



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

FACHADAS PARA EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS COM VENTILAÇÃO NATURAL EM SÃO PAULO

Mônica P. Marcondes (1); Marcia P. Alucci (2); Joana C. S. Gonçalves (3)

(1) Pós-Doutoranda do Departamento de Tecnologia da FAUUSP; marcondesmo@usp.br

(2) Professora Livre Docente do Departamento de Tecnologia da FAUUSP; marcialu@usp.br

(3) Professora Doutora do Departamento de Tecnologia da FAUUSP; Orientadora do Programa de Pós-Graduação *Environment and Energy* da *Architectural Association School of Architecture, Graduate School*.
36 Bedford Square, WC1B 3ES, Londres, Reino Unido; jocarch@usp.br

Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT-FAUUSP), Rua do Lago 876, São Paulo-SP, 05508-080, Tel.: (11) 3091 4644 r.213

RESUMO

O artigo apresenta os resultados de um estudo sobre fachadas de edifícios de escritórios com ventilação natural na cidade de São Paulo. O objetivo principal foi identificar soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios que apresentem condições adequadas de conforto térmico nos ambientes internos por no mínimo 80% das horas ocupadas do ano sem uso de sistema de condicionamento de ar. Dois modelos de edifícios de referência são propostos. Simulações anuais de desempenho térmico foram realizadas para sessenta e quatro cenários de edifícios de escritórios com diferentes configurações (forma, layout interno e orientação) e condições de ventilação, com o software TAS. Adotou-se a norma ASHRAE 55 como critério de conforto térmico. Uma relação entre a taxa de ventilação e o ganho máximo de calor no escritório pela fachada foi identificada para cada estudo de caso, para as horas em “conforto”. Os resultados das simulações computacionais geraram inputs para o projeto de soluções possíveis de fachada para os vinte e três casos de edifícios de escritórios que apresentaram ao menos 80% das horas ocupadas do ano em conforto.

Palavras chave: edifícios de escritórios, ventilação natural, conforto térmico, fachadas, São Paulo

ABSTRACT

The paper presents the findings of a study on the thermal performance of office buildings with natural ventilation in the city of São Paulo (Brazil). The main objective was to identify design solutions for façades of office buildings which provide internal thermal comfort conditions for at least 80% of the occupied hours during the year without use of cooling systems. Two reference models of buildings were proposed. Annual dynamic thermal simulation of sixty four scenarios of office buildings with different architectural configurations and ventilation conditions were carried out with TAS. ASHRAE 55 was adopted as comfort criteria. A relationship between the ventilation rate and the maximum heat gain in the office through the façade was identified for each study case, for the hours in “comfort”. The results of the simulations provided inputs for the design of possible façade’s solutions for the cases of office buildings which presented at least 80% of the annual occupied hours in comfort.

Keywords: thermal comfort, natural ventilation, façade, office building, São Paulo

1. INTRODUÇÃO

Em virtude de padrões comerciais e de ocupação, a tipologia dos edifícios de escritórios é caracterizada por alta geração de carga térmica interna e elevada demanda energética. Há concentração de pessoas e equipamentos, e a arquitetura de uma parcela considerável dos modelos correntes de edifícios de escritórios projetados e construídos em escala global ainda é primordialmente baseada no padrão comercial internacional, com uso abundante de vidro em fachadas seladas e ausência de sombreamento externo. Tal configuração de edifício implica em ganhos adicionais de carga térmica proveniente da radiação solar incidente, e na adoção generalizada de sistemas prediais de condicionamento ambiental.

Apontam-se a carga térmica interna, o clima externo, o projeto arquitetônico e as condições aceitáveis de conforto térmico como alguns dos principais parâmetros a influenciar o desempenho térmico e a eficiência energética dos edifícios de escritórios.

Tendo em vista a agenda ambiental e energética global atual, a demanda latente por edifícios que sejam mais sustentáveis, confortáveis para seus ocupantes e energeticamente eficientes para seus contextos, evidencia o uso de estratégias passivas de condicionamento ambiental (por exemplo, o uso de materiais com inércia térmica expostos, ventilação natural, resfriamento evaporativo, etc.) como alternativa a ser investigada.

A ventilação natural é considerada uma das estratégias de projeto mais eficientes para prover condições adequadas de conforto térmico aos ocupantes dos edifícios de modo energeticamente eficiente (BITTENCOURT & CÂNDIDO, 2005; ETHERIDGE & FORD, 2008; YAO et al., 2009). Além da provisão de taxas mínimas de renovação do ar, em atendimento a requisitos de salubridade, a ventilação natural pode promover o resfriamento passivo dos ambientes internos dos edifícios. Esse artifício é especialmente vantajoso para os edifícios de escritórios, à medida que pode remover o excesso de carga térmica interna e dissipar a umidade do ar, reduzindo ou excluindo a necessidade do uso de sistemas prediais de condicionamento ambiental.

Assim como as demais estratégias passivas, o período potencial de aplicação da ventilação natural ao longo do ano e sua eficiência vão depender das características específicas de cada edifício (arquitetônicas, propriedades termo-físicas dos materiais e sistemas construtivos, densidade e padrão de ocupação), do potencial do clima local (i.e., quando as condições climáticas estão favoráveis ao conforto térmico) e da expectativa e aceitação dos ocupantes com relação às condições ambientais internas.

Diversos estudos e pesquisas vem sendo desenvolvidos internacionalmente para investigar a aplicação da ventilação natural em edifícios de escritórios, como estratégia para reduzir o consumo energético da edificação (ARNOLD, 1996; GHIAUS, 2003; GRATIA & HERDE, 2003, 2007; RIJAL et al., 2007; ETHERIDGE & FORD, 2008; YAO et al, 2009; entre outros).

No cenário nacional, o projeto e a construção de edifícios de escritórios médios a altos na cidade de São Paulo nas últimas duas décadas apresentam forte influência dos modelos Norte Americanos, com aspectos como plantas mais profundas, fachadas envidraçadas seladas e o uso de sistemas artificiais de condicionamento ambiental por praticamente todo o ano, ainda que as condições climáticas se mostrem favoráveis à utilização de estratégias passivas (MARCONDES, 2004). A esse respeito, estudos recentes (MARCONDES, 2004; BENEDETTO, 2007; FIGUEIREDO, 2007) apontaram a possibilidade de ventilação natural de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo por partes do ano, indicando um potencial de aplicação dessa estratégia por até 83% do ano (FIGUEIREDO, 2007), dependendo do modelo de edifício e de sua condição de exposição.

O levantamento de edifícios de escritórios médios a altos divulgados sob o título de “ambientalmente sustentáveis” e “energeticamente eficientes” – propostos e/ou construídos na última década nos contextos internacional e local – indicou que, via de regra, as soluções e estratégias de projeto adotadas remetem à fachada como elemento fundamental para a eficiência e o melhor desempenho ambiental e energético do conjunto.

2. OBJETIVO

O objetivo principal desse trabalho foi identificar soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios na cidade de São Paulo que apresentem condições adequadas de conforto térmico nos ambientes internos por no mínimo 80% das horas ocupadas do ano sem uso de sistema de ar condicionado.

3. MÉTODO

O método utilizado compreendeu: a realização de cálculos de ventilação natural para os escritórios; simulações computacionais anuais de desempenho térmico de modelos de edifício de escritórios naturalmente ventilados, considerando o clima local; avaliação dos escritórios conforme a porcentagem de horas ocupadas no ano em conforto; e o estabelecimento de uma relação, que seja adequada às condições desejáveis de conforto térmico para os usuários dos escritórios, entre uma vazão de ar possível e o ganho de calor (carga térmica) máximo no ambiente pela fachada do edifício.

3.1. Condições climáticas

São Paulo (latitude $-23^{\circ}30'$; longitude $-46^{\circ}30'$; altitude 803m) apresenta “clima subtropical úmido” de acordo com a classificação da ASHRAE (2009).

Uma base de dados climáticos da cidade de São Paulo organizada por BENEDETTO (2007) foi utilizada nesta pesquisa. A análise desses dados mostra que as temperaturas médias variam de 18°C a 33°C , com ocorrência de temperaturas do ar amenas por cerca de 70% do ano (Figura 1). Níveis de umidade relativa do ar apresentam média anual de 80%. Dados mensais de radiação solar global (horizontal) mostram baixa variação ao longo do ano (de $131\text{W}/\text{m}^2$ em junho, durante o período de inverno, a $244\text{W}/\text{m}^2$ em dezembro, durante o verão), com valores máximos mensais elevados (até $1.095\text{W}/\text{m}^2$) – fato que indica a necessidade de proteção das fachadas dos edifícios em todas as orientações, ao longo do ano, para evitar ganhos de calor excessivos.

A realização de um diagnóstico climático para São Paulo indicou que a principal demanda ou desafio da arquitetura dos edifícios locais, visando a obtenção de conforto térmico para os usuários, é a ventilação dos ambientes internos, por até 46% do ano. Por outro lado, se o período de recomendação de outras estratégias passivas, tal como o uso de materiais com inércia térmica expostos, for adicionalmente considerado, é possível dizer que existe um potencial de condicionamento exclusivamente natural dos edifícios na cidade por até 89% do ano, como ilustrado na Figura 1.

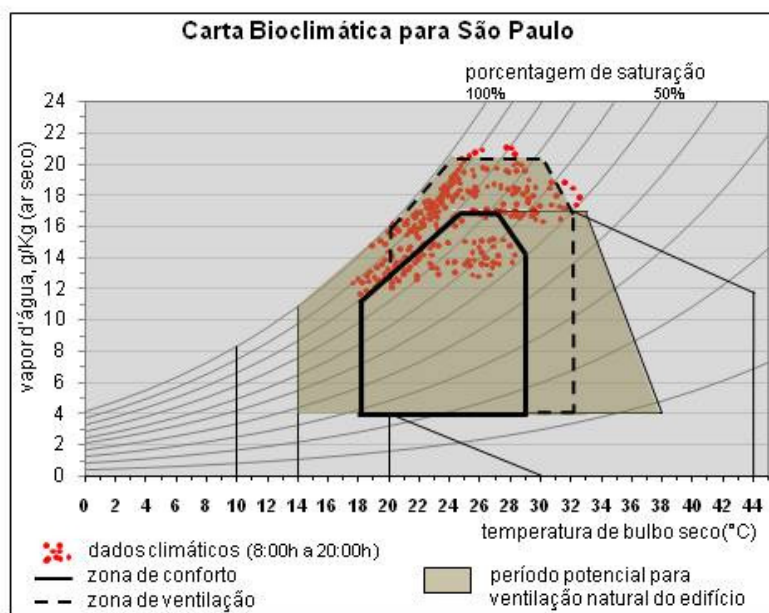


Figura 1 – Dados horários de temperatura do ar e umidade relativa do ar para São Paulo plotados em carta bioclimática (ALUCCI, 2005) para atividade sedentária com delimitação de uma zona de conforto e recomendação de estratégias de projeto para conforto térmico.

3.2. Modelos de edifícios

Dois modelos de edifícios foram propostos como referência de edifícios de escritórios com desempenho térmico e energético otimizado para as condições climáticas de São Paulo, e para permitir a ventilação natural interna com controle das condições pelo usuário: modelos de referência.

O primeiro modelo de edifício definido apresenta planta quadrada com layout livre e core de serviço central, seguindo os exemplos existentes e as tendências verificadas para os novos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo. Como alternativa ao padrão formal “típico”, o segundo modelo de edifício de escritórios de referência possui planta retangular mais estreita e dois cores de serviços laterais – configuração comum em edifícios Europeus.

Os edifícios de referência são compostos por embasamento, seis pavimentos tipo de escritórios e cobertura. O principal critério de definição das plantas dos escritórios foi sua profundidade máxima - ou a distância máxima de qualquer ponto da área de trabalho até a fachada - de 7,50m (GONÇALVES, 2003; BENEDETTO, 2007), visando o aprimoramento do desempenho térmico do edifício e do alcance e eficiência da ventilação natural no espaço interno. Ambos os modelos possuem áreas equivalentes, sendo 900m^2 de área total e 675m^2 de área útil de escritórios por pavimento tipo; porém, a quantidade de fachadas

expostas à radiação solar e à incidência dos ventos é diferente, sendo quatro no modelo quadrado e duas no modelo retangular (vide Figura 5).

Os escritórios possuem lajes de concreto expostas para aumentar a inércia térmica do ambiente e auxiliar a ventilação natural no aprimoramento das condições térmicas internas (ARNOLD, 1996); piso elevado com carpete; pé direito livre interno de 3,00m (BCO, 2000) e 3,75m de piso a piso. A proporção de superfícies transparentes e opacas das fachadas (wwr) é de 50% (BENEDETTO, 2007; FIGUEIREDO, 2007): o componente opaco é constituído de paredes de bloco de concreto com acabamento externo em cor clara ($U=2,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$; $\alpha=0,3$)¹; e as superfícies envidraçadas são compostas por vidro laminado incolor de 8mm sem sombreamento ($TL=0,87$, $FS=0,80$, $CS=0,93$)². A ventilação natural do ambiente interno acontece com a operação de janelas do tipo maxim-ar dispostas ao longo das fachadas expostas dos escritórios, considerando abertura efetiva máxima para ventilação natural de 30% (CIBSE AM10, 2005; CIBSE AM13, 2000). O escritório com layout livre permite a ocorrência de ventilação cruzada.

Parâmetros de ocupação: o período de ocupação considerado para os escritórios compreende os dias úteis das 8h às 20h. Durante esse período, adotou-se a densidade de uma pessoa (emitindo 140W (FROTA & SCHIFFER, 1995)) a cada 10m²; 8W/m² de carga térmica proveniente de iluminação artificial e 10W/m² fruto do uso de equipamentos, gerando uma carga térmica interna máxima de 32W/m².

Tabela 1– Parâmetros de ocupação da pesquisa *versus* ganhos de calor em escritórios Europeus

cenário	ganho de calor em escritórios europeus (W/m ²) (MARCONDES, 2004)			cargas térmicas adotadas (W/m ²)
	“baixo”	“médio”	“alto”	
pessoas	5-8	8-11	11-15	14
iluminação artificial	3-5	6-9	10-14	8
equipamentos	0-6	6-12	12-20	10
Total (W/m²)	8-19	20-32	33-49	32

Vale destacar que os valores adotados nesta pesquisa correspondem aos cenários de “ganhos de calor médios ou altos” para um ambiente de escritórios de acordo com padrões europeus (MARCONDES, 2004), todavia apresentam-se desafiadores para a prática atual de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo (Tabela 1).

3.3. Avaliação de desempenho térmico

Avaliações de desempenho térmico dos edifícios de referência foram realizadas com o objetivo de estabelecer a relação entre uma vazão de ar possível e os ganhos de calor no ambiente pela fachada. O método de avaliação proposto inclui a realização de cálculos de ventilação natural para estimativa de uma vazão de ar de referência para os escritórios e a realização de simulações computacionais anuais para os modelos de edifício de referência elaborados.

O critério de desempenho adotado foi a temperatura operativa interna (T_o), tendo-se como referência o modelo adaptativo de conforto da norma ASHRAE 55 (2004). Nesse modelo adaptativo faixas de temperatura operativa aceitáveis (ou temperatura de conforto) são definidas para o ambiente interno de edifícios naturalmente ventilados conforme a média das temperaturas do ar externo de cada mês, para dois níveis de tolerância: 90% de pessoas satisfeitas e 80% de pessoas satisfeitas, de acordo com a Figura 2. No presente trabalho considerou-se a faixa referente a 80% de pessoas satisfeitas, e definiu-se um limite: o escritório deve apresentar condições de conforto por no mínimo de 80% das horas ocupadas do ano.

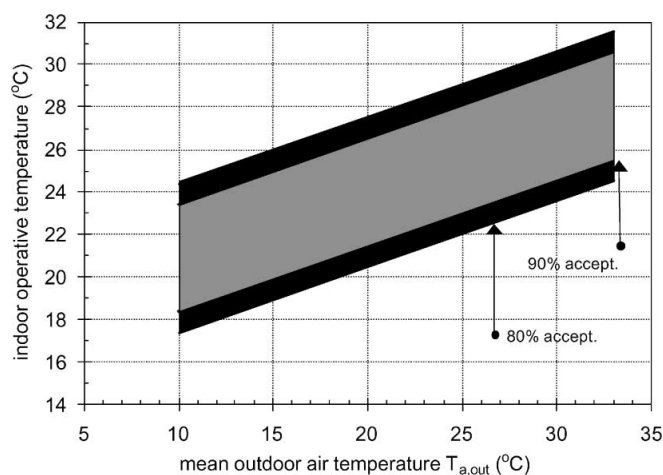


Figura 2 – Faixas de temperatura operativa aceitáveis para espaços naturalmente ventilados (ASHRAE 55, 2004).

Os cenários de análise consideram os dois modelos de edifício de referência - com forma retangular e quadrada; duas configurações internas para os escritórios: layout livre e layout celular; e oito orientações principais (Figura 3).

¹ “U” é o coeficiente global de transmissão térmica, em W/m² °C; e “α” é o coeficiente de absorção da radiação solar.

² As siglas TL, FS e CS correspondem, respectivamente, aos valores de transmissão luminosa, fator solar e coeficiente de sombreamento do vidro.

3.3.1. Predição de Ventilação Natural

Estudos de ventilação natural foram desenvolvidos para calcular uma vazão de ar possível para um pavimento tipo intermediário de cada cenário de edifício - vazão de referência. Considerando o caráter dinâmico da condição de vento externo, com sua intensidade e direção variando a cada momento, definiu-se uma situação de referência para a predição da ventilação natural dos escritórios³.

Primeiramente, procurou-se identificar as condições de vento padronizadas, estabelecendo uma correlação entre dados de direção e velocidade de vento das 8.760 horas do banco de dados climáticos utilizado (BENEDETTO, 2007). Determinou-se a frequência de ocorrência dos dados de direção de vento e correspondentes velocidades de ar. Considerando apenas as horas ocupadas, a maior frequência de ocorrência dos dados de vento acontece na direção sul, por 34% do ano, com velocidade média de 4,5m/s. Na seqüência, foram isolados os dados do banco referentes às horas ocupadas com vento na direção sul, e calculou-se a média dos valores das outras variáveis climáticas. Dentre o conjunto de dados isolados identificou-se uma hora representativa desse conjunto. A hora de referência utilizada para os cálculos de ventilação natural é apresentada na Tabela 2.

Uma vazão de ar possível foi calculada para cada cenário de edifício, para a hora de referência, considerando duas condições de ventilação: vazão de ar por “efeito chaminé” e vazão de ar por “efeito de vento”. A escolha das duas situações é feita na tentativa de cobrir o amplo leque de possibilidades para a condição de vento externo (Figura 3).

Tabela 2 – Hora de referência para os estudos de ventilação natural (17:00h do dia 09/11 do banco de dados climáticos).

Dados climáticos: São Paulo							
	radiação solar global (W/m ²)	radiação solar difusa (W/m ²)	nebulosidade	TBS (°C)	UR (%)	velocidade vento (m/s)	direção vento (°)
Hora de Referência	62,1	39,0	0,6	22,0	69	4,5	190
média dos dados das horas ocupadas e vento direção sul	76,8	52,3	0,9	21,3	72,3	4,5	175

Modo de Ventilação Natural	Efeito Chaminé	Efeito de Vento
Condição de exposição	Vento externo é obstruído por edifícios vizinhos	Ausência de obstruções no entorno ao acesso do vento
Forma do edifício		Retangular Quadrado
Layout interno		Planta livre Planta celular
Orientações	Retangular: Norte/sul, leste/oeste, noroeste/sudeste, nordeste/sudoeste Quadrado: Norte/sul/leste/oeste, noroeste/sudeste/nordeste/sudoeste	

Figura 3 – Cenários de análise: parâmetros arquitetônicos e condições de ventilação dos modelos de edifícios.

A condição de ventilação por efeito chaminé considera velocidade do ar externo igual a zero, e foi calculada conforme a seguinte equação (FROTA & SCHIFFER, 1995):

$$\Phi_{ch} = 0,14 \times A_{ch} \times \sqrt{(H_1 \times \Delta T_1)} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Φ_{ch} é a vazão de ar por efeito chaminé (m³/s);

A_{ch} é a área da menor abertura, seja a de entrada ou a de saída do ar (m²);

H_1 é a distância entre o centro das aberturas de entrada e saída do ar (m); e

$$\Delta T_1 = (1-m) \times \Delta T \quad \text{Equação 2}$$

³ Generalização assumida para simplificar a definição das correlações pretendidas, com base em estudos preliminares desta pesquisa. Esses estudos evidenciaram a dificuldade no estabelecimento de uma correlação entre a vazão de ar e os ganhos de calor no ambiente pela fachada com a abertura de janelas para ventilação do ambiente nas simulações de desempenho térmico dos modelos de edifício considerando a variabilidade nas condições de incidência do vento externo das 8.760 horas da base de dados climáticos local.

Onde:

m é o coeficiente de inércia (adimensional);

ΔT é a diferença entre a temperatura do ar interna e externa ($^{\circ}C$).

A condição de ventilação por efeito de vento considerou o vento externo incidindo na direção sul com velocidade de 4,5 m/s, conforme dados da hora de referência, e foi calculada pela equação (BS 5925, 1991):

$$\Phi_v = C_d \times A_o \times V \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Φ_v é a vazão de ar por efeito de vento (m^3/s);

C_d é o coeficiente de perda de carga da abertura (adimensional);

V é a velocidade do ar externo na abertura (m/s);

ΔC_p é a diferença entre os coeficientes de pressão (C_p) de entrada (C_e) e saída de ar (C_s) na abertura;

A_o é a área equivalente de aberturas para ventilação (m^2), calculada por:

$$\frac{1}{(A_o)^2} = \frac{1}{(A_e)^2} + \frac{1}{(A_s)^2} \quad \text{Equação 4}$$

onde A_e e A_s são as áreas de entrada e saída do ar, respectivamente (m^2).

Para estimar a ventilação por efeito de vento adotou-se $C_d=0,6$ (FROTA & SCHIFFER, 1995; CÓSTOLA, 2006), e os coeficientes de pressão calculados são apresentados na Figura 4.

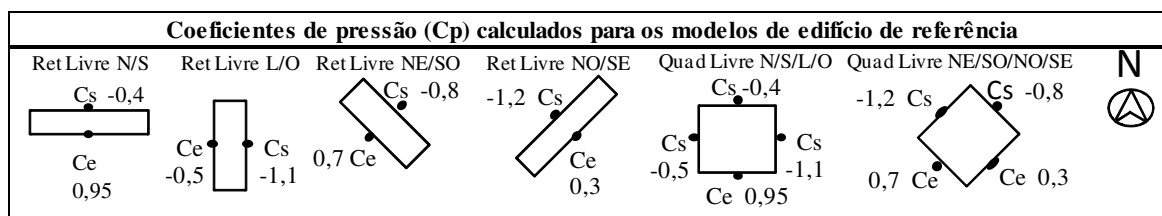


Figura 4 – Coeficientes de pressão para entrada (C_e) e saída do ar (C_s) calculados para os modelos de edifício em função da direção de incidência do vento, segundo método proposto por Sharag-Eldin (2007)

3.3.2. Simulação de desempenho térmico

Simulações anuais de desempenho térmico foram realizadas para os edifícios de escritórios de referência com o programa TAS (2009).

Parâmetros de simulação: para o período ocupado, foi considerada uma carga térmica interna fixa de $32W/m^2$ referente às pessoas, à iluminação artificial e ao uso de equipamentos, como anteriormente mencionado; e uma vazão de ar fixa, previamente calculada para cada cenário considerando a abertura máxima das janelas do tipo maxim-ar dos edifícios. Para o período não ocupado, adotou-se uma vazão de ar interna de 4 vol/h; esse valor considera a ocorrência de ventilação noturna adicionalmente a taxas mínimas de ventilação requeridas para efeito de salubridade (CIBSE AM13, 2000).

A Figura 5 ilustra as duas formas de edifícios e as duas configurações de layout interno simuladas para oito orientações duas condições de ventilação, totalizando sessenta e quatro cenários.⁴

O ambiente avaliado foi o 5º pavimento tipo de escritórios (cota +23m). Com base nos resultados das simulações computacionais para esse escritório em cada cenário de edifício, primeiramente calculou-se a temperatura operativa interna, conforme o critério adotado; e o número de horas ocupadas do ano em “conforto” foi avaliado. Posteriormente, dentre o grupo de horas em “conforto” foi detectado o máximo valor de ganho de calor no escritório devido à radiação solar incidente, por área de fachada (Q_{fmax} , W/m^2 fachada) para cada cenário.

De acordo com o procedimento da norma ASHRAE 55 (2004) aplicado aos dados climáticos da cidade de São Paulo, horas com temperaturas operativas internas de até $19^{\circ}C$ seriam classificadas como “frio”. Por esse motivo, assumiu-se que, nas condições específicas do presente trabalho (que envolve um contexto climático subtropical), uma parcela significativa das horas em “frio” podem ser consideradas em

⁴ Esclarece-se que as salas de aresta do edifício de planta quadrada e layout celular não foram avaliadas. Consideraram-se apenas as salas “centrais”, que apresentam dimensões equivalentes em ambos os edifícios de planta retangular e quadrada.

“conforto” se os usuários dos edifícios realizarem medidas adaptativas simples, como o controle da ventilação em momentos frios pelo ajuste ou fechamento de janelas, e mudanças no vestuário. Desse modo, o total de horas em “conforto” desta avaliação inclui as horas de “frio” obtidas.

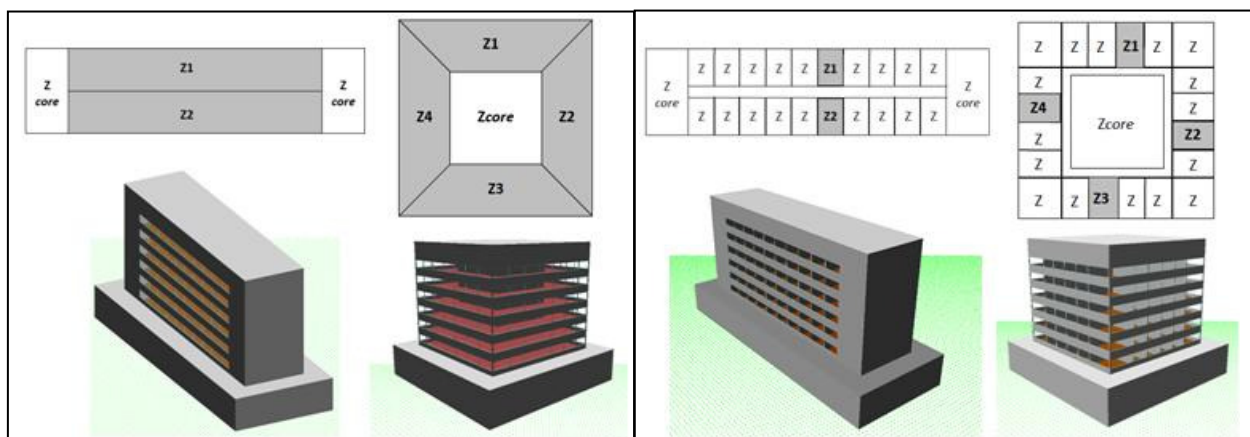


Figura 5 – Modelos geométricos dos edifícios no software TAS: plantas com delimitação das zonas de análise e vistas externas dos edifícios retangular e quadrado; escritórios de layout livre (à esquerda) e escritórios com layout celular (à direita).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

Os resultados da avaliação apresentaram grande variação dentre a gama de configurações arquitetônicas e condições de exposição, especialmente com relação à orientação dos edifícios.

Com relação aos cálculos de ventilação natural, vazões de ar similares foram obtidas para os cenários com ventilação por efeito chaminé, variando de 6,1vol/h a 7,1vol/h dependendo da forma do edifício e da configuração de layout interno. De modo oposto, os resultados para a condição de ventilação por efeito de vento apresentaram grande variação: entre 8,7vol/h e 86, vol/h para os casos de edifícios com planta livre – que permitiram ventilação cruzada no espaço interno; e entre 1,5vol/h e 11,1vol/h nos escritórios de layout celular. As vazões de ar mais baixas corresponderam aos escritórios orientados a leste e a oeste na condição com vento, devido à incidência sul considerada (a predominante), o que resultou em baixas velocidades do ar nos ambientes internos.

De modo geral, para cenários com a mesma orientação, casos com vazões de ar maiores e/ou casos com menor área de exposição (ou menor número de fachadas expostas) obtiveram melhor desempenho. Os edifícios de forma retangular e layout livre apresentaram resultados aproximadamente 10% maiores do que aqueles de forma quadrada e layout livre. Embora os últimos (quadrados com layout livre) apresentassem vazões de ar maiores, o ganho de carga térmica devido à radiação solar através das quatro fachadas expostas foi aproximadamente 40% maior do que o ganho solar no escritório retangular de layout livre (com duas fachadas expostas).

Por outro lado, com vazões de ar reduzidas – principalmente compreendendo os casos na condição de ventilação por efeito chaminé – a influência do ganho de calor solar no ambiente interno foi maior. Contudo, um melhor desempenho foi alcançado para os casos com menor área de exposição: os escritórios com layout celular (e apenas uma fachada exposta), comparativamente aos edifícios de layout livre, tanto retangulares quanto quadrados.

Vinte e três dos sessenta e quatro cenários analisados atenderam ao critério de conforto térmico, i.e. apresentaram um período mínimo de 80% das horas ocupadas do ano em conformidade com as condições aceitáveis de conforto térmico (Tabela 3):

- quatro escritórios com layout celular na condição de ventilação por efeito chaminé (as salas orientadas a sul e a sudoeste de ambos os edifícios retangular e quadrado);
- catorze escritórios com layout livre na condição de ventilação por efeito de vento (todos os cenários de edifícios retangulares e quadrados considerados, com exceção do edifício retangular com orientação leste/oeste); e
- cinco escritórios com layout celular na condição de ventilação por efeito de vento (as salas sul e sudoeste de ambos edifícios retangular e quadrado, e a sala orientada a norte do edifício retangular).

Em todos os demais cenários as condições desejáveis de conforto foram obtidas por mais de 50% do ano – com exceção das salas dos escritórios de layout celular e orientação leste/oeste na condição de ventilação por efeito de vento, as quais apresentaram o pior desempenho do conjunto, variando entre 13% e

36% de horas em conforto, principalmente como consequência das baixas vazões de ar resultantes nos ambientes de escritório.

Tabela 3 – Resumo dos resultados para os 23 cenários de edifícios que atenderam ao critério de conforto térmico.

Condição de ventilação	Cenários de edifícios: porcentagem de horas em conforto e vazões de ar de referência					
Efeito chaminé Escritórios layout celular	S = 83% $\Phi_{ch} = 7 \text{ vol/h}$ 	SO = 80% $\Phi_{ch} = 7 \text{ vol/h}$ 	S = 81% $\Phi_{ch} = 7 \text{ vol/h}$ 	SO = 80% $\Phi_{ch} = 7 \text{ vol/h}$ 		
Efeito de vento Escritórios layout celular	S = 90% $\Phi_v = 11,1 \text{ vol/h}$ 	SO = 81% $\Phi_v = 7,2 \text{ vol/h}$ 	S = 88% $\Phi_v = 11,1 \text{ vol/h}$ 	SO = 80% $\Phi_v = 7,2 \text{ vol/h}$ 	N = 80% $\Phi_v = 11,1 \text{ vol/h}$ 	
Efeito de vento Escritórios planta livre	N/S = 96% $\Phi_v = 74,3 \text{ vol/h}$ 	NE/SO = 94% $\Phi_v = 65,1 \text{ vol/h}$ 	NO/SE = 89% $\Phi_v = 45,6 \text{ vol/h}$ 	N/S/L/O = 84% $\Phi_v = 86,8 \text{ vol/h}$ 	NE/SO/NO/SE = 83% $\Phi_v = 76 \text{ vol/h}$ 	

5. SOLUÇÕES PROJETUAIS DE FACHADAS

Um procedimento para o projeto de soluções de fachada para edifícios de escritório com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado para as condições climáticas de São Paulo, é proposto. Esse é baseado em duas variáveis: a) a vazão de ar de referência - calculada para cada cenário de edifício; e b) o ganho máximo de calor pela fachada devido à radiação solar, adequado às condições desejáveis de conforto térmico - extraído das simulações computacionais para as horas em “conforto” de cada caso. Ou seja, uma solução possível de fachada deve proporcionar no máximo um ganho de carga térmica igual ao maior valor de ganho solar extraído das simulações computacionais para o conjunto de horas ocupadas em conforto de cada caso ($Q_{f\text{máx}}$); e deve proporcionar no mínimo uma vazão de ar no ambiente equivalente à vazão de referência calculada para cada cenário de edifício (Φ_{ch} ou Φ_v).

O projeto de soluções possíveis de fachada é realizado em duas etapas, apresentadas a seguir.

5.1. Etapa 1 - definição dos componentes e da proporção entre eles (wwr)

A escolha do tipo de componente ou componentes opacos e transparentes é feita com base na equação de ganho de calor devido à radiação solar do método de cálculo proposto por FROTA & SCHIFFER (1995). De acordo com esse método, o qual o ganho de calor através da fachada equivale à soma dos ganhos de carga térmica devido à radiação solar em todas as superfícies opacas e transparentes, conforme a equação:

$$Q = (A_{op} * U * \alpha * h_e^{-1} * Rad) + (A_{tr} * FS * Rad) \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

Q é o ganho de carga térmica devido à radiação solar pela fachada (W);

A_{op} é a área do componente opaco da fachada (m^2);

U é o coeficiente global de transmissão térmica ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$);

α é o coeficiente de absorção da radiação solar (adimensional);

h_e é o coeficiente de condutância térmica da superfície externa do componente ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$);

Rad é radiação solar global incidente na superfície (W/m^2);

A_{tr} é a área do componente transparente ou translúcido da fachada (m^2); e

FS é o fator solar do componente transparente ou translúcido (adimensional).

Diferentes arranjos de componentes, que vão gerar diferentes soluções de fachadas, podem ser testados por meio da definição das propriedades termo-físicas dos componentes na Equação 5: U e α para o(s) componente(s) opaco(s); e FS para o(s) componente(s) transparente(s), associado ou não a um dispositivo de proteção solar. Definindo-se a área dos respectivos componentes é estabelecida a proporção entre eles, ou wwr.

5.2. Etapa 2 - definição do tipo de abertura; dimensionamento e posicionamento

Conhecendo-se a vazão de ar de referência para cada ambiente de escritório, por meio da Equação 1 e da Equação 3 é possível determinar a área de abertura necessária para a ventilação natural do edifício (A_{ch} ou

A_o , de acordo com a condição de ventilação). Então, pode-se escolher o tipo de abertura da fachada, definir sua área e seu posicionamento em uma ou mais superfícies de um ambiente de escritório. Alternativamente, pode ser feito o processo inverso: inicialmente, escolher e dimensionar o tipo de abertura desejado; posteriormente, calcular a área de abertura, conforme a condição de ventilação (efeito chaminé ou efeito de vento); e, por fim, calcular a vazão de ar resultante. Essa deve ser no mínimo equivalente à vazão de ar de referência do cenário de edifício em questão.

5.3. Exemplo de solução de fachadas

A partir do procedimento proposto, um exemplo de solução possível de fachada é apresentado para um dos vinte e três cenários de edifícios de escritórios analisados em São Paulo nos quais a ventilação natural é possível por no mínimo 80% do ano (Figura 6).

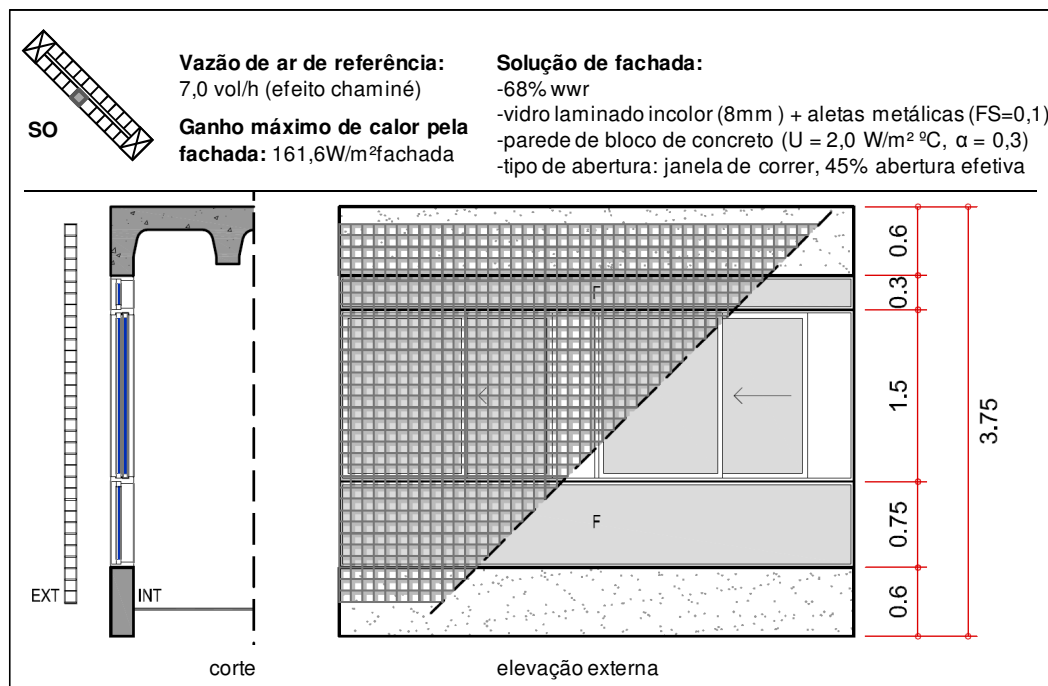


Figura 6 – Solução possível de fachada para o edifício de escritório retangular com layout celular, orientado a sudoeste, na condição de ventilação por efeito chaminé (dimensões em metros).

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A predição da ventilação natural dos espaços internos dos edifícios é uma tarefa complexa e desafiadora.

Os resultados da avaliação de desempenho térmico realizada para o edifício de escritórios em São Paulo mostraram que é possível ventilar naturalmente um ambiente de escritórios e proporcionar condições adequadas de conforto térmico aos usuários em uma grande variedade de cenários. Outros casos possíveis poderiam ser obtidos com o re-aprimoramento dos modelos de edifícios; com a redução da carga térmica interna (o que estaria atrelado ao estabelecimento de novos padrões de uso e ocupação do ambiente de escritórios); com o teste de diferentes tipos, áreas e posicionamento de aberturas nas fachadas; e com a aceitação de novos padrões de conforto térmico, incluindo a tolerância de temperaturas do ar elevadas (por exemplo, acima de 28°C) por algumas horas do ano. Com relação aos cenários de escritórios que não atenderam ao critério de avaliação, as condições desejáveis de conforto térmico foram alcançadas por mais de 50% do ano na grande maioria dos casos. Esse fato indica a validade de investigar a aplicação de estratégias de condicionamento ambiental em modo misto para alguns casos de edifícios de escritórios em São Paulo.

De acordo com este trabalho, uma solução possível de fachada para o edifício de escritórios com ventilação natural deve atender a dois aspectos principais: controlar os ganhos de calor devido à radiação solar - limite máximo; e permitir níveis adequados de vazão de ar no interior do edifício - limite mínimo. Desse modo, enfatiza-se que as soluções possíveis de fachadas para um determinado edifício de escritórios com ventilação natural não são soluções replicáveis, tanto com relação a outros edifícios, quanto para ambientes de um mesmo edifício que apresentem diferentes usos e/ou configurações e/ou orientações.

Adicionalmente, cabe enfatizar a inexistência de uma solução de fachada única ou específica para cada tipo de planta ou configuração de edifício, seja um escritório com layout livre ou celular, e com forma retangular ou quadrada. Em oposição, diferentes combinações de materiais e aberturas são possíveis para os diversos casos de edifícios, fato que pode ser explorado pelos projetistas dos edifícios de escritórios, conferindo maior liberdade arquitetônica.

Os produtos desta pesquisa incluem: (I) dois modelos de edifício de escritórios de referência, com características arquitetônicas e parâmetros de ocupação aprimorados para o desempenho térmico da edificação com ventilação natural diante das condições climáticas de São Paulo; (II) método de avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural; (III) procedimento para o dimensionamento de soluções de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural, de acordo com critérios de conforto térmico; (IV) exemplos de soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo. Os produtos do presente trabalho podem contribuir para o projeto de novos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, para o retrofit de edifícios existentes e para o desenvolvimento de novos produtos pela indústria nacional de materiais e componentes - com destaque para caixilhos, dispositivos de proteção solar externos e demais acessórios para as fachadas de edifícios de escritórios. Os métodos de avaliação e de projeto propostos podem ser reaplicados para outros contextos climáticos, após revisados e ajustados para as condições climáticas específicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALUCCI, M. P. *Software "Climaticus"*. São Paulo: Fauusp, 2005.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING (ASHRAE). *ASHRAE 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: ASHRAE, 2004.
- _____. *Climate Design Data*. ASHRAE Handbook. Atlanta: ASHRAE, 2009.
- ARNOLD, D. *Mixed Mode HVAC. An Alternative Philosophy*. ASHRAE Transactions, v. 102, n.1, 1996.
- BCO Guide 2000*. British Council for Offices. London, 2000
- BENEDETTO, G. S. *Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro*. Dissertação (Mestrado – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2007.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. *Introdução à Ventilação Natural*. Maceió: EDUFAL, 2005.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. *BSI-BS 5925: Code of Practice for Ventilation. Principles and Designing for Natural Ventilation*. London, 1991.
- CIBSE Applications Manual AM10*. Natural ventilation in non-domestic buildings. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2005.
- CIBSE Applications Manual AM13*. Mixed mode Ventilation. London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2000.
- Climaticus 4.2 software. LABAUT–FAUUSP: Alucci, 2005.
- CÓSTOLA, D. *Ventilação por Ação dos Ventos: Procedimento para Quantificação*. Dissertação (Mestrado) – FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2006.
- ETHERIDGE, D. W., FORD, B. *Natural ventilation of tall buildings – options and limitations*. Proceedings. CTBUH 8th World Congress. Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future. The Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Dubai, 3 – 5 de março, 2008.
- FIGUEIREDO, C. *Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de São Paulo: limites e possibilidades*. Dissertação (Mestrado) FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2007.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de conforto térmico*. 2. ed. São Paulo: Editora Nobel, 1995.
- GHIAUS, C. Free-running building temperature and HVAC climatic suitability. *Energy and Buildings*, v.35, p. 405-411, 2003.
- GONCALVES, J. C. *A sustentabilidade do edifício alto. Uma nova geração de edifícios altos e sua inserção urbana*. Tese de doutorado, FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2003.
- GRATIA, E., HERDE, A. Design of low-energy office buildings. *Energy and Buildings*, Volume 35, p. 473-491, 2003.
- _____. Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin? *Energy and Buildings*, Volume 39, n. 5, p. 605-619, 2007.
- MARCONDES, M. P. *Double-Skin façades in high-rise office buildings in São Paulo. A possible environmental efficient solution?* Masters Dissertation — Architectural Association Graduate School MA Environment & Energy Studies. London, 2004
- RIJAL, H., TUOHY, P., HUMPHREYS, M., NICOL, J., SAMUEL, A., CLARKE, J. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 39, p. 823-836, 2007.
- SHARAG-ELDIN, A. A parametric model for predicting wind-induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments. *Solar Energy*, Vol. 81, p. 52-61, 2007.
- TAS. Version 9.1.3. Milton Keynes: EDSL, Environmental Design Solutions Limited, 2009.
- YAO, R., LI, B., STEEMERS, K., SHORT, A. *Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China*. *Renewable Energy*, Vol. 34, n. 12, p. 2697-2705, 2009.