

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Rodrigo Malikovsky Marquardt

**INFLUÊNCIA DO EFEITO DE VIZINHANÇA NAS SOLICITAÇÕES DEVIDO À
AÇÃO DO VENTO: ESTUDO COMPARATIVO SEGUNDO NORMATIVA TÉCNICA
E SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Santa Cruz do Sul

2019

Rodrigo Malikovsky Marquardt

**INFLUÊNCIA DO EFEITO DE VIZINHANÇA NAS SOLICITAÇÕES DEVIDO À
AÇÃO DO VENTO: ESTUDO COMPARATIVO SEGUNDO NORMATIVA TÉCNICA
E SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Trabalho de conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Civil da Universidade
de Santa Cruz do Sul para a obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul

2019

À minha família pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo incentivo, e aos professores e colegas pelos ensinamentos e pela amizade, em especial, ao Prof. Me. Henrique Luiz Rupp pela sabedoria transmitida e orientação na realização deste trabalho.

Agradeço também a todos os amigos da equipe Kamikase Aerodesign pela companhia e parceria nos momentos em que passamos juntos.

"A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso."

(John Ruskin)

RESUMO

Este trabalho consiste no estudo da influência do efeito de vizinhança nas solicitações oriundas da ação do vento em edificações através do estudo comparativo entre normativa técnica e simulações fluidodinâmicas computacionais. As diretrizes de análise desenvolvidas neste trabalho consistem na proposição de modelos de vizinhança e validação do modelo de simulação computacional através do comparativo com dados obtidos em túnel de vento para uma edificação padrão (*CAARC Standard Tall Building*). A solução desenvolvida aborda a comparação entre as solicitações estimadas de acordo com a norma brasileira (NBR 6123:1988) e as obtidas através de simulação numérica computacional em razão da incidência do vento sobre duas configurações: uma com edificação isolada e outra com a presença das vizinhanças propostas. A análise comparativa dos resultados apresentou uma redução média de 30% das solicitações do modelo numérico em relação as estimadas através da norma brasileira. Além disso, quando considerado a influência do posicionamento das edificações vizinhas, as simulações fluidodinâmicas indicaram uma tendência de redução das solicitações com o afastamento destas edificações.

Palavras-chave: Ação do vento. Efeito de vizinhança. Fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

This work consists in the study of the influence of the neighborhood effect on the efforts of the wind action in buildings through the comparative study between technical normative and computational fluid dynamics simulations. The analysis guidelines developed in this work consist of the proposition of neighborhood models and validation of the computational simulation model through the comparison with wind tunnel data for a standard building (CAARC Standard Tall Building). The solution developed addresses the comparison between the efforts estimated according to the Brazilian norm (NBR 6123:1988) and obtained through numerical simulation as a reason of the wind incidence on two configurations: one with the building isolated and another with the presence of the proposed neighborhoods. The comparative analysis of the results presented an average reduction of 30% of the efforts of the numerical model in relation to those estimated through the Brazilian norm. In addition, when considering the influence of the positioning of neighboring buildings, the fluid dynamics simulations indicated a tendency of reduction of the efforts with the spacing of these buildings.

Keywords: Wind action. Neighborhood effect. Computational Fluid Dynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Perfis de velocidade média sobre terrenos de distintas rugosidades.....	20
Figura 2 - Processo esquemático das zonas de regime de escoamento	21
Figura 3 - Linhas de corrente	22
Figura 4 - Padrão de esteiras formadas por corpos aerodinâmicos e rombudos	23
Figura 5 - Cargas de vento em edificações.....	24
Figura 6 - Comportamento de um edifício sujeito às cargas de vento	25
Figura 7 - Comportamento de um edifício sujeito à torção	26
Figura 8 - Efeito Venturi	27
Figura 9 - Deflexão do vento na direção vertical	28
Figura 10 - Turbulência de esteira	29
Figura 11 - Regimes de escoamento de turbulência de esteira.....	29
Figura 12 - Parâmetros de força global e arrasto	31
Figura 13 - Coeficientes de arrasto (edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência)....	32
Figura 14 - Coeficientes de arrasto (edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência)	33
Figura 15 - Isopletras de velocidade básica do vento.....	35
Figura 16 - Fator S_1 para taludes e morros.....	36
Figura 17 - Parâmetros de projeto (dimensões e afastamento).....	40
Figura 18 - Geometrias de elementos de malha	42
Figura 19 - Malha estruturada e não-estruturada	43
Figura 20 – Gráfico da distribuição típica de velocidade em escoamentos turbulentos.....	43
Figura 21 - Modelos de condições de contorno	44
Figura 22 - Etapas da metodologia.....	48
Figura 23 - CAARC <i>Standard Tall Building</i>	49
Figura 24 - Área de influência dos efeitos de vizinhança para o CAARC <i>Standard Tall Building</i>	50
Figura 25 – Posicionamento global do modelo de vizinhança	51
Figura 26 - Modelo de vizinhança.....	52
Figura 27 - Posicionamento local do modelo de vizinhança	53
Figura 28 - Configurações e modelo analítico das solicitações	54
Figura 29 - Diretrizes do tipo 1 (domínio computacional)	57
Figura 30 - Dimensões do domínio computacional	58
Figura 31 - Refinamento de malha local (Inflation).....	60
Figura 32 - Refinamento de malha local (<i>BodySizing</i>).....	61
Figura 33 - Parâmetro de qualidade de malha (<i>Skewness</i>)	62
Figura 34 - Recomendações da ANSYS para valores de <i>Skewness</i>	63
Figura 35 - Parâmetro de qualidade de malha (razão de aspecto)	63
Figura 36 - Parâmetro de qualidade de malha (qualidade ortogonal)	64

Figura 37 - Recomendações da ANSYS para valores de qualidade ortogonal	64
Figura 38 - Resumo dos resultados do controle de qualidade de malha (<i>Skewness</i>)	64
Figura 39 - Resumo dos resultados do controle de qualidade de malha (razão de aspecto).....	65
Figura 40 - Resumo dos resultados do controle de qualidade de malha (qualidade ortogonal).....	65
Figura 41 - Configurações das condições de contorno dos limites do modelo físico.....	66
Figura 42 - Flutuações no perfil de escoamento turbulento	68
Figura 43 - Parâmetros de turbulência ($p = 0,23$).....	69
Figura 44 - Gráfico de monitoramento de convergência.....	70
Figura 45 - Coeficientes de pressão (Fachada 1 e 2).....	71
Figura 46 - Coeficientes de pressão (Fachada 3 e 4).....	72
Figura 47 - Perfil de erro absoluto	73
Figura 48 – Solicitações dos modelos 0,4h.....	74
Figura 49 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 0,4h-3b ($z = 150$ m).....	75
Figura 50 - Linhas de fluxo do modelo 0,4h-3b	75
Figura 51 - Solicitações dos modelos 0,8h	76
Figura 52 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 0,8h-3b ($z = 60$ m).....	77
Figura 53 - Solicitações dos modelos 1,2h	78
Figura 54 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 1,2h-1b ($z = 150$ m).....	79
Figura 55 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 1,2h-1b ($y = 45$ m).....	79
Figura 56 - Solicitações dos modelos 1,6h	80
Figura 57 - Solicitações dos modelos 2,0h	81
Figura 58 - Solicitações x posicionamento global.....	82
Figura 59 - Solicitações x posicionamento local.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de S_1 para taludes e morros	36
Tabela 2 - Categorias de rugosidade do terreno por altura média dos obstáculos.....	37
Tabela 3 - Parâmetros meteorológicos	38
Tabela 4 - Valores mínimos para o fator estatístico S_3	38
Tabela 5 - Denominações dos modelos de vizinhança	54
Tabela 6 - Parâmetros gerais de análise	55
Tabela 7 - Parâmetros da malha geral do domínio	60
Tabela 8 - Parâmetros de controle de <i>Inflation</i>	61
Tabela 9 - Configurações das condições de contorno.....	66
Tabela 10 - Configurações do modelo de turbulência	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius – unidade de medida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
atm	Atmosfera – unidade de medida
CAARC	Commonwealth Advisory Aeronautical Council
CFD	Computacional Fluid Dynamics (Fluidodinâmica computacional)
Inlet	Região de entrada do escoamento
NBR	Norma Brasileira
m	Metros – unidade de medida
Mesh	Malha computacional
ONU	Organização das Nações Unidas
Outlet	Região de saída do escoamento
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
s	Segundos – unidade de medida
Solver	Solução numérica computacional
Software	Programa
Wall	Parede limitante do escoamento
Skewness	Assimetria
Aspect Ratio	Razão de aspecto
Orthogonal Quality	Qualidade ortogonal
m/s	Metros por segundo – unidade de medida
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico – unidade de medida
Velocity	Velocidade
Outflow	Vazão
SST	Shear Stress Transport
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
LAC	Laboratório de Aerodinâmica das Construções
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

R_e	Número de Reynolds
ρ	Densidade do fluido
V	Velocidade média do fluido
D	Comprimento característico da geometria
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
F_a	Força global de arrasto
F_g	Componente de força global
C_a	Coefficiente de arrasto
q	Pressão dinâmica do vento
A_e	Área frontal efetiva
C_t	Coefficiente de força em direção genérica
A	Área de referência em direção genérica
h	Altura de uma edificação acima do terreno
l_1	Dimensão horizontal de uma edificação perpendicular à direção do vento
l_2	Dimensão horizontal de uma edificação na direção do vento
V_k	Velocidade característica do vento
V_0	Velocidade básica do vento
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator S_2
S_3	Fator estatístico
z	Altura medida com base na superfície do terreno no ponto considerado
d	Diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro
θ	Inclinação média do talude ou encosta do morro
F_r	Fator de rajada
p	Parâmetro meteorológico/Expoente da curva de potência
b	Parâmetro meteorológico
e_a	Excentricidade na direção de maior lado (a)
e_b	Excentricidade na direção de menor lado (b)
FV	Fator de vizinhança
s	Afastamento entre os planos das faces de edificações vizinhas
IB	Índice de bloqueio
$A_{edif.}$	Área de projeção transversal da edificação
$A_{dom.}$	Área de projeção transversal do domínio computacional
$V(z)$	Velocidade média na altura z
V_{ref}	Velocidade na altura de referência
z_{ref}	Altura de referência

$I_u(z)$	Intensidade da escala da componente longitudinal de turbulência
$I_i(z)$	Intensidade local de turbulência
$\sigma_i(z)$	Desvio padrão das flutuações da velocidade
$\sigma_u(z)$	Desvio padrão da velocidade flutuante na direção do escoamento do vento
$\sqrt{\beta_\sigma}$	Fator experimental
C_{as}	Coefficiente de arrasto superficial
C_p	Coefficiente de pressão
$C_{p_{CFD}}$	Coefficiente de pressão (CFD)
$C_{p_{túnel}}$	Coefficiente de pressão (túnel de vento)
F_x	Força no eixo x
M_y	Momento no eixo y
M_z	Momento no eixo z

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Área e limitação do tema	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos	19
1.3.1	Objetivo geral.....	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Vento natural.....	20
2.1.1	Camada limite atmosférica	20
2.1.2	Turbulência	22
2.1.3	Esteira.....	22
2.2	Ação do vento em edificações	24
2.2.1	Solicitações.....	25
2.2.2	Efeitos de vizinhança	26
2.2.2.1	Efeito Venturi	27
2.2.2.2	Deflexão do vento na direção vertical	28
2.2.2.3	Turbulência de esteira.....	28
2.3	Norma Brasileira – NBR 6123:1988	30
2.3.1	Coefficiente de arrasto (C_a).....	31
2.3.2	Pressão dinâmica do vento (q).....	33
2.3.3	Velocidade característica do vento (V_k).....	34
2.3.3.1	Velocidade básica do vento (V_0).....	34
2.3.3.2	Fator topográfico (S_1).....	35
2.3.3.3	Fator S_2	36
2.3.3.4	Fator estatístico (S_3).....	38
2.3.4	Excentricidade das forças de arrasto	39
2.3.5	Efeitos de vizinhança	39
2.4	Fluidodinâmica computacional	40
2.4.1	Pré-processamento	41

2.4.1.1	Malha (mesh).....	42
2.4.1.2	Modelo de turbulência.....	43
2.4.1.3	Condições de contorno.....	44
2.4.2	Solução numérica (<i>Solver</i>)	44
2.4.3	Pós-processamento	45
2.4.4	Consistência, Estabilidade e Convergência.....	45
2.4.5	Método dos volumes finitos	45
3	METODOLOGIA	47
3.1	Procedimento de pesquisa	47
3.2	Etapas da metodologia	48
4	DESENVOLVIMENTO.....	49
4.1	CAARC <i>Standard Tall Building</i>	49
4.2	Modelos de vizinhança.....	50
4.2.1	Parâmetros de posicionamento global.....	51
4.2.2	Parâmetros de posicionamento local	51
4.3	Solicitações perante a ação do vento.....	53
4.4	Denominações e parâmetros gerais de análise.....	54
4.5	Simulação computacional fluidodinâmica	55
4.5.1	Domínio computacional	56
4.5.2	Parâmetros de malha	59
4.5.2.1	Controle de qualidade de malha	62
4.5.3	Condições de contorno.....	65
4.5.3.1	Modelo de turbulência.....	67
4.5.4	Solução numérica e processamento	70
5	RESULTADOS.....	71
5.1	Validação do método numérico	71
5.2	Resultados dos modelos 0,4h	73
5.2	Resultados dos modelos 0,8h	76
5.3	Resultados do modelo 1,2h	77
5.4	Resultados dos modelos 1,6h	79
5.5	Resultados dos modelos 2,0h	81

5.6	Correlação de variáveis	82
5.6.1	Posicionamento global	82
5.6.2	Posicionamento local.....	83
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE A – RESULTADOS DO CONTROLE DE MALHA	91
	APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO A NBR 6123:1988 E SIMULAÇÕES CFD	93
	APÊNDICE C – CONTORNO DE VELOCIDADE NA DIREÇÃO X DOS MODELOS DE VIZINHANÇA ESTUDADOS.....	94

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, segundo relatório produzido pela Organização das Nações Unidas – ONU (2018), 54% da população mundial vive em áreas urbanas com uma projeção de crescimento de 68% até 2050. Esta expansão rápida e contínua da população em cidades com taxas de ocupação cada vez mais elevadas, assim como os avanços tecnológicos dos materiais disponíveis no setor da construção civil, resultam em um processo generalizado de verticalização das edificações presentes nestas cidades.

A verticalização das edificações com a finalidade de permitir uma alta taxa de ocupação resulta em edificações altas, e porventura esbeltas, representando assim uma variável determinante no projeto destas edificações, principalmente ao se tratar de sua estabilidade estrutural perante as solicitações horizontais provenientes da ação do vento.

Segundo Gonçalves et al. (2004), a ação do vento em edificações pode ser definida como um fenômeno de natureza aleatória que através da movimentação de massas de ar desenvolve forças dinâmicas sobre um sólido. Um dos parâmetros relevantes no que tange a ação exercida pelo vento em uma edificação é a presença dos elementos que compõem o seu entorno, sendo estes elementos denominados pela norma técnica brasileira que trata das forças devido ao vento em edificações, ABNT NBR 6123:1988, de vizinhança.

O efeito de vizinhança é um fator fundamental na análise da ação do vento, pois além de grande parte das edificações não se apresentar isolada, vários estudos realizados nesta área, como Carpeggiani (2004); Fontoura (2014); Vieira (2016), dentre outros, têm constatado que a presença de vizinhança referente à sua disposição e geometria pode tanto proteger uma edificação da ação vento quanto majorar seus efeitos. Devido à natureza aleatória e o grande número de variáveis que envolvem a ação do vento sobre edificações, muitos dos estudos e pesquisas nesta área baseiam suas análises no registro de dados obtidos em ensaios de túneis de vento e métodos computacionais com simulação das características do vento natural.

1.1 Área e limitação do tema

O estudo do presente trabalho foi desenvolvido na área de engenharia do vento com enfoque na investigação da ação do vento em um edifício padrão perante aos efeitos de vizinhança limitando-se a pesquisa e comparação das solicitações atuantes determinadas através da metodologia de cálculo proposta pelas diretrizes da norma ABNT NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações) e de simulações numéricas baseadas na fluidodinâmica computacional.

1.2 Justificativa

A construção de edificações de grande altura é uma prática comum em grandes centros urbanos dispostos em aglomerados densos. Este fenômeno representa uma alteração no comportamento do escoamento, e conseqüentemente, na pressão exercida pelo vento em comparação a uma situação onde as edificações encontram-se isoladas. Alguns incidentes podem ocorrer se este efeito não for corretamente considerado na análise da ação do vento atuante nestas edificações. Porém a investigação da ação do vento, principalmente referente a interferência originada pela presença de edificações vizinhas, é complexa devido ao grande número de variáveis necessárias para representar este efeito: geometrias e disposições das edificações, localização das edificações vizinhas, rugosidade do terreno, direção do vento e entre outros. Por este motivo pesquisas vêm sendo realizadas sobre este assunto a fim de abranger e compreender grande parte das possíveis configurações (HUI et al, 2013).

Segundo Khanduri et al. (1998), existem três motivos que justificam o estudo da influência dos efeitos de vizinhança devido à presença de edificações no contorno, sendo estas:

- O escoamento do vento é um fenômeno complexo e de difícil equacionamento;
- Poucos dados experimentais disponíveis;
- Intuição de que edifícios com vizinhança apresentam cargas oriundas da ação do vento inferiores a edifícios isolados devido ao efeito de proteção.

O presente trabalho visa contribuir para o estudo do efeito de vizinhança através de análises numéricas de fluidodinâmica computacional aplicadas aos modelos de vizinhança definidos.

1.3 Objetivos

Nesta seção será apresentado o objetivo geral, e em sequência os objetivos específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a investigação e análise da influência exercida pelo efeito de vizinhança nas solicitações oriundas da ação do vento sobre um edifício padrão (*CAARC Standard Tall Building*¹) para as composições de vizinhança propostas através do estudo comparativo mediante metodologia proposta pela norma ABNT NBR 6123:1988 e simulações computacionais fluidodinâmicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar as composições e relevância dos modelos de vizinhança estudados;
- Apresentar de maneira geral os conceitos e procedimentos de cálculo das solicitações estáticas devido à ação do vento perante as diretrizes da norma brasileira;
- Validar as condições de contorno e configurações do modelo de simulação fluidodinâmica computacional utilizado;
- Comparar os resultados obtidos para as solicitações conforme a norma brasileira e simulações numéricas computacionais de modo a verificar a influência do efeito de vizinhança para os modelos propostos;
- Correlacionar os parâmetros adotados para o posicionamento da vizinhança com as solicitações obtidas através do método numérico computacional.

¹ *CAARC Standard Tall Building* trata-se de um edifício padronizado com a finalidade de calibração e comparação de técnicas experimentais em túnel de vento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica fundamentada em livros, monografias, dissertações, artigos científicos, entre outras referências relacionadas ao tema deste trabalho.

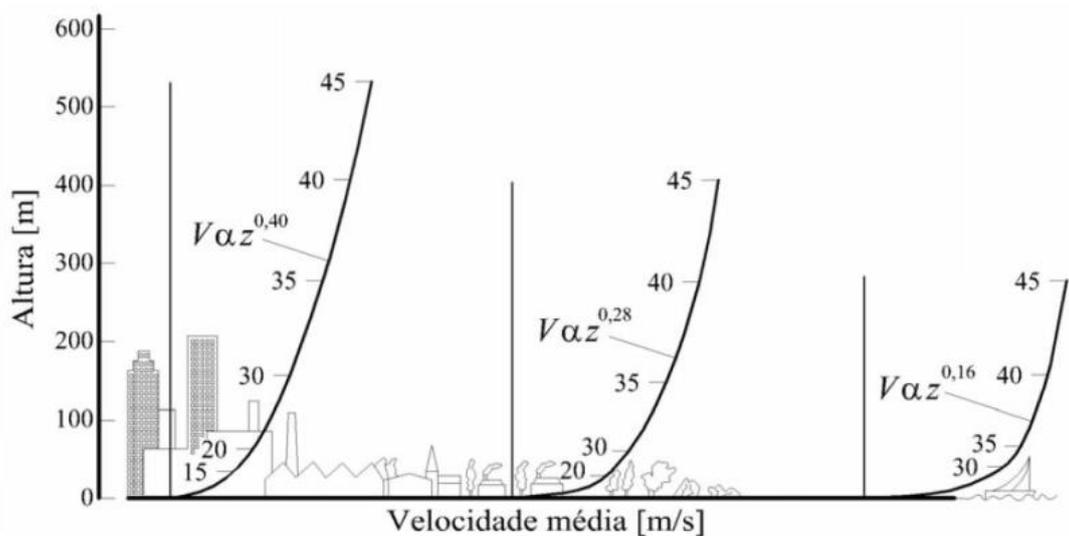
2.1 Vento natural

Segundo Blessmann (1995), o vento tem como origem imediata na diferença de pressão gerada na atmosfera proveniente fundamentalmente da variação de temperatura do ar. O desequilíbrio destas pressões da origem ao deslocamento do ar atmosférico de zonas de maior pressão para as áreas de menor pressão.

2.1.1 Camada limite atmosférica

A camada limite atmosférica é conceituada como sendo a região onde as características do vento natural sofrem interferência da viscosidade de seus obstáculos (rugosidade superficial) e da variação de temperatura no perfil vertical que alteram o padrão do escoamento do fluido (BLESSMANN, 1995). Em função deste parâmetro, há a variação da velocidade do vento associada a altitude até a velocidade gradiente onde o estado de pressão permanece relativamente constante com a variação de altitude, conforme representado na Figura 1.

Figura 1 - Perfis de velocidade média sobre terrenos de distintas rugosidades

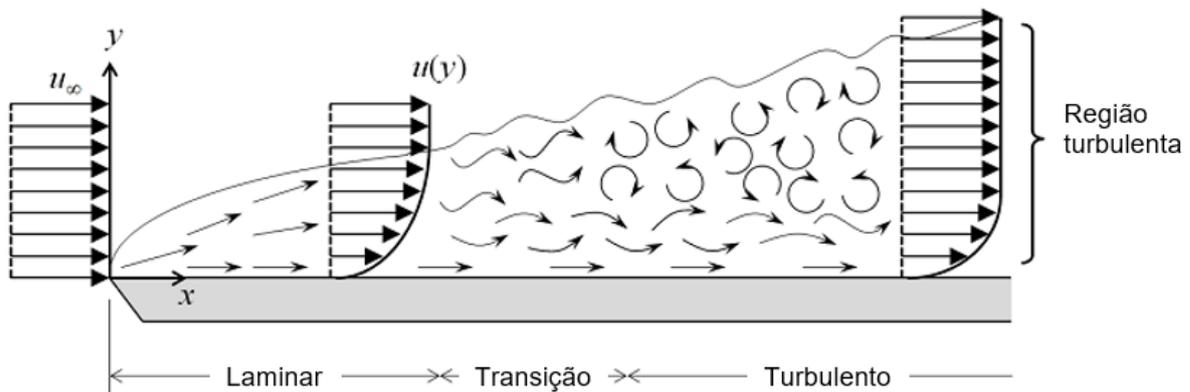


Fonte: CARPEGIANI (2004).

Segundo sua formação e regime de escoamento, a camada limite é composta por três zonas (Figura 2) que apresentam características distintas, conforme Blessmann (2011):

- Zona laminar: apresenta linhas de corrente de comportamento regular, onde ocorre a conformação do contorno da camada superficial;
- Zona de transição: apresenta um perfil de velocidades variáveis a jusante do escoamento onde há o desenvolvimento da camada limite em decorrência do atrito;
- Zona turbulenta: apresenta linhas de corrente de comportamento desordenado com descolamento do fluido da camada superficial, associada a geração de vórtices.

Figura 2 - Processo esquemático das zonas de regime de escoamento



Fonte: adaptado de FREI, Walter (2017). Disponível em: <https://br.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>. Acesso em: 15 nov. 2018.

O regime de escoamento de um fluido é definido essencialmente a partir da razão entre as forças inerciais e viscosas sendo este parâmetro denominado de número de Reynolds de acordo com a Equação 1.

$$R_e = \frac{\text{forças inerciais}}{\text{forças viscosas}} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (1)$$

Onde,

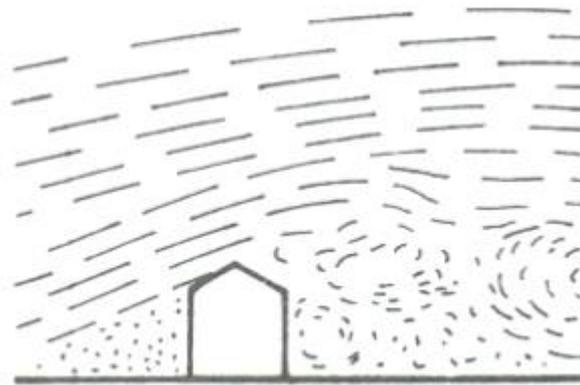
- R_e número de Reynolds;
- ρ densidade do fluido;
- V velocidade média do fluido;
- D comprimento característico da geometria;

μ viscosidade dinâmica do fluido.

2.1.2 Turbulência

De acordo com Gonçalves et al. (2004), há dois aspectos preponderantes quanto à ação do vento em edificações: aerodinâmicos e meteorológicos. Os aspectos aerodinâmicos têm grande influência nas solicitações atuantes nas edificações à medida que as partículas das massas de ar em movimento aderem as superfícies dos obstáculos em contato originando as designadas linhas de corrente (Figura 3).

Figura 3 - Linhas de corrente



Fonte: BLESSMANN (2011).

Associado ao efeito de descolamento da camada limite, o escoamento turbulento do ar a sotavento de um corpo caracteriza-se pela existência de vórtices e redemoinhos na direção da corrente formando uma zona denominada de esteira (BLESSMANN, 1995).

2.1.3 Esteira

O padrão do fluxo do ar em movimento no entorno de uma edificação está diretamente ligado ao efeito da esteira oriundo dos obstáculos vizinhos, sejam outras edificações ou elementos do terreno, e também da geometria da própria edificação, uma vez que o mesmo é alterado devido a separação da camada de ar na superfície do corpo ocasionando o desequilíbrio de pressões, e por consequência, o turbilhonamento do ar que se propaga através das correntes de fluxo dando origem aos vórtices e redemoinhos característicos da esteira (ALBERTI, 2015).

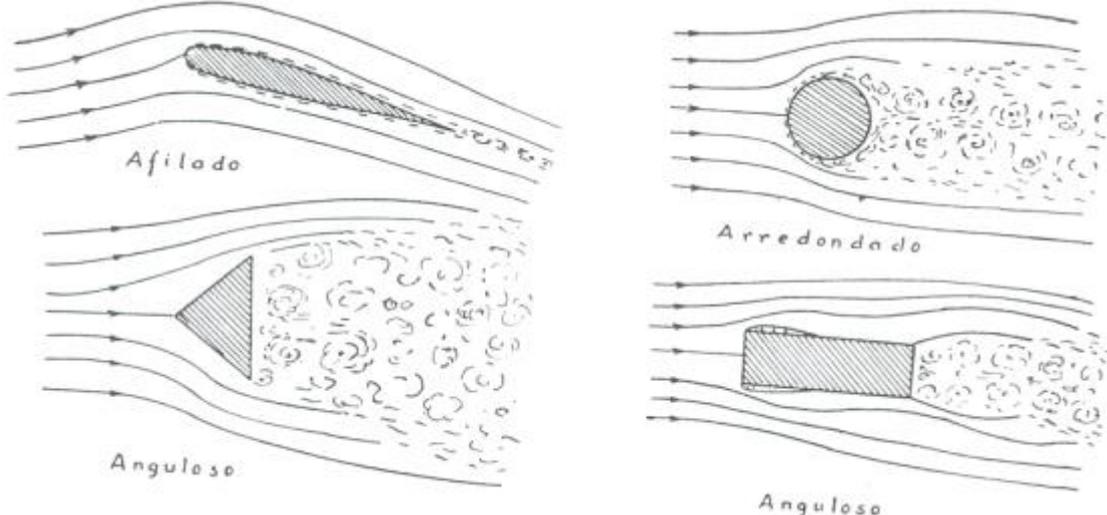
Segundo Alberti (2015, p. 47), o conceito de esteira pode ser dado como “ [...] uma assinatura da forma aerodinâmica dos corpos ao padrão de escoamento

imposto.” Pode-se assim considerar que a geometria do corpo apresenta grande influência sobre como o escoamento se comporta e quais são suas respostas quanto ao efeito de esteira.

Quanto a resistência de forma, ou seja, o comportamento de determinadas geometrias perante ao escoamento do ar, Blessmann (2011) classifica-as em três classes (Figura 4):

- **Corpos afilados ou aerodinâmicos:** o fluxo do escoamento ocorre de maneira suave ao longo do corpo conformando-o, não ocorrendo assim o descolamento da camada limite. A esteira formada por estes corpos apresenta-se muito estreita e de pequenas dimensões pois a resistência de forma deste tipo de corpo é muito pequena;
- **Corpos rombudos arredondados:** em corpos deste tipo, o comportamento do escoamento e da esteira dependem de alguns parâmetros, como as condições do fluxo, a rugosidade superficial do corpo e do terreno, a forma e orientação do escoamento, podendo apresentar variações dentro de limites relativamente amplos;
- **Corpos rombudos angulosos:** apresentando geometria característica da maioria das edificações, o descolamento do escoamento destes corpos ocorre principalmente sobre suas arestas. Geralmente apresentam esteiras maiores e mais turbulentas do que as demais classes dependendo muito pouco do número de Reynolds.

Figura 4 - Padrão de esteiras formadas por corpos aerodinâmicos e rombudos

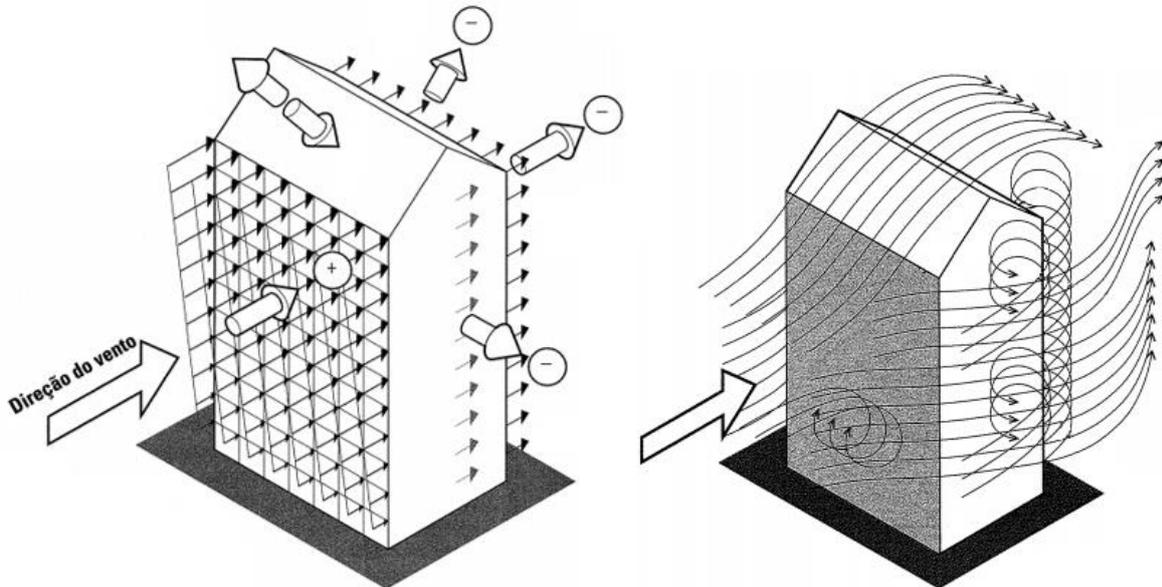


Fonte: BLESSMANN (2011).

2.2 Ação do vento em edificações

Segundo Ching, Onouye e Zuberbuhler (2010, p. 188), “as cargas de vento resultam das forças exercidas pela energia cinética de uma massa de ar em movimento [...]”. Impostas à estrutura como um todo e, principalmente, aos elementos de vedação das edificações, as cargas de vento são originadas através da transformação de energia cinética em solicitações laterais compostas pela combinação de pressão direta (sobrepessão), pressão negativa (sucção) e esforços de fricção, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Cargas de vento em edificações



Fonte: adaptado de CHING; ONOUYE; ZUBERBUHLER (2010).

A maior parte das cargas de vento atuante em uma edificação ocorre na forma de pressão direta, também denominada de sobrepessão, que é exercida perpendicularmente à direção do vento, ou seja, nas superfícies da edificação a barlavento. Este tipo de pressão é mais significativo em superfícies expostas de formas retangulares, sendo assim proporcional a área de contato (CHING; ONOUYE; ZUBERBUHLER, 2010).

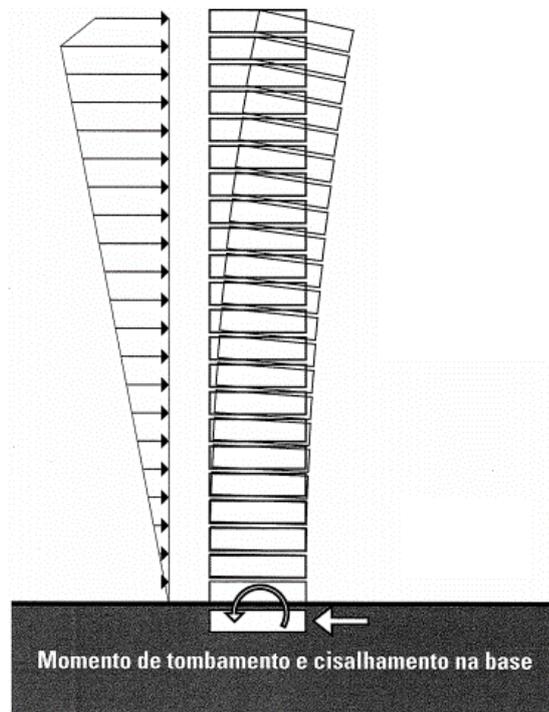
Segundo Ching, Onouye e Zuberbuhler (2010), além da sobrepessão oriunda da ação do vento, há uma parcela de pressão negativa (sucção) e outra de fricção ao quais as edificações estão submetidas. Composta pela pressão de sucção das superfícies laterais e a sotavento, a sucção tem origem principalmente no descolamento do escoamento em regiões onde a superfície é demasiada convexa ou

quando o fluxo do ar é muito rápido. Já os esforços de fricção longitudinais são oriundos do atrito das massas de ar com as superfícies da edificação paralelas ao fluxo do escoamento.

2.2.1 Solicitações

De modo geral, as cargas de vento que agem sobre um edifício são consideradas em níveis crescentes de pressão à medida em que a altura se afasta em relação ao solo, sendo estas consideradas perpendiculares ou normais às superfícies da edificação. Quando submetidos à estes carregamentos os edifícios, principalmente os de grande altura, se comportam de maneira similar a uma viga vertical em balanço engastada no solo, desenvolvendo solicitações de cisalhamento e momento de tombamento em relação a base da estrutura (CHING; ONOUYE; ZUBERBUHLER, 2010), conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Comportamento de um edifício sujeito às cargas de vento

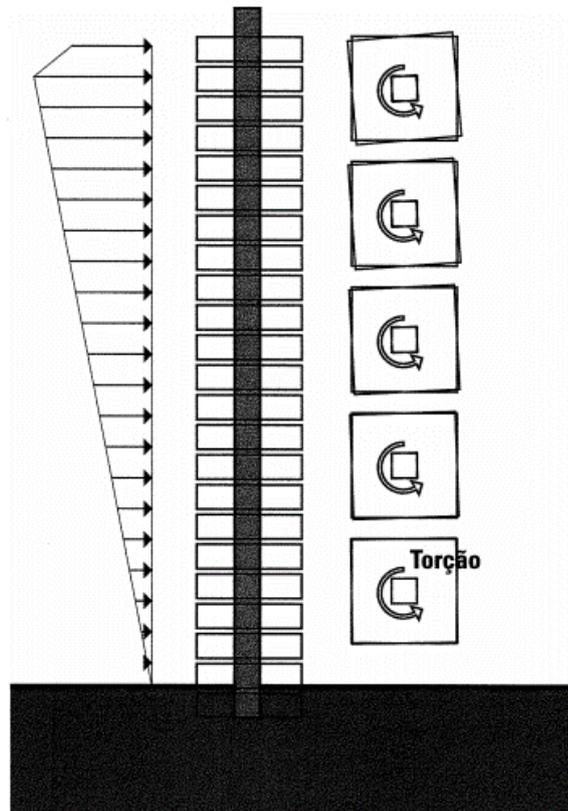


Fonte: adaptado de CHING; ONOUYE; ZUBERBUHLER (2010).

Derivada principalmente da distribuição assimétrica de pressão sobre superfícies opostas, outra solicitação ao qual as edificações estão submetidas é o momento de torção da seção transversal. Segundo Ching, Onouye e Zuberbuhler (2010), embora o momento de torção presente na maioria das edificações possa ser considerado

desprezível aos parâmetros de projeto, o mesmo pode apresentar-se crítico em edifícios altos, pois o momento de torção se acumula ao longo da altura da edificação ocasionando a rotação da seção transversal da edificação, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Comportamento de um edifício sujeito à torção



Fonte: adaptado de CHING; ONOUYE; ZUBERBUHLER (2010).

2.2.2 Efeitos de vizinhança

Dependente de fatores como geometria, localização e direção de incidência do escoamento do ar, cada edificação apresenta um campo aerodinâmico próprio. Segundo Blessmann (1989, p. 24), “um obstáculo natural ou artificial existente nas proximidades de uma edificação ou elemento estrutural pode afetar consideravelmente o campo aerodinâmico, e conseqüentemente, os esforços exercidos pelo vento”.

O campo aerodinâmico de uma edificação varia amplamente para distintas configurações de edificações no seu entorno, promovendo a modificação na direção do escoamento do vento, assim como variações consideráveis na sua velocidade média, e conseqüentemente originando efeitos ponderáveis de alteração dos

coeficientes aerodinâmicos, quanto às pressões, forças, flexões e efeitos de torção ao qual uma edificação está sujeita (VIEIRA, 2016).

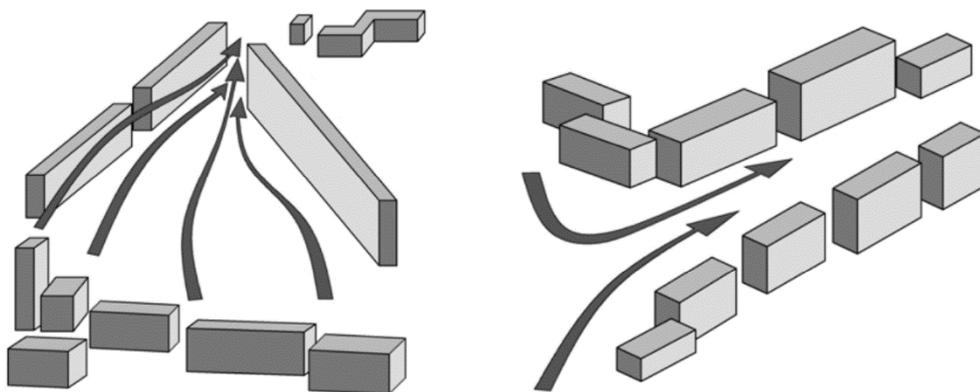
A natureza de caráter aleatório da interação do vento com corpos sólidos e a grande variabilidade de condições e configurações de entorno possíveis, tornam difícil a elaboração de parâmetros numéricos que considerem o efeito de vizinhança de forma genérica e abrangente. Apesar disso, a norma brasileira que trata da ação do vento em edificações (NBR 6123:1988), mais especificamente o seu ANEXO G, apresenta alguns parâmetros com a finalidade de representar o efeito de interferência de edificações vizinhas na ação do vento em uma edificação.

Segundo a NBR 6123:1988, existem três modos distintos em que as edificações vizinhas podem provocar o aumento das forças do vento: efeito Venturi, deflexão do vento na direção vertical e turbulência de esteira.

2.2.2.1 Efeito Venturi

O efeito Venturi (Figura 8) é caracterizado pela canalização de um fluxo de ar por um espaço relativamente estreito, como por exemplo, entre dois edifícios próximos, onde devido ao afunilamento do vento (compressão do fluido) ocorre o aumento da velocidade do escoamento tornando os coeficientes de pressão maiores nas superfícies em que ocorre o afunilamento (CARPEGGIANI, 2004).

Figura 8 - Efeito Venturi

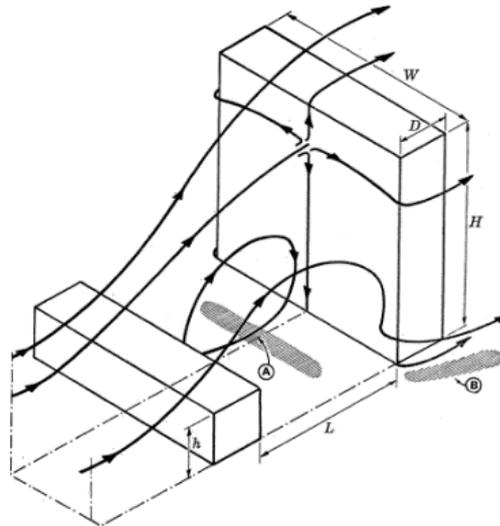


Fonte: adaptado de CARPEGGIANI (2004).

2.2.2.2 Deflexão do vento na direção vertical

Conforme a NBR 6123:1988, algumas edificações defletem para baixo parte do escoamento do ar incidente sobre sua superfície à barlavento, aumentando a velocidade do escoamento sobre as regiões próximas à base da edificação (Figura 9).

Figura 9 - Deflexão do vento na direção vertical



Fonte: adaptado de WISE (1971 apud ALBERTI, 2015).

2.2.2.3 Turbulência de esteira

Quanto ao efeito de turbulência de esteira segundo a NBR 6123 (1988, p. 58):

Uma edificação situada a sotavento de outra pode ser afetada sensivelmente pela turbulência gerada na esteira da edificação de barlavento, podendo causar efeitos dinâmicos (“efeitos de golpe”) consideráveis e alterações nas pressões.

Na região de turbulência de esteira (Figura 10) gerado à sotavento de um edifício ocorre a formação de vórtices de intensidade maiores daqueles formados pelo escoamento da camada limite atmosférica. Em consequência disso, ocorrem alterações consideráveis nas pressões experimentadas pelas edificações afetadas pela esteira (COOK, 1985 apud ALBERTI, 2015).

Figura 10 - Turbulência de esteira

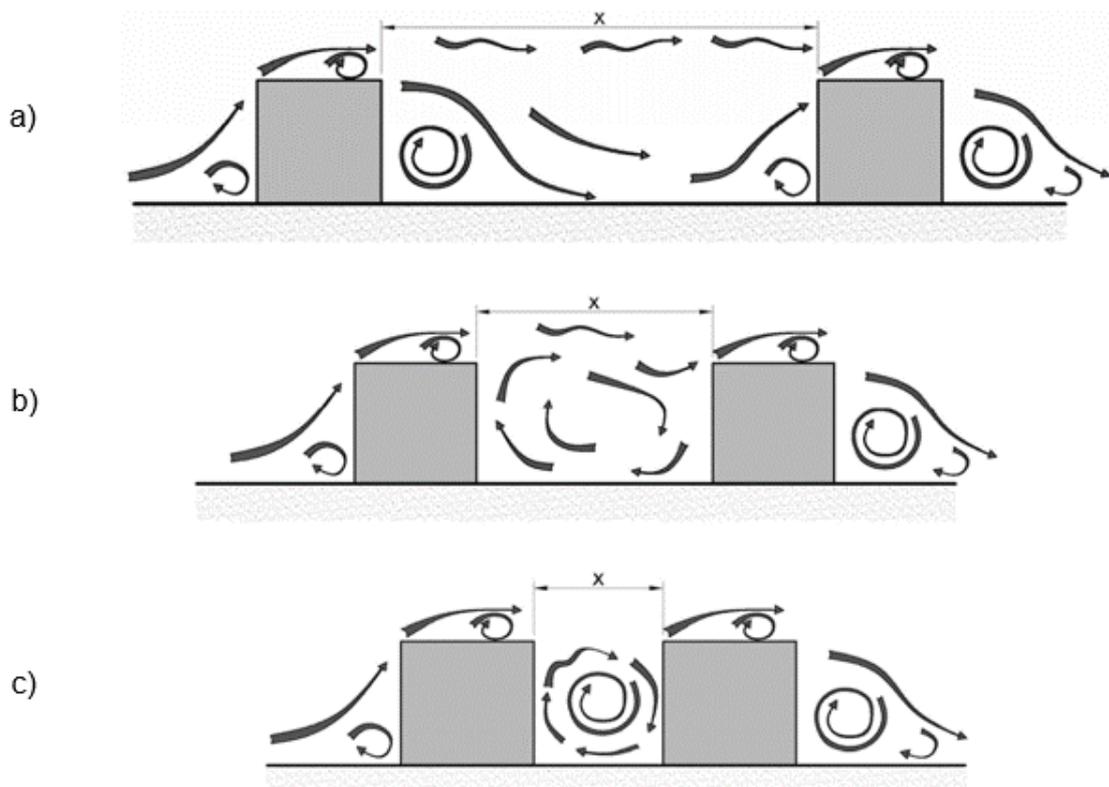


Fonte: COOK (1990 apud CARPEGIANI, 2004).

Segundo Cook (1990 apud CARPEGIANI, 2004), existem três padrões distintos de regimes de escoamento ao qual edificações estão sujeitas através da turbulência de esteira (Figura 11):

- a) Regime de escoamento de corpo isolado;
- b) Regime de escoamento de interferência de esteira;
- c) Regime de escoamento deslizante.

Figura 11 - Regimes de escoamento de turbulência de esteira



Fonte: adaptado de CARPEGIANI (2004).

No regime de escoamento de corpo isolado ocorre a reformulação do padrão de escoamento do vento devido a camada limite atmosférica antes de atuar em outros obstáculos a sotavento do elemento de interferência. Os elementos deste tipo de escoamento apresentam comportamento similar ao comportamento de elementos isolados (COOK, 1990 apud CARPEGGIANI, 2004).

Segundo Cook (1990 apud CARPEGGIANI, 2004), o regime de escoamento de interferência de esteira é caracterizado por um estado intermediário entre os outros dois tipos de regime, onde não ocorre a formação completa da esteira desenvolvendo um regime turbulento com a incidência de vórtices na edificação à sotavento.

Em relação ao regime de escoamento deslizante, ocorre a formação de um vórtice estável entre os corpos devido à proximidade, resultando em um regime de escoamento deslizante sobre suas superfícies. Além disso, há a ocorrência de um efeito de proteção às ações do vento entre as edificações (COOK, 1990 apud CARPEGGIANI, 2004).

2.3 Norma Brasileira – NBR 6123:1988

A norma brasileira, Forças devidas ao vento em edificações (NBR 6123:1988), apresenta em seu escopo o procedimento de cálculo e parâmetros normativos para a consideração das forças devido à ação estática e dinâmica do vento para fins de projeto de edificações.

Segundo a norma, a força estática global do vento sobre uma edificação é obtida pela soma vetorial das forças do vento atuantes. A componente da força global na direção do vento, ou seja, força de arrasto (F_a) é obtida pela expressão:

$$F_a = C_a q A_e \quad (2)$$

Onde,

C_a coeficiente de arrasto;

q pressão dinâmica do vento;

A_e área frontal efetiva: área de projeção ortogonal da superfície da edificação ou elemento sobre o plano perpendicular à direção do escoamento do vento.

De modo genérico, qualquer componente de força global (F_g) pode ser definida pela seguinte equação:

$$F_g = C_t q A \quad (3)$$

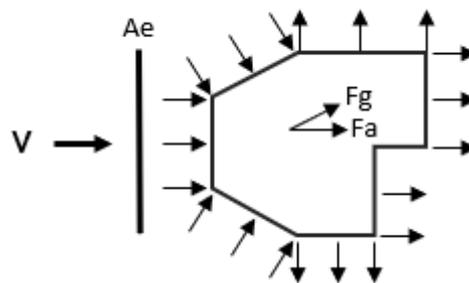
Em que,

C_t coeficiente de força em direção genérica (C_x , C_y , etc);

A área de referência em direção genérica.

Os parâmetros apresentados nessa seção estão ilustrados pela Figura 12.

Figura 12 - Parâmetros de força global e arrasto



Fonte: autor.

2.3.1 Coeficiente de arrasto (C_a)

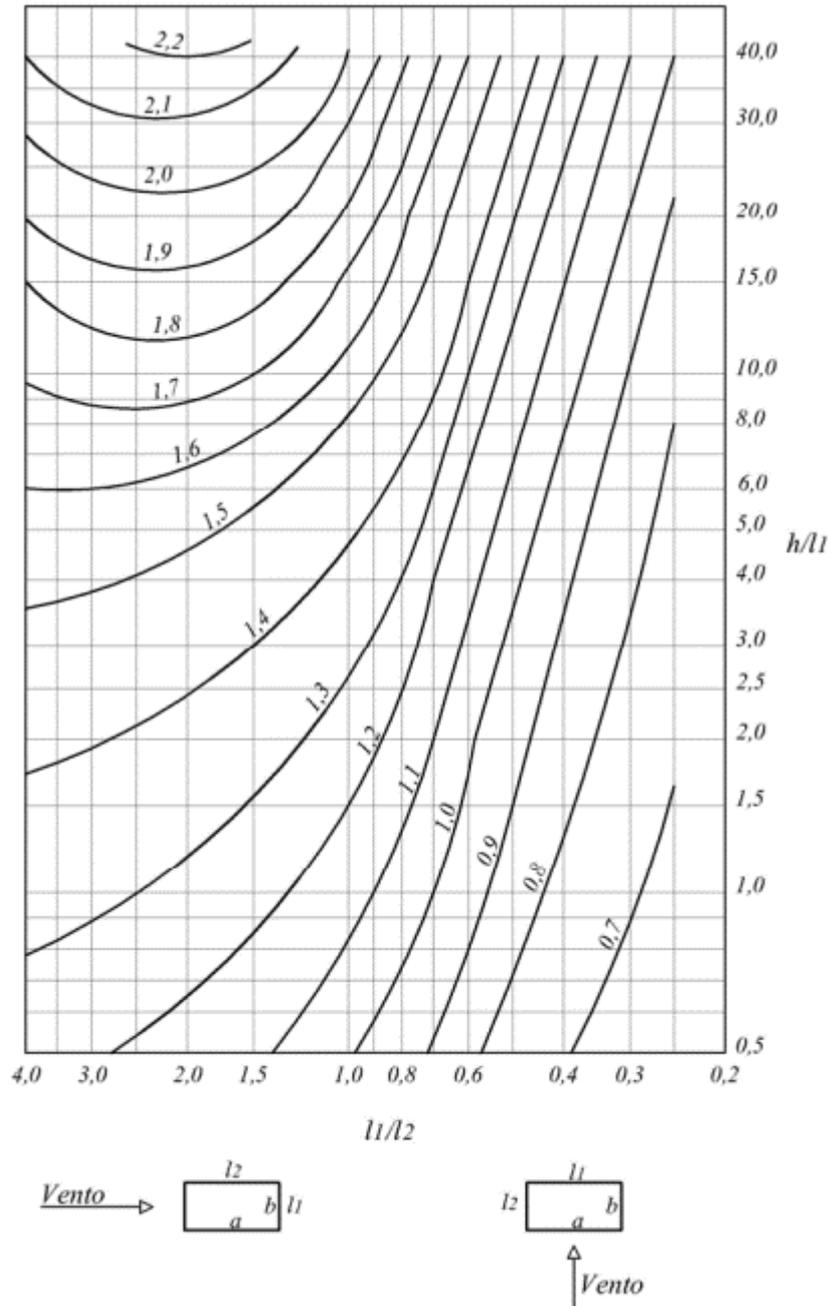
O coeficiente de arrasto é uma propriedade adimensional referente à resistência aerodinâmica de um corpo, neste caso uma edificação, em um meio fluido. Este coeficiente tem a contribuição de duas fontes: da fricção de superfície referente a rugosidade do material e arrasto de forma referente a geometria de obstrução.

O item 6.3 da NBR 6123:1988 apresenta coeficientes de arrasto aplicáveis a edificações de seção especificamente paralelepípedica, constante ou fracamente variável. Os coeficientes são dados em função de relações geométricas da edificação (h/l_1 e l_1/l_2).

Os valores dos coeficientes de arrasto são apresentados pela norma para duas situações de escoamento distintas: baixa turbulência (Figura 13) e alta turbulência (Figura 14).

Para a condição de baixa turbulência a norma brasileira considera a situação onde uma edificação está submetida a um fluxo de ar moderadamente suave, característico de zonas de campo aberto e plano.

Figura 13 - Coeficientes de arrasto (edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência)



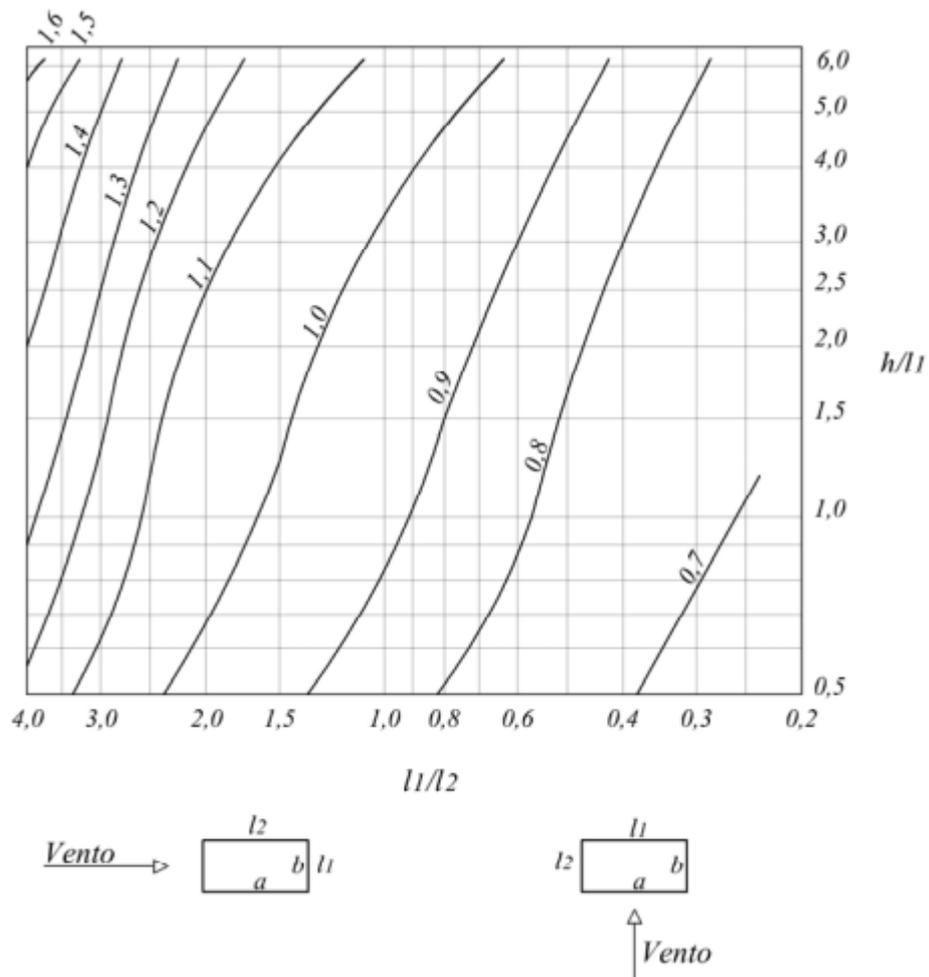
Fonte: NBR 6123:1988

Conforme a NBR 6123:1988, uma edificação pode ser considerada em zona de escoamento de alta turbulência, característico a centros de grandes cidades, quando atender ao seguinte requisito:

- A altura do edifício analisado não exceda duas vezes a altura média das edificações vizinhas, estendendo-se estas, na direção e no sentido do vento incidente, a distância mínima de:

- 500 metros, para uma edificação de até 40 metros de altura;
- 1000 metros, para uma edificação de até 50 metros de altura;
- 2000 metros, para uma edificação de até 70 metros de altura;
- 3000 metros, para uma edificação de até 80 metros de altura.

Figura 14 - Coeficientes de arrasto (edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência)



Fonte: NBR 6123:1988

De maneira geral, os coeficientes de arrasto para zonas de alta turbulência apresentam valores inferiores às zonas de baixa turbulência pois há uma redução da sucção na superfície à sotavento da edificação.

2.3.2 Pressão dinâmica do vento (q)

Também conhecida como pressão de obstrução, a pressão dinâmica é uma propriedade que representa a pressão exercida pela ação do vento sobre uma

superfície. Dada em função de sua velocidade característica (V_k), a mesma pode ser determinada através da Equação 4.

$$q = \frac{1}{2} \rho (V_k)^2 \quad (4)$$

De acordo com Blessmann (1990), a NBR 6123:1988 supõe para o cálculo da pressão dinâmica uma condição de pressão de 1 atm e temperatura de 15 °C, resultando na seguinte simplificação da equação:

$$q = 0,613 (V_k)^2 \quad (5)$$

2.3.3 Velocidade característica do vento (V_k)

A velocidade característica do vento é determinada com base na adequação da velocidade básica do vento, referente a localização geográfica da edificação, por fatores de correção que consideram características topográficas, as dimensões da edificação e parâmetros estatísticos (NBR 6123:1988).

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (6)$$

Onde,

V_0 velocidade básica do vento;

S_1 fator topográfico;

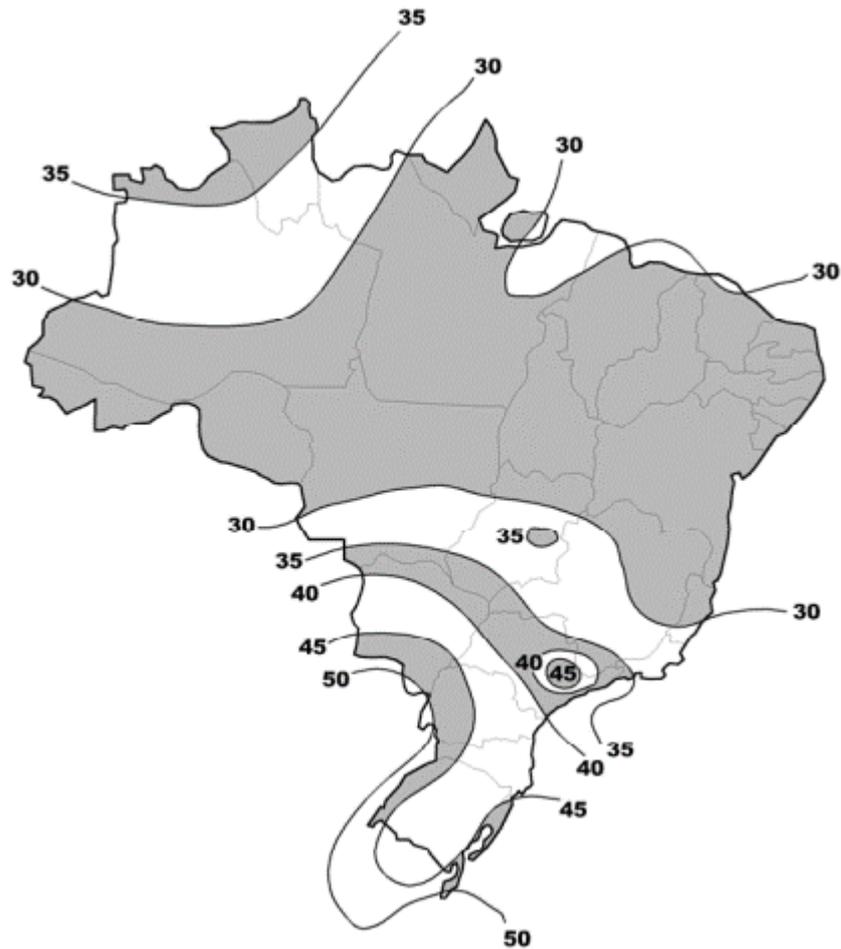
S_2 fator de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre terreno;

S_3 fator estatístico.

2.3.3.1 Velocidade básica do vento (V_0)

Segundo a NBR 6123 (1988, p. 5), a velocidade básica do vento corresponde a “velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano”. Esta velocidade é apresentada pela norma sob a forma de curvas denominadas de isopletras (Figura 15), as quais, segundo Blessmann (1990), foram obtidas com base em registros de rajadas máximas anuais de 49 estações situadas em aeroportos do país.

Figura 15 - Isopletas de velocidade básica do vento



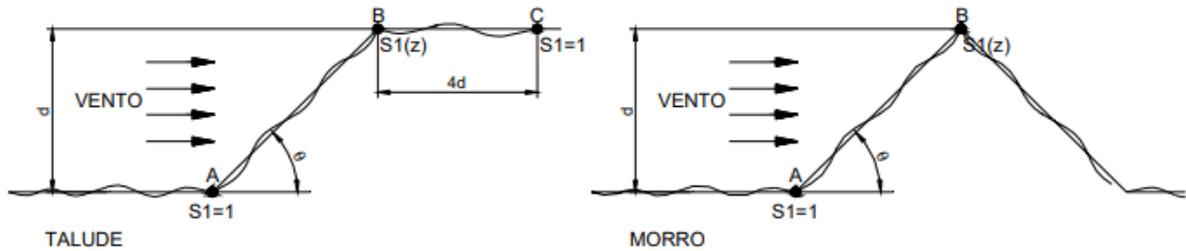
Fonte: NBR 6123:1988

2.3.3.2 Fator topográfico (S_1)

Segundo a NBR 6123:1988, o fator topográfico considera os efeitos das características topográficas locais de onde a edificação está inserida. A norma considera basicamente três situações:

- Terreno plano ou pouco ondulado: $S_1 = 1,0$;
- Vales profundos protegidos do vento de qualquer direção: $S_1 = 0,9$;
- Taludes e morros: S_1 depende do ângulo de inclinação do talude ou do morro, conforme exemplificado pela Figura 16.

Figura 16 - Fator S_1 para taludes e morros



Fonte: disponível em: http://usuarios.upf.br/~zacarias/acoes_vento.pdf. Acesso em: 18 nov. 2018.

Nos pontos A e C (taludes) e ponto A (morros): $S_1 = 1,0$. No ponto B, o fator S_1 é variável com a altura (z), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de S_1 para taludes e morros

Inclinação do talude/morro (θ)	Fator topográfico (S_1)
$\theta \leq 3^\circ$	$S_1(z) = 1,0$
$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$	$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \operatorname{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1,0$
$\theta \geq 45^\circ$	$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1,0$

Fonte: adaptado de NBR 6123:1988.

Onde,

- z altura medida com base na superfície do terreno no ponto considerado;
- d diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;
- θ inclinação média do talude ou encosta do morro.

2.3.3.3 Fator S_2

O fator S_2 é dado pela combinação dos efeitos da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação e da variação da velocidade do vento com a altura relativa ao terreno.

A NBR 6123 (1988, p. 8) estabelece, para a determinação do fator de rugosidade, cinco categorias quanto a rugosidade do terreno:

- a) Categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medidas na direção e sentido do vento incidentes;

- b) Categoria II: terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvore e edificações baixas;
- c) Categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas;
- d) Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada;
- e) Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e poucos espaçados.

De modo geral, as classificações perante a rugosidade do terreno podem ser resumidas através da altura média dos obstáculos, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Categorias de rugosidade do terreno por altura média dos obstáculos

Altura média dos obstáculos (m)	Categoria de rugosidade
0	I
1	II
3	III
10	IV
≥ 25	V

Fonte: adaptado de NBR 6123:1988.

Os efeitos decorrentes das dimensões da edificação para o fator S_2 são classificados pela NBR 6123 (1988, p. 9) em três classes:

- a) Classe A: todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estrutura sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m;
- b) Classe B: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m;
- c) Classe C: toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50m.

A partir da definição de categoria e classe, utiliza-se a Equação 7 para a determinação do fator S_2 em função da altura da edificação. Os valores do fator de rajada (F_r) e dos parâmetros meteorológicos (p e b) são obtidos no quadro 1 da norma (Tabela 3).

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (7)$$

Tabela 3 - Parâmetros meteorológicos

Categoria	z (metros)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,0695	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F _r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: adaptado de NBR 6123:1988.

2.3.3.4 Fator estatístico (S₃)

Baseado em conceitos estatísticos, o fator S₃ considera o grau de segurança exigido e a vida útil da estrutura. A NBR 6123:1988 adota 50 anos como período de recorrência médio. A Tabela 4 apresenta os valores mínimos estipulados pela norma para o fator estatístico.

Tabela 4 - Valores mínimos para o fator estatístico S₃

Grupo	Descrição	S ₃
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.).	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.).	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.).	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

Fonte: NBR 6123:1988.

2.3.4 Excentricidade das forças de arrasto

O item 6.6 da NBR 6123:1988 prevê, quando for o caso, a consideração dos efeitos de excentricidade das forças de arrasto, ou seja, a torção da seção transversal da edificação, devido a ação do vento agindo obliquamente ou por efeitos de vizinhança. Os esforços de torção são determinados através da ação das forças de arrasto agindo com uma excentricidade em relação ao eixo vertical geométrico. A norma recomenda:

- Edificações sem efeitos de vizinhança:

$$e_a = 0,075a \quad e \quad e_b = 0,075b \quad (8)$$

- Edificações com efeitos de vizinhança:

$$e_a = 0,15a \quad e \quad e_b = 0,15b \quad (9)$$

Sendo,

e_a excentricidade na direção de maior lado (a);

e_b excentricidade na direção de menor lado (b).

Para efeitos de excentricidade, a NBR 6123 (1988, p. 21) determina:

Os efeitos de vizinhança serão considerados somente até a altura do topo das edificações situadas nas proximidades, dentro de um círculo de diâmetro igual à altura da edificação em estudo, ou igual a seis vezes o lado menor da edificação, b, adotando-se o menor destes dois valores.

2.3.5 Efeitos de vizinhança

O anexo G da NBR 6123:1988, que diz respeito aos efeitos de vizinhança, determina que há certas situações em que é necessário considerar uma majoração dos coeficientes aerodinâmicos devido à possibilidade de alterações desfavoráveis das condições de vizinhança durante a vida útil da edificação em estudo. Indicado pelo fator FV (fator de efeito de vizinhança), o aumento nos coeficientes aerodinâmicos é determinado segundo a norma conforme os seguintes critérios:

$$FV = \frac{C \text{ na edificação com vizinhança}}{C \text{ na edificação isolada}} \quad (10)$$

Para valores representativos de FV adota-se:

$$s/d^* \leq 1,0 \quad FV = 1,3 \quad (11)$$

$$s/d^* \geq 3,0 \quad FV = 1,0 \quad (12)$$

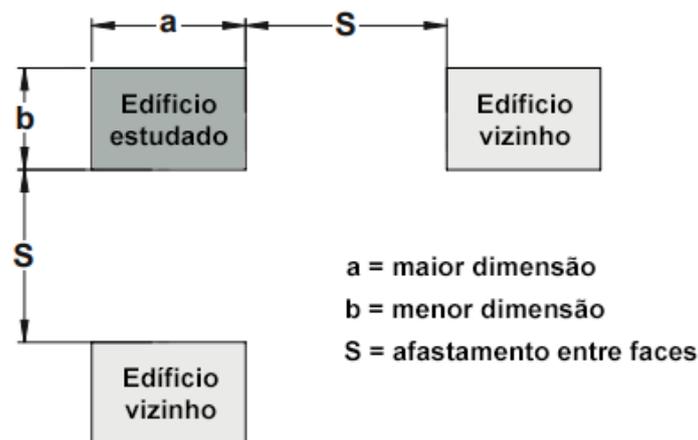
Onde,

s afastamento entre os planos das faces confrontantes de duas edificações altas vizinhas, sendo a x b as dimensões em planta das edificações (Figura 17);

d* a menor das duas dimensões:

- Lado menor b;
- Semidiagonal $\frac{1}{2}\sqrt{a^2 + b^2}$.

Figura 17 - Parâmetros de projeto (dimensões e afastamento)



Fonte: autor.

2.4 Fluidodinâmica computacional

A dinâmica de fluídos computacional é o termo dado para o conjunto de técnicas de análise de sistemas abrangendo escoamento de fluídos, transferência de calor e outros fenômenos associados, por meio de simulação computacional. Estas técnicas abrangem uma ampla gama de áreas de aplicação industriais e não industriais por apresentar vantagens únicas, como a redução substancial de prazos e custos de novos projetos, a capacidade de estudar sistemas onde ensaios experimentais são de difícil simulação e execução, e nível de detalhe dos resultados praticamente ilimitado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Os princípios físicos fundamentais da dinâmica dos fluídos podem ser expressos em termos de equações matemáticas básicas, geralmente equações integrais e

diferenciais parciais. As simulações numéricas computacionais fluidodinâmicas são fundamentadas na substituição destas equações em formas algébricas discretizadas que são resolvidas para a obtenção de valores para o campo de fluido em pontos discretos no tempo e/ou espaço (ANDERSON, 1995).

Apesar de existirem vários programas de análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como é popularmente conhecido a fluidodinâmica computacional, com formas de análise numérica e representação gráfica das soluções distintas, todos apresentam sua resolução baseada em três elementos principais: pré-processamento, solução numérica (*solver*) e pós-processamento (PORCIÚNCULA, 2007).

2.4.1 Pré-processamento

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a etapa de pré-processamento de uma simulação computacional consiste na entrada de dados de um problema de fluido em um *software* CFD por meio de uma interface e subsequente adequação destes dados para os parâmetros da solução numérica. As definições do usuário no estágio de pré-processamento consistem, de maneira geral, em:

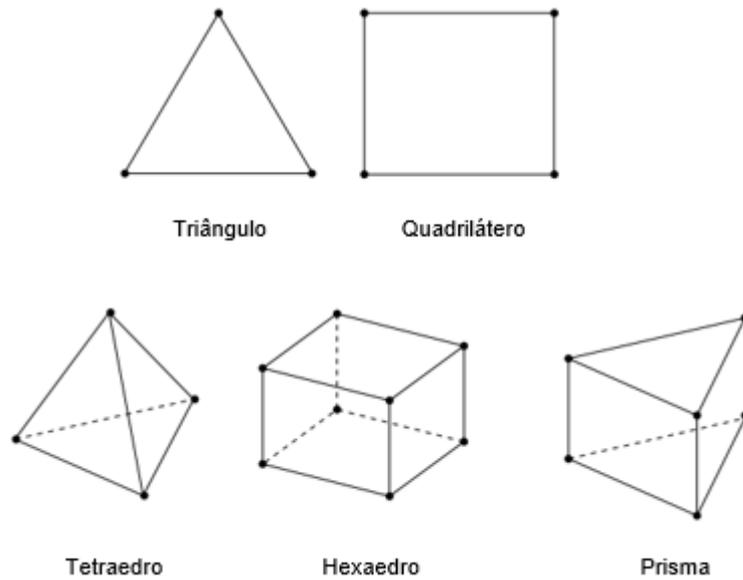
- Definição da geometria da região de interesse (domínio computacional);
- Geração da malha: divisão do domínio computacional em uma malha de elementos;
- Seleção do fenômeno físico a ser modelado;
- Determinação das propriedades do fluido;
- Especificação de condições de contorno adequadas.

A solução de um problema de fluido é obtida para os nós que compõe cada elemento da malha. A acuracidade de uma simulação CFD é governada fundamentalmente pelo nível de qualidade da malha. Em termos gerais, malhas com maiores quantidades de elementos tendem a apresentar resultados mais precisos, porém com custos de processamento mais elevados, por este motivo a construção e otimização da malha é uma das etapas mais importantes para uma simulação numérica computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.4.1.1 Malha (mesh)

A malha é o conjunto de elementos finitos interligados por nós pelo qual o domínio computacional é discretizado, onde as equações algébricas são resolvidas e os resultados são transmitidos para os nós adjacentes. A malha pode ser formada por diferentes geometrias (Figura 18) bidimensionais ou tridimensionais (PORCIÚNCULA, 2007).

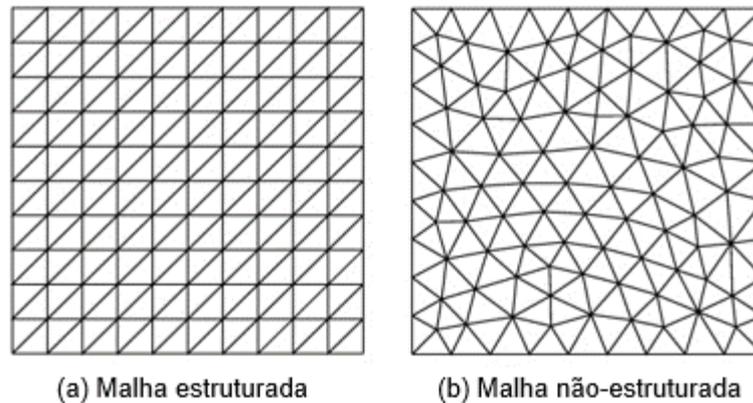
Figura 18 - Geometrias de elementos de malha



Fonte: adaptado de disponível em: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/graphics/g_flu_ug_fig_grid_elements.png. Acesso em: 19 nov. 2018.

Segundo Porciúncula (2007), uma propriedade de fundamental importância no desenvolvimento de uma malha é o modo como os elementos são distribuídos em uma geometria, mais especificamente denominada de topologia. Malhas onde os elementos são distribuídos de maneira ordenada e regular são classificadas como malha estruturada (Figura 19a). Já as malhas não-estruturadas (Figura 19b) ocorre em casos onde os elementos estão conectados de maneira desordenada.

Figura 19 - Malha estruturada e não-estruturada

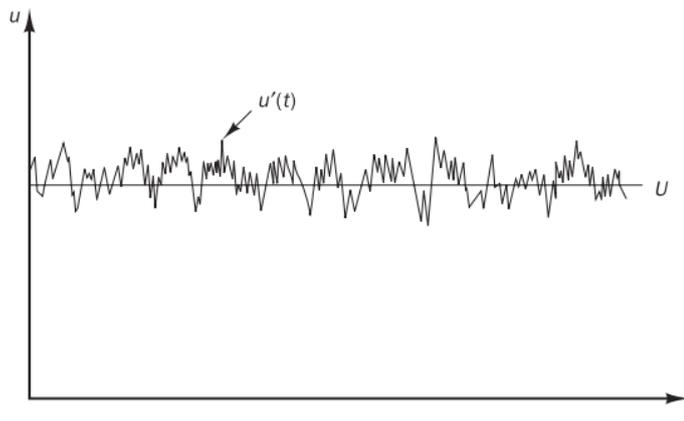


Fonte: adaptado de ALLISON, P. A. *Assessment of spurious mixing in adaptive mesh simulations of the two-dimensional lock-exchange*. Elsevier Ltd., 2013. p. 33.

2.4.1.2 Modelo de turbulência

A turbulência, como já exposto, é formada por vórtices e redemoinhos que causam flutuações irregulares na velocidade média do vento (Figura 20). Por apresentar natureza aleatória, a simulação do efeito de turbulência em um escoamento não permite o tratamento determinístico de suas propriedades, portanto modelos de turbulência baseados em teorias probabilísticas e médias estatísticas foram desenvolvidos para contornar problemas relativos em simulações numéricas (FONTOURA, 2014).

Figura 20 – Gráfico da distribuição típica de velocidade em escoamentos turbulentos



Fonte: VERSTEEG; MALALASEKERA (2007).

Segundo Cóstola e Alucci (2011), as abordagens de análise mais comuns em CFD são os baseados no uso de equações de conservação através da metodologia conhecida como RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) que permite a resolução

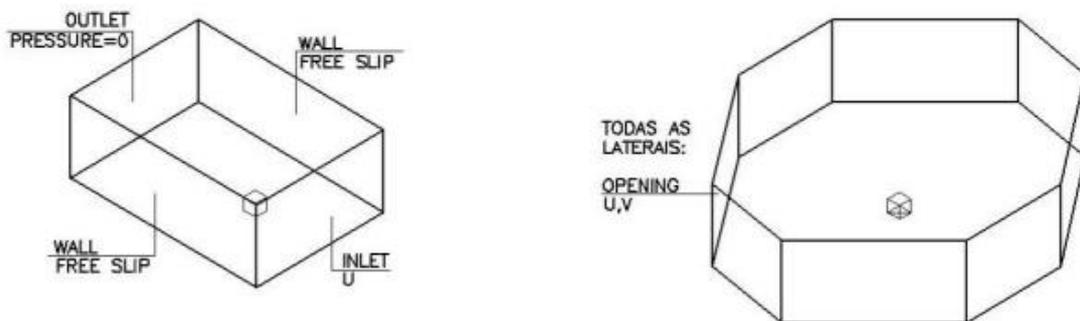
do escoamento médio com a consideração dos efeitos da turbulência de maneira simplificada por meio de modelos de turbulência.

2.4.1.3 Condições de contorno

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), todas as análises computacionais de fluidodinâmica são definidas em termos de dados de entrada e condições de contorno. Em análises que utilizam o método dos volumes finitos, as condições de contorno (Figura 21) mais comuns são:

- *Inlet* (região de entrada do escoamento);
- *Outlet* (região de saída do escoamento);
- *Wall* (parede limitante do escoamento);
- Pressão de referência.

Figura 21 - Modelos de condições de contorno



Fonte: CÓSTOLA; ALUCCI (2011).

2.4.2 Solução numérica (*Solver*)

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), a etapa de solução numérica se fundamenta na solução das equações numéricas determinadas através de um método de solução numérica, mais especificamente o método dos volumes finitos para fluidodinâmica de escoamentos de fluídos como o ar. Esta etapa consiste em:

- Integração das equações do escoamento do fluído sobre os volumes de controle do domínio;
- Discretização das equações integrais em equações algébricas;

- Solução das equações algébricas com base em um método iterativo (convergência da solução).

2.4.3 Pós-processamento

Composta pela representação e visualização gráfica dos dados obtidos pela solução, o pós-processamento permite a análise dos resultados pelo usuário através de dados como parâmetros de convergência, qualidade de malha e propriedades estatísticas de controle (MAITELLI, 2010).

2.4.4 Consistência, Estabilidade e Convergência

Apesar da grande confiabilidade atribuída às análises numéricas computacionais, os sistemas de equações utilizadas apresentam aproximações numéricas cujo efeitos são de difícil previsão. Deste modo, há três fatores importantes (consistência, estabilidade e convergência) para a avaliação e controle da eficiência e eficácia das simulações fluidodinâmicas (PORCIÚNCULA, 2007).

Segundo Porciúncula (2007), o parâmetro de consistência baseia-se na medida em que os elementos da malha que tendem a zero reproduzem esta condição em parâmetros de comparação das equações discretizadas às equações diferenciais. Já a condição de estabilidade consiste na aproximação dos resultados obtidos pela solução numérica da solução exata do método numérico, ou seja, em condições instáveis pequenas perturbações nos resultados de uma equação diferencial resultam em grandes modificações na solução. A condição de convergência é atendida quando os dois demais fatores são atendidos (SILVA, 2007).

2.4.5 Método dos volumes finitos

“O método de volumes finitos baseia-se na integração das equações diferenciais, na sua forma conservativa, sobre um volume de controle” (VASCONCELLOS, 1999, p. 20). Estruturado sobre as equações que governam o escoamento de fluídos, ou seja, o princípio de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, o modelo equacional diferencial parcial do método dos volumes finitos pode ser descrito de forma genérica pela equação de transporte geral (MALISKA, 2004).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) = \nabla \cdot (\Gamma^{\phi}\nabla\phi - \rho\vec{V}\phi) + S^{\phi} \quad (13)$$

Segundo Pantakar (1980), em uma análise computacional utilizando o método de volumes finitos o domínio é discretizado em um número finito de volumes de controle que envolvem um único ponto da malha, onde os valores das variáveis são calculados.

3 METODOLOGIA

“A metodologia é a aplicação de procedimentos e técnicas que devem ser observados para a construção do conhecimento, com o propósito de comprovar a sua validade e utilidade nos diversos âmbitos da sociedade” (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 14). Tendo como base esta definição, determina-se como critério fundamental de uma metodologia um objeto de estudo bem definido e delimitado, ou seja, objetiva determinação do que se pretende estudar, analisar e comprovar por meio de métodos científicos.

O estudo realizado neste trabalho propõe a verificação e análise da eficácia e eficiência de uma metodologia normatizada a partir de sua validação através de uma metodologia mais aprimorada e com um nível de abrangência maior no que se refere ao objeto de estudo. Desta forma, este estudo tem como natureza a pesquisa aplicada que, de acordo com Prodanov e Freitas (2013, p. 51), tem como objetivo “[...] gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos”.

Com base nas definições já expostas, este capítulo tem como objetivo definir os métodos utilizados neste trabalho através da identificação dos procedimentos e etapas que serão adotados no decorrer deste trabalho.

3.1 Procedimento de pesquisa

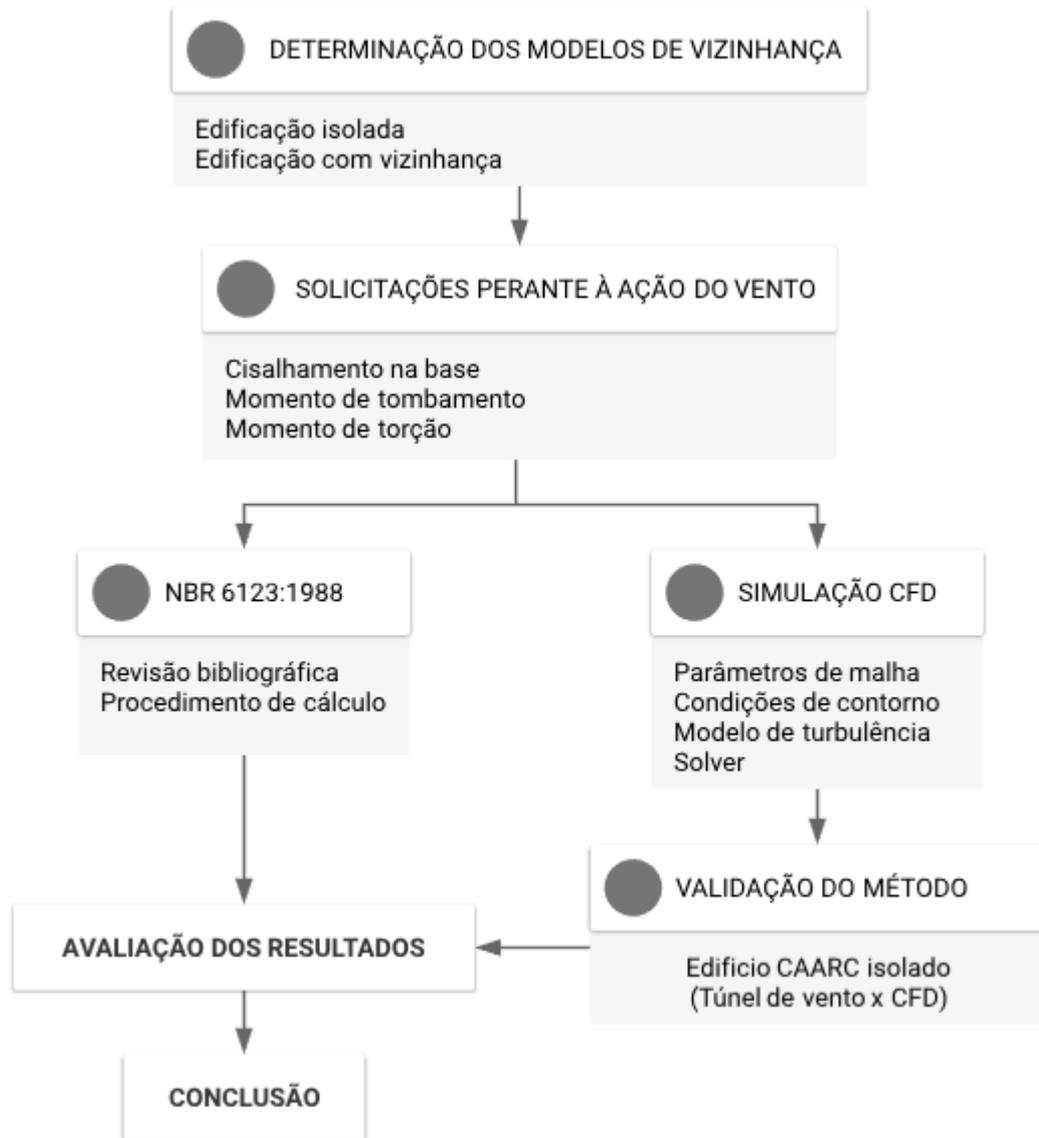
Em caráter preliminar, com a finalidade de proporcionar mais informações sobre o tema estudado, assim como sobre as metodologias e procedimentos de cálculos adotados, foi realizado neste trabalho uma pesquisa bibliográfica através de fundamentações teóricas e estudos similares realizados na área, possibilitando uma melhor delimitação dos objetivos e hipóteses definidos.

A pesquisa realizada no presente trabalho, a partir das definições expostas, se enquadra como tipo exploratório, pois “[...] têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores” (GIL, 2008, p. 27).

3.2 Etapas da metodologia

Com o objetivo de estudar e analisar o efeito de vizinhança na ação do vento em edificações, delimitou-se de maneira geral os procedimentos e etapas que serão adotados no decorrer deste trabalho, representados no fluxograma (Figura 22).

Figura 22 - Etapas da metodologia



Fonte: autor.

4 DESENVOLVIMENTO

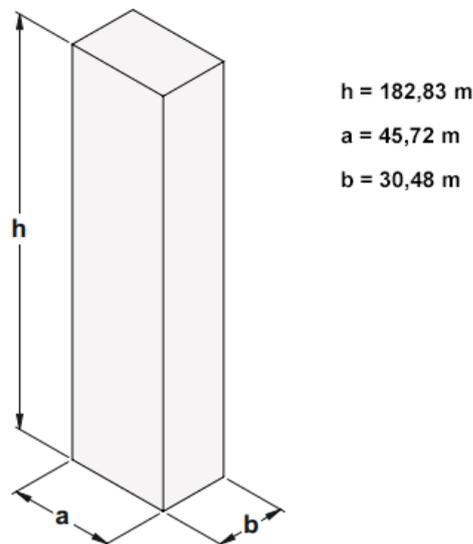
Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento das etapas e procedimentos propostos no presente trabalho.

4.1 CAARC *Standard Tall Building*

O CAARC *Standard Tall Building* é um modelo de edifício que foi determinado pela *Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council* (CAARC) e adotado como padrão em ensaios experimentais em túneis de vento realizados em diferentes centros de pesquisa, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com o objetivo de contribuir com o desenvolvimento das técnicas experimentais aplicadas em túneis de vento no estudo da ação do vento e seus efeitos sobre as edificações.

Em relação as características geométricas, o CAARC *Standard Tall Building* é um prisma de seção transversal retangular com as dimensões em escala real de 30,48 m x 45,72 m x 182,83 m. As superfícies externas do edifício são planas e sem detalhes geométricos, conforme a Figura 23.

Figura 23 - CAARC *Standard Tall Building*



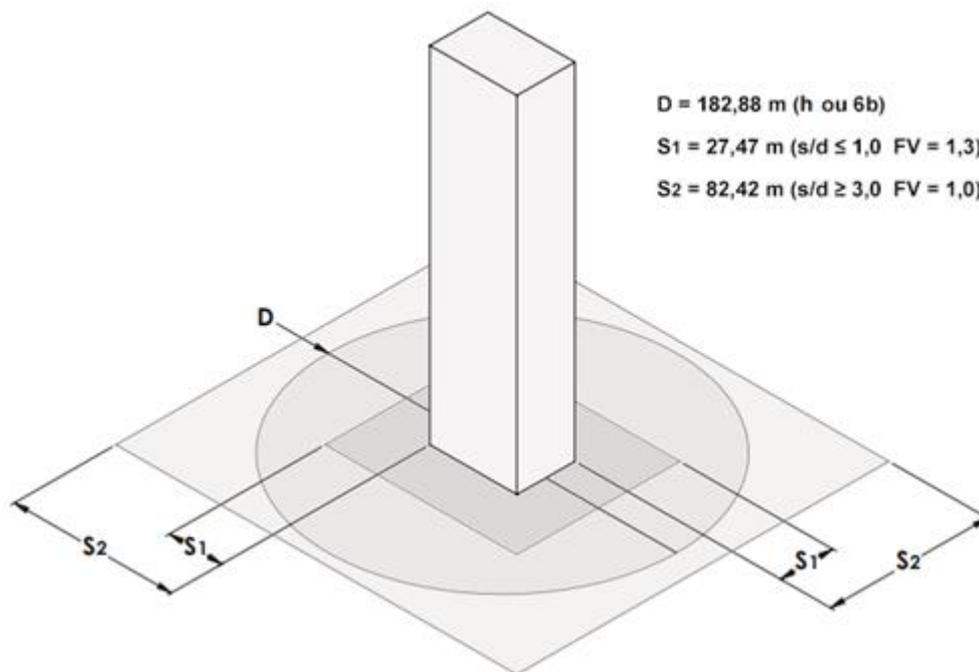
Fonte: autor.

Por se tratar de uma edificação com um banco de dados experimental sólido e possuir características geométricas similares a maioria dos edifícios altos, o CAARC *Standard Tall Building* foi adotado como edificação analisada neste trabalho.

4.2 Modelos de vizinhança

Conforme já apresentado nas seções 2.3.4 e 2.3.5 do presente trabalho, a NBR 6123:1988 apresenta dois critérios para a consideração dos efeitos de vizinhança na ação do vento atuante em uma edificação: um referente a excentricidade das forças de arrasto, ou seja, as solicitações de torção, e o outro referente a ponderação dos coeficientes aerodinâmicos. Estes parâmetros quando aplicados à edificação em estudo apresentam áreas de influência dos efeitos de vizinhança relevantes para a definição do posicionamento global das vizinhanças, conforme representado pela Figura 24.

Figura 24 - Área de influência dos efeitos de vizinhança para o CAARC Standard Tall Building



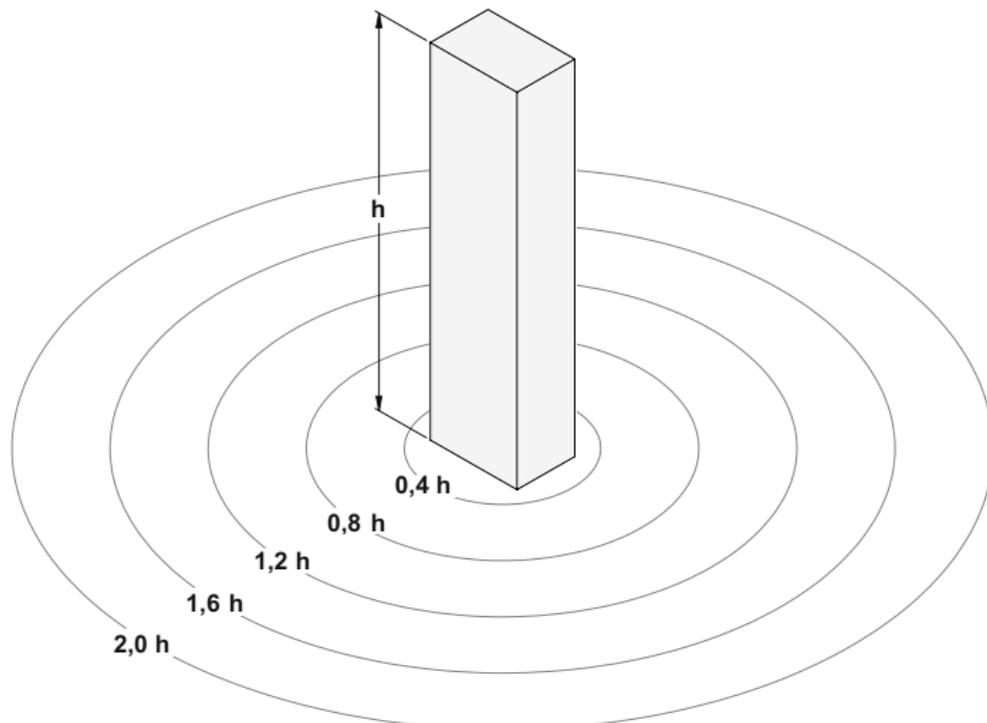
Fonte: adaptado de VIEIRA (2016).

De modo geral, o estudo experimental do efeito de vizinhança na ação do vento em edifícios apresenta como característica particular a grande variabilidade de disposições de vizinhança e inexistência de um padrão de composição bem definido, tratando-se de uma definição específica de cada estudo.

4.2.1 Parâmetros de posicionamento global

No presente trabalho foram propostas quinze composições de vizinhança distintas, além da análise da edificação isolada. Dentre estas, estipularam-se cinco distancias entre o eixo da edificação estudada e as edificações vizinhas, denominadas neste trabalho de contornos (Figura 25). Formados por círculos com seus diâmetros vinculados à altura (h) do CAARC *Standard Tall Building*, estes contornos foram determinados de modo a possibilitar a análise da transposição dos modelos nos limites de consideração dos efeitos de vizinhança (Figura 24) estipulados através dos critérios da NBR 6123:1988.

Figura 25 – Posicionamento global do modelo de vizinhança



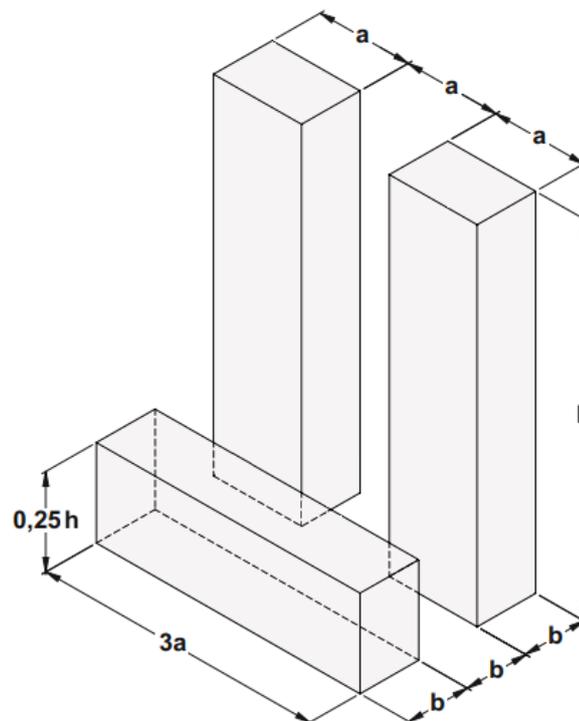
Fonte: autor.

4.2.2 Parâmetros de posicionamento local

A norma indica que os fatores de efeito de vizinhança devem ser considerados referente à altura dos edifícios que compõem a vizinhança e, por esta razão, optou-se por adotar como padrão dimensional das composições de vizinhança e das edificações vizinhas, as dimensões do CAARC *Standard Tall Building*.

Com a finalidade de reproduzir e, conseqüentemente, estudar a interferência dos efeitos de vizinhança citados no anexo G da NBR 6123:1988 (efeito Venturi, deflexão do vento na direção vertical e turbulência de esteira) nas solicitações oriundas da ação do vento da edificação estudada, estipulou-se como modelo padrão de vizinhança duas edificações com dimensões idênticas ao *CAARC Standard Tall Building* posicionadas frontalmente a edificação estudada e distantes entre si de modo a permitir o fluxo do vento em sua projeção e uma edificação de menor altura posicionada a sotavento destas edificações, conforme representado na Figura 26.

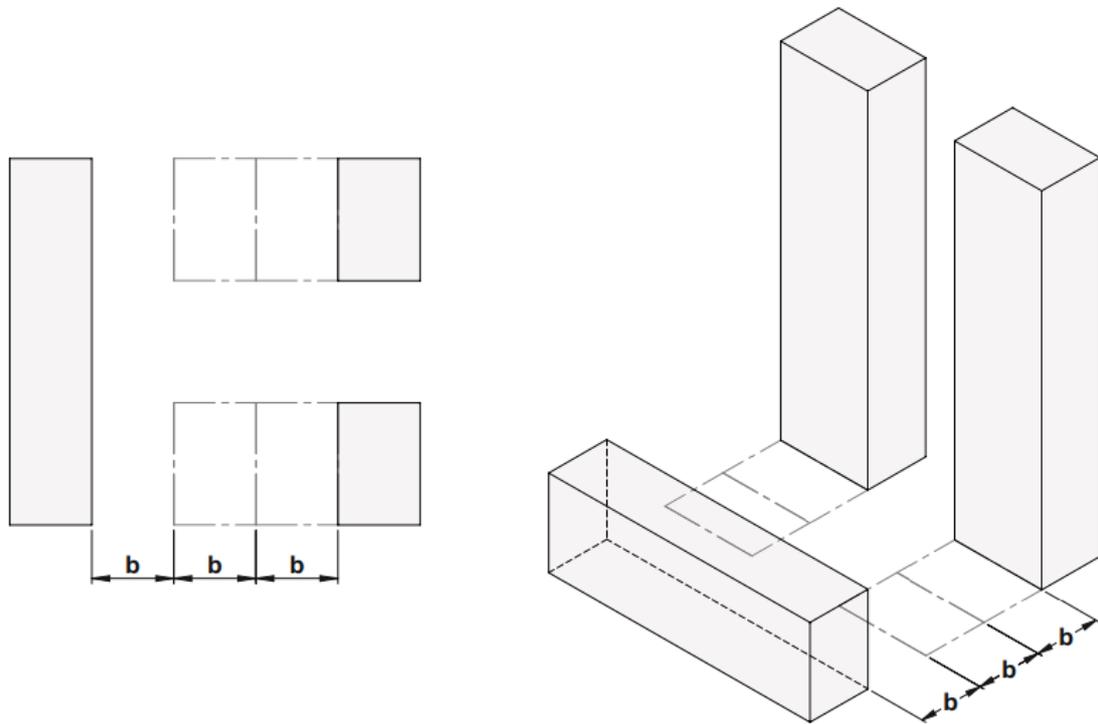
Figura 26 - Modelo de vizinhança



Fonte: autor.

Com base na definição da configuração do modelo de vizinhança, determinou-se como parâmetro de posicionamento local um afastamento entre os dois grupos de edificações vinculado a menor dimensão em planta do *CAARC Standard Tall Building* (b), definindo-se três tipos distintos de composições (Figura 27).

Figura 27 - Posicionamento local do modelo de vizinhança



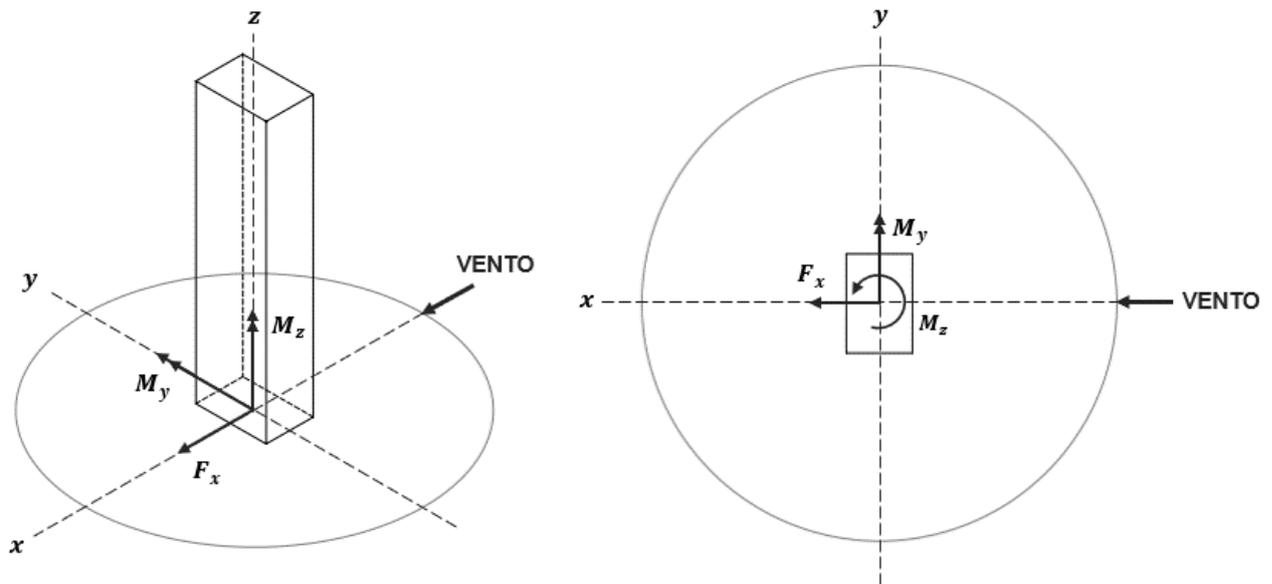
Fonte: autor.

4.3 Solicitações perante a ação do vento

A pressão dinâmica do vento atuante sobre uma edificação desenvolve uma resposta longitudinal, transversal e de torção nesta edificação. Estas respostas, também denominadas de solicitações, como objeto de estudo do presente trabalho foram obtidas em relação a posição da base da edificação e discretizadas sobre os eixos de referência determinados de maneira a possibilitar o estudo dos aspectos singulares da influência exercida pelo efeito de vizinhança nas solicitações oriundas da ação do vento sobre o edifício estudado.

Os eixos de referência (x , y e z) adotados e, respectivamente, as solicitações discretizadas (cisalhamento, momento de tombamento e torção) foram obtidas para o ângulo de incidência do vento perpendicular à superfície a x h do edifício estudado, conforme representado pela Figura 28.

Figura 28 - Configurações e modelo analítico das solicitações



Fonte: autor.

4.4 Denominações e parâmetros gerais de análise

Em resumo aos modelos de vizinhança definidos nas seções anteriores e apresentados pela Tabela 5 adotou-se para sua nomenclatura o seguinte critério:

Xh-Yb

Onde,

X distância referente ao posicionamento global;

Y distância referente ao posicionamento local.

Deste modo, o modelo 1,2h-2b refere-se ao modelo de vizinhança com as edificações vizinhas posicionadas no contorno com 219,40 m de diâmetro da edificação estudada e com distanciamento entre si de 60,96 m.

Tabela 5 - Denominações dos modelos de vizinhança

Variáveis		Posicionamento global				
		73,13 m	146,26 m	219,40 m	292,53 m	365,66 m
Posicionamento Local	30,48 m	0,4h-1b	0,8h-1b	1,2h-1b	1,6h-1b	2,0h-1b
	60,96 m	0,4h-2b	0,8h-2b	1,2h-2b	1,6h-2b	2,0h-2b
	91,44 m	0,4h-3b	0,8h-3b	1,2h-3b	1,6h-3b	2,0h-3b

Fonte: autor.

Baseado nas convenções e metodologia apresentada pela NBR 6123:1988, determinou-se os parâmetros gerais que foram utilizados nas análises das composições propostas neste trabalho, conforme apresentado pela Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros gerais de análise

h (m)	a (m)	b (m)	p	Categoria	V0 (m/s)	S1	S2	S3
182,83	45,72	30,48	0,23	IV	45	1,0	$b F_r \left(\frac{z}{10}\right)^{0,23}$	1,0

Fonte: autor.

Os parâmetros geométricos (h, a e b) correspondem as dimensões do CAARC *Standard Tall Building*. Os demais parâmetros derivam do ensaio em escala reduzida em túnel de vento utilizado como base de dados para a validação dos critérios adotados para as análises numéricas deste trabalho, cujo qual apresenta um perfil potencial de velocidades médias de expoente (p) corresponde à categoria IV, assumindo uma velocidade básica do vento (V_0) predominante à região Sul do país equivalente a 45 m/s.

4.5 Simulação computacional fluidodinâmica

Atualmente o mercado apresenta uma grande variedade de programas e pacotes computacionais utilizados para a resolução de problemas através de simulações numéricas. E apesar das suas diferenças, todos são baseados nos mesmos princípios matemáticos e lógicos, apresentando apenas algumas distinções na implementação numérica e no tratamento gráfico dos resultados. Dentre os programas comerciais de fluidodinâmica computacional, destaca-se no âmbito acadêmico e de pesquisas, o *software ANSYS Workbench* por apresentar uma versão com licença estudantil e um ambiente de interface gráfica simples e de fácil manuseio.

No presente trabalho utilizou-se o módulo *Fluent* do *software ANSYS Workbench* versão 17.0 para a simulação dos domínios das análises numéricas, sendo adotadas nestas algumas hipóteses fundamentais:

- Escoamento em regime turbulento;
- Fluido incompressível e newtoniano;

- Sistema isotérmico.

Com o objetivo estabelecer modelos numéricos apropriados e obter resultados computacionais precisos, vários fatores devem ser levados em consideração, como por exemplo o domínio computacional, geração da malha, condições de contorno, configurações do solver e controle de convergência. A previsão dos resultados, como a pressão no caso de análises CFD, poderá sofrer alguns problemas de estabilidade, acuracidade e confiabilidade, assim como na quantidade calculada se os parâmetros de análise não forem considerados corretamente. As principais configurações estabelecidas para o modelo das análises numéricas realizadas no presente trabalho são descritas nas seções subsequentes.

4.5.1 Domínio computacional

Segundo Revuz (2011), o domínio computacional representa a simulação da região onde ocorre o escoamento do fluido, ou seja, a região discretizada em que as equações numéricas são processadas. De modo geral, a modelagem do domínio computacional de uma análise CFD se fundamenta na determinação do tamanho do domínio, e no caso do presente trabalho, do posicionamento das edificações dentro deste domínio.

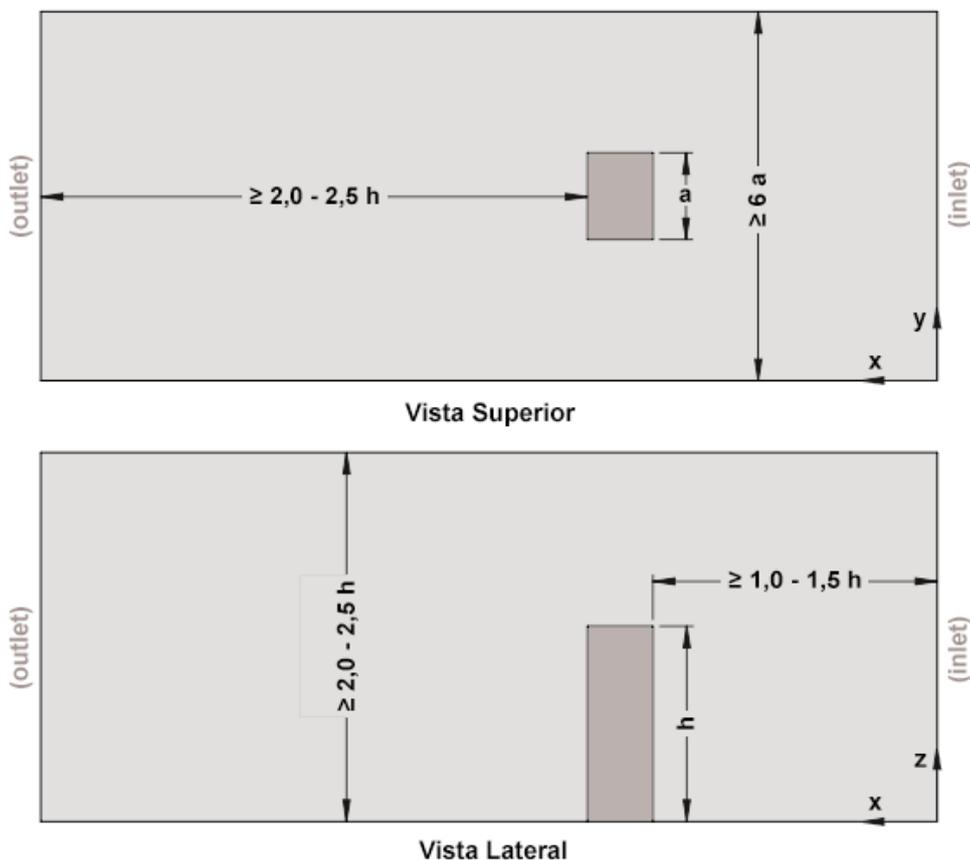
Usualmente, em simulações numéricas envolvendo o escoamento do vento em edificações, somente a parte inferior do domínio computacional corresponde a um limite físico real. As demais faces laterais e superior do domínio representam limites não-físicos, e devem estar localizadas longe o suficiente das edificações com a finalidade de evitar uma aceleração artificial elevada do escoamento devido a contração do fluido dentre estes limites. Deste modo, baseado em estudos realizados nesta área, adotou-se dois tipos de diretrizes para a determinação o tamanho do domínio computacional:

- Tipo 1: diretrizes que impõem distâncias mínimas entre o modelo e os limites do domínio;
- Tipo 2: diretrizes que impõem um índice de bloqueio máximo permitido.

Em relação às diretrizes do tipo 1, várias recomendações já foram propostas. Estudos realizados na área incluindo Tominaga et al. (2008) recomendaram que as distâncias em torno dos modelos devem ser suficientemente longas para garantir o pleno desenvolvimento do escoamento do fluido (HE; YANG; YE, 2014), onde os limites de entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) do escoamento devem estar localizados, respectivamente, à pelo menos cinco e dez vezes a altura (h) dos edifícios. Blocken (2015) revisou os fatores urbanos que diminuem a precisão e a confiabilidade da simulação CFD obtendo recomendações similares.

Apesar das diretrizes apresentadas anteriormente nesta seção serem utilizadas na maioria dos estudos realizados nesta área, Revuz (2011) e Huang, Li e Xu (2007 apud MOU et al., 2017) propõem diretrizes com reduções significativas no volume do domínio, e conseqüentemente, no custo de processamento das simulações CFD sem alterações significativas nos resultados obtidos. Estas diretrizes (Figura 29) foram utilizadas como restrições para a determinação do domínio computacional das análises numéricas realizadas neste trabalho.

Figura 29 - Diretrizes do tipo 1 (domínio computacional)



Fonte: adaptado de MOU et al. (2017).

Com o principal objetivo de evitar a interferência do fluxo entre o modelo e os limites laterais e superior do domínio as diretrizes do tipo 2 determinam um índice de bloqueio máximo (Equação 14) em relação à área transversal do domínio. De modo geral, recomendações para ensaios de túnel de vento e simulações CFD indicam, respectivamente, um valor para o índice de bloqueio máximo de 5% e 3%. Adotou-se, como restrição para o domínio computacional utilizado no presente trabalho, um índice de bloqueio de 3%.

$$IB = \frac{A_{edif.}}{A_{dom.}} \leq 3\% \quad (14)$$

Onde,

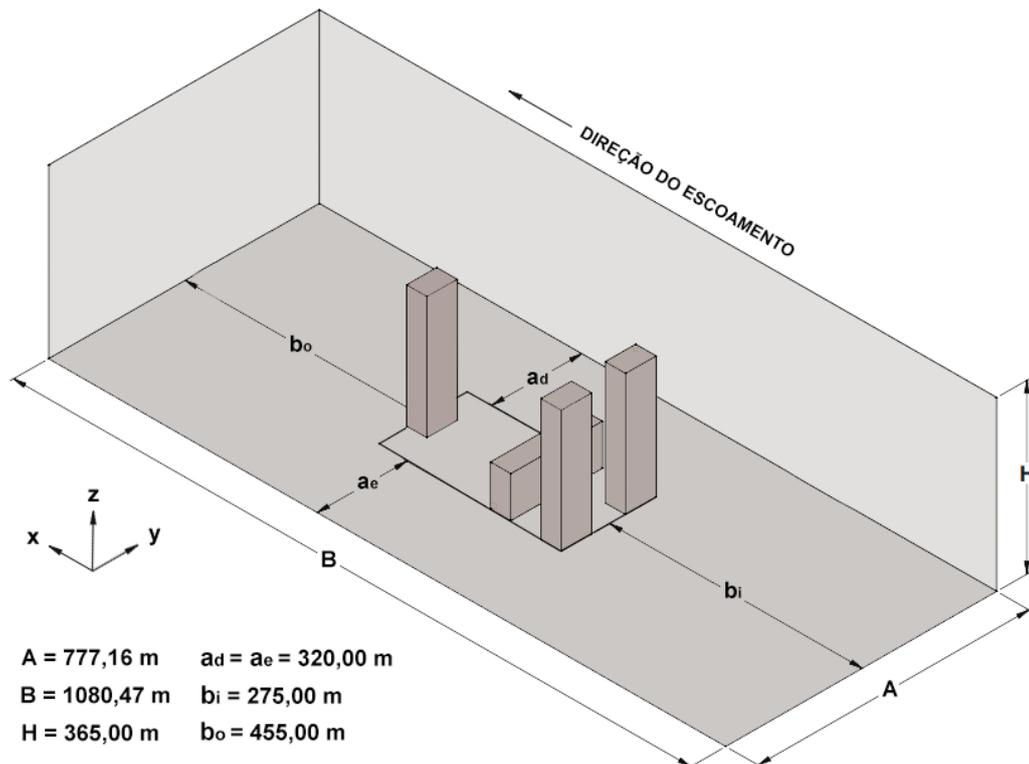
IB índice de bloqueio;

$A_{edif.}$ área de projeção transversal da edificação;

$A_{dom.}$ área de projeção transversal do domínio computacional.

De acordo com os parâmetros adotados para as diretrizes tipo 1 e 2, o domínio computacional utilizado nas simulações numéricas deste trabalho foi definido conforme Figura 30.

Figura 30 - Dimensões do domínio computacional



Fonte: autor.

4.5.2 Parâmetros de malha

As equações diferenciais parciais que governam o estudo do fluxo do fluido geralmente não são passíveis de soluções analíticas, exceto em casos muito simples. Portanto, para analisar o escoamento de um fluido, os domínios computacionais são divididos em subdomínios menores (elementos), onde as equações governantes são então discretizadas e resolvidas dentro de cada um desses subdomínios. O conjunto interconectado destes subdomínios, denominado como malha, determina em grande medida o tempo de computação e a precisão dos resultados obtidos em uma simulação CFD em função de sua qualidade e quantidade.

No intuito de prever o escoamento em torno de edificações com precisão aceitável, o parâmetro mais importante é a reprodução correta das características de descolamento e camada limite do fluido próximo as superfícies das edificações através de duas prerrogativas fundamentais: a transição suave entre os elementos da malha e, o tamanho e forma destes elementos.

Baseado nas recomendações de ANSYS (2015), selecionou-se para a geração das malhas utilizadas nas simulações computacionais do presente trabalho, uma técnica estruturada hexagonal (*MultiZone*) com uma abordagem de refinamento de malha local (*Inflation e BodySizing*), com o objetivo de reduzir significativamente o tempo de computação e melhorar a precisão dos resultados da previsão.

O elemento hexaédrico foi escolhido como geometria dos elementos da malha por proporcionar uma solução mais robusta e linear em relação as geometrias das composições analisadas. A configuração geral da malha para todas as análises contém as parametrizações apresentadas na Tabela 7 em função das variáveis utilizadas no software ANSYS *Workbench*.

Tabela 7 - Parâmetros da malha geral do domínio

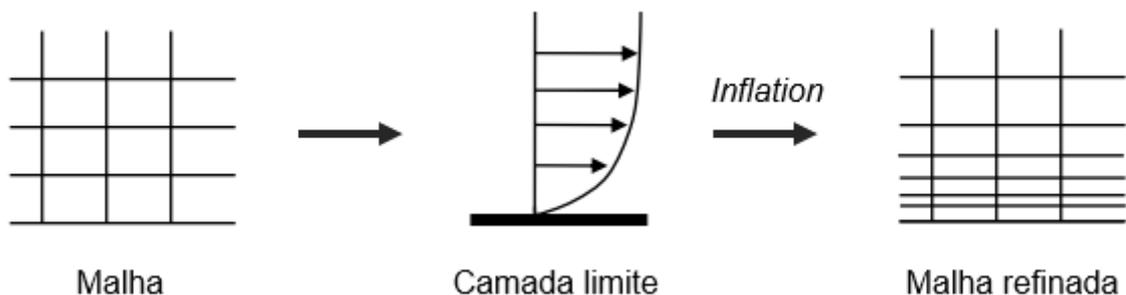
Configurações da malha	
Tipo de elemento	Hexaédrica
Função de tamanho	Curvatura
Centro de relevância	Fino
Suavização	Alta
Tamanho mínimo de elemento	0,50 m
Tamanho máximo de elemento	15,0 m
Taxa de crescimento	1,20
Comprimento máximo de borda	30,48 m
Método de geração de malha	<i>MultiZone</i>
Quantidade de nós	~ 450000
Quantidade de elementos	~ 400000

Fonte: autor.

Em relação a abordagem de refinamento de malha local, alguns controles de malha padrão foram aplicados em todos os domínios para todas as análises computacionais para assegurar um melhor desempenho de resolução nos resultados, sendo estes:

- *Inflation*: controle que permite a adequação da malha em função da camada limite (Figura 31) com o objetivo de aumentar a precisão nas regiões próximas das superfícies de contato do fluido com a geometria e de garantir a eficácia do modelo de turbulência. Este controle foi aplicado sobre o limite inferior do domínio e sobre as superfícies das edificações com as configurações apresentadas pela Tabela 8;

Figura 31 - Refinamento de malha local (Inflation)



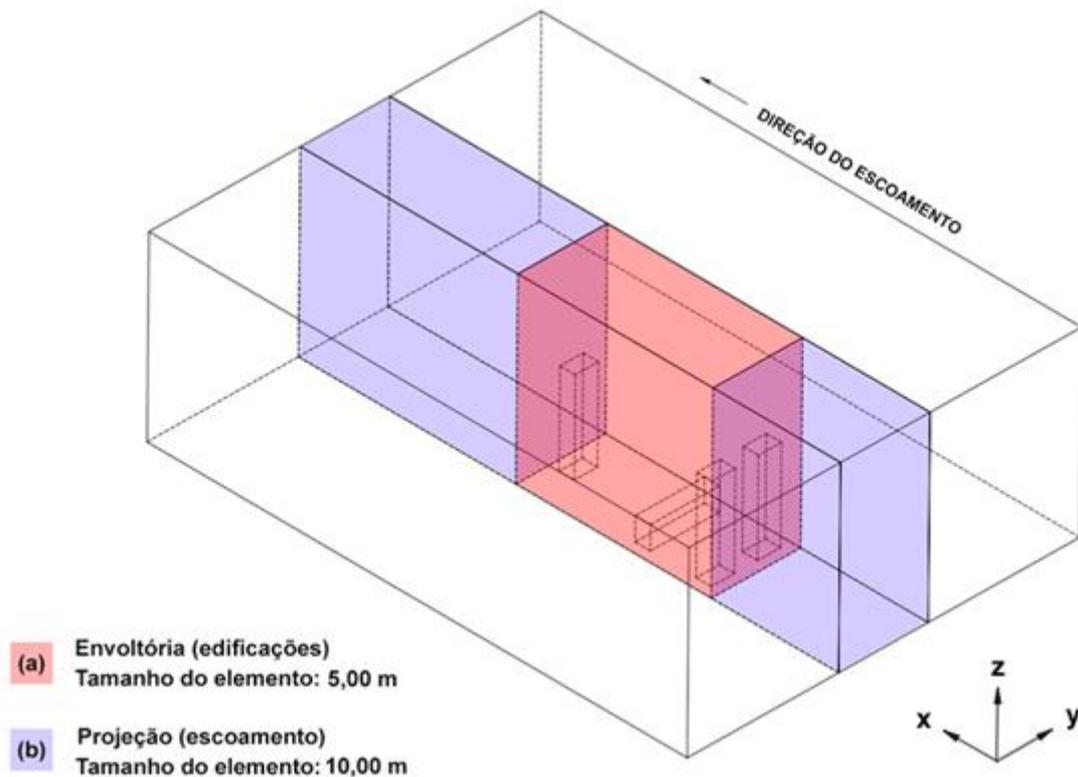
Fonte: autor.

Tabela 8 - Parâmetros de controle de *Inflation*

Configurações (<i>Inflation</i>)	
Tamanho da primeira camada	0,5 – 1,5 m
Nº de camadas	10 - 15
Taxa de crescimento	1,20

Fonte: autor.

- *BodySizing*: controle que permite a determinação do tamanho dos elementos presentes em um corpo. Aplicado sobre a região de envoltória das edificações (Figura 32a) e sobre a região de projeção do escoamento sobre as edificações (Figura 32b) ambos os refinamentos tem como objetivo a obtenção de resultados mais precisos sobre áreas que, intuitivamente, apresentam grande variação das propriedades do fluido devido às obstruções.

Figura 32 - Refinamento de malha local (*BodySizing*)

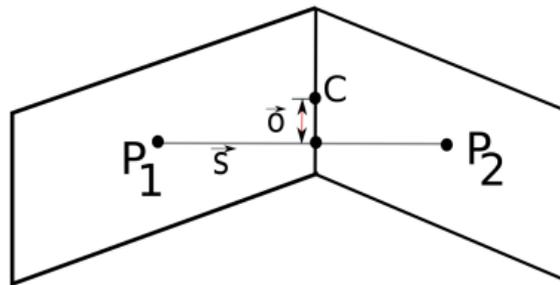
Fonte: autor.

4.5.2.1 Controle de qualidade de malha

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), a acuracidade de uma simulação CFD é governada fundamentalmente pelo nível de qualidade da malha. Para garantir a qualidade das malhas aplicadas nas análises numéricas do presente trabalho, foram utilizados alguns parâmetros que permitem a sua avaliação, grande parte associada aos aspectos geométricos e de associação entre elementos vizinhos, sendo estes parâmetros: *skewness* (assimetria), *aspect ratio* (razão de aspecto) e *orthogonal quality* (qualidade ortogonal).

Segundo Dose (2013), o *skewness* representa basicamente a orientação geométrica da malha através do desvio do vetor que conecta o centro da face e o centro dos volumes vizinhos, ou seja, a medida relativa à distorção de um elemento em comparação com sua geometria ideal.

Figura 33 - Parâmetro de qualidade de malha (Skewness)



Fonte: DOSE (2013).

A Figura 33 ilustra um exemplo de malha, onde P1 e P2 denotam os nós de cálculo posicionados no centro dos dois elementos, o ponto C representa o centro da interface entre os elementos e o vetor \vec{S} conecta os pontos P1 e P2. O vetor que conecta a intersecção do vetor \vec{S} e a interface das células é denominado de \vec{O} . O *skewness* de um elemento é expresso por:

$$Skewness = \frac{|\vec{O}|}{|\vec{S}|} \quad (15)$$

ANSYS (2016) apresenta uma escala qualitativa para os valores de *skewness* (Figura 34) e recomenda que para elementos hexaédricos os valores não ultrapassem 0,85.

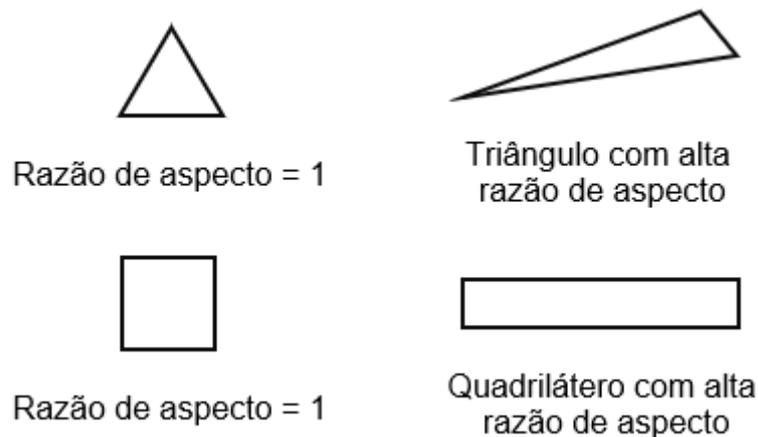
Figura 34 - Recomendações da ANSYS para valores de *Skewness*

Excelente	Muito Bom	Bom	Aceitável	Ruim	Inaceitável
0 - 0,25	0,25 - 0,50	0,50 - 0,80	0,80 - 0,94	0,95 - 0,97	0,98 - 1,00

Fonte: adaptado de ANSYS (2016).

“A razão de aspecto pode ser definida como a relação entre o maior e o menor comprimento de arresta de uma célula de malha” (DOSE, 2015). Idealmente, o valor da razão de aspecto deve ser próximo de 1,0 para garantir resultados precisos, porém ANSYS (2016) recomenda que a razão de aspecto seja no máximo 100, pois valores altos de razão de aspecto induzem erros inadmissíveis na previsão numérica do escoamento do fluido nas faces (Figura 35).

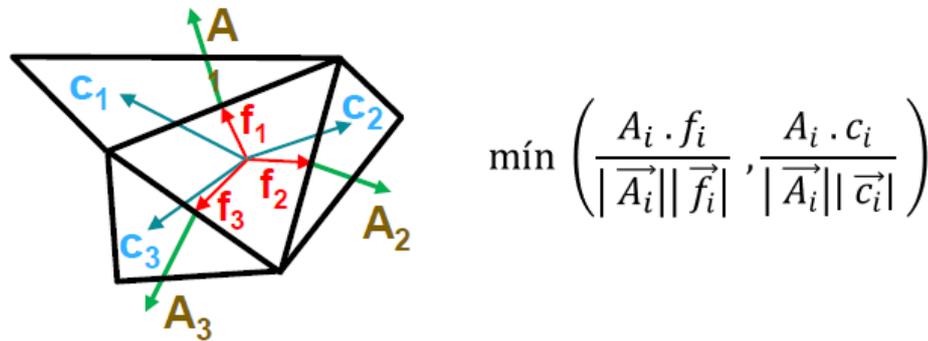
Figura 35 - Parâmetro de qualidade de malha (razão de aspecto)



Fonte: autor.

O conceito de ortogonalidade de malha relaciona-se com a proximidade dos ângulos entre as faces ou arrestas adjacentes de um elemento a um ângulo ótimo dependendo de sua topologia (Figura 36). A medida da qualidade ortogonal de um elemento varia de 0 (inaceitável) a 1 (excelente), conforme escala qualitativa apresentada pela ANSYS (Figura 37). Adotou-se um valor mínimo de qualidade ortogonal tolerável de 0,02 conforme recomendações de ANSYS (2016) para simulações CFD.

Figura 36 - Parâmetro de qualidade de malha (qualidade ortogonal)



Fonte: adaptado de ANSYS (2016).

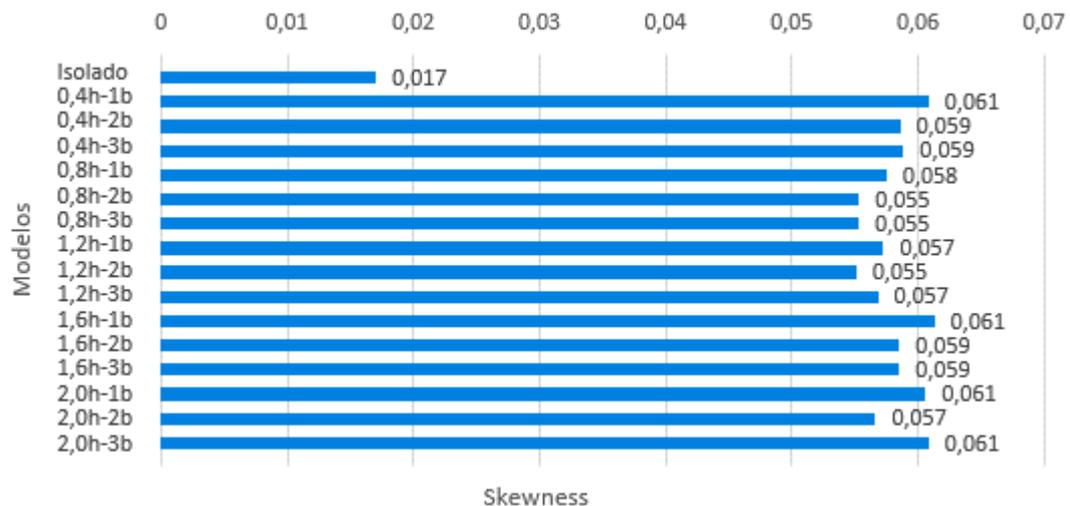
Figura 37 - Recomendações da ANSYS para valores de qualidade ortogonal

Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito Bom	Excelente
0 - 0,001	0,001 - 0,14	0,15 - 0,20	0,20 - 0,69	0,70 - 0,95	0,95 - 1,00

Fonte: adaptado de ANSYS (2016).

Em todas as simulações computacionais realizadas neste trabalho, foram verificadas e atenderam aos requisitos e critérios de controle de malha apresentados na referida seção, conforme síntese² apresentada pelos gráficos (Figura 38, Figura 39 e Figura 40) referente aos resultados dos parâmetros de controle de qualidade de malha de todas as simulações numéricas.

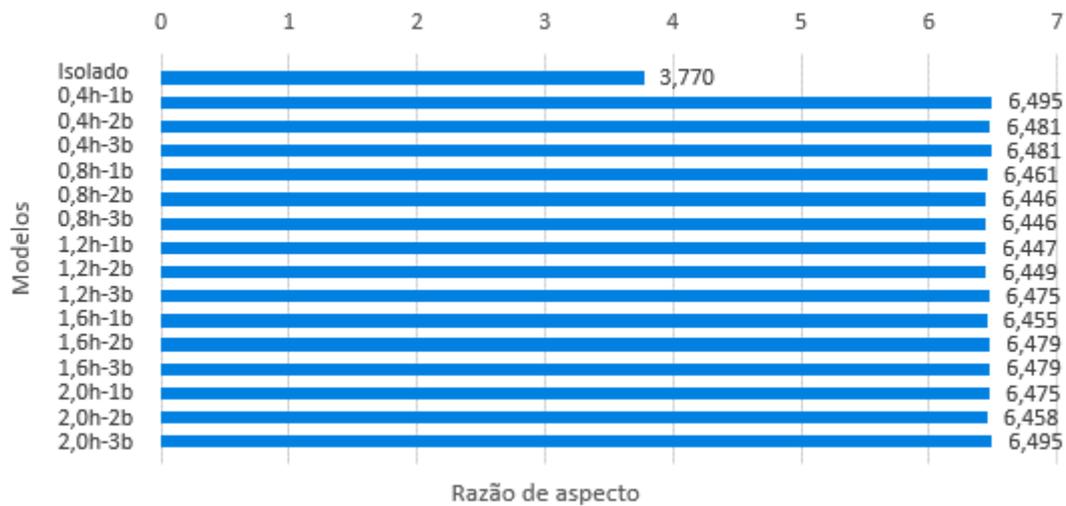
Figura 38 - Resumo dos resultados do controle de qualidade de malha (*Skewness*)



Fonte: autor.

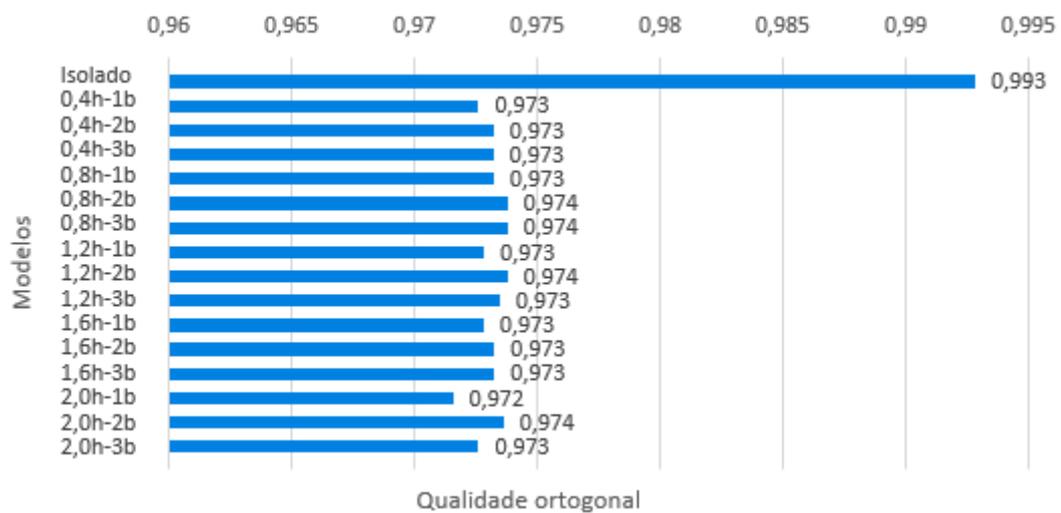
² Os dados discretizados dos resultados dos parâmetros de controle de malha obtidos para cada simulação realizada apresentam-se no APÊNDICE A.

Figura 39 - Resumo dos resultados do controle de qualidade de malha (razão de aspecto)



Fonte: autor.

Figura 40 - Resumo dos resultados do controle de qualidade de malha (qualidade ortogonal)



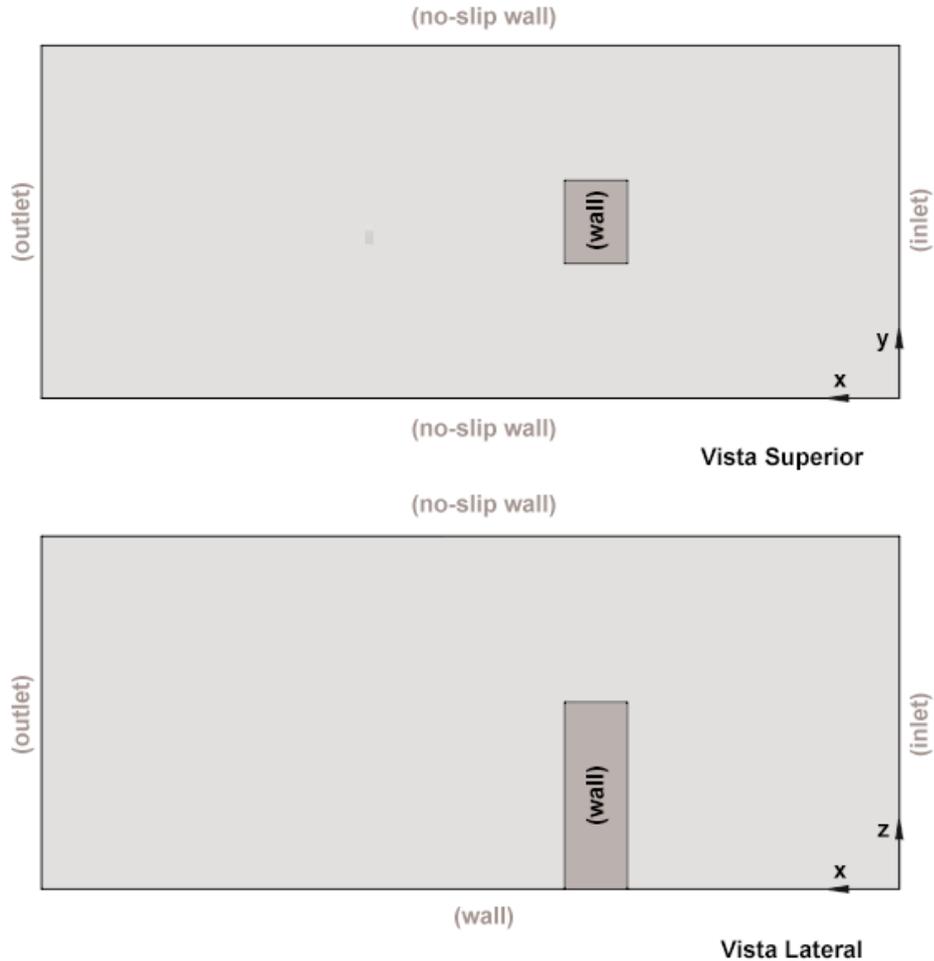
Fonte: autor.

4.5.3 Condições de contorno

As condições de contorno representam um componente essencial do modelo matemático de uma simulação CFD, onde são especificadas as variáveis e propriedades do fluido dentro dos limites do modelo físico (domínio computacional) e as características destes limites perante o escoamento. Para as análises numéricas, atribuiu-se como condição da face de entrada do escoamento, a configuração de “*inlet*” que indica a região a barlavento, onde a velocidade básica de entrada foi considerada 45 m/s, conforme Tabela 6. O elemento de saída do escoamento foi configurado como “*outlet*” considerando pressão relativa nula. Os demais limites foram atribuídos como obstruções ao escoamento através da condição “*wall*”, onde as faces

laterais e superior do domínio que representam limites não-físicos através da condição de “no-slip wall” garantindo que estes não influenciem na aerodinâmica no fluxo do escoamento, conforme representado esquematicamente na Figura 41.

Figura 41 - Configurações das condições de contorno dos limites do modelo físico



Fonte: autor.

As análises foram realizadas para um regime estacionário e turbulento de escoamento, considerando um fluido incompressível e newtoniano em um sistema isotérmico de temperatura de 15 °C e pressão atmosférica de 1 atm dentro do domínio computacional. A Tabela 9 apresenta as demais configurações de contorno gerais e do fluido utilizadas nas simulações numéricas.

Tabela 9 - Configurações das condições de contorno

Condições de contorno	
Tipo de análise	Estacionária
Domínio	Ar
Pressão de referência	1 atm
Temperatura do fluido	15 °C

Densidade do fluido	1,225 kg/m ³
<i>Inlet</i>	<i>Velocity inlet</i> (45 m/s)
<i>Outlet</i>	<i>Outflow</i> (ponderação da taxa de fluxo = 1)

Fonte: autor.

4.5.3.1 Modelo de turbulência

A reprodução das características do vento natural nas simulações numéricas é obtida através da combinação adequada entre a modelagem da turbulência atmosférica e da variação da velocidade do vento com a altura relativa ao terreno (LAVÔR, 2017).

Dessa forma, nas configurações das condições de contorno deste trabalho foi utilizado um modelo de turbulência híbrido, denominado de *Shear Stress Transport* (SST), que é composto por dois tipos de modelos: o k-ômega (k- ω), que apresenta uma formulação robusta e acurada nas regiões próximas de superfícies e k-epsilon (k- ϵ) que é aplicável a modelagem da turbulência em escoamentos externos (ANSYS, 2015).

Considerando a equação da lei potencial (Equação 16), o perfil potencial de velocidades médias foi aplicado na entrada do domínio (*inlet*) através da variável “*Vellnlet*” com o objetivo de simular a camada limite atmosférica real. O perfil de velocidade médias é dado pela Figura 43.

$$\frac{V(z)}{V_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^p \quad (16)$$

Onde,

$V(z)$ velocidade média na altura z ;

V_{ref} velocidade na altura de referência;

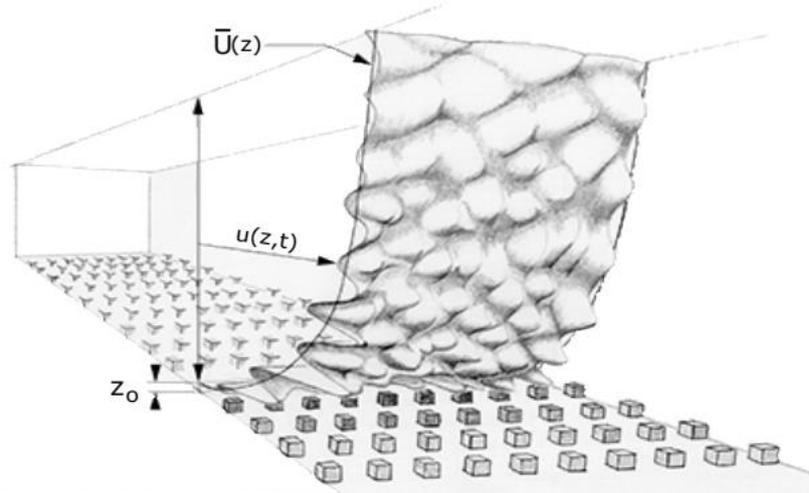
z_{ref} altura de referência (adotou-se $z_{ref} = 10,00$ m);

p expoente da curva de potência ($p = 0,23$ – correspondente à categoria IV de rugosidade do terreno da NBR 6123:1988).

Como já apresentado, a interação entre o fluido e a superfície de um sólido origina a turbulência do escoamento, subseqüentemente resultando em flutuações na velocidade do vento em torno de seu valor médio (Figura 42). Estas flutuações,

também denominadas de rajadas, devido à natureza aleatória apresentam um tratamento matemático baseado em distribuições probabilísticas.

Figura 42 - Flutuações no perfil de escoamento turbulento



Fonte: KOSS (2014 apud ALGABA, 2016).

As flutuações do vento são representadas através da intensidade da escala da componente longitudinal de turbulência, $I_u(z)$, ao qual foi aplicado nas configurações das condições de contorno através das variáveis “*IntensTurb*” conforme valores apresentados na Figura 43.

A intensidade local de turbulência, $I_i(z)$, pode ser definida através da razão entre o desvio padrão das flutuações da velocidade e a velocidade média:

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{V(z)} \quad (17)$$

Onde,

$\sigma_i(z)$ desvio padrão das flutuações da velocidade.

A partir de dados experimentais obtidos por Blessmann (1995), o desvio padrão da velocidade flutuante na direção principal de escoamento do vento, $\sigma_u(z)$, pode ser obtido através da Equação 18:

$$\sigma_u(z) = \sqrt{\beta_\sigma} \sqrt{C_{as}} V_{ref} = 2,58 \sqrt{C_{as}} V_{ref} \quad (18)$$

Sendo,

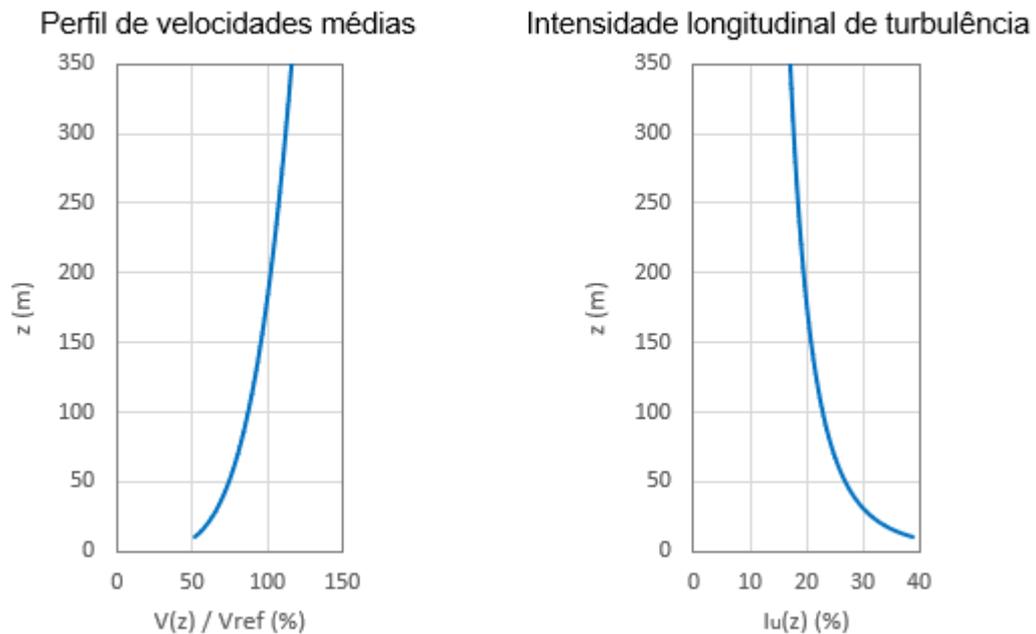
$\sqrt{\beta_\sigma}$ fator experimental invariável ao longo da altura (adotou-se 2,58 – conforme Blessmann, 1995);

C_{as} coeficiente de arrasto superficial ($C_{as} = 0,0226$ – conforme recomendações de Blessmann, 1995).

Substituindo-se a lei potencial (Equação 16) e a Equação 18 na expressão da intensidade local de turbulência (Equação 17), obtêm-se a seguinte equação para a intensidade da componente longitudinal de turbulência:

$$I_u(z) = 2,58 \cdot 0,0226 \left(\frac{z_{ref.}}{z} \right)^p \quad (19)$$

Figura 43 - Parâmetros de turbulência (p = 0,23)



Fonte: autor.

As configurações e parâmetros gerais do modelo de turbulência adotado nas simulações numéricas podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Configurações do modelo de turbulência

Modelo de turbulência	
Modelo de turbulência	<i>Shear Stress Transport (SST)</i>
Perfil de velocidades médias	“VellInlet” (Figura 43)
Intensidade longitudinal de turbulência	“IntensTurb” (Figura 43)
Método de especificação	Intermitência, intensidade e escala

Inicialização	Intensidade média = 5%
Energia cinética turbulenta	Lei potencial
Taxa de dissipação específica	

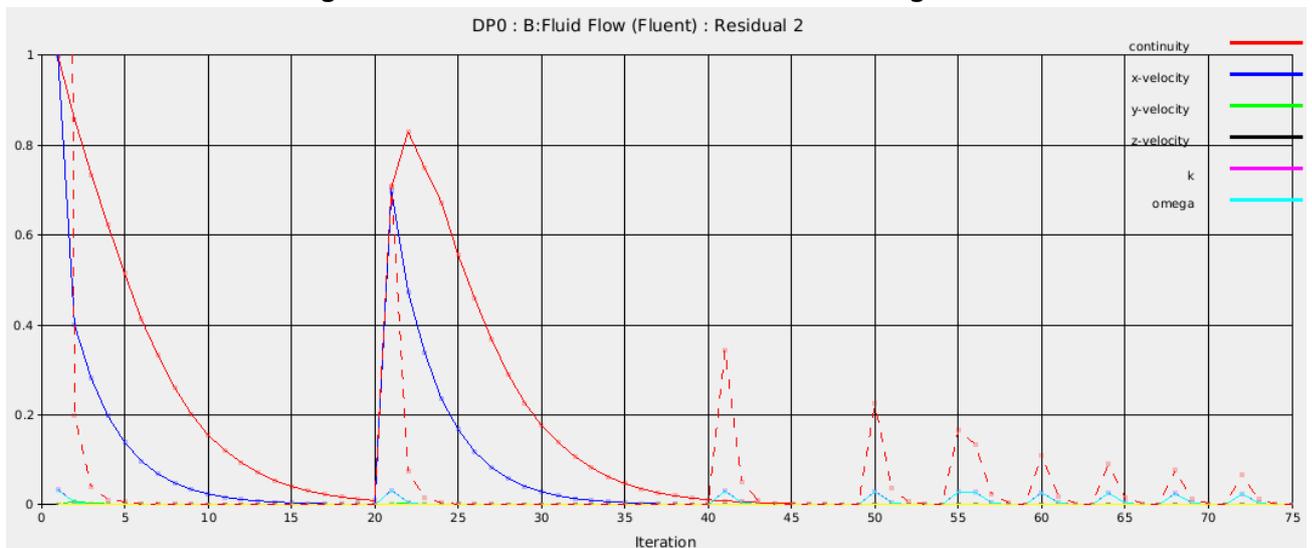
Fonte: autor.

4.5.4 Solução numérica e processamento

O ANSYS *Fluent* aplica o método dos volumes finitos para a solução iterativa das equações algébricas de conservação em cada elemento do domínio. As interações são processadas em função do resíduo das variáveis obtido nas soluções, possibilitando o monitoramento do nível de convergência da simulação. Para o critério de convergência adotou-se um valor máximo para o resíduo das variáveis de 10^{-4} , conforme recomendações de Franke (2006) e ANSYS (2015).

A interface de monitoramento e processamento apresentada no módulo *solution* do *software* para a simulação CFD do modelo de validação do método numérico pode ser observada na Figura 44.

Figura 44 - Gráfico de monitoramento de convergência



Fonte: autor, extraído do ANSYS.

O acoplamento pressão-velocidade das simulações foi resolvido através do algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) e estruturas de discretização de segunda ordem foram utilizadas para ambos os termos de convecção e viscosidade das equações governantes.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos (APÊNDICE B) a partir das análises realizadas segundo as metodologias descritas anteriormente.

5.1 Validação do método numérico

Como já evidenciado no presente trabalho e por pesquisas realizadas na área da fluidodinâmica computacional, como Lavôr (2017), Dose (2015), Revuz (2011) e entre outros, os resultados derivados de simulações CFD são sempre influenciados por diversos fatores. Para a validação da eficácia e precisão da metodologia das simulações numéricas, foi simulado uma composição com o modelo isolado do *CAARC Standard Tall Building* e, com os resultados obtidos, comparado com resultados experimentais de ensaios realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Os parâmetros utilizados na comparação entre as metodologias foram os coeficientes de pressão (C_p) computados e obtidos experimentalmente em túnel de vento sobre as fachadas da edificação (Figura 45 e Figura 46).

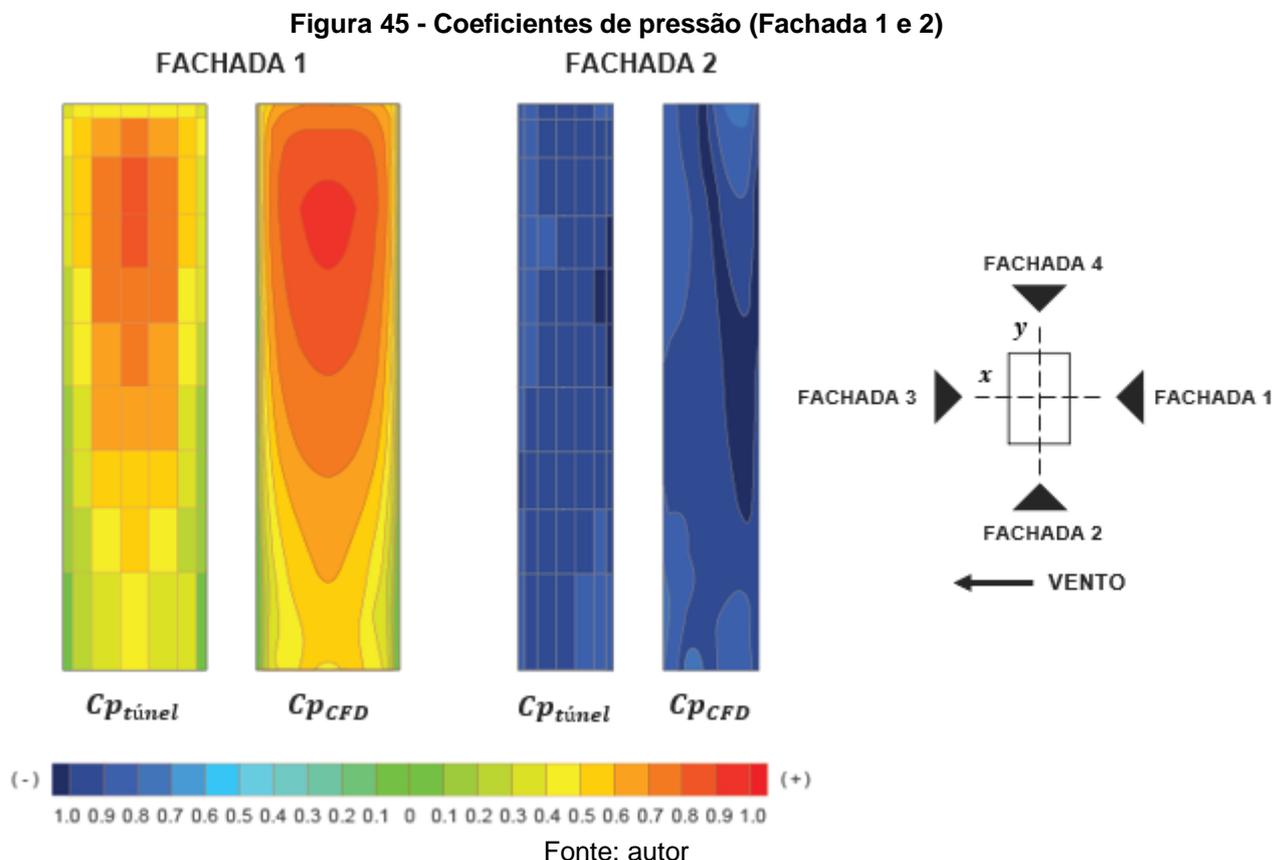
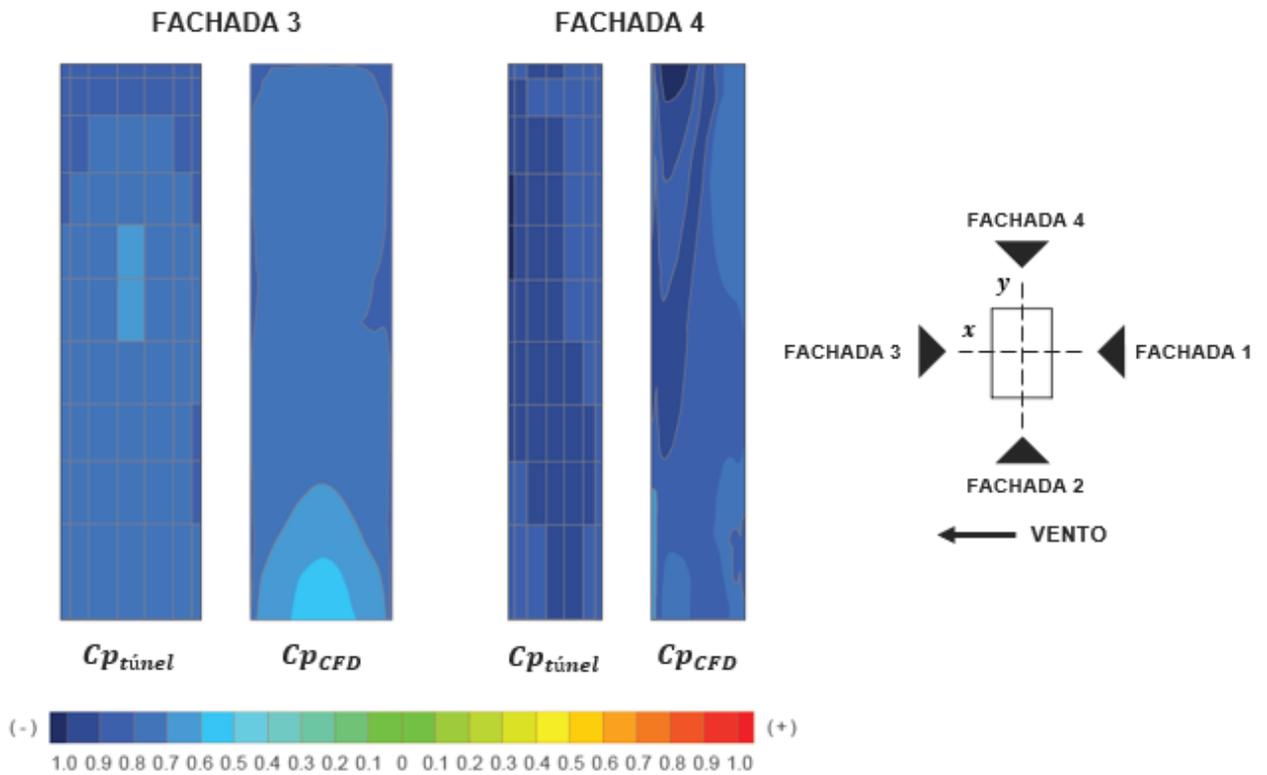


Figura 46 - Coeficientes de pressão (Fachada 3 e 4)



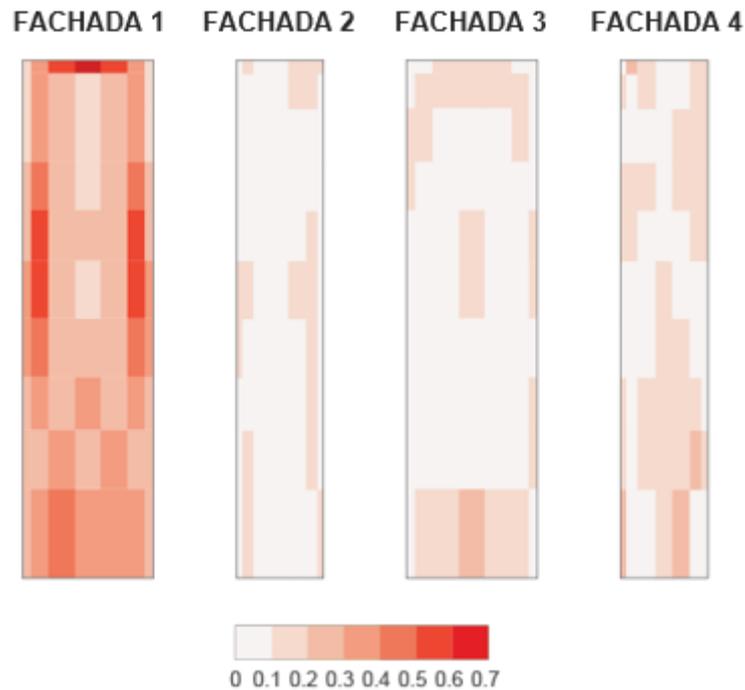
Fonte: autor

O erro relativo entre os resultados foi utilizado como parâmetro de avaliação e comparação dos dados (Equação 20), caracterizando um perfil de erro relativo nas fachadas (Figura 47).

$$\text{Erro relativo} = \left| \frac{Cp_{CFD} - Cp_{túnel}}{Cp_{túnel}} \right| \quad (20)$$

Estipulou-se um valor de 20% a 30% de erro relativo admissível nas fachadas, baseado nas recomendações de Obasaju (1992 apud MOU et al., 2017), para obtenção de resultados consistentes na comparação entre simulações CFD e ensaios experimentais.

Figura 47 - Perfil de erro absoluto



Fonte: autor

Observou-se nas regiões de interfaces das fachadas dos perfis de erro relativo valores locais superiores ao admissível estipulado. Tratando-se de regiões com gradiente de pressão amplo e, conseqüentemente de complexa aquisição, foram consideradas, para fins de investigação de análise, como admissíveis os valores de erro relativo destas regiões de pico pois não refletem as condições reais do modelo.

Conclui-se que a partir dos resultados apresentados que o modelo de simulação computacional reproduz os dados obtidos nos ensaios experimentais de túnel de vento, validando a metodologia para demais simulações.

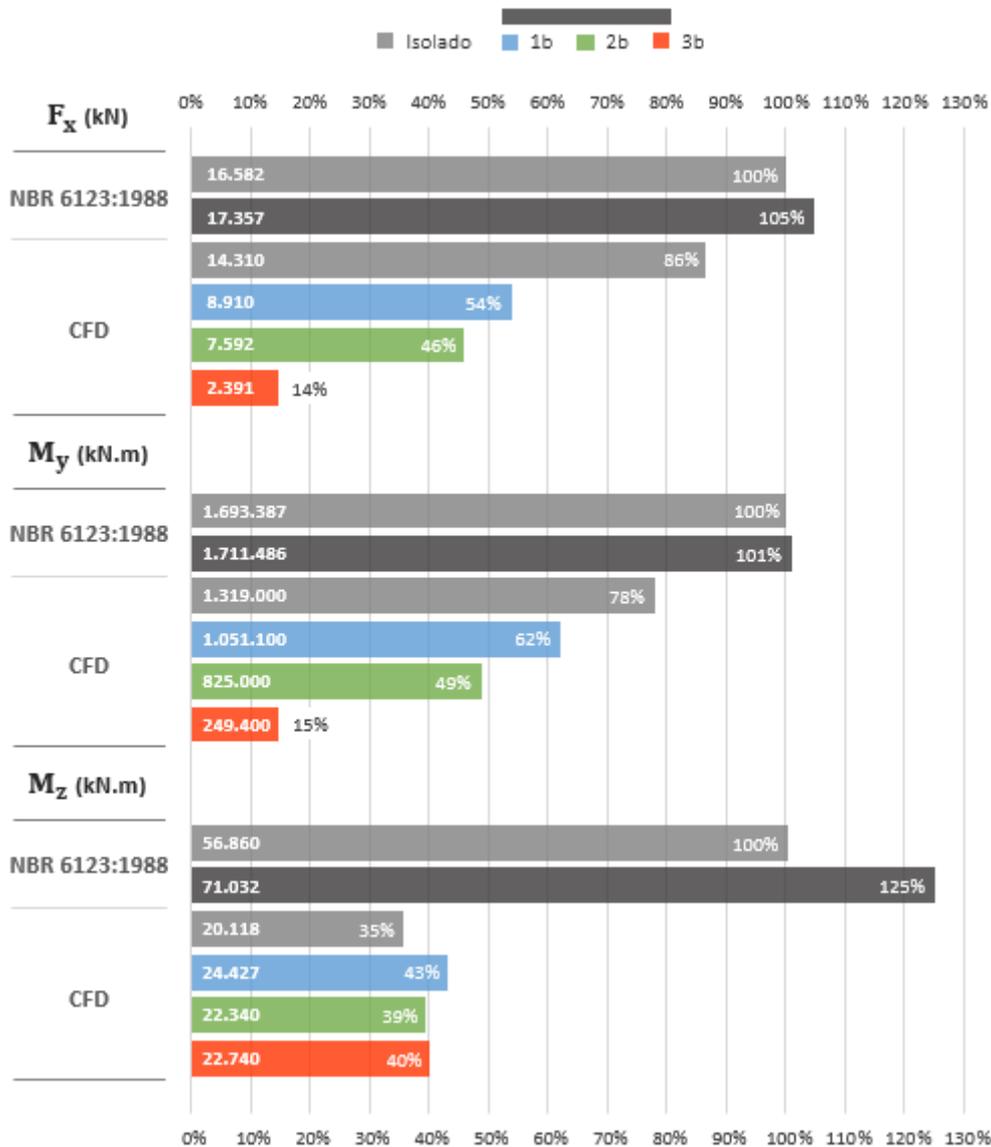
5.2 Resultados dos modelos 0,4h

Os modelos de vizinhança 0,4h foram elaborados com a presença do modelo de três edificações (Figura 26) posicionado frontalmente à fachada 1 do CAARC *Standard Tall Building* na direção do eixo X a uma distância de 21,32 m da edificação estudada.

Segundo NBR 6123:1988, considerou-se para os cálculos das solicitações uma excentricidade das forças de arrasto para edificações com efeitos de vizinhança e fator de vizinhança (FV) de 1,3 até 45,70 m (0,25 h) de altura.

A Figura 48 apresenta o comparativo das solicitações (F_x , M_y e M_z) dos modelos de vizinhança 0,4h (1b, 2b e 3b) estimadas de acordo com a norma brasileira com o obtido em simulações CFD, assim como os referentes valores para o modelo isolado em ambas as metodologias.

Figura 48 – Solicitações dos modelos 0,4h



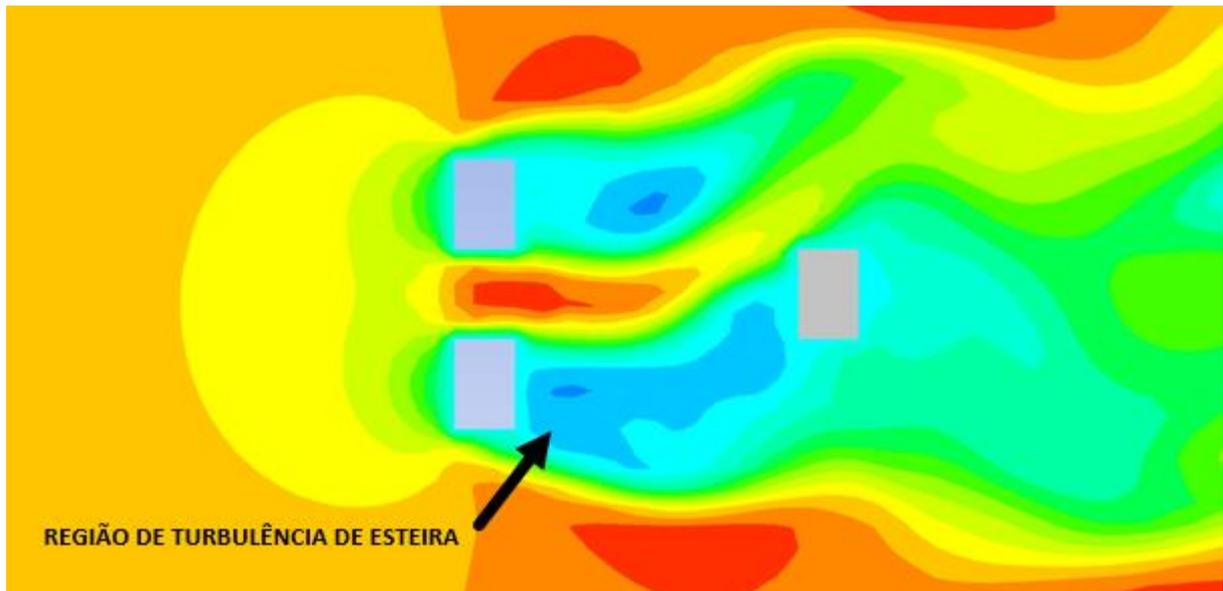
Fonte: autor

As solicitações obtidas através das simulações computacionais apresentaram valores inferiores ao estimado através da NBR 6123:1988, assim como uma tendência de minoração destas em relação ao modelo isolado.

Constatou-se uma tendência de redução significativa no cisalhamento e momento de tombamento com a variação do posicionamento local entre as edificações vizinhas, principalmente em referência ao modelo 0,4h-3b. Conforme

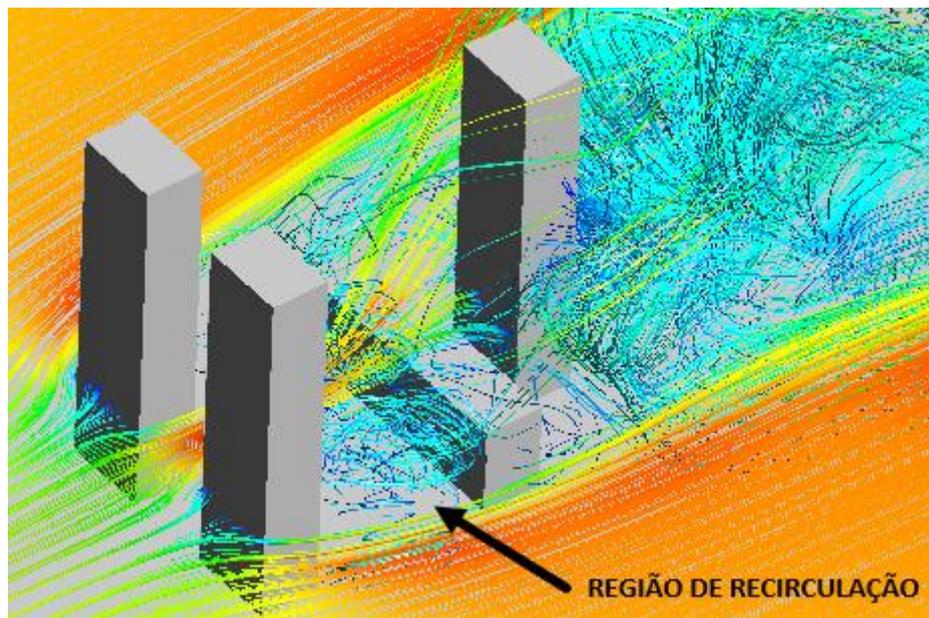
contorno de velocidade³ na direção X (Figura 49) e linhas de fluxo do escoamento (Figura 50), conclui-se que esta minoração ocorre em função da turbulência de esteira das edificações vizinhas e da recirculação do fluxo sobre a edificação de menor altura que induz um canal de fluxo sobre os níveis superiores desviando o escoamento incidente à lateral da edificação estudada.

Figura 49 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 0,4h-3b (z = 150 m)



Fonte: autor, extraído do ANSYS.

Figura 50 - Linhas de fluxo do modelo 0,4h-3b



Fonte: autor, extraído do ANSYS.

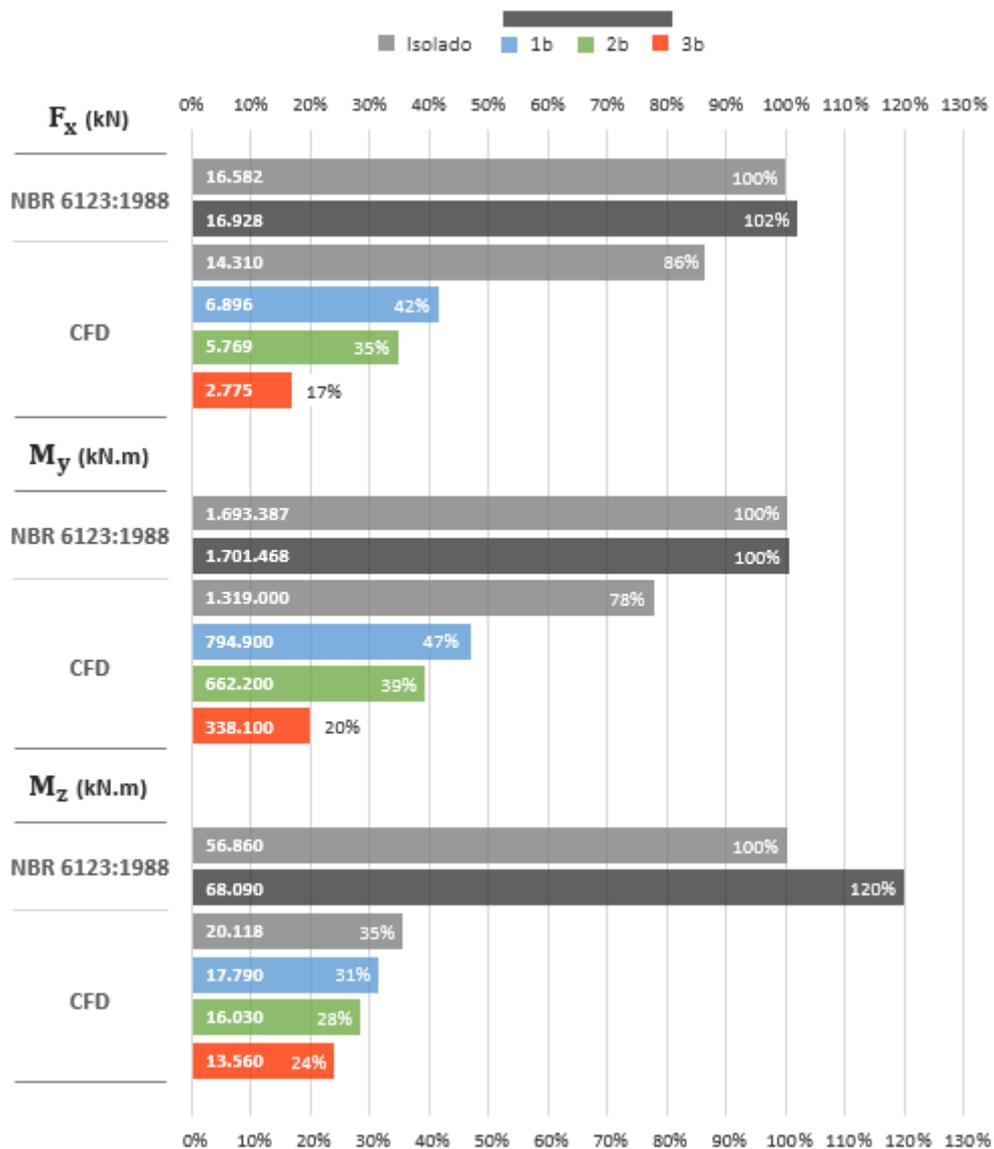
³ O APÊNDICE C apresenta o contorno de velocidade para todos os modelos de vizinhança simulados.

5.2 Resultados dos modelos 0,8h

Os modelos de vizinhança com posicionamento global de 0,8h foram elaborados com a presença das edificações vizinhas (Figura 26) posicionadas frontalmente à fachada 1 do CAARC *Standard Tall Building* na direção do eixo X a uma distância de 57,89 m da edificação estudada.

Conforme a NBR 6123:1988, considerou-se uma excentricidade das forças de arrasto para edificações com efeitos de vizinhança e fator de vizinhança (FV) de 1,13 até 45,70 m (0,25 h) da altura.

Figura 51 - Solicitações dos modelos 0,8h

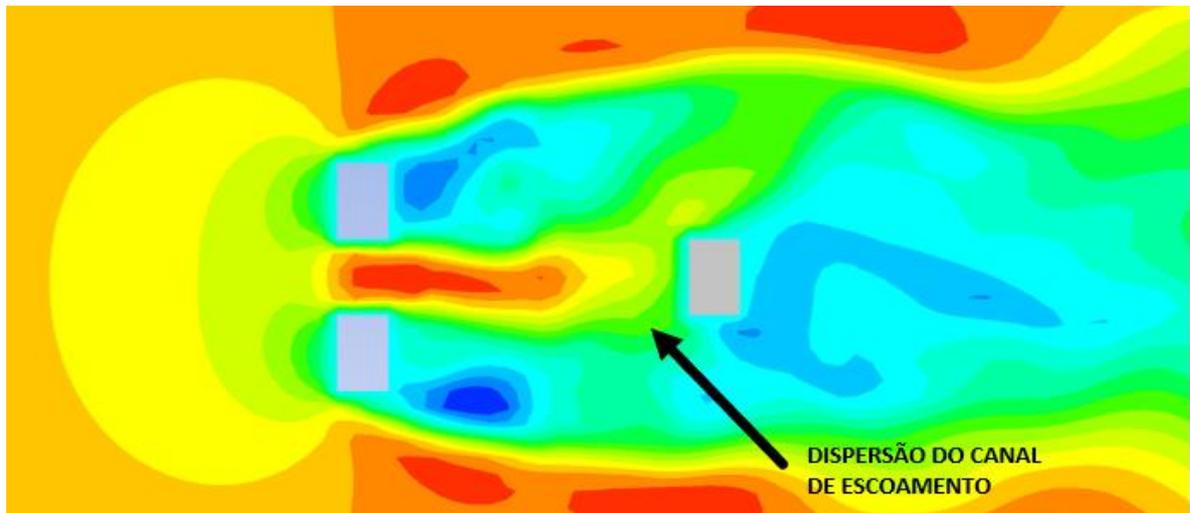


Fonte: autor

Conforme apresentado na Figura 51, os modelos 0,8h apresentam uma divergência na tendência do momento de torção em relação aos demais modelos, onde devido a presença de edificações vizinhas ocorre a minoração da torção em aproximadamente 10% a cada variação do posicionamento local (b).

Em termos de análise dos resultados obtidos pelo método numérico, a tendência de minoração do cisalhamento e momento de tombamento dos modelos com vizinhança em relação ao modelo isolado se mantém. Constata-se também que o modelo 0,8h-3b apresenta valores com redução significativa decorrente de efeito similar ao verificado nos resultados do modelo 0,4h-3b. O canal do escoamento (Figura 52) desenvolve-se, em comparação ao modelo citado, de modo mais desordenado e disperso atenuando o seu efeito.

Figura 52 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 0,8h-3b (z = 60 m)

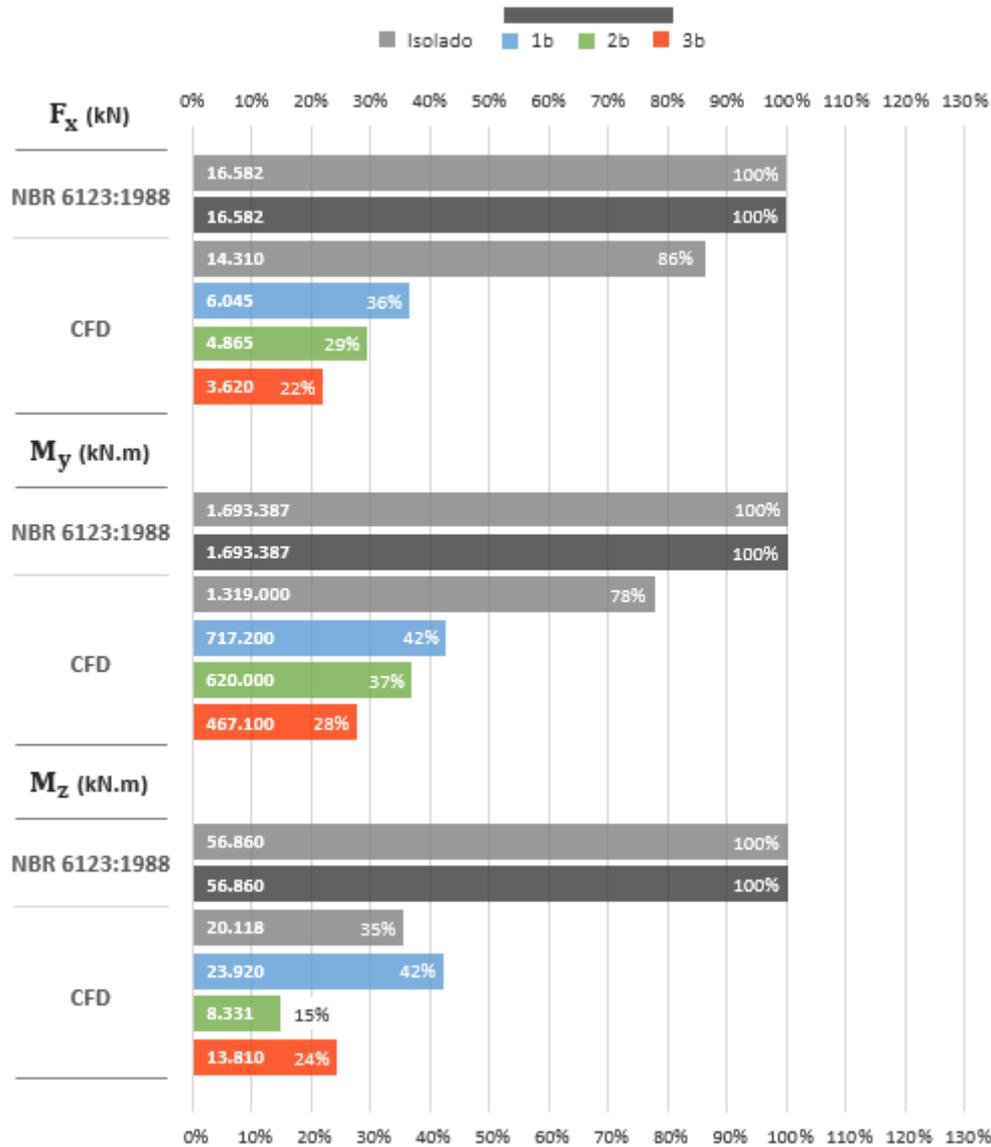


Fonte: autor, extraído do ANSYS.

5.3 Resultados do modelo 1,2h

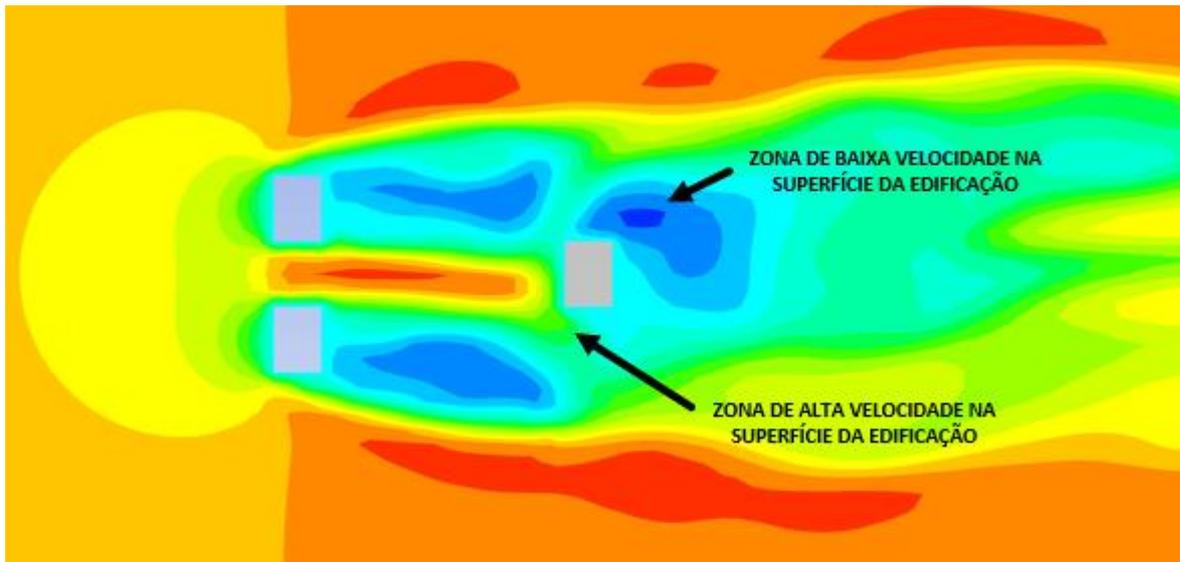
Compostos por uma vizinhança de três edificações, assim como os modelos anteriormente apresentados, os modelos 1,2h possuem um afastamento de 94,46 m entre os planos das faces confrontantes da edificação estudada para as demais. Desta maneira, as considerações dos efeitos de vizinhança na ação do vento dispostas na norma brasileira (NBR 6123:1988) não influenciam no cálculo das solicitações (Figura 53) para este modelo e demais modelos apresentados posteriormente neste trabalho, pois a edificação vizinha mais próxima à edificação estudada situa-se fora dos contornos representados na Figura 24.

Figura 53 - Solicitações dos modelos 1,2h



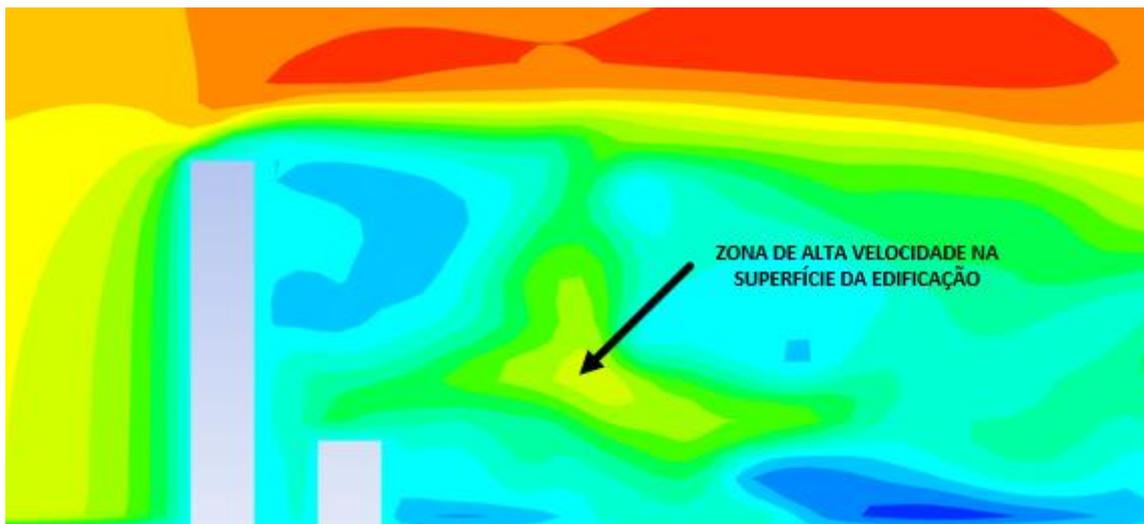
Destacam-se dentre os resultados obtidos para os modelos 1,2h, as variações de M_z , com uma majoração de 19% no modelo 1b e minoração de 59% no modelo 2b. Através do perfil de velocidades no plano horizontal (Figura 54) e plano vertical (Figura 55), verifica-se uma assimetria e a indução da torção da edificação estudada produzindo os valores de torção obtidos para o modelo 1,2h-1b em relação as demais configurações de vizinhança.

Figura 54 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 1,2h-1b (z = 150 m)



Fonte: autor, extraído do ANSYS.

Figura 55 - Contorno de velocidade na direção X do modelo 1,2h-1b (y = 45 m)



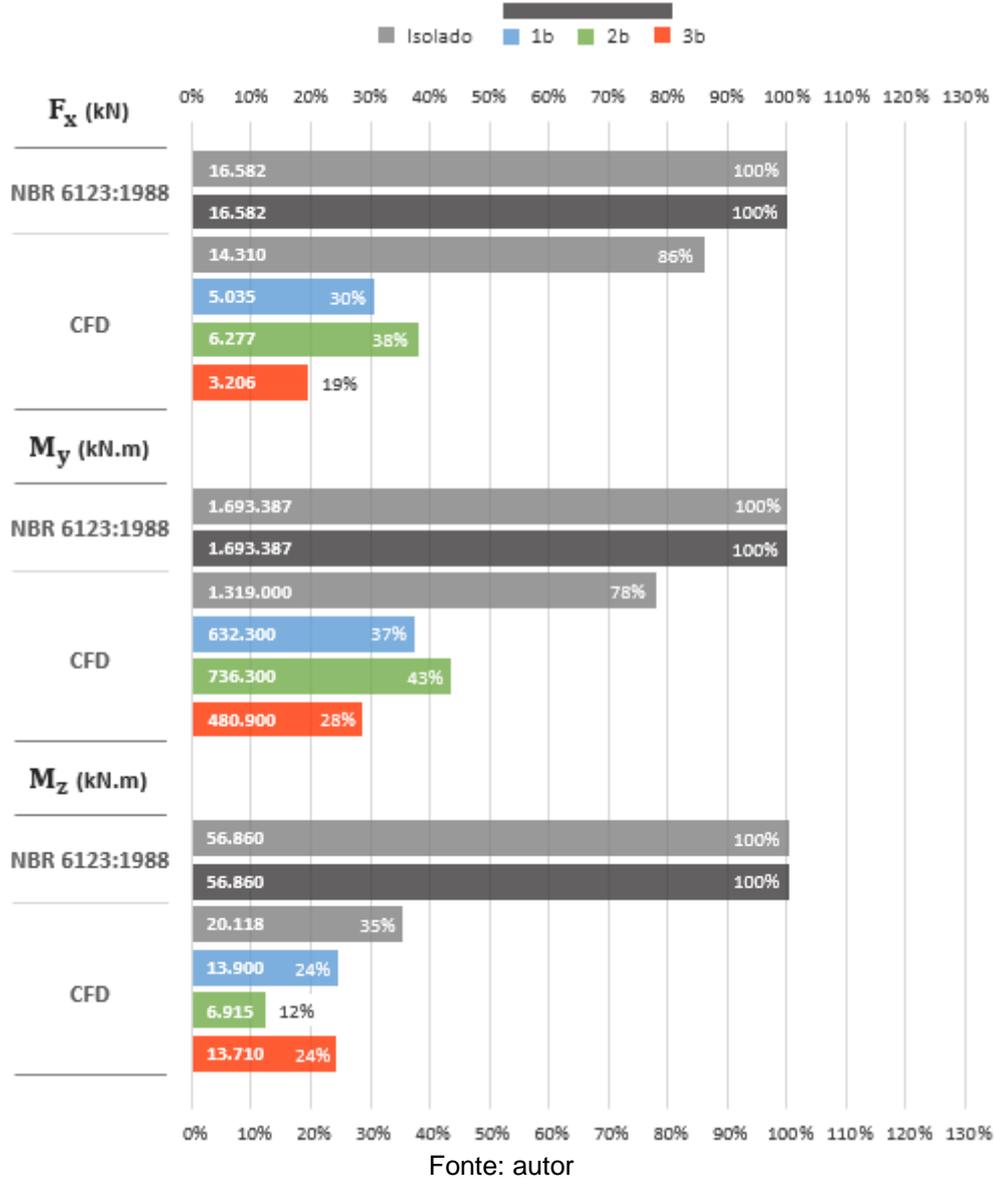
Fonte: autor, extraído do ANSYS.

5.4 Resultados dos modelos 1,6h

Distantes a 131,02 m do CAARC *Standard Tall Building*, as edificações vizinhas dos modelos 1,6h seguem a mesma composição dos demais modelos. Desta forma, perante a NBR 6123:1988, as vizinhanças não interferem no cálculo das solicitações referente ao efeito de vizinhança. A Figura 56 a seguir, apresenta a variação das solicitações (cisalhamento, momento de tombamento e torção) obtidas em análise numérica computacional em função do posicionamento local (b) do modelo de

vizinhança em comparativo aos valores das solicitações estimadas através da norma de vento brasileira (NBR 6123:1988) para escoamento de baixa turbulência.

Figura 56 - Solicitações dos modelos 1,6h



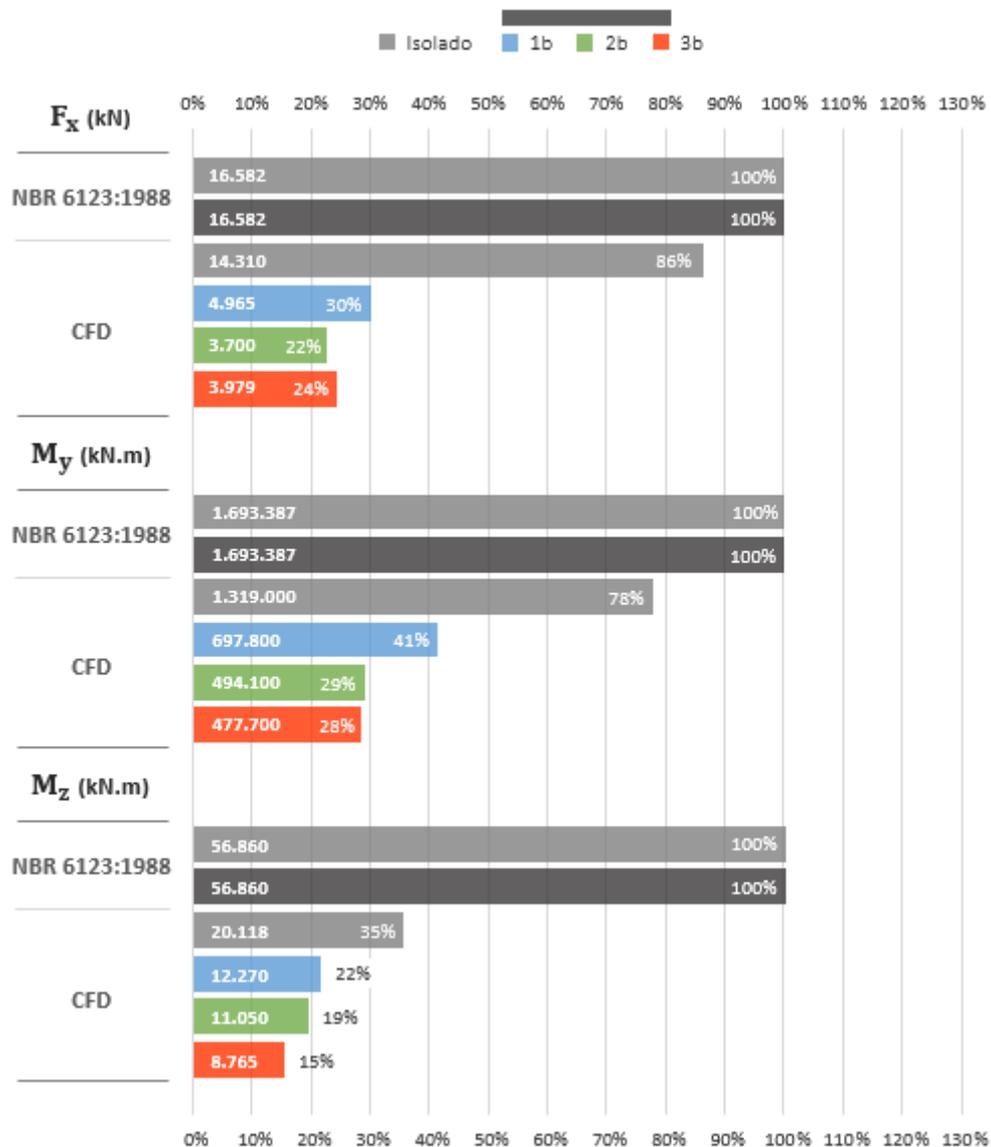
Através da análise dos resultados, evidenciam-se os resultados do modelo 1,6h-2b onde ocorre divergência da tendência das solicitações em relação aos demais resultados obtidos. Os valores médios de minoração dos modelos 1,6h oriundos do efeito de vizinhança para F_x , M_z e M_y são, respectivamente, de 66,18%, 53,25% e 42,80%.

5.5 Resultados dos modelos 2,0h

As solicitações dos modelos com vizinhança posicionada no contorno 2,0h foram estimadas de acordo com a norma brasileira e comparadas com os resultados obtidos nas simulações fluidodinâmicas realizadas.

Conforme apresentado na Figura 57, as variações dos resultados em relação ao posicionamento local apresentam um baixo desvio padrão, indicando um possível ponto neutro para a influência do efeito de vizinhança nas solicitações, ou seja, onde as variáveis (posicionamento global e local) não induzem mudanças significativas nos resultados obtidos.

Figura 57 - Solicitações dos modelos 2,0h



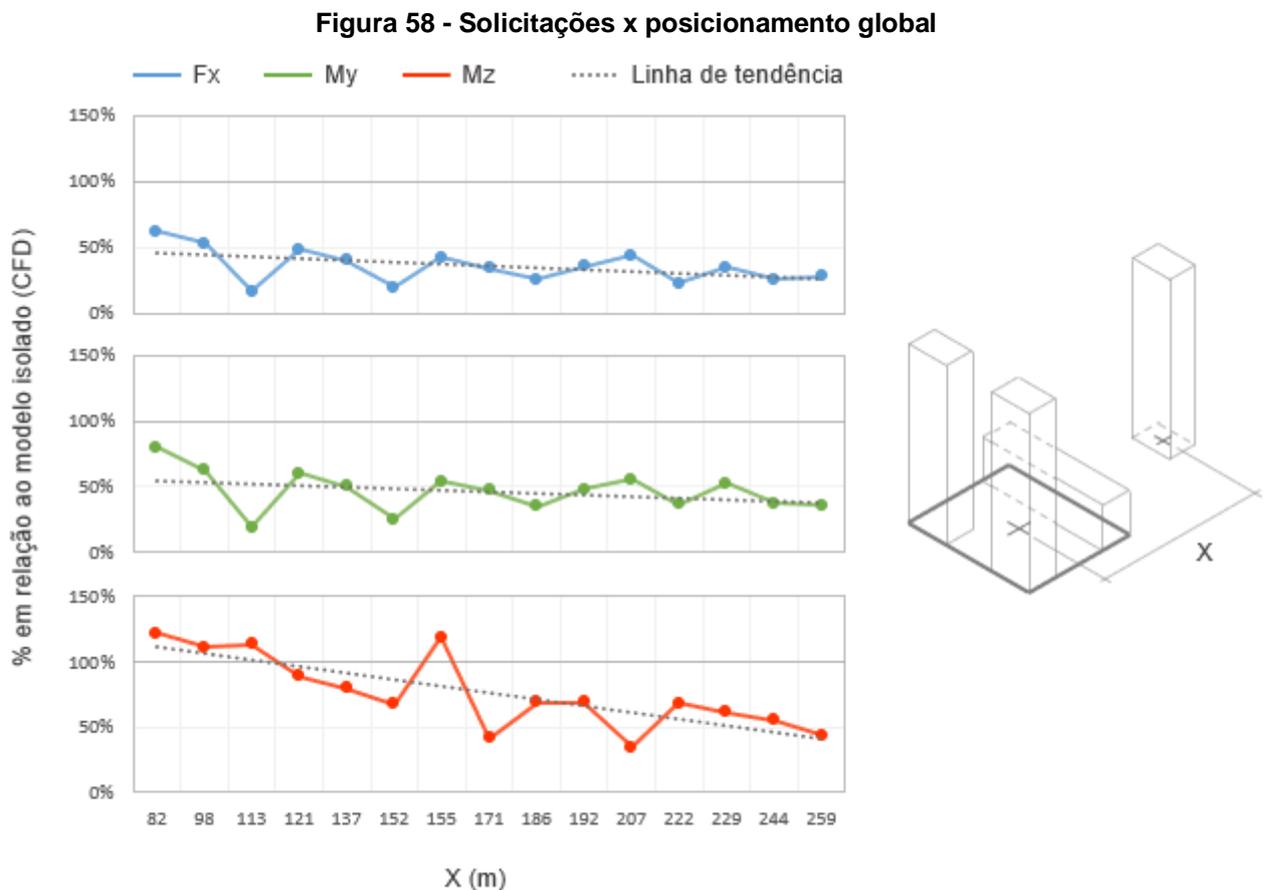
Fonte: autor

5.6 Correlação de variáveis

Nesta seção serão apresentados os resultados da correlação entre as variáveis relevantes no que diz respeito a influência do efeito de vizinhança nas solicitações devido a ação do vento com o objetivo de decompor e analisar os resultados apresentados nas seções 5.1 a 5.5.

5.6.1 Posicionamento global

Uma das variáveis determinantes no que tange a influência do efeito de vizinhança na ação do vento é o quão distante as edificações vizinhas se encontram posicionadas da edificação analisada. Com a finalidade de verificar a influência do posicionamento global nas solicitações obtidas através das simulações CFD realizadas neste trabalho, os resultados foram ordenados em ordem crescente em função da distância entre o centroide (X) do modelo de vizinhança e da edificação estudada conforme Figura 58.



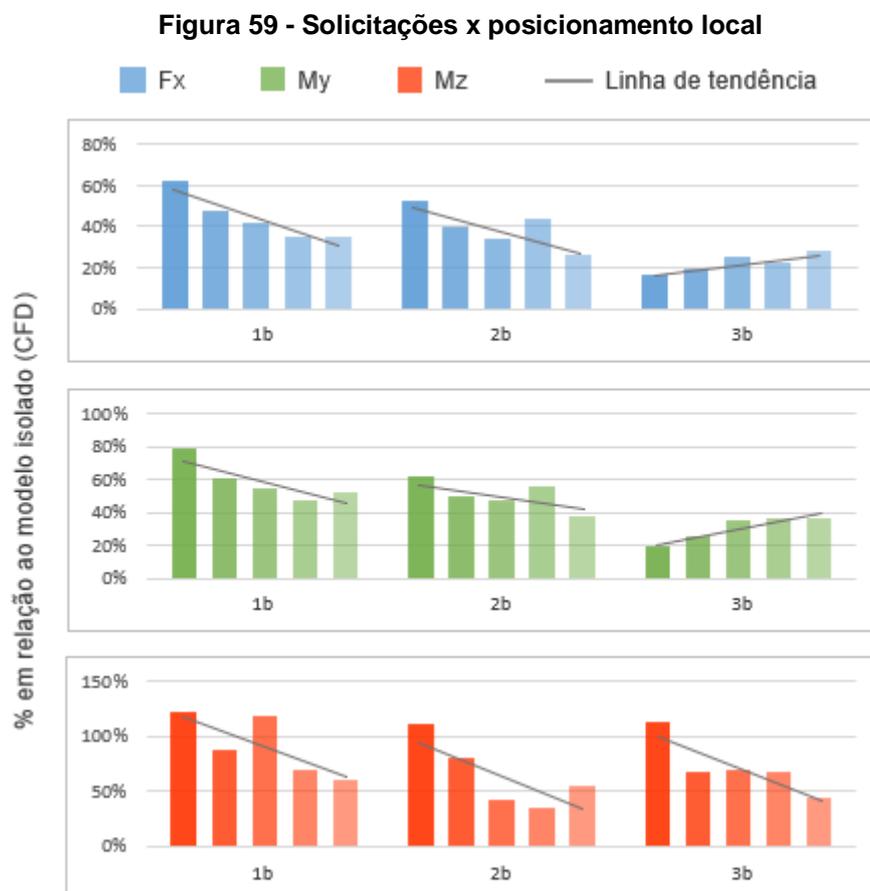
Fonte: autor

A partir dos gráficos da Figura 58 é possível observar uma tendência onde as solicitações diminuem à medida que o modelo de vizinhança se afasta da edificação analisada. Além disso, observa-se que apenas os resultados de momento de torção apresentam regiões com valores superiores a 100%, ou seja, onde ocorre a majoração da solicitação em relação ao modelo isolado.

5.6.2 Posicionamento local

Além do posicionamento global, a discretização dos resultados a partir da configuração interna do modelo de vizinhança também permite demonstrar e evidenciar o efeito de vizinhança e sua influência na ação do vento entre as composições estudadas.

Os gráficos da Figura 59 apresentam valores comparativos das solicitações de cisalhamento (F_x), momento de tombamento (M_y) e torção (M_z) agrupados referente ao posicionamento local dos modelos (1b, 2b e 3b) e ordenados em ordem crescente em função dos contornos de posicionamento global.



Fonte: autor

Os gráficos dos grupos 1b e 2b apresentam comportamento semelhante para as três solicitações analisadas, onde a tendência desenvolve-se decrescente a medida em que os contornos locais aumentam. Porém esta correlação não se mantém no grupo 3b, onde a tendência apresenta-se crescente para valores de cisalhamento e momento de tombamento. Conforme já apresentado nas seções 5.2 e 5.3 do presente trabalho, este efeito ocorre em função da turbulência da esteira das edificações vizinhas e da recirculação do fluxo sobre a edificação de menor altura.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a influência exercida pelo efeito de vizinhança nas solicitações oriundas da ação do vento sobre um edifício padrão através do estudo comparativo mediante metodologia proposta pela norma ABNT NBR 6123:1988 e simulações computacionais fluidodinâmicas.

O fator de vizinhança, segundo a NBR 6123:1988, tem como função majorar as solicitações atuantes em uma edificação tendo em consideração a presença de edificações vizinhas. Perante as pesquisas bibliográficas realizadas, constatou-se preliminarmente que a vizinhança efetivamente origina alterações no campo aerodinâmico, e conseqüentemente, interfere nestas solicitações.

Constatou-se também, através da validação das condições de contorno e configurações utilizadas no modelo de simulação fluidodinâmica computacional, que as simulações CFD realizadas possuem grande similaridade em comparação aos ensaios experimentais de escala reduzida de edificações em túnel de vento. Além disso, verificou-se de fundamental importância a adequada configuração e modelagem das simulações numéricas para a obtenção de resultados realísticos e confiáveis.

Através da realização de uma série de simulações computacionais e seguindo recomendações de pesquisas similares, estudou-se quinze composições de vizinhança distintas, sendo três disposições distintas de vizinhança, onde que para cada uma das situações foram posicionados no limite de cada um dos cinco contornos de estudo definidos. Dentre estes contornos, dois foram posicionados dentro do limite estipulado pela NBR 6123:1988 para a consideração da influência do efeito de vizinhança. Foram analisadas as forças resultantes na direção do escoamento (x), o momento fletor em torno do eixo y em relação a base da edificação, e o momento de torção em torno do centroide da seção transversal da edificação.

No intuito de correlacionar os resultados obtidos nas simulações fluidodinâmicas diante das solicitações estimadas segundo a NBR 6123:1988 para os modelos adotados, observou-se que a metodologia indicada pela norma brasileira conduz a estimativas conservadoras em relação as análises numéricas, apresentando uma redução média de aproximadamente 67% dos resultados entre as metodologias.

No que tange as análises computacionais, constatou-se também que, de modo geral, as solicitações obtidas para os modelos onde há a presença das edificações vizinhas em relação ao modelo isolado apresentam uma tendência de minoração a medida em que estas se afastam da edificação apenas ocorrendo a majoração para valores de momento de torção em alguns casos. Como já citado neste trabalho, este efeito se desenvolve concomitantemente a canalização do fluxo do ar entre as edificações vizinhas de maior altura devido ao efeito Venturi, a recirculação do escoamento oriundo da deflexão vertical do ar sobre a superfície à barlavento da edificação vizinha de menor altura, e do efeito de blindagem proporcionado por todas as edificações vizinhas.

Desta forma, conclui-se que é de fundamental importância a análise das condições das edificações vizinhas interferentes na determinação das ações originadas pelo vento nas edificações, e também, que em casos onde a edificação analisada seja muito esbelta ou apresente seção consideravelmente distinta das contempladas pela norma, recomenda-se a realização de estudo detalhado em ensaios de túnel de vento ou em simulações fluidodinâmicas computacionais que, diante do exposto no presente trabalho, trazem resultados confiáveis, realistas e precisos evitando o superdimensionamento da estrutura ou riscos contra a segurança da edificação.

O presente trabalho, em função de sua realização, proporcionou ao acadêmico um abrangente conhecimento teórico e prático sobre a ação do vento em edificações, bem como sobre sua aplicabilidade no campo da fluidodinâmica computacional.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação das composições de vizinhança utilizadas neste trabalho em ensaios de escala reduzida em túnel de vento permitindo a validação dos resultados das análises numéricas deste trabalho e a calibração das configurações utilizadas nas simulações CFD. Além disso, seguem outras sugestões:

- Estudo do efeito de vizinhança para modelos de vizinhança com edificações com parâmetros geométricos (altura, seção transversal, posicionamento global e local) diferentes;
- Aplicação dos modelos estudados com a variação do ângulo de incidência do escoamento;

- Investigação da resposta dinâmica a partir de um modelo aeroelástico para as quinze composições de vizinhança estudadas.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, F. A. **Determinação experimental em túnel de vento dos efeitos estáticos de proteção causados por edificações vizinhas: Contribuição para a revisão dos fatores de vizinhança da NBR-6123.** 2015. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- ALGABA, F. G. **Avaliação de métodos teóricos para estimativa do comportamento de edifícios altos sob a ação de vento turbulento.** 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- ANDERSON, J. D. **Computational fluid dynamics: the basics with applications.** 1. ed. 287 p. McGraw-Hill, 1995.
- ANSYS, Inc. **Ansys CFX-Solver Modeling Guide.** Release 16.2. Canonsburg, 2015.
- _____, Inc. **Documentation.** Release 17.0, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1988.
- BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios.** 2. ed. 81 p. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1989.
- _____, J. **Tópicos de normas vento.** 2. ed. 96 p. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1990.
- _____, J. **O vento na engenharia estrutural.** 1. ed. 166 p. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- _____, J. **Aerodinâmica das construções.** 3. ed. 264 p. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- BLOCKEN, B. **Computational Fluid Dynamics for Urban Physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations.** Building and Environment, v. 91, p. 219-245, 2015.
- CARPEGGIANI, Elvis Antônio. **Determinação dos efeitos estáticos de torção em edifícios devidos à ação do vento.** 2004. 184 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- CHING, F. D. K.; ONOUYE, B. S.; ZUBERBUHLER, D. **Sistemas estruturais ilustrados: padrões, sistemas e projeto.** Tradução de Alexandre Salvaterra. 1. ed. 319 p. Porto Alegre: Bookman, 2010.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. **Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício**. Revista Ambiente Construído, v. 11, p. 145-158, 2011.

DOSE, B. **CFD Simulations of a 2.5 MW wind turbine using ANSYS CFX and OpenFOAM**. 149 f. Thesis (Master Thesis) – Faculty of Computer Science and Electrical Engineering, University of Applied Science Kiel, Oldenburg, 2013.

FRANKE, J. **Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering, Yokohama, Japan, 2006.

FONTOURA, Patrícia C. C. N. de O. **Estudo experimental em túnel de vento dos efeitos de vizinhança em edifícios altos**. 2014. 255 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. 220 p. São Paulo: Atlas, 2008.

GONÇALVES, Roberto Martins et al. **Ação do vento nas edificações: Teoria e Exemplos**. São Carlos: EESC/USP, 2004.

HE, B. J.; YANG, L.; YE, M. **Strategies for creating good wind environment around Chinese residences**. Sustainable Cities and Society, 10 ed. p. 174-183, 2014.

HUANG, S.; LI, Q. S.; XU, S. **Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD**. Journal of Constructional Steel Research, v. 63, p. 612–627, 2007.

HUI, Y. et al. **Pressure and flow field investigation of interference effects on external pressures between high-rise buildings**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 115, p. 150-161, 2013.

KHANDURI, A. C. et al. **Wind-induced interference effects on buildings – a review of the state-of-the-art**. Engineering Structures, 7. ed. p. 617-630, 1998.

LAVÔR, T. F. A. **Análise dinâmica do modelo padrão de edifício alto sob a ação do vento**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

MAITELLI, C. W. S. De. **Simulação de escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional**. 2010. 183 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em ciência e engenharia de petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. 420 p. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004.

MOU, B. et al. **Numerical simulation of the effects of Building dimensional variation on wind pressure distribution.** Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, v. 11, p. 293-309, 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Perspectiva da Urbanização Mundial: Revisão 2018.** New York, 2018.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow.** 1. ed. p. 106. Washington DC: Hemisphere, 1980.

PORCIÚNCULA, C. B. da. **Simulação Fluidodinâmica Computacional de Processos de Separação Por Membranas.** 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PRODANOV, C. C.; DE FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas de Pesquisa e do Trabalho Acadêmico.** 2. ed. p. 277. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013.

REVUZ, Julia. **Numerical simulation of the wind flow around a tall building and its dynamic response to wind excitation.** 276 f. Thesis (PhD Thesis) – Department of Civil Engineering, University of Nottingham, 2011.

SILVA, K. R. De A. **Regiões de Estabilidade de Métodos Numéricos para Equações Diferenciais.** 2007. 65 f. Trabalho de curso (Licenciatura em Matemática) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

TOMINAGA, Y. et al. **AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 96, p. 1749-1761, 2008.

VASCONCELLOS, J. F. V. De. **Um método de volumes finitos usando malhas não-estruturadas para o estudo de escoamentos com frentes livres.** 1999. 271 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.** 2. ed. p. 517, 2007.

VIEIRA, G. S. **Estudo Experimental dos Esforços Solicitantes em um Edifício Alto Devidos à Ação do Vento Considerando a Influência de Edificações Vizinhas.** 2016. 228 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

APÊNDICE A – RESULTADOS DO CONTROLE DE MALHA

Isolado			
Nós		Elementos	
426240		395804	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,017	0,0723
Razão de aspecto			
1,001	51,499	3,770	7,1806
Qualidade ortogonal			
0,21	1	0,993	0,046

0,4h-1b			
Nós		Elementos	
468844		431118	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,061	0,129
Razão de aspecto			
1,002	59,394	6,495	10,875
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,973	0,088

0,4h-2b			
Nós		Elementos	
469674		431938	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,059	0,128
Razão de aspecto			
1,002	59,394	6,481	10,868
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,973	0,088

0,4h-3b			
Nós		Elementos	
469674		431938	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,059	0,127
Razão de aspecto			
1,002	59,394	6,481	10,868
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,973	0,088

0,8h-1b			
Nós		Elementos	
471251		433496	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,058	0,128
Razão de aspecto			
1,002	59,394	6,461	10,854
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,973	0,087

0,8h-2b			
Nós		Elementos	
472247		434480	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,055	0,127
Razão de aspecto			
1,001	59,394	6,446	10,845
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,974	0,087

0,8h-3b			
Nós		Elementos	
472247		434480	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,055	0,127
Razão de aspecto			
1,001	59,394	6,440	10,845
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,974	0,087

1,2h-1b			
Nós		Elementos	
475650		437740	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,057	0,130
Razão de aspecto			
1,002	59,394	6,447	10,804
Qualidade ortogonal			
0,164	1	0,973	0,088

1,2h-2b			
Nós		Elementos	
471749		433988	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,055	0,127
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,449	10,851
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,974	0,087

1,2h-3b			
Nós		Elementos	
470172		432430	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,057	0,127
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,475	10,863
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,973	0,087

1,6h-1b			
Nós		Elementos	
471998		434234	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,061	0,128
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,445	10,845
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,973	0,087

1,6h-2b			
Nós		Elementos	
469840		432102	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,813	0,059	0,127
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,479	10,866
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,973	0,088

1,6h-3b			
Nós		Elementos	
469840		432102	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,059	0,127
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,479	10,866
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,973	0,088

2,0h-1b			
Nós		Elementos	
475252		437334	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,836	0,061	0,132
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,475	10,842
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,972	0,089

2,0h-2b			
Nós		Elementos	
471168		433414	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,814	0,057	0,127
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,458	10,856
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,974	0,087

2,0h-3b			
Nós		Elementos	
468844		431118	
Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão
<i>Skewness</i>			
1,31E-10	0,810	0,061	0,129
<i>Razão de aspecto</i>			
1,002	59,394	6,495	10,875
<i>Qualidade ortogonal</i>			
0,164	1	0,973	0,088

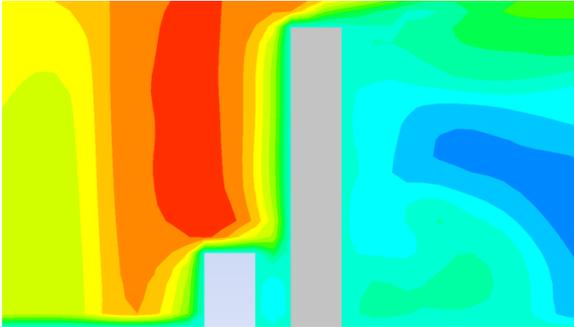
**APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO A NBR 6123:1988 E
SIMULAÇÕES CFD**

Solicitações						
Modelo	NBR 6123:1988			CFD		
	F _x (kN)	M _y (kN.m)	M _z (kN.m)	F _x (kN)	M _y (kN.m)	M _z (kN.m)
Isolado	16.582	1.693.387	56.860	14.310	1.319.000	20.118
0,4h-1b	17.357	1.711.486	71.032	8.910	1.051.100	24.427
0,4h-2b				7.592	825.000	22.340
0,4h-3b				2.391	249.400	22.740
0,8h-1b	16.928	1.701.468	68.090	6.896	794.900	17.790
0,8h-2b				5.769	662.200	16.030
0,8h-3b				2.775	338.100	13.560
1,2h-1b	16.582	1.693.387	56.860	6.045	717.200	23.920
1,2h-2b				4.865	620.000	8.331
1,2h-3b				3.620	467.100	13.810
1,6h-1b				5.035	632.300	13.900
1,6h-2b				6.277	736.300	6.915
1,6h-3b				3.206	480.900	13.710
2,0h-1b				4.965	697.800	12.270
2,0h-2b				3.700	494.100	11.050
2,0h-3b				3.979	477.700	8.765

APÊNDICE C – CONTORNO DE VELOCIDADE NA DIREÇÃO X DOS MODELOS
DE VIZINHANÇA ESTUDADOS

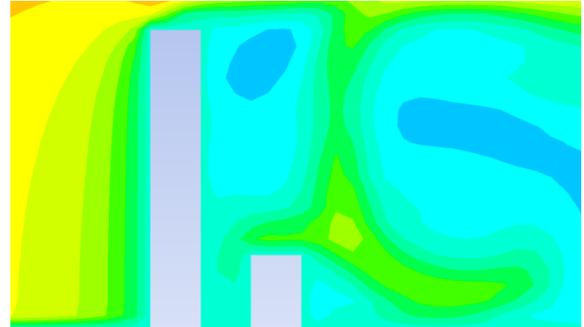
MODELO 0,4h-1b

y = 0 m

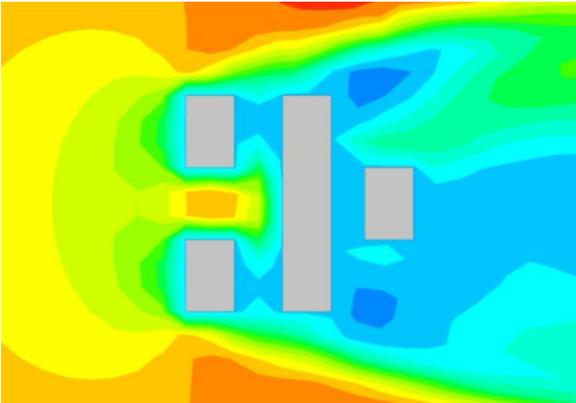


z = 30 m

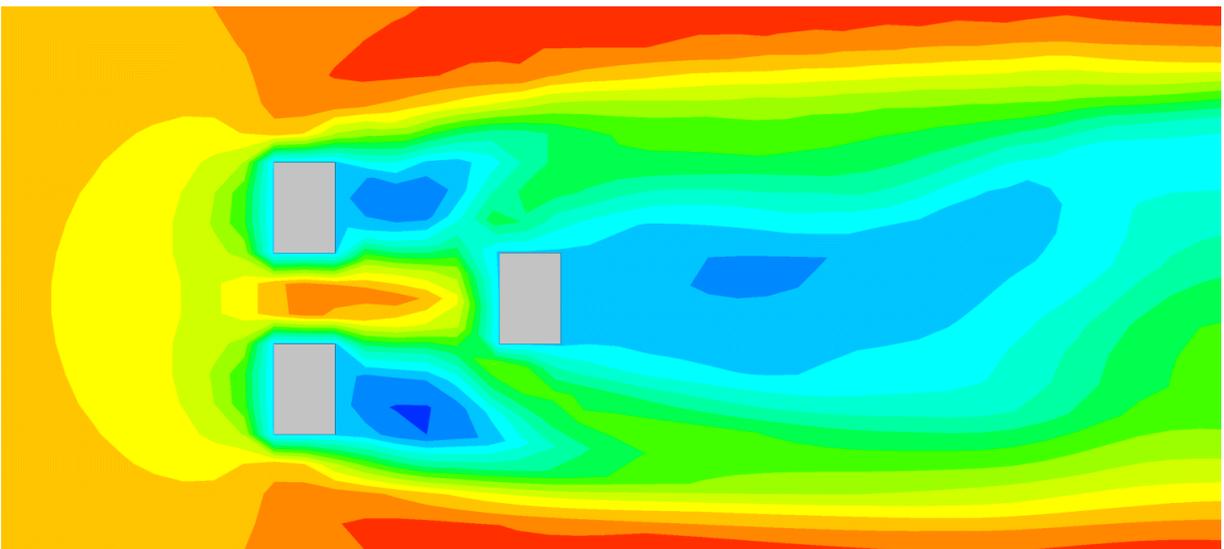
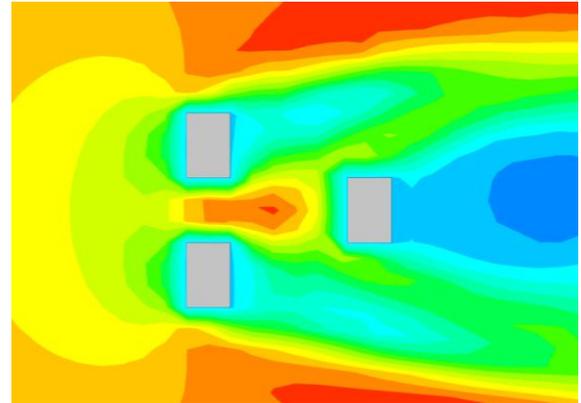
y = -45 m



z = 60 m



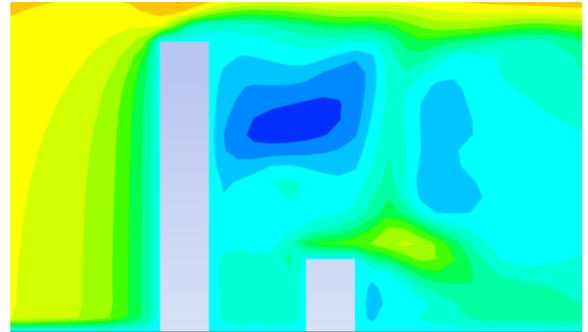
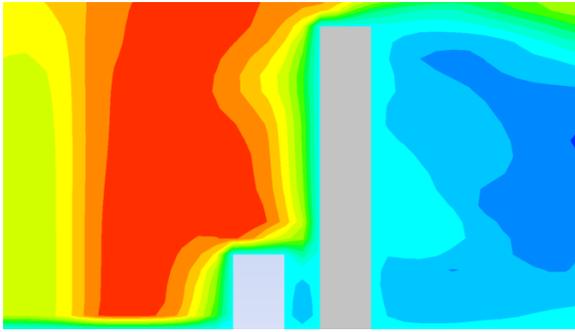
z = 150 m



MODELO 0,4h-2b

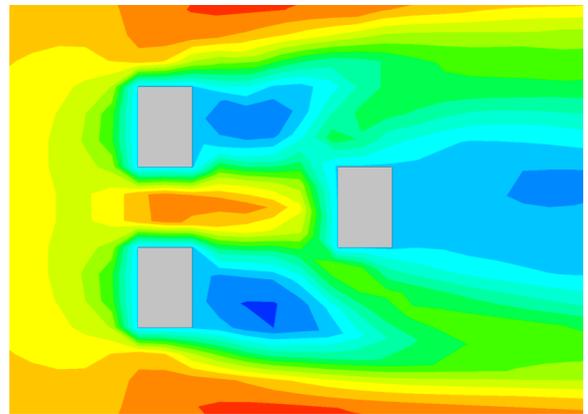
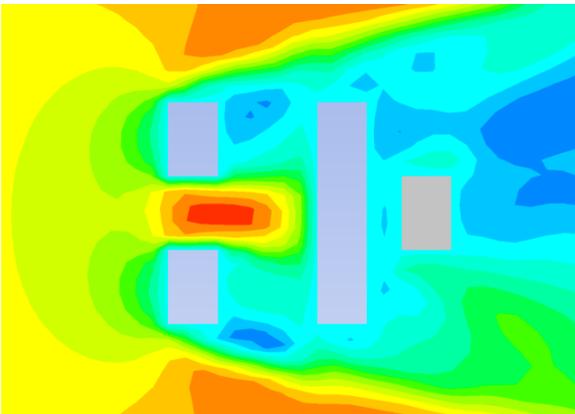
y = 0 m

y = -45 m

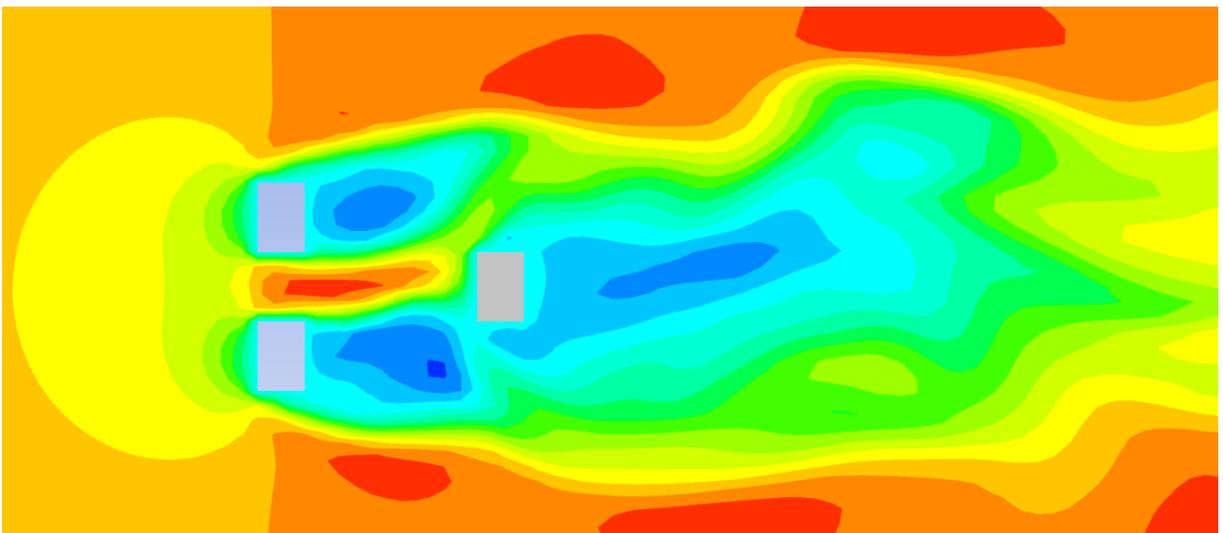


z = 30 m

z = 60 m

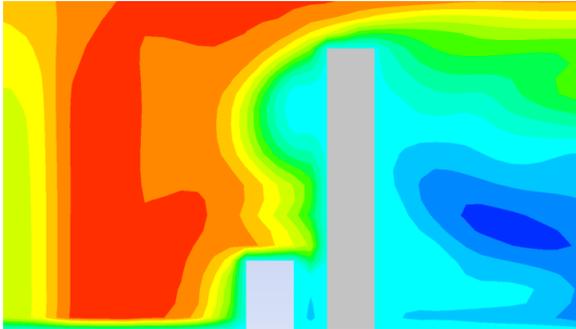


z = 150 m

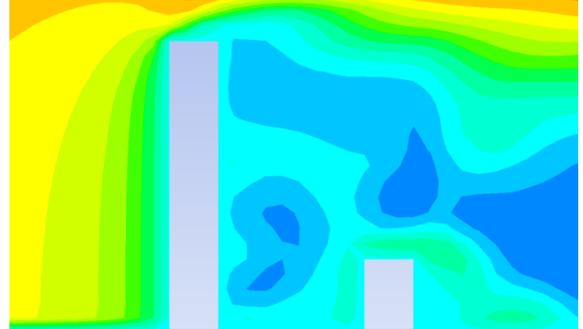


MODELO 0,4h-3b

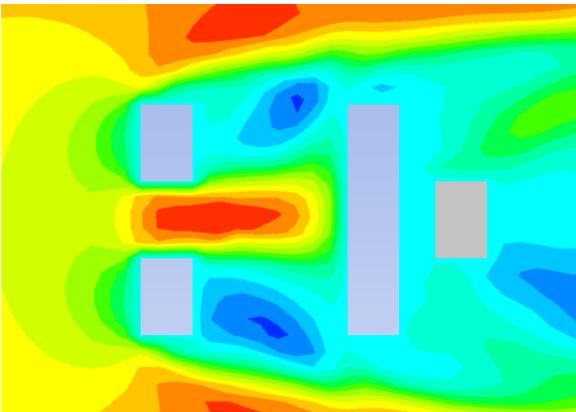
y = 0 m



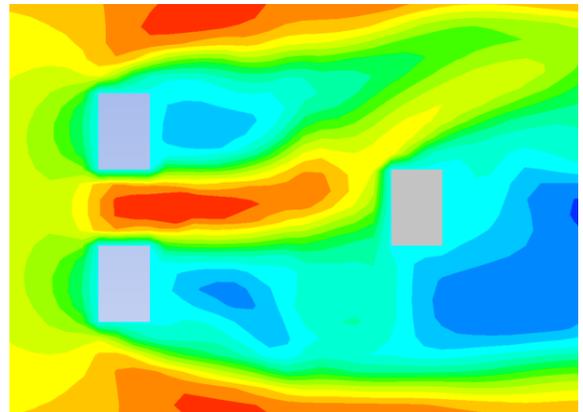
y = -45 m



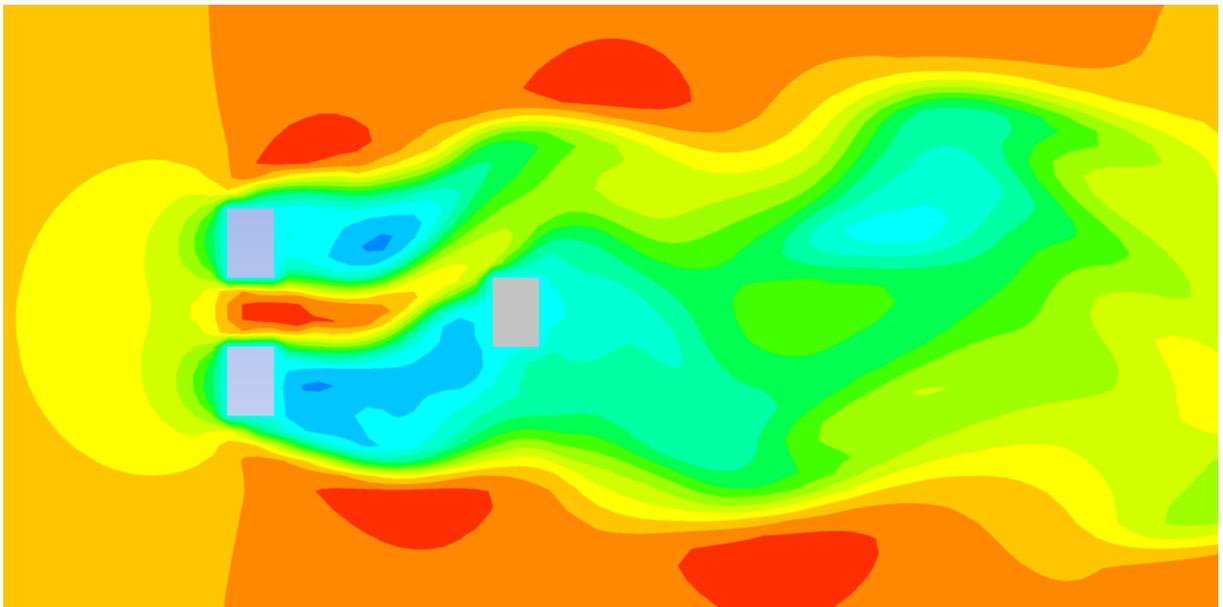
z = 30 m



z = 60 m

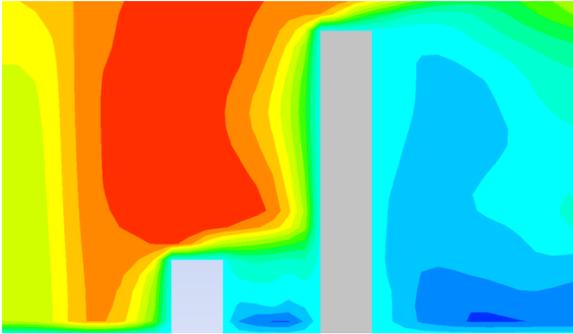


z = 150 m

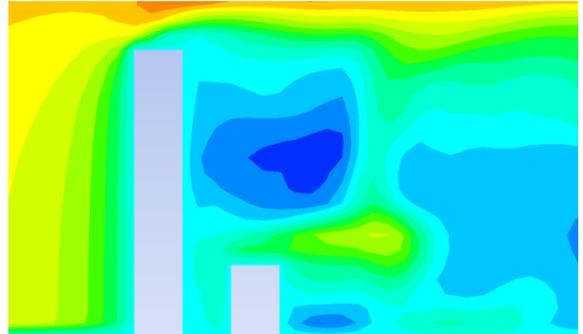


MODELO 0,8h-1b

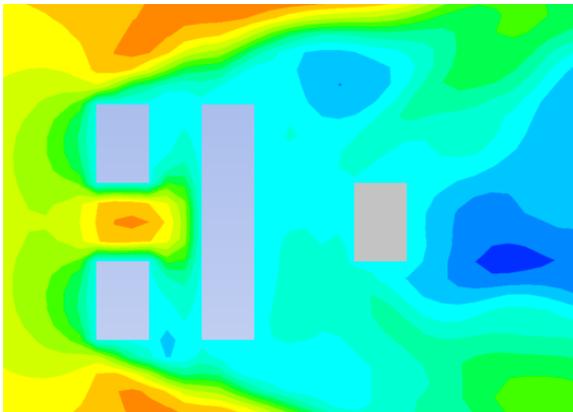
y = 0 m



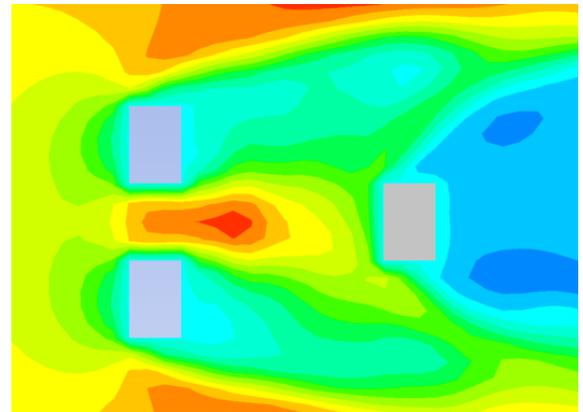
y = -45 m



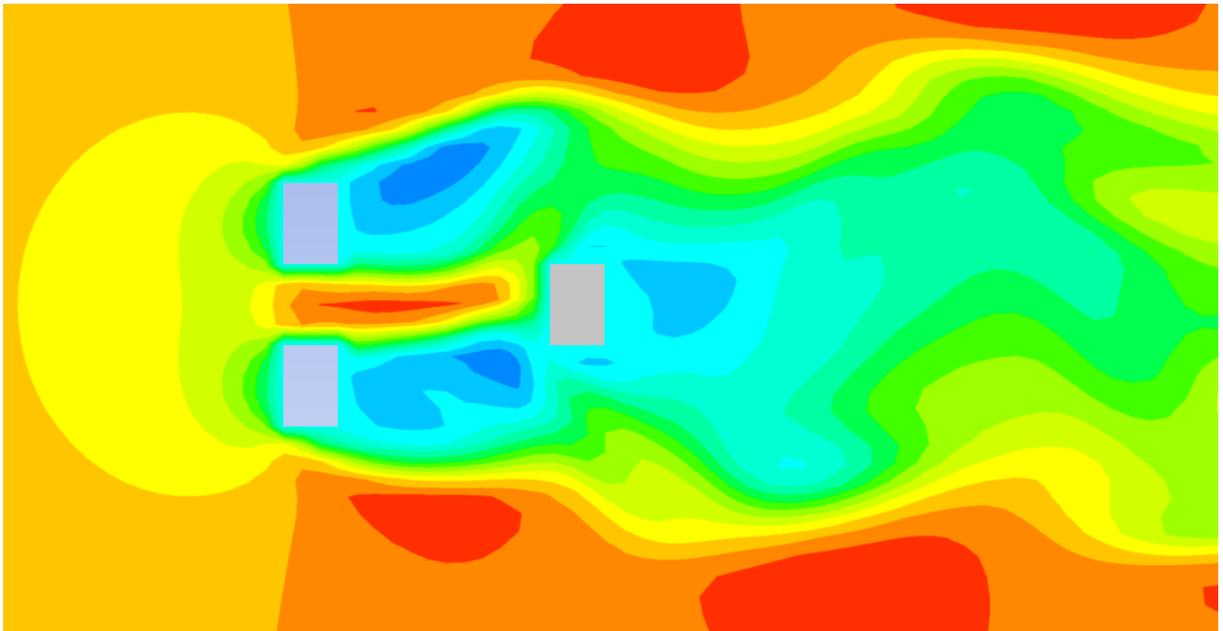
z = 30 m



z = 60 m

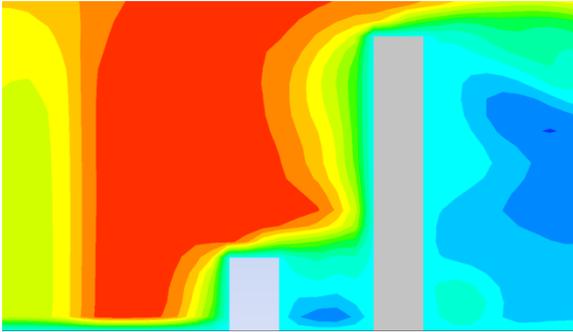


z = 150 m

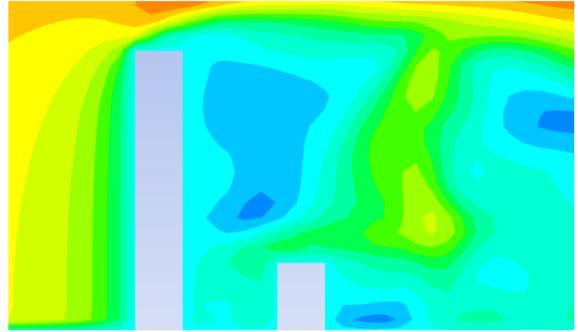


MODELO 0,8h-2b

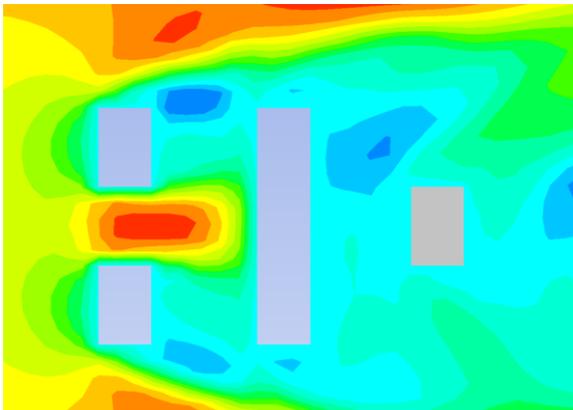
y = 0 m



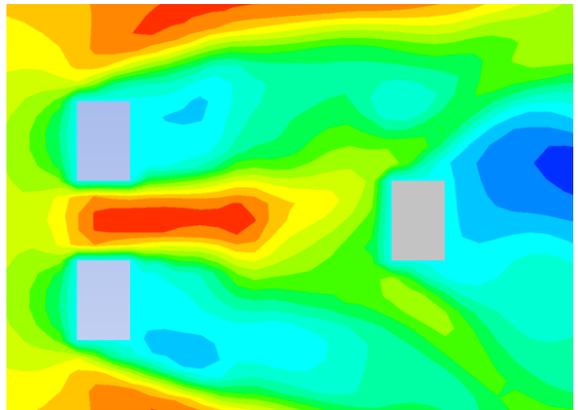
y = -45 m



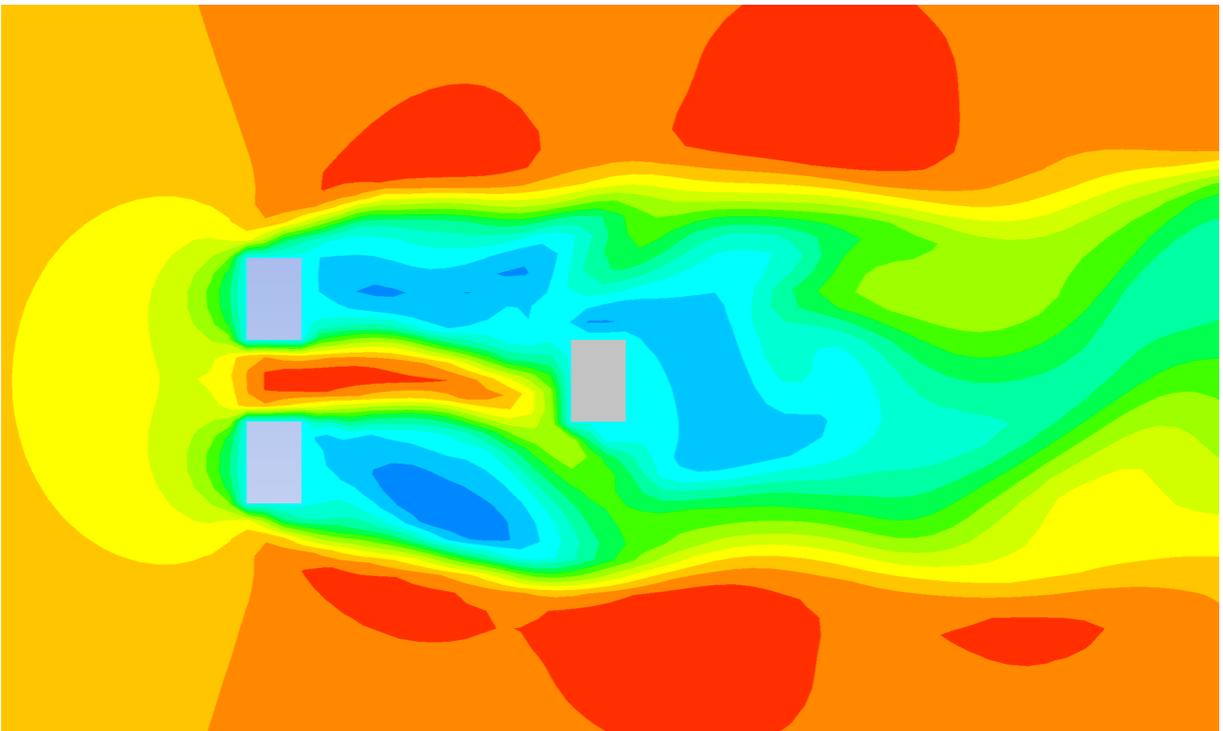
z = 30 m



z = 60 m



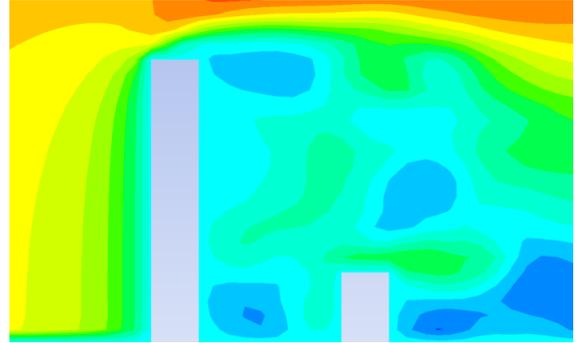
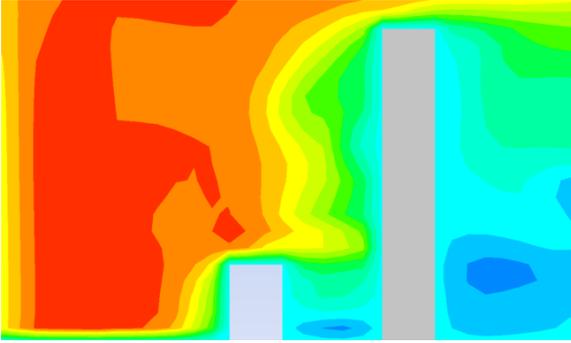
z = 150 m



MODELO 0,8h-3b

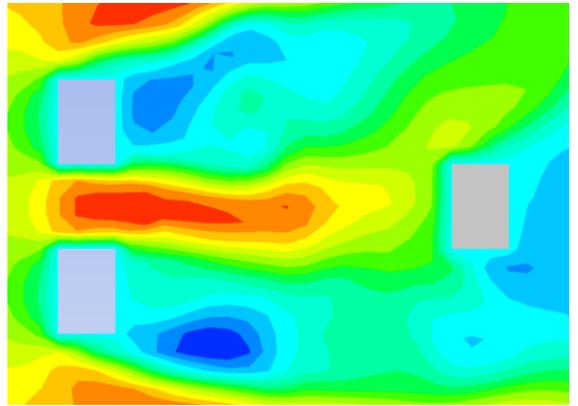
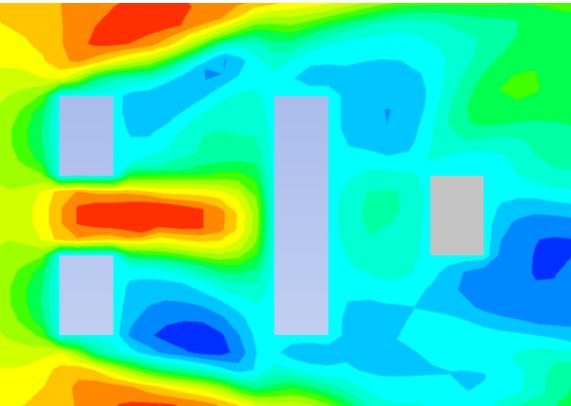
y = 0 m

y = -45 m

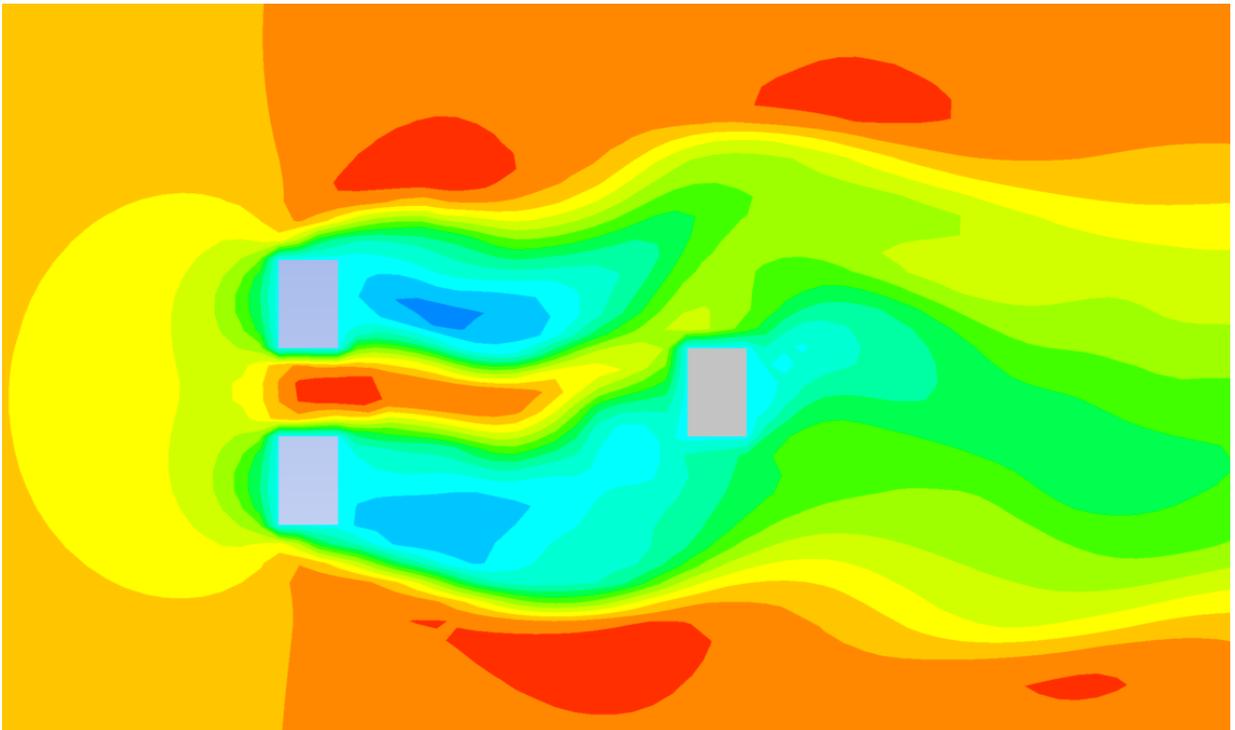


z = 30 m

z = 60 m



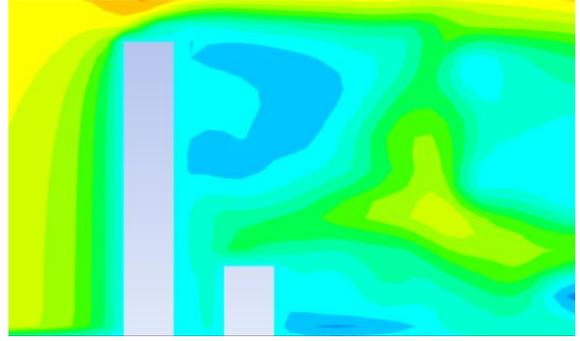
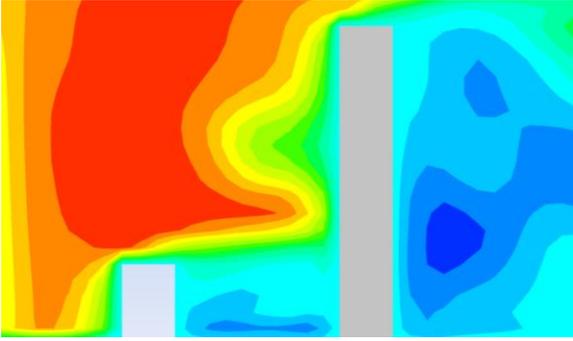
z = 150 m



MODELO 1,2h-1b

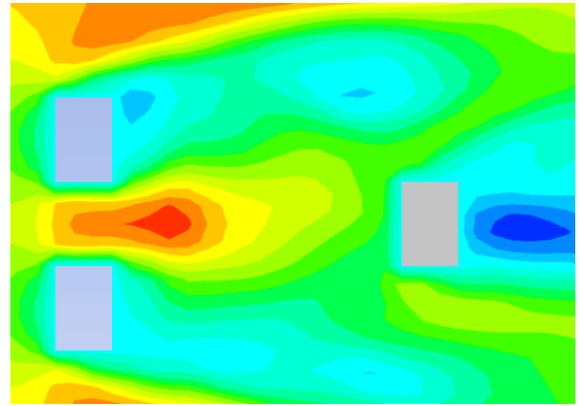
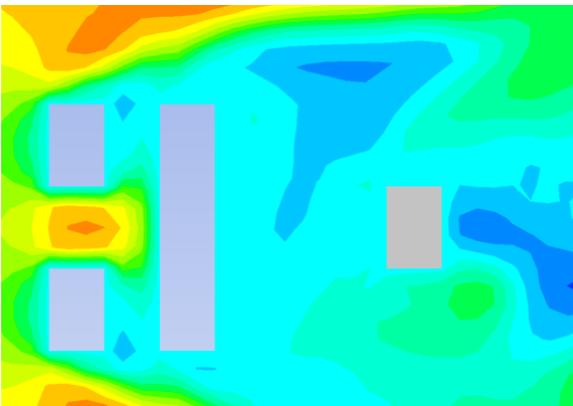
y = 0 m

y = -45 m

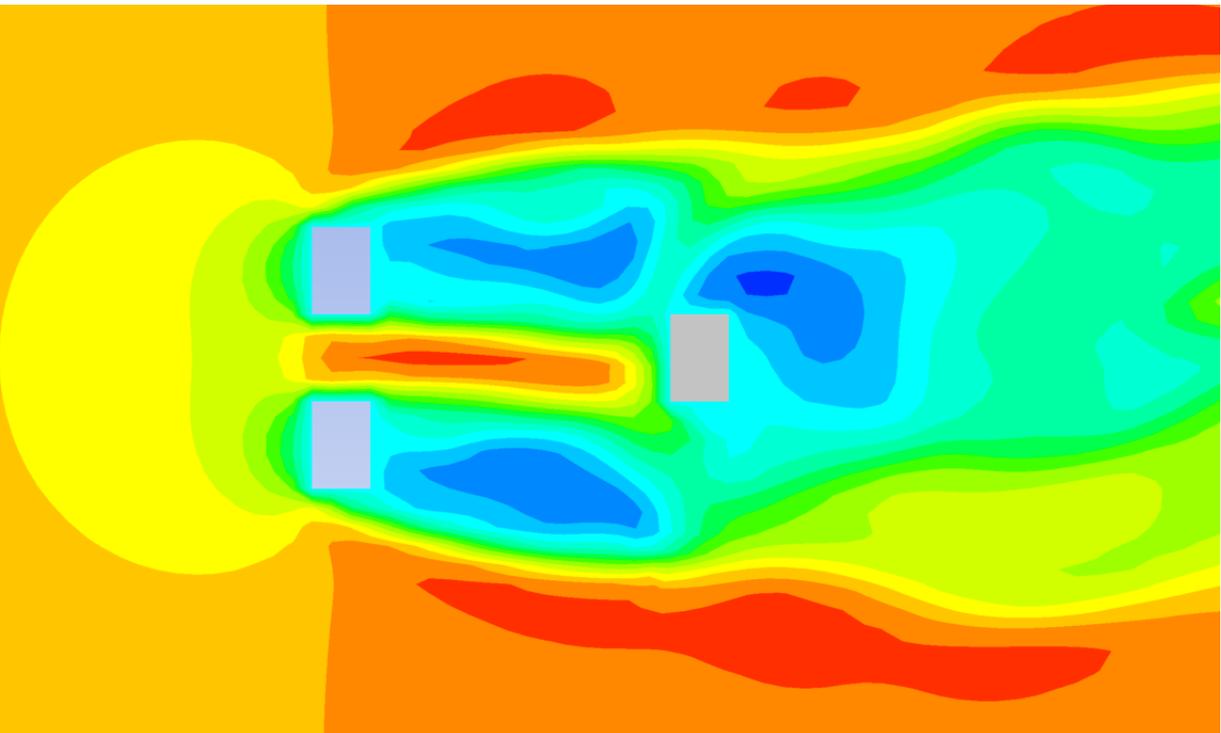


z = 30 m

z = 60 m

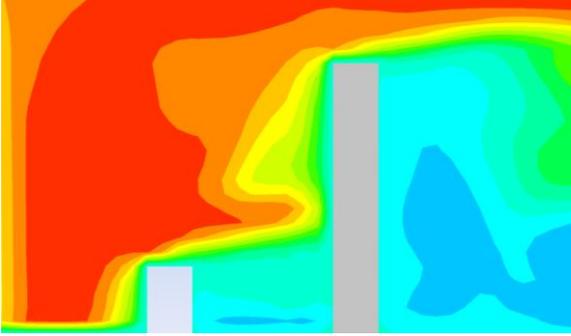


z = 150 m

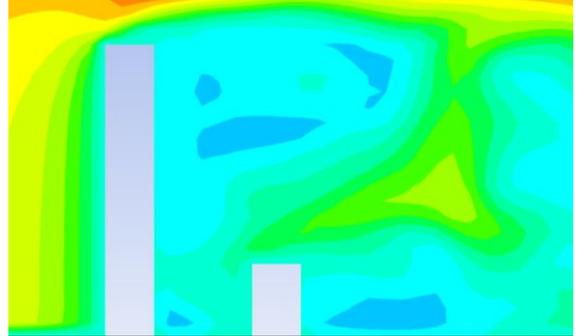


MODELO 1,2h-2b

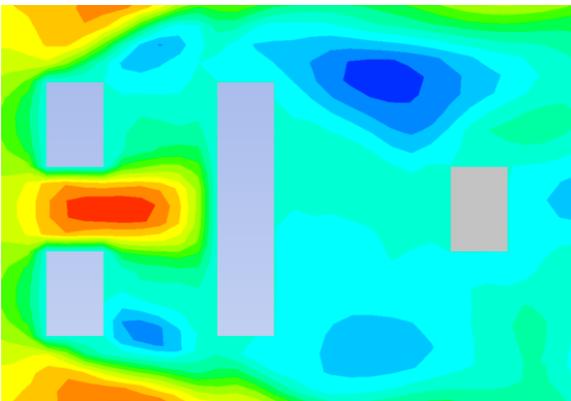
y = 0 m



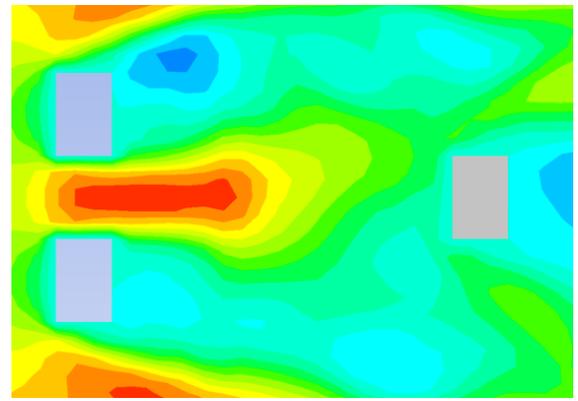
y = -45 m



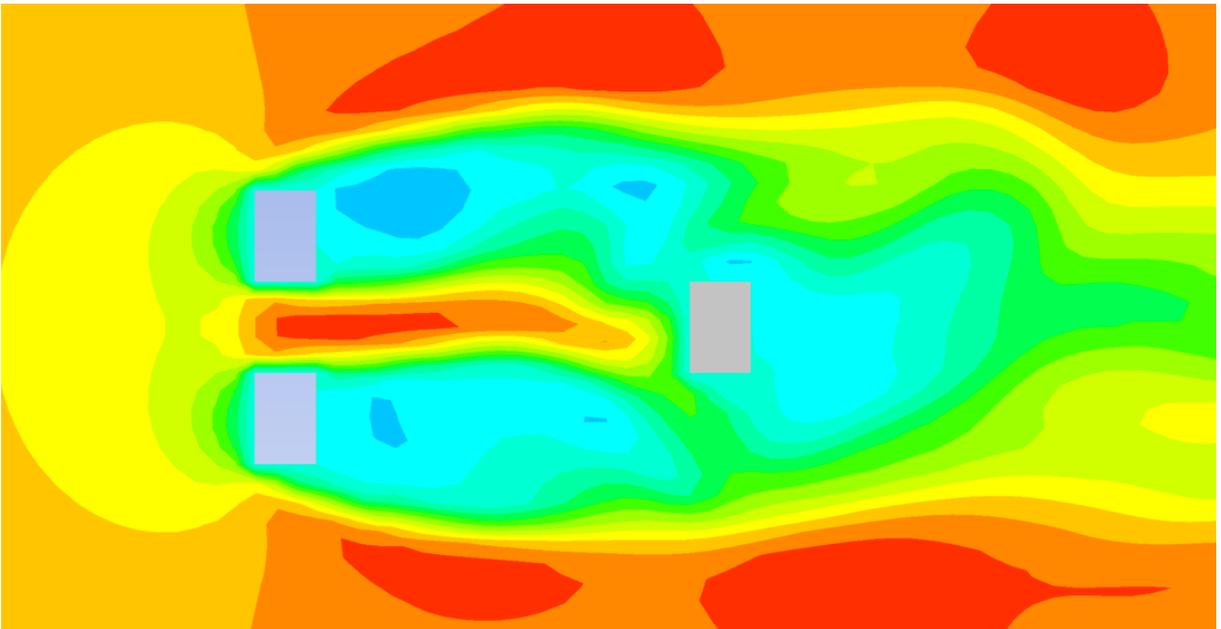
z = 30 m



z = 60 m

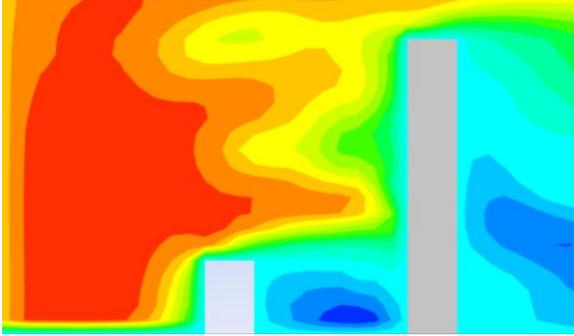


z = 150 m

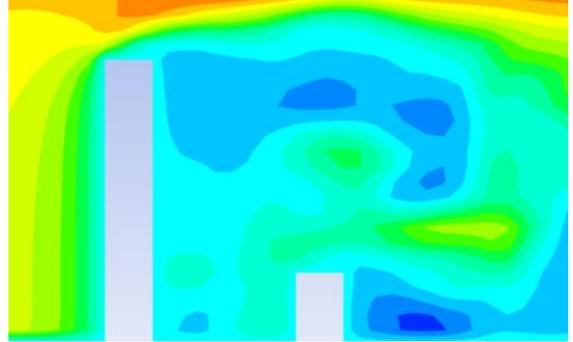


MODELO 1,2h-3b

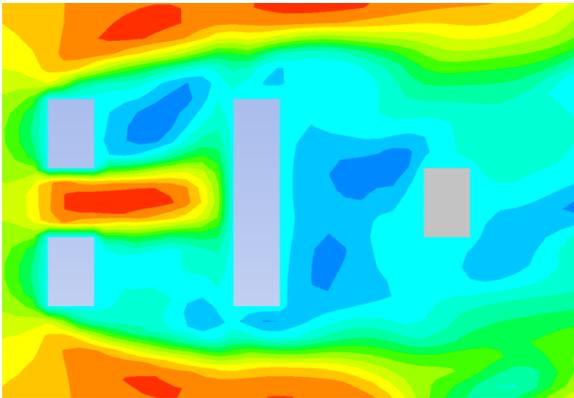
y = 0 m



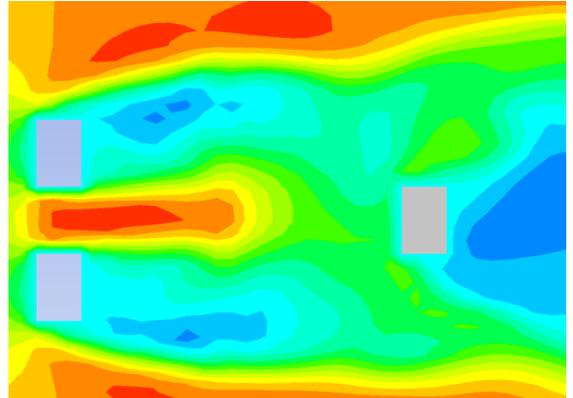
y = -45 m



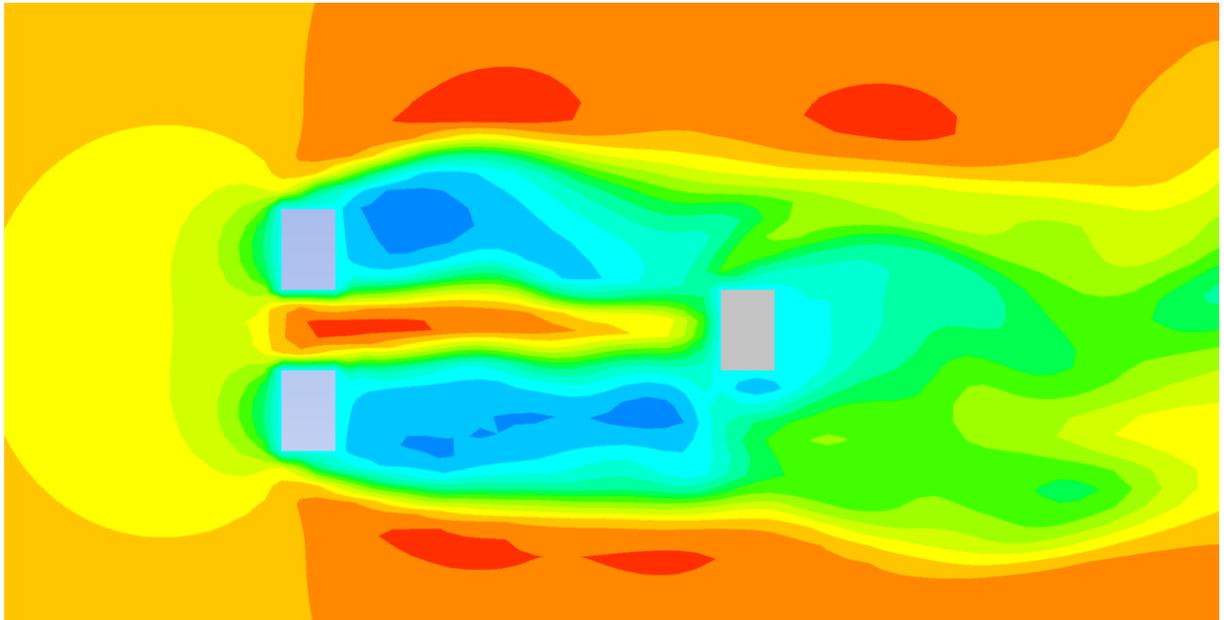
z = 30 m



z = 60 m

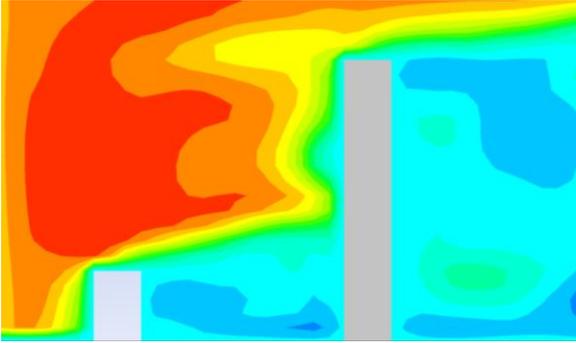


z = 150 m

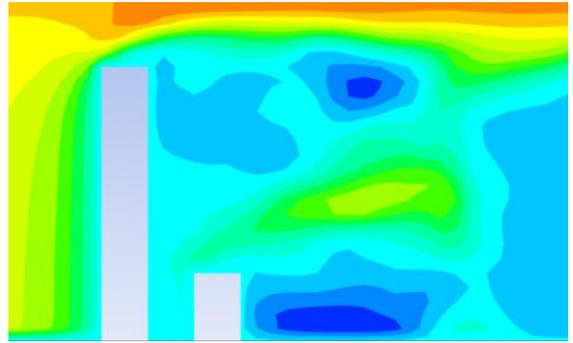


MODELO 1,6h-1b

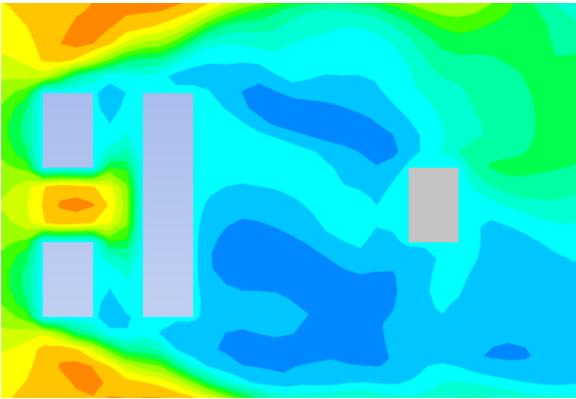
y = 0 m



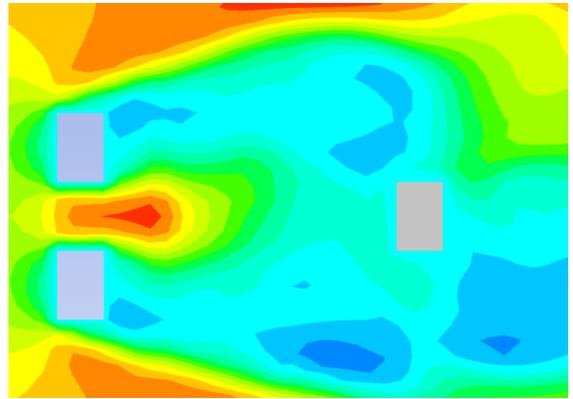
y = -45 m



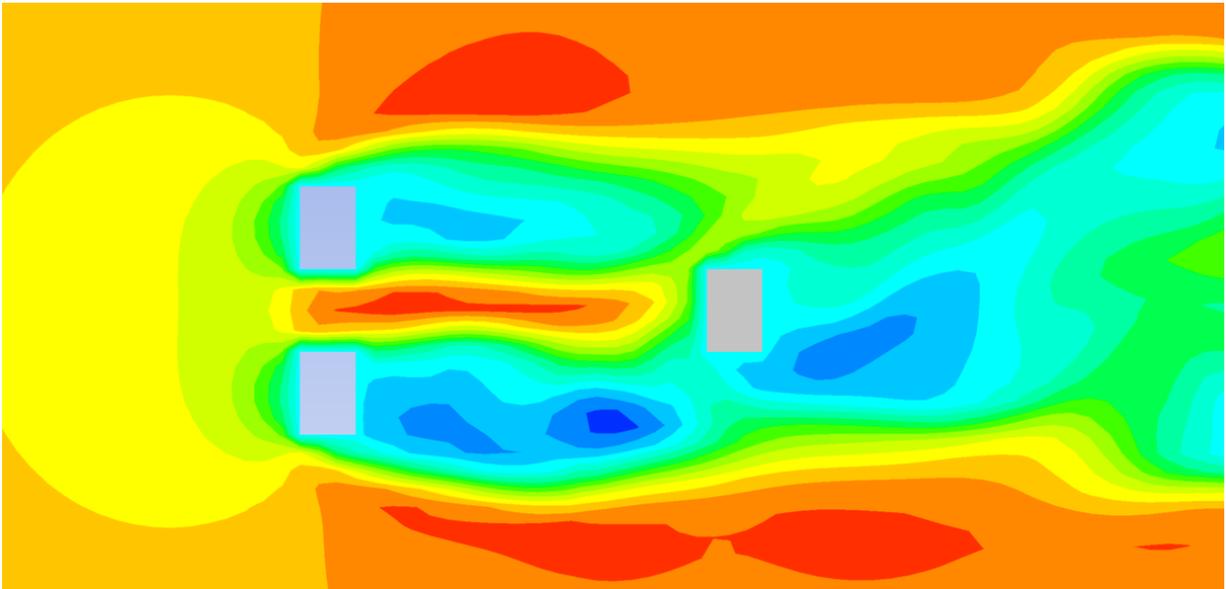
z = 30 m



z = 60 m

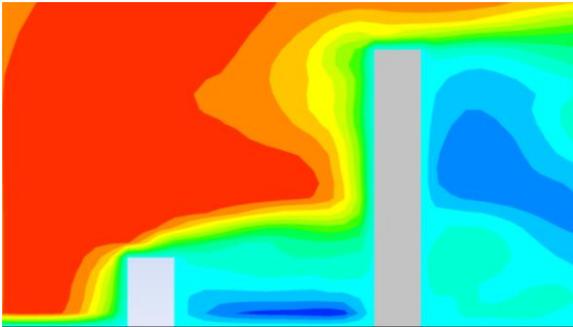


z = 150 m

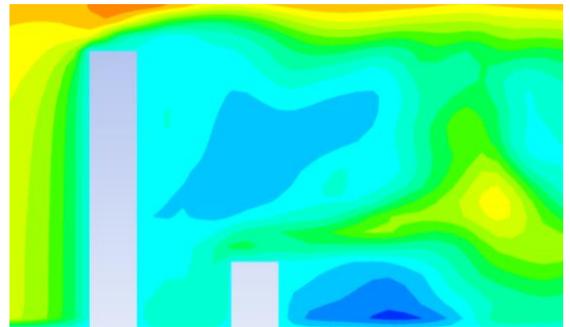


MODELO 1,6h-2b

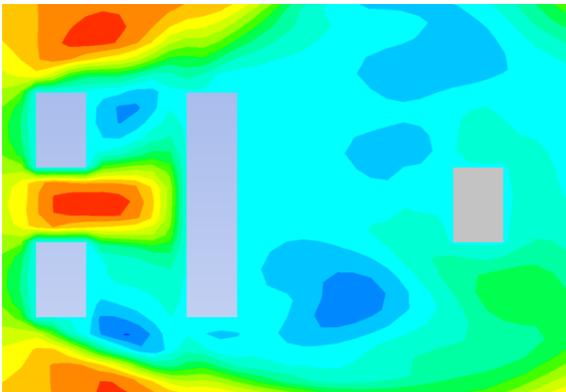
y = 0 m



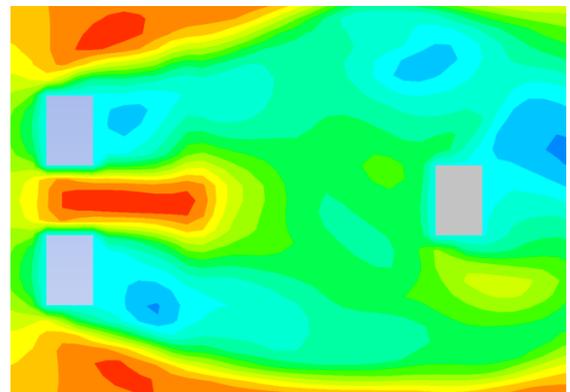
y = -45 m



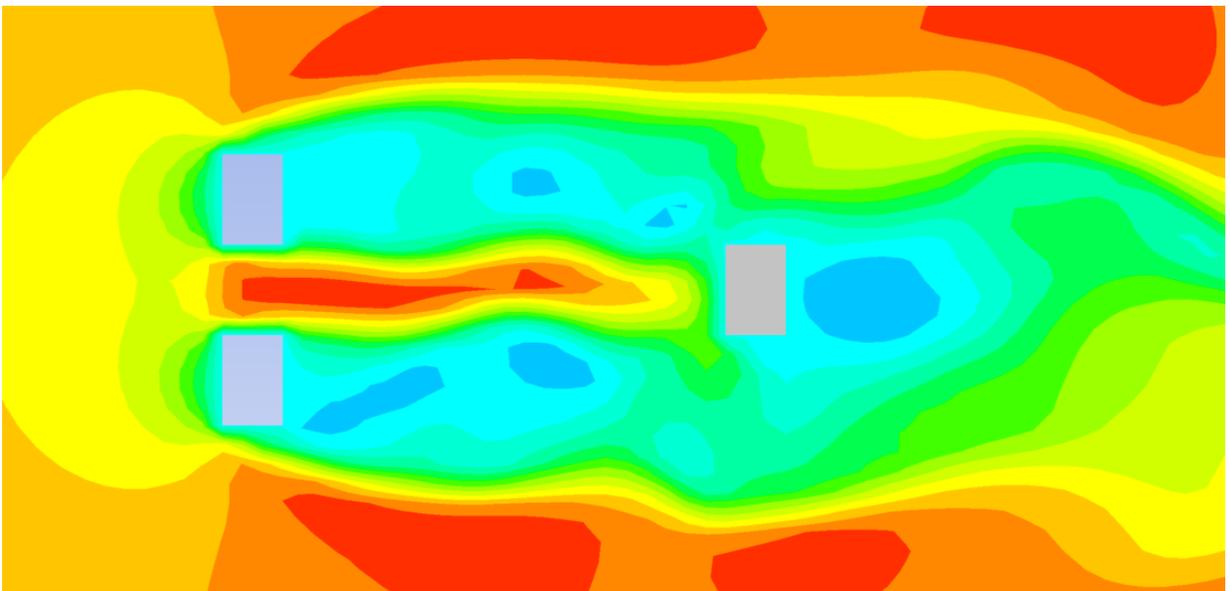
z = 30 m



z = 60 m

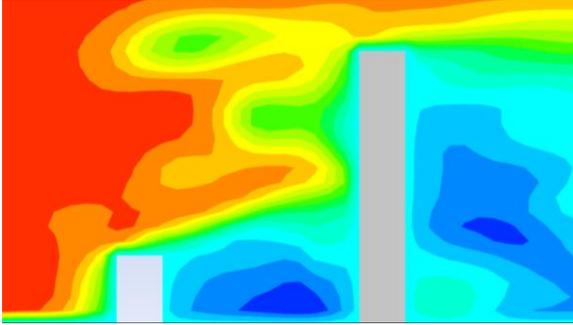


z = 150 m

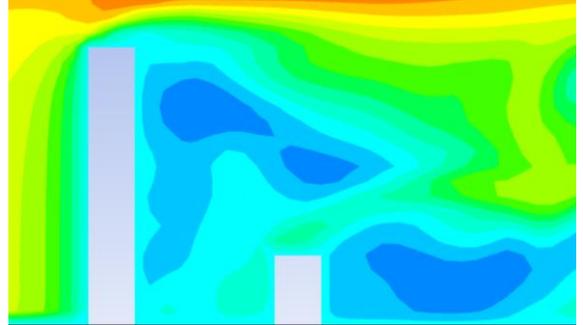


MODELO 1,6h-3b

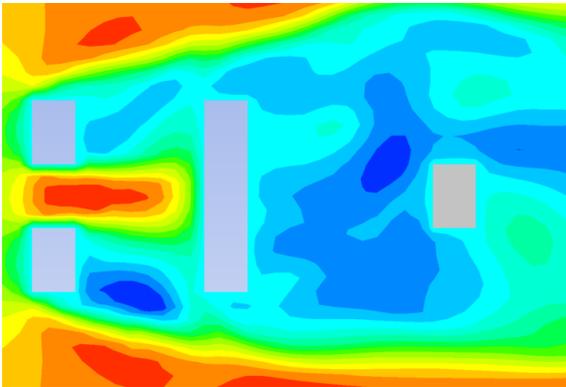
y = 0 m



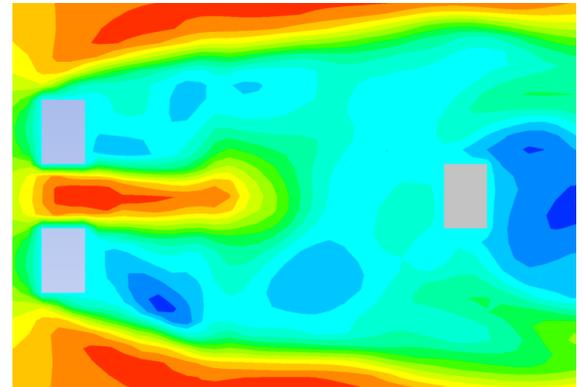
y = -45 m



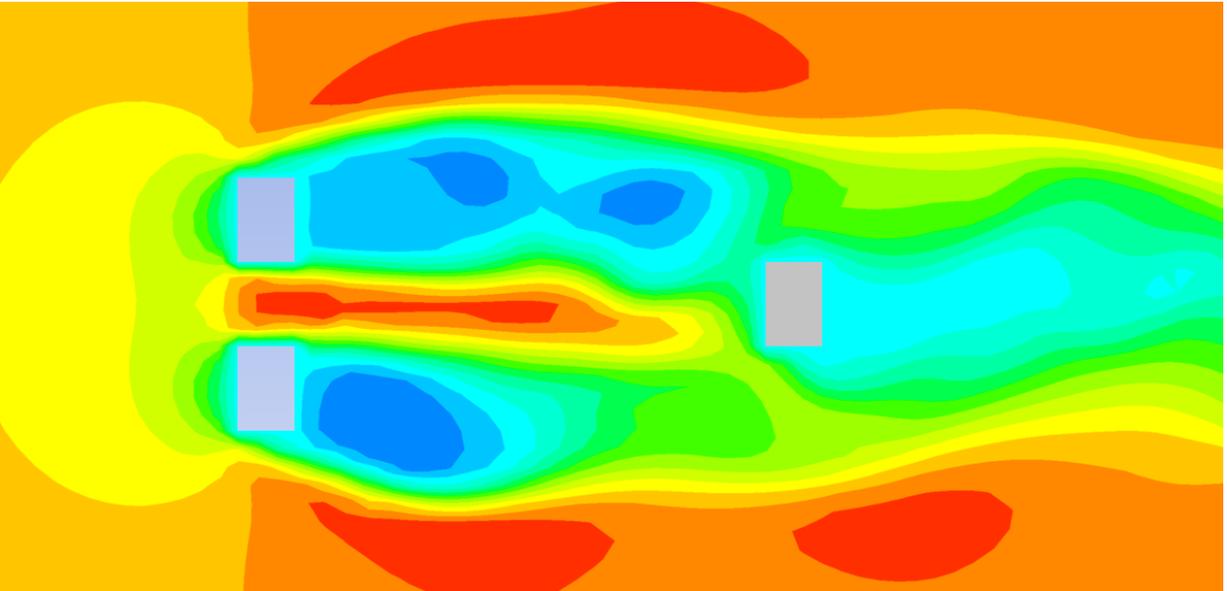
z = 30 m



z = 60 m



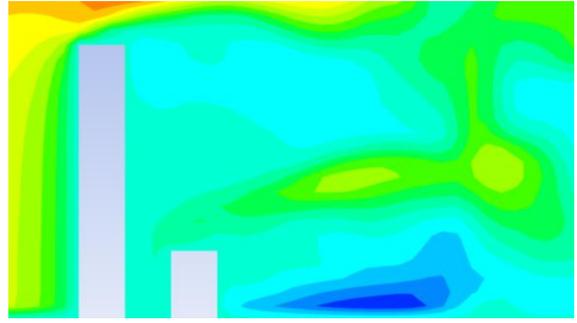
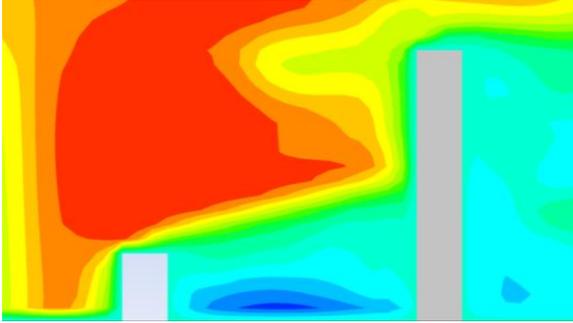
z = 150 m



MODELO 2,0h-1b

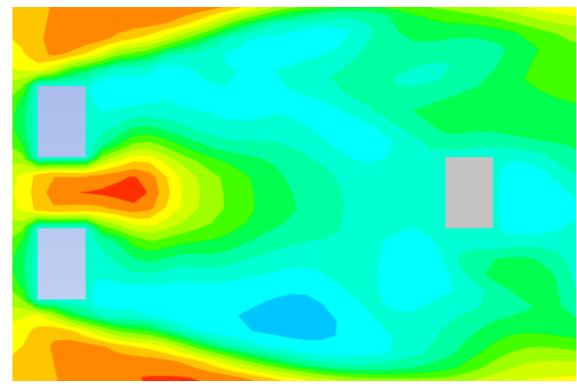
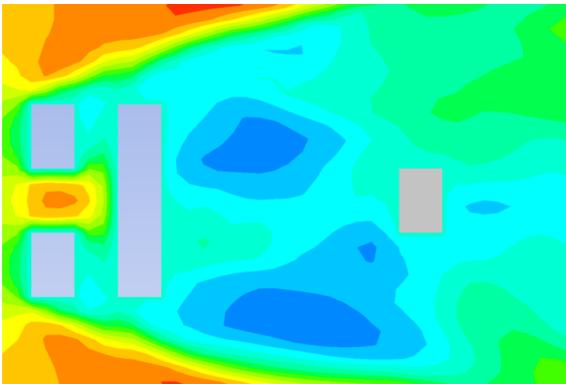
y = 0 m

y = -45 m

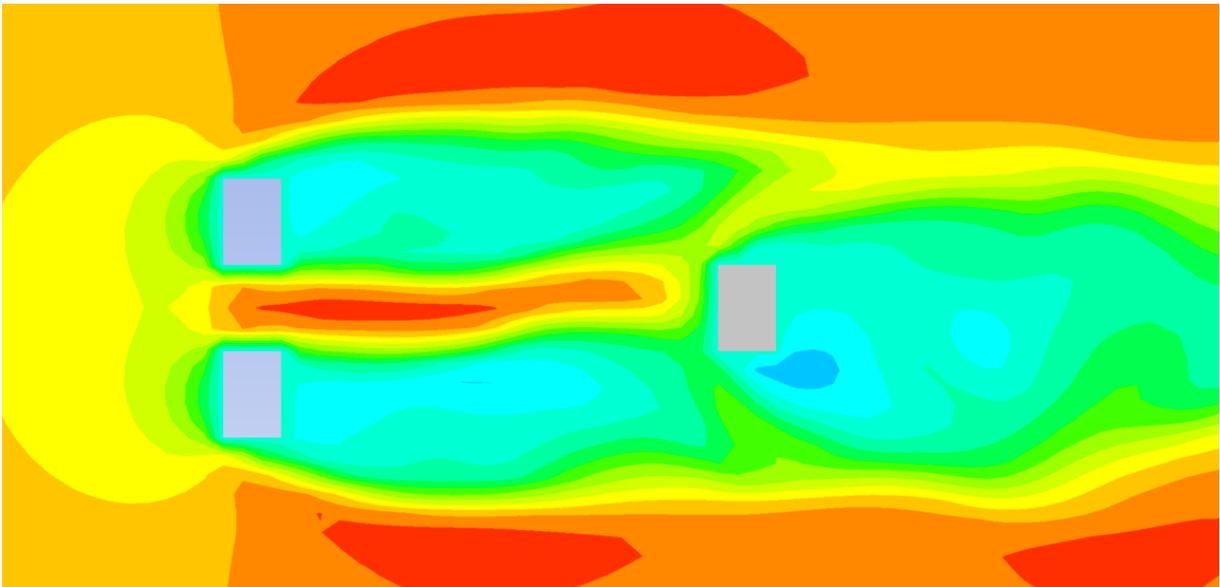


z = 30 m

z = 60 m



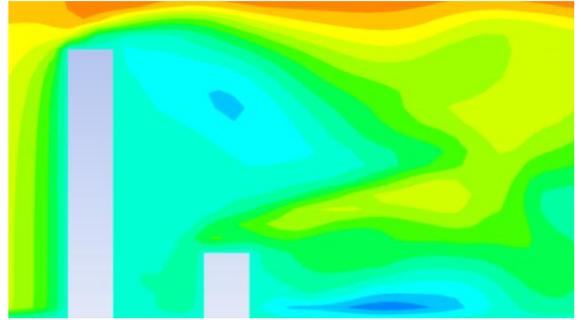
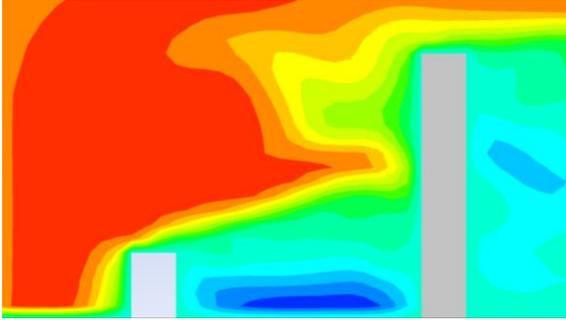
z = 150 m



MODELO 2,0h-2b

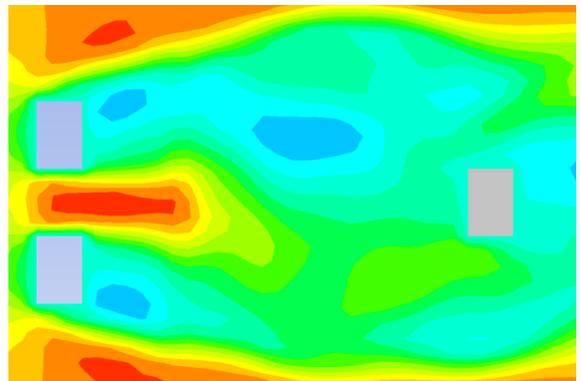
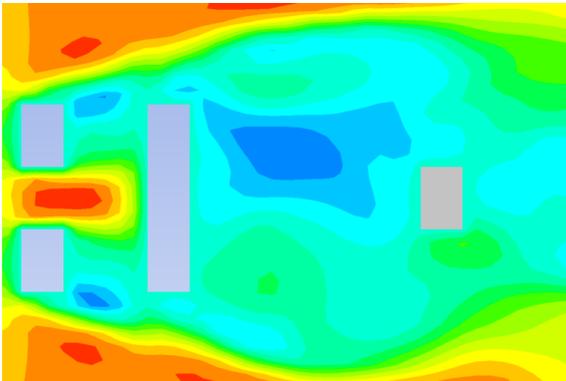
y = 0 m

y = -45 m

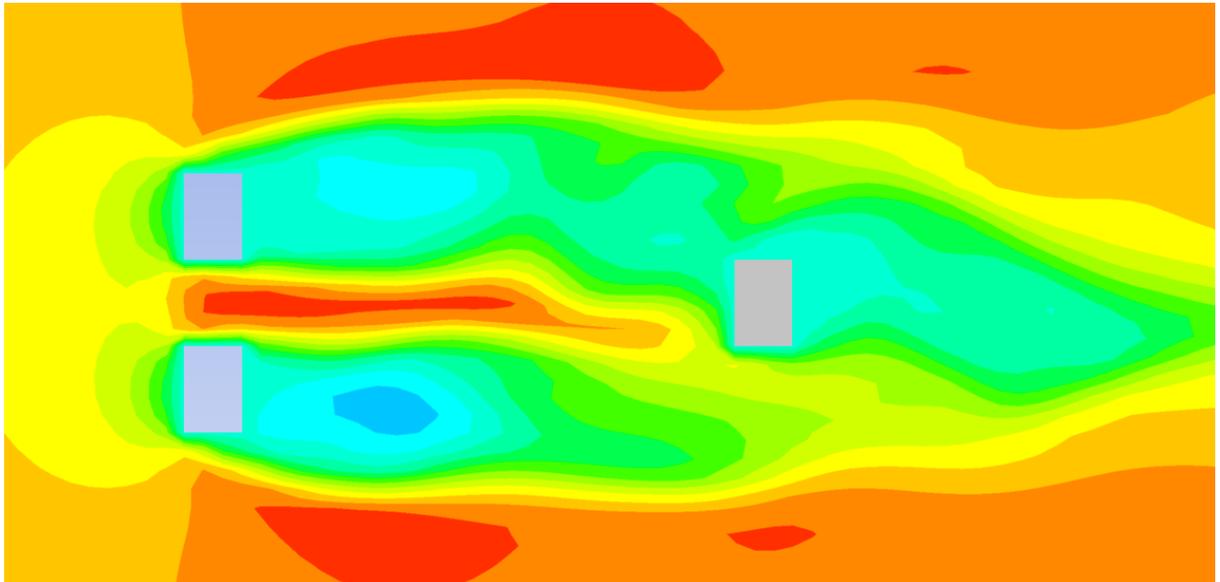


z = 30 m

z = 60 m



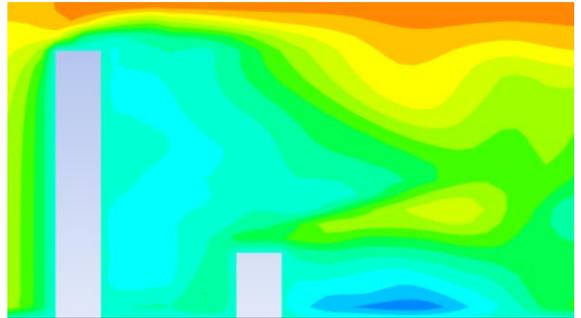
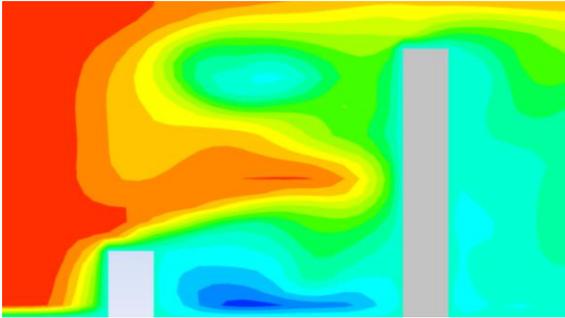
z = 150 m



MODELO 2,0h-3b

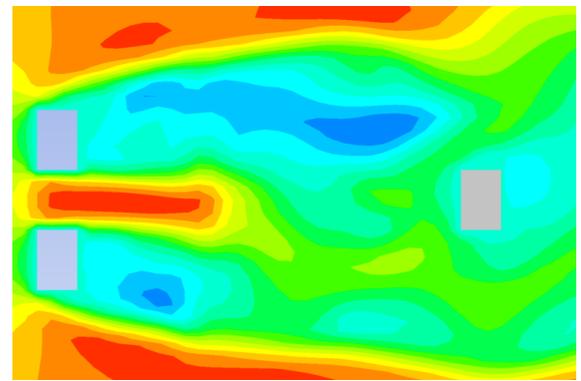
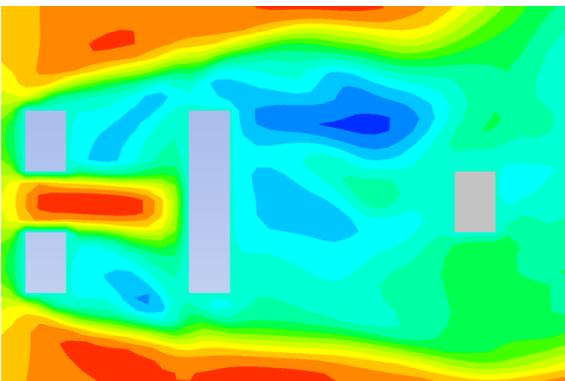
y = 0 m

y = -45 m



z = 30 m

z = 60 m



z = 150 m

