



**XIENCAC**  
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

**VIIELACAC**  
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO  
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

## CONSTRUÇÃO DE MODELOS FÍSICOS PARA ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NATURAL EM TÚNEL DE VENTO

Alessandra R. Prata-Shimomura (1); Gabriela Celani (2); Anésia Barros Frota (3)

(1) PhD, Pesquisadora, Departamento de Arquitetura e Construção, [arprata.shimo@gmail.com](mailto:arprata.shimo@gmail.com)

(2) PhD, Professora, Departamento de Arquitetura e Construção, [celani@fec.unicamp.br](mailto:celani@fec.unicamp.br)

(3) PhD, Professora do Departamento de Tecnologia da Arquitetura, [arfrota@uol.com.br](mailto:arfrota@uol.com.br)

(1) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, LACAF, Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada.

(2) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, LAPAC, Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção.

Avenida Albert Einstein, 951, Cidade Universitária "Zeferino Vaz", cep: 13083-852, Campinas/SP, tel: (19) 3521-2909.

(3) Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, LABAUT – Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética. Rua do Lago, 876, Cidade Universitária, cep: 05508-900, São Paulo/SP. tel: (11) 3091-4571 fax: (11) 3091-4539

### RESUMO

Este artigo apresenta técnicas para a construção de modelos físicos utilizados em estudos de caso (para a cidade de Santos e São Paulo) para conhecer as características da ventilação urbana de uma dada região; bem como as técnicas utilizadas nos ensaios em túnel de vento. O objetivo, nestes casos, foi verificar a possibilidade de compreender a situação atual e avaliar alternativas de intervenção dos cenários estudados. Para isso foi utilizado o equipamento túnel de vento de camada limite atmosférica e técnicas que apresentaram resultados quali e quantitativos aplicáveis a projetos.

A alternativa de modelos físicos não se limita a escala urbana, possibilitando detalhamento e análise de elementos arquitetônicos em obras existentes e em projetos de edifícios. O principal objetivo verificado, se refere à produção do modelo, que com o uso da prototipagem rápida permitiu que se obtivesse uma excelente precisão dimensional e rapidez na execução. Além disso, foi possível perceber que o uso dessa tecnologia poderia ser mais explorado nos ensaios com maquetes arquitetônicas em túnel de vento, pois permite a reprodução de detalhes e texturas que são normalmente omitidos em consequência da dificuldade de produção das maquetes em escalas muito reduzidas e de forma “tradicional”.

Palavras-chave: modelos físicos, ventilação natural, túnel de vento.

### ABSTRACT

This article presents techniques for constructing physical models used in case studies (to the city of Santos and Sao Paulo) to ascertain the characteristics of urban ventilation in a given region, as well as the techniques used in wind tunnel tests. The goal in these cases was to investigate the possibility of understanding the current situation and assess alternative possibilities of intervention for the scenarios in study. For this we used the boundary layer wind tunnel and techniques that showed qualitative and quantitative results applicable to projects.

The alternative to physical models is not confined to urban scale, enabling detailed analysis and architectural elements in works and projects of existing buildings. The main objective verified, refers to the production of the model, which - with the use of rapid prototyping - enabled us to obtain an excellent dimensional accuracy and speed of execution. Moreover, it was possible to note that this technology could be further explored in tests of architectural models in wind tunnel, because it allows the reproduction of details and textures that are usually omitted due to the difficulty of producing models in very small scales in the "traditional" manner.

Keywords: physical models, natural ventilation, wind tunnel.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao processo de crescimento das cidades, é notável que preocupações relacionadas ao desenvolvimento destas sejam foco de estudos e interesses de pesquisadores. A responsabilidade, neste processo, deve ser de projetistas do solo urbano, buscando um equilíbrio na organização das áreas urbanas, considerando questões como áreas permeáveis, tipo de uso das edificações, padrão de ocupação e variáveis ambientais (sol, vento, umidade).

A verificação das condições de ventilação natural nas cidades com estudos em modelos auxilia na elaboração de projetos arquitetônicos ou de planejamento, possibilitando maior precisão na avaliação da ventilação de ambientes internos e externos, a partir de um melhor conhecimento das condições do entorno.

Alterações na configuração urbana atual, projetos de novos edifícios, de bairros novos ou áreas públicas, envolvem questões relacionadas com o usuário no que tangem o seu conforto (seja térmico, acústico e luminoso), segurança quanto à ação dos ventos, qualidade do ar e, que deveriam ser estudadas e analisadas para a sua implantação.

Quanto à ventilação natural, a avaliação do fenômeno para o dimensionamento, orientação e localização das aberturas e barreiras ao vento é baseada em conceitos da teoria da mecânica dos fluidos. Existem vários métodos de cálculo e simulações do fenômeno com o objetivo de averiguar as condições de ventilação natural em recintos internos. Com a verticalização de áreas urbanas, estudos mais datalhados na malha urbana e na implantação de projetos, tornam-se necessários para o melhor entendimento do conjunto como um todo.

Estudos experimentais, como ensaios em túnel de vento, softwares e/ou modelos matemáticos, são ferramentas importantes que permitem uma análise das transformações urbanas ou arquitetônicas aplicadas ao tecido urbano (quadras, bairros) ou em áreas pré-definidas na implementação de edifícios (PRATA, 2005; PLATE, 1999). Ferramentas que permitem a visualização da ação do vento tanto no exterior e interior dos edifícios, bem como de áreas urbanas, são de grande utilidade para projetistas, pois auxiliam no entendimento do comportamento da ventilação natural. A visualização de escoamentos serve para elucidar o comportamento de fenômenos físicos e permite a obtenção de dados qualitativos e quantitativos (TOLEDO et al., 2004).

O uso de modelos e ensaios em túnel de vento são fundamentais para a verificação dos efeitos do vento decorrentes de modificações em espaços abertos, em grupos de edifícios, dispersão de poluentes ou odores, segurança e conforto dos pedestres, bem como para a análise em edifícios (estrutural) e propagação de emissões veiculares (vias e/ou áreas específicas – garagens, indústrias).

Arquitetos e planejadores estão tomando consciência da necessidade de requerer informação a respeito das prováveis condições de vento ao redor dos edifícios propostos, ainda na fase de projeto (SILVA et al., 2003). Esta informação vem, principalmente, de testes de modelos em túneis de vento, com velocidades medidas na vizinhança de um edifício e com a representação das características do entorno.

A vantagem dos ensaios em túnel de vento em relação às medições feitas no local está no fato de que planejamentos futuros, ou seja, alternativas de mudanças podem ser compreendidas muito rapidamente, assim que seja construído um modelo apropriado da região do projeto.

## 2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo apresentar técnicas para a construção de modelos físicos utilizados em estudos de caso (para a cidade de Santos e São Paulo); bem como as técnicas utilizadas nos ensaios para a avaliação da ventilação natural.

## 3. MÉTODO

Esse trabalho apresenta a construção do modelo físico, o instrumento para avaliação da ventilação natural – neste caso o túnel de vento; e as técnicas utilizadas nos ensaios para a avaliação da ventilação natural.

### 3.1. Construção do modelo físico

#### 3.1.1. Escala do modelo

Para os ensaios em túnel de vento, a reprodução dos perfis de corrente do vento pode ser conseguida através de geradores de turbulência (ou vórtices) e elementos de rugosidade, instalados na extensão do piso do túnel (Figura 1). A semelhança geométrica deve reproduzir fielmente os objetos a serem pesquisados e a escala a ser utilizada, deve ser adequada para não alterar as condições do escoamento.



Figura 1 – Exemplo de elementos de rugosidade colocados no piso do túnel de vento ( PRATA SHIMOMURA, 2010).

Para ensaios em túnel de vento a escala do modelo/maquete depende da dimensão da seção do túnel, da área de estudo, do tipo de ensaio a ser realizado (estrutural, edifício, meio urbano) e dos critérios de semelhança. Podem-se utilizar técnicas para visualização qualitativa do fluxo de ar com fumaça ou técnica de erosão com areia e, para medições quantitativas, são utilizados anemômetros de fio quente e/ou tubo de Pitot, que permitem medir as velocidades das correntes que incidem sobre o modelo (PRATA, 2005).

Para a definição da escala do modelo Silva (1999), entre outros, define um valor crítico de 7%. Este valor refere-se a área frontal do modelo que não deve ocupar mais que 7% da seção do túnel de vento para não proporcionar interferência de efeito de bloqueio nos ensaios.

### 3.1.2. Execução do modelo - técnicas

Para a execução do modelo, além da definição da escala, a técnica a ser utilizada para a construção depende do que será observado. Os modelos podem ser construídos em madeira, acrílico, gesso, etc; podendo serem feitos com técnicas de marcenaria, corte a laser, impressão 3D, dentre outras.

Para este trabalho serão apresentados os modelos desenvolvidos em duas áreas: o Bairro da Pompéia (cidade de Santos/SP) e para trecho do Bairro de Moema (São Paulo/SP).

Para o estudo da área na cidade de Santos, adotou-se as quadras da área do Bairro da Pompéia (entre o canal 1 e 2). A escolha da área e das quadras aconteceu em função da verificação de inserção de edifícios altos nesta área, bem como a configuração urbana atual (PRATA, 2005).

A configuração urbana nesta área abrange edifícios altos (+/- 15 andares) na orla da praia, formando um paredão para as áreas posteriores, e edifícios de menor altura em uma área intermediária (praça central), com edifícios de 2 a 3 andares na parte limite (avenidas). Foi elaborado, no modelo, alterações em determinados pontos, basicamente na segunda quadra atrás do paredão, para verificar possíveis alterações no campo de velocidades. Com o desenvolvimento destes ensaios foi possível verificar o que ocorre na situação atual e com estas alterações (Figura 2).

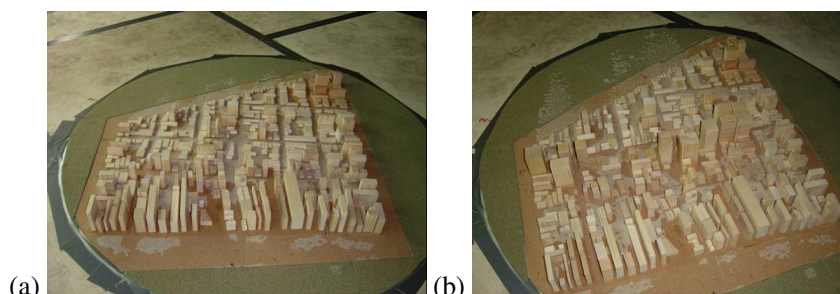


Figura 2 – Imagens dos ensaios – situação atual (a) e com alterações (b) (PRATA, 2005).

A maquete para o ensaio em Santos/SP foi confeccionada em madeira na escala 1:1.000 – aproximadamente 80x80cm, gerando uma “prancha circular” de 1m de diâmetro para a colocação no túnel de vento. Os quarteirões/arruamento foram definidos possibilitando, através de um encaixe, a alteração de cada quadra. Esta alteração possibilitou simular as quadras independentes com a situação atual (Figura 3).

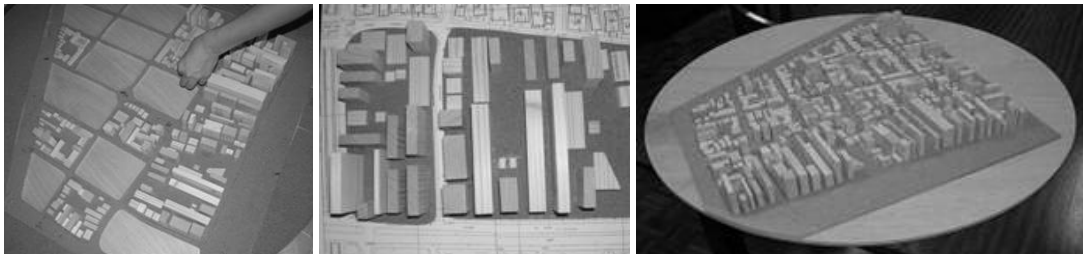


Figura 3 – Exemplo de alteração do modelo para análises independentes (PRATA, 2005).

Na Figura 4 é possível observar que as quadras e o arruamento foram recobertos por uma “folha” de cortiça. Este revestimento foi útil para a visualização dos ensaios de erosão. Como o túnel de vento tem uma área de teste/mesa giratória de 2.60m de diâmetro, esta base foi colocada dentro do túnel de vento, e a área ao redor foi recoberta para evitar que houvesse interferências de pressão e deslocamento do fluxo de vento sob o modelo.

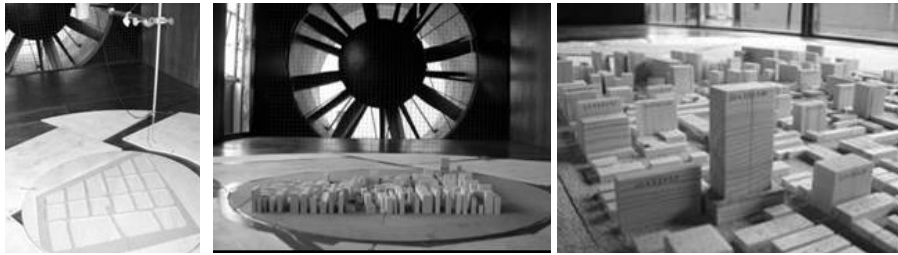


Figura 4 – Posicionamento do modelo no túnel de vento (PRATA, 2005).

Para o estudo da área da cidade de São Paulo/SP (Bairro de Moema) foram desenvolvidos 2 modelos em escalas diferentes. O primeiro em escala 1:500 e o segundo em escala 1:250, ambos em madeira.

O modelo na escala 1:500 tem aproximadamente 170x170cm e compreende parte do bairro de Moema, destacando uma área com edifícios mais verticalizados. Este modelo foi confeccionado no LAME – Laboratório de Modelos e Ensaios, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP (Figura 5).



Figura 5 – Confeção do modelo/Moema: escala 1:500 (PRATA-SHIMOMURA, 2008).

Neste primeiro modelo, foram observados os coeficientes de pressão de 10 prédios inseridos na área de maior verticalização. Como esta escala permitiu, apenas, 17 tomadas de pressão por prédio, não houve um melhor detalhamento, exigindo um número maior de pontos por prédio. Na escala 1:250 este número sobe para 48 tomadas por prédio, permitindo uma comparação entre escalas e uma definição maior no resultado (Figura 6).



Figura 6 – Preparação do modelo com as tomadas de pressão: escala 1:500 (PRATA-SHIMOMURA, 2008).

O modelo volumétrico em escala 1:250, foi desenvolvido no LAPAC - Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP e teve como objetivo restringir o tamanho do modelo, apenas para as quadras onde estão os prédios verificados na escala 1:500 (Figura 7).



Figura 7 – Confeção do modelo/Moema: escala 1:250 (PRATA-SHIMOMURA, 2009).

Estes prédios tem um número maior de tomadas de pressão (48 tomadas), a fim de verificar as alterações relativas a escala e proporcionar um número maior de dados por face dos valores de pressão passíveis de serem utilizados em cálculos matemáticos.

A execução de duas maquetes com dois métodos diferentes, a marcenaria tradicional (maquete em escala 1:500) e a prototipagem rápida (maquete em escala 1:250), permitiu a comparação dessas duas técnicas em termos de rapidez de execução e precisão, duas características importantes para a realização de ensaios em tunel de vento. Na marcenaria tradicional são utilizadas ferramentas operadas manualmente, como as serras de fita, circular e “tico-tico”, e as furadeiras de mão e de bancada. As madeira é medida e marcada manualmente, e apesar do uso de guias e gabaritos, e do cuidado do operador, a precisão nunca é perfeita. A prototipagem rápida consiste na utilização de equipamentos controlados por computador que executam cortes, fresagens, furações e construção por deposição sucessiva de camadas, sempre a partir de modelos geométricos digitais. Embora as origens da expressão Prototipagem Rápida (PR) estejam ligadas especificamente à construção por camadas por meio de técnicas como estereolitografia, impressão 3D, fusion deposition modeling e sinterização seletiva a laser (VOLPATO, 2007), autores como Lennings (1997) descrevem a PR como sendo "a process that automatically creates a physical prototype from a 3D CAD-model, in a short period of time", e incluem nela outros processos de produção, como as cortadoras a laser e a fresadoras de controle numérico, também conhecidas como fresadores CNC.

As principais vantagens da prototipagem rápida, além da rapidez, são a precisão dimensional e a possibilidade de produção de formas livres e complexas. Além disso, o usuário não precisa possuir qualquer tipo de habilidade manual ou treinamento especializado, o que é indispensável no caso da operação de máquinas de marcenaria tradicionais. As técnicas de prototipagem rápida já são comumente empregadas na produção de maquetes arquitetônicas, principalmente nos Estados Unidos, onde muitas escolas de arquitetura disponibilizam equipamentos desse tipo a seus alunos (CELANI & PUPO, 2008).

As maquetes urbanas para simulação em túnel de vento precisam ser extremamente precisas, tendo em vista a reduzida escala dos modelos. Qualquer diferença de milímetros equivale a uma diferença de metros. Contudo, são raros os relatos de execução de maquetes para experimentos em túnel de vento com técnicas de prototipagem rápida. A grande maioria das descrições de uso da PR para a realização de testes em túnel de vento encontradas na literatura referem-se a projetos de aviões e automóveis (EFUNDA, 2009; KOCHAN, 2003; HEINTZELMAN, 2006; MACHINE DESIGN, 2007). Esses relatos referem-se sempre ao uso de técnicas de construção por camadas, que permitem a produção de formas livres. Oliva e Celani (2008) realizaram um experimento de circulação de ar no interior de maquete de seção de um edifício hospitalar de João Filgueiras Lima (Lelé), produzida em impressora 3D (Figura 8).

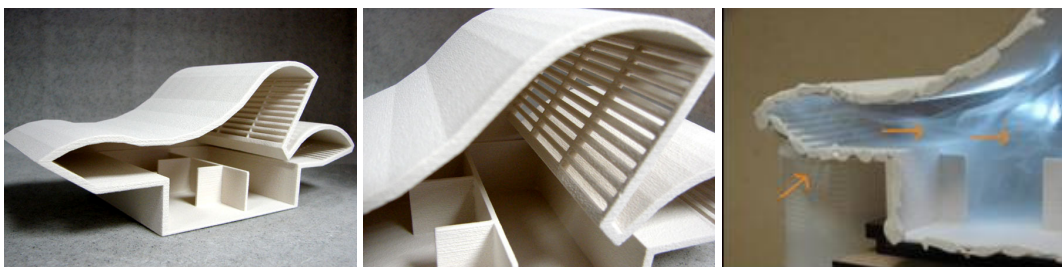


Figura 8 – Exemplo de modelo de edifício (OLIVA e CELANI, 2008).

Neste experimento os edifícios possuíam formas ortogonais. Sendo assim, não foi necessário utilizar técnicas de construção por camadas. Foi utilizada apenas a cortadora a laser Universal Laser Systems X-660 de 60 Watts com mesa de corte de 800x450mm do Laboratório de Automação e Prototipagem para arquitetura e Construção (LAPAC) da FEC-UNICAMP. As faces de cada edifício foram desenhadas no programa AutoCAD em duas dimensões e cortadas a laser em MDF de 3mm. A cortadora a laser possui *driver* para esse *software*, e se comunica com o programa de maneira semelhante a uma impressora comum. As faces que deveriam receber tomadas de pressão foram furadas a laser nos locais necessários. A base da maquete foi subdividida em pedaços, uma vez que sua dimensão excedia a dimensão da mesa de corte (45x80cm). Para marcar as posições em que os edifícios deveriam ser colados sobre a base foi usada uma potência mais baixa do laser, onde é possível desenhar toda a implantação. Para este experimento o desenho das peças foi executado em AutoCAD foi, e em aproximadamente oito horas todas as peças foram cortadas a laser. Em consequência da precisão e do acabamento perfeito do corte a laser, não foi necessário lixar as peças ou fazer ajustes antes de colá-las com adesivo instantâneo.

Os resultados obtidos com a cortadora a laser demonstram que essa técnica permite a produção de maquetes com grande precisão e em pouco tempo, quando comparada às técnicas de marcenaria tradicional.

### 3.2. O Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica

O túnel de vento pode ser utilizado para fins didáticos, de pesquisa e comerciais. Testes para construção civil e estruturas envolvem simulação da camada limite atmosférica e modelagem das construções vizinhas. O campo do escoamento do vento em torno de um edifício é determinado pelas características do vento imediatamente a barlavento, pela direção que se apresenta e pelas características geométricas do próprio edifício. Para os casos de estudo foi utilizado o Túnel de Vento de Camada Limite Atmosférica do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) (Figura 9), que foi construído para estudar o movimento do ar em áreas urbanas e industriais.

Pereira (2002), descreve o túnel de camada limite atmosférica do IPT com faixa de velocidade subsônica (até 25-30 m/s), baixa pressão e capacidade de geração de dois tipos de perfis de velocidade. A seção de teste possui 3,00m de largura, 2,00m de altura e 28,00m de extensão, com forro de altura regulável. Em duas regiões da seção de testes (no começo e no final do túnel) encontram-se mesas giratórias com 2,60m de diâmetro, possibilitando o giro de modelos para diferentes ângulos e permitem uma diversidade de estudos e aplicações para áreas como construção civil, meio ambiente, química, aeronáutica e automobilística. A entrada de ar no túnel é feita por uma seção de 5,00 por 4,00m, passa por colméias, telas retificadoras, trecho de contração, seção de testes (aeronáutica), seção de produção de perfis de camada limite, nova seção de testes e ventilador. O ventilador succiona o ar de dentro do túnel (Figura 9).

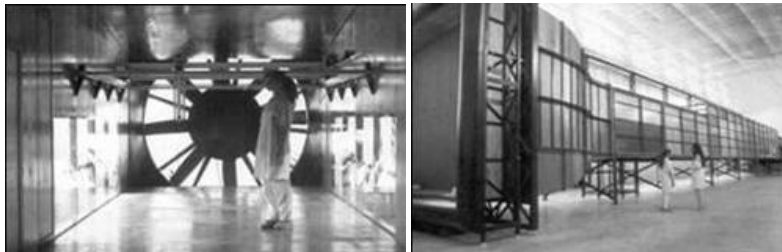


Figura 9 - Túnel – vista externa e Seção de Testes (Folder de divulgação do túnel do dia da inauguração – 06/06/2002).

### 3.3. Técnicas utilizadas para análise e resultados

Para este artigo, como exemplo, estão descritas as técnicas de figuras de erosão (geradas pela movimentação de grãos de areia sobre a área de ensaio) e medições de perfis de vento em altura em pontos pré-definidos (tubo de Pitot e fio quente).

#### 3.3.1. Figuras de Erosão

As figuras de erosão são utilizadas para a visualização do campo de velocidade no nível do solo (JANEIRO BORGES et al, 1979). A técnica das figuras de erosão consiste em espalhar sobre o piso do modelo (área que deseja-se analisar) uma fina camada de areia. Ao introduzir o fluxo de ar formam-se erosões que simulam a intensidade do vento em torno dos edifícios. A partir do momento que a areia da área de teste se desloca, as figuras de erosão resultam não só das acelerações ocasionadas pelos elementos, mas também do movimento

do fluxo que foi aplicado no túnel. Com o aumento da velocidade pelo ventilador, formam-se isolinhas que representam as direções do escoamento do ar sobre o modelo (PRATA et al., 2005), Figura 10.



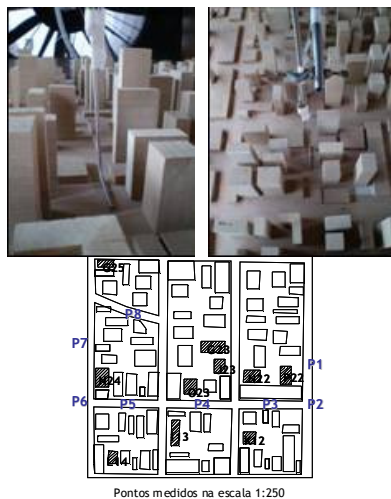
Figura 10 – Ensaio de erosão (PRATA (2005) e PRATA SHIMOMURA (2008)).

### 3.3.2. Medidas com Tubo de Pitot e Sonda de Fio Quente

Para se obter as velocidades do escoamento do fluxo de ar que simula a velocidade do vento sobre o modelo a várias alturas, pode-se utilizar como instrumentos o tubo de *Pitot* e a sonda de fio quente.

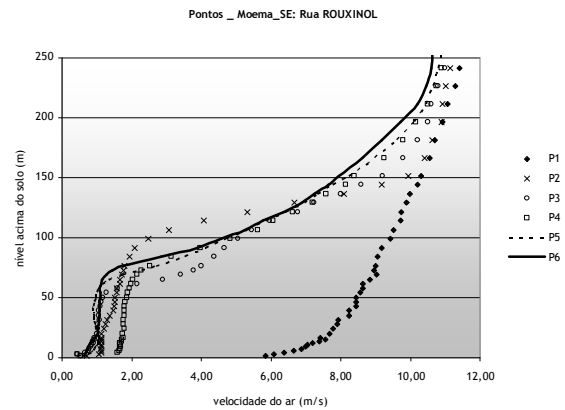
Estes equipamentos auxiliam na verificação da CLA (Camada Limite Atmosférica) que depende da topografia local, das dimensões e forma dos obstáculos naturais e artificiais (denominados rugosidade) até uma cota na qual se atinge uma velocidade constante. Os elementos de rugosidade originam fluxos complexos à sua volta, denominados vórtices ou turbilhões. A formação destes fluxos depende da forma, densidade e flexibilidade dos elementos.

O tubo de *Pitot* baseia-se nas diferenças de pressão total e estática para a obtenção do valor de velocidade. Este equipamento é eficiente quando o fluxo incide diretamente sobre o tubo (Figura 11).



Pontos de medidas no modelo – meio urbano

Figura 11 – Exemplo de medidas com tubo de *Pitot* (PRATA-SHIMOMURA, 2008).



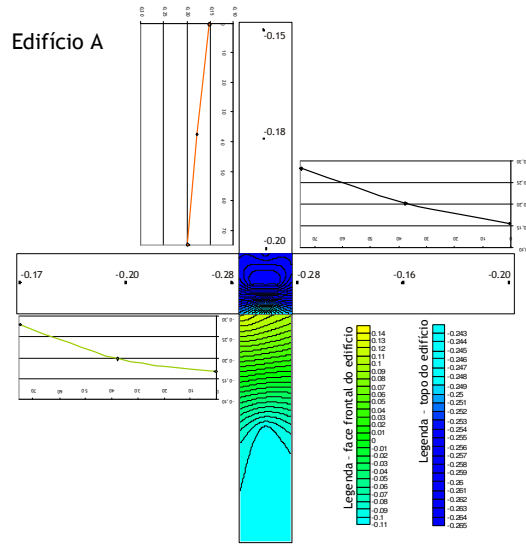
Resultado de medidas de perfil de velocidade

Em alguns casos, as medidas com o tubo de *Pitot* não podem ser realizadas na parte posterior de um modelo/edifício, pois o fluxo pode vir de qualquer direção (PRATA SHIMOMURA, 2008). Neste caso, utilizam-se as medidas com anemômetro de fio quente, que permite o registro das velocidades em intensidade de turbulência, vindas de qualquer direção. A saída do fio quente é dada em voltagem (variação de tensão em Volts). O fio quente registra a intensidade de turbulência no instante em que a variação da voltagem ocorre para manter a temperatura do fio constante, sendo esta variação o registro. Com este registro, em função de uma curva de calibração do equipamento, é possível obter o dado em m/s.

Os ensaios com o modelo de Moema (escala 1:500), objetivaram explorar os valores de rugosidade, os perfis de velocidades médias devido à rugosidade atual da área e a medida de valores de coeficientes de pressão em alguns prédios inseridos na área de maior verticalização (Figura 12).

Com a sonda de fio quente é possível medir as pressões exercidas pelo vento em cada ponto da face do edifício. A pressão dinâmica do fluxo não perturbado é medida através de um tubo de Pitot posicionado antes do modelo, a fim de obter valores para o cálculo de  $C_p$  – coeficientes de pressão. A definição do coeficiente

de pressão é de grande utilidade, pois estabelece não a pressão na face, mas a relação entre a pressão dinâmica do vento e a pressão exercida no edifício pelo mesmo, podendo, desta forma, verificar as áreas que atuam como entrada e saída de ar em função de suas pressões serem positivas ou negativas. No projeto arquitetônico o efeito da ventilação natural por ação do vento reside no posicionamento das aberturas em função das áreas de altas e baixas pressões na fachada, o que possibilita obter um melhor aproveitamento desta estratégia de conforto.



Exemplo de resultado obtido para o Edifício A

Figura 12 – Exemplo de medidas com sonda de fio quente (PRATA-SHIMOMURA, 2009).

O projeto de ventilação natural deve poder observar e aproveitar as áreas de maior pressão ou criá-las, conforme necessário, com alternativas de desenho de fachada, elementos de envoltória ou mesmo tirando proveito das superfícies/edifícios no entorno. Para os ensaios com o modelo de Moema (escala 1:500 e 1:250) para cada ponto da tomada de pressão, foi feito um pequeno furo, onde foi introduzido o cateter - mangueira plástica de pequeno diâmetro (+/- 1,5mm) utilizada para ligar a tomada de pressão até os sensores de pressão, colocados fora do túnel de vento (Figura 13).

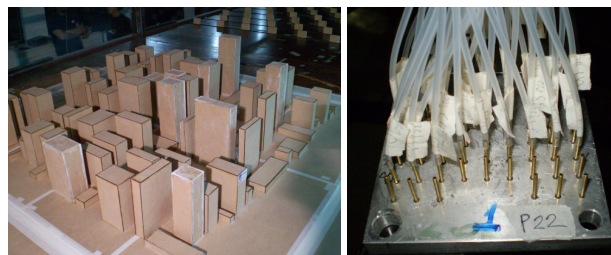


Figura 13 – Exemplo de adequação do modelo para o ensaio de tomadas de pressão (PRATA-SHIMOMURA, 2009).

Para estas medidas as conexões devem ser feitas com cuidado, de forma a evitar vazamentos. Desta forma, os valores podem ser registrados sem ocasionar falhas na aquisição dos dados. É importante identificar cada mangueira com o número da tomada de pressão, em cada face do edifício/modelo, para obter precisamente os pontos e valores medidos.

#### 4. CONCLUSÕES

O modelo físico, como forma de aprendizado e reconhecimento de verificação de estratégia de tomada de decisão projetual, permite a verificação de características projetuais em estágio atual e possibilita o desenvolvimento de alterações futuras.

No que se refere à produção do modelo, o uso da prototipagem rápida permitiu que se obtivesse uma excelente precisão dimensional e rapidez na execução. Além disso, foi possível perceber que o uso dessa tecnologia poderia ser mais explorado nos ensaios com maquetes arquitetônicas em túnel de vento, pois



permite a reprodução de detalhes e texturas que são normalmente omitidos em consequência da dificuldade de produção das maquetes em escalas muito reduzidas e de forma “tradicional”.

O resultado dos ensaios em modelos físicos auxilia na percepção do espaço, quanto a ventilação natural, permitindo o entendimento de questões como conforto do pedestre, dispersão de poluentes; bem como a qualidade interna dos edifícios. Estes resultados são obtidos por técnicas de simulação, conforme o objetivo que se deseja atingir, seja para o ambiente urbano (grupo de edifícios, espaços abertos, etc) como para o edifício isolado (posição, forma geométrica, aberturas, etc). Desta forma, o projetista pode precisar suas tomadas de decisões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CELANI, M. G. C.; PUPO, R. T.. Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para Arquitetura e Construção: Definições e Estado da Arte no Brasil. Cadernos de pós-graduação em arquitetura e urbanismo, v.8, 2008, p.1-8.
- EFUNDA – Engineering Fundamentals. Rapid prototyping: an overview. Disponível em: [http://www.efunda.com/processes/rapid\\_prototyping/intro.cfm](http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm). Acesso em: 16 de julho de 2009.
- HEINTZELMAN, A. Wind tunnels, CFD and rapid prototyping. Performance Racing Industry, April 2006.
- JANEIRO BORGES, A. R. e SARAIVA, J. A. G.. An erosion technique for assessing ground level winds. Wind Engineering, Proceeding of the Fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA Edited by . Cermak, Pergamon Press, Oxford, July, 1979, pp. 235 - 242.
- KOCHAN, A. Rapid prototyping helps Renault F1 Team UK improve championship prospects. Assembly Automation, vol.23, no.4, 2003, p.336 – 339.
- LENNINGS, A. F. CNC offers RP on the Desktop. Prototyping Technology International 1997 annual report. 1997, p.297-301.
- MACHINE DESIGN Staff. Rapid-prototyping resin good enough for wind-tunnel tests. Machine Design, 26 de abril de 2007. Disponível em: <http://machinedesign.com/article/rapid-prototyping-resin-good-enough-for-wind-tunnel-tests-0426>.
- OLIVA, C. e CELANI, G. Ventilação e sustentabilidade: uso de maquetes para avaliação da ventilação natural no processo de projeto. Congresso PIBIC. Campinas, UNICAMP, setembro de 2008.
- PEREIRA, M. T. & JABARDO, P. J. S. Avaliação de condições ambientais utilizando túnel de vento. Global Conference – Construindo um Mundo Sustentável, 23 a 25 outubro, São Paulo, ABPPOLAR, 2002.
- PLATE, E. J. Methods of investigating urban wind fields – physical models. Atmospheric Environment 33, 1999 – pp. 3981 – 3989.
- PRATA, A. R.. Impacto da altura dos edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano. 2005. 243 f. Tese (Doutoramento em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas ) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- PRATA SHIMOMURA, A. R. Relatório 2 FAPESP. Programa Pós-Doutoramento. São Paulo, Dez., 2008.
- PRATA SHIMOMURA, A. R. Relatório 3 FAPESP. Programa Pós-Doutoramento. São Paulo, Dez., 2009.
- PRATA, A. R., BRUNELLI, G., JABARDO, P. J. S., MARCIOTTO, E. R. & NADER, G.. Urban Ventilation: influence of physical models' scale in wind tunnel tests. PLEA2005 - The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture. Beirut, Lebanon, 13-16 November, 2005. 6p.
- SILVA, F. M. da & SARAIVA, J. A. G.. Ação do vento nas condições de conforto no Forum Madeira. (Relatório Final) Ministério das Obras Públicas, Transportes e Habitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Núcleo de Observação de Obras, Proc. 0304/01/14518, Nota Técnica 20/2003 – NOE-A, Lisboa, julho, 2003, 43p.
- SILVA, F. de A. G. da. O vento como ferramenta no desenho do ambiente construído uma aplicação ao nordeste do Brasil. Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 234p.
- TOLEDO, A. & PEREIRA, F. O. R.. Métodos e técnicas de visualização para a avaliação da ventilação natural pela ação do vento em edifícios. NUTAU – Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2004.
- VOLPATO, N. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2007.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, ao LABAUT/FAUUSP, ao IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo (apoio nos ensaios em túnel de vento de camada limite atmosférica), ao LAME – Laboratório de Modelos e Ensaio da FAUUSP e ao LAPAC, Laboratório de Automação e Prototipagem para Arquitetura e Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da UNICAMP pelo auxílio na confecção dos modelos.