



APLICAÇÃO DE CFD PARA CÁLCULO DAS PRESSÕES DINÂMICAS EM EDIFICAÇÕES

Application of CFD for the obtaining of external pressure coefficients in buildings

Douglas Pereira Agnelo (1); Fernando Akira Kurokawa (2);
Valério da Silva Almeida (3)

(1) Engenheiro Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.

(2) Dr. Prof., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.

(3) Dr. Prof., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil.

Email para Correspondência: dagnelo@usp.br; (P) Apresentador

Resumo: Muito embora a carga do vento incidente em uma construção possa ser estabelecida em projeto de forma bastante simplificada, a determinação das cargas induzidas pelo vento e sua respectiva ação dinâmica na estrutura demanda análises mais aprofundadas, em face da complexidade do fenômeno e o caráter absolutamente aleatório do seu comportamento. O estudo da ação do vento e sua interação com as estruturas, apresentam-se de forma preponderante e devem ser levados em conta ainda na fase de projetos. Com o advento da tecnologia computacional e das técnicas numéricas, a Dinâmica dos Fluidos Computacional vem desempenhando papel fundamental para solução de problemas de interação vento-estrutura. Visando a otimização dos recursos para execução de estruturas e eficiência no dimensionamento dos projetos, o objetivo aqui é determinar as pressões dinâmicas devido à ação do vento em edificações, via simulação em CFD. A simulação numérica dessa interação vento-estrutura foi feita utilizando a ferramenta Abaqus. Os resultados das simulações são comparados com os modelos de cálculos utilizados na Norma Brasileira NBR 6123:1988 de 2013 e Eurocode parte 1-4 e, com os dados experimentais obtidas por túnel de vento. Os resultados mostram-se satisfatórios e consistentes. Devido a limitação e o alto custo das análises em uma investigação experimental, a partir dos resultados obtidos pelas simulações, observa-se que a Dinâmica dos Fluidos Computacional pode ser utilizada como alternativa para estimar as pressões dinâmicas das edificações.

Palavras chaves: Dinâmica dos Fluidos Computacional; Forças Horizontais nas Estruturas; NBR 6123:1988; Simulação Numérica.

Abstract: Although the wind load incident on a construction can be established in a very simplified design, the determination of the wind-induced loads and their respective dynamic action in the structure demands more in-depth analysis, due to the complexity of the phenomenon and the absolutely random character of their behavior. The study of the action of the wind and its interaction with the structures, are preponderant and must be taken into account even in the project phase. With the advent of computational technology and numerical techniques, Computational Fluid Dynamics has been playing a fundamental role in solving wind-structure interaction problems. In order to optimize the resources for the execution of



structures and efficiency in the design of the projects, the objective here is to determine the dynamic pressures due to the wind action in buildings, through CFD simulation. The numerical simulation of this wind-structure interaction was done using the Abaqus tool. The results of the simulations are compared with the calculation models used in the Brazilian Standard NBR 6123: 1988 of 2013 and Eurocode part 1-4 and, with the experimental data obtained by wind tunnel. The results are satisfactory and consistent. Due to the limitation and the high cost of the analyzes in an experimental investigation, from the results obtained by the simulations, it is observed that Computational Fluid Dynamics can be used as an alternative to estimate the dynamic pressures of the buildings.

Keywords: *Computational Fluid Dynamics; Horizontal Forces in Structures; NBR 6123: 1988; Numerical Simulation.*

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é o principal motivador da inovação tecnológica na construção civil. Ao se projetar e executar uma obra de engenharia civil é fundamental aproveitar ao máximo as condições geográficas e bioclimáticas locais a fim de garantir o mínimo de impacto ambiental.

Desenvolvimento é definido como sustentável quando satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras em satisfazer suas próprias necessidades (LENZI, 2006). Neste aspecto, a eficiência construtiva e o desenvolvimento sustentável na engenharia civil estão diretamente relacionados com a utilização racional, otimizada e eficiente de materiais e mão de obra.

Atualmente o consumo de recursos naturais, com o desenvolvimento econômico e o aumento populacional, vem crescendo podendo atingir oitenta toneladas por habitante ao ano em países desenvolvidos (MATTHEWS et al., 2000) sendo que 70% destes recursos são destinados para a construção civil (MATOS; WAGNER, 1998).

Para obtenção da eficiência construtiva e do desenvolvimento sustentável, há uma necessidade de desmaterialização das obras de engenharia. No Brasil, a liberação de recursos governamentais para o segmento habitacional exige cada vez mais o cumprimento e comprovação de políticas sustentáveis pelas construtoras. Portanto, construir mais usando o mínimo de recursos se torna cada vez mais obrigatório. Neste aspecto, a engenharia civil deve buscar alternativas sustentáveis desde da concepção de projeto até a fase final de utilização da obra.

A concepção do projeto e o dimensionamento estrutural impacta de forma preponderante neste processo, já que as soluções dos elementos estruturais pelos modelos de cálculo adotados refletem diretamente no consumo de recursos materiais e humanos. A utilização de um modelo de cálculo mais conservador e menos econômico se replica em todo o processo aumentando de forma potencial os consumos de materiais e mão de obra.

No tocante à concepção e dimensionamento estrutural, o estudo da ação do vento e sua interação com as estruturas, apresentam-se de forma muito significativa, entretanto a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013a) não se aplica às edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento



e seus efeitos. Segundo a mesma, resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes na NBR 6123:1988 (ABNT, 2013a).

Tendo em vista o disposto no artigo 53, da Lei 4.591/64, a NBR 12721 (ABNT, 2013b) fornece as diretrizes para obtenção dos preços dos insumos da construção civil (Custo Unitário Básico - CUB), divulgados mensalmente pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil, nos termos do art. 54 da mesma Lei.

Um ensaio convencional para determinação de forças para cálculo da estrutura e pressões nos elementos de revestimento de um edifício custa em torno 38 mil reais no Brasil e o dobro ou mais no exterior (LOTURCO, 2010), o que equivale ao custo de 67 m² de área construída de um edifício PIS (Projeto de Interesse Social), área calculada pelo CUB de março de 2010 (SINDUSCON-RS, 2010). Portanto o custo médio de um ensaio de túnel de vento representa aproximadamente o custo de um apartamento de edifício multifamiliar padrão PIS.

“Há outros tipos de ensaios e diferentes níveis de complexidade em que os preços são determinados conforme a necessidade dos estudos” segundo professor Acir Mércio Loredo-Souza, do LAC (Laboratório de Aerodinâmica das Construções) da UFRGS (LOTURCO, 2010).

Em São Paulo, o preço aproximado do serviço de ensaio de túnel vento é de R\$ 50 mil (BONAFÉ, 2017), podendo variar de acordo com o tipo de edificação, quantidade de torres, altura e vizinhança. Comparando com o custo do metro quadrado construído em edificações padrão PIS, o ensaio representa o custo de uma unidade da edificação, já que o preço do ensaio equivale a 58 m² da área construída referenciada pela CUB PIS de janeiro de 2017 (SINDUSCON-SP, 2017).

2 JUSTIFICATIVA

Com o avanço das técnicas numéricas e da tecnologia computacional, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) vêm desempenhando papel fundamental para solução de problemas de interação vento-estrutura.

As modelagens em *CFD* utilizam métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar problemas que envolvem escoamentos de fluidos (FORTUNA, 2000). A base dos modelos de cálculo são as equações de Navier-Stokes, as quais são resolvidas de forma iterativa usando algoritmos computacionais complexos.

“A *CFD* é empregada para diminuir o ciclo de projeto através de estudos paramétricos cuidadosamente controlados, reduzindo assim a quantidade necessária de testes experimentais” (ÇENGEL, 2007). Com a evolução computacional nas últimas décadas, a utilização de *CFD* tornou indispensável no processo de concepção de estruturas que envolvem aerodinâmica e hidrodinâmica em diversos países tais como Estados Unidos, Japão, Rússia, Alemanha, China entre outros.

85% das perdas econômicas devido a riscos naturais no mundo são causadas por danos causados pelo vento. As perdas de tornados, bem como de tufões, aumentaram. É particularmente importante para o Japão e a Ásia mitigar os danos causados pelo vento, pois possuem grandes



idades com edifícios altos e áreas residenciais de alta densidade onde a maioria dos edifícios são de madeira (TPU-COE, 2008).

Sendo assim, o *21st Century Center of Excellence Program*, financiado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia no Japão, em parceria com a Universidade Politécnica de Tóquio, desenvolveu uma base de dados aerodinâmica realizada com ensaios de túnel de vento com diferentes configurações de edifícios, ângulos de incidência do vento, influência de edifícios adjacentes, etc. O objetivo desta base de dados é fornecer parâmetros de cálculo para dimensionamento de edifícios pelos engenheiros estruturais. A base de dados foi utilizada pelo presente trabalho para avaliação dos resultados da simulação computacional.

3 METODOLOGIA

3.1 Equações governantes da dinâmica dos fluidos

As equações governantes que modelam escoamentos incompressíveis, transientes e isotérmicos são as equações de conservação de massa e de momento, dadas respectivamente, por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i \quad (2)$$

em que u_i ($i = 1; 2; 3$) são as componentes de velocidade, t é o tempo, ρ é a massa específica, p é a pressão, ν é a viscosidade cinemática e f_i representa as forças externas.

A maioria dos escoamentos são turbulentos caracterizados pela flutuação dos campos de velocidade, na qual pode ser definido com uma condição de fluxo caótica, flutuante e aleatória (ASYIKIN, 2012). Estas flutuações aleatórias em um escoamento também transportam importantes quantidades, tais como força e energia. Escoamentos turbulentos são altamente instáveis, tridimensionais e são um processo dependente do tempo. Nesse regime de escoamento a viscosidade passa a ter uma característica randômica, e por essa razão são necessárias maneiras que possam prever esse comportamento para que os termos das equações que envolvem a viscosidade sejam completos. Com isso, há a necessidade de escolha de um modelo de turbulência. De acordo com (WILCOX et al., 1998) existem na literatura vários modelos de turbulência.

O modelo de turbulência adotado pela ferramenta *Design Builder* é o modelo $\kappa - \varepsilon$ padrão ((LAUNDER; SPALDING, 1974); (YAKHOT et al., 1992)). Este modelo, apesar de válido para escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos (NIELSEN, 2004), é o mais comumente empregado e apresenta resultados satisfatórios. Além disso, requer um baixo consumo de simulação quando comparados aos outros modelos de turbulência e relativamente preciso (PUSTELNIK; TRIBESS, 2006; KUROKAWA, 2009).

O modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ está entre os modelos conhecidos como duas equações (EGER et al., 2010), em que as escalas de velocidade e de comprimento são obtidas através da solução de

duas equações de transporte. A variável κ representa a energia cinética turbulenta e ε é a taxa de dissipação em que as equações de transporte são dadas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial(\kappa u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + P - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} P - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4)$$

na qual σ_κ e σ_ε são os coeficientes de difusão turbulenta, P é o termo da produção da média da energia cinética turbulenta, $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes empíricas. A viscosidade turbulenta ν_t é obtida por:

$$\nu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

em que C_μ é uma constante empírica. As constantes das Eqs. (3) e (4) são obtidas a partir da correlação de dados experimentais de diversos escoamentos turbulentos (JONES; LAUNDER, 1972), sendo dadas por: $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_\kappa = 1.0$ e $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

3.2 Condições iniciais e de contorno

Neste trabalho, para as condições iniciais todas as variáveis são prescritas no início dos cálculos (condição de Dirichlet). Na entrada do domínio (“inlet”), as velocidades são prescritas e na saída do domínio (“outlet”), assume-se que o escoamento está completamente desenvolvido com pressão estática igual zero Pa. Nas paredes superior, inferior, frontal e posterior do domínio foram impostas a condição de não deslizamento.

4 CARACTERIZAÇÃO

4.1 Modelo experimental por túnel de vento

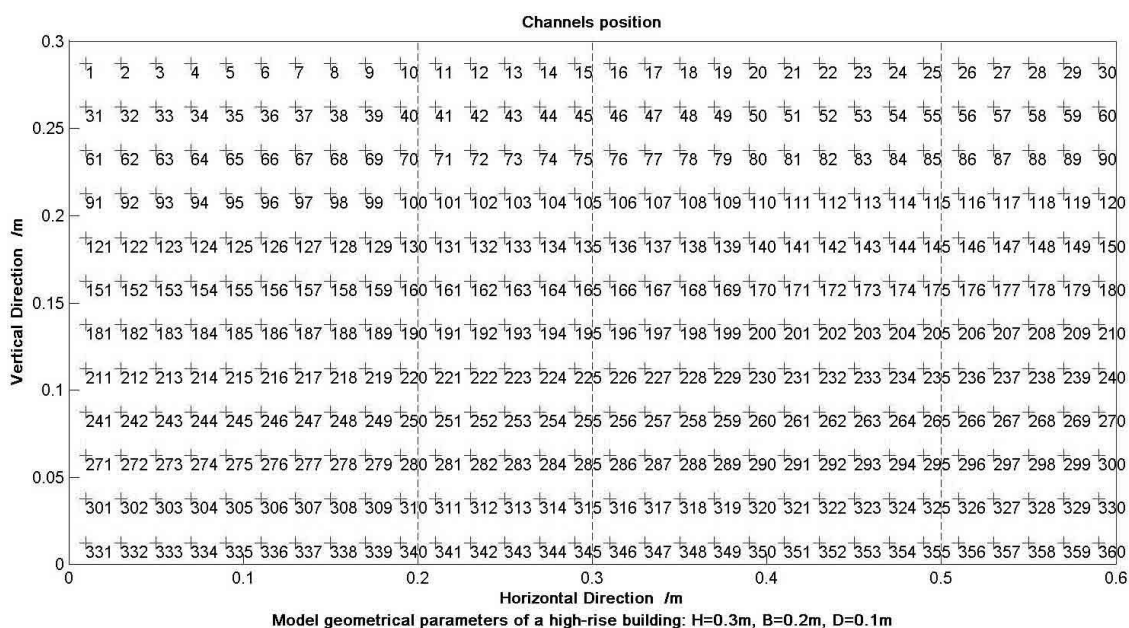
Os resultados do ensaio de túnel de vento utilizados neste trabalho são de uma edificação de 10 x 20 metros em planta com altura de 30 metros. O modelo em escala apresenta as dimensões em planta de 0.1 x 0.2 metros com altura de 0.3 metros. Os sensores de monitoramento de pressão do ensaio de túnel de vento estão apresentados na Figura 1.

As equações diferenciais (1) a (4), juntamente com as condições de contorno, são resolvidas numericamente no ambiente de simulação *Design Builder CFD* versão 4.5.0.148 usando o método dos volumes finitos (MVF), cuja solução resultante satisfaz a conservação de quantidades como massa, quantidade de movimento em qualquer volume de controle finito. Detalhes do método podem ser encontrados em (PATANKAR, 1980; FORTUNA, 2000). O método de solução numérica empregado pela ferramenta comercial *Design Builder* é método segregado, ou seja, as equações de continuidade, momento e energia são

resolvidas separadamente. Para resolver o acoplamento pressão-velocidade o algoritmo SIMPLE (*Semi Implicit Linked Equations*) foi utilizado.

No contexto de variáveis primitivas, as Eqs. (1) a (4) são discretizadas adotando-se uma malha deslocada, ou seja, a pressão, densidade, energia cinética turbulenta (κ) e a taxa de dissipação (ϵ) são aproximadas no centro dos volumes de controle, enquanto que, as velocidades são aproximadas nas faces. As derivadas temporais são aproximadas pelo método de Euler explícito. Os termos difusivos e o gradiente de pressão são por diferenças centrais enquanto que os termos advectivos são discretizados usando-se o esquema *Upwind* de primeira ordem (FERREIRA et al., 2009). As equações discretizadas são resolvidas iterativamente, usando o método linha por linha conhecido como algoritmo de Thomas ou TDMA (*TriDiagonal Matrix Algorithm*) e a sub-relaxação é usada para acelerar a convergência (PATANKAR, 1980; MALISKA, 1994).

Figura 1 – Sensores de pressão acoplados no modelo para ensaio de túnel de vento

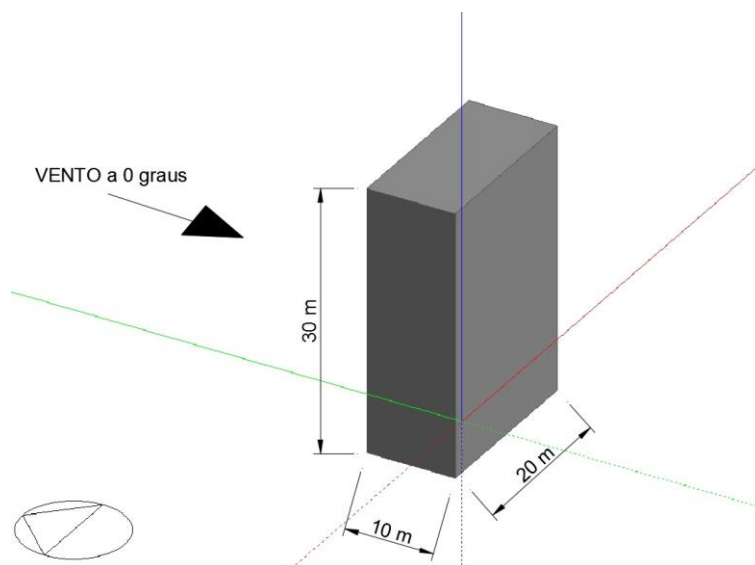


Fonte: TPU-COE (2008)

4.2 Modelo computacional por *CFD*

A análise através de *CFD* foi realizada com ângulos de incidência do vento 0° da edificação em planta. A densidade do ar considerada foi de 1.2041 kg/m^3 , a velocidade inicial do vento foi de 40 m/s .

Figura 2 – Dimensões da edificação



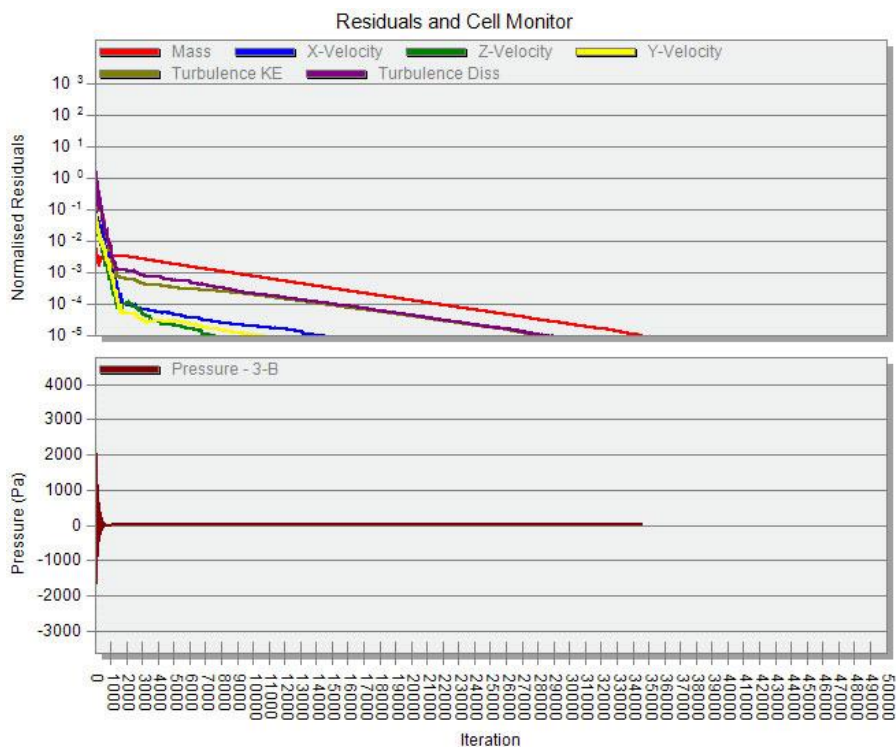
Fonte: Os autores

O domínio para cada simulação apresenta majoração de 20 a 15 em relação à dimensão da edificação em direção do vento (profundidade do domínio), de 10 a 5 em relação à dimensão da edificação ortogonal à direção do vento (largura do domínio) e de majoração de 2 em relação à altura da edificação conforme Figura 4, totalizando na média de todas as simulações 150 elementos na direção do vento, 50 elementos na direção ortogonal ao vento e 30 elementos na direção da altura (Figura 4), totalizando em média 225 mil elementos em cada uma das cinco simulações realizadas.

A simulação computacional foi realizada em regime estacionário. A estabilização da pressão ocorreu nas cinco simulações ocorreu após mil iterações e a convergência da massa com erro inferior 10^{-5} ocorreu entre 15 a 35 mil iterações em cada uma das simulações.

As simulações foram realizadas com computador tipo desktop com processador *quad-core i7-5500U*, com 8.0 Gb de memória *RAM* e sistema operacional *Windows 8.1*. A duração média para atingir a convergência, com erro de 10^{-5} , foi de 36 horas para cada simulação com aproximadamente 35000 iterações conforme Figura 3.

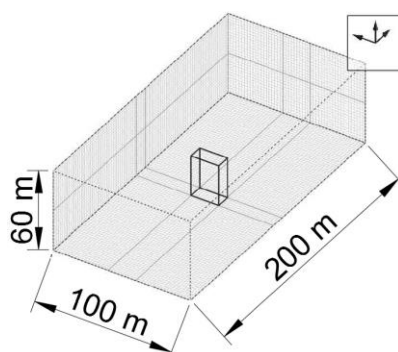
Figura 3 – Monitoramento da simulação por *CFD*



Fonte: Os autores

Para todas as simulações computacionais realizadas por *CFD*, dois pontos de monitoramento para medir as velocidades e pressão no escoamento livre foram implementados na entrada e a 30 metros da entrada do domínio, a uma altura de 30 metros (altura do edifício).

Figura 4 – Domínio para o vento com direção 0°

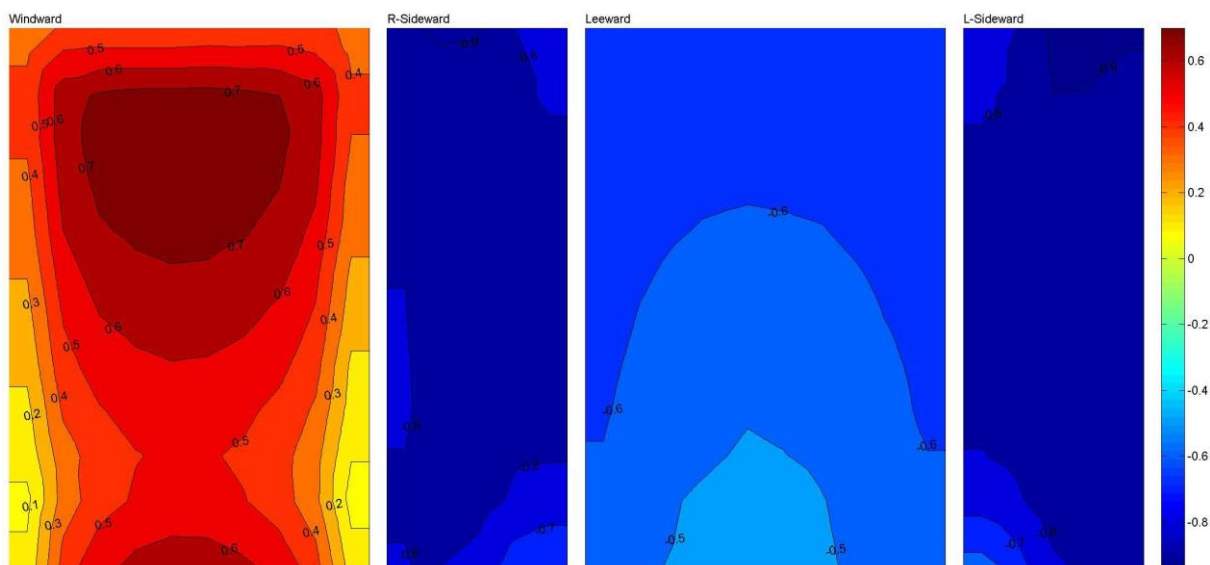


Fonte: Os autores

5 RESULTADOS

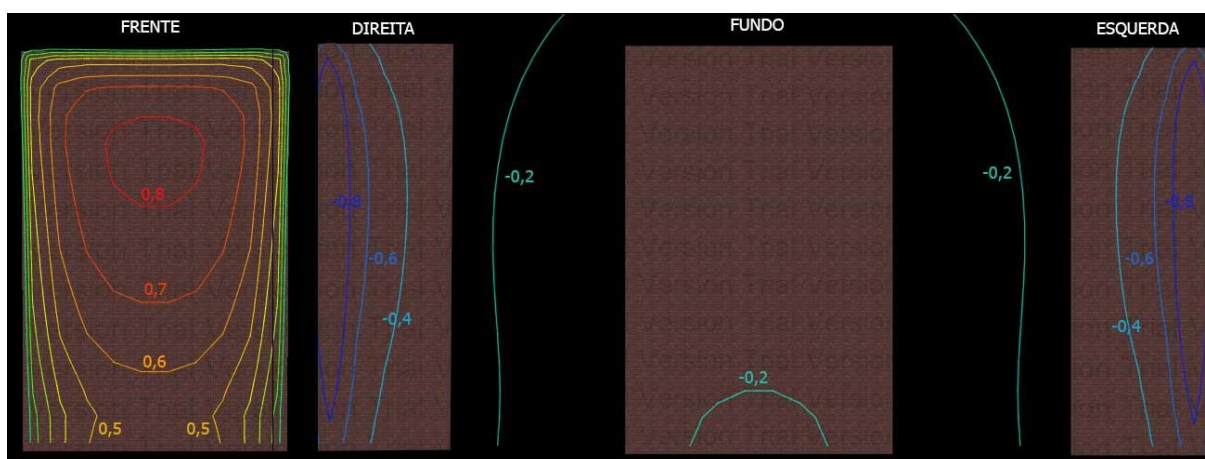
5.1 Análise qualitativa

Figura 5 – Resultados experimentais do C_{pe} com incidência do vento 0°



Fonte: TPU-COE (2008)

Figura 6 – Resultados do C_{pe} da simulação computacional por *CFD* com incidência do vento a 0°



Fonte: Os autores

5.2 Análise quantitativa

Tabela 1 – Resultados do C_{pe} por ponto de monitoramento

Coeficiente de Pressão Externa (C_{pe})								
Ponto	33	38	42	44	48	53	57	59
CFD	0.62	0.62	-1.08	-0.73	-0.65	-0.65	-0.73	-1.08
Ensaio	0.76	0.73	-0.90	-0.86	-0.68	-0.68	-0.87	-0.95
NBR6123	0.80	0.80	-1.00	-0.60	-0.60	-0.60	-0.60	-1.00

Fonte: Os autores

Tabela 2 – Erro relativo entre métodos

Comparativo	Erro relativo ξ [%]							
CFD x Ensaio	-17.73%	-13.91%	20.31%	-14.93%	-4.56%	-3.57%	-16.70%	13.01%
CFD x NBR	-21.93%	-21.93%	7.89%	21.33%	8.95%	8.95%	21.33%	7.89%
NBR x Ensaio	5.38%	10.26%	11.51%	-29.89%	-12.40%	-11.49%	-31.34%	4.75%

Fonte: Os autores

Tabela 3 – Resultados comparativos (média simples do erro relativo)

Comparativo	MÉDIA $ \xi $
CFD x Ensaio	13.09%
CFD x NBR	15.02%
NBR x Ensaio	14.63%

Fonte: Os autores



6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados podemos tirar as seguintes conclusões em relação à metodologia apresentada neste trabalho:

- A curvas de isovalores obtidas através da Dinâmica dos Fluidos Computacional apresentaram mesmas características quanto ao formato e desenvolvimento das concentrações de sobrepensões e sucções nos ângulos de incidência de vento analisados em relação aos dados experimentais;
- Os valores máximos dos coeficientes de pressão externas obtidos através da Dinâmica dos Fluidos Computacional apresentaram resultados satisfatórios, com valores máximos em entre +0,7 e +0,8 no ângulo de incidência do vento, conforme os valores máximos dos dados experimentais. Vale a pena ressaltar que a NBR 6123:1988 (ABNT, 2013) apresenta o valor constante de +0:8 em toda face frontal de acordo com as características da edificação estudada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:1988**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2013a.

_____. **NBR 12721:2006** Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013b.

ASYIKIN, M. T. *CFD simulation of vortex induced vibration of a cylindrical structure*. Dissertação (Mestrado) — Institutt for bygg, anlegg og transport, 2012.

BONAFÉ, G. Ensaio em túnel de vento gera dados não contemplados pela norma da ABNT. **AECweb**, Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/ensaio-em-tunel-de-vento-gera-dados-nao-contemplados-pela-norma-da-abnt_13604_0_1>. Acesso em: 18 fev. 2018.

EGER, R. S. et al. Modelação de escoamentos turbulentos sob a ação de rotação alternada. 2010.

ÇENÇEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos–Fundamentos e Aplicações**. São Paulo, McGraw-Hill, 2007.

FERREIRA, V. et al. Assessment of a high-order finite difference upwind scheme for the simulation of convection–diffusion problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Wiley Online Library, v. 60, n. 1, p. 1–26, 2009.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. [S.l.]: Edusp, 2000.



JONES, W.; LAUNDER, B. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International journal of heat and mass transfer*, Elsevier, v. 15, n. 2, p. 301–314, 1972.

KUROKAWA, F. A. *Um esquema upwind para leis de conservação e sua aplicação na simulação de escoamentos incompressíveis 2D e 3D laminares e turbulentos com superfícies livres*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. **The numerical computation of turbulent flows:** Computer methods in applied mechanics and engineering, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974.

LENZI, Cristiano Luis. **Sociologia ambiental: risco e sustentabilidade na modernidade**. Edusc, 2006.

LOTURCO, B. Engenharia do Vento. **Téchne**, Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/156/engenharia-do-vento-alem-das-reacoes-da-estrutura-dos-286688-1.aspx>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional:** fundamentos e coordenadas generalizadas. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1994.

MATOS, G.; WAGNER, L. Consumption of materials in the United States, 1900–1995. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 23, n. 1, p. 107–122, 1998.

MATTHEWS, Emily et al. The weight of nations-material outflows from industrial economies. In: **World Resources Institute**. 2000.

NIELSEN, P. V. **Computational fluid dynamics and room air movement**. Indoor air, Wiley Online Library, v. 14, n. s7, p. 134–143, 2004.

PATANKAR, S. **Numerical heat transfer and fluid flow**. [S.l.]: CRC press, 1980.

PUSTELNIK, M.; TRIBESS, A. **Avaliação numérica de ambientes com insuflamento de ar frio pelo piso**. [S.l.]: EPUSP, 2006.

SINDUSCON-SP. Boletim Econômico - Janeiro de 2017. **Sinduscon-SP**, Disponível em: <<http://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2017/02/01-Janeiro-2017.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2017.

SINDUSCON-RS. Evolução do CUB Versão 2006. **Sinduscon-RS**, Disponível em: <<http://www.sinduscon-rs.com.br/wp-content/uploads/2017/06/VALORES-DOS-CUBS.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

TPU-COE. Wind Effects on Buildings and Urban Environment Program: Aerodynamic database of high-rise buildings. 2008. Disponível em: <<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/>>. Acesso em: 18 abr. 2017.



WILCOX, D. C. et al. **Turbulence modeling for CFD**. [S.l.]: DCW industries La Canada, CA, 1998.

YAKHOT, V. et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, **AIP**, v. 4, n. 7, p. 1510–1520, 1992