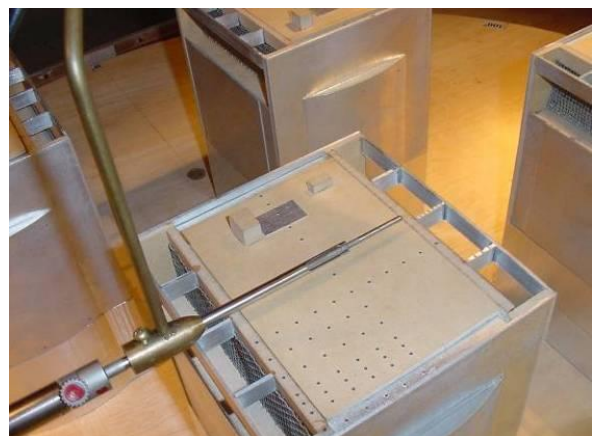
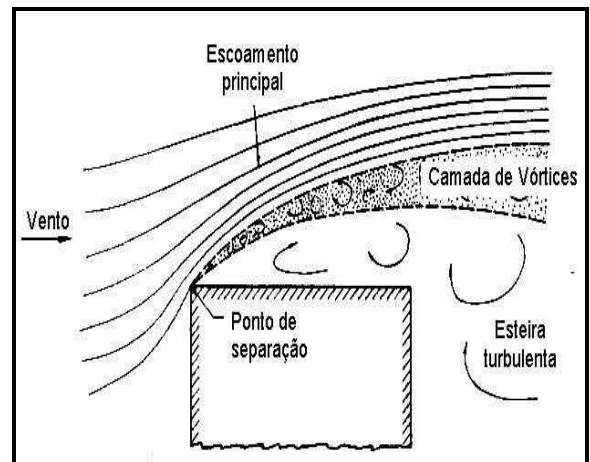


Figura 25: Esquema da separação do escoamento no topo de edificações com arestas vivas e modelo no interior do túnel de vento (LOREDO-SOUZA et al., 2002).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, destaca-se a importância da utilização do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. Constata-se a grande utilização do túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da UFRGS como ferramenta para verificação do desempenho aerodinâmico durante a fase de projeto de complexas obras de engenharia. Entretanto, o equipamento pode ser utilizado como ferramenta de design aerodinâmico numa ampla gama de produtos que necessitem avaliação de suas características aerodinâmicas. Considera-se que a determinação das características aerodinâmicas de produtos através de ensaios em túnel de vento, com a utilização de modelos reduzidos é a melhor ferramenta disponível para projetos desta natureza.

Neste contexto, atualmente estão sendo realizados testes com modelos reduzidos de veículos automotores. Foi adotado como modelo genérico de um veículo automotor o corpo de *Ahmed* (AHMED, 1981 e AHMED et al., 1984). Este volume tem sido muito utilizado em diversos estudos em túneis de vento para a determinação de coeficientes aerodinâmicos, características do escoamento, etc. (URUBA, 2009 e KATZ, 1995). As dimensões originais do corpo de *Ahmed* representam a quarta parte (*quarter-scale*) das

dimensões um veículo tipo *hatchback*. Este modelo é muito adequado para a realização de estudos, a partir dos quais é possível quantificar os efeitos provocados pela variação do ângulo de inclinação da face superior traseira em termos de coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação, por exemplo. De acordo com Hucho (1998) os principais fatores a serem considerados em medições de forças de arrasto em modelos reduzidos de veículos em túneis de vento são: dimensões do túnel de vento, razões de bloqueio, correções devido a bloqueio, número de Reynolds, simulação do efeito do solo, etc. Uma vez estabelecidos os parâmetros importantes para a simulação e, levando-se em consideração as características do túnel de vento foram projetados e construídos dois modelos reduzidos do corpo de *Ahmed*, em escalas geométricas de 1/10 e 1/6,5.

A realização dos testes a partir de modelos com escalas geométricas distintas permite verificar a influência do número de Reynolds e da razão de bloqueio na medição das forças de arrasto. As medições foram realizadas para os ângulos de inclinação da face superior da traseira de 25°, 30° e 35°. De forma a possibilitar a otimização do uso dos modelos reduzidos, estes foram projetados e construídos em três partes: Nariz (parte frontal com bordos curvos), corpo (região central paralelepípedica) e traseira (parte posterior com face superior inclinada). Na Figura 26, é mostrada uma perspectiva do projeto do modelo permitindo a identificação das partes constituintes.

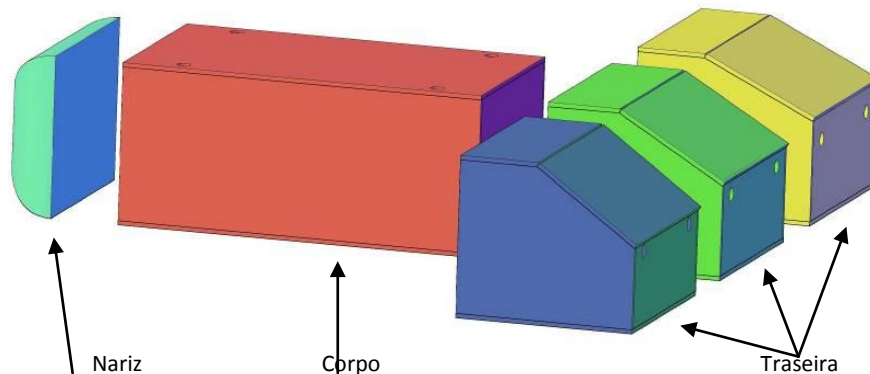


Figura 26: Perspectiva do projeto dos modelos do corpo de *Ahmed*.

Para a medição das forças de arrasto nos modelos reduzidos do corpo de *Ahmed*, a parte que compõe o conjunto corpo + nariz foi fixada na mesa de testes e, uma a uma, as respectivas partes traseiras com ângulos de inclinação de 25°, 30° e 35° foram afixadas completando o conjunto e realizadas as aquisições para 7 diferentes velocidades do vento. Esta mesa foi rigidamente conectada à

uma balança de forças unidirecional que foi adequadamente calibrada para a gama de forças esperada. Na Figura 27, são mostradas fotografias do modelo reduzido do corpo de *Ahmed* em escala 1/10 no interior do túnel de vento, sobre mesa de testes para a realização de medidas dos coeficientes de arrasto.



Figura 27: Fotografias dos modelos do corpo de *Ahmed* em escala 1/10 no interior do túnel de vento.

Na Figura 28, são mostrados os resultados em termos de coeficientes aerodinâmicos de arrasto em função do número de Reynolds para os modelos reduzidos do corpo de *Ahmed* (1/10 e 1/6,5), para diferentes ângulos de inclinação da face

superior traseira. Os resultados foram obtidos mediante ensaios com escoamento uniforme e suave e, os coeficientes de arrasto calculados com a pressão dinâmica de referência corrigida pelo fator de bloqueio.

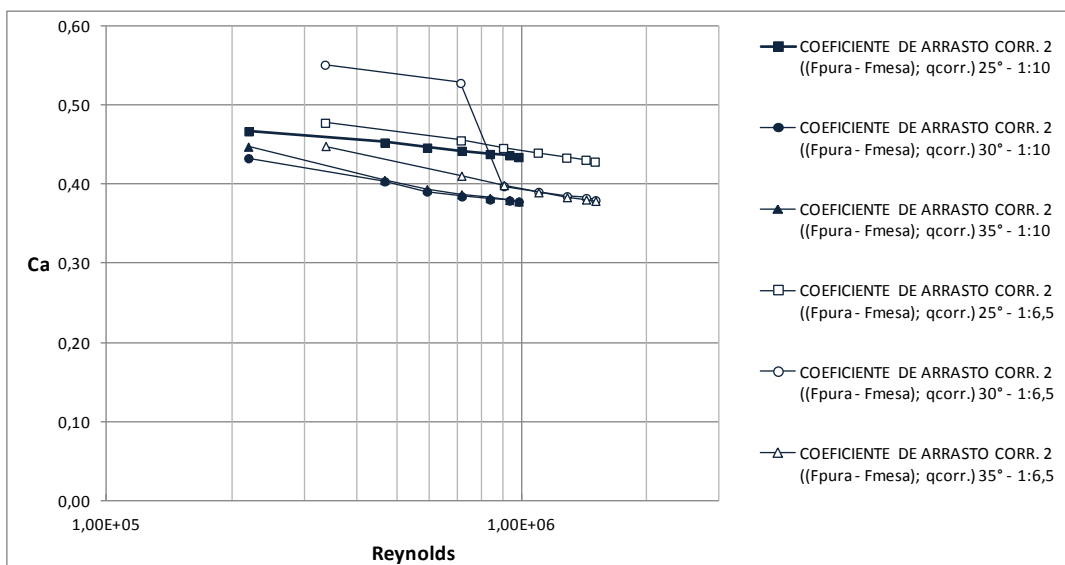


Figura 28: Valores dos coeficientes de arrasto em função do número de Reynolds para os modelos reduzidos do corpo de *Ahmed* em função da escala geométrica, do ângulo da face superior da parte traseira. Resultados corrigidos pelo fator de bloqueio.

Além de medidas de coeficientes de arrasto, a utilização de técnicas de visualização do escoamento em torno de modelos reduzidos de veículos auxilia na interpretação dos resultados, possibilitando a identificação de zonas de alta vorticidade e de separação do escoamento, por exemplo. A

utilização de uma haste flexível (fio de lã) ou injeção de fumaça são as técnicas mais comumente empregadas. Exemplos de visualização do escoamento em torno de um modelo reduzido de ônibus estudado no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann são mostrados nas Figuras 29 e 30.



Figura 29: Sequencia imagens da visualização do escoamento com o uso de haste flexível (fio de lã preto) em torno de um modelo reduzido de um ônibus na região da esteira - parte posterior do ônibus (vento incidindo na horizontal, da direita para a esquerda).



Figura 30: Fotografia da visualização do escoamento com injeção de fumaça em torno de um modelo reduzido de um ônibus (vento incidindo na horizontal, da direita para a esquerda).

## REFERÊNCIAS

- [1]. ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. 2005.
- [2]. AHMED, S. R. An experimental study of the wake structures of typical automobile shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 9, p. 49-62, 1981.
- [3]. AHMED, S. R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE Technical Paper Series 840300*. 34p., 1984.
- [4]. BAXTER, M. Projeto de Produto: Guia prático para o design de novos produtos. 2ª Edição. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- [5]. BLESSMANN, J. The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, v. 10, p. 231-248, 1982.
- [6]. BLESSMANN, J. Aerodinâmica das construções. 2. ed. Porto Alegre. Editora Sagra, 1990. 263p.
- [7]. CARPEGGIANI, E. A. Determinação dos Efeitos Estáticos de Torção em Edifícios Altos Devido à Ação do Vento. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.
- [8]. GORECKI, J. P. Wind tunnel design and applications In: Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. 1998, Porto Alegre. Proceedings... Porto Alegre: Brasil, May 25-29, p.1-13, 1998. Riera and Davenport Editors.
- [9]. HESKETT, J. Desenho Industrial. 3ª edição, Rio de Janeiro: José Olympio, 2006.
- [10]. HUCHO, I W. H. Aerodynamics of Road Vehicles, 4th ed., SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 1998.
- [11]. ITO, M.; NAKAMURA, Y. Aerodynamic Stability of Structures in Wind. *IABSE Periodica 2/1982*, IABSE Surveys S-20, p. 33-56, 1982.
- [12]. KATZ, J. Race Car Aerodynamics: Designing for Speed. Bentley Publishers, USA, 1995.
- [13]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; SCHETTINI, E. B. C. . Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto e Segurança de Pedestres para o Projeto RochaVerá, São Paulo. LAC-UFRGS. Relatório interno. 2001.
- [14]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; SCHETTINI, E. B. C. ; ROCHA, M. M. Estudo em Túnel de Vento das Condições de Conforto de Pedestres para o Projeto SP Wellness - Alphaville. LAC-UFRGS. Relatório interno. 2002.
- [15]. LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; PALUCH, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. Turbulência, Sérgio V. Möler e Jorge H. Silvestrini Editores, vol. 4, 2004 – p. 137-163.
- [16]. (a) LOREDO-SOUZA, A. M. ; PALUCH, M. J. ; ROCHA, M. M. ; NÚÑEZ, G. J. Z. ; CARPEGGIANI, E. A. ; RIPPEL, L. I. . Projetos de Pontes Estaiadas - Ação do Vento. In: Congresso de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, 2005.
- [16]. (b) LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; GUIMARAES, A. F.; PIMENTEL, J. L.; IGNACIO, L. R.. Wind Tunnel Testing of a Coal Pile Model of the CVRD - Vitória, Brazil, and the Effects Caused by Porous Fences. In: 10th ACWE - Americas Conference on Wind Engineering, 2005, Baton Rouge, Louisiana, USA. CD - Tenth Americas Conference on Wind Engineering Pre-Proceedings, 2005.
- [18]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. ; PALUCH, M. J. ; RIPPEL, L. I. ; CARPEGGIANI, E. A. ; NÚÑEZ, G. J. Z. ; SILVA, A. O. E. ; MEDEIROS, J. C. P. . Coeficientes de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão. In: XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 2006, Campinas, SP. Anais das XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 2006. p. 1102-1110.
- [19]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. . Determinação em Túnel de Vento dos Coeficientes de Arrasto Aerodinâmico sobre Modelos Seccionais do Arco da Cobertura do Estádio Olímpico Luís Ramos, Puerto La Cruz - Venezuela. LAC-UFRGS. Relatório interno. 2007.
- [20]. LOREDO-SOUZA, A. M. . Ação Estática do Vento sobre o Empreendimento Prosperitas São Paulo. LAC-UFRGS. Relatório interno. 2007.
- [21]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. ; NÚÑEZ, G. J. Z. ; CARPEGGIANI, E. A. ; PALUCH, M. J. . Estudo em Túnel de Vento do Comportamento Dinâmico do Complexo Viário Jornalista Roberto Marinho. In: II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2007, Rio de Janeiro. II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2007.
- [22]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; NÚÑEZ, G. J. Z. ; OLIVEIRA, M. G. K. ; SIQUEIRA, G. M. ; BÊNIA, M. C. D. . Majorações e Reduções nas Cargas de Vento em Edifícios Altos de Concreto Armado: Influência de Prédios Vizinhos. In: 51 Congresso Brasileiro do Concreto, 2009, Curitiba. Anais do 51 Congresso Brasileiro do Concreto, 2009.
- [23]. LOREDO-SOUZA, A. M. ; ROCHA, M. M. ; OLIVEIRA, M. G. K. ; KLEIN, G. M. B. ; BÊNIA, M. C. D. ; SIQUEIRA, G. M. . Estudo em Túnel de Vento da Cobertura do Estádio Beira-Rio, Porto Alegre. In: III Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, 2010, Rio de Janeiro. Anais do CBPE2010 - CD, 2010.
- [24]. MEASNET. Cup Anemometer Calibration Procedure. Version 1, September, 1997.
- [25]. NÚÑEZ, G. J. Z. Determinação experimental e teórica da resposta transversal à ação do vento de uma torre de telecomunicações de concreto armado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2001.
- [26]. NÚÑEZ, G. J. Z. Investigação Experimental do Efeito de Interferência de Tabuleiros Paralelos de Pontes em Túnel de Vento Frente ao Desprendimento de Vórtices. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.
- [27]. PIRES, J. C., OLIVEIRA, B. F. Modelagem e Simulação Virtual de Pá para Aerogerador de Pequeno Porte. *Design & Tecnologia*, Vol. 2, 69-75, 2010.
- [28]. SCOTT, R. In the Wake of Tacoma: Suspension Bridges and the Quest for Aerodynamic Stability. Second printing. USA. ASCE press, 2001.
- [29]. URUBA, V.; HLADÍK, O. On the Ahmed Body Wake In: Colloquium FLUID DYNAMICS 2009. Institute of Thermomechanics AS CR, v.v.i., Prague, October, 21-23, 2009.