

## APRESENTAÇÃO DO TÚNEL DE VENTO DA FAU/UFRJ

**Oscar Daniel Corbella (1)<sup>1</sup>; Acir Mércio Loredou-Souza (2); Mario José Paluch (3)**

(1) FAU/UFRJ, (21) 2598.1978, fax (21) 2598.1890 – [ocorbella@terra.com.br](mailto:ocorbella@terra.com.br)

(2) LAC/UFRGS, (51) 3308.7145, fax (51) 3308.7146 - [acir@ufrgs.br](mailto:acir@ufrgs.br)

(3) PPGE/UPF, (54) 3316.8233, fax (54) 3316.8233 - [corrient@upf.br](mailto:corrient@upf.br)

### RESUMO

Neste artigo se descreve o novo Túnel de Vento de Camada Limite instalado na FAU/UFRJ, construído para servir como demonstração da interação entre o meio construído e o vento. Tendo como finalidade inicial a demonstração aos alunos de graduação, a colaboração entre vários grupos de pesquisa o transformou em um instrumento de pesquisa científica de conseqüências sobre regiões delimitadas da cidade ou sobre vários efeitos de decisões arquitetônicas sobre o edifício. O Túnel, de circuito aberto, tem um comprimento total aproximado de 7,20 m, possuindo um ventilador centrífugo, instalado a barlavento do modelo a ser ensaiado, constando de várias gavetas deslizantes com telas e colméias que tornam os perfis de velocidade do escoamento mais uniformes. Posteriormente, na seção de ensaio do túnel foram dispostos vários dispositivos, descritos no trabalho, para simular um escoamento com propriedades semelhantes ao vento real. Os modelos se localizam sobre uma mesa giratória, com o fim de simular o vento provindo de várias direções. O Túnel está instalado no LCA/FAU/UFRJ. Descrevem-se vários ensaios que podem ser realizados com esta ferramenta, propostos para vários métodos de visualização, fundamentalmente erosão de areia. A pesquisa para o projeto do Túnel teve financiamento do CNPq, através do Projeto No. 479073/2003-1.

Palavras chaves: túnel de vento, conforto ambiental, urbanismo bioclimático, arquitetura bioclimática, ensaios em modelos.

### ABSTRACT

In this paper it is described the new Boundary Layer Wind Tunnel of the FAU/UFRJ, built to serve as demonstration of the interaction between the wind and its environment. Having as its initial goal the demonstration to undergrad students, the collaboration among several research groups has transformed it in a research tool for problems concerning the urban environment and building architectural details. The open circuit tunnel has a total length of 7,20 m, having a centrifugal fan installed windward of the test table, and several devices as screens and honeycombs to make the flow smoother and uniform. Furthermore, with the purpose of simulating a real atmospheric flow, other devices were placed at the wind tunnel floor and flow entrance. The models are put in a turntable to simulate the wind coming from various angles. The tunnel is located at LCA/FAU/UFRJ. The possibilities of studies are described to be performed with this tool, especially for visualization methods with emphasis in aeolian erosion. The research for the tunnel design had the financing of CNPq, through Project No. 479073/2003-1.

Keywords: wind tunnel, pedestrian comfort, bioclimatic urbanism, bioclimatic architecture, model testing.

---

<sup>1</sup> Pesquisador do CNPq.

## 1. INTRODUÇÃO - HISTÓRICO E JUSTIFICATIVA DO PROJETO

Em novembro de 2003 foram aprovados os recursos solicitados ao CNPq (Edital Universal 01/2002) para a construção de um Laboratório de Conforto Ambiental para a FAU/UFRJ, destinados a atender o projeto e a construção de um Heliódón, um céu artificial e um túnel de vento, sendo os três aparelhos destinados à demonstração de fenômenos ambientais para os alunos da graduação.

Posteriormente a esta apresentação ao CNPq, outro grupo de pesquisa, também da FAU/UFRJ, solicitou recursos para o PROCEL com um objetivo similar ao pedido anterior. Depois de aprovado o pedido pelo CNPq, e começada a pesquisa para projetar os distintos componentes, foi aprovado também o pedido ao PROCEL. Após numerosas reuniões com professores e autoridades da FAU, combinou-se que os recursos aprovados pelo PROCEL seriam utilizados para a construção do Heliódón e o céu artificial, ao passo que os recursos oriundos do CNPq, passariam a ser utilizados para a construção de um túnel de vento de maior gabarito. Entendeu-se que pudesse também ser utilizado para pesquisa, além de demonstração para alunos da graduação. Tendo a autorização ao CNPq para mudar os objetivos e a forma de aplicação dos recursos, concentrou-se sobre a realização do mesmo.

Decidido o abandono do projeto rudimentar feito para um túnel de vento de demonstração, prosseguiram-se os contatos com o Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC/DECIV/PPGEC/UFRGS), para realizar outro projeto com uma boa base científica, cumprindo com os requisitos técnicos solicitados pela FAU/UFRJ. Também, foi determinado o lugar físico onde se podia montar o túnel na FAU/UFRJ, dentro da região destinada ao Laboratório de Conforto Ambiental.

Em maio de 2004, o LAC apresentou uma proposta de consultoria que foi aceita após vários debates, fundamentalmente com relação ao uso futuro do túnel de vento e o espaço disponível, visto o projeto geral de laboratórios da FAU/UFRJ (Fig. 1).

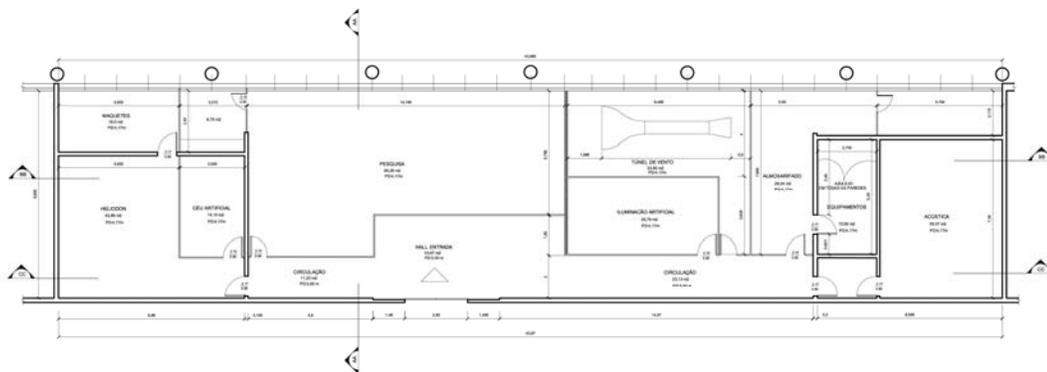


Fig. 1 Esquema de localização do Túnel de Vento no Laboratório de Conforto Ambiental no térreo da FAU/UFRJ - Rio de Janeiro, outubro de 2004.

Depois de serem consideradas várias opções para o projeto do túnel, aprovou-se a versão definitiva em setembro de 2005, após definida a potência do motor do ventilador, sendo determinante a relação custo – benefício e o dinheiro disponível. Nesse momento, definido o tipo de túnel, começaram a serem tomadas as primeiras medidas para a construção, estudando-se vários levantamentos de preços tanto de materiais a serem empregados quanto à mão de obra capaz de construir o equipamento. Foi finalmente acordado realizar o corpo do túnel na Oficina de Metais e Madeira da EBA/UFRJ, que apresentou os custos mais baixos, e maiores facilidades para o controle das diferentes etapas da construção, devido a estar localizado no prédio da Reitoria da UFRJ, o mesmo que é sede da FAU.

Paralelamente, foram estudadas as diferentes opções para a aquisição do ventilador centrífugo, determinando-se a compra à empresa OTAM, de Porto Alegre, aparelho que foi recebido em fevereiro de 2006. Um esquema da vista lateral do túnel é apresentado na figura 2.

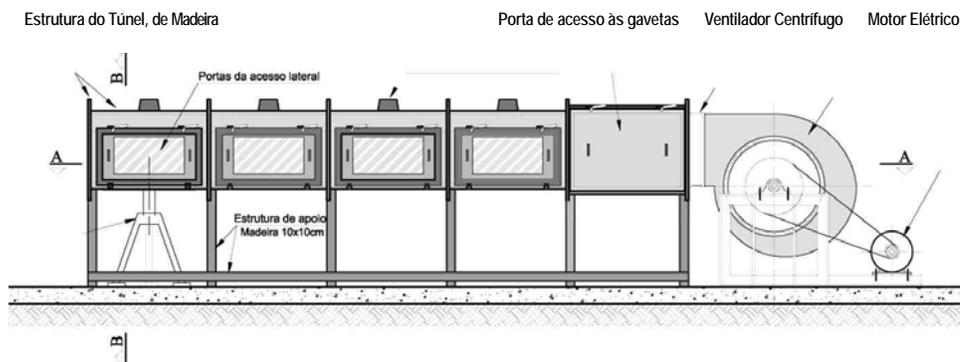


Figura 2. Projeto do túnel de vento - Vista lateral

Contratou-se a empresa ACAM, que tinha alguma experiência com túneis de vento, para a montagem do ventilador e sua conexão com o corpo principal do túnel. O serviço foi entregue após o término da parte central do túnel em julho de 2006.

O trabalho de calibração em vazio do túnel foi realizado em setembro de 2006, por técnicos do LAC que viajaram desde o Rio Grande do Sul. O controle de qualidade do túnel da FAU/UFRJ resultou satisfatório para os técnicos, ainda que fossem solicitados alguns melhoramentos.

Posteriormente à calibração em vazio, foi realizado o projeto dos elementos internos para causar uma rugosidade que produzisse turbulências, a fim de simular o vento real de camada limite sobre os modelos a estudar. O projeto foi discutido e foram realizadas as modificações internas, base para geração da rugosidade, a barreira e os geradores de vórtices, necessários para a geração de um escoamento turbulento com características de um terreno de Categoria IV, pela NBR-6123.

## 2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO DO TÚNEL.

O projeto foi realizado com o intuito de construir uma ferramenta capaz de permitir o entendimento da interação do escoamento do vento com as edificações e seu entorno, através da utilização de técnicas de visualização, principalmente erosão eólica.

Apesar do fato de que uma variedade de dispositivos ativos e passivos tais como jatos, grelhas, geradores de vórtices etc., (Loredo-Souza, A. M., Schettini, E. B. C. e Paluch, M. J., 2004) tenham tido sucesso na geração de escoamentos deslizantes e turbulentos, existem vantagens na utilização do método mais simples de crescimento natural da camada limite, permitindo-se o desenvolvimento do escoamento através de uma longa superfície rugosa. Portanto, no projeto de um túnel de vento de camada limite é desejável que ao menos uma parte do escoamento desenvolva-se sobre cobrimentos mínimos com diferentes rugosidades.

Durante o planejamento do túnel de vento, diversas condições e restrições tiveram que ser consideradas. O baixo custo do equipamento foi uma premissa básica no projeto. Da mesma forma, o túnel devia ser locado dentro de uma sala da FAU-UFRJ com dimensões em planta de 8,50 m x 4,00 m. Finalmente, a velocidade desejável para a realização dos ensaios de erosão eólica era de até 10 m/s.

A disponibilidade de espaço e baixo custo excluíram a possibilidade da construção de uma configuração do tipo retorno fechado. Um túnel de vento de circuito aberto foi então escolhido. Para facilitar o projeto e a fabricação do túnel, adotou-se uma seção transversal retangular.

A geometria da sala da FAU-UFRJ foi o principal fator determinante das dimensões do túnel de vento. Não sendo possível avaliar de forma precisa correções de bloqueio aplicáveis a grupos de edificações expostas a escoamentos turbulentos e deslizantes, foi desejável minimizar os efeitos do bloqueio para evitar a necessidade de correções. Portanto, era desejável um túnel com uma seção transversal grande o suficiente para atingir o objetivo principal de realizar testes de visualização do escoamento através da utilização de material particulado para erosão eólica.

A especificação do comprimento do túnel foi mais complicada. Claramente, do ponto de vista das simulações, quanto maior o comprimento da secção de ensaios, mais vantagens ela apresenta. Porém, devido à já mencionada questão do espaço, o comprimento da câmara de ensaios foi definido em conjunto com necessidades mínimas de espaço de outros componentes do túnel, tais como ventilador, motor, gavetas de simulação, etc.

Existem duas possibilidades de configurações para túneis do tipo circuito aberto, dependendo se o ventilador é na entrada (túnel soprador) ou na saída (túnel de sucção) da câmara de ensaios. O túnel soprador permite a operação de toda a câmara de ensaios à pressão atmosférica e isto traz certas vantagens como, por exemplo, não ser necessária a vedação da câmara de ensaios e o escoamento não ser influenciado pela presença de grandes aberturas a sotavento da câmara de ensaios, permitindo rápido acesso caso necessário.

A única vantagem de um túnel de sucção é que o escoamento advindo diretamente do ambiente em que o túnel está localizado tende a ser bem menos perturbado do que o escoamento advindo diretamente de um ventilador (caso dos túneis sopradores). Este último caso pode ser um problema se um ventilador axial for utilizado, devido à dificuldade em remover a vorticidade do escoamento. Porém, é quase irrelevante se um ventilador soprador centrífugo for utilizado. Portanto, foi considerado que a melhor solução para atingir o objetivo proposto era um túnel tipo soprador, com um ventilador soprador centrífugo. Por limitações de espaço, decidiu-se por evitar o convencional difusor de saída.

Usando-se da teoria usual foi determinada a vazão de ar, a potência aerodinâmica e o salto de pressão a ser fornecido pelo ventilador para estimar suas dimensões. Estimaram-se também as perdas de carga produzidas pelos elementos tais como as colméias de tubos circulares, as grades de regime supercrítico (grades de malha quadrada simuladora de vento natural, com barras 6 mm espaçadas de 25 mm), as telas Otis (com malha 25 mm e arame 2,0 mm), as telas de arame (screen), a câmara de ensaios e a descarga livre para a atmosfera (que em um túnel de circuito aberto implica em coeficiente de perda de carga local).

Nas condições dadas obteve-se, para o túnel em vazio, um coeficiente de perda total teórico  $K_{total} = 3,94$  (sem grade simuladora) ou  $K_{total} = 4,94$  (com a grade simuladora de turbulência). Nessas condições foi estimada a potência aerodinâmica a ser fornecida pelo ventilador. O ventilador centrífugo escolhido, potenciado por um motor elétrico de 30 CV, consegue escoar até 21.500 m<sup>3</sup>/h, aproximadamente. Possui controle de velocidade através de veneziana regulável manualmente.

Na sua versão final, a seção transversal do Túnel mede 0,95 m de largura por 0,65 m de altura (Ver figuras 2 e 3). Funcionando em vazio o túnel demonstrou capacidade para atingir velocidades de até 13 m/s, com um perfil suficientemente plano.



Figura 3 – Vista lateral



Figura 4 – Interior do túnel



Figuras 5 e 6 – Detalhes das gavetas para uniformizar o escoamento

### 3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO DO TÚNEL.

Após o término da construção do túnel de vento foi necessário determinar as características do escoamento simulado e alterar o que não estivesse satisfatório. Este foi um longo processo, pois era necessário que as características do escoamento estivessem dentro dos padrões estabelecidos para o objetivo desejado. Foram utilizados diversos equipamentos para a instrumentação dos modelos e medição das características do escoamento.

A tarefa consistiu em verificar se o escoamento, na condição de túnel em vazio (sem simuladores da camada limite), era o suficientemente uniforme, tanto espacial como temporalmente.

Para que o escoamento no túnel se aproxime às condições ideais (escoamento uniforme e suave), segundo Pankhurst y Holder (apud Surry, 1982), os fenômenos que devem estar ausentes, ou reduzidos a níveis muito baixos, são:

- Distribuição espacial das velocidades médias do vento não uniforme;
- Rotação do escoamento (*swirl*);
- Pulsações de baixa frequência nas velocidades médias do escoamento;
- Turbulência.

Segundo Cermak (1981), na condição de túnel em vazio, as não uniformidades do escoamento na câmara de ensaio não devem ultrapassar  $\pm 2\%$  para as velocidades médias e 1% para a intensidade de turbulência.

Durante a visita realizada pelo pessoal do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC/UFRGS), ao Laboratório de Conforto Ambiental (LCA) da UFRJ, foram realizadas as seguintes tarefas:

- Testou-se qualitativamente a ausência de rotação do escoamento e de níveis elevados de turbulência;
- Medição das velocidades médias do vento na seção principal do túnel, ou seja, em correspondência com a mesa de ensaio;
- Medição das velocidades médias do vento na zona de ingresso à câmara de ensaio do túnel;
- Medição das velocidades médias do vento na seção principal do túnel sem as telas uniformizadoras;

Para efetuar a determinação de velocidades foi empregado:

- Um tubo de Pitot-Prandtl, que por meio de uma mangueira plástica foi conectado a um transdutor elétrico de pressão diferencial Honeywell, modelo 163 PC01 D36. As leituras de tensão (médias temporais), proporcionais à pressão dinâmica do escoamento, foram lidas num voltímetro digital (ver figura 7);
- Um sensor analógico de pressão atmosférica;
- Um sensor elétrico de temperatura.

As velocidades médias do vento foram calculadas a partir da medição das pressões dinâmicas, pressão atmosférica e temperatura do escoamento. Considerando também que o maior desvio em velocidades médias, com relação à velocidade de referência, foi de 17,5% sem telas, e de 7,8% com telas, pode-se concluir que as mesmas produzem um acréscimo significativo na qualidade do escoamento, já que reduzem as não uniformidades espaciais e temporais das velocidades do ar.

Observou-se, também, que a uniformização das velocidades conduz a uma queda na velocidade do túnel, de 14 m/s (sem telas) para 12 m/s (com telas), aproximadamente.

A determinação qualitativa da ausência de rotação no escoamento (*swirl*) e de níveis elevados de turbulência foi realizada com a ajuda de um fio de lã de uns 30 cm, aproximadamente, fixado à extremidade da sonda de um anemômetro comercial. A sonda foi localizada em diferentes pontos da câmara de ensaio, sendo que o fio de lã se manteve, em forma estacionária, paralelo ao eixo do túnel.



Figura 7 – Tubo de Pitot-Prandtl para medir os perfis de vento.

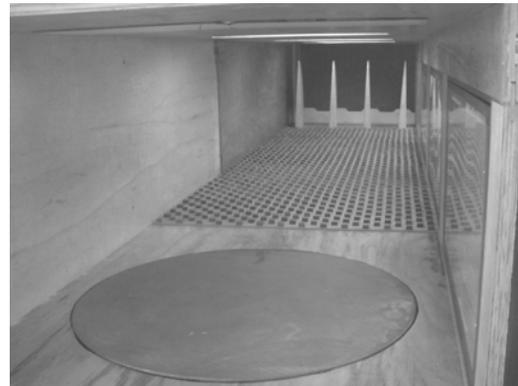


Figura 8 – Elementos para produzir rugosidade.

Os resultados recolhidos permitiram concluir que na condição de túnel em vazio, este túnel possui um escoamento suficientemente uniforme, tanto espacial como temporalmente, o que permite que sejam iniciados os trabalhos de simulação da camada limite atmosférica.

#### **4. PROJETO DE GERADORES DE TURBULÊNCIAS.**

A localização de elementos geradores de turbulências teve por objetivo conseguir simular um vento com rugosidade Categoria IV (segundo a NBR 6123, 1988) com  $p = 0,25$ ;  $z_0$  entre 700 e 1000 mm e  $\delta$  entre 420 e 600m. Para alcançar esse objetivo foi empregada a técnica de simulação de Counihan consistente na colocação de uma barreira, de geradores de vorticidade e de rugosidade.

A rugosidade foi simulada por uma base composta por blocos de madeira de base quadrada, de 20 mm de lado e 12 mm de altura. Os blocos, dispostos em X, foram distanciados de 5 cm, tanto no sentido longitudinal quanto transversal (Fig. 8).

Para os geradores de vorticidade foram previstos quatro elementos, tipo aletas de tubarão, de 50 cm de altura. Observados lateralmente, a borda a barlavento dos geradores possui a forma de um quarto de elipse, com o semi-eixo maior vertical de 50 cm e o semi-eixo menor horizontal de 25 cm. Cortando

horizontalmente os geradores resultam triângulos isósceles de altura variável, com um semi-ângulo de  $6^{\circ}$  entre os lados iguais do triângulo. A separação entre eixos dos geradores é de 25 cm (Fig. 9).

A barreira, com altura média de 9 cm que cresce para 11,5 cm em correspondência com os geradores de vórtices, foi localizada em uma das caixas dos simuladores, o mais próximo à câmara de ensaio (Fig. 10). As partes altas e baixas da barreira possuem um comprimento de 10 cm, com exceção das partes baixas localizadas nas extremidades, com 2,5cm. A separação entre a barreira e os geradores localizados a sotavento é de 20 cm.



Figura 9 – Elementos geradores de vorticidade



Figura 10 - Posição da barreira

Colocados os elementos geradores de turbulências a próxima tarefa antes de começar com o uso para demonstração e pesquisa, é a verificação experimental dos perfis de vento.

## 5. CONCLUSÃO

A visa de conclusão pode-se afirmar que, após um trabalho árduo, conseguiu-se produzir um equipamento que se apresenta como um aparelho experimental de alta qualidade, com potencialidades para servir à pesquisa científica dos efeitos dos ventos sobre a urbe e as construções, e para servir de demonstração desses efeitos aos alunos da graduação em arquitetura, para entender melhor os conceitos e aprimorar seus projetos. Os resultados apresentados permitem concluir que podem ser iniciados os trabalhos de simulação da camada limite atmosférica.



Figura 11 – Posicionamento de maquete de parte do bairro de Copacabana - RJ



Figura 12 – Vista geral do túnel de vento da FAU/UFRJ

Cabe ressaltar que pesquisas similares às que podem ser propostas para este equipamento foram realizadas em 2005 por um de nossos doutorandos, (visualização de zonas de estagnação em maquete urbana por meio da técnica de erosão de areia) usando o túnel de vento do IPT em São Paulo. Estas tarefas deram lugar a vários trabalhos de pesquisa e à Tese Doutoral do Prof. Homero Jorge Mattos de Carvalho, sobre uma metodologia para levantamento micro-climático urbano analisando um bairro da cidade de João Pessoa. Foi também estudada uma maquete de uma região de Copacabana, no Rio de Janeiro, como parte de outra Tese de Doutorado, da Prof.a Virginia Vasconcellos, com o qual foram identificados padrões de circulação de ventos da região estudada.

Outros tipos de trabalhos que se podem realizar com esta ferramenta e essa técnica são: a visualização de locais com estagnação para localização de barreiras protetoras de ventos ou ruídos (em aeroportos), no projeto urbano para a localização de zonas com maior escoamento de ventos e, com ajuda de um heliodón ou software para determinação da incidência da radiação solar, estudar os pontos propensos a tornarem-se ilhas de calor. Neste momento, se está trabalhando com as autoridades da FAU para determinar o tipo de experiências a realizar no túnel para apoio à docência, nas disciplinas diretamente correlacionadas, e para os projetos arquitetônicos e urbanos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- Carvalho, H. J. M. de, (2006), Análise.... Tese de Doutorado, PROURB/FAU/UFRJ, abril de 2006.
- Carvalho, H. J. M., Corbella, O. D. e Da Silva, F. A., (2007) Influência Da Direção Dos Ventos Sobre as Correlações entre a Forma Urbana e o Clima. Enviado para o ENCAC 2007, aprovado o resumo.
- Carvalho, H. J. M., Corbella, O. D. e Da Silva, F. A., (2007) Metodologia para a Análise das Interações entre a Forma Urbana e o Clima, enviado para o ENCAC 2007, aprovado o resumo.
- Cermak, J. E. (1981) Wind Tunnel Design for Physical Modeling of Atmospheric Boundary Layer. Journal of the Engineering Mechanics Division. Volume 107 N.3 May/June 1981. p. 623-642.
- Loredou-Souza, A. M., Schettini, E. B. C., Paluch, M. J. (2004) Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. In: *Turbulência* / editores Sérgio Viçosa Möller e Jorge Hugo Silvestrini. – Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. (Coleção Cadernos de Turbulência, 4). ISBN: 85-85769-19-X.
- Pankhurst y Holder (apud Surry, 1982)
- Stathopoulos, T. (1984) Design and Fabrication of a Wind Tunnel for Building Aerodynamics. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 16 Issues 2-3 April 1984 p. 361-376.
- Vasconcellos, V. M. N. de, (2006) O Entorno Construído e o Microclima de Praças em Cidades de Clima Tropical Quente E Úmido: Uma Contribuição Metodológica para o Projeto Bioclimático. Tese de Doutorado, PROARQ/FAU/UFRJ, dezembro de 2006.