XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

BASE DE DADOS DE COEFICIENTES DE PRESSÃO PARA EDIFÍCIOS NO FORMATO H

Talita Andrioli Medinilha de Carvalho (1); Lucila Chebel Labaki (2)
(1) Arquiteta & Urbanista , Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Construção, talitamedinilha@gmail.com
(2) Professora Titular, lucila@fec.unicamp.br
Unicamp, Departamento de Arquitetura e Construção, Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada - LACAF, Rua Saturnino de Brito, 224 - Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas - São Paulo, (019)3521 2422

RESUMO
Devido a grande importância da ventilação natural para o conforto térmico das edificações, pesquisas atuais têm buscado incluir a sua análise em seus objetivos. Para tanto, é possível recorrer a simulação computacional a qual pode ser realizada por muitos métodos como, Computational Fluid Dynamics (CFD) e Airflow Network (AFN). O primeiro é mais preciso, mas envolve uma curva de aprendizado longa e demanda muito tempo para produção de modelos, configuração, simulação e também tratamento dos dados. Já a AFN geralmente está acoplada a programas do tipo Building energy simulation (BES), sendo mais rápida para simular se comparado ao CFD; além disso possui uma esta curva de aprendizado mais curta, especialmente para usuários que já trabalham a simulação energética e buscam, apenas, incluir a ação dos ventos no processo. Apesar desta facilidade a simulação do tipo AFN demanda o conhecimento do Coeficiente de pressão (Cp), sendo a sua precisão essencial para a validade dos resultados finais. Embora seja de grande relevância, atualmente as bases de dados e modelos analíticos de cálculo disponíveis sobre o Cp ainda estão incompletas, não possuindo dados para várias configurações de edifícios. Assim pretende-se elaborar uma base dados de Cp considerando o formato edifícios em H devido a sua grande ocorrência no Brasil. Para tanto serão realizadas simulações em CFD com variações na altura e também proporção em planta afim de gerar uma base de dados de ampla aplicação. Com este produto espera-se facilitar o acesso de pesquisadores à simulação da ventilação natural em programas do tipo BES, reduzindo as incertezas dos resultados e incentivando a aplicação da ventilação natural em novas construções.
Palavras-chave: conforto térmico, ventilação natural, coeficiente de pressão, simulação energética, CFD.

ABSTRACT
Due to the great importance that natural ventilation has on thermal comfort, current researches have sought to include natural ventilation analysis in their scope. For such, it is possible to resort to computational simulations which can be performed by many methods, such as Computational Fluid Dynamics (CFD) and Airflow Network (AFN). The first is more precise but involves a longer learning curve and requires a lot of time for modeling, configuration, simulation also data processing. AFN simulation, on the other hand, is usually coupled with Building Energy Simulation (BES) software, which simulates faster than CFD; it also has a shorter learning curve, especially for users who already run energy simulations and only seek to include the natural ventilation effects. Despite these benefits, AFN simulation demands previous knowledge on Pressure Coefficient (Cp) and its precision is essential for the validity of the final results. Although it is of great relevance, the currently available databases and analytical models of Cp are still incomplete, lacking data for various buildings configurations. Thus, it is intended to elaborate a Cp database for building in H shape due to its large occurrence in Brazil. In order to generate a database for a wide range of applications, CFD simulations will be performed with variable heights and proportion at floor plan. Therefore, it is expected to further the researchers access to natural ventilation simulations in BES software, reducing results uncertainties and encouraging the application of natural ventilation in new constructions.
Keywords: thermal comfort, natural ventilation, pressure coefficient (Cp), Building energy simulation, CFD.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação natural é de grande importância para o conforto térmico em climas quentes (AFLAKI et al., 2015) sendo estratégia é recomendada para 99% do nosso território segundo o Zoneamento Bioclimático brasileiro (ABNT, 2003). Reconhecendo esta importância, pesquisas atuais no campo do conforto térmico tem buscado incluir os efeitos da ventilação natural em suas análises, seja através da coleta de dados em loco (estala real), da simulação computacional ou do túnel de vento (escala reduzida).

Embora esta prática seja uma forma de incentivar a aplicação da estratégia em novos projetos, ela pode ser um grande desafio aos pesquisadores, em especial quando é adotada a simulação computacional como método de obtenção de dados. Para tanto é possível adotar diversos métodos, sendo os mais usados: o *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e o *Airflow Network* (AFN).

Embora o CFD seja um método muito preciso também envolve várias etapas demoradas (Modelagem do objeto de estudo e do domínio, Geração da malha, Definição do código de solução, Simulação do modelo, Exportação dos dados) exigindo alta capacidade de processamento do computador e um longo tempo de simulação podendo levar muitas horas ou até mesmo dias para ser concluído (MEDINILHA; LABAKI, 2016). Além disso trabalhar com este tipo de ferramenta exige uma expertise avançada que demanda tempo para ser alcançada pelo usuário. Apesar disso o CFD fornece uma grande quantidade de dados como pressão nas faces do modelo, escoamento do fluxo (com intensidade de direção), sendo adequados para compreender a ventilação natural isoladamente, mas não para analisar a eficiência energética de edifícios.

Já a simulação de um AFN é mais rápida que o primeiro método além de ser capaz de considerar diversas incidências e velocidades do vento e simular grandes períodos (exemplo: um ano). É comum a adoção deste tipo de simulação (AFN acoplada ao BES- Building Energy Simulation) quando o objetivo é compreender a eficiência energética objeto de estudo incluindo os efeitos a ventilação por ação dos ventos na análise, além disso é um caminho acessível principalmente para usuários que já dominam ferramentas do tipo BES (ESP-r (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2018), Energy Plus (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S; BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE, 2018) e DOMUS (MENDES; OLIVEIRA; SANTOS, 2013)).

Porém, para realizar a simulação da ventilação através da AFN é necessário inserir valores de coeficiente de pressão Cp $^{\text{como dado}}$ de entrada (PEREIRA et al., 2013) . Este coeficiente pode ser descrito como "quociente adimensional da pressão dinâmica medida em um ponto x na parede do modelo (Px) pela pressão dinâmica do fluxo de ar (vento) não perturbado (Pd)"(CÓSTOLA, 2006), sendo influenciado por um grande numero de parâmetros "incluindo geometria do edifício, detalhamento da fachada (ex: elementos de proteção solar externos, balcões), posição na fachada, elementos de obstrução do entorno (ex: prédios, arvores), velocidade do ar, direção dos ventos e intensidade da turbulência"(CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

O uso de valores de Cp corretos é essencial para a fidelidade dos resultados de ventilação natural em simulações BES (BAHARVAND, 2010; KARAVA; STATHOPOULOS; ATHIENITIS, 2006; LUKIANTCHUKI et al., 2016; TOLEDO, 2006) e estes podem ser obtidos através de cálculos manuais, busca nas bases de dados, simulação em CFD ou túnel de vento (sendo as duas últimas recomendadas devido a confiabilidade nos resultados) (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007).

Alguns dos principais banco de dados e modelos analíticos disponíveis atualmente são AIVC, ASHRAE, Swami & Chandra, CpCalc+, Cp Generator, Base de dados TPU (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009; TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY, 2018), porém apesar destes modelos e bases de dados citados serem muito práticos não podem ser utilizados em todos os casos, aplicando-se apenas a formas simples (como um quadrado ou retângulo). Assim, para edifícios de formas complexas é necessário recorrer a fontes primarias de simulação, como os citados softwares de CFD ou túnel de vento, trazendo um significativo aumento do tempo de fluxo de trabalho.

Segundo TEIXEIRA et al. (2015) no Brasil edifícios residenciais no formato retangular representam 65% dos casos, enquanto os quadrados em torno de 15%, já o formatos em H significam 15%, outras configurações como a em "L" ou em "T" foram consideradas estatisticamente insignificantes. De maneira que se faz necessário uma base de dados mais abrangente e que considere a realidade brasileira incluindo o formato H, por exemplo.

2. OBJETIVO

Tendo em vista a crescente inserção da ventilação natural em simulações do tipo BES, o escopo deste trabalho é criar uma base de dados de coeficientes de pressão nas fachadas de edifícios no formato H, para diferentes velocidades e incidências do vento, e também variações na alturas e proporções em planta.

3. MÉTODO

A pesquisa se dará em 3 (três) etapas, sendo a primeira a definição da amostra incluindo tipologias de edifícios (forma em planta e altura), velocidade e direção do vento. Então será conduzida a simulação em CFD (etapa dois) onde serão realizados testes em modelos simplificados para validar as configurações de modelagem, perfil de camada limite e rugosidade do terreno (pré-teste); em seguida será feita a automação da simulação produzindo a variação das dimensões da tipologia de edifício definida, inclusão da simulação de variações na velocidade e direção do vento. A ultima etapa (três) será a obtenção e tratamento dos dados, que procederá com a aquisição dos valores da pressão ao longo da fachada, cálculo do coeficiente de pressão, análise estatística dos dados e sistematização dos dados em imagens (isolinhas de Cp em cada fachada). Um detalhamento destes passos se encontra na sequência.

3.1 Definição da amostra

De acordo com a revisão bibliográfica foi definido utilizar variações da planta em H para a geração da base de dados em questão; neste sentido a amostra incluirá variações na forma do envelope em planta e altura do edifício, bem como da velocidade e incidência do vento.

A planta inicial (Figura 2-a) utilizada no pré-teste e apresentada neste trabalho seguiu as dimensões de 15,1m x16,7m por 13m de altura (conforme detalhado na Tabela 1), estas medidas de basearam em um caso real implantado na cidade de Piracicaba, SP. A partir destas medidas serão modeladas outras proporções em planta alterando as dimensões A, B, C, D , E e F (Figura 2-b) e também variações da altura do prédio (H).

Para a geração das diferentes proporções do modelo será utilizada uma rotina no software Matlab para criação randômica de combinações dos valores mínimos e máximos estipulados na Tabela 1, respeitando o intervalo de 0,5m entre as dimensões. A definição destes valores se baseou em valores típicos de edifícios residenciais brasileiros, sendo a variação em altura baseada no número máximo de pavimentos apresentados na referência da literatura (TEIXEIRA et al., 2015) assumindo que a altura de cada pavimento seja 3m.

Vale ressaltar que a fachada será modelada como uma empena cega, ou seja, não será levado em consideração as divisões internas da planta ou as dimensões das aberturas, embora seja claro que estes fatores podem influenciar o coeficiente de pressão, visto que estas combinações podem ser infinitas foi optado por não modelá-las neste trabalho. Além disso, a cobertura da edificação será plana em todos os casos.

Já a velocidade do ar irá variar entre 1m/s e 10m/s a cada 0,5m/s (a altura de 3m do solo), sendo valores diferentes destes incoerentes com a realidade. Além disso a incidência do vento também será variada segundo recomendações (CÓSTOLA; ALUCCI, 2011) cada 30° dentro de ¼ de quadrante (de 0° a 90°) já que os valores são simétricos nos outros quadrantes.

Dimensão	Medida pré-teste (m)	Medida mínima (m)	Medida máxima (m)
A	15,1	5	35
B	16,7	9	30
C	6,3	3	10
D	4,1	3	10
E	4,4	1	10
F	6,3	3	15
H	13	3	135

Tabela 1. Intervalos mínimos e máximos de variações das proporções do modelo.

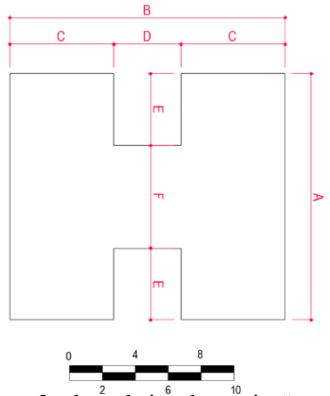


Figura 2. planta baixa das variações nas proporções da forma.

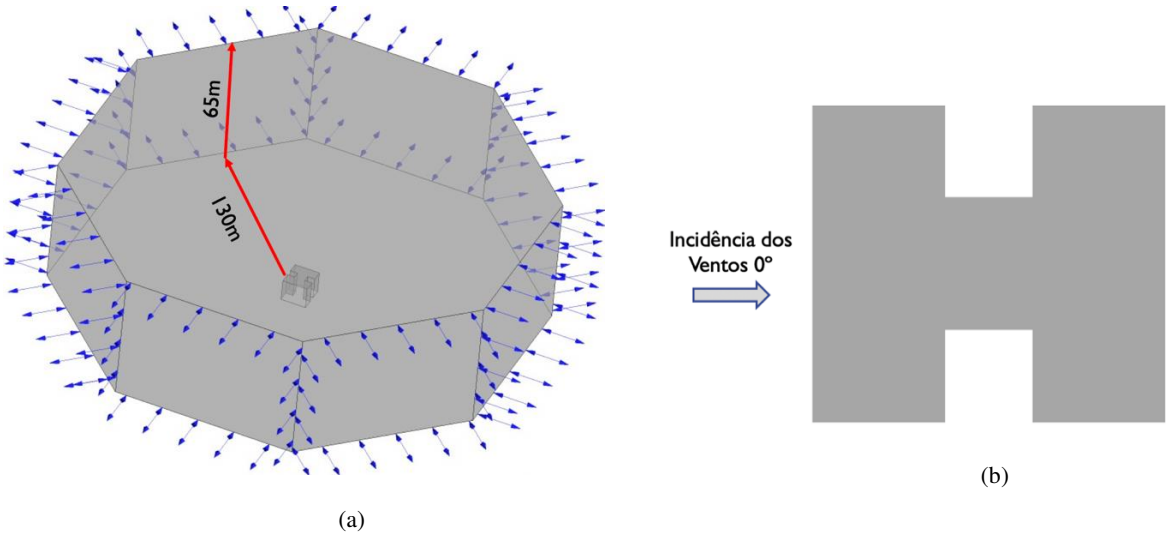
3.2 Simulação em CFD

Na etapa da simulação em CFD (etapa 2) foi adotado o programa CFX (ANSYS, 2019), já que é um software largamente adotado em simulações de ventilação natural e aceito pelo meio acadêmico (ALDAWOUD, 2016; CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI et al., 2016; MORAIS; LABAKI, 2013; SOKHI et al., 2000).

A fim de garantir a fidelidade dos dados, primeiro foi realizada a simulação de um modelo simplificado (chamado de pré-teste) e posteriormente serão inseridas as variações dos parâmetros definidos (forma e altura do edifício, bem como velocidade e direção do vento) de maneira progressiva. Já para validar

os resultados da pesquisa os dados iniciais (do modelo pré-teste) serão comparados com valores correspondentes em um experimento em escala reduzida em túnel de vento verificando a confiabilidade dos resultados, então serão realizados possíveis ajustes nas configurações do modelo digital.

No pré-teste foi adotada a incidência da ventilação de 0° (Figura 3-b) e domínio octogonal que, apesar que demandar maior tempo de simulação, possibilita a alteração da direção dos ventos com facilidade; já as dimensões do domínio seguem recomendações adequadas para o caso estudado, raio de 10 vezes a altura do objeto de estudo (H), e altura do domínio de 5 (cinco) vezes a altura do objeto em questão (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007), no caso do pré-teste as dimensões do domínio estão indicadas na Figura 3-a.



(a) (b)

Figura 3. (a) Perspectiva isométrica do domínio modelado no software CFX para o caso pré-teste, (b) planta baixa do pré-teste com indicação do sentido dos ventos.

Tabela 2. Configurações do domínio e da malha utilizados na simulação do pré-teste

GLOBAL PARAMETERS- Sizing		DOMAIN INPUT
n° of cells across gap=	3	**Configuração do Domínio**
face size=	2	analysis type= stationary
maximum size=	4	heat transfer= isothermal at 20°C
growth rate=	1,2	turbulence model= k epsilon
		Condições do entorno
		paredes laterais do domínio= subsonic opening
MESH CONTROL- Face sizing		topo do domínio= free slip wall
Local =	edificação	base do domínio ; room walls= no slip wall
element size=	0.8m	velocidade média a 3m do solo = 2,46m/s
growth rate=	1,2	**Critério de convergencia**
		maximum residual = 10-4
		minimum iterations = 1
		maximum iterations = 600

Fonte: Baseado em (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007)

Para a configuração do modelo foi utilizada a análise do tipo estacionária e a transmissão de calor isotérmica, desta forma cargas térmicas (devido a ocupação interna, envoltória e sombreamento) não foram consideradas na simulação. Um detalhamento das configurações adotadas para a simulação do pré-teste pode ser visto na Tabela 2, conforme sugerido na literatura (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Apesar do efeito da temperatura ser de grande importância em alguns casos entende-se que como esta pesquisa analisa apenas o envelope do edifício este efeito não terá impacto relevante e poderá ser suprimido.

3.3 Obtenção e tratamento dos dados

Após a simulação do modelo serão adquiridos valores da pressão estática (P_x) em todas fachadas do edifício e de posse destes dados será realizado o cálculo do coeficiente de pressão de acordo com as equações 1 e 2.

$$C_P = \frac{P_x - P_0}{P_d} \quad \text{Equação 1}$$

$$P_d = \frac{\rho \cdot U_h^{\,2}}{2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Cp= coeficiente de pressão [adimensional]

Px = pressão estática em um ponto da face do edifício [Pa]

Po = pressão estática de referência [Pa]

Pd= pressão dinâmica [Pa]

ρ =densidade do ar [kg/m3]

Uh = velocidade do ar tomada a altura do edifício em um ponto não perturbado do domínio e a barlavento[m/s] (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009)

Para a sistematização dos dados, estes serão classificados por parâmetros como: proporção do edifício em planta, altura do edifício, velocidade e direção do vento. Desta forma facilitando o acesso do usuário ao conjunto de dados de interesse, assim o pesquisador poderá encontrar os coeficientes mais adequados ao modelo que pretende simular.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Pré-teste

Uma vez classificados todos os dados serão apresentados ao usuário na forma de imagens de isolinhas dos valores do Cp das fachadas de interesse. A Figura 4 mostra a representação da variação da pressão estática nas fachadas apenas do modelo pré-teste.

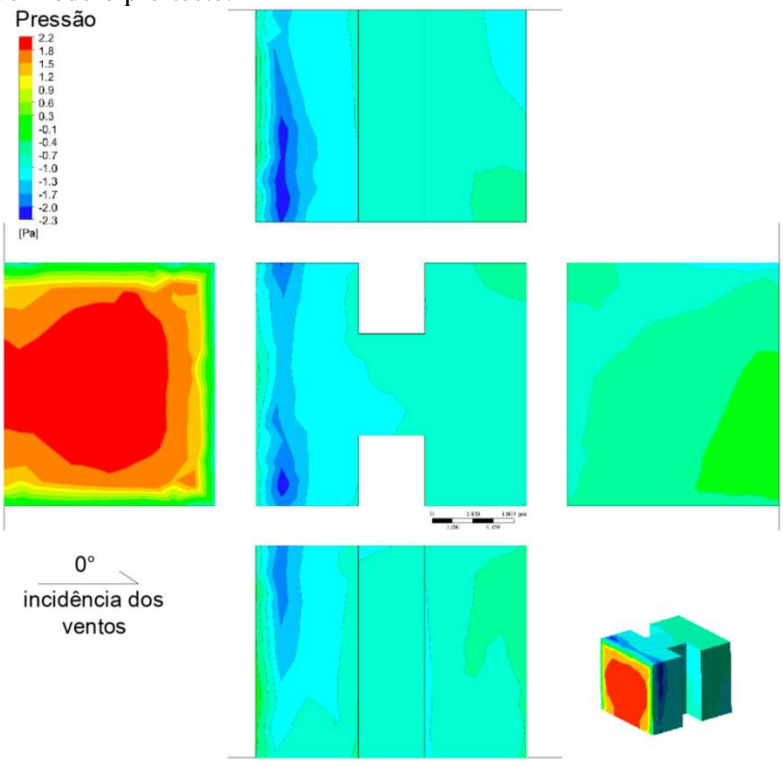


Figura 4. representação da distribuição da pressão estática nas fachadas do modelo pré-teste através de isolinhas.

5. ETAPAS FUTURAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na sequência será conduzida a validação do modelo apresentado neste artigo, pré-teste, e então serão realizados possíveis ajustes no modelo a fim de reduzir as incertezas do processo. Então será iniciada a simulação das outras situações descritas no método utilizando uma rotina no software Matlab. Por fim tendo os dados em mão, será realizado tratamento e sistematização dos dados para então disponibilizá-los na forma de isolinhas da distribuição do Coeficiente de pressão nas fachadas.

Como o presente trabalho conclui-se que será possível elaborar uma base de dados de Coeficientes de Pressão para edifícios no formato H, compreendendo assim um formato de edifício recorrente no Brasil. Desta maneira, será mais acessível aos pesquisadores incluir a ventilação por ação dos ventos em simulações

em programas BES (como Energy Plus, Domus, ESP-r), além de demandar menos tempo, se comparado com o acoplamento da simulação BES e CFD. Por fim acredita-se a base de dados produzida poderá incentivar que novas pesquisas considerem a ventilação por ação dos ventos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações -Parte 1 : Definições , símbolos e unidades**Rio de Janeiro, BrasilABNT, , 2003.

AFLAKI, A. et al. A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. **ENERGY AND BUILDINGS**, v. 101, p. 153–162, 2015.

ALDAWOUD, A. Windows design for maximum cross-ventilation in buildings. **Advances in Building Energy Research**, 2016.

ANSYS. **ANSYS CFX.**Canonsburg, Estados Unidos.ANSYS, , 2019.

BAHARVAND, E. **How to model a wall solar chimney? Complexity and Predictability**. Eindhoven: Technische Universiteit, 2010.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 25 set. 2006.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. **Proceedings: Building Simlation 2007**, n. 2003, p. 999–1006, 2007.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Ambiente Construído (Online)**, v. 11, n. 1, p. 145–158, 2011.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment**, 2009.

KARAVA, P.; STATHOPOULOS, T.; ATHIENITIS, A. K. Impact of internal pressure coefficients on wind-driven ventilation analysis. **International Journal of Ventilation**, v. 5, n. 1, p. 53–66, 2006.

LUKIANTCHUKI, M. A. et al. Sheds extratores e captadores de ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 83–104, jan. 2016.

MEDINILHA, T. A.; LABAKI, L. C. **Let's open these windows! The influence of opening design parameters on natural ventilation.** PLEA. **Anais**...Los Angeles: PLEA, 2016

MENDES, N.; OLIVEIRA, R. C. DE L. F. DE; SANTOS, G. H. DOS. **Domus.**Curitiba.Eletrobras, , 2013.

MORAIS, J. M. S. C.; LABAKI, L. C. **Evaluating natural ventilation in multi-storey social housing**. PLEA. **Anais**...2013

PEREIRA, H. A. DA C. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energy Plus – versão 8.0**. Florianópolis – SC: [s.n.].

SOKHI, R. S. et al. (EDS.). **Urban Air Quality: Measurement, Modelling and Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000.

TEIXEIRA, C. A. et al. **Levantamento das características de edifícios residenciais brasileirosLabeee**. Florianopolis: [s.n.].

TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Aerodynamic Databese of High-rise Buildings**. Toquio: [s.n.]. Disponível em: <http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/highrise/Homepage/homepageHDF.htm>.

TOLEDO, A. M. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos : uma aplicação em Maceió/AL.** Florianópolis: UFSC, 2006.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S; BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE. **EnergyPlus.**Berkeley, Estados Unidos.U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO), , 2018. Disponível em: <https://energyplus.net/>

UNIVERSITY OF STRATHCLYDE. **ESP-r.**Glasgow, Escócia.University of Strathclyde, , 2018.