

Mônica Pereira Marcondes

Orientador:
Prof. Dr. Simos Yannas

f

ACHADA DUPLA VENTILADA EM
EDIFÍCIOS ALTOS DE
ESCRITÓRIOS EM SÃO PAULO.
UMA SOLUÇÃO
AMBIENTALMENTE EFICIENTE?

112

pós-

RESUMO

O artigo apresenta os principais resultados de uma dissertação de mestrado desenvolvida como parte do programa em Environment and Energy Studies, da Architectural Association Graduate School – AA, em Londres, entre 2003 e 2004. A presente pesquisa investigou a aplicabilidade e o desempenho ambiental de fachadas duplas ventiladas (*double-skin façades*) em edifícios altos de escritórios na cidade de São Paulo. Inicialmente, as origens e características desses sistemas foram estudadas, identificando-se possíveis funções e os argumentos aclamados para utilização desse tipo de fachada em edifícios altos de escritórios. Foram criados modelos conceituais para comparar e avaliar qualitativamente o desempenho de diferentes tipologias de fachadas duplas ventiladas. Na seqüência, uma análise comparativa foi apresentada, considerando-se o contexto climático de São Paulo. O uso de fachadas duplas ventiladas para expandir o período potencial de ventilação natural em edifícios altos de escritórios foi investigado. Análises térmicas dinâmicas foram realizadas com o *software* TAS (EDSL) para avaliar o desempenho térmico de fachadas duplas ventiladas em comparação a fachadas simples (comumente encontradas em edifícios de escritórios em São Paulo). Somam-se a esses, estudos de iluminação natural desenvolvidos com os *softwares* ECOTECH (MARSH) e RADIANCE (LBNL). Os resultados preliminares apontaram para a possibilidade de ventilação natural dos ambientes com todas as tipologias de fachadas testadas, por diferentes períodos do ano. Finalmente, aspectos ambientais foram enfatizados nas conclusões finais, contribuindo para um panorama sobre a possível aplicação de fachadas duplas ventiladas em edifícios altos de escritórios na cidade de São Paulo.

PALAVRAS-CHAVE

Fachadas, fachadas duplas ventiladas, edifícios altos, edifícios de escritórios, desempenho ambiental, conforto térmico.

FACHADA DE DOBLE PIEL EN
EDIFICIOS ALTOS DE OFICINAS EN
SÃO PAULO. ¿ UNA SOLUCIÓN
AMBIENTAL EFICIENTE?

RESUMEN

El artículo presenta los principales resultados de una disertación de maestría desarrollada como parte del programa en Environment and Energy Studies da Architectural Association Graduate School – AA, Londres, entre 2003 y 2004. El estudio investigó la aplicabilidad y el desempeño ambiental de fachadas de doble piel (*double-skin façades*) en edificios altos de oficinas en la ciudad de São Paulo, Brasil. Inicialmente, se han estudiado los orígenes y las características de los sistemas, identificando las posibles funciones e las razones declaradas para la utilización de ese tipo de fachada en edificios altos de oficinas. Se han creado modelos conceptuales para comparar y evaluar de modo cualitativo el funcionamiento de diversas tipologías de fachadas de doble piel. En seguida, se presenta un análisis comparativo que considera las condiciones climáticas de São Paulo. Se ha investigado el uso de las fachadas de doble piel con el objetivo de extender el período potencial de ventilación natural en edificioal altos de oficinas. Se han realizado análisis térmicos dinámicos usando el *software* TAS (EDSL 2003), para evaluar el desempeño térmico de fachadas de doble piel, comparadas con fachadas simples (frecuentemente encontradas en edificios de oficinas en São Paulo). Además de esos, se han realizado estudios de iluminación natural con los *softwares* ECOTECT (MARSH) y RADIANCE (LBNL). Los resultados preliminares han indicado la posibilidad de ventilación natural de los ambientes con todas las tipologías de fachadas evaluadas, en distintos períodos del año. En las conclusiones finales, se ha dado énfasis a los aspectos ambientales, contribuyendo para un panorama a cerca de la posible aplicación de las fachadas de doble piel en edificioa altos de oficinas en la ciudad de São Paulo.

PALABRAS CLAVE

Fachadas, fachadas de doble piel, edificios altos, edificios de oficinas, desempeño ambiental, comodidad térmica.

DOUBLE-SKIN FAÇADES ON HIGH-
RISE OFFICE BUILDINGS IN SÃO
PAULO: AN ENVIRONMENTALLY
EFFICIENT SOLUTION?

ABSTRACT

This paper presents the key findings of a master's dissertation developed as part of the Environment and Energy Studies Programme of the Architectural Association Graduate School – AA, London, in 2003/2004. The study investigates the applicability of double-skin façades on high-rise office buildings in the city of São Paulo, Brazil. As part of the investigation, the origins and characteristics of the systems are studied, identifying suggested reasons for the use of such façades in high-rise offices. Conceptual models were created to qualitatively compare and evaluate the performance of different double-skin typologies. A comparative analysis was undertaken taking the climatic conditions of São Paulo into account. The application of double-skin façades was investigated with dynamic thermal simulation, using TAS (EDSL 2003) to assess thermal performance, and using ECOTECH (Square One 2004) and RADIANCE for daylighting studies. The results provide an overview of environmental considerations underlying the design and possible application of double-skin façades in São Paulo.

KEY WORDS

Façades, double-skin façades, high-rise buildings, office buildings, environmental performance, thermal comfort.

INTRODUÇÃO

Fachadas do tipo *double-skin* podem ser caracterizadas pela existência de, ao menos, duas camadas de vidro configurando uma cavidade, ventilada ou não, que podem ser reguladas, adaptando-se para responder às condições internas aceitáveis de conforto, de um modo energeticamente mais eficiente.

No entanto, o termo *double-skin* é geralmente utilizado quando a cavidade gerada pelos panos de vidro é ventilada, razão pela qual é comum referir-se a tais sistemas como **fachadas duplas ventiladas**. O fluxo de ar ao longo da cavidade confere uma natureza dinâmica contínua à fachada. Ele altera a temperatura da camada envidraçada interior, alterando a transferência de calor para o ambiente. Como consequência, os mecanismos térmicos relacionados às fachadas simples¹ e duplas são diferentes, assim como o impacto na eficiência energética e no conforto ambiental dos ocupantes.

As fachadas duplas ventiladas vêm se tornando elementos freqüentes em uma nova era de edifícios de escritórios na Europa, motivados por projetos inovadores, principalmente na Alemanha, Inglaterra e Holanda. Tais edifícios são aclamados como tecnologicamente inovadores, energeticamente eficientes e ambientalmente conscientes para os contextos climáticos nos quais estão inseridos, e, por esse motivo, levaram a uma rápida adoção da tecnologia *double-skin*.

Os primeiros exemplos de fachada dupla ventilada foram identificados em climas temperados, especialmente na Alemanha, após a crise energética da década de 1970. O foco principal era prover qualidade ao envelope do edifício, principalmente quanto ao isolamento térmico e, conseqüentemente, reduzir as perdas de calor. Inicialmente, tais edifícios eram baixos² e condicionados artificialmente. O modelo típico de fachada dupla ventilada era composto por uma cavidade (*buffer zone*) entre uma camada externa de vidro simples e uma camada de vidro duplo interna. Geralmente conectando múltiplos andares, a fachada possibilitaria aquecimento passivo do ar externo ao longo da cavidade, podendo-se reaproveitar parte desse calor no topo da fachada (Figura 1).

(1) Neste trabalho, entende-se por “fachada simples” aquela conformada por apenas um pano de vidro transparente.

(2) Diferentes autores apresentam definições diversas sobre a altura dos edifícios. Para os objetivos deste trabalho, considerou-se baixo o edifício composto por até 5 pavimentos; médio, entre 6 e 20; e alto, mais de 21 pavimentos, respectivamente.

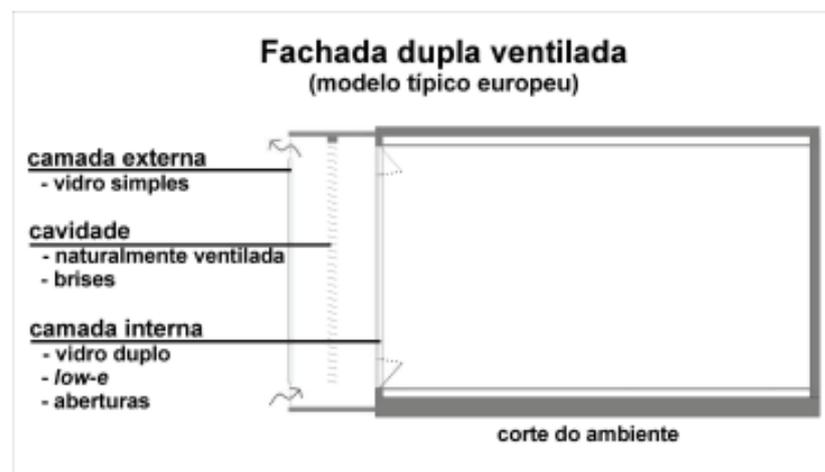


Figura 1: Corte esquemático: Modelo típico europeu de uma fachada dupla ventilada
Crédito: Autora

Figura 2: Edifício Debis, em Berlim, Alemanha (1997). Detalhe de uma variante de fachada dupla ventilada em edifícios altos, com a camada exterior passível de abertura (à direita)
Crédito: Autora

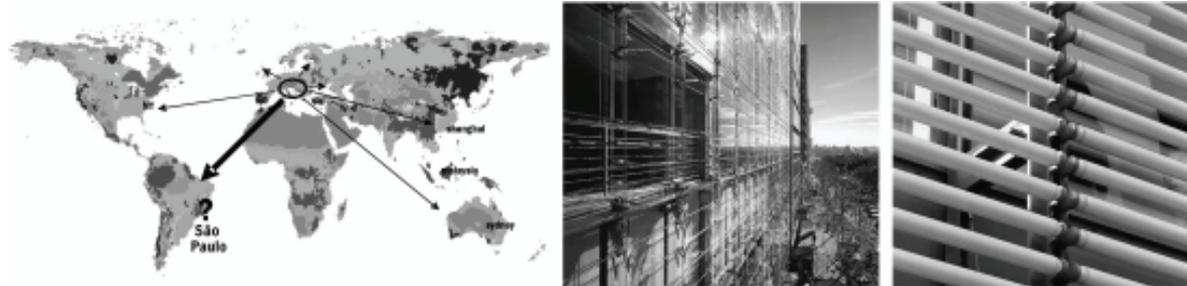


Figura 3: Novas tipologias de fachadas duplas ventiladas em diferentes contextos climáticos: no centro, Aurora Place, Sydney, Austrália (2000); à direita, edifício do jornal *The New York Times*, Nova York, EUA (ambos são projetos de Renzo Piano Building Workshop)

Fonte: Elaboração sobre Classificação Climática de Koeppen's (FAO – SORN – Agrometeorology Group, 1997); Martin Van Der Wal; Michael Denanée

Atualmente, as fachadas duplas ventiladas são freqüentemente associadas a edifícios altos (Figura 2). Dentre os argumentos mais citados para sua utilização está um aumento na eficiência energética e no conforto dos usuários, além da possibilidade de abrir-se as janelas nos andares mais elevados, mesmo em situações de altas velocidades de vento, dessa forma prolongando o período no qual o edifício pode ser naturalmente ventilado. Outros argumentos apresentados são redução de transmissão sonora, controle do usuário e redução nos ganhos solares, aliados a uma maximização da transparência, permitindo contato com o exterior – questões geralmente conflitantes.

Por sua natureza intrínseca, as fachadas duplas ventiladas resultam em sistemas tecnologicamente complexos, com custos iniciais elevados. Apesar dessas questões, no entanto, o interesse por essa tecnologia vem crescendo em uma escala global. Sua adoção está praticamente se tornando uma “tendência” em diferentes contextos climáticos, culturais e econômicos, e constatou-se ser devido mais a aspectos visuais e arquitetônicos do que ao total entendimento das implicações ambientais de sua aplicação (Figura 3).

Para o contexto de São Paulo, verificou-se a existência de uma demanda crescente por esse tipo de fachada, por parte de clientes e investidores, os quais freqüentemente apresentam grandes expectativas em relação a novos empreendimentos, buscando associar uma imagem de impacto. Ao mesmo tempo, o mercado local começou a demonstrar sinais de um crescente interesse da indústria internacional em explorar tal componente no desenvolvimento de edifícios de escritórios na cidade, em um futuro próximo. Ainda não existe exemplo construído de fachada dupla ventilada na cidade.

Nesse contexto, o principal objetivo da pesquisa foi analisar a aplicabilidade e o desempenho ambiental de fachadas duplas ventiladas para edifícios de escritórios na cidade de São Paulo. Isso foi feito por análises térmicas dinâmicas e simulações computacionais de iluminação natural de uma amostra de fachadas, para as condições climáticas da cidade.

I – TIPOLOGIAS DE FACHADAS DUPLAS VENTILADAS

Oito modelos conceituais e teóricos de fachadas duplas ventiladas foram elaborados e organizados de acordo com a conexão estabelecida entre o interior do edifício e o exterior, conforme ilustra a Figura 4. Todos apresentam dispositivos de proteção solar na cavidade, a qual é ventilada naturalmente com ar externo (com exceção do modelo 3, ventilado com ar interno), conectando múltiplos andares nos modelos 1 e 4, e isolada a cada pavimento nos demais. As aberturas em ambas as camadas das fachadas podem ser fixas ou reguláveis (manualmente ou automatizadas), com exceção do modelo 8 (mais sofisticado tecnologicamente, com maior área de abertura e operação automatizada – Tabela 1).

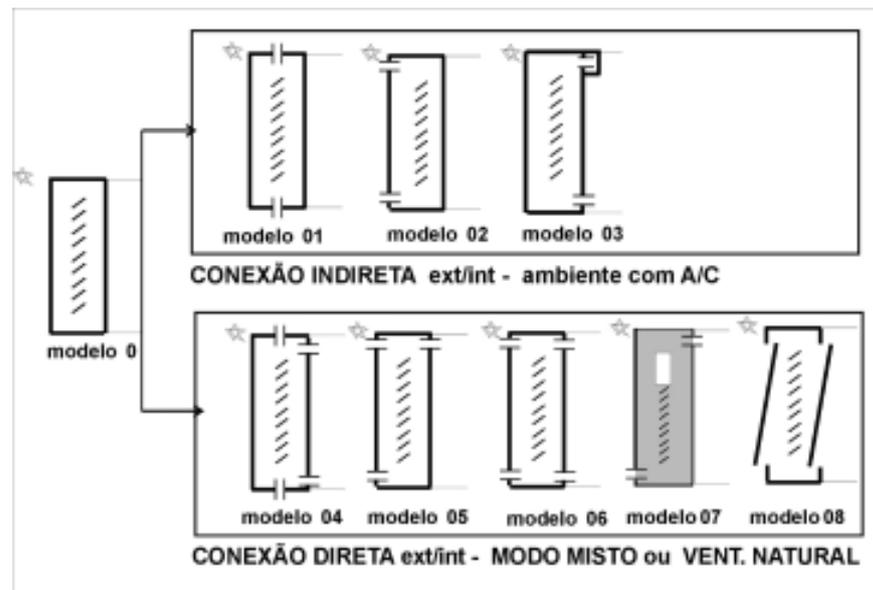


Figura 4: Tipologias de fachadas duplas ventiladas
Crédito: Autora

Avaliação qualitativa comparativa		M 8
aspectos principais	<ul style="list-style-type: none"> • interface direta entre ambiente interno / externo • edifício operando em modo misto (espaços internos com opção de condicionamento natural ou artificial) • fachada ventilada com ar externo • ventilação por andar, com ampla(s) abertura(s) na camada (ou "pele") externa da fachada com cavidade isolada por andar • possível ventilação do ambiente, com ampla(s) abertura(s) na camada interna da fachada • ambas as camadas podem abrir completamente • necessidade de sistema de controle complexo para as aberturas, com sensores • risco de contaminação por ventilação cruzada: se o ar de saída da camada externa entrar na abertura do andar superior 	
aquecimento	aberturas fechadas na camada interna -----> funciona como M 2 aberturas fechadas nas camadas interna e externa -----> funciona como M 0	
resfriamento	aberturas fechadas na camada interna -----> funciona como M 2 , com desempenho aprimorado devido às aberturas adicionais camada externa pode abrir completamente, visando aumentar as taxas de ventilação e na tentativa de evitar superaquecimento do ar na cavidade apresenta o melhor desempenho em comparação aos outros modelos de fachada dupla ventilada avaliados	exemplo 
ventilação do ambiente	<ul style="list-style-type: none"> • possibilidade de ocorrência de contaminação da ventilação entre ambientes • sensores nas aberturas reduzem o efeito de rajada de vento nos ambientes em situações de altas velocidades de vento, assim a 2ª camada é completamente aberta (geralmente no modo "resfriamento"), evitando o efeito negativo da camada adicional • desse modo, o período total de ventilação do ambiente pode ser expandido 	
iluminação natural	<ul style="list-style-type: none"> • 2ª camada – redução na transmissão de luz natural • comparativamente, esse modelo poderia apresentar o melhor desempenho em termos de provisão de luz natural quando a 2ª camada é completamente aberta (geralmente no modo "resfriamento"), evitando o efeito negativo da camada adicional 	Debris Headquarters, Berlin, Alemanha (1997) – Renzo Piano building workshop Fonte: http://www.rpwwf.org/
acústica	<ul style="list-style-type: none"> • quando o edifício está sob o modo de ventilação natural, há possibilidade de ocorrer transmissão sonora ambiente/ ambiente (desempenho inferior ao M 4, M 5 e M 6 devido à maior área de aberturas na camada interna) • não existe isolamento acústico do exterior quando o edifício opera no modo de ventilação natural e a 2ª camada está totalmente aberta • desempenho aprimorado, se o edifício for artificialmente condicionado; principalmente no modo de aquecimento 	
propagação de fogo e de fumaça	<ul style="list-style-type: none"> • possibilita exaustão natural de fumaça • em caso de incêndio, as amplas aberturas controladas por sensores permitem rápido dissipamento de fumaça • além disso, sensores controlam as aberturas na camada externa para evitar fumaça levada novamente ao ambiente pelo vento 	
manutenção custos	custos elevados: – máximo dentre os modelos de fachada dupla ventilada avaliados <ul style="list-style-type: none"> • múltiplas aberturas ou amplas aberturas a cada andar • aberturas na camada exterior expostas às intempéries (resistência e manutenção do sistema, especialmente para os andares superiores devido a altas velocidades/ pressões de vento) • necessidade de sistema complexo de controle com sensores 	
comentários	<ul style="list-style-type: none"> • cavidade isolada por andar: ventilação depende mais da velocidade e direção do vento do que da diferença de pressão e temperatura (menor controle; aspecto negativo para o modo de resfriamento) • desempenho geral aprimorado devido à grande flexibilidade e adaptabilidade às variações nas condições internas e externas. O melhor dentre os modelos de fachada dupla ventilada avaliados • entretanto, devido aos custos implícitos ainda mais elevados, apenas dois exemplos haviam sido construídos na época desta pesquisa 	

Tabela 1: Exemplo de tabela de análise de tipologias de fachadas duplas ventiladas: modelo 8

A Tabela 1 apresenta os aspectos principais de cada modelo e analisa qualitativa e comparativamente seu desempenho ambiental, em contraposição à tipologia de cavidade selada (modelo 0), conforme sete critérios: aquecimento, resfriamento e ventilação do ambiente, iluminação natural, acústica, propagação de fogo e fumaça, e custos. Como exemplo, a tabela apresenta e analisa o modelo 8.

O objetivo principal de tal comparação é evidenciar que tipologias diferentes podem ser mais apropriadas, de acordo com as condições específicas de sua aplicação. Desse modo, conforme as variações climáticas, a composição mais adequada da fachada deve, também, ser aquela ajustável e adaptável.

2 – CONTEXTO CLIMÁTICO E PRECEDENTES

(3) METEONORM – Global Meteorological Database for Solar Energy and applied Climatology. Meteotest, version v. 5.0, 2003.

2.1 – Diagnóstico climático e requisitos de projeto

São Paulo (latitude: -23°30'; longitude: -46°30'; 850 m acima do nível do mar)³ apresenta condições climáticas amenas, com variações de temperatura

relativamente pequenas ao longo do ano, e uma temperatura média anual em torno de 20°C. Extremos de temperatura podem chegar a 33°C nos meses mais quentes e 5°C nos mais frios. Os dados de umidade relativa do ar mostram valores elevados ao longo de todo o ano, com uma média mensal em torno de 80%. Flutuações diárias de temperatura ao redor de 10°C evidenciam o potencial de utilização de estratégias como a ventilação natural aliada à inércia térmica. Valores de iluminância difusa ao redor de 10.000 lux são encontrados para mais de 70% das horas de iluminação natural por dia. Os níveis de radiação solar global apresentam-se em torno de 300 W/m² por mais de 60% do ano, com picos de até 1.100 W/m² nos meses mais quentes.

Os edifícios altos de escritórios de São Paulo estão tipicamente concentrados ao longo de vias movimentadas, com tráfego intenso que compromete a qualidade do ar e resulta em valores elevados de ruído.

De acordo com tais informações, foi possível estabelecer requisitos ambientais e recomendações de projeto para edifícios altos de escritórios, conforme ilustra a Tabela 2. A norma internacional ISO 7330 (1994) e recomendações de Lamberts et al. (LAMBERTS, 1997) foram utilizadas como base para o estabelecimento de critérios de conforto térmico. Sendo assim, para os períodos de condicionamento natural do ambiente (isto é, com possibilidade de ventilação natural, as condições internas aceitáveis de conforto para um edifício de escritórios, operando entre 8 e 20 horas, seriam entre **18-28°C** para temperatura do ar interno, e entre **35%-70%** de umidade relativa (Figura 6). Para os períodos do ano nos quais o ambiente funciona com condicionamento artificial (geralmente com equipamentos de resfriamento, como o ar-condicionado), foi assumido que as faixas de conforto seriam de 20°C-25°C e 35%-70% de umidade relativa.

Tabela 2: Requisitos ambientais e de projeto para edifícios em São Paulo: Genéricos vs. edifícios altos de escritórios
Crédito: Autora

Requisitos ambientais	Recomendações para edifícios genéricos	Implicações para edifícios altos de escritórios
Resfriamento	Controle solar (controle de ganhos de calor, todas orientações, ano todo)	Ocupantes: geralmente ganhos internos elevados
	Promover o movimento do ar (dissipar o excesso de umidade e cargas internas)	Andares elevados: alta velocidade e pressão de vento Ocupantes: aumento na umidade absoluta
	Inércia térmica + ventilação noturna (reduzir flutuações t°. Durante ocupação, dissipar cargas internas, absorver calor)	Depende <i>do layout</i> interno
Iluminação natural	Distribuição homogênea, uniformidade; mínimo de iluminação para promover níveis aceitáveis de conforto visual; controle de ofuscamento e contrastes)	Plantas estreitas profundas Normas: níveis mínimos de iluminância
Controle do ruído e da qualidade do ar		Reduz com altura

2.2 – Precedentes de edifícios altos

No contexto brasileiro e até latino-americano, São Paulo aparece como a cidade mais desenvolvida em termos demográficos e econômicos. Esses fatores ajudaram a impulsionar a ocorrência de uma aglomeração de edifícios de escritórios na cidade a partir da década de 1970. Pode-se dizer que tais edifícios são caracterizados por falta de preocupações ambientais e com conforto térmico, e apresentam alto consumo energético. Desde 1960, a evolução das tipologias de



Figura 5: Precedentes arquitetônicos. MEC (Ministério da Educação e Cultura, 1936-1945), no Rio de Janeiro: exemplo do início da arquitetura moderna brasileira (à esquerda). O novo edifício-sede do Banco de Boston (2002), apresentado como o ícone do “edifício verde” na cidade São Paulo (ao centro) e o Edifício Torre Norte (2000), parte do conjunto CENU na marginal do Pinheiros (à direita)
Crédito: Fotos de Nelson Kon e Joana Gonçalves

edifícios de escritórios evidencia a adoção de plantas mais profundas. Os exemplos da década de 1980 são do tipo “cortina de vidro” (*curtain wall*), seladas e com fração de área envidraçada da parede (*wwr – window to wall ratio*) de até 100%. Tais edifícios operam com sistemas de condicionamento e iluminação artificial por quase todo o período de ocupação, com conseqüências diretas na eficiência energética. A tendência atual é de essas características continuarem, com edifícios baseados em plantas retangulares ou quadradas, com bloco de serviços central e áreas de piso totais na faixa entre 600-2.200 m² (GONÇALVES, 2003). Por outro lado, nota-se que, em alguns casos, ocorreu uma redução considerável na proporção de superfícies envidraçadas, com *wwr* de 100%, passando para aproximadamente 50%, como exemplificado pelo Edifício Torre Norte na Figura 5. Vale destacar que, apesar de coerente com as recomendações de projeto para o clima da cidade, a solução de redução da área envidraçada das fachadas aconteceu por razões econômicas.

3 – FACHADAS DUPLAS VENTILADAS PARA SÃO PAULO

3.1 – Panorama geral

A Tabela 3 ilustra uma avaliação do desempenho de fachadas duplas ventiladas, baseada nos requisitos e características de projeto aclamados para os sistemas adotados na Europa, e para o contexto de São Paulo.

Para locais de clima frio e temperado na Europa, uma das funções da fachada dupla ventilada é ajudar na redução da demanda por aquecimento do ambiente. Em São Paulo, a necessidade de aquecimento pode ser considerada uma preocupação secundária, acontecendo por um curto período no ano. Já em relação ao resfriamento do espaço, a utilização de uma fachada dupla ventilada pode ser benéfica por dissipar ganhos de calor pelo movimento de ar que ocorre na cavidade, antes que o mesmo entre no ambiente interno. Mas esse pode não

(4) Trata-se de uma análise preliminar simplificada, e, portanto, algumas variáveis como os ganhos de calor pela envoltória, e os efeitos da velocidade do ar no conforto dos usuários não foram considerados.

(5) O valor de 3°C foi preliminar e simplificado estimado, baseado em um modelo hipotético de ambiente de escritórios de 27m², considerando-se 1 pessoa/10m² e testando-se o impacto de material de construção leve e pesado, em diferentes cenários. Para os cálculos, foi considerado um aumento na temperatura do ar devido ao calor sensível dos ocupantes, da iluminação artificial e de equipamentos, além de um aumento na taxa de umidade absoluta referente ao calor latente produzido pelas pessoas, variando de acordo com a temperatura do ar. Posteriormente, simulações computacionais foram realizadas, possibilitando uma quantificação mais acurada desses parâmetros e seu impacto no desempenho do ambiente – vide item 3.3 deste artigo.

(6) Entende-se por estratégia passiva aquela feita sem o gasto de energia, oposto à ativa. No caso de serem aplicados meios ativos, o ambiente funcionaria com uma estratégia de condicionamento ambiental em modo misto. Este alia períodos de condicionamento natural e artificial para um mesmo ambiente e o sistema de condicionamento artificial só é ligado quando as condições climáticas ou outros fatores externos e/ou internos impedem a obtenção de conforto nos ambientes por meios naturais.

Desempenho (esperado) de fachadas duplas ventiladas		
Requisitos ambientais	Cidades europeias	São Paulo
Aquecimento	√√	√
Resfriamento	√	√√
Controle solar	√	√
Iluminação natural	√	√
Controle de ruído	√	√
Controle da qualidade do ar	√	√
Ventilação natural	√√	√√

√√ muito bom √ bom - NA
 ▨ itens requerem investigação

Tabela 3: Desempenho de uma fachada dupla ventilada, segundo as razões aclamadas para sua aplicação nas cidades europeias e em São Paulo, em relação a diferentes critérios ambientais
 Crédito: Autora

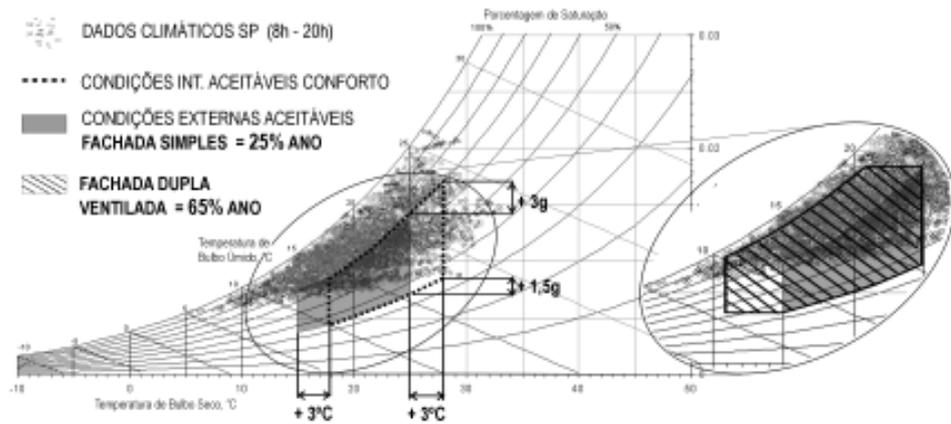
ser o modo mais favorável de utilização de tal sistema na cidade de São Paulo, e atenção deve ser dada ao fato de existir evidência de aquecimento excessivo do ar na cavidade de algumas fachadas duplas ventiladas em operação (PASQUAY, 2001). Talvez a forma mais eficiente de utilização dessa fachada seja para expandir o período no qual um edifício alto de escritórios pode ser naturalmente ventilado em São Paulo.

3.2. – Análise psicrométrica⁴

Para os períodos de condicionamento natural, as condições internas aceitáveis para conforto seriam entre 18-28°C e 35%-70% de umidade relativa, como mencionado anteriormente. Considerando-se apenas as cargas térmicas geradas internamente, em um primeiro momento, estudos analíticos demonstraram que ganhos internos dos ocupantes, iluminação artificial e equipamentos podem gerar um aumento da temperatura do ar interno da ordem de 3°C⁵. Como resultado, as condições externas sob as quais as condições internas desejáveis poderiam ser alcançadas foram assumidas como sendo entre 15-25°C de temperatura do ar e 35-70% de umidade relativa. É possível observar, pela Figura 6, que um edifício com uma fachada simples, mais convencional, poderia ser naturalmente condicionado por apenas 25% das horas de ocupação. No restante do ano, estratégias passivas ou ativas⁶ teriam de ser aplicadas para aprimorar as condições de conforto do ambiente.

Nesse contexto, a utilização de uma fachada dupla ventilada poderia permitir uma maior regulação da entrada do ar, possibilitando que se aproximasse das condições de conforto ao entrar no ambiente interno. De acordo com os estudos realizados neste trabalho, o período de condicionamento natural poderia ser expandido para até 65% do período de ocupação do edifício, com a utilização de uma fachada dupla ventilada (considerando-se seu potencial máximo de flexibilidade e adaptabilidade, e a realização de um controle eficiente por seus usuários – Figura 6).

Figura 6: Dados horários de temperatura e umidade relativa do ar para São Paulo, plotados na carta psicrométrica – análise de períodos potenciais de ventilação natural dos edifícios com fachadas simples e fachadas duplas ventiladas
Crédito: Autora



3.3 – Análise térmica dinâmica

Para testar os valores preliminares encontrados nos estudos analíticos (isto é, a porcentagem de tempo no qual o ambiente poderia ser naturalmente condicionado), análises térmicas dinâmicas foram realizadas com o *software* TAS⁷, comparando-se o desempenho térmico de fachadas duplas ventiladas a fachadas simples. Esse *software* utiliza como abordagem de cálculo a simulação dinâmica, na qual a condição térmica do edifício é traçada a partir de uma série de análises horárias instantâneas, indicando seu desempenho, não só em condições extremas, mas também ao longo de um ano típico. Isso permite avaliar a influência de vários processos térmicos em termos de simultaneidade, localização e interação.

As simulações realizadas referem-se a uma sala de escritório de 27 m² (4,5 m de largura, 6 m de profundidade e 2,7 m de pé direito) em um edifício alto hipotético, contendo apenas uma fachada voltada para o exterior, de acordo com quatro orientações: N, S, L e O, sob as condições climáticas de São Paulo. As condições internas foram estabelecidas para o período de ocupação das 8 às 20 horas, considerando-se uma pessoa a cada 9 m², sendo a carga térmica gerada internamente equivalente a 140 W por pessoa, 10W/m² referente à iluminação artificial e 12 W/m² referente ao uso de equipamentos.

Foram analisadas duas das tipologias de fachada dupla ventilada no ambiente, modelo 6 e modelo 8 – Figura 4; Tabela 1 e ambas com cavidade isolada por andar e aberturas nas duas camadas da fachada, permitindo, assim, ventilação natural no ambiente e, conforme a estratégia de controle das aberturas, um maior grau de adaptabilidade. Essas foram comparadas a uma fachada simples – caso de referência. Um conjunto de estratégias passivas foi considerado para o aprimoramento do desempenho ambiental do ambiente, incluindo sombreamento, massa térmica e a possibilidade de ventilação noturna. Todos os casos de fachada dupla ventilada considerados incluíram tais estratégias. A Tabela 4 apresenta os casos-base simulados e analisados⁸.

O critério de avaliação dos resultados foi a porcentagem do ano na qual os valores de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente de estudo estivessem adequados aos parâmetros de conforto térmico adotados, durante o período de ocupação estipulado (das 8 às 20 horas).

(7) A-TAS. Versão 8.5. Milton Keynes: EDSSL, Environment Designs Solutions Limited, 2003.

(8) Informações adicionais a respeito do modelo geométrico utilizado nas simulações térmicas dinâmicas, bem como os parâmetros de entrada assumidos e/ou calculados previamente às simulações, inclusive referentes ao banco de dados climáticos da cidade de São Paulo utilizado, estão detalhadamente descritos na dissertação de mestrado da autora (MARCONDES, 2004).

	Casos-base	Variações	Descrição
Fachada Simples	Simples	Simples A	1 camada vidro transparente 10 mm + ventilação diurna (janelas altas/baixas 100% abertas)
		Simples B	Simples A + elementos proteção solar externos
		Simples B ²	Simples A + vidro refletivo
		Simples C	Simples A + massa térmica exposta
		Simples D	Simples A + massa térmica + ventilação noturna
		Simples E	Simples A+B+C+D
		Simples F	Área envidraçada reduzida (wwr = 50%) + controle automatizado aberturas (ventilação diurna + noturna)
Fachada Dupla Ventilada	Modelo 6*	Modelo 6 A	camada externa/interna: 1 camada vidro transparente 10 mm; aberturas altas/baixas (13,3% da área da fachada); profundidade cavidade= 90 cm; massa térmica exposta; ventilação diurna (janelas 100% abertas)
		Modelo 6 B	Modelo 6 A + controle aberturas (ventilação diurna + noturna)
		Modelo 6 C	camada externa: 1 camada vidro transparente 10 mm; aberturas altas/baixas (13,3% da área fachada); camada interna: 1 camada vidro duplo transparente (6+12+6 mm); aberturas altas/baixas (13,3% da área da fachada); cavidade= 90 cm; massa térmica exposta; controle aberturas (ventilação diurna + noturna)
	Modelo 8*	camada externa: 1 camada vidro transparente 10 mm; aberturas altas/baixas (50% da área da fachada); camada interna: 1 camada vidro transparente 10 mm; aberturas altas/baixas (13,3% da área da fachada); cavidade= 90 cm; massa térmica exposta; controle aberturas (ventilação diurna + noturna)	

Tabela 4: Casos-base das simulações térmicas dinâmicas com o *software* TAS

Crédito: Autora

* Variações de fachada dupla ventilada da Figura 4

Comparando-se os resultados dos modelos de fachada dupla ventilada e simples, verificou-se que o aumento da temperatura do ar e a conseqüente redução da umidade relativa do ar na cavidade permitiram que as condições de umidade relativa do ar incidente permanecessem dentro da faixa considerada aceitável por um maior período de tempo, aumentando, assim, o desempenho geral da fachada. O modelo de fachada dupla ventilada com tipologia aprimorada (isto é, com aberturas reguláveis e maior área de vãos – modelo 8) e maiores taxas de ventilação possibilitou que o período de ventilação natural do ambiente fosse até 15% maior do que o melhor modelo de fachada simples testado.

Os resultados das simulações térmicas foram comparados com a investigação psicrométrica preliminar. Esses foram similares para os casos mais promissores de fachadas duplas ventiladas: um edifício alto de escritórios poderia ser naturalmente ventilado, das 8 às 20 horas, durante até 65% do ano (resultado máximo) com esse tipo de fachada. Por outro lado, considerando os casos com fachadas simples, um resultado de 25% do ano foi obtido nos primeiros estudos e, entre 40% e 50% do ano, baseado nas análises desenvolvidas com o TAS, de acordo com a orientação e a taxa de ventilação adotada para a fachada.

Comparando-se com uma fachada mais tradicional, uma expansão no período de ventilação natural do ambiente entre 15%-25% do ano (considerando-se o cenário mais pessimista) poderia ser conseguida com a aplicação de uma fachada dupla ventilada.

Vale ressaltar que apenas um modelo geométrico simplificado de fachada dupla ventilada pôde ser estudado, devido a limitações do *software* TAS v. 8.5, utilizada no momento da pesquisa. Verificou-se que o modelo não considerou

(9) MARSH, A. J.
ECOTECH. Versão 5.5.
Perth: Square One, 2004.

(10) Como parte da metodologia utilizada, o modelo de simulação foi gerado no ECOTECH, exportado para ser calculado no RADIANCE, e novamente importado para o ECOTECH, na busca de melhor visualização dos resultados.

Desktop Radiance 2.0
Beta. Marinsoft, Inc. and
Lawrence Berkeley,
National Laboratory, 2001.

integralmente o impacto das dinâmicas dos fluxos de ar na cavidade, no desempenho ambiental geral da fachada. Dessa forma, os resultados podem ser considerados subestimados, esperando-se um desempenho mais favorável na prática.

Mas a influência da fachada dupla ventilada também irá variar conforme outros parâmetros, como a configuração da planta do edifício e o sistema de operação das fachadas, sendo manual ou automatizado. Considerando-se diferentes *levantes* internos para o escritório, essa influência apenas aconteceria nas áreas periféricas de uma planta típica. No caso de uma configuração de planta profunda, por exemplo, o desempenho de uma fachada dupla ventilada certamente seria reduzido, reduzindo-se, assim, a expansão no período de ventilação natural, bem como a conseqüente economia no consumo de energia. Seguindo a tendência dos modelos norte-americanos de edifícios de escritórios, configurações de plantas profundas são freqüentes em edifícios em São Paulo. Isso, invariavelmente, causa reduções adicionais no potencial benefício que as fachadas duplas ventiladas poderiam proporcionar, e com edifícios de maiores consumos energéticos (já comumente maiores de 200 kWh/m²/mês (ROMÉRO, 1995).

3.4 – Análise de iluminação natural

Baseado nos mesmos modelos e casos das simulações com o TAS (Tabela 4), o desempenho de fachadas duplas ventiladas e simples, em termos de níveis de iluminância no ambiente de trabalho, foi investigado usando ECOTECH⁹ e RADIANCE¹⁰. Foi considerada uma condição de céu encoberto (*overcast*) com iluminância do céu padrão (*design sky illuminance*) de 9.258 lux, calculado no ECOTECH pelo modelo de Tregenza (1986). Para esse estudo, 300 lux (3,2% DF) foi considerado como o nível mínimo de iluminância necessário no interior do ambiente, em conformidade com normas brasileiras (NBR 5413, 1991). Os resultados das simulações foram analisados em termos de níveis de iluminação natural no ambiente à altura de 0.80 m, e níveis mínimos ao final da profundidade do módulo de escritório (a 6 m da fachada), em relação a quatro orientações: N, S, L e O – Figura 7.

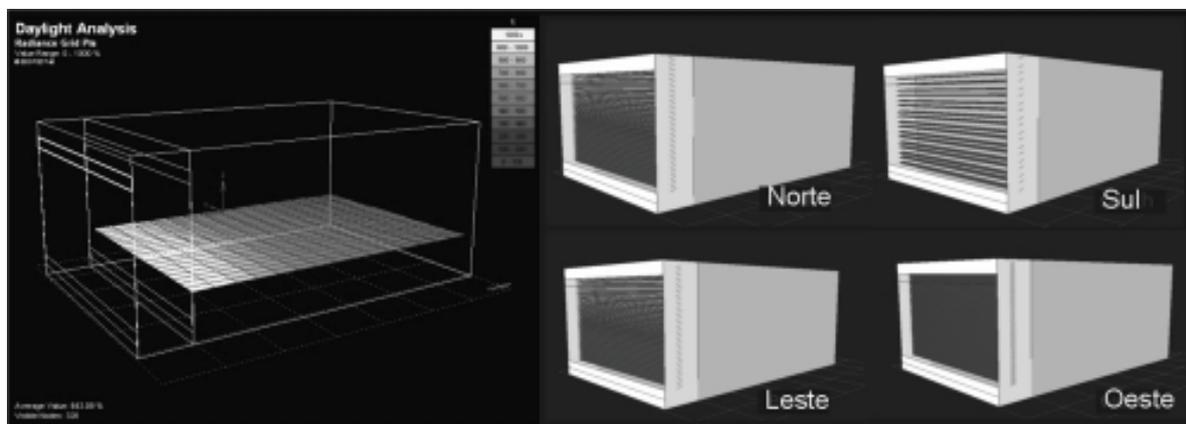


Figura 7: Modelo de fachada dupla ventilada simulada no *software* ECOTECH: plano de análise com h=80 cm (à esquerda) e modelo com elementos de proteção solar para cada orientação (à direita)
Crédito: Autora

Conforme o esperado, o desempenho da fachada dupla ventilada, em termos de disponibilidade de luz natural no módulo de escritório, foi menor em comparação aos modelos de fachada simples, principalmente devido à camada de vidro extra, às divisórias da cavidade e à profundidade efetiva adicional causada pela projeção da fachada. Sem a inclusão de elementos de proteção solar, a redução do desempenho foi de 30%, mas os resultados ainda permaneceram dentro de uma faixa aceitável (i.e. $DF \geq 3,2\%$).

Considerando-se o uso de *brises*, a análise de iluminação natural demonstrou que, com os modelos de fachadas duplas ventiladas testados, não foram atingidos níveis adequados de iluminância no interior de um ambiente com 6 m de profundidade, quando os *brises* do interior da cavidade operavam efetivamente para obter controle solar (situação típica de uma fachada dupla ventilada). Desse modo, se os *brises* forem fixos, o edifício terá de depender de iluminação artificial por parte considerável do ano, apesar da grande disponibilidade de luz do céu de São Paulo. Alternativamente, a análise também mostrou que o uso de elementos externos, aliados a uma fachada simples, poderia proporcionar proteção solar efetiva e, ao mesmo tempo, garantir níveis adequados de iluminação natural para o mesmo espaço, com a vantagem adicional de permitir vistas para o exterior (especialmente relevante, em se tratando do conforto dos ocupantes e índices de produtividade).

Estudos posteriores mais detalhados poderiam avaliar a contribuição da radiação direta, mesmo filtrada por *brises*, já que é esperado ocorrer uma alta variabilidade de níveis de iluminância no interior do espaço ao longo do dia. Além disso, outras questões como ofuscamento e contrastes também são responsáveis por impactos consideráveis no desempenho geral das fachadas nesse cenário.

CONCLUSÕES

De acordo com esta investigação, as fachadas duplas ventiladas foram consideradas tecnicamente aplicáveis a edifícios de escritórios em São Paulo. Os resultados mais favoráveis para esse tipo de fachada, em comparação às fachadas simples, são devido, principalmente, à alteração das condições de umidade relativa do ar externo na cavidade conformada pelos dois panos de vidro da fachada dupla, antes de entrar no ambiente, expandindo o período no qual as condições de ventilação natural estariam adequadas ao que foi definido como aceitável. Nesse caso, permitindo a expansão da ventilação natural por até 25% das horas de ocupação do ano, em relação ao uso de uma fachada simples.

Do ponto de vista econômico, tal investimento ainda não aparece competitivamente em relação às tipologias de fachadas mais tradicionais. Ainda assim esta abordagem preliminar do tema demonstra a validade da realização de novas investigações sobre a fachada dupla ventilada, como uma possível solução ambientalmente eficiente para edifícios de escritórios em São Paulo.

Além disso, as fachadas simples também são apontadas como outra alternativa, desde que aprimoradas com a inclusão de estratégias passivas, como a incorporação de elementos externos de proteção solar, por exemplo.

A presente pesquisa se baseou em análises simplificadas e foi considerada uma ferramenta para iniciar uma análise crítica e um debate técnico a respeito da aplicação de fachadas duplas ventiladas em São Paulo. Estudos posteriores são sugeridos e devem incluir modelos geométricos mais acurados e complexos de fachadas duplas ventiladas, com análises de CFD – *computer fluid dynamics*, e, se possível, modelagem física com teste em túnel de vento. Os diferentes impactos da fachada em andares altos e baixos de um mesmo edifício também poderiam ser testados, assim como seu desempenho acústico.

BIBLIOGRAFIA

- GONÇALVES, J. C. *A sustentabilidade do edifício alto. Uma nova geração de edifícios altos e sua inserção urbana*. 2003. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO) – ISO 7730. *Moderate thermal environments: Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*. Genebra: ISO, 1994.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. *Eficiência energética na arquitetura*. São Paulo: PW Editores, 1997.
- MARCONDES, M. P. *Double-skin façades in high-rise office buildings in São Paulo. A possible environmental efficient solution?* 2004. Dissertação (Mestrado) – Architectural Association Graduate School MA Environmental, Londres, 2004.
- NBR 5413. *Iluminância de interiores*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.
- PASQUAY, T. Natural ventilation in high-rise buildings with double façades, saving or waste of energy. In: PLEA 2001 – THE 18TH CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2001. *Proceedings of PLEA 2001*. Florianópolis, SC: PLEA, 2001.
- ROMÉRO, M. A. Consumo de energia em escritórios de arquitetura: Um balanço da situação no município de São Paulo. *Sinopses*, São Paulo, n. 20, p. 30-36, 1995.
- TREGENZA, P. R. Measured and Calculated Frequency Distributions of Daylight Illuminance. *Lighting Research and Technology*, v. 2, n. 18, p. 71-74. Disponível em: Subtask C – New Daylight Algorithms. @ <http://eande.lbl.gov/Task21/BRE-ETSU/intro.html>. Acesso em: 1986.

Mônica Pereira Marcondes

Arquiteta e urbanista pela FAUUSP, mestre em Environment & Energy Studies (MA AAEE) da Architectural Association Graduate School, Londres, e bolsista do Programa Alban (European Union Programm of High Level Scholarships for Latin America). Atualmente é pesquisadora e doutoranda do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Tecnologia da FAUUSP.
e-mail: mopm2@terra.com.br