



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

JOÃO ARTHUR VIANA DE SOUSA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA À OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE
SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS CONSIDERANDO
OS EFEITOS AERODINÂMICOS DA VIZINHANÇA**

Caruaru

2023

JOÃO ARTHUR VIANA DE SOUSA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA À OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE
SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS CONSIDERANDO
OS EFEITOS AERODINÂMICOS DA VIZINHANÇA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais

Linha de Pesquisa: Simulação Numérica

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Bono

Caruaru

2023

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Sousa, João Arthur Viana de.

Simulação numérica aplicada à otimização topológica de sistemas de contraventamento em edifícios altos considerando os efeitos aerodinâmicos da vizinhança / João Arthur Viana de Sousa. - Recife, 2023.
173f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.
Orientação: Gustavo Bono.

1. Otimização Topológica; 2. Dinâmica dos Fluidos Computacional; 3. Contraventamento. I. Bono, Gustavo. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 620

JOÃO ARTHUR VIANA DE SOUSA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA À OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE
SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS CONSIDERANDO
OS EFEITOS AERODINÂMICOS DA VIZINHANÇA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Materiais
Linha de Pesquisa: Simulação Numérica

Aprovado em: 15/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Bono (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Felipe Schaedler de Almeida (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Caruaru

2023

AGRADECIMENTOS

Sou grato primeiramente a Deus, autor da vida e engenheiro do universo, por ter me concedido a inteligência, a força de vontade e as condições necessárias para vencer mais esta etapa na minha jornada acadêmica e profissional.

A minha mãe, Clívia Viana, por todo o seu amor e cuidado a mim dedicados desde o momento em que fui concebido e por nunca ter medido esforços para me auxiliar na busca pelos meus objetivos.

Ao professor Dr. Gustavo Bono por sua orientação e paciência ao me transmitir os conhecimentos necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa. O seu empenho e disponibilidade ao longo desses três anos foram fundamentais não só para a conclusão desse estudo, mas também pelo meu desenvolvimento enquanto pesquisador.

Aos colegas do Anderson Viana, Paulo Ulisses e Raul César que se dispuseram pacientemente a me auxiliar no aprendizado dos *softwares* necessários ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos amigos Edmilson Roque, Felipe Fernandes, Iálysson Medeiros, Lucas Neves, Jacqueline Avelino e todos os demais que direta ou indiretamente serviram de suporte, acadêmico e emocional, nessa caminhada.

A Bárbara Alves que teve papel fundamental para que eu decidisse cursar o mestrado. E à professora Gleicilene Bione pelo seu indispensável auxílio na elaboração do pré-projeto.

Às amigas Alice Costa e Dênia Santos por terem me acompanhado de perto durante todo esse trajeto, desde as disciplinas até a defesa. Obrigado por dividirem comigo as dificuldades, tristezas, alegrias e vitórias desta etapa da minha vida. Sua contribuição foi essencial. Agradeço em especial a Alice pela parceria no desenvolvimento de artigos, apresentação de trabalhos e no aprendizado do OpenFOAM. O valor de sua ajuda é imensurável.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio indispensável apoio financeiro prestado ao longo da realização deste trabalho.

“...gostaria de ser professor. Não conheço missão maior e mais nobre que a de dirigir as inteligências jovens e preparar os homens do futuro.”

Dom Pedro II

RESUMO

As últimas décadas têm sido testemunhas da acelerada verticalização dos centros urbanos como resposta ao aumento da demanda por espaço comercial e habitacional. Edificações cada vez mais altas e esbeltas têm se erguido e, devido à sua sensibilidade às cargas laterais, os estudos relacionados à quantificação dos esforços causados pelo vento têm se tornado cada vez mais importantes. Ao passo que o desenvolvimento da sociedade requer o uso de cada vez mais recursos naturais, a crescente consciência ambiental torna imperativa a necessidade de que o uso desses recursos seja cada vez mais racional. Nesse contexto, o presente trabalho empregou, em ambiente de programação MATLAB o método de Otimização Topológica *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) para gerar sistemas de contraventamento tridimensionais otimizados com relação à rigidez. Para tanto, o código *top3dmgcg* sofreu alterações que lhe permitiram impor técnicas de controle de leiaute, como simetria e repetição de padrões, às estruturas otimizadas, aumentando sua exequibilidade. Para determinação das cargas do vento foi empregado o *software* de distribuição livre e código aberto OpenFOAM. O escoamento do vento foi simulado empregando-se a metodologia baseada nas equações médias de Reynolds (RANS) e o modelo de fechamento de turbulência *Shear Stress Transport* $\kappa - \omega$ (SST). De modo a representar a realidade dos centros urbanos, o estudo considerou uma edificação principal cercada por edificações vizinhas de diferentes alturas com o vento incidindo em diferentes direções. No estudo, analisa-se como os efeitos aerodinâmicos devido à variação de altura e incidência do vento, bem como os parâmetros do SIMP, influenciam a solução ótima. Os resultados demonstraram que, apesar dos parâmetros geométricos da vizinhança influenciarem fortemente as cargas impostas à edificação principal, os fatores de maior influência sobre a otimização topológica são as técnicas de controle de leiaute.

Palavras-chave: Otimização Topológica; Dinâmica dos Fluidos Computacional; OpenFOAM; SIMP; Contraventamento; Efeitos de vizinhança.

ABSTRACT

The last few decades have witnessed the accelerated verticalization of urban centers in response to the increased demand for commercial and housing space. Increasingly taller and slender buildings have been rising and, due to their sensitivity to lateral loads, studies related to the quantification of efforts caused by wind have become increasingly important. While the development of society requires the use of more and more natural resources, growing environmental awareness makes it imperative that the use of these resources is increasingly rational. In this context, the present work used, in a MATLAB programming environment, the Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) Topological Optimization method to generate three-dimensional bracing systems optimized with respect to stiffness. To this end, the top3dmgcg code underwent changes that allowed it to impose layout control techniques, such as symmetry and pattern repetition, on the optimized structures, increasing their feasibility. To determine wind loads, the free and open source software OpenFOAM was used. The wind flow was simulated using the methodology based on Reynolds average equations (RANS) and the Shear Stress Transport κ - ω (SST) turbulence closure model. In order to represent the reality of urban centers, the study considered a main building surrounded by neighboring buildings of different heights with the wind falling in different directions. In the study, it is analyzed how the aerodynamic effects due to the variation in height and wind incidence, as well as the SIMP parameters, influence the optimal solution. The results demonstrated that, although the geometric parameters of the neighborhood strongly influence the loads imposed on the main building, the factors with the greatest influence on topological optimization are layout control techniques.

Keywords: Topology Optimization; Computational Fluid Dynamics; OpenFOAM; SIMP; Bracing Systems, Neighborhood Effects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre pórtico (a) sem e (b) com emprego de contraventamento.....	33
Figura 2 – Sistemas de contraventamento aplicados em edifícios altos. (A) The Bow, em Calgary. (B) Tornado Tower, em Paris. (C) D2 Tower, em Doha.	34
Figura 3 – Tipos de Otimização Estrutural.....	35
Figura 4 - Processos conceituais de otimização topológica	37
Figura 5 - <i>Checkerboard</i> (tabuleiro de xadrez)	39
Figura 6 - Apresentação do raio e domínio para o filtro	40
Figura 7– Viga MBB otimizada empregando-se diferentes fatores de penalização. (A) Domínio de projeto. (B) $p = 0,50$, (C) $p = 1,50$ e (D) $p = 3$	42
Figura 8– Otimização através do método SIMP. (a) domínio de projeto. (b) distribuição do material após 10 iterações. (c) distribuição final de material (230 iterações)	42
Figura 9– Problema da dependência de malha observado na otimização de uma roda de bicicleta. (A) 320 elementos. (B) 2880 elementos. (C) 5120 elementos.....	43
Figura 10 - Independência de malha alcançada na otimização de uma roda de bicicleta. (A) 320 elementos. (B) 2880 elementos. (C) 5120 elementos	44
Figura 11 – Restrição de simetria: (A) conjunto de variáveis de projeto y . (B) conjuntos de densidades. (C) montagem simétrica das variáveis de projeto	46
Figura 12 – Restrição de repetição de padrões. (A) conjunto de variáveis de projeto d . (B) conjuntos de densidades. (C) montagem das variáveis de projeto com repetição de padrões	47
Figura 13 – Distribuição das cargas do vento: pressão positiva na face a barlavento, e pressão negativa na fachada a sotavento e telhado	49
Figura 14 – Perfis de velocidade média para diferentes tipos de terreno	50
Figura 15 – Efeitos de interferência. (a) martelamento, (b) efeito Venturi e (c) esteira turbulenta	54
Figura 16 – Modelagem de um jato turbulento através de diferentes metodologias.....	56

Figura 17 – Componentes média e flutuante de uma variável	57
Figura 18 – Configurações da edificação. (A) visão tridimensional. (B) vista em planta.....	60
Figura 19 – Fluxograma com as etapas de uma simulação no OpenFOAM	62
Figura 20 – Estrutura de diretórios do caso	63
Figura 21 – Domínio computacional empregado nas simulações do OpenFOAM para um prédio isolado.....	66
Figura 22 – Domínios modelados para a simulação dos 16 casos estudados.....	68
Figura 23 – Representação bidimensional dos níveis de refinamento na malha com o <i>snappyHexMesh</i>	72
Figura 24 – Regiões de refinamento empregadas na geração das malhas.....	73
Figura 25 – Domínio A discretizado. (A) visão completa. (B) detalhe próximo à edificação	74
Figura 26 – Esquema representativo das áreas de influência empregadas na determinação da força atuante em cada nó.....	76
Figura 27 – Fluxograma do processo de otimização topológica através <i>top3dmgcg_BUILDING</i>	77
Figura 28 – Representação dos planos de simetria.....	78
Figura 29 – Representação do número de células usadas na repetição de padrões. (A) repetição com 3 células. (B) repetição com 6 células.....	79
Figura 30 – Vista no plano <i>xy</i> do domínio estendido com restrição de elementos passivos	80
Figura 31 – Domínio de projeto: (a) sem elementos passivos, (b) inclusão de elementos passivos no núcleo de material sólido, e (c) detalhe da região passiva	80
Figura 32 – Modelo de edificação otimizado resultante do código <i>top3dmgcg_BUILDING</i>	81
Figura 33 - Plotagem de uma mesma estrutura utilizando diferentes valores de <i>cut off</i> . (A) <i>cut off</i> de 0,2. (B) <i>cut off</i> de 0,5	82
Figura 34 – Configuração urbana simulada no estudo de validação do domínio computacional.....	84

Figura 35 – Dimensões empregadas na modelagem do domínio retangular.....	84
Figura 36 – Dimensões empregadas na modelagem do domínio quadrado	85
Figura 37 – Domínio retangular discretizado. (A) visão completa, (B) detalhe próximo às edificações	86
Figura 38 – Domínio quadrado discretizado. (A) visão completa, (B) detalhe próximo às edificações	86
Figura 39 – Contornos de pressão nas fachadas da edificação principal – validação do domínio computacional	87
Figura 40 – Gráficos de dispersão do coeficiente de pressão médio. (A) domínio quadrado × TPU, (B) domínio retangular × TPU.....	88
Figura 41 – Gráfico de dispersão do coeficiente de pressão médio, comparação entre os domínios retangular e quadrado.....	89
Figura 42 – Malha M1. (A) domínio completo. (B) detalhe perto das edificações.....	92
Figura 43 - Malha M3. (A) domínio completo. (B) detalhe perto das edificações	92
Figura 44 - Contornos de pressão nas fachadas da edificação principal – validação do OpenFOAM	93
Figura 45 - Gráfico de dispersão do coeficiente de pressão médio, comparação entre os domínios entre as malhas M1, M2 e M3 com os dados da TPU	94
Figura 46 - Viga Engastada	97
Figura 47 – Valores da função objetivo dos casos discretizados com a malha M1	102
Figura 48 – Valores da função objetivo dos casos discretizados com a malha M2	102
Figura 49 – Comparação entre os valores de h para casos com mesma combinação de nível de refinamento de malha e fração de volume	103
Figura 50 – Representação do Caso 1, empregado no estudo paramétrico	104
Figura 51 – Distribuição dos coeficientes de pressão (C_p) nas fachadas da edificação.....	104
Figura 52 – Distribuição do coeficiente de pressão médio (C_p) nas fachadas dos 16 casos analisados.....	116

Figura 53 – Simulações conduzidas por Elshaer <i>et al.</i> (2017) apresentando distribuição assimétrica do coeficiente de pressão sobre as fachadas da edificação estudada	117
Figura 54 - Simulações conduzidas por Ledo, Kosasih e Cooper (2011) apresentando distribuição assimétrica da velocidade a (b) 10 metros e (c) 12 metros acima do solo.....	117
Figura 55 - Simulações conduzidas por Heo <i>et al.</i> (2016) apresentando distribuição assimétrica da (b) pressão e (c) magnitude da velocidade.....	118
Figura 56 – Comportamento dos coeficientes aerodinâmicos e suas componentes sob diferentes cenários de escoamento do vento.....	121
Figura 57 – Relação entre a disposição das barras e os coeficientes aerodinâmicos	123
Figura 58 – Relação entre função objetivo (C) e coeficientes de arrasto (CD) e momento (CM)	124
Figura 59- Relação entre quantidade de iterações (it) e coeficientes de arrasto (CD) e momento (CM)	125
Figura 60 – Flexibilidade média dos casos otimizados com diferentes técnicas de controle geométrico	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Domínio e conjuntos de condições de contorno empregados em cada caso	69
Tabela 2 – Conjunto de condições de contorno CC-1 aplicadas às faces dos domínios	70
Tabela 3 – Conjunto de condições contorno CC-2 aplicadas às faces dos domínios.....	70
Tabela 4 – Dimensões e nível de refinamento das regiões de refinamento empregadas na discretização dos domínios computacionais.....	85
Tabela 5 – Erros calculados para o estudo de validação do domínio computacional	90
Tabela 6 – Condições de contorno aplicadas às faces do domínio para estudo de validação do OpenFOAM	91
Tabela 7 - Níveis de refinamento empregados nas três regiões de refinamento das malhas geradas para estudo de validação do OpenFOAM	92
Tabela 8 – Comparação entre coeficientes aerodinâmicos.....	95
Tabela 9 – Métricas de validação	96
Tabela 10 – Aumento relativo do tempo de processamento dos códigos top3d e top3D125 em relação ao top3dmgcg_BUILDING.....	101
Tabela 11 – Valores padrões adotados para o estudo paramétrico do <i>top3dmgcg_BUILDING</i>	105
Tabela 12 – Casos formados por combinações de diferentes parâmetros de controle geométrico	106
Tabela 13 – Casos formados por combinações de diferentes valores de fator de penalização e raio de filtro.....	109
Tabela 14 – Valores de função objetivo e valores médios para os casos EP-10 a EP-20	111
Tabela 15 – Valores padrões adotados para os 16 casos principais do presente estudo após realizada a análise paramétrica	114
Tabela 16 – Coeficientes aerodinâmicos dos 16 casos principais.....	119
Tabela 17 – Comparação entre as médias dos coeficientes aerodinâmicos e número de iterações dos casos com maior e menor número de iterações	125

Tabela 18 – Relação entre tempo de processamento e quantidade de iterações (t/it) e desvio padrão (S) para diferentes combinações de técnicas de controle geométrico	128
Tabela 19 – Valores médios do parâmetro h para as diferentes combinações de técnicas de controle geométrico empregadas	129

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Possíveis combinações para formação de casos	61
Quadro 2 – Combinações de casos com diferentes malhas e frações de volume	98
Quadro 3 – Comparação dos resultados para diferentes frações de volume utilizando a malha M1 (24×12×12)	99
Quadro 4 - Comparação dos resultados para diferentes frações de volume utilizando a malha M2 (48×24×24)	100
Quadro 5 - Resultados obtidos através da variação dos parâmetros de controle geométrico	107
Quadro 6 - Resultados obtidos através da variação do raio de filtro e fator de penalização	110
Quadro 7 - Resultados obtidos através da variação da fração de volume	112
Quadro 8 - Resultados obtidos através da variação do nível de refinamento da malha	113
Quadro 9 - Estruturas Otimizadas com imposição de simetria em xz e yz a 0° e repetição de padrões com 3 células	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABL	<i>Atmospheric Boundary Layer</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BESO	<i>Bidirectional Evolutionary Structural Optimization</i>
CAA	Campus Acadêmico do Agreste
CAARC	<i>Commonwealth Advisory Aeronautical Research</i>
CAD	<i>Computer-aided Design</i>
CC	Condições de Contorno
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CS	Condição de Simetria
DES	<i>Detached Eddy Simulation</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
EP	Estudo Paramétrico
ESO	<i>Evolutionary Structural Optimization</i>
FAC1.3	Fator de 2 das observações
FAC2	Fator de 1,3 das observações
FB	Viés Fracionário
FGM	<i>Functionally Graded Materials</i>
GAMG	<i>Geometric Algebraic Multigrid Solver</i>
GMTS	<i>Growth Method for Truss Structures</i>
GNU	<i>General Public License</i>
LECOM	Laboratório de Engenharia Computacional
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LSM	<i>Level Set Method</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MBB	Messerschmitt-Bölkow-Blohm
MCC	<i>Moving Morphable Components</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MGCG	<i>Multigrid Preconditioned Conjugate Gradients</i>
MMA	<i>Method of Moving Asymptotes</i>

NBR	Norma Brasileira
NMSE	<i>Normalized Mean Square Error</i>
NRMSE	<i>Normalized Root Mean Square Error</i>
OBJ	<i>Wavefront Object</i>
OC	<i>Otimality Criteria</i>
OpenFOAM	<i>Open Field Operation and Manipulation</i>
OT	Otimização Topológica
PGC	<i>Preconditioned Conjugate Gradients</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RBD	<i>Reliability-Based Design</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RNG	<i>Renormalization Group</i>
SAO-DUAL	<i>Sequential Approximate Optimization in Dual form</i>
SAO-QP	<i>Sequential Approximate Optimization in Quadratic Program form</i>
SERA	<i>Sequential Element Rejection and Admission</i>
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
TPU	<i>Tokyo Polytechnic University</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
WF	<i>Wall Function</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica
k	Energia cinética turbulenta
ω	Dissipação específica da energia cinética turbulenta
ε	Dissipação da energia cinética turbulenta
ρ_e	Densidade artificial de um elemento
N	Número total de elementos
V	Volume
p	Fator de penalização
E_0	Módulo de elasticidade original
E_e	Módulo de elasticidade artificial
E_{min}	Módulo de elasticidade mínimo
C	Flexibilidade média
$\mathbf{u}_e$	Vetor de deslocamento do elemento
$\mathbf{k}_0$	Matriz de rigidez do elemento
$\mathbf{U}$	Vetor global de deslocamentos
$\mathbf{F}$	Vetor global de forças
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez global
$V(\rho)$	Volume do material
V_0	Volume do domínio de projeto
f_v	Fração de volume
v_e	Volume artificial de um elemento
N_e	Conjunto de elementos cuja distância centro-a-centro é menor que o raio de filtro
$\Delta(e, i)$	Distância centro-a-centro entre elementos
r_{min}	Raio de filtro
γ	Pequeno número positivo usado para evitar divisão por zero
H_{ei}	Fator de peso
ρ_i	Densidade de elementos cuja distância centro-a-centro é menor que o raio de filtro
$\tilde{\rho}_e$	Densidades físicas
$\mathbf{y}$	Variáveis de projeto
$\mathbf{d}$	Conjunto de densidades
$\mathbf{d}^1$	Conjunto de densidades primárias

$\mathbf{d}^2$	Conjunto de densidades secundárias
Z_0	Comprimento de rugosidade
z	Altura em relação ao solo
q	Pressão dinâmica do vento
F	Força do vento
A	Área
C_e	Coeficiente de forma externo
C_i	Coeficiente de forma interno
Re	Número de Reynolds
U_∞	Velocidade de corrente livre
L	Comprimento característico/ Largura e comprimento da edificação principal
ν	Viscosidade cinemática
U_i	Velocidade na direção i
t	Tempo
P	Pressão
x_i	Distância na direção do eixo x
x_j	Distância na direção do eixo y
x_k	Distância na direção do eixo z
f_i	Forças de corpo na i -ésima direção
μ	Viscosidade molecular
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ϕ	Valor instantâneo de qualquer variável envolvida no escoamento
$\bar{U}_i$	Velocidade média na direção i
$\bar{P}$	Pressão média
$\bar{\rho}$	Massa específica média
u'_i	Componente flutuante da velocidade na direção i
p'	Componente flutuante da pressão
$\tilde{\rho}$	Componente flutuante
τ_{ji}	Tensor de Reynolds
H	Altura da edificação principal
α	Ângulo de incidência do vento
y^+	distância entre as superfícies sólidas e a primeira célula adjacente a elas
U	Velocidade

U_{ref}	Velocidade de referência do vento
H_{ref}	Altura de referência
β	Fator de exposição
u_{ABL}	Velocidade de fricção
κ	Constante de von Karman
C_μ	Constante empírica adotada como 0,09 para o cálculo da dissipação específica da energia cinética turbulenta
H_{max}	Altura da edificação mais alta
μ_t	Viscosidade cinemática turbulenta
∇	Divergente
C_p	Coefficiente de pressão médio
P_∞	Pressão do escoamento livre
A_{inf}	Área de influência de cada nó da malha empregada no MATLAB
$nelx$	Número de elementos na direção x
$nely$	Número de elementos na direção y
$nelz$	Número de elementos na direção z
ft	parâmetro usado para determinar o tipo de filtro a ser aplicado no método SIMP
nl	Quantidade de malhas empregadas no processo multigrid
$cgtol$	Tolerância empregada no processo multigrid
$cgmax$	Quantidade máxima de iterações empregada no processo multigrid
xz	Plano formado pelos eixos x e y
yz	Plano formado pelos eixos y e z
xy	Plano formado pelos eixos x e y
x_box	Quantidade de elementos passivos na direção x
y_box	Quantidade de elementos passivos na direção y
m	Metros
R1	Primeira região de refinamento, mais interna

R2	Segunda região de refinamento, intermediária
R3	Terceira região de refinamento, mais externa
x_{min}	Menor valor de x , referente às dimensões das regiões de refinamento
x_{max}	Maior valor de x , referente às dimensões das regiões de refinamento
y_{min}	Menor valor de y , referente às dimensões das regiões de refinamento
y_{max}	Maior valor de y , referente às dimensões das regiões de refinamento
z_{min}	Menor valor de z , referente às dimensões das regiões de refinamento
z_{max}	Maior valor de z , referente às dimensões das regiões de refinamento
R^2	Coefficiente de Determinação
SQ_{res}	Soma dos quadrados dos resíduos
SQ_{tot}	Soma total dos quadrados
n	Número de dados coletados
y_i	Valor observado (experimental)
$\bar{y}_i$	Média dos valores observados
$\hat{y}_i$	Valor estimado através da simulação numérica
$y_{i,max}$	Máximo valor observado em um experimento
$y_{i,min}$	Mínimo valor observado em um experimento
C_D	Coefficiente de arrasto
C_M	Coefficiente de momento
M_x	Momento em torno do eixo x
M_y	Momento em torno do eixo y
F_y	Componente da força na direção y
F_x	Componente da força na direção x
L_z	Distância entre o ponto de aplicação da força e a base da edificação
l_a	Comprimento de referência, medido como a altura da edificação
S_a	Área de referência, calculada pela multiplicação da base pela altura da edificação
F_D	Força resultante aplicada pelo vento da direção do arrasto
p.p	Pontos percentuais
ν	Coefficiente de Poisson

$\bar{h}$	Valor médio da largura da barra
C_{Dx}	Coeficiente de arrasto na direção x
C_{Dy}	Coeficiente de arrasto na direção y
C_{Mx}	Coeficiente de momento na direção x
C_{My}	Coeficiente de momento na direção y
it	Quantidade de iterações
S	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo Geral	26
1.1.2	Objetivos Específicos	26
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO	33
2.2	OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	34
2.3	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA (OT)	35
2.3.1	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i> (SIMP)	37
2.4	PROBLEMAS NUMÉRICOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	39
2.4.1	Tabuleiro de xadrez (<i>checkerboard</i>)	39
2.4.2	Densidades Intermediárias	41
2.4.3	Dependência de Malha	43
2.5	TÉCNICAS DE CONTROLE DE LEIAUTE	44
2.5.1	Imposição de Simetria	45
2.5.2	Repetição de Padrões	46
2.6	MÉTODO MULTIGRID	47
2.7	AÇÃO DO VENTO SOBRE EDIFICAÇÕES	48
2.7.1	NBR 6123/2023 – Forças Devidas ao Vento em Edificações	51
2.7.2	Túnel de Vento	51
2.7.3	Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)	52
2.8	INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA	53
2.9	MODELAGEM NUMÉRICA	55
2.9.1	Modelo de fechamento turbulência $\kappa - \omega$ SST	58
3	METODOLOGIA	60
3.1	CASOS ESTUDADOS	60
3.2	DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DO VENTO	62
3.2.1	Estrutura de arquivos dos casos do OpenFOAM	63
3.2.2	Condições iniciais do escoamento	64
3.2.3	Domínio computacional e condições de contorno	66
3.2.4	Discretização do domínio computacional	71

3.2.5 Modelagem Numérica	74
3.2.6 Pós-processamento	75
3.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA	77
3.4 CARACTERÍSTICAS COMPUTACIONAIS	82
4 VALIDAÇÃO E VERIFICAÇÃO	83
4.1 VALIDAÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL	83
4.2 VALIDAÇÃO DO OPENFOAM.....	91
4.3 VERIFICAÇÃO DO <i>top3dmgcg_BUILDING</i>	97
4.4 ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO MÉTODO SIMP	103
4.4.1 Análise da influência dos parâmetros de controle geométrico	105
4.4.2 Análise da influência do fator de penalização e raio de filtro	109
4.4.3 Análise da influência da fração de volume.....	112
4.4.4 Análise da influência do nível de refinamento de malha	113
4.4.5 Resultados do estudo paramétrico	114
5 RESULTADOS	115
5.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA E DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO NAS CARGAS IMPOSTAS À EDIFICAÇÃO.....	115
5.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	121
5.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TÉCNICAS DE CONTROLE GEOMÉTRICO ...	126
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	130
6.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	132
REFERÊNCIAS	133
APÊNDICE A – RESULTADOS DA MODELAGEM DO ESCOAMENTO VENTO NO OPENFOAM	142
APÊNDICE B – ESTRUTURAS OTIMIZADAS COM SIMETRIA A 0° E REPETIÇÃO DE TRÊS CÉLULAS	148
APÊNDICE C – ESTRUTURAS OTIMIZADAS ATRAVÉS DA IMPOSIÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROLE GEOMÉTRICO.....	151

1 INTRODUÇÃO

A verticalização dos centros urbanos tem se intensificado nas últimas décadas como consequência do desenvolvimento socioeconômico das nações. Edificações altas ou esbeltas, por possuírem frequências próprias baixas, respondem dinamicamente aos efeitos do vento como resultado da separação da camada limite e do desprendimento de vórtices (Taranath, 2009). Nas estruturas mais baixas, os efeitos do vento podem ser tratados apenas como um acréscimo da componente estática do carregamento sobre a estrutura. Por outro lado, a norma NBR 6123 (ABNT, 2023) determina que para edificações com período fundamental superior a 1 s é preciso quantificar a resposta flutuante na direção do vento médio. Ao estudar os efeitos do vento sobre uma edificação, realizar a análise de um prédio isolado se afasta do ideal, uma vez que nos centros urbanos existe uma elevada concentração de edificações que causa alterações no escoamento em torno da edificação estudada. Cabe destacar, ainda, que essa vizinhança não é estática, isto é, com o passar dos anos a configuração dos prédios em um centro urbano pode sofrer fortes alterações, modificando o escoamento do vento e, consequentemente, as cargas sobre as demais edificações.

Tradicionalmente, experimentos em túneis de vento têm sido utilizados como ferramenta para avaliação dos efeitos aerodinâmicos e aeroelásticos causados pela ação do vento sobre estruturas (Kim; Tamura; Yoshida, 2015; Shirzadi; Tominaga; Mirzaei, 2020). Nas últimas décadas, devido ao avanço tecnológico dos computadores e à versatilidade apresentada pelos métodos numéricos, a Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD (*Computational Fluid Dynamics*) tem se tornado uma ferramenta cada vez mais atraente (Thordal; Bennetsen e Koss, 2019). Ramponi e Blocken (2012) afirmam que o uso de CFD apresenta vantagens quando comparada a outras abordagens (túnel de vento e metodologias definidas em norma, por exemplo), destacando o fato dela fornecer dados em todos os pontos do domínio computacional e trazer total controle sobre as condições de contorno.

Uma vez calculadas as cargas atuantes sobre uma edificação, é necessário conceber sua estrutura. Conforme Ching, Onouye e Zuberbuhler (2009), a concepção da estrutura de um edifício consiste no estabelecimento de um arranjo adequado dos vários elementos estruturais, assegurando assim que o mesmo possa atender às finalidades para as quais foi projetado. Em virtude da complexidade das construções, uma estrutura requer o emprego de diferentes tipos de peças estruturais adequadamente combinadas para a formação do conjunto resistente. Dessa forma, as estruturas devem ter a capacidade de resistir tanto às cargas gravitacionais quanto às

cargas laterais geradas por vento e sismo; onde os elementos estruturais como lajes, vigas e pilares são os responsáveis por resistir às cargas gravitacionais, e os reforços laterais, ou contraventamento, são os encarregados de resistir às cargas laterais.

O contraventamento, enquanto sistema de ligação entre os elementos principais de uma estrutura com o objetivo de aumentar a rigidez do conjunto, pode ser concebido através de diversas soluções, dentre as quais encontra-se a possibilidade de estar expresso nas fachadas do edifício. Esta possibilidade permite ao sistema de contraventamento cumprir funções tanto estéticas quanto estruturais além de evitar a restrição da continuidade de espaços livres no interior da edificação (Tomei; Imbimbo; Mele, 2018).

Por muito tempo os projetos de engenharia foram concebidos baseando-se principalmente na experiência e intuição do projetista. Nos últimos anos, porém, graças ao cenário de extrema competitividade da indústria da construção civil e à crescente necessidade de se reduzir os impactos ambientais, os projetistas têm buscado, cada vez mais, ferramentas que possibilitem aos seus projetos atender aos requisitos de desempenho e segurança com o menor custo possível. No caso de edifícios altos, o menor custo está associado ao menor peso da estrutura, ocasionado por um menor consumo de material. Neste sentido, surge como alternativa o uso de técnicas de otimização estrutural, que consistem em obter o projeto de melhor desempenho, sendo avaliado através de uma função objetivo a partir de um conjunto de variáveis que descrevem o sistema estrutural.

Bendsoe e Sigmund (2003) classificam a otimização estrutural em três tipos: paramétrica, de forma e topológica. Na otimização paramétrica, o modelo estrutural é previamente conhecido e permanece constante ao longo do processo de otimização. Nesse contexto, os parâmetros geométricos da estrutura, como as dimensões da seção transversal dos elementos, são ajustados de maneira a minimizar ou maximizar uma grandeza física específica, como a flexibilidade média, tensão máxima, deflexão, entre outros. Na otimização de forma, a estrutura apresenta forma variável e a topologia fixa, não ocorrendo a inserção de furos. As variáveis de projeto definem o contorno do domínio, cuja forma é alterada durante o processo de otimização. A Otimização Topológica (OT), tem como objetivo buscar a melhor distribuição do material ao longo de um domínio de projeto satisfazendo determinados conjuntos de restrições e minimizando ou maximizando uma função, configurando assim uma eficiente ferramenta na busca de projetos de qualidade e custo otimizados.

Existem diversos métodos de OT, podendo-se citar os seguintes: *Evolutionary Structural Optimization* (ESO), o *Sequential Element Rejection and Admission* (SERA), *Level Set Method*

(LSM) e o *Moving Morphable Components* (MCC), entre outros. Porém, os dois métodos de OT mais difundidos e amplamente estudados são os métodos *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) e o *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* (BESO). O SIMP, funciona através de uma discretização fixa da estrutura em elementos finitos. Cada elemento finito é então associado a uma função densidade ρ cujos valores variam entre 0 e 1. Um ‘zero’ denota um elemento vazio e ‘1’ denota um elemento sólido. Os valores entre 0 e 1 são denominados como elementos de densidades intermediárias, que podem ser interpretados como uma mesoestrutura de material com furos.

Neste contexto, empregou-se o modelo de turbulência *Shear Stress Transport $\kappa - \omega$* (SST), através do *software* OpenFOAM, para simular o escoamento do vento em torno de um edifício alto, cercado por edificações de diferentes alturas, a fim de obter informações acerca dos esforços laterais a que o edifício está submetido. Uma vez em posse de tais informações, utiliza-se o método de Otimização Topológica SIMP, juntamente com técnicas de controle de layout (simetria e repetição de padrões), para definir configurações alternativas de fachadas estruturais ótimas, isto é, mais econômicas, seguras e de maior desempenho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Otimizar sistemas de contraventamento de edifícios altos localizados em ambientes urbanos fazendo uso do método de Otimização Topológica SIMP e ferramentas da CFD para determinação das cargas do vento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são apresentados nos seguintes pontos:

- Simular o escoamento turbulento em torno de um conjunto de edificações através do programa de distribuição livre e código aberto baseado na CFD, OpenFOAM, adotando para tanto, o modelo de turbulência *Shear Stress Transport $k - \omega$* (SST);

- Implementar alterações no código de OT *top3dmgcg*, desenvolvido por Amir, Aage e Lazarov (2014), que lhe permitam: (1) ler as cargas de vento obtidas através da simulação CFD, (2) impor simetria e repetição de padrões à estrutura otimizada a fim de aumentar a exequibilidade da solução final;
- Analisar como os principais parâmetros da metodologia SIMP influenciam a Otimização Topológica, isto é, fator de penalização, raio de filtro, nível de refinamento da malha, fração de volume e técnicas de controle geométrico;
- Realizar um estudo paramétrico, analisando como a otimização do sistema de contraventamento é influenciada pela mudança da direção do vento e da altura das edificações vizinhas em duas situações: (1) edificações vizinhas de altura padronizada e (2) edificações vizinhas com diferentes alturas.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Otimização Topológica é uma área relativamente nova da ciência, que tem experimentado um significativo desenvolvimento teórico e prático graças às contribuições fundamentais de pioneiros como Prager e Rozvany (1977), Bendsoe (1989), Sigmund (1989), e Bendsoe e Sigmund (2003). Este avanço teórico, aliado à incorporação da OT em *softwares* comerciais, tem permitido sua aplicação em uma ampla gama de indústrias, incluindo a mecânica (Biswal; Venkatesh; Arumaikkannu, 2021), a aeroespacial (Vishwanathan *et al.*, 2021), a médica (Wu *et al.*, 2020), entre outras.

No que se refere ao emprego da OT em problemas estruturais de engenharia civil, pode-se citar o trabalho de Zakhama *et al.* (2007), no qual foi proposta uma formulação para inclusão de cargas de vento no problema de OT para minimização da flexibilidade. Sabendo que o vento normalmente varia sua direção e velocidade, e tendo a necessidade de modelar de forma realista o comportamento deste sobre as estruturas, os autores enxergaram a necessidade da utilização de casos com múltiplas cargas. Foi demonstrado que levar as cargas de vento em consideração gera estruturas otimizadas mais rígidas com mesmo volume.

Kazakis *et al.* (2017) integraram técnicas computacionais de OT à fase de definição das estruturas como parte do *design* arquitetônico assistido por computador. Os exemplos estudados consistiram em prédios altos, sujeitos aos esforços do vento, otimizados com o SIMP. Três pontos principais foram analisados, o primeiro refere-se à inclusão de restrições de manufatura

e problemas conceituais de projeto ao problema de otimização. O segundo trata do desenvolvimento de um procedimento automático que converte as imagens da estrutura otimizada em arquivos CAD (*Computer-aided Design*). No terceiro ponto foram apresentados métodos computacionais visando à redução do custo computacional exigido para resolver os problemas. Os resultados demonstraram que a abordagem adotada pelos autores foi eficiente para otimizar estruturas levando em consideração restrições reais de engenharia, como exequibilidade e estética.

Angelucci, Mollaioli e AlShawa (2020) fornecem estratégias de modelagem e carregamento para incorporar rotinas de OT na definição do sistema de contraventamento em edifícios altos. Sabendo que o leiaute ideal de uma estrutura é especialmente sensível à alteração das condições de suporte e carregamento, os autores converteram as cargas distribuídas, agindo diretamente sobre a edificação, em cargas concentradas aplicadas nos nós principais, e investigaram como diferentes perfis da carga lateral afetam a topologia ótima. Os resultados demonstraram que os diferentes perfis de carregamento têm pouca influência no resultado final da estrutura otimizada e que, conseqüentemente, um cenário simplificado com distribuição uniforme além de captar os principais aspectos da ação do vento evita complexidades extras à rotina de otimização.

Um fator limitante da aplicação prática da OT reside no fato das estruturas otimizadas possuírem *design* complexo, tornando-as inviáveis ou até mesmo inexecutáveis por meio de processos tradicionais de manufatura. No tocante à otimização de sistemas de contraventamento, essa limitação torna-se ainda mais evidente devido à dimensão das estruturas. Com o objetivo de mitigar essa dificuldade, obtendo uma topologia otimizada mais padronizada, e conseqüentemente mais executável, diversos pesquisadores têm recorrido a técnicas de imposição de simetria e repetição de padrões. Assim, Almeida, Paulino e Silva (2010) discutiram a influência do leiaute e da gradação de material sobre o comportamento geral da rigidez de compósitos especiais, conhecidos como FGM (*Functionally Graded Materials*), que são materiais caracterizados pela variação gradual em suas propriedades. Dessa forma, as propriedades desejáveis de dois diferentes tipos de materiais podem ser combinadas em um único material por meio da mudança suave e contínua da microestrutura.

Uma vez que a disposição dos materiais na microestrutura é determinante na obtenção das características desejáveis, Almeida, Paulino e Silva (2010) recorreram à Otimização Topológica associada com a imposição de restrições de simetria e repetição de padrões para implementar a mudança gradual do material tanto no nível global quanto no nível local. Os

resultados obtidos indicam que a abordagem adotada pelos autores é eficiente para representar a microestrutura de FGMs bem como facilitar e reduzir os custos de sua fabricação.

A abordagem empregada por Almeida, Paulino e Silva (2010) foi estendida para a otimização de sistemas de contraventamento de prédios altos por Torres e Almeida (2013). Fazendo uso do método SIMP e com o objetivo de minimizar a flexibilidade média das estruturas, os autores introduziram uma metodologia utilizando a OT para materiais homogêneos e isotrópicos incluindo restrições de simetria e repetição de padrões em qualquer direção. Os exemplos estudados, tanto em 2D quanto em 3D, demonstraram que a metodologia adotada pelos autores é bastante útil na geração de estruturas com leiaute de média ou baixa complexidade.

He *et al.* (2022a) propuseram uma nova abordagem para o controle de leiaute de estruturas bi e tridimensionais durante o processo de otimização topológica integrando, ao método BESO, o recurso de preservação de topologia dos Pontos Simples. Nessa abordagem os elementos sólidos são removidos iterativamente dos limites estruturais até que o resto da estrutura seja representado por um “esqueleto” com a espessura de um elemento. Os elementos removíveis são chamados de pontos simples e sua remoção não altera a topologia estrutural. Os resultados numéricos demonstraram que ao prescrever os projetos iniciais com diferentes topologias, a nova abordagem é capaz de gerar soluções diversificadas e competitivas, e assim, o projetista pode integrar preferências estéticas, sendo capaz de controlar diretamente a complexidade estrutural enquanto o desempenho estrutural é mantido.

Existem variadas metodologias eficazes na determinação das cargas de vento atuando em uma estrutura, como os ensaios em túnel de vento, metodologias estabelecidas em norma ou ainda a Dinâmica dos Fluidos Computacional. Esta última foi utilizada por Tang, Xie e Felicetti (2014) num estudo de otimização topológica de edifícios sujeitos a cargas de vento. Os autores utilizaram a CFD para simular várias direções de vento incidindo sobre estruturas. Os resultados finais mostraram a CFD como uma aliada eficiente da OT na concepção de prédios altos.

Lee *et al.* (2012) estabeleceram uma formulação para conduzir otimizações topológicas e de forma utilizando o algoritmo de projetos baseados em confiabilidade RBD (*Reliability-Based Design*). As cargas de vento foram estimadas através da CFD fazendo-se uso do *software* OpenFOAM. A otimização de forma foi utilizada para definir o perfil externo ótimo da edificação, e a otimização topológica foi utilizada para determinar a configuração ótima do sistema estrutural. Os autores comprovaram que a formulação proposta tem boa capacidade para determinar as variáveis de projeto ótimas.

Bobby *et al.* (2014) apresentam uma formulação para processos de otimização de prédios altos baseada na concepção de tais prédios é definida por três estágios: projeto conceitual, definição do sistema estrutural e projeto detalhado. A ideia dos autores é enriquecer os dois primeiros estágios com ferramentas analíticas a fim de fornecer aos projetistas uma visão das formas aerodinâmicas e dos sistemas estruturais. A formulação apresentou-se como uma ponte entre os aspectos dinâmicos e estruturais do procedimento de projeto de edifícios altos por meio de uma modelagem CFD. Eles empregaram otimização topológica baseada em desempenho. Os resultados obtidos para um estudo de caso mostraram a precisão e eficiência da formulação proposta.

No que se refere às pesquisas relacionadas à Otimização Topológica e Engenharia do Vento Computacional no âmbito do Campus Acadêmico do Agreste (CAA) pode-se citar o trabalho de Salvador (2018), que empregou o método SIMP para resolver o problema da minimização de flexibilidade sujeita à restrição de volume no contexto de elasticidade linear tridimensional. No estudo foi analisado como quatro critérios de resolução influenciam os principais parâmetros e a topologia final de diferentes problemas clássicos de OT, a saber o Critério de Otimalidade (OC), a Programação Quadrática associada à Otimização por Aproximação Sequencial (SAO-QP, *Sequential Approximate Optimization in Quadratic Program form*), a aproximação Dual também associada à Otimização por Aproximação Sequencial (SAO-DUAL, *Sequential Approximate Optimization in Dual form*) e o Método das Assíntotas Móveis (MMA). Os exemplos analisados demonstraram que os quatro critérios de resolução sempre apresentam valores numéricos relativamente próximos para a função objetivo.

Pereira (2018) e Silva, Pereira e Bono (2023) empregaram, no MATLAB, os métodos BESO e SIMP para otimizar, estruturas de contraventamento bidimensionais em edifícios altos, utilizando como modelo de estudo o edifício padrão da *Commonwealth Advisory Aeronautical Research* (CAARC). Para a obtenção dos carregamentos do vento, duas abordagens foram empregadas: a norma NBR 6123/2023 e a CFD, esta última fazendo uso da metodologia LES (*Large Eddy Simulation*).

Cavalcante (2019), utilizou o *software* OpenFOAM para determinar as regiões entre prédios paralelos onde aerogeradores apresentariam melhor rendimento aerodinâmico. Para tanto, analisou-se o campo de velocidade, distribuição de pressão, índice de turbulência, parâmetros geométricos das edificações e ângulo de incidência do vento. Para a modelagem da turbulência foi empregado o modelo de fechamento $k - \varepsilon$ RNG. Foram simulados dois prédios paralelos de altura (H) e lado (B) com razão de aspecto 1:1:4. Verificou-se que a melhor região para

instalação das turbinas eólicas seria no plano de simetria entre os prédios com $x/B = 0,0$; $0,40 \leq y/B \leq 0,40$ e $3,0 \leq z/B \leq 4,0$.

Silva (2021) otimizou, com relação à rigidez, fachadas estruturais de edifícios altos considerando a influência do vento, utilizando o método SIMP, desenvolvido em ambiente de programação MATLAB. Para a Otimização Topológica foram implementados dois programas, um bidimensional e um tridimensional, baseados no programa *top3dmgcm* desenvolvido por Amir, Aage e Lazarov (2014). Os dois códigos implementaram técnicas para controle de leiaute através da imposição de simetria e repetição de padrões. O sistema linear proveniente da análise de elementos finitos foi solucionado no programa 3D com um *solver* iterativo multinível, o MCGC. Para a determinação do carregamento do vento fez-se uso da CFD através do programa OpenFOAM com os modelos de turbulência *Renormalization Group* $\kappa - \varepsilon$ (RNG) e *Shear Stress Transport* $\kappa - \omega$ (SST).

Nascimento e Bono (2022) empregaram, no *software* OpenFOAM, o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão para estudar a ventilação no interior de edificações de pequena altura observando como as condições geométricas influenciam a topologia do escoamento e as taxas de fluxo volumétrico. Foram simulados, bidimensionalmente, arranjos de três edificações com variadas inclinações do terreno e valores de afastamento entre as edificações. Os resultados revelaram que a maior inclinação do terreno e o maior afastamento entre as edificações favorece a ventilação na segunda e terceira edificação.

Silva (2022) implementou o método BESO, adicionando técnicas de controle de leiaute e o *multigrid* geométrico (MCGC) para gerar sistemas de contraventamento tridimensionais otimizados. Para determinação dos esforços causados pelo vento foi empregado o modelo de turbulência $\kappa - \varepsilon$ padrão, no *software* OpenFOAM, simulando o escoamento do vento em torno de um conjunto de nove edificações de mesma altura. O estudo considerou diferentes casos variando a altura das edificações vizinhas e a distância entre as mesmas a fim de analisar como as diferentes configurações geométricas da vizinhança influenciam a topologia otimizada dos sistemas de contraventamento.

Almeida (2023) analisou a influência de determinados parâmetros sobre a ventilação natural cruzada. Utilizando o *software* OpenFOAM e empregando o modelo de fechamento de turbulência $k-\omega$ SST, foi simulado o escoamento do vento em torno de um modelo de edificação com aberturas em faces opostas e variadas configurações de vizinhança. A pesquisa investigou como o distanciamento entre as edificações e a dimensionalidade do modelo simulado (2D ou

3D) influenciam o escoamento do vento. Os resultados demonstraram que o aumento na distância entre as edificações favorece a ventilação natural e que os modelos simulados em 2D tendem a superestimar os parâmetros de velocidade e energia cinética quando comparados aos modelos 3D.

Nesse contexto, o presente trabalho dá continuidade à pesquisa desenvolvida por Silva (2022) ao otimizar fachadas estruturais de edifícios altos. Entretanto, para representar um ambiente urbano mais real, consideram-se edificações com diferentes alturas e a turbulência é modelada, no OpenFOAM, empregando o modelo de turbulência $\kappa - \omega$ SST. Para a etapa de otimização topológica, emprega-se o método SIMP e, além da repetição de padrões e simetria a 0° , impõe-se também simetria a 45° .

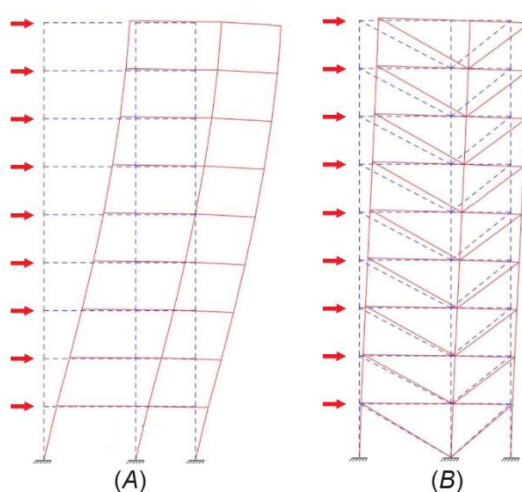
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS DE CONTRAVENTAMENTO

Com o desenvolvimento das cidades, há a tendência da concentração de grandes contingentes da população junto dos centros urbanos, o que faz dos edifícios altos uma característica física dominante nas cidades modernas. Taranath (2009) mostra que a partir de certa altura, o movimento lateral de um edifício tem uma importância significativa no projeto estrutural passando a ser influenciado não apenas pela resistência dos materiais, mas também por questões de rigidez, a qual depende principalmente do tipo de sistema estrutural adotado.

Dessa forma, para prédios altos, torna-se vital o uso de sistemas de contraventamento, que é uma estrutura auxiliar implementada para resistir às solicitações adversas que possam surgir nos edifícios e cujo principal objetivo é aumentar a rigidez da estrutura. De acordo com Franca (2003), ao inserir barras diagonais no interior dos quadros aporticados de uma estrutura, é possível eliminar os momentos de ligações entre vigas e colunas, fazendo com que todos os elementos estejam sujeitos apenas a esforços axiais, o que permite que as estruturas contraventadas se comportem de maneira mais eficiente quando comparadas às estruturas puramente aporticadas. Na Figura 1, mostra-se, simplificadamente, a influência do sistema de contraventamento na deformação de um prédio sujeito a cargas laterais.

Figura 1 – Comparação entre pórtico (a) sem e (b) com emprego de contraventamento



Fonte: Autor (2023)

Os sistemas de contraventamento não precisam estar necessariamente no interior da edificação, podendo estar na fachada. Nessa situação, passam a ter interesse arquitetônico e são definidos tanto por sua eficiência estrutural quanto por aspectos estéticos (Tomei; Imbimbo; Mele, 2018).

Na Figura 2, podem-se observar edifícios em que o contraventamento cumpre funções estéticas e estruturais.

Figura 2 – Sistemas de contraventamento aplicados em edifícios altos. (A) The Bow, em Calgary. (B) Tornado Tower, em Paris. (C) D2 Tower, em Doha.



Fonte: (A) Flickr ¹, (B) Flickr ², (C) Archello ³

2.2 OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL

O processo de otimização estrutural consiste em determinar o projeto de melhor desempenho. Sendo este avaliado então através de uma função objetivo, podendo incluir a maximização da rigidez (minimização da flexibilidade), minimização de tensões, minimização de deslocamentos, alteração da frequência natural e maximização da carga de flambagem, entre outras. A otimização estrutural pode ser classificada em três diferentes tipos, são eles: a otimização paramétrica, a otimização de forma e a otimização topológica. Conforme Querin *et al.* (2017), na otimização paramétrica o projetista já definiu a forma da estrutura, mas ainda não sabe o tamanho dos componentes estruturais. Por exemplo, se uma viga em balanço está sendo otimizada, o tamanho e posição dos elementos que a compõem podem ser já previamente conhecidos, mas não as dimensões de suas seções transversais. Na otimização de forma, a

¹ <https://www.flickr.com/photos/stuckinthemetal/10215323934/in/explore-2013-10-11>

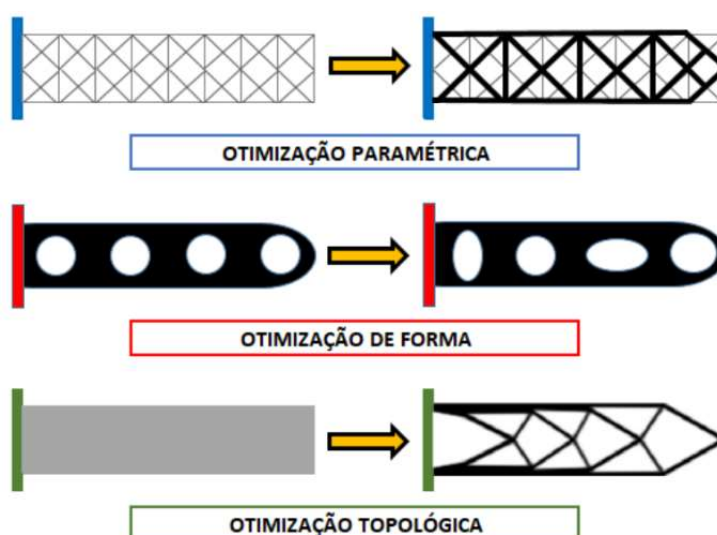
² <https://www.flickr.com/photos/54931505@N07/5157662465>

³ <https://archello.com/story/31775/attachments/photos-videos/1>

incógnita é a forma ou contorno de algumas partes da fronteira de um determinado domínio estrutural. Desse modo, a estrutura tem forma variável e topologia fixa, não ocorrendo a inserção de furos ou elementos.

A Otimização Topológica é a forma mais geral de otimização estrutural; ela resolve o problema de distribuir uma determinada quantidade de material dentro de um domínio de projeto. Para estruturas do tipo contínuo em duas dimensões (2D), as mudanças de topologia podem ser alcançadas permitindo que a espessura de uma chapa, por exemplo, tenha valores zero em diferentes locais, determinando assim o número e a forma das cavidades (furos). Para estruturas do tipo contínuo em três dimensões (3D), o mesmo efeito pode ser obtido com uma variável do tipo densidade que pode levar qualquer valor a zero. Na Figura 3, exemplificam-se os três tipos de otimização estrutural apresentados.

Figura 3 – Tipos de Otimização Estrutural



Fonte: Pereira (2018)

A otimização topológica, enquanto foco do presente trabalho, receberá especial atenção no item a seguir.

2.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA (OT)

A otimização topológica é uma das mais avançadas técnicas de otimização estrutural e é usada principalmente nos estágios iniciais de um projeto para a produção de leiautes conceituais ótimos que representem o esqueleto de uma estrutura ou componente estrutural. O desenvolvimento de um leiaute ótimo envolve a distribuição ótima do material em um domínio

baseando-se em determinadas condições de suporte, carregamento, restrições e objetivos (Tsavdaridis *et al.*, 2020). Conforme Querin *et al.* (2017), existem diversos métodos de OT, o quais podem ser agrupados principalmente em duas categorias: (1) métodos baseados no Critério de Otimalidade (OC) e (2) métodos heurísticos ou intuitivos.

Os métodos OC satisfazem um conjunto de critérios relacionados ao comportamento da estrutura e são baseados na condição de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (ver Haftka; Gürdal, 1992), o que significa que são mais rigorosos. São adequados para problemas com grande número de variáveis de projeto e poucas restrições. Dentre os métodos baseados no Critério de Otimalidade, pode-se citar o método da Homogeneização, o SIMP, LSM (*Level Set Method*) e o GMTS (*Growth Method for Truss Structures*). Os métodos heurísticos, por outro lado, são derivados da intuição, observações de processos de engenharia ou de sistemas biológicos. Esses métodos nem sempre podem garantir a otimalidade mas podem prover soluções eficientes viáveis. Alguns dos métodos heurísticos são o ESO (*Evolutionary Structural Optimization*), o BESO (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization*) e o SERA (*Sequential Element Rejection and Admission*), entre outros.

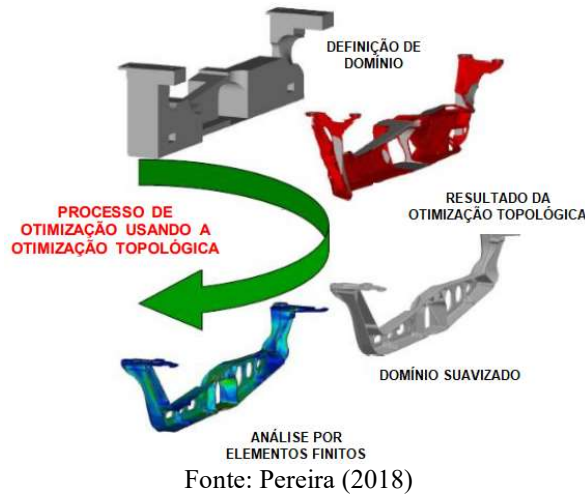
De acordo com Eschenauer e Olhoff (2001), a OT de estruturas contínuas pode ainda ser classificada, quanto à sua abordagem, em duas classes: microscópica (material) e macroscópica (geometria). Na abordagem microscópica é comum usar uma malha fixa de elementos finitos para representar a geometria do domínio, com cada variável de projeto atingindo valores constantes dentro de cada elemento finito. A otimização consiste em determinar se cada elemento da malha deve conter material ou não, dessa forma, a densidade do material dentro de cada elemento é usada como uma variável de projeto definida entre os limites 0 (vazio) e 1 (material sólido). Durante o processo, as variáveis de projeto tendem a atingir um dos valores limites, formando assim um leiaute com agregados de pontos com material sólido ou vazios.

Na abordagem macroscópica, uma vez que a otimização topológica é realizada em conjunto com a otimização de forma, a malha não pode ser fixa, mas deve mudar conforme as mudanças dos contornos do projeto. Nessa abordagem, o leiaute de um corpo sólido pode ser alterado adicionando ou retirando material do domínio de projeto, ou ainda pelo posicionamento iterativo de novos furos em pontos específicos no domínio. Neste último caso, em cada iteração, os furos e os limites variáveis existentes do corpo contínuo são simultaneamente submetidos a um procedimento de otimização de forma (Eschenauer; Olhoff, 2001).

Independentemente da abordagem adotada, as soluções obtidas frequentemente precisam de ajustes, como a suavização dos contornos e definição dos elementos sólidos, de modo a tornar

o resultado viável construtivamente. Isso ocorre em virtude da dificuldade de dar um significado físico aos elementos de densidade intermediária, impossibilitando a fabricação da estrutura otimizada. Após os ajustes, a realização de uma nova análise da estrutura torna-se necessária a fim de verificar se as alterações na topologia não afetam a eficiência da estrutura otimizada. Na Figura 4, mostra-se uma representação dessas etapas.

Figura 4 - Processos conceituais de otimização topológica



Dentre os métodos de OT que utilizam a abordagem microscópica pode-se destacar o SIMP, sendo, um dos métodos mais populares e mais bem estabelecidos. No próximo item será dada uma visão mais aprofundada desse método, já que o mesmo se adota neste trabalho.

2.3.1 *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP)

Segundo Querin *et al.* (2017), o SIMP, desde seu desenvolvimento por Bendsoe (1989), tem se tornado o método de OT com mais publicações e também o mais implementado em *softwares* comerciais. A principal ideia do método é usar apenas uma variável de projeto por elemento finito, sendo esta variável uma densidade artificial (ρ_e) com valor que varia dentro do intervalo $0 \leq \rho_e \leq 1$. Dessa forma, o volume do domínio de projeto é dado pela relação entre o volume de cada elemento finito e sua densidade artificial através da seguinte expressão:

$$V = \sum_{e=1}^N v_e \rho_e \quad (01)$$

onde N , é o número total de elementos usados para discretizar o domínio de projeto, ρ_e é a densidade artificial do e -ésimo elemento e V é o volume resultante do domínio de projeto.

A densidade artificial (ρ_e) é também utilizada na determinação do módulo de elasticidade de cada elemento (E_e), conforme a Eq. (2), dada por Andreassen *et al.* (2011).

$$E_e(\rho_e) = E_{min} + \rho_e^p (E_0 - E_{min}), \quad \rho_e \in [0,1] \quad (02)$$

onde, E_0 é a rigidez do material, E_{min} é uma rigidez muito pequena adotada para evitar regiões vazias a fim de impedir que a matriz de rigidez se torne singular, e p é um fator de penalização introduzido para evitar que os elementos apresentem valores de densidades intermediárias.

O problema de otimização através do SIMP consiste em determinar a distribuição ótima de material no domínio de projeto, respeitando as restrições impostas. A formulação do problema é dada por:

$$\begin{aligned} \text{minimizar: } C(\boldsymbol{\rho}) &= \sum_{e=1}^N E_e(\rho_e) \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \\ \text{sujeito a: } \frac{V(\boldsymbol{\rho})}{V_0} &= f_v \\ \mathbf{KU} &= \mathbf{F} \\ 0 &\leq \boldsymbol{\rho} \leq 1 \end{aligned} \quad (03)$$

onde C é a flexibilidade média, $\mathbf{u}_e$ é o vetor de deslocamento do elemento, $\mathbf{k}_0$ é a matriz de rigidez do elemento, $\mathbf{U}$ e $\mathbf{F}$ são os vetores globais de deslocamento e força, respectivamente, $\mathbf{K}$ é a matriz de rigidez global, $\boldsymbol{\rho}$ é o vetor das variáveis de projeto (densidade dos elementos), $V(\boldsymbol{\rho})$ e V_0 são o volume do material e volume do domínio de projeto, respectivamente e, por fim, f_v é fração de volume prescrita.

Conforme apresentado por Bendsoe e Sigmund (2003) a sensibilidade da função objetivo com relação às variáveis de projeto, pode-se definir por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \rho_e} &= -p(\rho_e)^{p-1} \mathbf{u}_e^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}_e \\ \frac{\partial V}{\partial \rho_e} &= v_e \end{aligned} \quad (04)$$

O método SIMP foi originalmente apresentado para solucionar problemas de elasticidade linear, porém pode ser estendido para outros tipos de problemas, como demonstrado por Bendsoe e Sigmund (2003). Além disso, Liu *et al.* (2018) explicam que outros tipos de restrição também podem ser aplicados ou combinados.

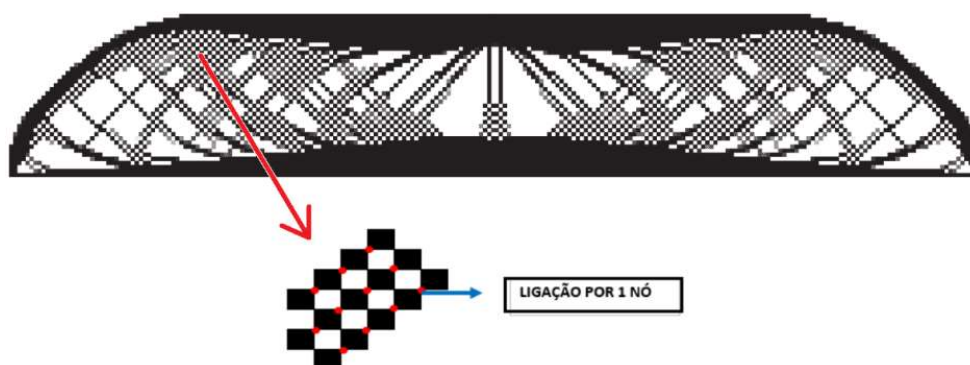
2.4 PROBLEMAS NUMÉRICOS DA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A metodologia de otimização topológica apresenta problemas teóricos e numéricos não triviais, como os problemas do tabuleiro de xadrez (*checkerboard*), da dependência de malha e dos elementos com densidades intermediárias. Estes três problemas serão brevemente apresentados nos seguintes tópicos.

2.4.1 Tabuleiro de xadrez (*checkerboard*)

O problema de instabilidade do tabuleiro de xadrez é caracterizado, de acordo com Diaz e Sigmund (1995), pela formação de regiões com alternância de elementos sólidos e vazios na topologia final, concedendo à estrutura otimizada uma semelhança com um tabuleiro de xadrez, como representado na Figura 5.

Figura 5 - *Checkerboard* (tabuleiro de xadrez)



Fonte: Autor (2023)

Conforme Sigmund (1994), o *checkerboard* é um problema numérico que acontece devido à má modelagem da rigidez pelo método dos elementos finitos de baixa ordem e não pode ser interpretado como um tipo de microestrutura porosa ideal. Regiões com padrões de tabuleiro de xadrez têm rigidez (numérica) artificialmente alta. No entanto, a rigidez real de um tabuleiro de xadrez composto por elementos sólidos e vazios é zero, devido às singularidades de tensão nos cantos das regiões sólidas. Essa instabilidade é indesejável no resultado final, não corresponde a uma distribuição ótima do material no domínio de referência e sua configuração é muito difícil de ser manufaturada (Shukla; Misra; Kumar, 2013).

No trabalho de Diaz e Sigmund (1995) foi demonstrado que o padrão do tabuleiro de xadrez surge em razão das aproximações numéricas oriundas do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Assim, os autores sugeriram a adoção de elementos finitos de alta ordem como modo de evitar o problema do *checkerboard*. Foi observado que os elementos bidimensionais quadráticos de 9 nós apresentam distribuições mais homogêneas, enquanto os elementos bidimensionais de 4 nós tendem a produzir uma rigidez artificial elevada. O problema dessa abordagem, porém, reside no fato dos elementos finitos de alta ordem aumentarem o custo computacional da otimização.

Desse modo, a abordagem mais empregada para contornar o problema do tabuleiro de xadrez consiste em aplicar alguma técnica de filtragem à sensibilidade ou à densidade do elemento. Sigmund (1994) explica que os filtros de sensibilidades ponderam a sensibilidade de um elemento com base nos elementos da vizinhança, modificando a sensibilidade $\partial C / \partial \rho_e$ conforme a Eq. (5):

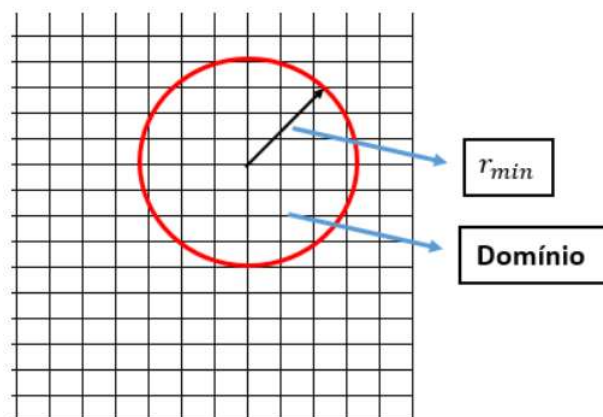
$$\frac{\partial \widehat{C}}{\partial \rho_e} = \frac{1}{\max(\gamma, \rho_e) \sum_{i \in N_e} H_{ei}} \sum_{i \in N_e} H_{ei} \rho_i \frac{\partial C}{\partial \rho_i} \quad (05)$$

Onde N_e é o conjunto de elementos i cuja distância centro-a-centro $\Delta(e, i)$ ao elemento e é menor que o raio do filtro r_{min} , γ é um pequeno número positivo cujo objetivo é evitar a divisão por zero, e H_{ei} um fator de peso definido como:

$$H_{ei} = \max(0, r_{min} - \Delta(e, i)) \quad (06)$$

O comprimento do filtro, é definido pelo raio de influência do filtro, isto é, o r_{min} , que é independente do nível de refinamento da malha. A função desse parâmetro no filtro é determinar os nós que irão influenciar a sensibilidade do e -ésimo elemento, conforme representado na Figura 6:

Figura 6 - Apresentação do raio e domínio para o filtro



Fonte: Pereira (2018)

Os filtros de densidades, por outro lado, são aplicados à densidade do elemento, transformando a densidade original de um elemento ρ_e em $\tilde{\rho}_e$, de acordo com a Eq. (7):

$$\tilde{\rho}_e = \frac{1}{\sum_{i \in N_e} H_{ei}} \sum_{i \in N_e} H_{ei} \rho_i \quad (07)$$

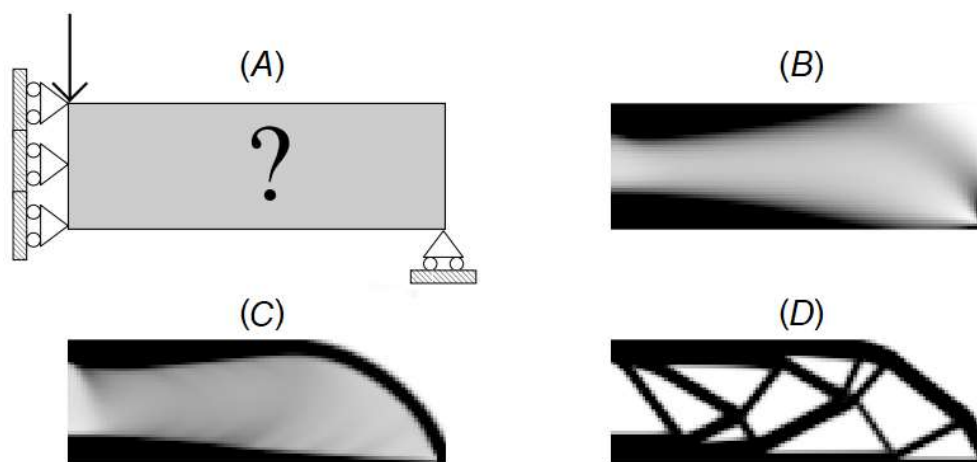
Por conta deste filtro, as densidades originais ρ_e são designadas como as variáveis de projeto e as densidades filtradas $\tilde{\rho}_e$ como as densidades físicas. Esta terminologia é necessária para enfatizar o fato de que a aplicação de um filtro de densidade faz com que as densidades originais ρ_e percam seu significado físico. Por consequência, deve-se sempre apresentar o campo de densidade filtrada $\tilde{\rho}_e$ em vez do campo de densidade original ρ_e como a solução para o problema de otimização.

2.4.2 Densidades Intermediárias

Os métodos baseados em densidade, como é o caso do SIMP, estão sujeitos ao problema de densidades intermediárias. Uma vez que a densidade artificial de cada elemento (ρ_e) pode variar dentro do intervalo $0 \leq \rho_e \leq 1$, qualquer valor diferente dos limites inferior e superior configura um elemento de densidade intermediária. Os elementos que se distanciam dos limites são problemáticos em virtude da dificuldade de lhes atribuir um significado físico bem como pela complexidade envolvida em sua manufatura. A solução para esse problema foi apresentada por Rozvany e Zhou (1991) através de uma abordagem que consiste em adotar valores adequados para o fator de penalização.

O fator de penalização tende a aproximar as densidades dos elementos aos valores extremos (0 e 1) evitando assim os elementos “cinzas” (densidade intermediária) e apresentando soluções formadas por elementos “brancos” (vazio) e “pretos” (sólido). A influência do fator de penalização sobre as estruturas otimizadas pode ser observada na Figura 7, que mostra o resultado da otimização, feita através do SIMP, da viga MBB (Messerschmitt-Bölkow-Blohm) variando apenas o fator de penalização empregado para $p = 0,50$; 1,50 e 3.

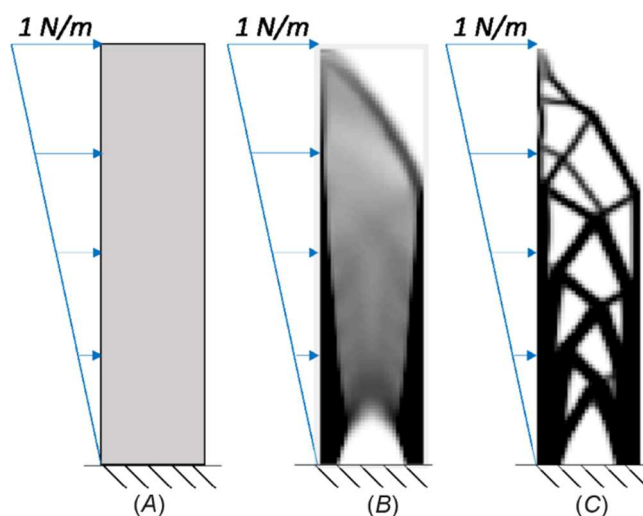
Figura 7– Viga MBB otimizada empregando-se diferentes fatores de penalização. (A) Domínio de projeto. (B) $p = 0,50$, (C) $p = 1,50$ e (D) $p = 3$



Fonte: Autor (2023)

O processo de otimização através do SIMP ocorre de maneira iterativa. Recomenda-se empregar uma estratégia de continuação em que, nas primeiras iterações, o leiaute ótimo da estrutura será calculado utilizando-se um fator de penalidade $p = 1$, nas iterações seguintes esse valor aumenta-se de forma progressiva até atingir seu valor máximo, designado pelo projetista, fazendo com que o processo de otimização alcance uma solução sólido/vazio (Querin *et al.*, 2017). Alguns programas, porém, não fazem uso dessa estratégia de continuação e, desde o início do processo iterativo, adotam para p o valor atribuído pelo usuário. O procedimento de distribuição de material a cada iteração até a obtenção de uma solução sólido/vazio pode ser observado na Figura 8.

Figura 8– Otimização através do método SIMP. (a) domínio de projeto. (b) distribuição do material após 10 iterações. (c) distribuição final de material (230 iterações)



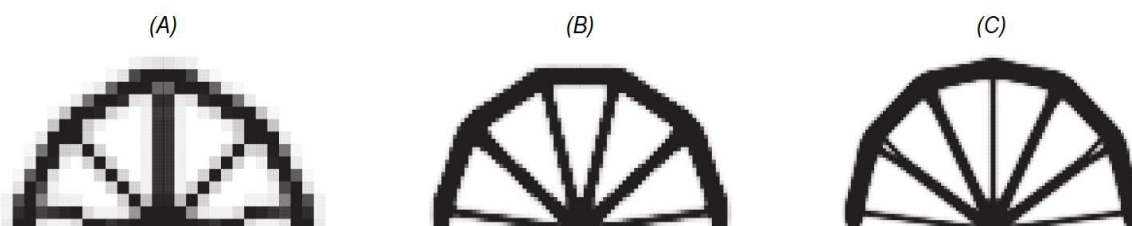
Fonte: Silva (2021)

2.4.3 Dependência de Malha

De acordo com Sigmund e Petersson (1998), o problema da dependência de malha se refere à não obtenção qualitativa da mesma solução para diferentes malhas, uma vez que, idealmente, o refinamento da malha deveria resultar em uma melhor modelagem dos elementos finitos da mesma estrutura ótima e uma melhor descrição dos limites entre regiões sólidas e vazias, não em uma estrutura mais detalhada e qualitativamente diferente.

Na Figura 9, pode-se observar o problema da dependência de malha na prática. Tem-se uma roda de bicicleta otimizada através do método SIMP variando-se apenas a quantidade de elementos empregada na discretização do domínio. Percebe-se que houve um aumento considerável da quantidade de barras, da complexidade da estrutura e, conseqüentemente, diminuição da exequibilidade.

Figura 9– Problema da dependência de malha observado na otimização de uma roda de bicicleta. (A) 320 elementos. (B) 2880 elementos. (C) 5120 elementos



Fonte: Sigmund (1994)

Sigmund (1994) explica que, por propósitos práticos, o interesse da otimização topológica está em soluções mais “grosseiras”, isto é, com menos barras e furos maiores. Dessa forma se busca um método para “fixar” a topologia independentemente do quão refinada seja a discretização da malha para que assim o seu refinamento resulte apenas em descrições melhores e mais suaves dos limites entre regiões sólidas e vazias na estrutura otimizada.

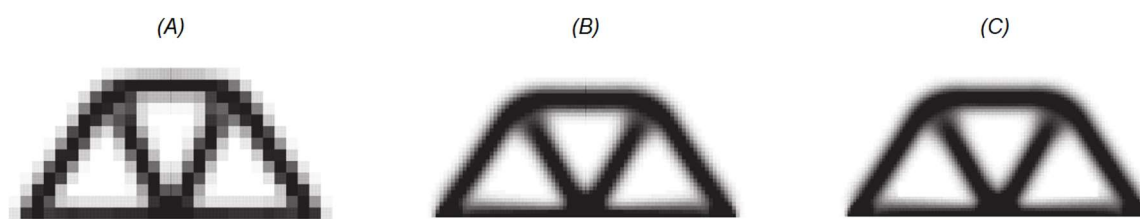
Sigmund e Petersson (1998) dividem o problema da dependência de malha em duas categorias: (1) o problema na não-existência de soluções e (2) o problema das soluções não-únicas. Na primeira categoria a discretização de uma estrutura em uma malha cada vez mais fina é necessária uma vez que fornece um valor cada vez melhor da função objetivo. Já na categoria (2) uma estrutura mais refinada é sempre possível, mas não necessária.

Naturalmente, não é possível estabelecer esquemas que removam a não-unicidade de um problema, mas é possível, através da introdução de restrições de manufatura, por exemplo,

como uma restrição de área mínima, determinar uma solução menos oscilante. Com relação ao problema da não-existência de soluções, vários métodos foram sugeridos, como a introdução de uma restrição de gradiente local, implementada por Niordson (1983), o método de controle de perímetro, desenvolvido por Haber, Bendsoe e Jog (1996), e ainda o esquema de filtro de sensibilidade, proposto por Sigmund (1994).

O filtro proposto por Sigmund (1994) é uma extensão do filtro proposto para lidar com o problema do *checkerboard* e baseia-se na modificação das sensibilidades dos elementos através da média ponderada entre elementos fixos na vizinhança, conforme demonstrado na Eq. (5). Na Figura 10, pode-se observar o filtro de sensibilidade sendo aplicado à mesma estrutura da Figura 9, utilizando $r_{min} = 0,04$.

Figura 10 - Independência de malha alcançada na otimização de uma roda de bicicleta. (A) 320 elementos. (B) 2880 elementos. (C) 5120 elementos



Fonte: Sigmund (1994)

Nota-se que o maior refinamento da malha não resultou numa mudança significativa do leiaute otimizado com inserção/exclusão de novas barras ou furos, mas sim numa melhor definição das fronteiras entre regiões sólidas e vazias.

2.5 TÉCNICAS DE CONTROLE DE LEIAUTE

Conforme Torres e Almeida (2013), alcançar o controle de leiaute na otimização topológica é relevante e necessário para facilitar a manufatura das estruturas otimizadas e diminuir seu custo, levando assim a OT a além de uma ferramenta de projeto preliminar. Muitas restrições geométricas de manufatura foram desenvolvidas com esse fim, como a simetria axial e repetição de padrões, e podem contribuir para fazer com que os resultados das técnicas de otimização sejam mais adequados para projetos de engenharia. Essas restrições são relevantes também no projeto de prédios altos, ajudando os engenheiros estruturais a apresentarem projetos conceituais ótimos para o sistema de contraventamento.

Os edifícios são normalmente formados pela repetição de um determinado pavimento ao longo da sua altura e frequentemente é desejável que o sistema estrutural siga este padrão. A topologia desejada é, portanto, a repetição de uma subestrutura em cada pavimento ou em cada conjunto de pavimentos. Ao otimizar o desempenho do sistema estrutural durante a fase de projeto conceitual, essa parte da edificação pode desempenhar um papel importante no projeto e reduzir o consumo de recursos.

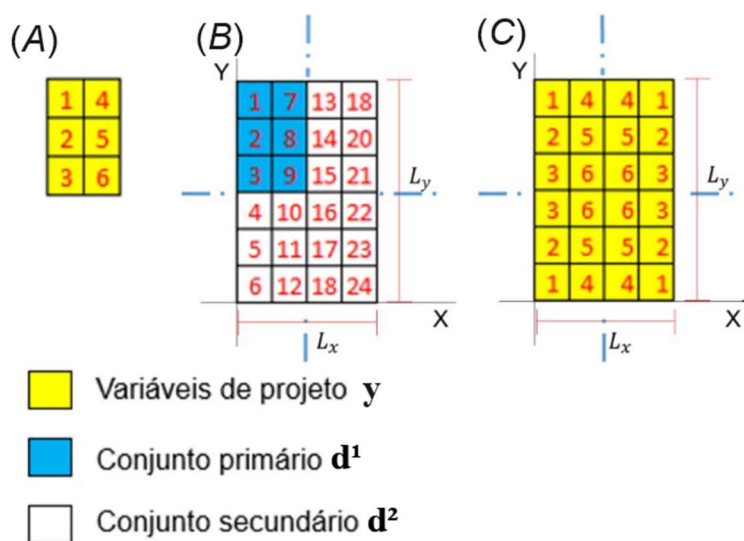
No âmbito do Campus Acadêmico do Agreste, Silva (2021) e Silva (2022) implementaram técnicas de controle de leiaute a seus respectivos códigos de OT ao otimizar estruturas de contraventamento. Ambos os autores implementaram tanto a repetição de padrões ao longo da altura do edifício estudado, quanto a simetria axial a 0° . Nesse contexto, o presente estudo amplia o uso da simetria axial ao implementar, além das já mencionadas técnicas, a simetria a 45° . A distinção entre simetria a 0° e 45° pode ser vista, em detalhes, no item 3.3.

2.5.1 Imposição de Simetria

Almeida, Paulino e Silva (2010) explicam que a distribuição simétrica do material é alcançada mapeando as variáveis de projeto $\mathbf{y}$ no conjunto de densidades $\mathbf{d}$. O conjunto de densidades é dividido em dois subconjuntos: as densidades primárias $\mathbf{d}^1$ e as densidades secundárias $\mathbf{d}^2$, obtidas de $\mathbf{d}^1$ formando um leiaute simétrico. Na Figura 11 mostra-se um esquema representativo relacionando o conjunto de variáveis $\mathbf{y}$ aos conjuntos de variáveis $\mathbf{d}^1$ e $\mathbf{d}^2$ considerando simetria tanto na direção x quanto na direção y .

As variáveis de projeto (Figura 11.A) são mapeadas nas densidades primárias $\mathbf{d}^1$ (elementos cinzas na Figura 11.B). O segundo mapeamento é feito levando em consideração a simetria desejada. As coordenadas dos elementos do conjunto secundário de densidades $\mathbf{d}^2$ são testadas para determinar as condições de simetria do conjunto de densidades primárias $\mathbf{d}^1$. Assim que o elemento simétrico é identificado, a mesma variável de projeto, é atribuída para os dois nós.

Figura 11 – Restrição de simetria: (A) conjunto de variáveis de projeto y . (B) conjuntos de densidades. (C) montagem simétrica das variáveis de projeto

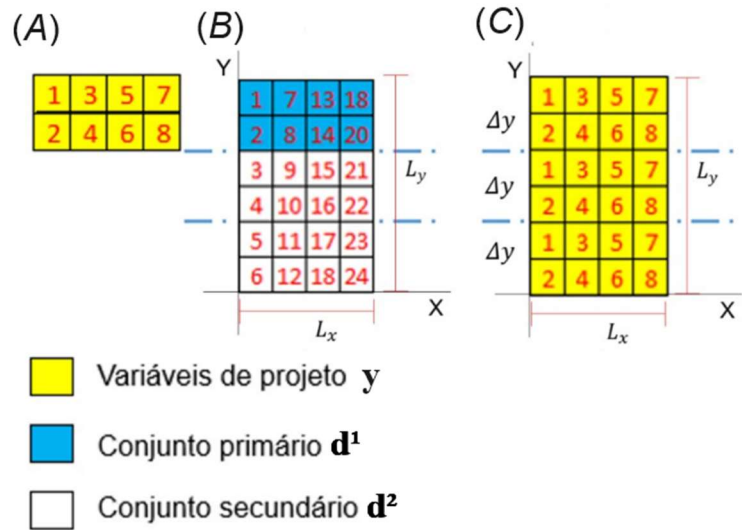


Fonte: Adaptado de Silva (2021)

2.5.2 Repetição de Padrões

Padrões são aplicados pelo mapeamento das variáveis de projeto y no conjunto de densidades d . O esquema de mapeamento segue a mesma ideia desenvolvida para impor restrições de simetria e o conjunto de densidades d é dividido em dois subconjuntos: o subconjunto de densidades primárias d^1 e o de densidades secundárias d^2 , obtido do conjunto primário pela formação de um padrão. Na Figura 12, mostra-se um esquema representativo relacionando o conjunto de variáveis de projeto y aos conjuntos de densidades d^1 e d^2 considerando padrões tanto na direção x quanto na direção y . As variáveis de projeto (Figura 12.A) são mapeadas no conjunto de densidades primárias d^1 (elementos cinzas na Figura 12.B). O segundo mapeamento é construído levando em consideração o padrão desejado. As coordenadas dos elementos do conjunto de densidades secundárias d^2 são testadas para determinar a condição de padrão a partir do conjunto primário d^1 . Uma vez que os elementos correspondentes são identificados, a mesma variável de projeto é atribuída para todos os elementos seguindo o padrão. (Almeida; Paulino; Silva, 2010).

Figura 12 – Restrição de repetição de padrões. (A) conjunto de variáveis de projeto **d**. (B) conjuntos de densidades. (C) montagem das variáveis de projeto com repetição de padrões



Fonte: Adaptado de Torres e Almeida (2013)

As formulações de imposição de simetria e repetição de padrões são relativamente simples e podem ser vistas nos trabalhos de Silva (2021) e Silva (2022), que as implementaram ao código de OT através dos métodos SIMP e BESO, respectivamente.

2.6 MÉTODO MULTIGRID

Conforme Keller (2007), as situações em que se exigem métodos de solução de sistemas lineares (*solvers*) eficientes são, em geral, em processos iterativos de solução, normalmente originados de métodos numéricos, que requerem uma estimativa inicial da solução até atingir a solução aproximada dentro de um determinado nível de convergência. Durante o processo obtém-se, em cada nível iterativo, uma solução aproximada do problema. A diferença entre a solução naquele nível iterativo e a solução exata do problema é denominada erro. O objetivo é reduzir este erro a um nível mínimo, de acordo com as especificações do problema. Reduzir este erro, que pode ser decomposto em diversos harmônicos (modos) através de uma série de Fourier, é a tarefa do *solver*. Os diversos modos deste erro podem ser associados a um espectro de frequência, cujo comprimento de onda é da ordem do tamanho da malha. Para resolver o sistema linear de forma eficiente é preciso reduzir, também com eficiência, todas as componentes do erro. Como os métodos iterativos reduzem com eficiência apenas as componentes (modos) do erro cuja frequência corresponde ao tamanho da malha em uso, se

apenas uma malha for empregada, é natural esperar-se que a redução de todas as componentes do erro seja ineficiente.

Dessa forma, a estratégia dos métodos *multigrid* é usar uma sequência de malhas juntamente com *solvers* iterativos buscando reduzir todas as componentes de frequência de erro. Na malha original (fina) os modos de mais alta frequência do erro são facilmente eliminados pelo solver linear, enquanto os modos de baixa frequência são difíceis de remover. O fato desses modos de baixa frequência de erro serem eliminados lentamente causa a estagnação da taxa de convergência. Assim, utilizando-se uma malha grossa, o modo correspondente a esta nova malha pode ser também eliminado. Procedendo-se desta forma, todos os modos de erro podem ser facilmente eliminados pelo solver iterativo. Assim sendo, os métodos *multigrid* podem ser vistos como aceleradores de convergência dos *solvers* de sistemas lineares, sendo intimamente ligados à natureza da malha. Eles não são por si só, métodos de solução de sistemas lineares, como muitas vezes são considerados.

2.7 AÇÃO DO VENTO SOBRE EDIFICAÇÕES

Taranath (2009) define vento como um termo usado para descrever o movimento horizontal do ar. Ele explica que os ventos são produzidos por diferenças na pressão atmosférica, sendo estas causadas por diferenças de temperatura geradas principalmente pela distribuição desigual do calor do sol sobre a superfície terrestre, bem como pelas diferentes propriedades térmicas dos solos e oceanos.

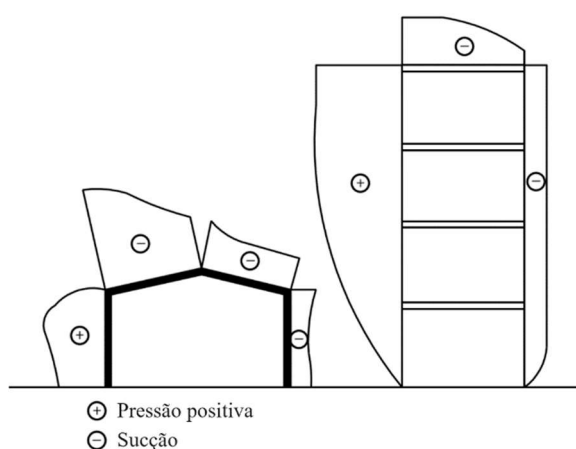
As características das pressões do vento em uma estrutura são uma função das características do vento incidente, da geometria da estrutura em consideração e da proteção contra o vento oferecida pelo ambiente, seja através da topografia do terreno, seja através de estruturas construídas pelo homem. As pressões não são estáveis, mas altamente flutuantes, em parte como um resultado das rajadas do vento, mas também como resultado do desprendimento de vórtices nas bordas da estrutura, o que resulta em uma distribuição não uniforme da pressão sobre a superfície edificação.

As complexidades das cargas do vento devem ser levadas em consideração ao se executar um projeto, uma vez que, em virtude das muitas incertezas envolvidas, as máximas cargas de vento aplicadas a uma estrutura durante sua vida útil podem variar amplamente daquelas idealizadas no projeto. Assim, a integridade de uma estrutura não deve ser garantida baseando-se apenas

na norma aplicável, uma vez que a normas não se aplicam a prédios e construções com formatos e localização não convencionais (Mendis *et al.*, 2007).

A pressão do vento é positiva na face a barlavento, e negativa nas demais faces e na maior parte da superfície do telhado (ver Figura 13). Geralmente, observam-se pressões negativas nas quinas dos prédios e bordas dos telhados, particularmente em saliências. A estrutura geral é projetada para resistir às pressões laterais e de elevação, e as partes individuais da estrutura são projetadas para resistir às concentrações de pressões positivas e negativas. (Taranath, 2009).

Figura 13 – Distribuição das cargas do vento: pressão positiva na face a barlavento, e pressão negativa na fachada a sotavento e telhado



Fonte: Taranath (2009)

Mendis *et al.* (2007) lista três efeitos básicos do vento que necessitam ser levados em consideração no projeto de estruturas sensíveis ao vento:

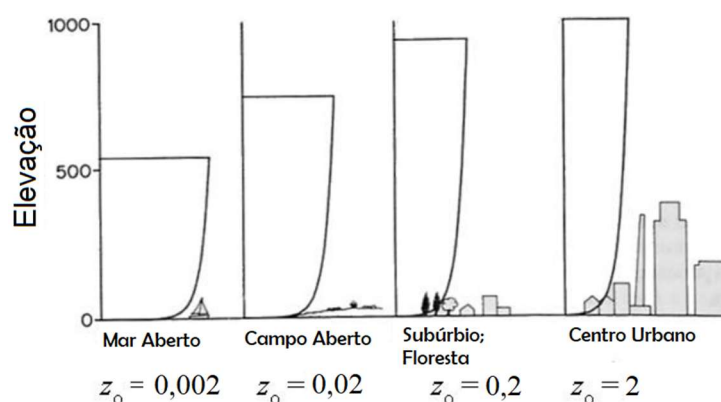
1. Impacto no entorno – investiga como a construção de uma estrutura pode alterar o vento e os efeitos dessa alteração sobre o ambiente em que o vento incide. Esse estudo é particularmente importante para avaliar o impacto sobre pedestres, veículos e outras estruturas existentes na vizinhança.
2. Cargas aplicadas às fachadas – devido ao alto custo dos sistemas de revestimento de prédios altos, os engenheiros e projetistas não podem usufruir do conservadorismo das normas na avaliação das cargas aplicadas às fachadas de edificação. Com as devidas considerações à complexidade dos formatos das edificações e suas características dinâmicas, nem mesmo as mais avançadas normas são capazes de avaliar com precisão as cargas impostas pelo vento. Assim, testes em túnel de vento para avaliar as cargas de projeto são agora uma prática normal da indústria, com o objetivo de minimizar os

custos iniciais de capital e de manutenção com elementos de revestimento como painéis e vidros.

3. Cargas aplicadas à estrutura – determina a carga de vento de projeto a fim de definir o sistema estrutural resistente à carga lateral de uma estrutura para satisfazer os mais variados critérios de projeto.

Perto da superfície terrestre a velocidade do vento é afetada pelo atrito da corrente de ar com o terreno, formando assim uma camada limite, denominada ABL (do inglês, *Atmospheric Boundary Layer*), na qual a velocidade do vento varia de valores próximos ao zero, na superfície, até um valor máximo na altura do gradiente. A depender do tipo de terreno, a espessura da camada limite pode variar entre 500 m e 3000 m. Isso ocorre porque cada tipo de terreno tem um comprimento de rugosidade associado (z_o), o qual confere maior ou menor influência sobre o escoamento do ar (Mendis *et al.*, 2007, Lu e Li, 2022). Tal influência pode ser observada na Figura 14, quanto menor o comprimento de rugosidade (caso do mar ou campo aberto), menor a altura da camada limite. Já com maiores comprimentos de rugosidade (subúrbios e centros urbanos), a camada limite atinge valores mais elevados.

Figura 14 – Perfis de velocidade média para diferentes tipos de terreno



Fonte: Mendis *et al.* (2007)

Segundo Lu e Li (2022), as cargas impostas pelo vento a prédios e estruturas estão fortemente relacionadas com as características da camada limite atmosférica, portanto, uma representação realística da ABL é essencial para garantir a concepção de projetos seguros de estruturas resistentes ao vento.

A distribuição da ação do vento em edificações pode ser obtida através de três formas principais: metodologias estabelecidas em normas, ensaios experimentais em túnel de vento e a Dinâmica dos Fluidos Computacional. Nos próximos tópicos, cada uma dessas formas será abordada de maneira mais aprofundada.

2.7.1 NBR 6123/2023 – Forças Devidas ao Vento em Edificações

No caso do Brasil, as regras que definem os parâmetros de cálculo para o projeto de equipamentos e estruturas sujeitas à ação estática e dinâmica do vento estão contidas na NBR 6123/2023 – Forças Devidas ao Vento em Edificações. Esta norma não se aplica a casos de edificações com formas, dimensões ou localização incomuns, casos para os quais estudos especiais devem ser conduzidos. No entanto, para a ampla maioria dos casos, os parâmetros descritos nesta norma podem ser aplicados de maneira satisfatória na determinação da ação do vento.

As forças estáticas devido ao vento são determinadas, de acordo com a NBR 6123/2023, a partir da velocidade básica do vento, definida como a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno em campo aberto e plano. Uma vez definida, a velocidade básica é ponderada através de fatores topográficos, estatísticos e de rugosidade para então determinar a velocidade característica do vento. Sendo esta usada na determinação da pressão dinâmica do vento.

2.7.2 Túnel de Vento

Os túneis de vento são instalações experimentais projetadas para simular o escoamento do vento sobre objetos, como estruturas, veículos, aeronaves e outros corpos, em condições controladas e repetíveis, e são capazes de fornecer dinâmicas realísticas do escoamento do vento, como a evolução dos vórtices e efeitos da esteira (He *et al.*, 2022b).

Blessmann (2011) destaca a importância de representar corretamente as condições de contorno, de maneira a simular com a maior fidelidade possível as condições e comportamento da atmosfera terrestre, a fim de garantir bons resultados. Assim, é vital que seja representado o caráter turbulento da camada limite atmosférica, bem como o seu gradiente de velocidade referente à altura.

Embora os túneis de vento sejam altamente eficientes e confiáveis na previsão do comportamento do vento em diversas condições atmosféricas, seu acesso é restrito a centros acadêmicos de grande porte e empresas especializadas. Diante dessa limitação, a Dinâmica dos

Fluidos Computacional emerge como uma ferramenta cada vez mais acessível e confiável para aplicação nas áreas de engenharia do vento e dinâmica dos fluidos.

2.7.3 Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

O constante progresso das técnicas numéricas e das capacidades computacionais tem aumentado a capacidade dos projetistas de analisar e simular processos relacionados ao vento com a CFD complementando as abordagens experimentais e analíticas, fornecendo um meio alternativo de simular fluxos de fluidos reais.

A CFD apresenta claras vantagens quando comparada às outras metodologias de determinação das cargas do vento. As simulações numéricas são capazes de prever cargas que não seriam calculadas através de normas e, em oposição à maioria das técnicas experimentais, fornecem dados de todos os pontos do domínio computacional, permitindo assim estudos paramétricos. A Dinâmica dos Fluidos Computacional permite ainda que as simulações sejam feitas em escala real, evitando assim os requisitos de similaridade com os testes em escala reduzida, além de ser mais rápida e econômica que os testes em túnel de vento (Blocken; Stathopoulos; Beek, 2016; Toja-Silva *et al.*, 2018).

Embora apresente diversas vantagens, a literatura cita desafios envolvidos no uso da CFD. Blocken, Stathopoulos e Beeck (2016) citam o fato de a CFD ser altamente dependente das decisões do usuário, principalmente no que diz respeito à malha empregada na discretização do domínio computacional, as condições de contorno iniciais, os esquemas numéricos e a tolerância empregada. Druenen *et al.* (2019) explicam que os resultados numéricos têm a imperativa necessidade de validação através de resultados experimentais além de exigirem uma alta capacidade computacional para realização das simulações.

Na engenharia civil, além da previsão de cargas de vento em estruturas, as simulações CFD também são ferramentas fundamentais para analisar, por exemplo: cargas de vento em prédios altos (HUANG *et al.*, 2007), ventilação natural (Van Hooff; Blocken; Tominaga, 2017), dispersão de poluentes (Du *et al.*, 2021), conforto de pedestre (Druenen *et al.*, 2019), entre outros.

2.7.3.1 OpenFOAM

Existem diferentes ferramentas que auxiliam os profissionais de engenharia a realizarem análises de Fluidodinâmica Computacional. Os programas comerciais, apesar de terem vantagens, como interface mais amigável e suporte técnico, muitas vezes limitam seu uso devido aos custos das licenças comerciais. O fato de também restringirem o acesso ao código fonte impede que usuários o modifiquem. Nesse sentido, o OpenFOAM é um programa de código aberto e licenciado sobre GNU (*General Public License*), o que dispensa o pagamento de licenças para se usufruir de todas as opções disponibilizadas no programa, tendo alcançado sucesso como uma ferramenta cada vez mais robusta e eficiente. Ele é escrito em C++ com vários utilitários e uma vasta biblioteca de solvers implementados para diversos problemas como transferência de calor, escoamentos compressíveis, incompressíveis, multifásicos, análise de tensão em mecânica estrutural, eletromagnetismo, combustão, modelagem de turbulência, entre outras aplicações. Além disso, possui uma estrutura de código modular que permite aos usuários desenvolverem solucionadores numéricos personalizados, bem como utilitários de pré e pós-processamento (OpenFOAM *FOUNDATION*, 2021; Chen; Hall, 2022).

O OpenFOAM tem sido utilizado de forma consistente no meio acadêmico e industrial a fim de simular o escoamento de fluidos, fornecendo resultados que podem ser empregados nas mais diversas áreas, como por exemplo: potencial eólico (Zhang; Deng; Wang, 2019; Amini *et al.*, 2021), transferência de calor (Sun *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2023), combustão de biomassa sólida (Sánchez *et al.*, 2021), potencial para ventilação natural (Zhang *et al.*, 2022; Nascimento; Bono, 2022), determinação de cargas do vento (Wang; Chen, 2020), cálculo de campos magnéticos (Yang, 2021), entre outros. Dessa maneira o OpenFOAM se consolida como uma ferramenta versátil e confiável na solução de diversos tipos de problemas de engenharia.

2.8 INTERFERÊNCIA DA VIZINHANÇA

Embora muitos estudos a respeito dos efeitos do vento em prédios altos se deem através da análise de um prédio isolado, é de suma importância entender que em ambientes urbanos reais, onde edificações altas estão cercadas por outros edifícios altos, as cargas do vento podem ser muito diferentes daquelas observadas em casos isolados. Dessa forma, uma vizinhança composta por prédios altos pode tanto aumentar quanto diminuir consideravelmente não apenas

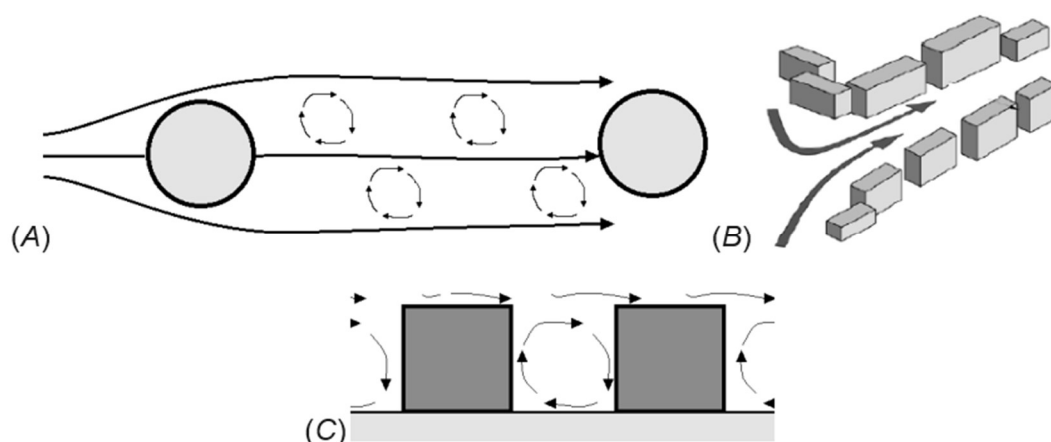
os valores médios de carga do vento, mas também os picos de pressão atuando nos sistemas externos das edificações (Kim; Tamura; Yoshida; 2011).

A análise dos efeitos da vizinhança não é trivial, uma vez que existe um grande número de fatores a serem levados em consideração, como o tamanho e forma da edificação, posição relativas das edificações interferentes, ângulo de incidência do vento e condições do terreno. Nesse sentido, devido à sua agilidade e versatilidade em simular casos com diferentes condições de contorno, a CFD surge como uma ferramenta ideal para quantificar e analisar os, assim chamados, efeitos de interferência.

Um dos principais efeitos de interferência, o martelamento, é definido por Blessmann (2005) como a carga periódica gerada por vórtices de von Kármán, provenientes de edificações a barlavento. A força periódica pode gerar efeitos relevantes quando a frequência natural da edificação for coincidente com a dos turbilhões. Outro efeito de interferência relevante é o efeito Venturi, que se refere ao aumento da velocidade ou vazão do fluido devido a uma diminuição da área transversal.

Dessa forma, a depender da disposição das edificações em um ambiente urbano, a vizinhança pode ser responsável pelo aumento da velocidade do vento e, conseqüentemente, das pressões exercidas nas edificações a sotavento. Pode-se citar ainda os efeitos de esteira turbulenta que ocorrem quando uma edificação é afetada pela turbulência gerada na esteira de edificações a barlavento, o que pode alterar significativamente a distribuição de pressões nas edificações. Os principais efeitos de interferência são representados esquematicamente na Figura 15.

Figura 15 – Efeitos de interferência. (a) martelamento, (b) efeito Venturi e (c) esteira turbulenta



Fonte: Silva (2022)

2.9 MODELAGEM NUMÉRICA

A CFD envolve a aplicação de princípios da física, matemática, engenharia e ciência da computação para entender e simular o escoamento dos fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados; sob as mais diversas condições. Sua abordagem fundamental consiste na modelagem matemática do escoamento dos fluidos através da formulação de equações que descrevem como as propriedades do fluido, como velocidade, pressão, densidade e temperatura, variam em função do tempo e da posição no espaço. Essas equações, que são baseadas nas leis de conservação de massa, energia e momento linear, apenas possuem solução exata nos casos em que o escoamento é considerado muito simples, o que não é o caso da maioria dos escoamentos que ocorrem na natureza, especialmente o escoamento do ar em torno de edificações localizadas em ambientes urbanos.

As leis de conservação de massa e momento linear permitiram o desenvolvimento das equações de Navier-Stokes, que são a base da dinâmica dos fluidos. Devido à impossibilidade de, na maioria dos casos, resolver as equações de Navier-Stokes de forma analítica, procura-se empregar métodos numéricos capazes de fornecer soluções aproximadas das equações de conservação para escoamentos laminares e turbulentos (Silva-Freire; Menut; Su, 2022).

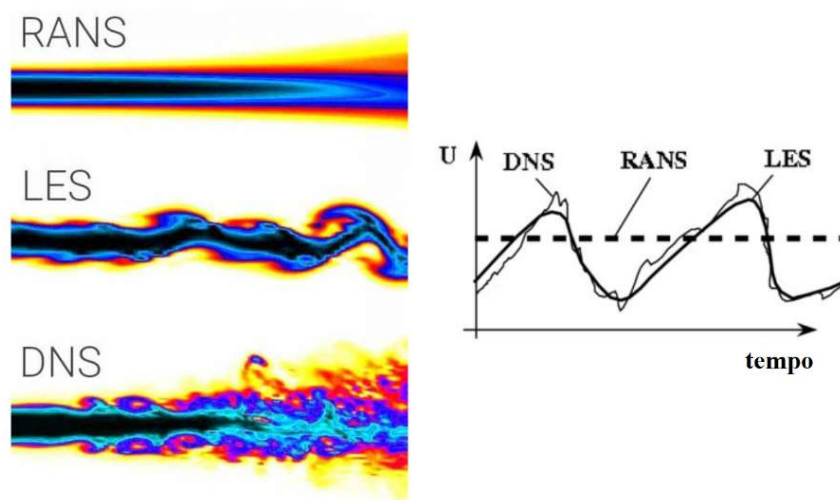
A turbulência, enquanto fenômeno físico de alta complexidade, e que exerce grande influência no escoamento dos fluidos, pode ser modelada em programas de CFD por diversas alternativas, dentre as quais, as três principais são as metodologias DNS (*Direct Numerical Simulation*), LES (*Large Eddy Simulation*) e RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

Conforme Moukalled, Mangani e Darwish (2016), a metodologia DNS visa resolver diretamente todas as escalas do escoamento, isto é, todas as estruturas turbulentas, através da resolução das equações de Navier-Stokes em sua forma completa, sem simplificações ou aproximações. Para tanto, simulações conduzidas através dessa metodologia precisam de discretizações temporais e espaciais muito refinadas, isto é, uma malha composta por elementos muito pequenos assim como passos de tempo também muito pequenos. Em virtude disso, a DNS é a mais precisa e detalhada das metodologias existentes, porém, é também a de maior custo computacional, tendo sua aplicação limitada a problemas muito simples e com número de Reynolds relativamente baixos, como empregado nos trabalhos de Xue *et al.* (2014), Zaripov *et al.* (2021) e Koncar, Sotosek e Bajsic (2022).

A fim de reduzir o enorme custo computacional associado à solução direta das equações de Navier-Stokes, análises estatísticas podem ser usadas para simplificar a resolução de escoamentos turbulentos. A natureza da turbulência, dependente do tempo, juntamente com sua ampla gama de escalas de tempo, sugere que técnicas de média estatística podem ser aplicadas para aproximar as flutuações aleatórias. No entanto, a média temporal leva a correlações que não são conhecidas a priori, surgindo dos termos não lineares nas equações de movimento. Modelar essas correlações que ocorrem é o clássico problema de fechamento na modelagem de turbulência. Assim, a metodologia LES surge como um método de menor custo computacional que consiste em resolver diretamente as maiores escalas de turbulência, determinadas principalmente pela geometria do problema em consideração, enquanto as menores escalas, que apresentam comportamento mais universal, são modeladas usando modelos de sub-malha. (Moukalled; Mangani; Darwish, 2016; Blocken, 2018).

Apesar de ser menos custosa que a DNS, a metodologia LES ainda apresenta um elevado custo computacional, o que pode representar uma dificuldade para o seu emprego em pesquisas acadêmicas. Nesse sentido, a metodologia RANS é atualmente a mais popular, consistindo em um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e de continuidade. Nessa abordagem, todas as escalas são modeladas, sem que nenhuma seja resolvida diretamente, resultando em menor exigência computacional (Moukalled, Mangani e Darwish, 2016). Desse modo, por trabalhar com valores médias, essa metodologia fornece resultados menos precisos. Na Figura 16, pode-se observar os resultados obtidos através do emprego de diferentes metodologias.

Figura 16 – Modelagem de um jato turbulento através de diferentes metodologias



Fonte: Nicoud (2007) e Idealsimulations⁴

⁴ <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>

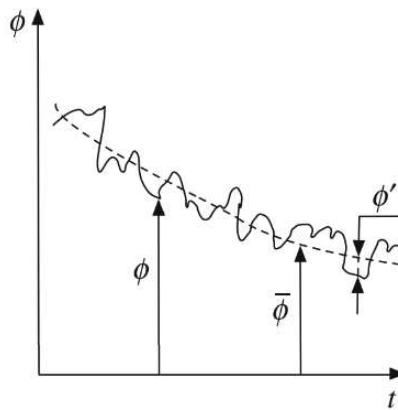
A equação de Navier-Stokes, é dada da seguinte maneira:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right) \quad (08)$$

onde, ρ é a massa específica do fluido, t é o tempo, U é a velocidade, P é a pressão, e x é a distância, f_i representa as forças de corpo na i -ésima direção, μ é a viscosidade molecular e δ_{ij} é o delta de Kronecker.

Conforme Moukalled, Mangani e Darwish (2016), na metodologia RANS a abordagem principal consiste em decompor as variáveis do escoamento em uma componente média e uma componente flutuante. Em seguida, substitui-se a variável original por essas componentes na equação original e aplica-se o operador de média temporal na equação resultante. Essa estratégia permite separar a média temporal das flutuações turbulentas, tornando possível modelar a turbulência de forma estatística, o que simplifica o cálculo e a análise do comportamento do fluido. A decomposição das variáveis é representada na Figura 17, em que ϕ representa o valor instantâneo de qualquer variável envolvida no escoamento, ϕ' representa sua componente flutuante e $\bar{\phi}$ representa a sua componente média.

Figura 17 – Componentes média e flutuante de uma variável



Fonte: Moukalled, Mangani e Darwish (2016)

Ao decompor as principais variáveis que caracterizam o escoamento de um fluido nas partes média e flutuante, obtém-se o seguinte:

$$U_i = \bar{U}_i + u'_i \quad (09)$$

$$P = \bar{P} + p' \quad (10)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \tilde{\rho} \quad (11)$$

Em que $\bar{U}_i$, $\bar{P}$ e $\bar{\rho}$ são as médias da velocidade, pressão e massa específica, respectivamente, e u'_i , p' e $\tilde{\rho}$ são as componentes flutuantes da velocidade, pressão e massa específica, respectivamente. Nos casos em que o fluido é incompressível, a massa específica do fluido não se altera ao longo do tempo, resultando em $\tilde{\rho} = 0$. Aplicando as Equações 09 – 11 e o operador de média temporal na Eq. (08) e após certas manipulações, obtém-se:

$$\rho \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \rho \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial \bar{U}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right) + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (12)$$

Em que τ_{ji} é o tensor de Reynolds, dado por:

$$\tau_{ji} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (13)$$

O surgimento do tensor de Reynolds introduz à equação de movimento seis novas incógnitas. Trata-se de um momento de segunda ordem resultante da decomposição das variáveis e da aplicação do operador de média temporal. Tentar determinar esse momento de segunda ordem através das equações de conservação originais resultará no surgimento de um momento de terceira ordem, e assim sucessivamente, gerando o que se denomina problema de fechamento da turbulência, consistindo em um sistema de equações que possui mais incógnitas que equações para as resolver. A alternativa encontrada para contornar esse problema foi a aplicação dos Modelos de Fechamento de Turbulência, que buscam estabelecer relações entre as flutuações turbulentas e as grandezas médias do escoamento.

Existem diferentes abordagens para a modelagem de turbulência. Cada modelo é desenvolvido com base em hipóteses específicas e simplificações que são apropriadas para certos tipos de escoamentos e situações específicas. No entanto, nenhum modelo de fechamento pode abranger todas as características e complexidades da turbulência em todos os regimes e condições de escoamento. De fato, a escolha do modelo de fechamento mais adequado a determinado problema não é trivial, tendo sido objeto de estudo de diversos autores como Wright e Easom (2003), Gimenez *et al.* (2018), Kosutova *et al.* (2019) e Shirzadi, Tominaga e Mirzaei (2020).

2.9.1 Modelo de fechamento turbulência $\kappa - \omega$ SST

Dentre os vários modelos de turbulência existentes, os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ são dois dos mais empregados na literatura (Shirzadi; Tominaga; Mirzaei, 2020; Ricci *et al.*, 2020; Hadavi, Pashdarshahri, 2020). O modelo de fechamento $k - \varepsilon$ padrão é o mais popular em CFD e se

baseia no conceito de viscosidade turbulenta. Esse modelo é constituído por duas equações diferenciais parciais, correspondentes à energia cinética turbulenta (k) e a sua taxa de dissipação (ε) (Wilcox, 2006). Apesar de sua ampla aplicação, uma limitação significativa relacionada à sua incapacidade de capturar relações mais sutis entre a produção de energia turbulenta e as tensões normais, características de modelos que são governados por duas equações (Wright; Easom, 2003; Shaheed; Mohammadian; Gildeh, 2019).

O modelo $k - \omega$ padrão, desenvolvido por Wilcox (1988), busca prever a turbulência através de equações diferenciais parciais baseadas na energia cinética turbulenta (k) e na taxa de dissipação específica (ω), em que ω é dado pela razão entre ε e k . Uma das principais desvantagens desse modelo é a sua forte dependência dos resultados em relação à especificação arbitrária da frequência de turbulência ω quando aplicado às camadas de cisalhamento livre (Menter, 1992).

Devido à necessidade de modelar eficientemente escoamentos com fortes gradientes adversos de pressão e separação da camada limite, o modelo *Shear Stress Transport* $k - \omega$ (SST) foi idealizado a partir da combinação dos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ (Menter, 1994). A fusão dos modelos proporciona que as vantagens conhecidas sejam a ele incorporadas, onde o mesmo se comporta como o modelo $k - \omega$ próximo às paredes (subcamada viscosa da camada limite) e como o modelo $k - \varepsilon$ na região da corrente livre (sem a presença de paredes). Além disso, o modelo SST fornece bons resultados dentro de uma ampla faixa de variação para os valores de y^+ ($30 < y^+ < 300$), que é um parâmetro definido como a distância entre as superfícies sólidas e a primeira célula adjacente a elas, desse modo, maiores valores de y^+ requerem menor refinamento da malha e, conseqüentemente, menor custo computacional (Nikkho et al., 2017 e SREBRIC et al., 2015). Como resultado, o SST é capaz de eficientemente resolver escoamentos com separação e fortes gradientes adversos de pressão, apresentando uma solução menos sensível às condições de contorno (Yuan et al., 2022; Gimenez; Bre, 2023; Lee et al., 2023).

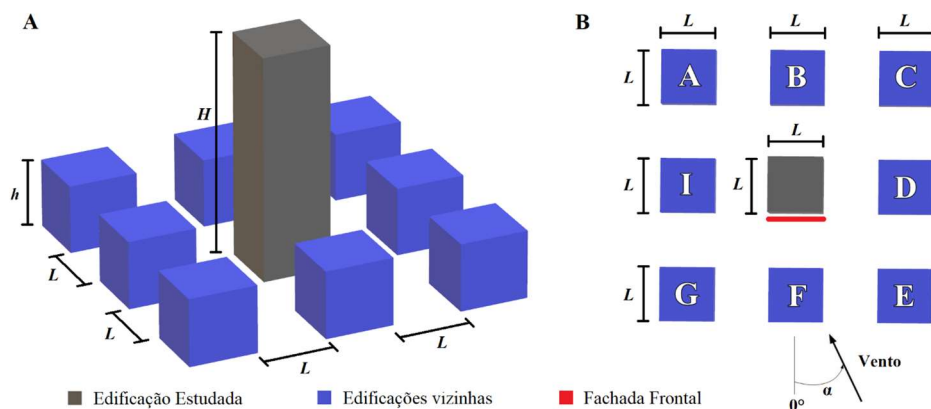
3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem por finalidade otimizar sistemas de contraventamento de edifícios altos localizados em ambientes urbanos, isto é, cercados por outras edificações. Para tanto, buscou-se implementar um código eficiente e compacto do método de Otimização Topológica SIMP para estruturas tridimensionais. O código desenvolvido teve como base o programa *top3dmgcg* desenvolvido por Amir, Aage e Lazarov (2014), o qual foi alterado para impor condições de simetria e repetição de padrões. Para a determinação das cargas do vento atuantes na edificação estudada, foi empregada a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) através do *software* de distribuição livre e código aberto OpenFOAM. Para a simulação do escoamento turbulento foi empregada a metodologia RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Por fim, foi estudado como os principais parâmetros geométricos do ambiente urbano e o ângulo de incidência do vento influenciam o escoamento, a distribuição de pressão nas fachadas da edificação e, conseqüentemente, a estrutura de contraventamento obtida pela otimização topológica.

3.1 CASOS ESTUDADOS

Para a representação de um edifício alto em ambiente urbano, propõe-se o estudo de um edifício principal cercado por oito edifícios vizinhos, identificados como A, B, C, D, E, F, G e I, como representado na Figura 18. A edificação principal possui uma relação de aspecto $L \times L \times H$, onde L é o comprimento e largura das nove edificações, bem como a distância entre as mesmas, e H é a altura da edificação principal (sendo $H = 6L$).

Figura 18 – Configurações da edificação. (A) visão tridimensional. (B) vista em planta



Fonte: Autor (2023)

Os parâmetros h e α representam a altura relativa das edificações vizinhas e o ângulo de incidência do vento (medido com relação à direção normal à fachada frontal da edificação principal), respectivamente. Para esses dois parâmetros foram escolhidos diferentes valores a fim de se formar uma combinação de 16 casos, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Possíveis combinações para formação de casos

CASOS	α [°]	ALTURA RELATIVA DAS EDIFICAÇÕES VIZINHAS [h]							
		A	B	C	D	E	F	G	I
C-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-2		2 L	2 L	2 L	2 L	2 L	2 L	2 L	2 L
C-3		4 L	4 L	4 L	4 L	4 L	4 L	4 L	4 L
C-4		6 L	6 L	6 L	6 L	6 L	6 L	6 L	6 L
C-5	45	0	0	0	0	0	0	0	0
C-6		2 L	2 L	2 L	2 L	2 L	2 L	2 L	2 L
C-7		4 L	4 L	4 L	4 L	4 L	4 L	4 L	4 L
C-8		6 L	6 L	6 L	6 L	6 L	6 L	6 L	6 L
C-9	0	0	3 L	2 L	L	6 L	L	4 L	5 L
C-10	45								
C-11	90								
C-12	135								
C-13	180								
C-14	225								
C-15	270								
C-16	315								

Fonte: Autor (2023)

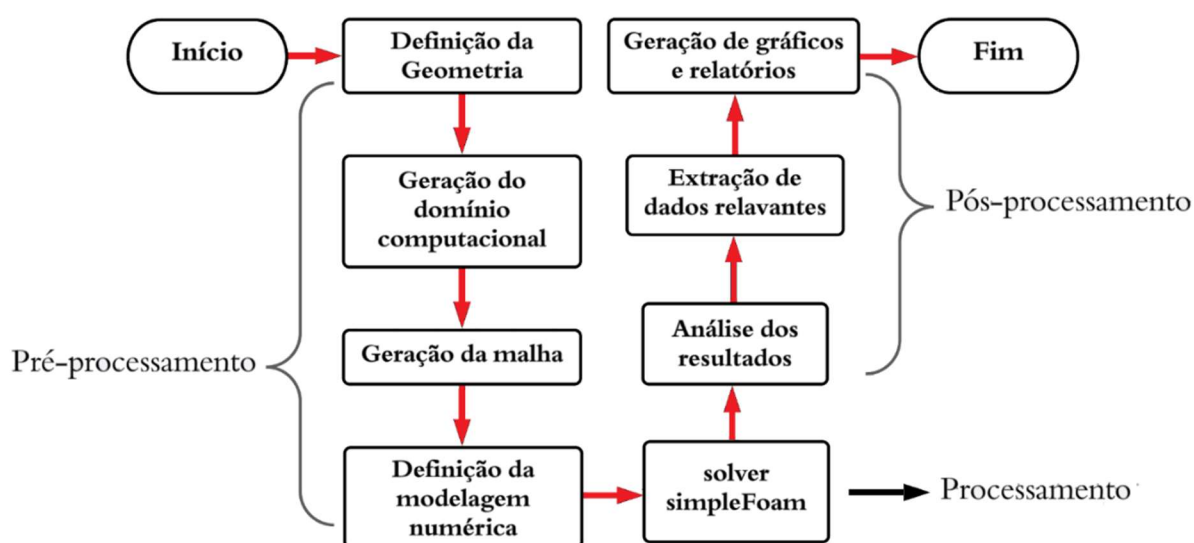
Os casos C-1 a C-8 examinam o escoamento do vento em duas situações: ângulos de incidência do vento de 0° e 45°, enquanto a altura das edificações vizinhas é alterada uniformemente, isto é, todas as edificações vizinhas possuem a mesma altura. No entanto, é sabido que em grandes cidades a altura dos edifícios não é padronizada e pode variar significativamente ao longo do tempo. Dessa forma, os casos C-9 a C-16 são conduzidos para investigar o escoamento do vento em torno de um prédio cercado por edifícios de diferentes alturas. Esses casos visam simular, de maneira mais realista em relação aos grandes centros urbanos, como a vizinhança pode influenciar o escoamento do vento, aumentando ou diminuindo as cargas laterais exercidas sobre um determinado edifício. Nos casos C-9 a C-16, a altura da vizinhança é mantida constante, variando apenas o ângulo de incidência do vento em 45° para cada caso.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS CARGAS DO VENTO

O escoamento do vento foi modelado no OpenFOAM empregando-se o modelo de fechamento turbulência *Shear Stress Transport $k - \omega$* (SST), que é um modelo baseado nas equações médias de Reynolds (RANS) e tem sido amplamente utilizado para simular o escoamento turbulento em ambientes urbanos, fornecendo resultados com boa concordância com dados experimentais, como pode ser visto nos trabalhos de An, Wong e Fung (2019), Ricci *et al.* (2020) e Hadavi e Pasdarshahri (2020). A escolha de um modelo da metodologia RANS foi motivada principalmente pelo fato de que o seu tempo de processamento é consideravelmente menor em comparação com os modelos baseados na Simulação de Grandes Escalas (LES).

Na Figura 19, apresenta-se um fluxograma com todas as etapas necessárias para simulação completa de um problema tridimensional no OpenFOAM.

Figura 19 – Fluxograma com as etapas de uma simulação no OpenFOAM



Fonte: O Autor (2023)

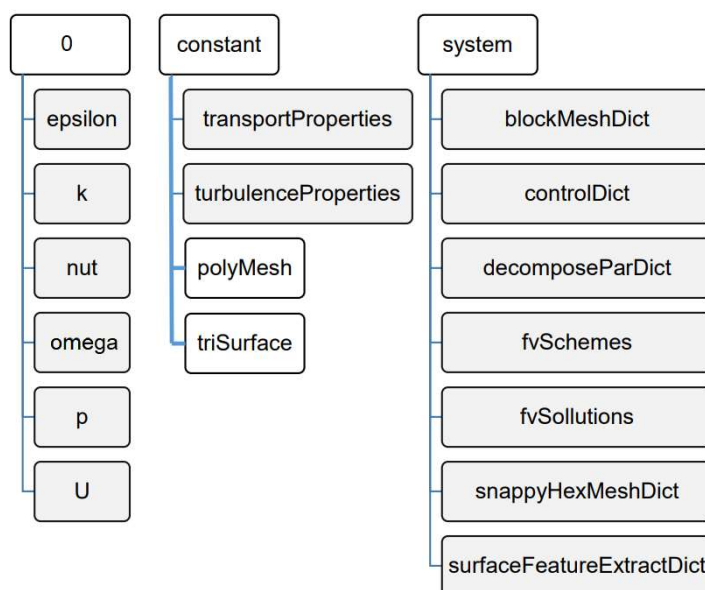
Conforme se observa no fluxograma, as etapas de uma simulação podem ser agrupadas em três grupos: pré-processamento, que consiste na definição de todas as informações do caso estudado; processamento, que consiste na execução da simulação; e pós processamento, que consiste na etapa em que os dados são extraídos e analisados.

3.2.1 Estrutura de arquivos dos casos do OpenFOAM

A falta de uma interface gráfica intuitiva é uma das principais dificuldades enfrentadas pelos novos usuários do OpenFOAM já na etapa de pré-processamento. O software se baseia em uma estrutura de linha de comando, o que requer que os usuários aprendam e se familiarizem com os comandos e scripts necessários para executar simulações. Ao contrário das interfaces gráficas convencionais, não estão disponíveis abas ou janelas que permitam aos usuários inserirem ou modificar diretamente informações relacionadas à geometria, condições de contorno e configurações da simulação, por exemplo. Em vez disso, essas informações devem ser fornecidas em arquivos .TXT, dentro de diretórios específicos.

De acordo com o guia do usuário do OpenFOAM a estrutura básica de um caso, que contém o conjunto mínimo de arquivos para executar uma simulação, é composta por três diretórios: a pasta *0*, a pasta *constant* e a pasta *system*, conforme apresenta-se na Figura 20.

Figura 20 – Estrutura de diretórios do caso



Fonte: Silva (2022)

A pasta *0* contém arquivos que definem os valores, no instante inicial da simulação, de parâmetros que são alterados ao longo da simulação, como velocidade (*U*), pressão (*p*) e as variáveis de turbulência: energia cinética turbulenta (*k*), viscosidade cinemática turbulenta (*nut*), dissipação da energia cinética turbulenta (*epsilon*), nos casos em que se use o modelo de fechamento ($\kappa - \varepsilon$), e a dissipação específica da energia cinética turbulenta (*omega*) nos casos em que use um modelo de fechamento ($\kappa - \omega$). O nome do diretório de tempo é baseado no

tempo simulado em que os dados são gravados. Como geralmente as simulações são iniciadas no tempo $t = 0$ s, as condições iniciais são armazenadas em um diretório chamado *0*.

A pasta *constant* contém parâmetros que não são alterados ao longo da simulação. Contém uma descrição completa da malha do caso em um subdiretório chamado *polyMesh*, bem como arquivos que especificam propriedades físicas para a aplicação em questão, como *transportProperties*, onde se define o valor da viscosidade cinemática de acordo com o fluido a ser simulado, e *turbulenceProperties*, onde são definidas as propriedades do modelo de fechamento de turbulência empregado. O subdiretório *triSurface* contém os dados de geometrias que venham a ser inseridas no domínio.

A pasta *system*, por sua vez é usada para configurar parâmetros associados ao procedimento de solução em si, ou seja, é nessa pasta onde se controla a simulação. Ela contém pelo menos os seguintes 3 arquivos: *controlDict*, onde os parâmetros de controle de execução são definidos, incluindo tempo de início/fim, passo de tempo e parâmetros para saída de dados; *fvSchemes*, onde os esquemas de discretização usados na solução podem ser selecionados durante a execução; e *fvSolution*, onde os solucionadores de equações, tolerâncias e outros controles de algoritmo são definidos para a execução.

A pasta *system* ainda pode conter o arquivo *blockMeshDict*, que é utilizado para definir a geometria e a discretização inicial da malha no caso simulado; o arquivo *decomposeParDict*, que é utilizado para se executar uma simulação em paralelo, distribuindo o processamento entre várias CPUs ou computadores; o arquivo *snappyHexMeshDict*, utilizado para configurar e controlar o processo de geração de malha utilizando o comando SnappyHexMesh, que é capaz de criar malhas hexaédricas de alta qualidade; e o arquivo *surfaceFeatureExtractDict*, usado para inserir na malha já estruturada um corpo tridimensional no formato STL.

3.2.2 Condições iniciais do escoamento

As condições iniciais do escoamento, empregadas no presente estudo, se baseiam no teste de túnel de vento conduzido pela Universidade Politécnica de Tóquio (*Tokyo Polytechnic University*, TPU⁵) para um prédio com relação de aspecto $0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$, e nas diretrizes

⁵ Disponível em: <<http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>>. Acesso em 17 de julho de 2022.

empregadas por Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017) para simulação de escoamentos tridimensionais empregando o modelo de fechamento da turbulência $\kappa - \omega$ SST.

Dessa forma, o perfil vertical de velocidade de entrada foi prescrito usando a lei de potência, definida conforme a Eq. (14):

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{H_{ref}} \right)^\beta \quad (14)$$

onde:

$U(z)$ = velocidade do vento em função da altura, em m/s;

z = altura em relação ao solo, em m;

U_{ref} = velocidade de referência, em m/s;

H_{ref} = altura de referência, em m;

β = fator de exposição, adotado como 0,27.

Para a altura de referência H_{ref} adota-se a altura da edificação principal, 0,6 m, e para velocidade de referência, adota-se o mesmo valor empregado no teste de túnel de vento da TPU para uma edificação isolada, isto é, 11,14 m/s. Tais condições resultam em um número de Reynolds igual 456.000. Os perfis de energia cinética turbulenta $k(z)$ e sua taxa de dissipação $\varepsilon(z)$, são calculados conforme as Eqs. (15) e (16), respectivamente:

$$k(z) = 0,033[u(H)]^2 e^{-0,32(\frac{z}{H})} \quad (15)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{(u_{ABL})^3}{k(z + z_0)} \quad (16)$$

Em que u_{ABL} é a velocidade de fricção e é dada pela seguinte equação:

$$u_{ABL} = \frac{U_{ref} \kappa}{\ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right)} \quad (17)$$

Onde κ é a constante de von Karman (0,42) e z_0 é a altura rugosa (0,0009 m). A taxa de dissipação específica é calculada usando a seguinte equação:

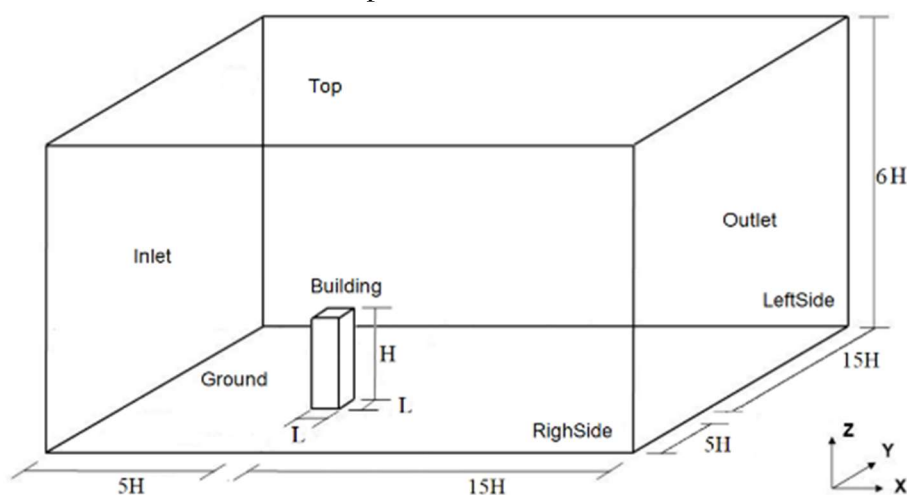
$$\omega(z) = \frac{\varepsilon(z)}{C_\mu k(z)} \quad (18)$$

Em que C_μ é uma constante empírica adotada como 0,09. Conforme Tominaga *et al.* (2008), as Eq. (15)-(18) assumem que a tensão de cisalhamento entre as camadas do fluido é constante, o que é válido apenas para a região inferior da camada limite atmosférica.

3.2.3 Domínio computacional e condições de contorno

As dimensões do domínio computacional empregado nas simulações do OpenFOAM foram definidas conforme as recomendações presentes na literatura, adotando valores mínimos que garantam que as características do escoamento não serão afetadas pelas fronteiras (Franke *et al.*, 2004; Tominaga *et al.*, 2008; Wang; Chen, 2020). Para uma edificação isolada, a razão de bloqueio deve ficar abaixo de 3%, as fronteiras laterais, superior e de entrada devem ser posicionadas a uma distância de no mínimo $5H$ da edificação, e a fronteira de saída do escoamento deve ser posicionada a no mínimo $15H$ da edificação a fim de permitir o completo desenvolvimento do escoamento. De acordo com essas recomendações, as dimensões do domínio computacional, em função da altura H da edificação, são apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Domínio computacional empregado nas simulações do OpenFOAM para um prédio isolado



Fonte: O Autor (2023)

Pode-se notar que tanto a edificação quanto as faces do domínio são identificados por termos escritos em inglês na Figura 21, isso se deve ao fato de, nos diretórios do OpenFOAM, as fronteiras e o corpo estudado serem identificados por nomes em inglês, dessa forma, na representação do domínio, optou-se pelo uso dos mesmos termos especificados nos diretórios.

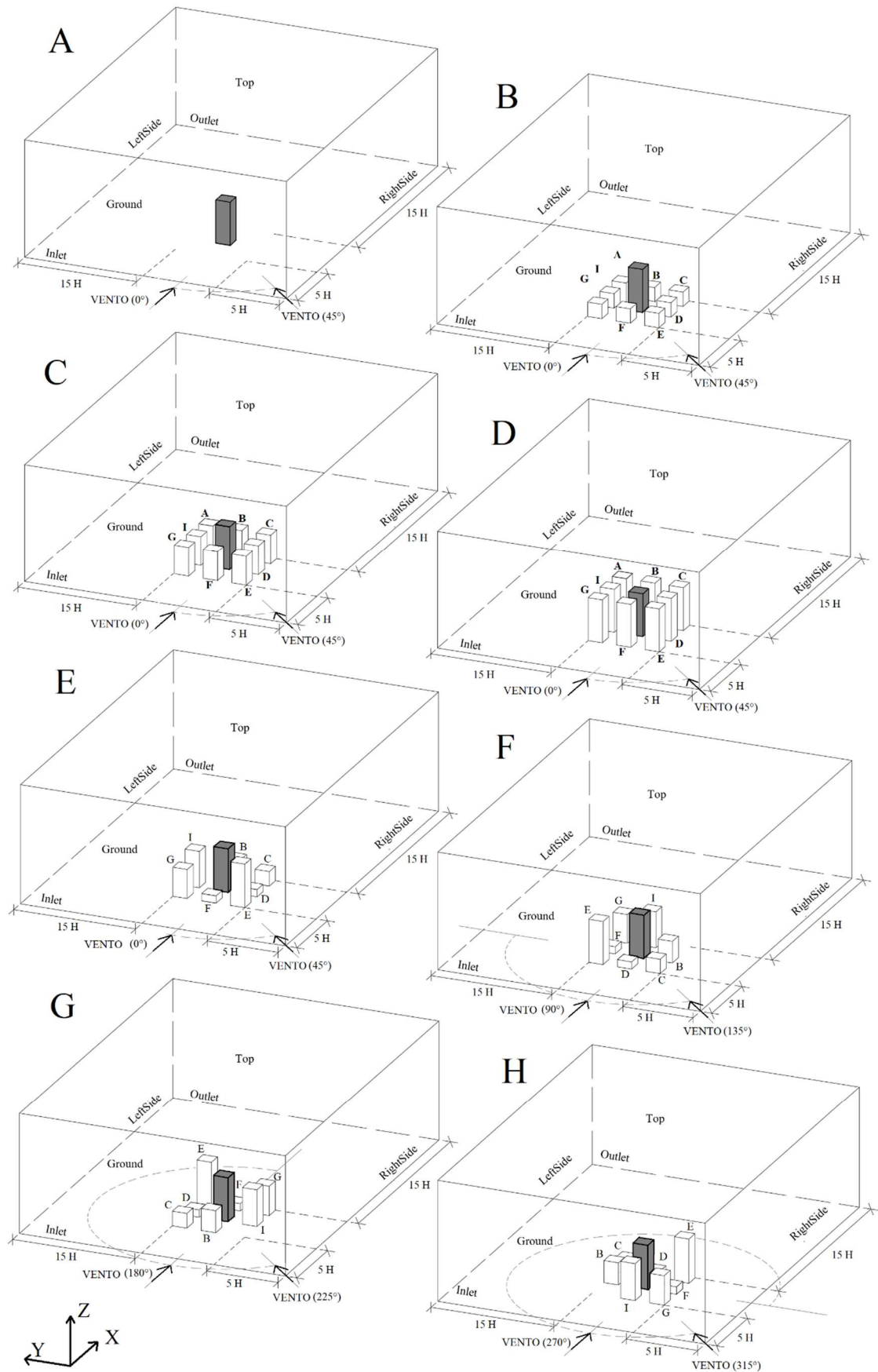
Nota-se também que o domínio representado na Figura 21 tem base quadrada e a edificação não se encontra posicionada de forma simétrica, em relação ao domínio, em nenhuma das direções. Essa configuração difere da maioria das configurações utilizadas na literatura em que um domínio de base retangular é utilizado e a edificação é posicionada de forma a ter simetria em relação ao plano longitudinal central. A adoção de um domínio de base quadrada e sem simetria no presente estudo foi motivada pela especificidade do conjunto de casos a serem simulados, conforme apresentado no Quadro 1.

Uma vez que a presente pesquisa trabalha com um total de 16 simulações, optou-se pelo uso do domínio representado na Figura 21, pois sua configuração permite a simulação de até três casos utilizando a mesma malha, variando apenas o ângulo de incidência do vento. Dessa forma, enquanto o uso do domínio retangular, mais tradicional, implicaria na geração de 16 malhas, uma para cada caso, a adoção do domínio quadrado implicou na geração de apenas 8 malhas, reduzindo à metade o esforço computacional despendido nessa etapa.

As dimensões do domínio empregado para simular os casos dos ambientes urbanos segue as mesmas recomendações do caso isolado. Entretanto, H deve ser substituído por H_{max} (a altura da edificação mais alta) e a distância entre as fronteiras e as edificações devem ser medidas não a partir da edificação principal, mas sim a partir das edificações mais externas. Dessa forma, a Figura 22 apresenta os 8 domínios empregados na simulação dos 16 casos analisados no presente estudo.

Os quatro primeiros domínios permitem a geração da malha e a simulação dos casos C-1 a C-8. Como nestes casos a principal variação consiste na altura das edificações vizinhas, para cada geometria foi gerado um domínio capaz de simular o escoamento em dois ângulos de incidência, 0° e 45° . Por outro lado, nos casos C-9 a C-16 não há variação na geometria das edificações e o ângulo de incidência do vento é a única variável. Dada a impossibilidade de um único domínio simular todos os ângulos de incidência propostos e, ao mesmo tempo, respeitar as recomendações de dimensionamento da literatura, adotou-se a estratégia de modelar quatro domínios. Cada domínio rotaciona todo o ambiente urbano em 90° , garantindo a simulação dos oito ângulos de incidência. Essa estratégia pode ser observada nas Figuras 22.E até 22.H.

Figura 22 – Domínios modelados para a simulação dos 16 casos estudados



Fonte: O Autor (2023)

Embora o ângulo de incidência do vento varie de 0° a 315° em relação à direção normal à fachada frontal da edificação principal, em cada domínio a direção longitudinal do escoamento apenas forma dois ângulos em relação à direção x : 0° e 45° , devido à rotação do próprio ambiente urbano, como pode ser observado na Figura 22. Dessa maneira, a direção do vento é determinada de acordo com as condições de contorno definidas para cada face do domínio.

Em cada domínio foram definidos dois conjuntos de condições de contorno. O primeiro conjunto, identificado como CC-1, foi definido para simular o escoamento do vento a 0° em relação à direção x do domínio, enquanto o segundo, identificado como CC-2, foi definido para simular o escoamento do vento a 45° em relação à direção x do domínio. O conjunto CC-1 foi utilizado para simular os casos C-1, C-2, C-3, C-4, C-9, C-11, C-13 e C15. Os demais casos são simulados através do conjunto CC-2. Para facilitar a compreensão, na Tabela 1 apresentam-se o domínio, o conjunto de condições de contorno e os ângulos de incidência do vento adotado em cada caso. A referência utilizada para identificar os domínios mostra-se na Figura 22.

Tabela 1 – Domínio e conjuntos de condições de contorno empregados em cada caso

Caso	Domínio	Ângulo de Incidência do Vento		Conjunto de Condições de Contorno
		Em relação à fachada frontal	Em relação ao eixo x	
C-1	A	0°	0°	CC-1
C-2	B	0°	0°	CC-1
C-3	C	0°	0°	CC-1
C-4	D	0°	0°	CC-1
C-5	A	45°	45°	CC-2
C-6	B	45°	45°	CC-2
C-7	C	45°	45°	CC-2
C-8	D	45°	45°	CC-2
C-9	E	0°	0°	CC-1
C-10	E	45°	45°	CC-2
C-11	F	90°	0°	CC-1
C-12	F	135°	45°	CC-2
C-13	G	180°	0°	CC-1
C-14	G	225°	45°	CC-2
C-15	H	270°	0°	CC-1
C-16	H	315°	45°	CC-2

Fonte: O Autor (2023)

As condições de contorno identificadas como CC-1 e CC-2 são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, aplicam-se nas faces dos domínios definidos nas Figuras 21 e 22.

Tabela 2 – Conjunto de condições de contorno CC-1 aplicadas às faces dos domínios

Face	Velocidade	Pressão	κ	ω	μ_t
Inlet	$u_x = U(z)$ $u_y = u_z = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\kappa = \kappa(z)$	$\omega = \omega(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
Outlet	$\nabla(U) = 0$	$p = 0$	$\nabla(\kappa) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
Ground	$U_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF
Top	CS	CS	CS	CS	CS
RightSide	CS	CS	CS	CS	CS
LeftSide	CS	CS	CS	CS	CS
Building	$U_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF

Nomenclatura: CS = condição de simetria; WF = função de parede (*Wall Function*); U_i = componente da velocidade com relação à direção $i = x, y, z$

Fonte: O Autor (2023)

Tabela 3 – Conjunto de condições contorno CC-2 aplicadas às faces dos domínios

Face	Velocidade	Pressão	κ	ω	μ_t
Inlet	$u_x = u_y = \frac{\sqrt{2}}{2} \times U(z)$ $u_x = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\kappa = \kappa(z)$	$\omega = \omega(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
Outlet	$\nabla(U) = 0$	$p = 0$	$\nabla(\kappa) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
Ground	$U_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF
Top	CS	CS	CS	CS	CS
RightSide	$u_x = u_y = \frac{\sqrt{2}}{2} \times U(z)$ $u_x = 0$	$\nabla(p) = 0$	$\kappa = \kappa(z)$	$\omega = \omega(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
LeftSide	$\nabla(U) = 0$	$p = 0$	$\nabla(\kappa) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
Building	$U_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF

Nomenclatura: CS = condição de simetria; WF = função de parede (*Wall Function*); u_i = componente da velocidade com relação à direção $i = x, y, z$

Fonte: O Autor (2023)

No OpenFOAM, a condição de gradiente nulo ($\nabla = 0$), indica que o gradiente normal de uma determinada variável é zero. A condição de simetria (CS), conforme descrito por Moukalled, Mangani e Darwish (2016), desempenha uma função análoga à condição de gradiente nulo para campos escalares. Para campos vetoriais, essa condição reflete as componentes paralelas ao bordo e anula as componentes ortogonais.

O uso de funções de parede tem a finalidade de modelar a camada limite turbulenta adjacente às paredes de um domínio de simulação de forma simplificada. Assim, para a energia cinética turbulenta (κ), foi aplicada a função de parede identificada como “*kqRwallFunction*”. A taxa de dissipação específica (ω) foi tratada com a função denominada “*omegaWallFunction*”, e para a viscosidade turbulenta (μ_t), foi adotada a função “*nutkRoughWallFunction*”.

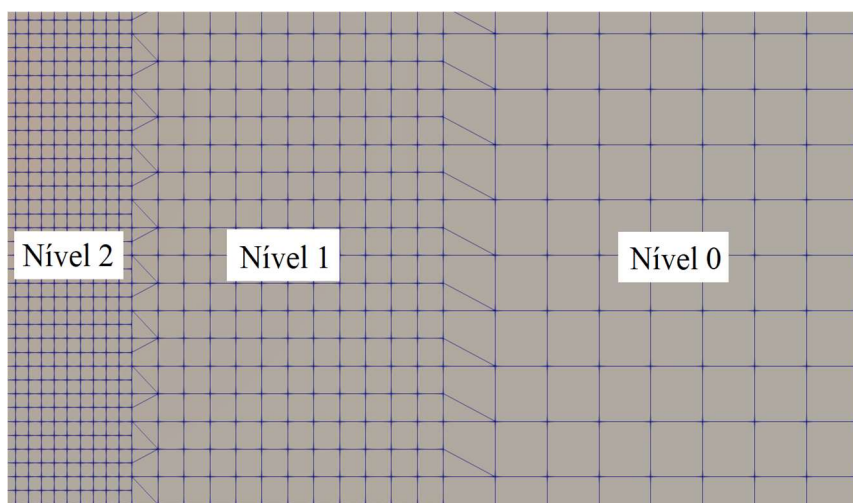
3.2.4 Discretização do domínio computacional

Para a discretização do domínio computacional foi empregada a ferramenta *snappyHexMesh*, nativa do OpenFOAM. De acordo com o manual do usuário do OpenFOAM, o *snappyHexMesh* é uma ferramenta que gera automaticamente malhas tridimensionais compostas por elementos hexaédricos a partir de geometrias de superfície trianguladas no formato STL (*Standard Triangle Language*) ou OBJ (*Wavefront Object*). O *snappyHexMesh* trabalha por meio de iterações, refinando continuamente uma malha inicial para que ela se ajuste à superfície do objeto.

No presente trabalho, as superfícies das edificações simuladas foram geradas no *software* livre de código aberto SALOME (versão 9.3), e exportadas para o OpenFOAM no formato “.STL”. O arquivo deve ser armazenado na pasta *triSurface*, localizada no diretório *constant*, para que, a partir da malha inicial gerada pelo comando *blockMesh*, seja gerada uma nova malha com diferentes regiões de refinamento. Essas regiões são definidas pelo usuário e se tornam cada vez mais refinadas à medida que se aproximam do objeto analisado.

As regiões de refinamento são identificadas por níveis. O nível 0 é a região de refinamento da malha inicial. A partir dessa região, cada novo nível de refinamento divide um elemento hexaédrico em 8 partes iguais. Dessa forma, se no nível 0 uma determinada região do domínio seria composta por um único elemento hexaédrico, no nível 1 essa mesma região seria composta por 8 elementos, no nível 2 seria composta por 64 elementos e assim sucessivamente. Na Figura 23, ilustra-se esse processo, porém de maneira bidimensional, a fim de facilitar a visualização.

Figura 23 – Representação bidimensional dos níveis de refinamento na malha com o *snappyHexMesh*

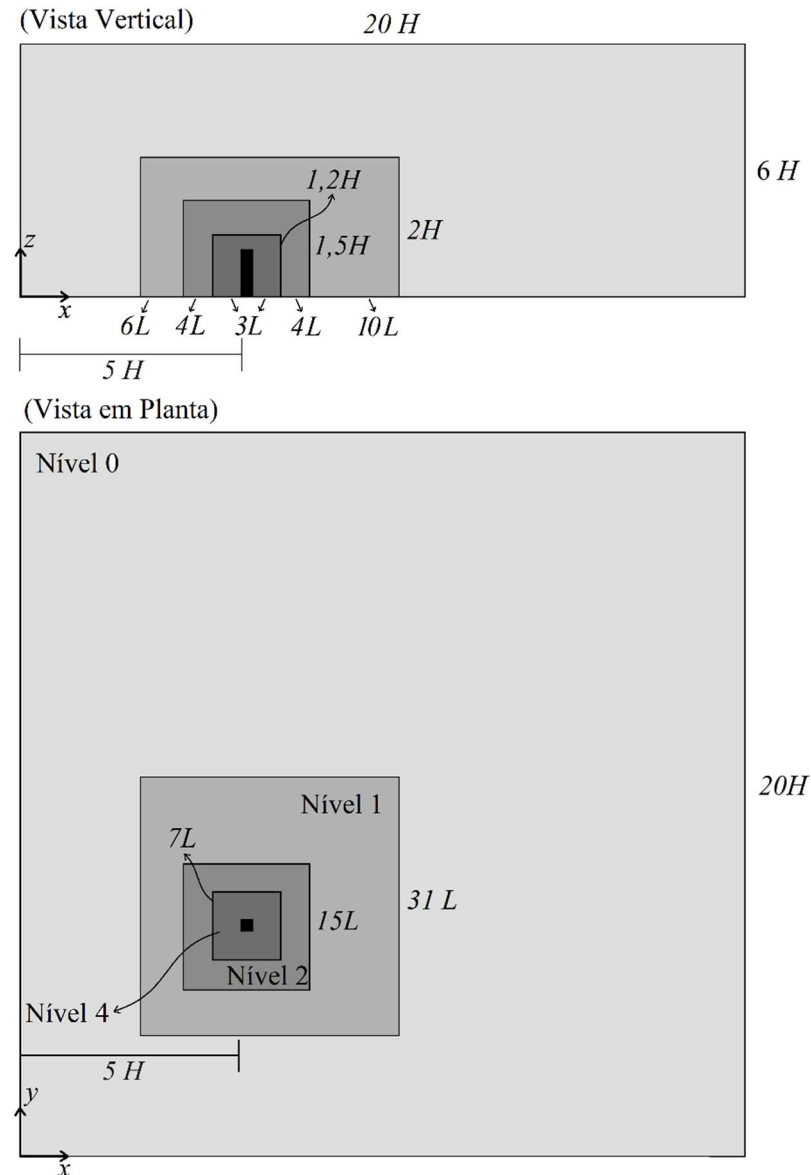


Fonte: O Autor (2023)

Nos casos analisados nesta pesquisa foram definidas três regiões de refinamento da malha, além da malha inicial. A malha inicial, com nível de refinamento 0, foi configurada para ter elementos hexaédricos com aresta de tamanho L , isto é, equivalente à largura da base das edificações. A primeira região de refinamento foi estabelecida com nível de discretização 1, resultando em elementos de aresta $L/2$; a segunda região de refinamento foi definida com nível de discretização 2, gerando elementos de aresta $L/4$; a terceira região foi configurada com nível de refinamento 4, implicando em elementos hexaédricos com arestas de tamanho $L/16$. E, por fim, a superfície das edificações foi discretizada empregando-se o nível 5, resultando em elementos de aresta $L/32$. Essa configuração adotada para a discretização do domínio é resultado do estudo de refinamento de malha.

Na Figura 25, pode-se observar as vistas superior e vertical dos níveis de refinamento empregados na geração das malhas, bem como as dimensões adotadas para cada região de refinamento, medidas a partir das faces da edificação principal.

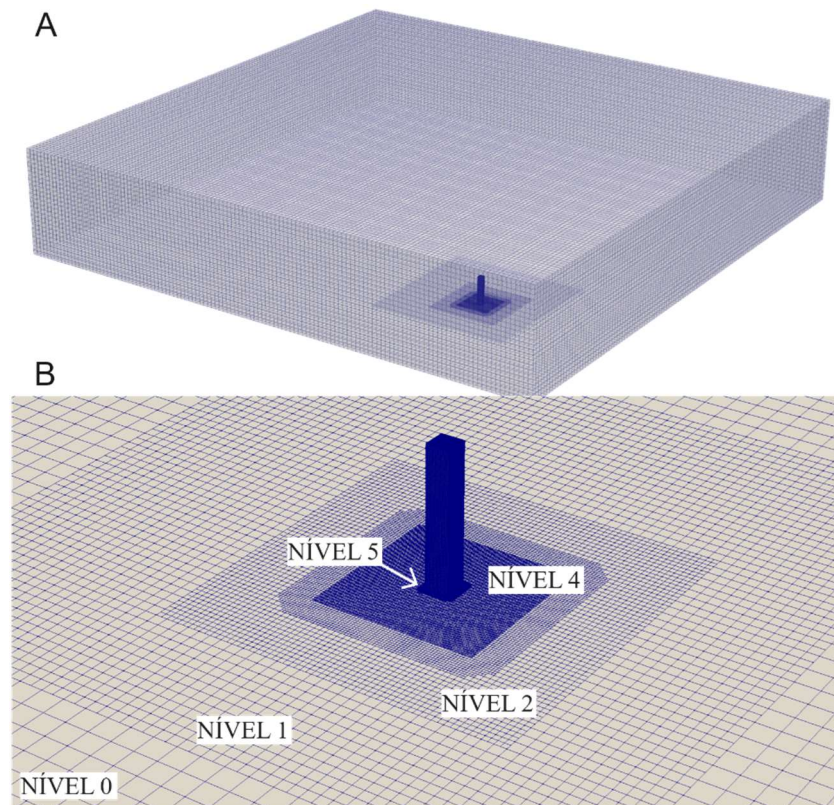
Figura 24 – Regiões de refinamento empregadas na geração das malhas



Fonte: O Autor (2023)

Para cada um dos domínios foi gerada uma malha seguindo as diretrizes mencionadas anteriormente. O domínio A, utilizado para simular os casos C-1 e C-5, apresentou a menor discretização, totalizando 2.406.289 volumes finitos. Por outro lado, o domínio D, utilizado para simular os casos C-4 e C-8, resultou na malha com o maior número de elementos, totalizando 4.331.717 volumes finitos. A malha resultante da discretização do domínio A apresenta-se na Figura 25. Podem-se observar os diferentes níveis de refinamento da malha e como o elementos se concentram ao redor da edificação.

Figura 25 – Domínio A discretizado. (A) visão completa. (B) detalhe próximo à edificação



Fonte: O Autor (2023)

3.2.5 Modelagem Numérica

A definição dos esquemas de discretização dos volumes finitos é feita no arquivo *fvSchemes*, localizado no diretório *system*. Como todos os casos analisados são simulados em estado estacionário, emprega-se o esquema *steadyState* para a discretização da derivada temporal. Para a discretização dos termos do gradiente foi utilizado o esquema *cellMDLimited Gauss linear*. Esse esquema utiliza um método de média ponderada para calcular o gradiente nas células do domínio, limitando os gradientes com base na diferença entre os valores nas células vizinhas, visando evitar oscilações numéricas indesejáveis.

Para a discretização do operador de divergência, foi utilizado o esquema *bounded Gauss linearUpwind*. Ele aplica um esquema *upwind* linearizado para calcular as contribuições das células vizinhas na divergência. Ele prioriza a direção do escoamento e minimiza a propagação de erros numéricos. O esquema *Gauss Linear limited* foi empregado para discretizar o operador laplaciano e utiliza uma combinação linear de valores em células vizinhas para calcular a variação espacial da grandeza estudada. A limitação linear visa controlar a amplificação de

erros numéricos e garantir uma solução estável. Por fim, para a interpolação de valores entre células, foi utilizado o esquema linear.

O arquivo *fvSolution* coordena os *solvers* empregados na resolução dos sistemas lineares. No estudo, emprega-se o *solver* GAMG (*Geometric Algebraic Multigrid Solver*), que é um solucionador eficiente para resolver sistemas lineares. Ele emprega técnicas de *multigrid* para acelerar a convergência. O suavizador escolhido para todos os solucionadores foi o Gauss-Seidel.

Para a simulação adota-se o *solver* *simpleFoam*, que emprega o algoritmo *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* (SIMPLE). O mesmo é um algoritmo amplamente utilizado em simulações de CFD e possibilita acoplar a pressão e a velocidade nas equações de Navier-Stokes. O método SIMPLE é iterativo e baseado na separação da velocidade em componentes corrigidas para assegurar a continuidade e o equilíbrio de massa no domínio.

Por fim, aplica-se um fator de relaxação de 0,3 para a pressão e 0,5 para a velocidade e variáveis de turbulência. O fator de relaxação controla a taxa de atualização dos valores das variáveis em cada iteração do solucionador. Para todas as simulações foi definida como condição de parada uma tolerância de 10^{-4} para cada variável do escoamento, conforme recomendado Franke *et al.* (2007).

No arquivo *controlDict* foi definido o tempo total de simulação. Para todos os casos estudados foram simulados 5000 passos de tempo. Em regime estacionário o conceito de tempo físico não é relevante pois não há mudanças significativas nas condições físicas ao longo do tempo. Nas simulações realizadas com o *solver* *simpleFoam* não há uma noção direta de tempo físico sendo considerado. Em vez disso, o *solver* itera em passos de tempo até que a solução convirja para um estado estacionário.

3.2.6 Pós-processamento

A etapa de pós-processamento consiste na extração e análise dos dados. Para tanto, foi empregado o *software* ParaView (versão 5.4.1). Como o emprego das simulações de CFD têm a finalidade principal de fornecer os valores das cargas do vento aplicadas às fachadas de um prédio alto localizado em um ambiente urbano, na etapa de pós-processamento, os dados de maior interesse são os de pressão.

O coeficiente de pressão médio (C_p) é dado pela Eq. (19) e foi utilizado para plotar o campo médio de pressões nas quatro fachadas da edificação principal dos 16 casos estudados.

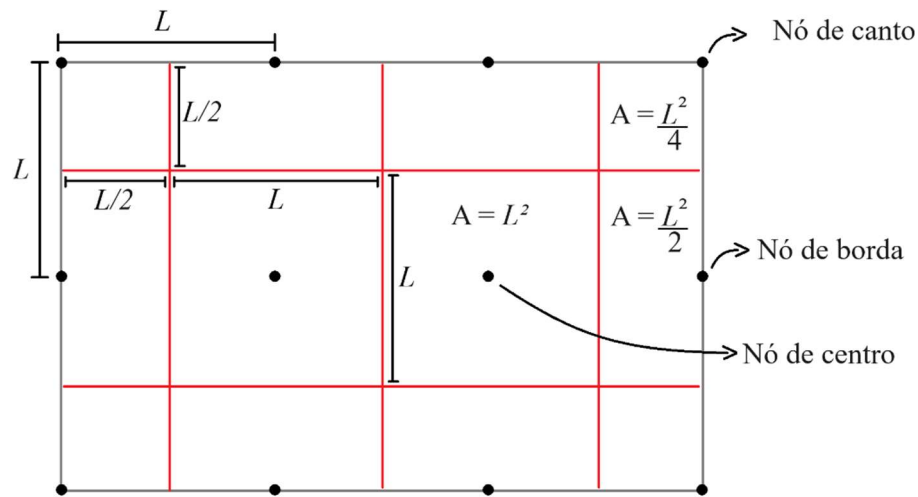
$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2} \quad (19)$$

Onde P é a pressão estática do fluido no ponto em que o coeficiente de pressão está sendo calculado, P_∞ é a pressão do escoamento livre, ρ é a massa específica do ar (1,225 kg/m³ ao nível do mar e em temperatura ambiente de 15° C) e U_{ref} é a velocidade de referência. Através do ParaView, foram extraídos os valores de pressão nos pontos das fachadas do prédio de modo que esses pontos coincidisse com os nós resultantes da discretização do domínio empregado na Otimização Topológica. Uma vez em posse dos dados de pressão, a Eq. (20) foi empregada para determinar a força resultante aplicada em cada nó.

$$F = P A_{inf} \quad (20)$$

Em que F é a força aplicada no nó, P é o valor da pressão e A_{inf} é a área de influência de cada nó. A área de influência é determinada de acordo com a posição do nó (de canto, de borda ou de centro) e com a distância entre os nós L , conforme descrito na Figura 26:

Figura 26 – Esquema representativo das áreas de influência empregadas na determinação da força atuante em cada nó



Fonte: O Autor (2023)

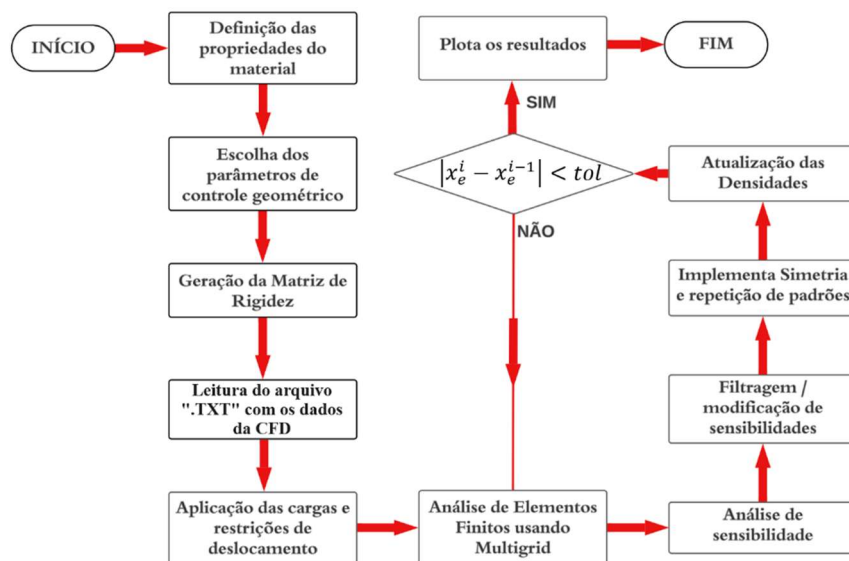
Essa metodologia permite que seja aplicada uma força em todos os nós das fachadas do prédio estudado na Otimização Topológica, resultando em uma representação e, consequentemente, numa análise mais precisa de como a vizinhança interfere no escoamento do vento e na Otimização Topológica das estruturas.

3.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Para a etapa de Otimização Topológica, foi implementado, em ambiente de programação MATLAB (versão 2020.a), o código denominado *top3dmgcg_BUILDING*. Essa implementação foi baseada no *top3dmgcg*, um código desenvolvido por Amir, Aage e Lazarov (2014), que emprega o método SIMP em problemas tridimensionais de minimização de flexibilidade. O *top3dmgcg_BUILDING* consiste em uma extensão do código original *top3dmgcg*, com modificações que permitem ao usuário impor restrições de controle geométrico à solução, tais como simetria, repetição de padrões e inclusão de elementos passivos. Essas adições ampliam a flexibilidade do código e proporcionam maior controle sobre as características geométricas dos resultados obtidos.

Na Figura 27, apresenta-se um fluxograma com todas as etapas do processo de Otimização Topológica através *top3dmgcg_BUILDING*.

Figura 27 – Fluxograma do processo de otimização topológica através *top3dmgcg_BUILDING*



Fonte: O Autor (2023)

O processo de OT tem início com a chamada do código, a partir do *prompt* do MATLAB, com a seguinte linha de comando:

```
top3dmgcg_BUILDING(nelx,nely,nelz,volfrac,penal,rmin,ft,nl,cgtol,cgmax)
```

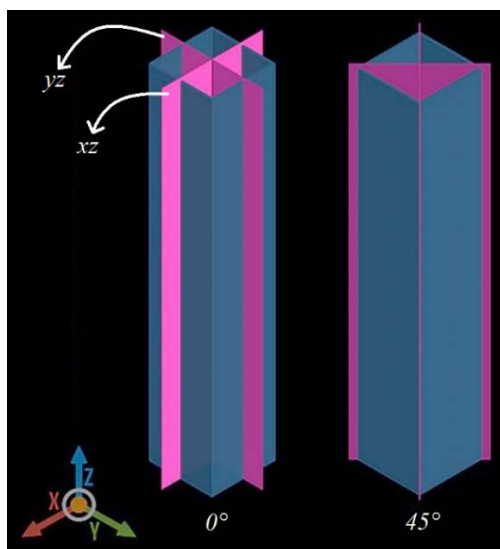
onde, *nelx*, *nely* e *nelz* são as quantidades de elementos nas direções *x*, *y* e *z*, respectivamente, *volfrac* é a fração de volume da solução final, *penal* é o fator de penalização e *rmin* é o tamanho do raio do filtro. O parâmetro *ft* é usado para determinar o tipo de filtro a ser aplicado: para o

filtro de sensibilidade, $ft = 1$; para o filtro de densidade, $ft = 2$. O processo *multigrid* é definido pelos três últimos parâmetros: nl é a quantidade de malhas que será empregada; $cgtol$ é a tolerância e $cgmax$ a quantidade máxima de iterações empregada no método dos Gradientes Conjugados. Para esses parâmetros, conforme empregado por Amir, Aage e Lazarov (2014), adotou-se $nl = 4$, $cgtol = 10^{-10}$ e $cgmax = 100$ tanto para as análises de validação quanto para a resolução dos 16 casos desta pesquisa.

A primeira etapa do programa consiste na leitura das propriedades definidas para o material. São definidos os módulos de elasticidade do material sólido ($E_0 = 1$) e do material artificial ($E_{min} = 10^{-9}$), e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$). Essas propriedades são definidas pelo usuário do código e, no caso do presente estudo, optou-se pelo uso dos mesmos valores adotados por Amir, Aage e Lazarov (2014), Liu e Tovar (2014) e Ferrari e Sigmund (2020).

Na etapa seguinte, o usuário determina os parâmetros de controle geométrico que devem ser impostos à solução otimizada. É possível determinar se a solução deverá ter simetria em xz e/ou yz a 0° ou 45° , bem como determinar se haverá ou não repetição de padrões e, em caso positivo, quantas serão essas repetições. Quando a estrutura é descrita como tendo simetria em xz , entende-se que a distribuição de elementos é simétrica em relação ao plano formado pelos eixos X e Z . O mesmo conceito se aplica à simetria em yz . Nesses casos a simetria é de 0° porque os planos de simetria são paralelos aos planos formados pelos eixos coordenados. Por outro lado, nos casos em que a simetria é a 45° , os planos de simetria formam um ângulo de 45° com os planos formados pelos eixos coordenados. Para facilitar a compreensão, na Figura 28 apresenta-se um esquema representativo dos planos de simetria a xz e yz a 0° e a 45° .

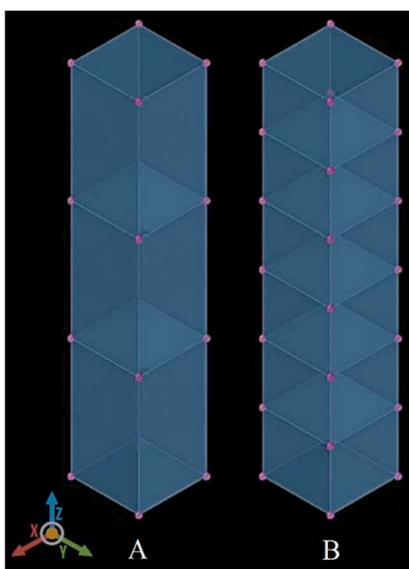
Figura 28 – Representação dos planos de simetria



Fonte: Adaptado de Goli, Alaghmandan e Barazandeh (2021)

Na repetição de padrões os elementos são agrupados de acordo com a quantidade de células definidas. Em teoria, a repetição de padrões pode ser implementada na direção de qualquer eixo coordenado. Uma vez que o presente estudo analisa estruturas de contraventamento, convém que a repetição de padrões ocorra ao longo da altura da edificação, ou seja, na direção z . Os elementos que ocupam a mesma posição relativa dentro de cada célula são agrupados para que, através da média de suas sensibilidades, lhes sejam sempre atribuídos o mesmo valor de densidade. No presente trabalho foram analisados casos com 3 e 6 células unitárias na repetição de padrões, conforme pode ser visto na Figura 29.

Figura 29 – Representação do número de células usadas na repetição de padrões. (A) repetição com 3 células. (B) repetição com 6 células



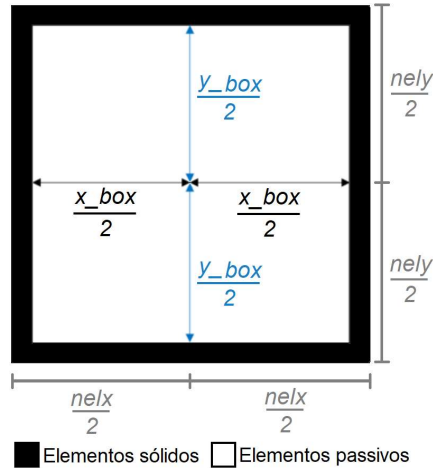
Fonte: Adaptado de Goli, Alaghmandan e Barazandeh (2021)

Os sistemas de contraventamento não precisam estar necessariamente no interior da edificação, podendo estar, como nos casos analisados neste estudo, nas fachadas da edificação. Assim, durante o processo de OT só devem existir elementos nas zonas mais externas do domínio. Isso significa que no interior do domínio todos os elementos devem ser vazios, enquanto no exterior as densidades podem variar entre os valores mínimo e máximo de forma a proporcionarem à estrutura a menor flexibilidade média possível. Os vazios introduzidos no domínio são denominados elementos passivos e configuram regiões que o algoritmo não altera, uma vez que sua densidade é fixa e não variável.

A quantidade de elementos passivos nas direções x e y é dada pelas variáveis x_box e y_box , respectivamente. Essas quantidades são definidas pelo usuário do programa de acordo com a quantidade desejada de elementos na formação das fachadas. Para o presente estudo, adotou-se 2 elementos na formação das fachadas, independentemente do nível de refinamento da malha.

Assim, os elementos passivos, de acordo com os valores atribuídos a x_box e y_box , são posicionados de forma simétrica em relação ao centro do domínio nas direções x e y . Um esquema representativo das variáveis x_box e y_box pode ser observado na Figura 30.

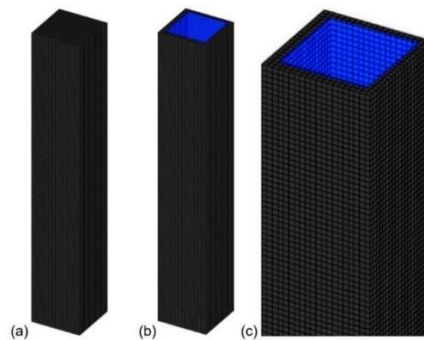
Figura 30 – Vista no plano xy do domínio com restrição de elementos passivos



Fonte: Adaptado de Silva (2021)

Com relação à direção z , considera-se que a quantidade de elementos passivos nessa direção é igual à quantidade de elementos atribuídos ao domínio na direção z , em todos os casos, como pode ser observado na figura 31. No exemplo apresentado, mostra-se o domínio de projeto sem a inclusão de elementos passivos e com a inclusão dos elementos passivos no núcleo da edificação, além de uma visão mais detalhada da região de elementos passivos.

Figura 31 – Domínio de projeto: (a) sem elementos passivos, (b) inclusão de elementos passivos no núcleo de material sólido, e (c) detalhe da região passiva



Fonte: Silva (2022)

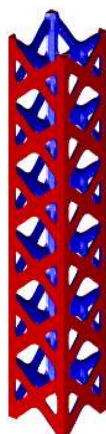
Na etapa seguinte, o código implementado prepara-se para a análise de elementos finitos através da discretização do domínio em uma malha estruturada com elementos hexaédricos trilineares de acordo com os valores fornecidos para as variáveis $nelx$, $nely$ e $nelz$. A partir de cada elemento da malha é construída uma matriz de rigidez local ($\mathbf{k}_0$) e a matriz de rigidez global ($\mathbf{K}$).

O vetor de carregamentos ($\mathbf{F}$) e os suportes são modificados de acordo com cada estrutura analisada, considerando sempre as devidas direções em que há restrição de liberdade. No presente trabalho, os suportes consistem em restringir o deslocamento dos nós da base da estrutura e a direção das forças aplicadas dependem da fachada analisada. Para as fachadas frontal e traseira, as forças são aplicadas na direção x , enquanto para as fachadas laterais, as forças são aplicadas na direção y .

Na etapa subsequente, se realiza a leitura do arquivo “.TXT” que armazena as informações de carregamento sobre a fachada obtidas a partir da análise de CFD no OpenFOAM. A partir de então, se inicia o processo de otimização topológica, resolvendo problema de elasticidade linear tridimensional através do método dos elementos finitos. Na primeira iteração, as densidades de todos os elementos são iguais ao valor da fração de volume. Em todas as iterações é feita a análise de elementos finitos, aplicando-se o solver MCGC na resolução do sistema de equações. Depois da análise de elementos finitos, as sensibilidades são calculadas e aplica-se o filtro de sensibilidade. Nessa etapa são calculadas as médias das sensibilidades dos elementos correspondentes, isto é, elementos simétricos ou na mesma posição relativa em diferentes células. Assim, o valor médio é atribuído para todos os elementos correspondentes, garantindo que as condições de simetria e repetição de padrões sejam atendidas.

Após atualizadas as densidades, o critério de parada é verificado e, se não atendido, o programa reinicia o processo a partir da análise de elementos finitos até que o critério de convergência seja atendido. Dessa forma, o resultado é fornecido em uma figura tridimensional composta por duas cores, como pode ser observado na Figura 32. As superfícies representadas em vermelho são aquelas que coincidem com as extremidades do domínio. Por outro lado, as superfícies representadas em azul são aquelas no interior do domínio.

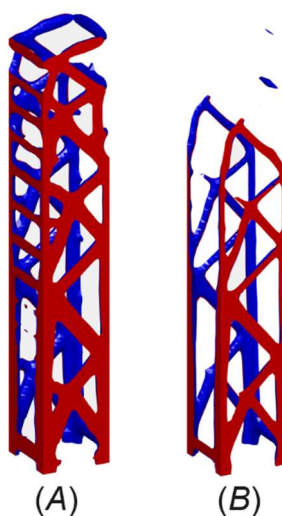
Figura 32 – Modelo de edificação otimizado resultante do código *top3dmgcg_BUILDING*



Fonte: O Autor (2023)

Para a geração das figuras tridimensionais, são plotados apenas os elementos com densidade igual ou superior a um valor limite, definido pelo usuário, denominado *cut off*. Embora seja comum adotar para *cut off* um valor de 0,50, no presente trabalho este valor resultou em estruturas de difícil interpretação, observando-se descontinuidades nos elementos que definem a estrutura, como pode ser visto na Figura 33.B. Dessa forma, para o presente estudo foi adotado um *cut off* de 0,20 para todas os problemas de OT, uma vez que esse valor apresentou melhores resultados, como se observa na Figura 33.

Figura 33 - Plotagem de uma mesma estrutura utilizando diferentes valores de *cut off*. (A) *cut off* de 0,20. (B) *cut off* de 0,50



Fonte: O Autor (2023)

3.4 CARACTERÍSTICAS COMPUTACIONAIS

As simulações no OpenFOAM foram realizadas no Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM) do Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste (CAA-UFPE) e no computador pessoal do autor. Por sua vez, os problemas de OT foram solucionados apenas no computador pessoal do autor. Os computadores do LECOM possuem o Sistema Operacional de 64 bits Ubuntu 16.04 LTS, memória RAM de 7,4 GB e 1,00 TB de memória física. O computador pessoal do autor é configurado com uma memória RAM de 8,0 GB, sistema operacional de 64 bits Windows 11 Home, processador core i5-8400 CPU @ 2.80GHz e 1,12 TB de memória física.

4 VALIDAÇÃO E VERIFICAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os estudos de validação conduzidos para avaliar a acurácia e confiabilidade das abordagens empregadas. Os resultados estão divididos nos seguintes tópicos: (1) validação do domínio computacional empregado no OpenFOAM, (2) validação do programa de CFD, (3) verificação do programa de otimização topológica *top3dmgcg_BUILDING* e (4) estudo dos principais parâmetros do *top3dmgcg_BUILDING*.

4.1 VALIDAÇÃO DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL

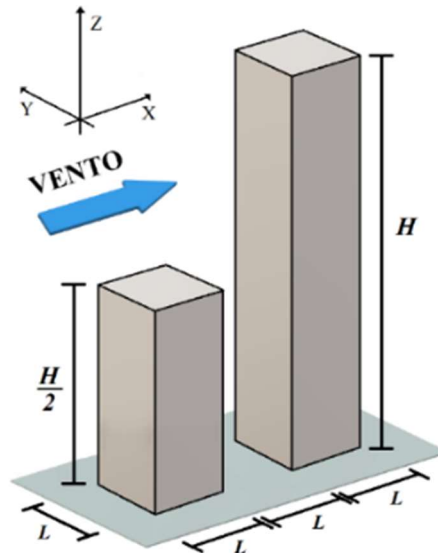
Como dito anteriormente, o domínio computacional mais comum empregado em simulações de CFD consiste em um domínio de base retangular com o objeto a ser analisado posicionado de forma simétrica em relação ao plano paralelo à direção do escoamento. Na presente pesquisa, com o intuito de facilitar a modelagem e diminuir o custo computacional despendido no processo de geração da malha, adotou-se um domínio de base quadrada, capaz de simular até um máximo de 3 casos com a mesma malha, alterando-se apenas as condições de contorno para controlar o ângulo de incidência do vento.

Dessa forma, através de um estudo de validação se analisa que o uso de um domínio diferente do convencional não altera de forma significativa os resultados das simulações nem implica em perda de confiabilidade. Para tanto, comparam-se os resultados obtidos através de ensaio experimental em túnel de vento conduzido pela Universidade Politécnica de Tóquio (TPU) com os resultados obtidos através de simulações numéricas empregando-se os dois domínios analisados: o convencional, de base retangular, e o adotado no presente estudo, de base quadrada.

O problema analisado consiste em um ambiente urbano formado por duas edificações. A edificação principal tem relação de aspecto $1 \times 1 \times 4$ ($L \times L \times H$, com $L = 0,07$ m) e o prédio interferente tem relação de aspecto $1 \times 1 \times 2$, como pode ser observado na Figura 34. Nos ensaios experimentais, o prédio interferente pode estar localizado em diversas posições com relação ao prédio principal. Para este estudo, foi escolhida uma distância relativa de $2L$ entre as edificações. Para a modelagem do escoamento foram adotadas as condições iniciais e de

contorno apresentadas nos itens 3.2.2 e 3.2.3, com exceção da velocidade de referência que adota-se 8,2 m/s na altura de referência $H_{ref} = 0,28$ m, a altura da edificação principal.

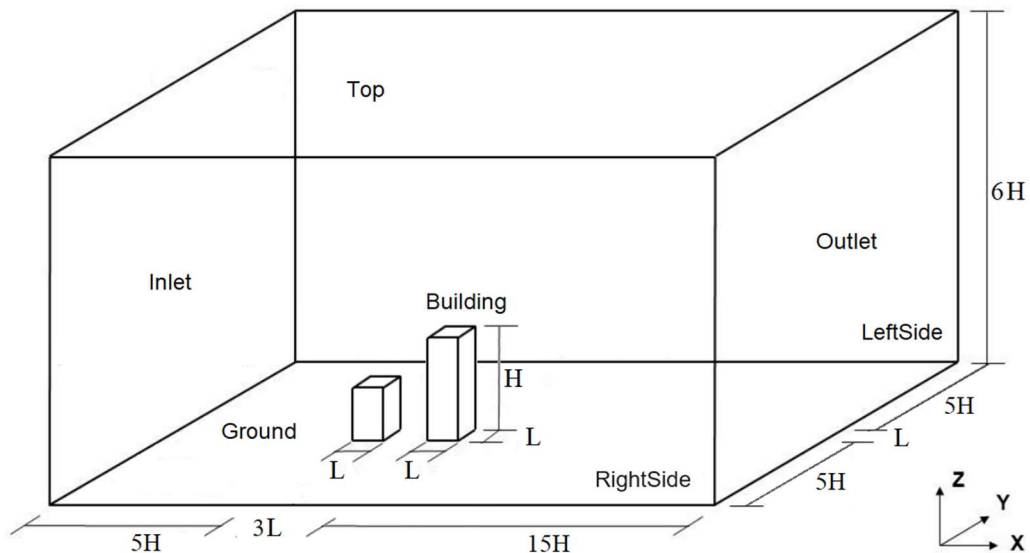
Figura 34 – Configuração urbana simulada no estudo de validação do domínio computacional



Fonte: O Autor (2023)

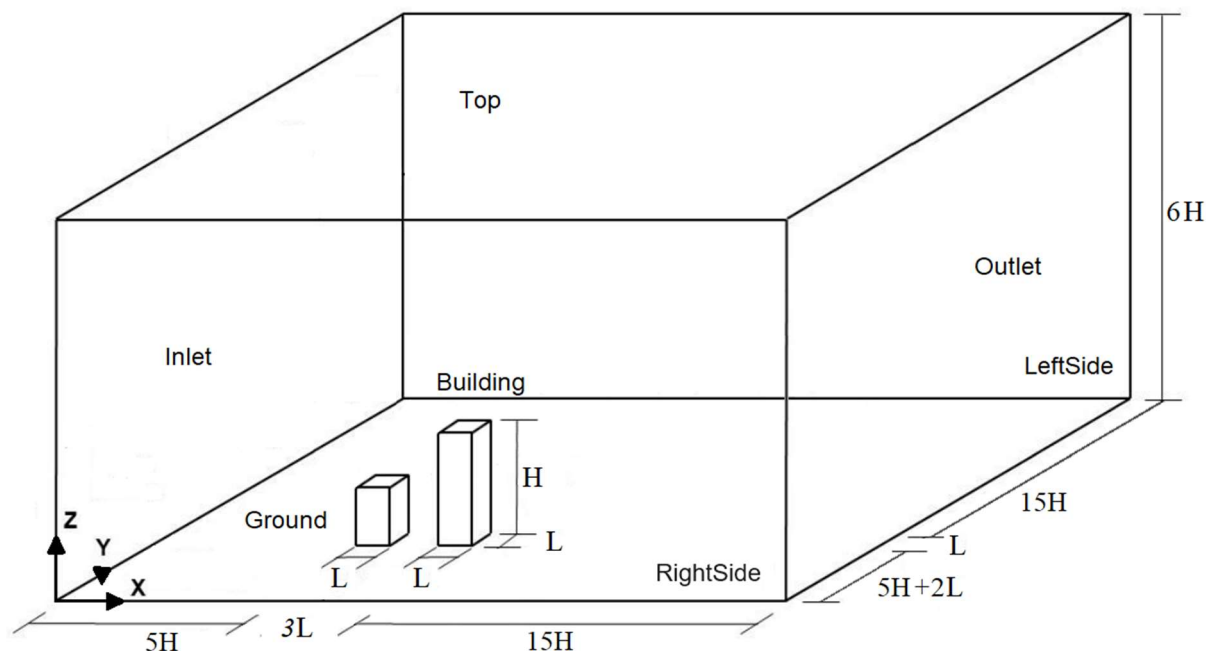
Nas Figuras 35 e 36, apresentam-se os domínios computacionais retangular e quadrado, empregados no estudo de validação. As dimensões de cada domínio foram definidas de acordo com as diretrizes apresentadas no item 3.2.3.

Figura 35 – Dimensões empregadas na modelagem do domínio retangular



Fonte: O Autor (2023)

Figura 36 – Dimensões empregadas na modelagem do domínio quadrado



Fonte: O Autor (2023)

Para a discretização dos domínios computacionais empregou-se a ferramenta *snappyHexMesh*, permitindo uma maior concentração de volumes finitos nas regiões de interesse. Para cada domínio foram geradas 3 regiões de refinamento ao redor das edificações. As dimensões e nível de refinamento de cada região são apresentadas na Tabela 4 através da determinação das coordenadas mínimas e máximas de cada região nas direções x , y e z .

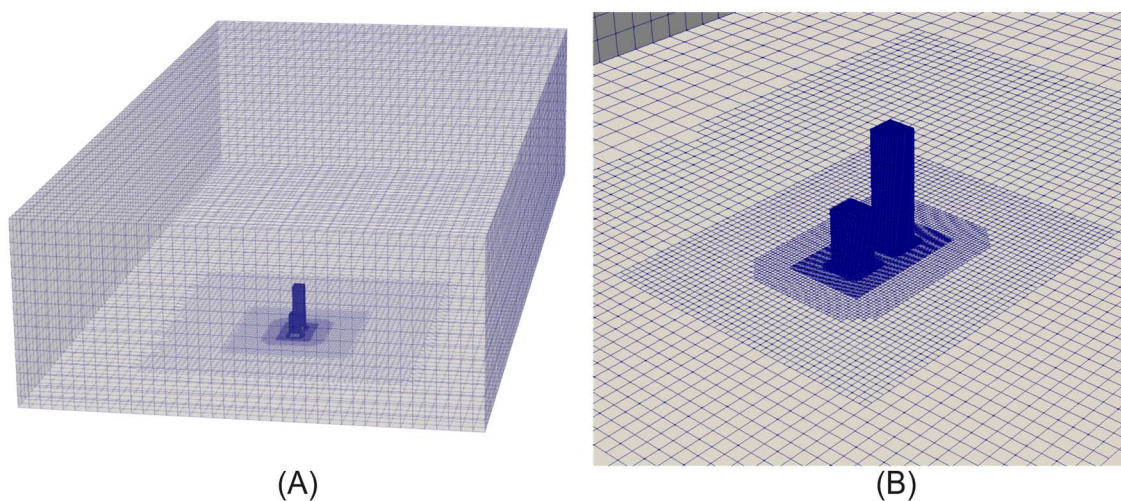
Tabela 4 – Dimensões e nível de refinamento das regiões de refinamento empregadas na discretização dos domínios computacionais

	Domínio Retangular			Domínio Quadrado		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Nível de Refinamento	4	2	1	4	2	1
x_{min}	1,33	1,05	0,63	1,33	1,05	0,63
x_{max}	1,68	1,96	2,66	1,68	1,96	2,66
y_{min}	1,33	1,05	0,63	1,47	1,19	0,77
y_{max}	1,68	1,96	2,38	1,68	1,96	2,66
z_{min}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
z_{max}	0,40	0,60	0,80	0,40	0,60	0,80

Fonte: O Autor (2023)

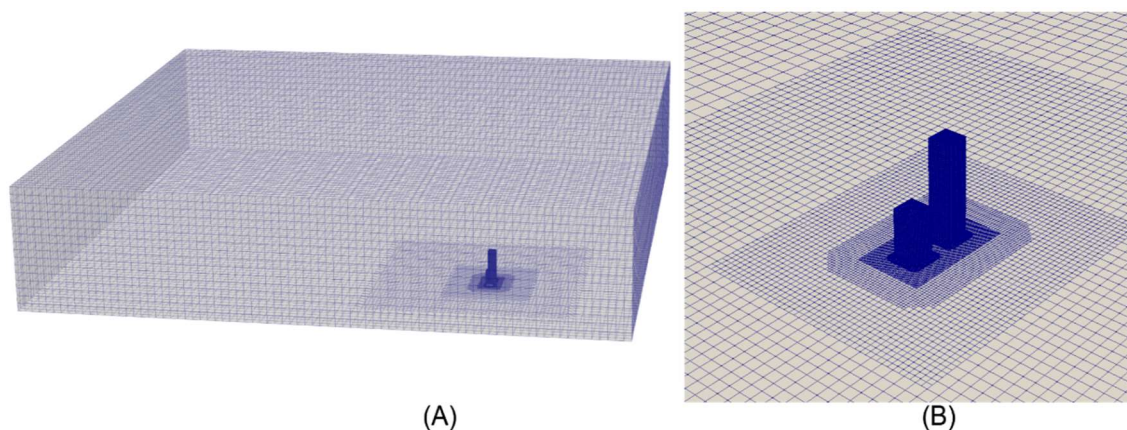
Nas Figuras 37 e 38, apresentam-se as malhas resultantes das discretizações mostradas acima. O domínio de base retangular resultou em uma malha de 744.467 volumes finitos, enquanto a malha do domínio quadrado apresentou 930.774 volumes finitos.

Figura 37 – Domínio retangular discretizado. (A) visão completa, (B) detalhe próximo às edificações



Fonte: O Autor (2023)

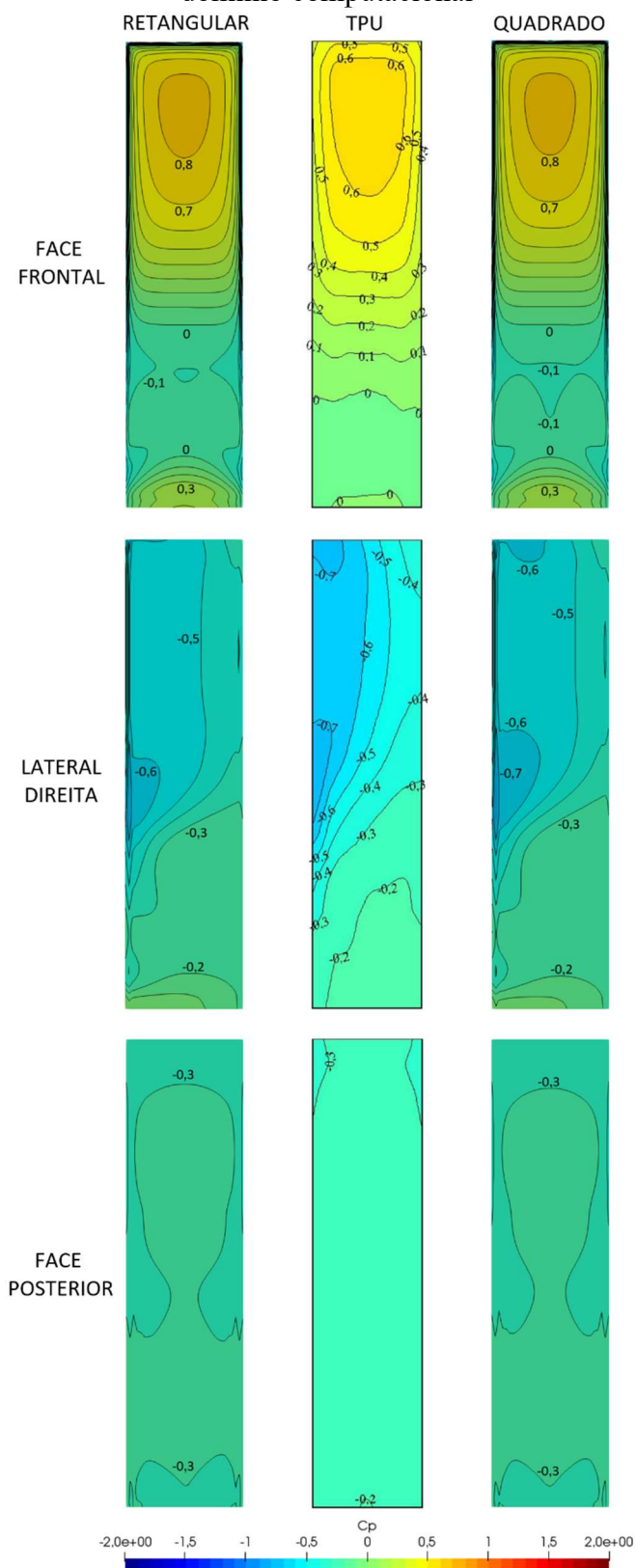
Figura 38 – Domínio quadrado discretizado. (A) visão completa, (B) detalhe próximo às edificações



Fonte: O Autor (2023)

Os resultados das simulações realizadas com ambos os domínios computacionais são mostradas na Figura 39 através da distribuição do coeficiente de pressão, juntamente com as médias temporais disponibilizadas pela TPU. Os resultados das fachadas frontal, lateral direita e posterior são exibidos, enquanto os contornos de pressão na fachada lateral esquerda são omitidos devido à sua simetria em relação à fachada direita. As isolinhas dos contornos de pressão são demarcadas a cada 0,10 e é utilizada a mesma escala de cores da TPU para representar os resultados numéricos.

Figura 39 – Contornos de pressão nas fachadas da edificação principal – validação do domínio computacional



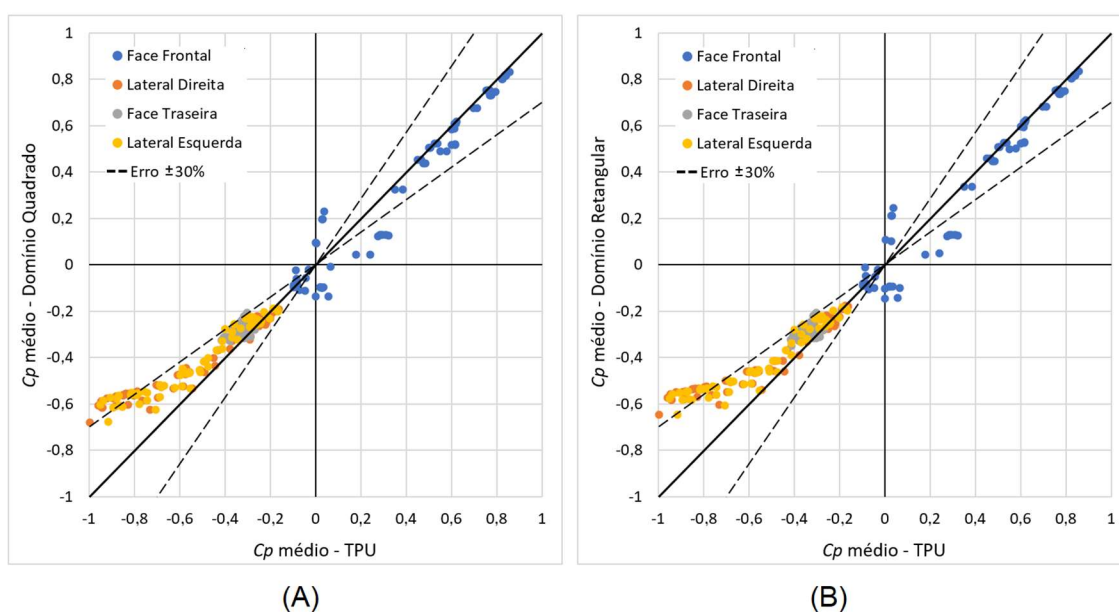
Fonte: O Autor (2023)

Pode-se notar que tanto o emprego do domínio quadrado quanto do domínio retangular levaram a resultados bastante próximos daqueles obtidos através dos ensaios experimentais em túnel de

vento. Nota-se também que, apesar de algumas diferenças perceptíveis, os resultados obtidos através dos dois domínios não apresentam desvios significativos entre si que possam pôr em dúvida a confiabilidade dos resultados obtidos através do emprego do domínio de base quadrada.

No ensaio experimental realizado no túnel de vento da Universidade Politécnica de Tóquio foram usados 252 sensores localizados nas quatro fachadas do modelo de edificação. Com base na informação da localização dos sensores, é possível extrair do OpenFOAM os dados de pressão referentes aos mesmos pontos, permitindo que sejam feitas análises quantitativas. Na Figura 40, são apresentados dois gráficos de dispersão que correlacionam os valores do coeficiente de pressão médio obtidos nas simulações numéricas com ambos os domínios e experimentais. Quanto mais próximos os pontos estiverem da linha contínua, inclinada a 45° , mais os resultados numéricos se adequam aos experimentais.

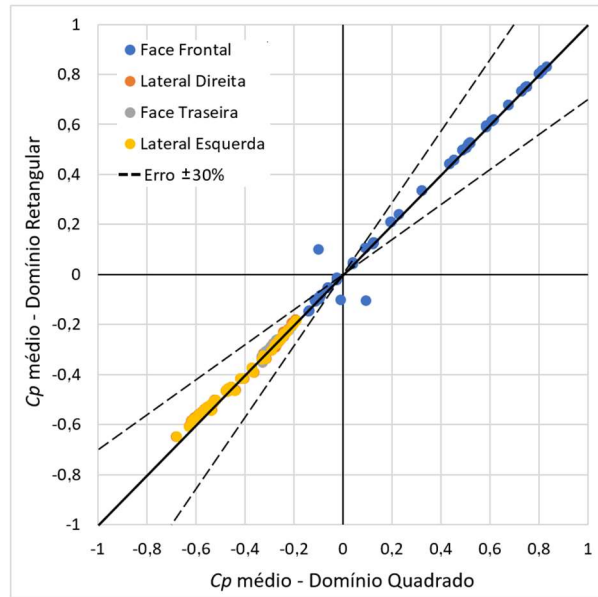
Figura 40 – Gráficos de dispersão do coeficiente de pressão médio. (A) domínio quadrado $\times$ TPU, (B) domínio retangular $\times$ TPU



Fonte: O Autor (2013)

Percebe-se, que o comportamento de ambos os domínios é semelhante, apresentando boa conformidade com os valores experimentais, tendo a maioria dos pontos uma diferença relativa menor que 30%, ver linha tracejada. Nos dois domínios observa-se que as maiores diferenças relativas estão nas pressões negativas de maiores valores e nos valores próximos ao zero. Na Figura 41, apresenta-se o gráfico de dispersão, confrontando os valores obtidos em ambos os domínios.

Figura 41 – Gráfico de dispersão do coeficiente de pressão médio, comparação entre os domínios retangular e quadrado



Fonte: O Autor (2023)

Percebe-se uma ótima concordância entre os dois domínios estudados, a distribuição dos pontos próximos à linha central reforça o entendimento de que o emprego do domínio quadrado não provoca alterações significativas nos resultados quando comparados àqueles obtidos pelo uso de um domínio convencional.

Por fim, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio quadrático normalizado (NRMSE, *Normalized Root Mean Square Error*). Conforme Sarkar *et al.*(2023), O R^2 é uma medida estatística utilizada para avaliar o quão bem um modelo se ajusta aos dados observados (experimentais). A métrica varia entre 0 e 1, onde os valores mais próximos de 1 indicam melhor ajuste do modelo com relação aos dados experimentais e os valores próximos do 0 indicam um ajuste insatisfatório. O R^2 é dado pela equação:

$$R^2 = \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad (21)$$

onde, SQ_{res} e SQ_{tot} são dados pelas seguintes equações:

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (22)$$

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (23)$$

onde, n é o número de dados coletados, y_i é o valor observado (experimental), $\bar{y}_i$ é a média espacial dos valores observados e $\hat{y}_i$ é o valor estimado através da simulação numérica. Segundo Jiang *et al.* (2023) o NRMSE, também é uma medida estatística utilizada para avaliar a precisão de um modelo. É uma métrica que quantifica o erro médio entre os valores experimentais e numéricos, normalizando-o em relação à escala dos dados. No caso do NRMSE, valores próximos ao 0 indicam uma melhor concordância entre os dados observados e simulados. O NRMSE é dado pela seguinte equação:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{i,max} - y_{i,min}} \quad (24)$$

onde, y_{max} e y_{min} são os valores máximo e mínimo, respectivamente, observados no experimento, e $RMSE$ é o erro médio quadrático, dado pela expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (25)$$

Os valores do R^2 e do $NRMSE$ para os dois domínios são apresentados na Tabela 5. São calculados os erros considerando ambos os domínios e o experimento em túnel de vento, bem como entre os domínios analisados. Também são apresentados os valores ideais para cada erro, isto é, o melhor resultado que poderia ser alcançado.

Tabela 5 – Erros calculados para o estudo de validação do domínio computacional

	R^2	$NRMSE$
Quadrado $\times$ TPU	0,882	6,95%
Retangular $\times$ TPU	0,861	7,49%
Quadrado $\times$ Retangular	0,996	1,24%
Valores ideais	1	0

Fonte: O Autor (2023)

Os resultados dos erros confirmam as análises anteriores, demonstrando que ambos os domínios produzem resultados muito próximos aos dados experimentais. É importante destacar que a comparação entre os próprios domínios revela os melhores resultados, com apenas 1,24 de erro (NRMSE) e um coeficiente de determinação de 0,996. Além disso, observa-se que o domínio quadrado apresenta resultados mais próximos dos dados experimentais que o domínio retangular.

Assim, com base em todas as análises apresentadas, pode-se afirmar que o uso do domínio de base quadrada não altera os resultados das simulações. Além disso, essa abordagem é capaz de reduzir significativamente o tempo necessário para gerar as malhas. Assim, sua adoção é vantajosa para o desenvolvimento desta pesquisa.

4.2 VALIDAÇÃO DO OPENFOAM

Uma vez validado o domínio computacional, é necessário validar também o programa de CFD, isto é, é necessário garantir que os parâmetros estabelecidos para os modelos e esquemas numéricos, bem como as condições iniciais e de contorno atribuídas ao problema são capazes de simular com fidelidade os efeitos do escoamento do vento. Para tanto, adota-se como estudo experimental o mesmo caso analisado no estudo de validação do domínio computacional, isto é, o escoamento ao redor de duas edificações conduzido no túnel de vento da TPU. A edificação principal tem relação de aspecto $1 \times 1 \times 4$ e um prédio vizinho tem uma relação de aspecto $1 \times 1 \times 2$, como apresentado no item 4.1. O domínio adotado para o estudo de validação do OpenFOAM é o mesmo apresentado na Figura 36. Aqui, porém, o escoamento do vento foi simulado considerando um ângulo de 90° . Dessa forma, as condições de contorno prescritas nas fronteiras do domínio seguem as especificações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições de contorno aplicadas às faces do domínio no estudo de validação

Face	Velocidade	Pressão	κ	ω	μ_t
Inlet	CS	CS	CS	CS	CS
Outlet	CS	CS	CS	CS	CS
Ground	$U_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF
Top	CS	CS	CS	CS	CS
RightSide	$U_y = U(z)$	$\nabla(p) = 0$	$\kappa = \kappa(z)$	$\omega = \omega(z)$	$\nabla(\mu_t) = 0$
LeftSide	$\nabla(U) = 0$	$p = 0$	$\nabla(\kappa) = 0$	$\nabla(\omega) = 0$	$\nabla(\mu_t) = 0$
Building	$U_i = 0$	$\nabla(p) = 0$	WF	WF	WF

Nomenclatura: CS = condição de simetria; WF = função de parede (*Wall Function*); u_i = componente da velocidade com relação à direção $i = x, y, z$

Fonte: O Autor (2023)

Para a discretização do domínio foram empregados três níveis de refinamento da malha, um grosseiro, um básico e um fino, denominados M1, M2 e M3. Compostos por 448.453, 930.774 e 1.822.665 volumes finitos, respectivamente. Na modelagem das malhas, foram empregadas três regiões de refinamento, com dimensões idênticas em todas as malhas. Essas dimensões estão detalhadas na Tabela 4 para o domínio quadrado. A diferença entre as malhas está relacionada ao nível de refinamento atribuído a cada região, conforme A Tabela 7.

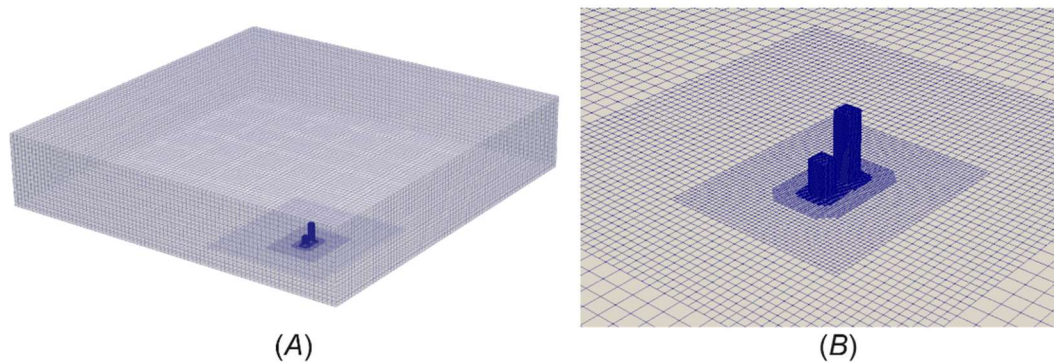
Tabela 7 - Níveis de refinamento empregados nas três regiões de refinamento das malhas geradas para estudo de validação do OpenFOAM

	M1	M2	M3
R1	1	1	2
R2	2	2	3
R3	3	4	4

Fonte: O Autor (2023)

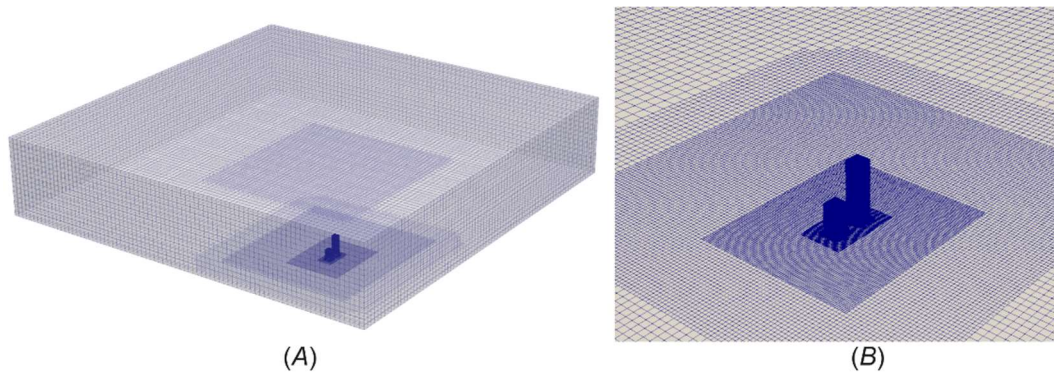
As malhas M1 e M3, resultantes das discretizações apresentadas acima podem ser observadas nas Figuras 42 e 43. A malha M2 pode ser observada na Figura 38, apresentada no item 4.1

Figura 42 – Malha M1. (A) domínio completo. (B) detalhe perto das edificações



Fonte: O Autor (2023)

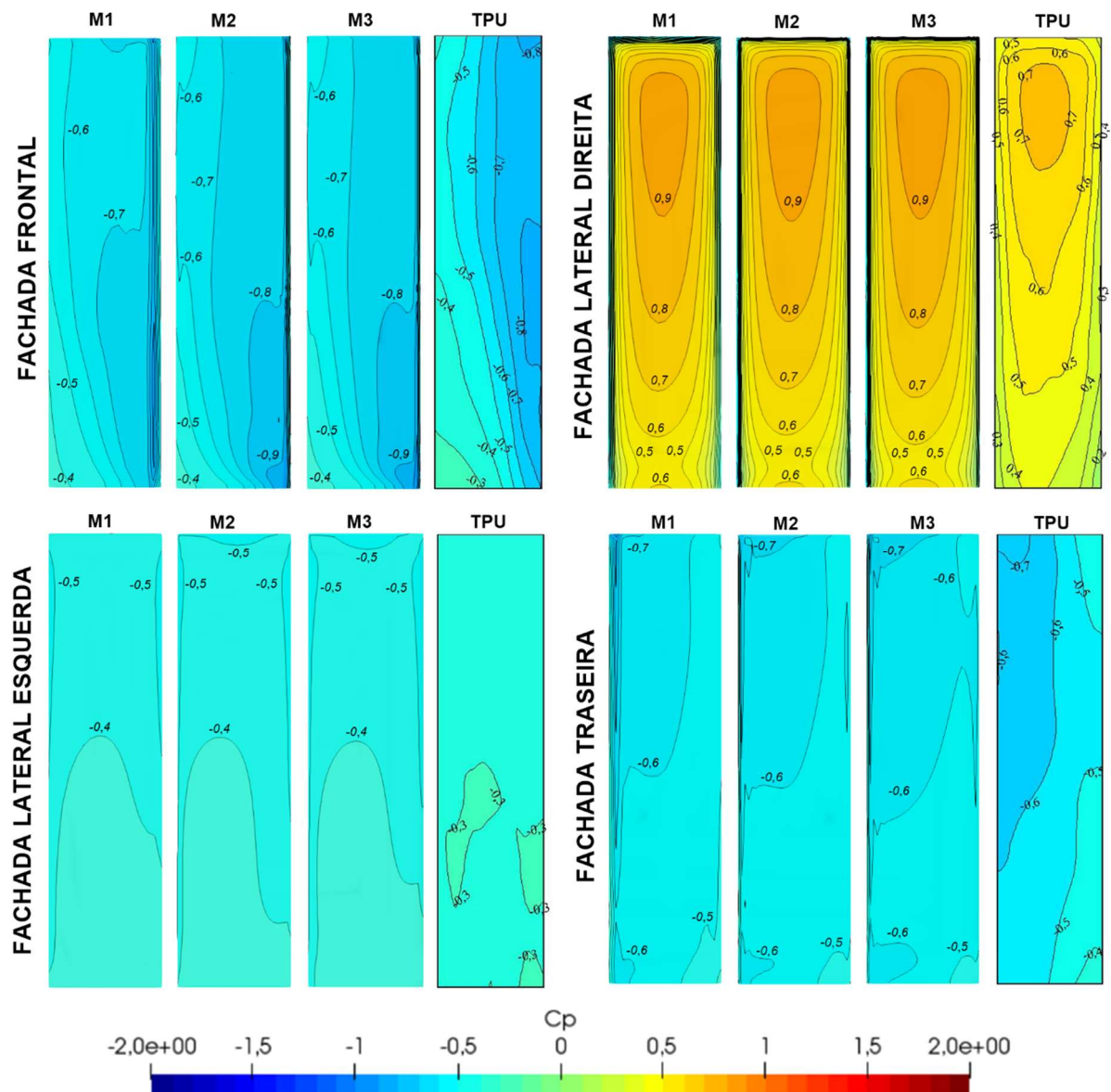
Figura 43 - Malha M3. (A) domínio completo. (B) detalhe perto das edificações



Fonte: O Autor (2023)

Os resultados das simulações com as três malhas são apresentados na Figura 44, através da distribuição do coeficiente de pressão médio, juntamente com os resultados experimentais disponibilizados pela TPU. As isolinhas dos contornos de pressão são demarcadas a cada 0,10 e é utilizada a mesma escala de cores da TPU.

Figura 44 - Contornos de pressão nas fachadas da edificação principal – validação do OpenFOAM

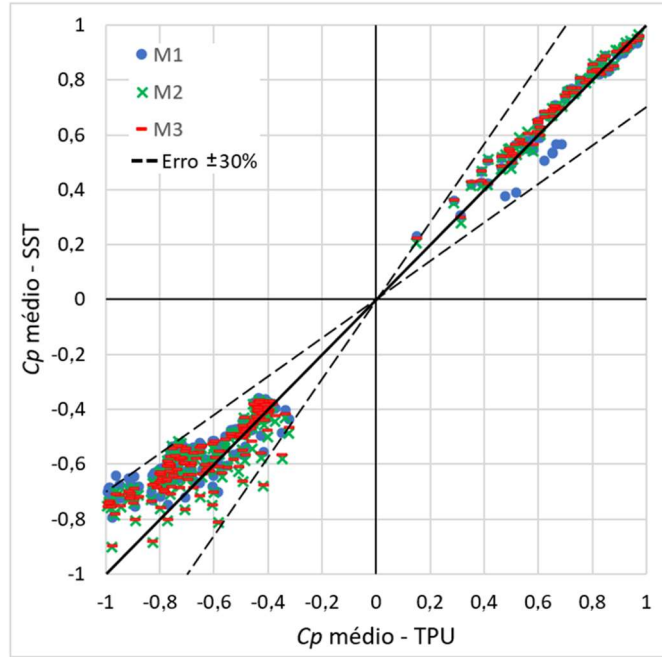


Fonte: O Autor (2023)

Percebe-se, que a distribuição de pressões com os três níveis de refinamento da malha produz resultados muito próximos aos apresentados no ensaio experimental, principalmente nas fachadas frontal e traseira. Também, se observa pouca variação entre as diferentes malhas.

Na Figura 45, apresenta-se um gráfico de dispersão correlacionando os valores do coeficiente de pressão médio obtidos com as três malhas analisadas e os dados experimentais, determinado da mesma maneira como foi descrito no item 4.1.

Figura 45 - Gráfico de dispersão do coeficiente de pressão médio, comparação entre os domínios entre as malhas M1, M2 e M3 com os dados da TPU



Fonte: O Autor (2023)

Observa-se uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados obtidos com as três malhas, sendo poucos pontos os que apresentam diferenças relativas superiores a 30%. À medida que o nível de refinamento da malha aumenta, as simulações numéricas tendem a se aproximar dos dados experimentais. As malhas M2 e M3 mostram C_p muito próximos, indicando a convergência dos resultados. Assim, um refinamento adicional da malha resultaria em um aumento considerável no custo computacional sem diferenças significativas nos resultados.

Foram também calculados os coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D) e de momento (C_M), em relação à base da edificação principal, tanto para as simulações numéricas, com as três malhas empregadas, quanto para o ensaio experimental. O momento é calculado com relação aos eixos x e y e é composto por duas parcelas, M_x e M_y . As cargas nas fachadas laterais direita e esquerda contribuem para a parcela M_y enquanto as fachadas frontal e traseira contribuem com a parcela M_x . Essas duas parcelas são calculadas pelas seguintes equações:

$$M_x = \sum F_y L_z \quad (26)$$

$$M_y = \sum F_x L_z \quad (27)$$

onde, F_y e F_x correspondem às forças aplicadas na direção perpendicular aos eixos y e x , respectivamente, e L_z é a distância entre o ponto de aplicação da força e a base da edificação. Os valores são adimensionalizado de acordo com o comprimento (l_a) e área de referência (S_a), conforme as seguintes equações:

$$C_{M_i} = \frac{M_i}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 S_a l_a} \quad (28)$$

$$C_M = \sqrt{C_{M_x}^2 + C_{M_y}^2} \quad (29)$$

onde, M_i é o momento no eixo i , S_a é a área de referência, calculada através da multiplicação da base da edificação por sua altura, l_a é o comprimento de referência, medido como a altura da edificação e C_M é o coeficiente de momento total adimensionalizado (Silva, 2022; Lu e Li, 2022). Com relação ao coeficiente de arrasto (C_D), ele é dado pela equação:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2 S_a} \quad (30)$$

onde, F_D é a força resultante devido à ação do vento na direção do arrasto. Os valores dos coeficientes aerodinâmicos mostram-se na Tabela 8 para as simulações numéricas e o ensaio experimental. O erro entre as simulações e o experimento é quantificada, permitindo uma análise comparativa entre os dois conjuntos de dados.

Tabela 8 – Comparação entre coeficientes aerodinâmicos

	C_D	C_M	Erro C_D (TPU)	Erro C_M (TPU)
M1	0,9908	0,5144	9,82%	12,81%
M2	1,0409	0,5493	5,26%	6,90%
M3	1,0483	0,5516	4,59%	6,51%
TPU	1,0987	0,5900		

Fonte: O Autor (2023)

Os resultados mostram uma boa concordância entre os dados experimentais e as simulações realizadas por meio do OpenFOAM. As diferenças relativas do C_D e do C_M , entre a malha M1

e o experimento apresentam valores aproximadamente duas vezes maiores que as diferenças relativas entre a malha M3 e o experimento. Ao aumentar o nível de refinamento da malha de M1 para M2, as diferenças relativas são significativamente reduzidas, apresentando reduções de -4,56 pontos percentuais e -5,91 pontos percentuais para C_D e C_M , respectivamente. No entanto, ao aumentar o nível de refinamento da malha, de M2 para M3, observa-se uma menor diferença relativa, com valores de -0,67 pontos percentuais e -0,39 pontos percentuais para C_D e C_M , respectivamente. Esse comportamento indica uma convergência das soluções para um mesmo resultado.

Por fim, calculam-se as métricas: o fator de 2 das observações (FAC2), o fator de 1,3 das observações (FAC1.3), o viés fracionário (FB), o erro médio quadrado normalizado (NMSE), o coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE) e o erro quadrático médio normalizado (NRMSE). Os resultados obtidos apresentam-se na Tabela 9. Na última linha estão dispostos os valores ideais para cada métrica de validação. O cálculo da FAC2, FAC1.3, FB e NMSE foi realizado conforme Van Hooff, Blocken e Tominaga (2017).

Tabela 9 – Métricas de validação

	FAC2	FAC1.3	FB	NMSE	R^2	RMSE	NRMSE
M1	1	0,833	0,261	0,211	0,942	0,132	7,42%
M2	1	0,873	0,203	0,156	0,957	0,117	6,26%
M3	1	0,869	0,212	0,157	0,958	0,117	6,28%
Valor ideal	1	1	0	0	1	0	0,00%

Fonte: O Autor (2023)

Os resultados das métricas mostram uma boa concordância das simulações com os dados experimentais. Em todos os níveis de refinamento são observados valores próximos aos valores ideais o que demonstra a confiabilidade dos resultados. A malha M2 apresentou melhores resultados para o FAC1.3, FB e NMSE. Já a malha M3 apresentou os melhores resultados para o R^2 , RSME e NRMSE.

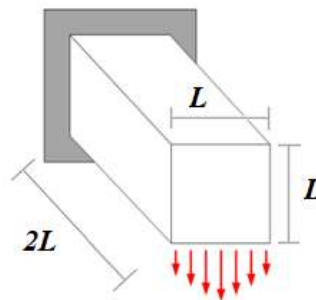
Em função das análises, tanto quantitativas e qualitativas, pode-se concluir que a malha M1 apresenta os resultados menos satisfatórios, por sua vez, as malhas M2 e M3 mostram resultados bastante semelhantes. Portanto, optou-se por empregar para as simulações dos 16 casos, a mesma discretização da malha M2 usada no estudo de validação. Essa escolha é motivada pelos bons resultados quantitativos e qualitativos, além do mais o maior custo computacional

envolvido na utilização da malha M3 não representaria uma melhora significativa nos resultados.

4.3 VERIFICAÇÃO DO *top3dmgcg_BUILDING*

Para verificar as implementações de simetria e repetição de padrões no programa de OT, emprega-se o problema da viga em balanço. O problema consiste em uma viga prismática de proporções $2 \times 1 \times 1$ (largura $\times$ comprimento $\times$ altura), engastada em uma de suas extremidades e solicitada por carga distribuída de forma senoidal na outra extremidade, conforme mostra-se na Figura 46.

Figura 46 - Viga Engastada



Fonte: Adaptado de Amir, Aage e Lazarov (2014)

Os resultados obtidos com o programa comparam-se com dois códigos de Otimização Topológica que utilizam o método SIMP: o *top3d* desenvolvido por Liu e Tovar (2014) e o *top3D125* desenvolvido por Ferrari e Sigmund (2020). O primeiro programa é uma expansão para a resolução de problemas tridimensionais do código bidimensional *Top88*, implementado por Andreassen *et al.* (2011). Para todos os programas foram considerados como material sólido os elementos com densidade ρ_e superior ou igual a 0,50, conforme também empregado por Liu e Tovar (2014) e Andreassen *et al.* (2011).

Para o problema, define-se o módulo de elasticidade $E = 1 \text{ Pa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$, raio de filtro $r_{min} = \sqrt{3}$ e fator de penalização $p = 3$, conforme valores adotados para o mesmo problema por Amir, Aage e Lazarov (2014), Liu e Tovar (2014) e Ferrari e Sigmund (2020). Estes três trabalhos utilizaram uma malha composta por 27.648 elementos ($48 \times 24 \times 24$) e uma fração de volume de 12%. Porém, com o objetivo de enriquecer a análise de validação, no presente trabalho foram analisadas duas malhas ($M1 = 24 \times 12 \times 12$ e $M2 = 48 \times 24 \times 24$) em combinação com três diferentes valores da fração de volume ($f_v = 0,12; 0,24$ e $0,48$), formando

uma combinação de casos que pode ser observada no Quadro 2. A escolha de uma malha mais grosseira (M1) que a utilizada pelos autores (M2) se deu em virtude das limitações dos recursos computacionais disponíveis.

Quadro 2 – Combinações de casos com diferentes malhas e frações de volume

CÓDIGO	CASO	FRAÇÃO DE VOLUME	MALHA
<i>Top3dmcg_BUILDING</i>	V-1	0,12	48x24x24
	V-2	0,12	24x12x12
	V-3	0,24	48x24x24
	V-4	0,24	24x12x12
	V-5	0,48	48x24x24
	V-6	0,48	24x12x12
<i>Top3d</i>	V-7	0,12	48x24x24
	V-8	0,12	24x12x12
	V-9	0,24	48x24x24
	V-10	0,24	24x12x12
	V-11	0,48	48x24x24
	V-12	0,48	24x12x12
<i>Top3D125</i>	V-13	0,12	48x24x24
	V-14	0,12	24x12x12
	V-15	0,24	48x24x24
	V-16	0,24	24x12x12
	V-17	0,48	48x24x24
	V-18	0,48	24x12x12

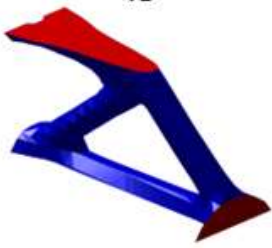
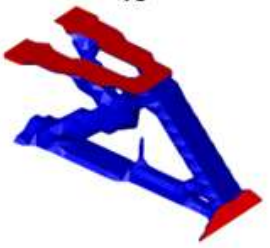
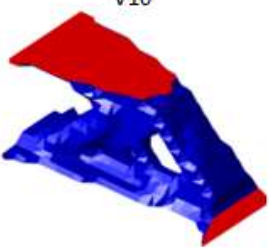
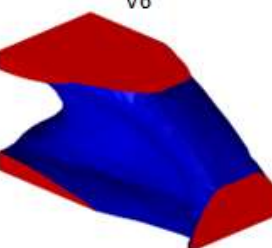
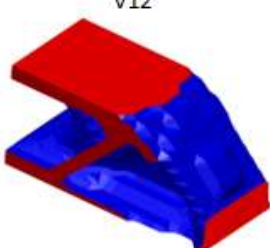
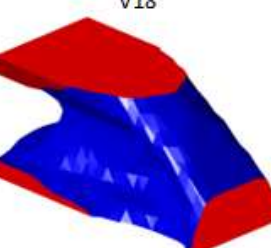
Fonte: O Autor (2023)

Para os casos V-1 a V-12 foi adotada uma tolerância de 10^{-3} para a atualização da densidade dos elementos, conforme adotado por Liu e Tovar (2014) e Amir, Aage e Lazarov (2014). Já para os casos V-13 a V-18 foi adotada uma tolerância de 10^{-7} , conforme adotado por Ferrari e Sigmund (2020). A escolha de uma tolerância diferente para os casos V-13 a V-18 se deu em virtude de o código desenvolvido por Ferrari e Sigmund (2020) adotar, para o seu cálculo, um critério diferente dos demais códigos.

Os resultados da otimização topológica dos casos com a malha M1 e M2 podem ser observados nos Quadros 3 e 4, respectivamente. Além do resultado gráfico, explicitando a topologia da estrutura otimizada, também se apresentam os valores da função objetivo (flexibilidade média, em N.m), a quantidade de iterações (It), o tempo de processamento adimensionalizado (t) em relação ao caso V-2 (48,75 s), e o parâmetro $\bar{h}$, definido por Yago *et al.* (2021) calcula-se como

a razão entre o volume e a área da superfície da solução. Este parâmetro provê uma resposta quantitativa sobre a complexidade do leiaute otimizado. Para baixos valores de $\bar{h}$, a solução ótima apresenta um grande número de barras finas, tornando-a mais difícil de ser manufaturada. À medida que o valor de $\bar{h}$ aumenta, o número de barras tende a diminuir e sua espessura tende a aumentar, simplificando a complexidade da topologia ótima e facilitando a sua manufatura.

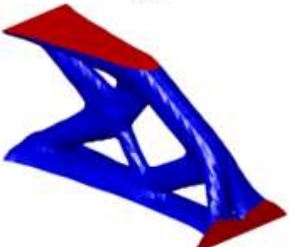
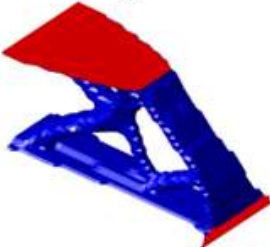
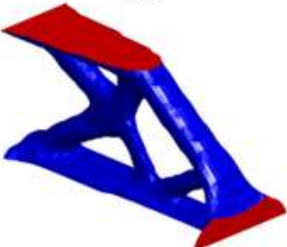
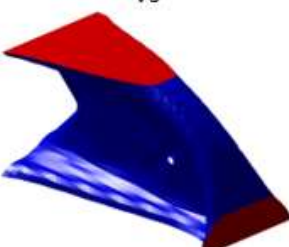
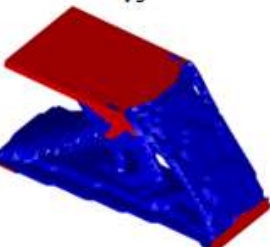
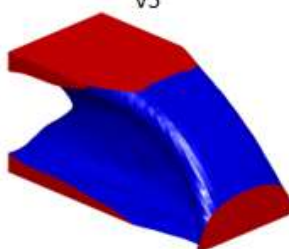
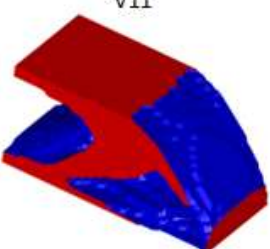
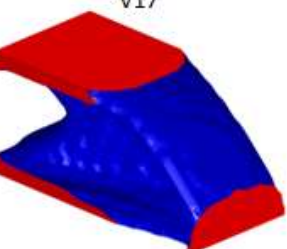
Quadro 3 – Comparação dos resultados para diferentes frações de volume utilizando a malha M1 (24×12×12)

f_v	<i>top3dmgcg_BUILDING</i>	<i>top3d</i>	<i>top3D125</i>
0,12	V2  OBJ: 2155 $\bar{h}$: 0,497 t = 1,000 It.: 132	V8  OBJ: 2269 $\bar{h}$: 0,415 t = 0,719 It.: 119	V14  OBJ: 2513 $\bar{h}$: 0,534 t = 1,081 It.: 241
	V4  OBJ: 810 $\bar{h}$: 0,712 t = 0,575 It.: 73	V10  OBJ: 797 $\bar{h}$: 0,622 t = 0,815 It.: 199	V16  OBJ: 903 $\bar{h}$: 0,765 t = 1,484 It.: 310
	V6  OBJ: 359 $\bar{h}$: 1,031 t = 0,235 It.: 32	V12  OBJ: 361 $\bar{h}$: 0,897 t = 0,694 It.: 162	V18  OBJ: 384 $\bar{h}$: 1,065 t = 1,107 It.: 255

Fonte: O Autor (2023)

Nota-se que os resultados do *top3dmgcg_BUILDING* são mais próximos daqueles obtidos através do *top3D125*, principalmente para os casos em que se usou a malha M2, enquanto o *top3d* apresenta diferenças mais notáveis em relação a estes, sobretudo nos casos em que se requer uma maior fração de volume da estrutura final.

Quadro 4 - Comparação dos resultados para diferentes frações de volume utilizando a malha M2 (48×24×24)

f_v	<i>top3dmgcg_BUILDING</i>	<i>top3d</i>	<i>to3D125</i>
0,12	V1  OBJ: 3090 $\bar{h}$: 0,816 t = 8,462 It.: 164	V7  OBJ: 3244 $\bar{h}$: 0,653 t = 29,333 It.: 195	V13  OBJ: 3408 $\bar{h}$: 0,839 t = 80,446 It.: 305
0,24	V3  OBJ: 1341 $\bar{h}$: 1,193 t = 10,174 It.: 196	V9  OBJ: 1479 $\bar{h}$: 0,860 t = 51,832 It.: 361	V15  OBJ: 1498 $\bar{h}$: 1,208 t = 131,336 It.: 420
0,48	V5  OBJ: 686 $\bar{h}$: 1,902 t = 4,952 It.: 93	V11  OBJ: 698 $\bar{h}$: 1,524 t = 51,585 It.: 155	V17  OBJ: 712 $\bar{h}$: 1,928 t = 174,278 It.: 524

Fonte: O Autor (2023)

Com relação ao tempo de processamento, os dados revelam que o código *top3dmgcg_BUILDING* é o mais eficiente entre os três, tendo necessitado de menos tempo para atingir o critério de parada que os demais códigos, para quase todas as combinações de nível de refinamento da malha e fração de volume estudadas (a exceção consiste na combinação da malha M1 com a fração de volume de 12%, em que o *top3d* registrou o menor tempo de processamento).

Na Tabela 10 observa-se o aumento relativo do tempo de processamento dos códigos *top3d* e *top3D125* em relação ao *top3dmgcg_BUILDING*.

Tabela 10 – Aumento relativo do tempo de processamento dos códigos *top3d* e *top3D125* em relação ao *top3dmgcg_BUILDING*

<i>fv</i>	M1		M2	
	<i>top3d</i>	<i>top3D125</i>	<i>top3d</i>	<i>top3D125</i>
0,12	-28,01%	8,14%	246,63%	850,64%
0,24	41,86%	158,33%	409,46%	1190,91%
0,48	195,72%	371,91%	335,87%	3419,25%
Média	23,19%	103,01%	335,60%	1536,66%

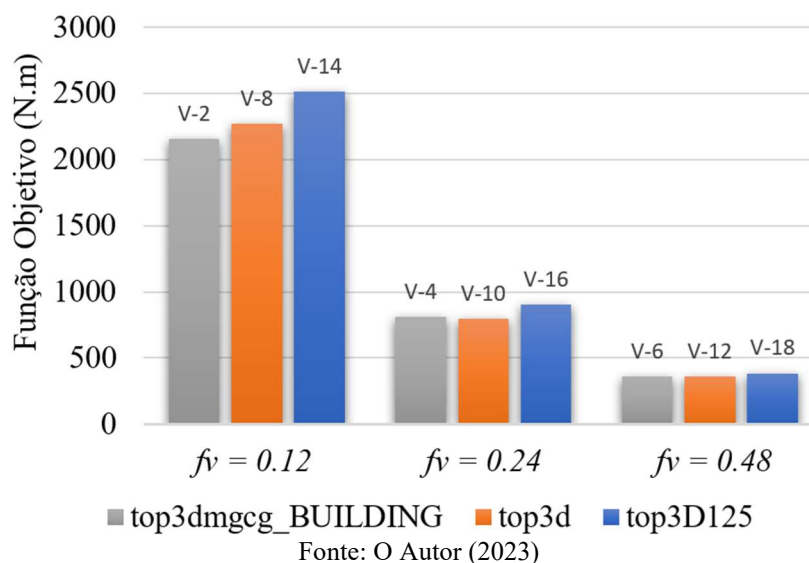
Fonte: O Autor (2023)

Percebe-se que os demais códigos demandam mais tempo de processamento, quando comparados ao *top3dmgcg_BUILDING*, à medida em que se aumenta a fração de volume requerida e, principalmente, à medida em que se aumenta o nível de refinamento da malha. Não por acaso, as menores diferenças relativas (-28,01% e 8,14%, em relação ao *top3d* e *top3D125*, respectivamente) foram obtidas entre os casos constituídos pela malha M1 e fração de volume de 12%, enquanto as maiores diferenças relativas (335,87% e 3419,25%, em relação ao *top3d* e *top3D125*, respectivamente) foram observadas entre os casos constituídos pela malha M2 e fração de volume de 48%.

Os valores médios demonstram que o fator de maior influência no aumento do tempo de processamento é o nível de refinamento da malha. Para a malha M1 o aumento médio no tempo de processamento foi de 23,19% e 103,01% em relação ao *top3d* e ao *top3D125*, respectivamente, enquanto para a malha M2 esse aumento foi de 335,60% e 1536,66% em relação ao *top3d* e ao *top3D125*, respectivamente. O aumento expressivo de 1536,66% indica que o *top3D125* é muito mais sensível ao aumento do nível de refinamento de malha que o *top3dmgcg_BUILDING*.

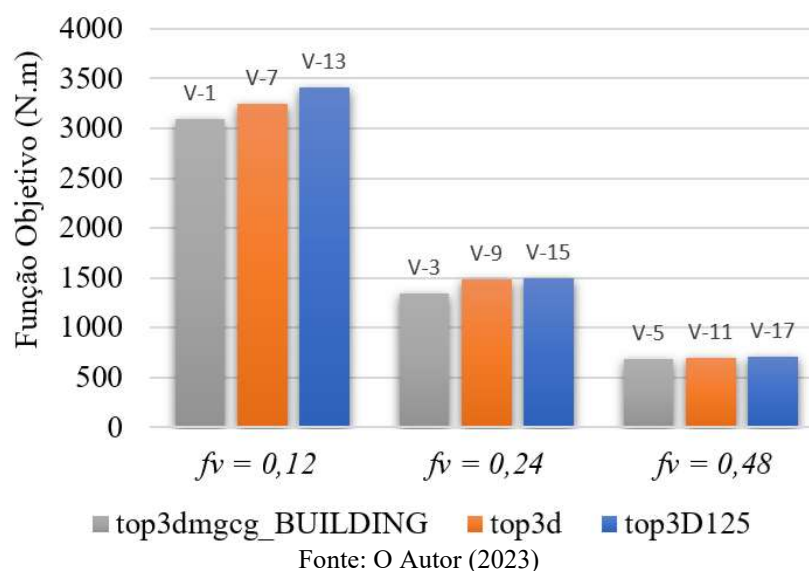
Embora haja grandes discrepâncias em relação ao custo computacional envolvido, a análise quantitativa dos valores da função objetivo e do parâmetro $\bar{h}$ demonstram que há boa concordância entre os resultados dos três códigos. De forma a facilitar a comparação dos dados, as Figuras 47 e 48 apresentam gráficos onde é possível observar o valor da função objetivo dos casos discretizados com a malha M1 e M2, respectivamente.

Figura 47 – Valores da função objetivo dos casos discretizados com a malha M1



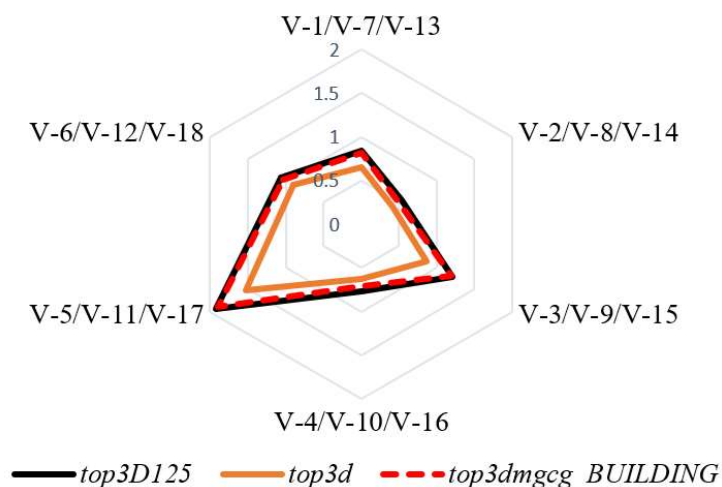
Nota-se que o *top3dmgcg_BUILDING* é o código mais eficiente quando se trata de minimizar a função objetivo tendo resultado no menor valor em comparação com os demais códigos para as frações de volume de 12% e 48%. Em valores médios, o *top3dmgcg_BUILDING* fornece topologias com flexibilidade média 4,58% menores que aquelas obtidas pelo *top3d* e 10,39% menores que aquelas obtidas através do *top3D125*.

Figura 48 – Valores da função objetivo dos casos discretizados com a malha M2



Na Figura 49, apresenta-se uma comparação entre os valores de $\bar{h}$ para os casos com mesma combinação de nível de refinamento de malha e fração de volume, conforme apresentado no Quadro 2.

Figura 49 – Comparação entre os valores de $\bar{h}$ para casos com mesma combinação de nível de refinamento de malha e fração de volume



Fonte: O Autor (2023)

Observa-se, na Figura 49, uma boa concordância dos valores de $\bar{h}$ entre os três códigos analisados, sendo mais expressiva entre o *top3dmgcg_BUILDING* e o *top3D125*, ao ponto das linhas que representam estes códigos se tornarem praticamente coincidentes, dificultando a distinção entre elas. Em valores médios, o *top3dmgcg_BUILDING* apresentou uma diferença relativa de 23,74% em relação ao *top3d* e de 3,12% em relação ao *top3D125*. Este último dado corrobora a análise visual dos Quadros 3 e 4 ao demonstrar o quão próximas são as soluções ótimas destes dois códigos.

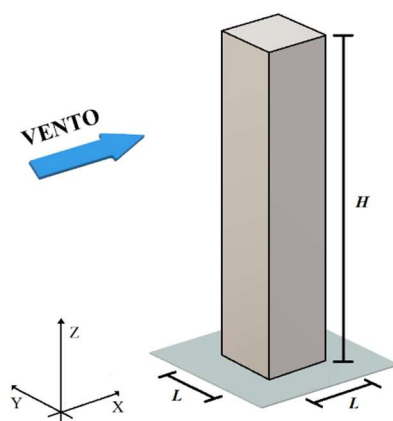
Os resultados aqui analisados e discutidos demonstram que o programa implementado com as alterações para imposição de simetria e repetição de padrões à estrutura final fornece soluções com topologias semelhantes às de outros códigos já consagrados na literatura, além de fornecer menores valores de função objetivo e ter menor custo computacional.

4.4 ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO MÉTODO SIMP

O método SIMP possui diversos parâmetros de entrada, definidos pelo usuário do código, sendo os principais: a fração de volume (f_v), a discretização definida pela quantidade de elementos nas direções x , y e z , definidas como $nelx$, $nely$ e $nelz$, respectivamente, no programa; o raio de filtro de sensibilidades (r_{min}) e as técnicas de controle geométrico empregadas (repetição de padrões e simetria).

Com o objetivo de analisar como esses parâmetros modificam o leiaute final das estruturas e determinar como influenciam a função objetivo, custo computacional e exequibilidade, no presente item é realizado um estudo paramétrico empregando-se o Caso 1, como descrito no Quadro 1 e representado na Figura 50. O Caso 1 consiste em uma edificação isolada com relação de aspecto $1 \times 1 \times 6$ ($L \times L \times H$). O vento incide sobre o edifício em um ângulo de 0° , isto é, perpendicular à fachada frontal, e com velocidade de referência de 11,14 m/s.

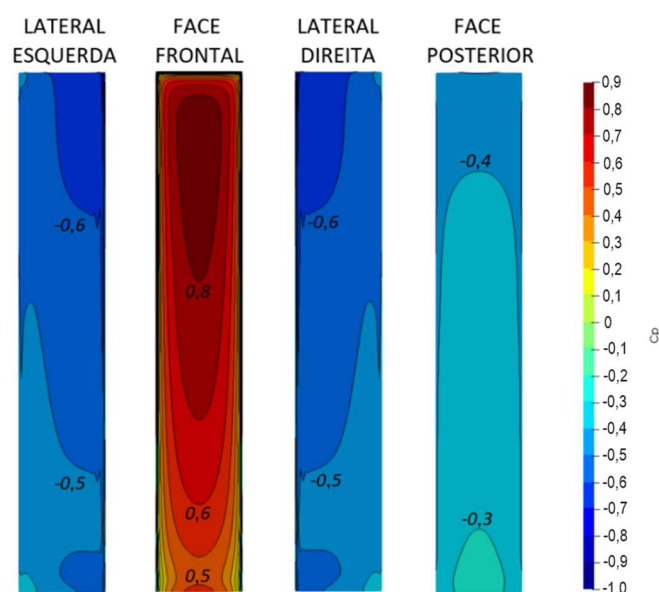
Figura 50 – Representação do Caso 1, empregado no estudo paramétrico



Fonte: O Autor (2023)

As condições de carregamento a que a edificação está sujeita são apresentadas na Figura 51 através da distribuição do coeficiente de pressão (C_p) nas quatro fachadas. Os dados foram obtidos através de simulação numérica no OpenFOAM empregando o modelo de turbulência $k - \omega$ (SST) e um domínio formado por aproximadamente 2,4 milhões de volumes finitos.

Figura 51 – Distribuição dos coeficientes de pressão (C_p) nas fachadas da edificação



Fonte: O Autor (2023)

Para o estudo paramétrico, em cada análise são variados um ou dois parâmetros, do programa *top3dmgcg_BUILDING*, enquanto o restante é mantido fixo. Assim, são realizadas quatro análises: na primeira delas, se avalia a influência das medidas de controle geométrico; na segunda análise são estudadas possíveis combinações entre diferentes fatores de penalização e raio de filtro de sensibilidades; na terceira análise comparam-se os resultados obtidos através de diferentes frações de volume; e por fim, na última análise é estudada a influência do nível de refinamento da malha.

Os valores padrão adotados para cada parâmetro são apresentados na Tabela 11. Esses valores configuram o caso denominado EP-1. Adotou-se a nomenclatura “EP” para os casos deste estudo como abreviação de Estudo Paramétrico.

Tabela 11 – Valores padrão adotados para o estudo paramétrico do *top3dmgcg_BUILDING*

Parâmetro	Valor
p	3,0
r_{min}	2,0
f_v	0,1
Malha	$20 \times 20 \times 120$
Controle Geométrico	xz e yz
Máximo de Iterações	1000
<i>Cut off</i>	0,5

Fonte: O Autor (2023)

4.4.1 Análise da influência dos parâmetros de controle geométrico

A fim de analisar a influência dos parâmetros de controle geométrico sobre a topologia final das estruturas otimizadas, são simulados 9 casos, com os valores padrões adotados na Tabela 11 e as possíveis combinações de repetição de padrões, com 3 ou 6 células unitárias, e simetria em relação aos planos xz e yz a 0° ou 45° , como expresso na Tabela 12.

Tabela 12 – Casos formados por combinações de diferentes parâmetros de controle geométrico

Caso	C. Geométrico
EP-1	xz e yz (0°)
EP-2	--
EP-3	xz (0°)
EP-4	yz (0°)
EP-5	xz e yz (45°)
EP-6	xz e yz (0°) e repetição (3)
EP-7	xz e yz (45°) e repetição (3)
EP-8	xz e yz (0°) e repetição (6)
EP-9	xz e yz (45°) e repetição (6)

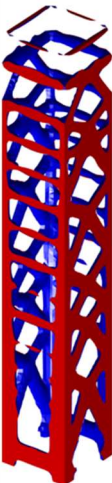
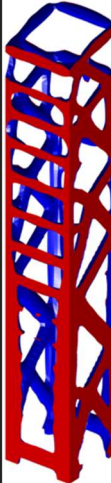
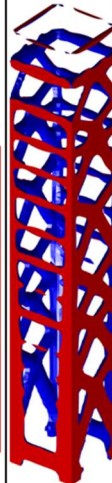
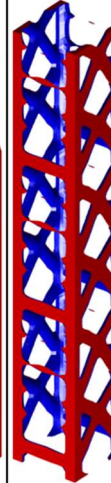
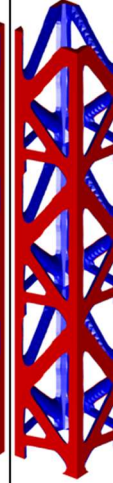
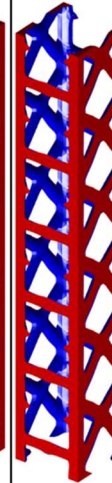
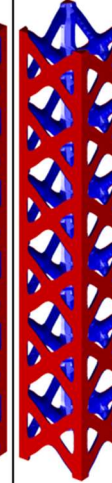
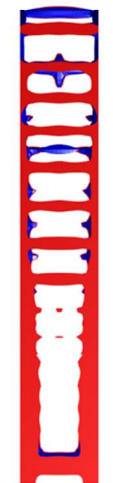
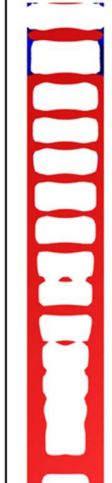
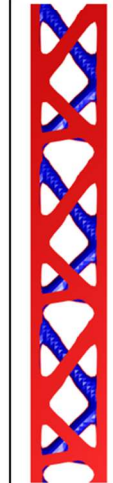
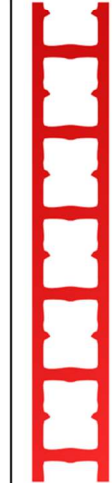
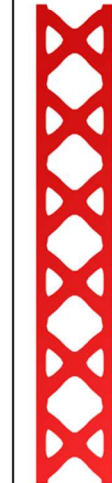
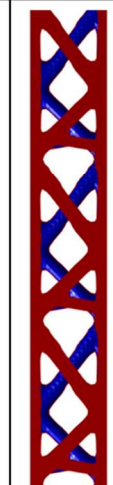
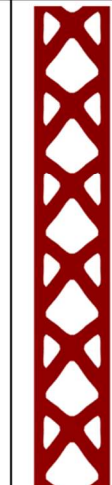
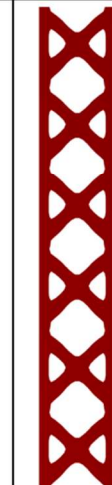
Fonte: O Autor (2023)

No Quadro 5, apresentam-se os resultados dos casos descritos na Tabela 12. São comparadas as topologias da estrutura otimizada, o valor da função objetivo (OBJ), a quantidade de iterações (It) necessárias para se atingir a convergência (10^{-2}), o tempo de processamento adimensionalizado com relação ao caso EP-1 (435,22 s) e o parâmetro $\bar{h}$.

Analisando as estruturas otimizadas percebe-se a influência que o controle geométrico exerce sobre os resultados. Nos casos em que se impõem menos restrições geométricas, como os quatro primeiros casos, é possível observar uma leiaute mais “livre”, isto é, mais complexo, mais heterogêneo, com maior variação na espessura e comprimento das barras, além da presença de barras que não se ligam ao restante da estrutura. Nota-se ainda que não há diferenças perceptíveis entre os casos que fazem uso ou não da simetria em xz (EP-1 e EP4; EP-2 e EP-3). O que pode ser atribuído ao fato de o carregamento, apresentado na Figura 51, ser simétrico nessa direção. Assim, espera-se que a imposição de simetria nessa direção não altere os resultados.

A imposição de simetria apenas em relação aos dois planos rotacionados a 45° graus mudou completamente o padrão topológico da estrutura otimizada. Enquanto todos os demais casos apresentaram estruturas com barras, o caso EP-5 apresentou estrutura em casca, com os elementos de maior densidade se concentrando na superfície externa da estrutura, o que não é desejável em uma estrutura de contraventamento.

Quadro 5 - Resultados obtidos através da variação dos parâmetros de controle geométrico

	EP-1	EP-2	EP-3	EP-4	EP-5	EP-6	EP-7	EP-8	EP-9
OBJ.	2978	2810	2810	2974	4047	4305	4882	4717	5553
lt	81	146	146	83	57	95	154	61	72
t/t_{ref}	1,00	1,83	1,82	1,03	0,71	1,18	1,93	0,76	0,90
$\bar{h}$	0,5466	0,5595	0,5591	0,5461	0,5405	0,5802	0,5831	0,5768	0,5741
VISÃO TRIDIMENSIONAL									
VISTA FRONTAL									
VISTA LATERAL DIREITA									

Fonte: O Autor (2023)

Nos quatro últimos casos do Quadro 5, onde se impõe também a repetição de padrões, é possível observar leiautes mais padronizados e homogêneos. As barras apresentam comprimentos e

espessuras semelhantes e quase não se observam descontinuidades de barras na estrutura principal. Essas características aumentam a simplicidade da estrutura e, conseqüentemente, a sua exequibilidade, o que é um fator crucial no uso de estruturas otimizadas.

Ao analisar os dados qualitativos das simulações, nota-se que não há diferenças significativas nem um padrão a ser observado na quantidade de iterações ou no tempo de processamento. O caso EP-7, que usa simetria em duas direções e repetição de padrões com três células, foi o caso que demandou maior número de iterações e maior tempo de processamento para alcançar a convergência, 154 e 1,93, respectivamente. Logo em seguida, vem o caso EP-2, que não utiliza nenhuma restrição de controle geométrico, tendo necessitado de 146 iterações e 1,93 para atingir a convergência.

Por outro lado, os casos EP-8 e EP-9, que são casos em que se aplica simetria em duas direções e repetição de padrões com seis células, então entre os casos com menor número de iterações e menor tempo de processamento, juntamente com o caso EP-4, que utiliza simetria em apenas uma direção. Dessa forma, não se pode afirmar que a quantidade de restrições geométricas tem relação direta com o tempo de processamento das simulações.

Considerando-se apenas os casos com simetria e repetição de padrões (EP-6 a EP-9), percebe-se que para o mesmo número de repetições a simetria a 45° demanda maior número de iterações e tempo de processamento bem como resulta em um maior valor para a função objetivo. Por sua vez, ao analisar os casos com mesmo tipo de simetria, percebe-se que os casos com mais repetições (EP-8 e EP-9) têm menor tempo de processamento que os casos com apenas 3 repetições (EP-6 e EP-7), no entanto, apresentam maiores valores da função objetivo.

Tratando especificamente da função objetivo, pode-se identificar que quanto mais restrições geométricas forem impostas, maior será o seu valor, sendo a simetria a 45° e a repetição de padrões as restrições responsáveis pelos maiores aumentos. Isso pode ser observado no fato de o caso EP-2, em que não se emprega controle geométrico, apresentar a menor flexibilidade média (2.810,0 N.m), enquanto o caso EP-9, ao qual é imposto simetria a 45° e repetição de padrões com seis células, é o caso com maior valor de flexibilidade média (5.553,0 N.m). A diferença relativa entre esses dois casos foi de 97%.

Este comportamento era esperado, uma vez que as restrições geométricas limitam a liberdade do código na procura pela topologia que forneça a menor função objetivo possível. Dessa forma, entende-se que na busca por uma maior exequibilidade é necessário renunciar uma estrutura mais rígida.

Por fim, o parâmetro $\bar{h}$, que expressa quantitativamente a complexidade da solução, demonstra que os casos em que se aplica repetição de padrão (EP-6 a EP-9) são os casos com estruturas menos complexas e, conseqüentemente, de maior exequibilidade. Os casos EP-6 e EP-7, que empregam repetição de 3 células unitárias, apresentaram os maiores valores entre todos os casos, enquanto o caso EP-5, que emprega apenas simetria em xz e yz a 45° apresentou o valor mais baixo de $\bar{h}$.

4.4.2 Análise da influência do fator de penalização e raio de filtro

Para a análise da influência do raio de filtro e do fator de penalização foram considerados os seguintes valores de $p = \{2, 3 \text{ e } 4\}$ e $r_{min} = \{1,5; 2; 3 \text{ e } 4\}$. As combinações dos valores adotados para esses dois fatores, originam 12 casos, conforme mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Casos formados por combinações de diferentes valores de fator de penalização e raio de filtro

$r_{min} \backslash p$	1,5	2	3	4
2	EP-10	EP-11	EP-12	EP-13
3	EP-14	EP-1	EP-15	EP-16
4	EP-17	EP-18	EP-19	EP-20

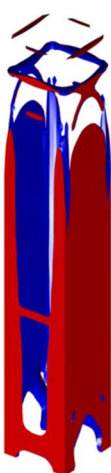
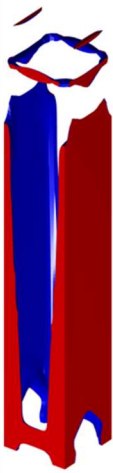
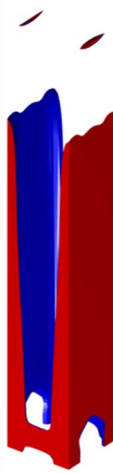
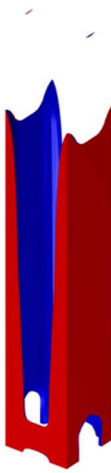
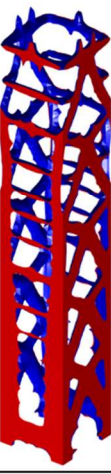
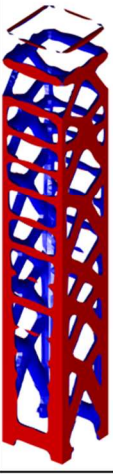
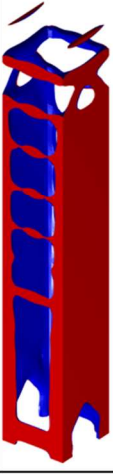
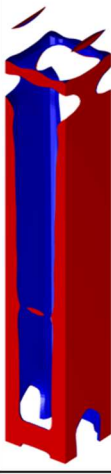
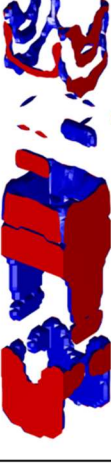
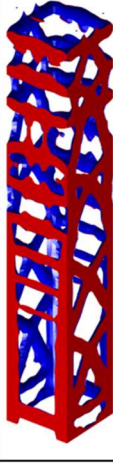
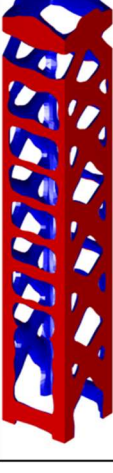
Fonte: O Autor (2023)

No Quadro 6, mostram-se as estruturas otimizadas para todos os casos, o valor da função objetivo, em $N.m$, a quantidade de iterações e o tempo de processamento, adimensionalizado em relação ao caso EP-1, necessários para se atingir a convergência e o parâmetro $\bar{h}$. Os casos EP-14, EP-18, EP-19 e EP-20 não atingiram a convergência antes do limite máximo estabelecido de 1000 iterações. Por sua vez, o caso EP-17 não atingiu a convergência apresentando uma estrutura com descontinuidades.

Nos casos que se emprega o fator de penalização $p = 2$, independentemente do raio de filtro adotado, as estruturas otimizadas não desenvolveram os elementos estruturais lineares esperados para uma estrutura de contraventamento. Já nos casos em que se adotou $p = 3$, os menores valores de raio de filtro levaram a estruturas formadas por elementos estruturais lineares, como os casos EP-1 e EP-14, nos quais se usou $r_{min} = 2,0$ e $r_{min} = 1,5$, respectivamente. Nos casos em que se adotou maiores valores para o raio de filtro foram observadas estruturas formadas por elementos estruturais de superfície. Por fim, nos casos em

que foi adotado o valor de $p = 4$, é possível observar uma boa variedade de resultados: o caso EP-17, em que se adota o menor valor do raio de filtro não foi capaz de fornecer uma solução viável, aumentando assim o valor da função objetivo.

Quadro 6 - Resultados obtidos através da variação do raio de filtro e fator de penalização

$p \backslash r_{min}$	1,5	2	3	4
2	 EP-10 OBJ: 2238 it.: 46 t/t_{ref}: 0,57 $\bar{h}$: 0,5652	 EP-11 OBJ: 2247 it.: 39 t/t_{ref}: 0,49 $\bar{h}$: 0,6804	 EP-12 OBJ: 2317 it.: 39 t/t_{ref}: 0,48 $\bar{h}$: 0,7524	 EP-13 OBJ: 2358 it.: 33 t/t_{ref}: 0,41 $\bar{h}$: 0,7684
3	 EP-14 OBJ: 2788 it.: 1000 t/t_{ref}: 12,64 $\bar{h}$: 0,5221	 EP-1 OBJ: 2978 it.: 81 t/t_{ref}: 1,00 $\bar{h}$: 0,5666	 EP-15 OBJ: 3680 it.: 40 t/t_{ref}: 0,50 $\bar{h}$: 0,6988	 EP-16 OBJ: 4009 it.: 32 t/t_{ref}: 0,40 $\bar{h}$: 0,7553
4	 EP-17 OBJ: $4,695 \times 10^8$ it.: 100 t/t_{ref}: 1,28 $\bar{h}$: 0,6777	 EP-18 OBJ: 7750 it.: 1000 t/t_{ref}: 12,70 $\bar{h}$: 0,5608	 EP-19 OBJ: 6480 it.: 1000 t/t_{ref}: 12,94 $\bar{h}$: 0,6349	 EP-20 OBJ: 6817 it.: 1000 t/t_{ref}: 12,74 $\bar{h}$: 0,7555

Nos casos EP-18 e EP-19, que adotam valores intermediários para o raio de filtro, nota-se a solução com a tradicional estrutura formada por barras. Por sua vez, o valor mais alto do raio de filtro, $r_{min} = 4$, originou a formação de elementos de superfície nos planos paralelos à aplicação das forças e de elementos lineares na direção perpendicular. Cabe destacar ainda que nos casos EP-19 e EP-20 não se observam elementos descontínuos.

Com relação ao número de iterações e tempo de processamento, é possível notar uma tendência de que quanto cresce o fator de penalização, aumenta o número de iterações e o tempo de processamento necessário para que se atinja a convergência. Já em relação ao raio de filtro não se observa nenhum padrão de influência nesses dois parâmetros.

Na Tabela 14, apresentam-se os valores da flexibilidade média, em N.m, para os casos estudados, bem como as médias dos valores em relação ao raio de filtro e ao fator de penalização. Nota-se claramente a tendência de crescimento em seu valor à medida em que se aumenta o valor do fator de penalização, havendo um aumento de 46,8% entre a média dos casos que utilizam $p = 2$ e 3, e uma aumento relativo de 108,6% entre a média dos casos que utilizam $p = 3$ e 4.

Tabela 14 – Valores de função objetivo e valores médios para os casos EP-10 a EP-20

$p \backslash r_{min}$	1,5	2,0	3,0	4,0	Média
2	2238,00	2247,00	2317,00	2358,00	2290,00
3	2788,00	2978,00	3680,00	4009,00	3363,75
4	-	7750,00	6480,00	6817,00	7015,67
Média	2513,00	4325,00	4159,00	4394,67	

Fonte: O Autor (2023)

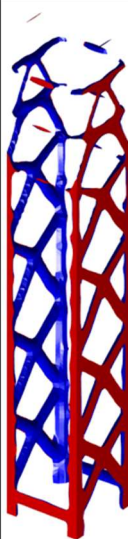
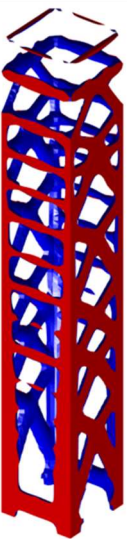
Por outro lado, essa tendência não é observada em relação aos valores adotados para o raio de filtro. Percebe-se, um aumento expressivo entre a média dos casos que adotam $r_{min} = 1,5$ e $r_{min} = 2,0$, de 72,1%, mas logo em seguida há uma redução relativa de 3,8% entre a média dos casos que adotam $r_{min} = 2,0$ e 3,0, e uma aumento relativo de apenas 5,6% entre a média dos casos que adotam $r_{min} = 3,0$ e 4,0.

Em função dos dados apresentados, pode-se observar que os melhores resultados foram fornecidos pelos casos EP-1 e EP-14. Ambos consideraram $p = 3,0$, apresentam estruturas com baixos valores de flexibilidade média, suas topologias apresentam leiaute formado por barras com poucos elementos separados da estrutura principal.

4.4.3 Análise da influência da fração de volume

Para a análise da influência da fração de volume consideram-se três valores: $f_v = \{5\%, 10\% \text{ e } 15\%\}$. No Quadro 7, apresentam-se, considerando os valores padrões definidos na Tabela 11, as três estruturas otimizadas, o valor da função objetivo, em N.m, a quantidade de iterações e o tempo de processamento, adimensionalizado em relação ao caso EP-1, necessários para se atingir a convergência, e o parâmetro $\bar{h}$.

Quadro 7 - Resultados obtidos através da variação da fração de volume

f_v		5%	10%	15%
Vista				
VISÃO TRIDIMENSIONAL		EP-21		EP-22
		OBJ: 10210	OBJ: 2978	OBJ: 2012
		it.: 1000	it.: 81	it.: 208
		t: 12,62	t: 1,00	t: 2,71
		$\bar{h}$: 0,4355	$\bar{h}$: 0,5666	$\bar{h}$: 0,6802

Fonte: O Autor (2023)

Constata-se no Quadro 7 a formação de estruturas com barras mais espessas na medida que aumenta o valor da fração de volume. Também, se percebe, que a variação desse parâmetro não resultou em diferentes topologias, as três soluções são semelhantes.

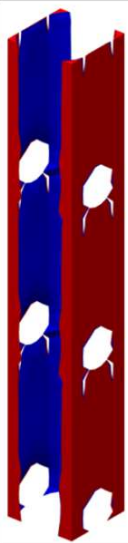
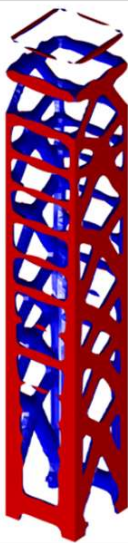
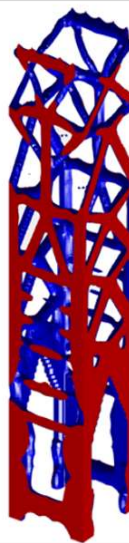
Como esperado, os casos com maior fração de volume apresentam menor flexibilidade média, afinal, quando maior o volume de material de uma estrutura, maior será a sua rigidez. Entre os casos EP-21 e EP-22 há um aumento de 200% no valor da fração de volume porém, existe uma diferença relativa de 407,5% no valor da flexibilidade média. Já entre os casos EP-1 e EP-22, há um aumento de 50% na fração de volume e uma diferença relativa de 48% entre os valores da função objetivo. Esses dados demonstram que há uma tendência de que maiores valores de fração de volume tenham cada vez menos influência na redução da função objetivo.

Com relação ao tempo de processamento, o caso EP-21 não atingiu a convergência antes do limite estabelecido de 1000 iterações, em virtude disso, seu tempo de processamento foi 12,62 vezes maior que o do caso EP-1.

4.4.4 Análise da influência do nível de refinamento de malha

Para a análise da influência do nível de refinamento de malha foram adotadas três malhas: M1, com 6.000 elementos ($10 \times 10 \times 60$), M2 com 48.000 elementos ($20 \times 20 \times 120$) e M3 com 162.000 elementos ($30 \times 30 \times 180$). Considerando os valores padrões definidos na Tabela 11, no Quadro 8 mostram-se as três estruturas otimizadas, o valor da função objetivo, em N.m, a quantidade de iterações e o tempo de processamento, adimensionalizado em relação ao caso EP-1, e o parâmetro $\bar{h}$.

Quadro 8 - Resultados obtidos através da variação do nível de refinamento da malha

Malha	10x10x60	20x20x120	30x30x180
Visão Tridimensional			
	EP-23	EP-1	EP-24
	OBJ: 21070	OBJ: 2978	OBJ: 2537
	it.: 204	it.: 81	it.: 406
	t: 0,47	t: 1,00	t: 19.12
	$\bar{h}$: 0,4224	$\bar{h}$: 0,5666	$\bar{h}$: 0,6845

Fonte: O Autor (2023)

Observa-se que o refinamento da malha possui forte influência sobre a topologia das estruturas.. A malha M1, menos refinada, resulta numa estrutura sem barras contendo material apenas nas fachadas laterais. Também resultou no maior valor da função objetivo, sendo 707,52% maior que o valor obtido pelo caso EP-1 e 830,51% maior que o valor obtido pelo caso EP-24.

Percebe-se que quanto maior o nível de discretização do domínio, menor será o valor da função objetivo e maior o tempo de processamento. A malha M3 precisou de 19,12 vezes mais tempo

de processamento em comparação com a malha M2. Considerando que o tempo de processamento do caso EP-1 foi de 435,22 s, resulta num tempo de processamento de 8.321,41 s, ou 2 h 18 min 41 s.

4.4.5 Resultados do estudo paramétrico

A necessidade de se realizar um estudo paramétrico surge da grande quantidade de parâmetros envolvidos no processo de otimização topológica. Dessa forma, o estudo paramétrico buscou determinar e quantificar a influência de cada um desses fatores nos resultados finais

Considerando que um bom resultado consiste numa simulação com baixo tempo de processamento, baixo valor da função objetivo e topologia simples, ou seja, formada por elementos lineares e sem descontinuidades nas barras. Com base nos resultados obtidos, é possível indicar que o conjunto de valores que satisfazem essas condições, e que será adotado na simulação dos 16 casos principais do presente estudo são os dados na Tabela 15, que incluem a repetição de três células unitárias ao longo da direção z e simetria em relação aos planos xz e yz .

Tabela 15 – Valores padrões adotados para os 16 casos principais do presente estudo após realizada a análise paramétrica

Parâmetro	Valor
p	3,0
r_{min}	2,0
f_v	0,1
Malha	$20 \times 20 \times 120$
Controle Geométrico	xz, yz e repetição (3)

Fonte: o Autor (2023)

5 RESULTADOS

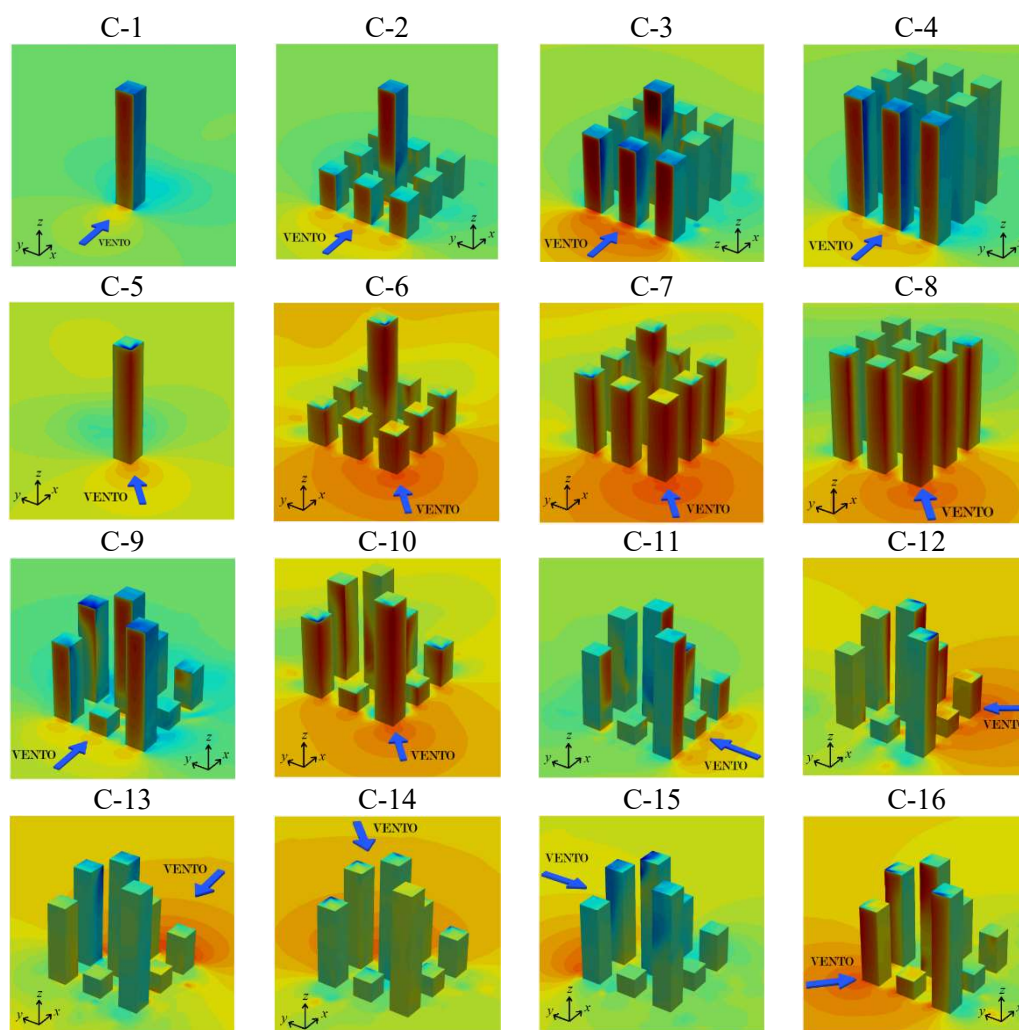
Inicialmente, neste capítulo, são analisados os resultados das simulações de CFD através do OpenFOAM, discutindo como as diferentes configurações geométricas da vizinhança e o ângulo de incidência do vento influenciam as cargas aerodinâmicas impostas à edificação principal. Na segunda parte, apresentam-se os resultados da otimização topológica, obtidos através do programa *top3dmgcg_BUILDING*, considerando as diferentes condições de carregamento. Por fim, analisa-se como as diferentes técnicas de controle de leiaute influenciam os resultados da otimização topológica.

5.1 INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA E DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO NAS CARGAS IMPOSTAS À EDIFICAÇÃO

A distribuição do coeficiente de pressão médio (C_p) nas fachadas da edificação principal para os 16 casos analisados nesta pesquisa são apresentados na Figura 52 e, com maior riqueza de detalhes, no Apêndice A. Os resultados apresentados na Figura 52 não seguem um padrão para a escala de cores, pois sua escolha foi feita separadamente para cada caso a fim de se obter a melhor visualização possível do problema. No Apêndice A, entretanto, a distribuição do C_p em cada fachada é apresentada seguindo uma mesma escala de cores, a fim de facilitar a compreensão e comparação dos resultados.

Inicialmente, os oito primeiros casos analisam a edificação isolada e com vizinhanças da mesma altura para o ângulo de incidência 0° (casos C-1 até C-4) e 45° (casos C-5 até C-8). Em seguida, os oito últimos casos analisam a edificação cercada por prédios de diferentes alturas para oito diferentes ângulos de incidência do vento. A descrição detalhada dos casos é feita no item 3.1. Em função dos resultados, podem-se estabelecer algumas relações entre a vizinhança, o ângulo de incidência do vento e as cargas aerodinâmicas na edificação principal.

Figura 52 – Distribuição do coeficiente de pressão médio (C_p) nas fachadas dos 16 casos analisados



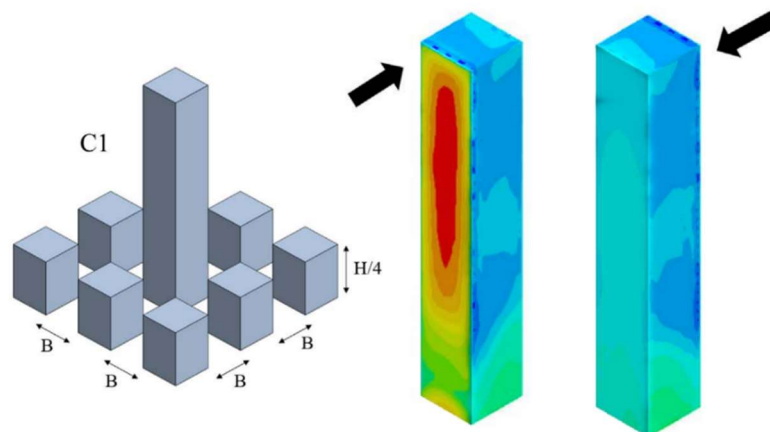
Fonte: O Autor (2023)

Nos casos da edificação principal isolada (C-1 e C-5), observa-se uma distribuição simétrica do C_p em relação à direção longitudinal do escoamento, o que era esperado uma vez que as condições de contorno e a geometria do problema também são simétricas nessa mesma direção. Por outro lado, nos casos em que existem edificações vizinhas, observa-se uma forte assimetria nas regiões localizadas abaixo da altura máxima da vizinhança enquanto acima dessa região a distribuição de pressões tende a continuar aproximadamente simétrica.

A existência das edificações vizinhas causa a perturbação do escoamento, que assume uma topologia complexa e induz a assimetria nas variáveis. De fato, esse comportamento também é visto tanto em estudos experimentais, como pode ser visto nos vários testes conduzidos pela TPU, quanto em estudos numéricos conduzidos com diferentes modelos de turbulência. Por exemplo, no trabalho conduzido por Elshaer *et al.* (2017) simula-se o escoamento do vento em um ambiente urbano muito similar ao analisado nesta pesquisa através da metodologia LES. Na

Figura 53 mostra-se a distribuição das pressões sobre as fachadas da edificação. Percebe-se que existe uma boa semelhança com os resultados obtidos no caso C-2.

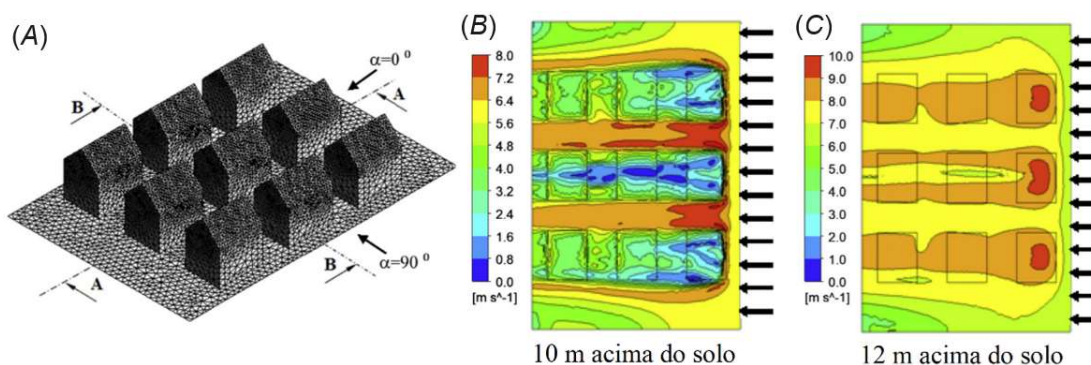
Figura 53 – Simulações conduzidas por Elshaer *et al.* (2017) apresentando distribuição assimétrica do coeficiente de pressão sobre as fachadas da edificação estudada



Fonte: Elshaer *et al.* (2017)

Ledo, Kosasih e Cooper (2011) empregaram o modelo de turbulência $k - \omega$ SST para simular o escoamento em ambientes suburbanos com diferentes ângulos de incidência do vento. As características geométricas do ambiente analisado, ver Figura 54.A, configuram problemas simétricos em relação à direção longitudinal do escoamento. Apesar disso, os resultados observados, referentes à magnitude da velocidade média acima dos telhados, apresentam um comportamento levemente assimétrico.

Figura 54 - Simulações conduzidas por Ledo, Kosasih e Cooper (2011) apresentando distribuição assimétrica da velocidade a (b) 10 metros e (c) 12 metros acima do solo

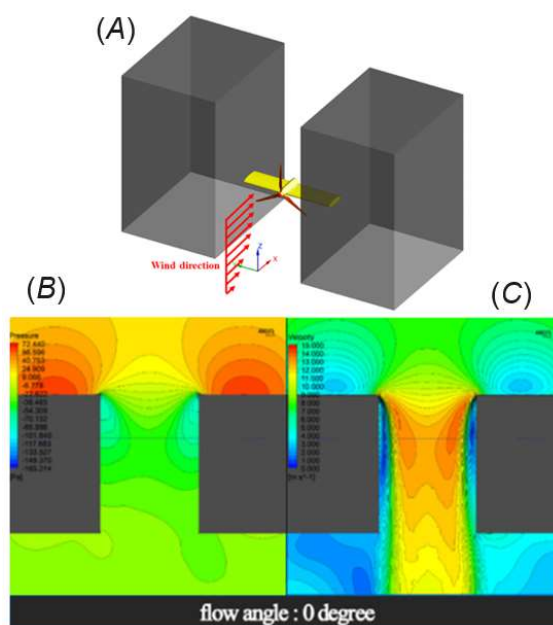


Fonte: Ledo, Kosasih e Cooper (2011)

Pode-se citar ainda o trabalho de Heo *et al.* (2016), onde investiga-se numericamente a eficiência da instalação de uma turbina eólica entre duas edificações, ver Figura 55. No estudo, emprega-se o modelo de turbulência $k - \omega$ SST. Os autores simularam o escoamento do vento em torno das edificações com e sem a presença da torre eólica. Nesse último caso, onde as

condições geométricas são simétricas, os resultados também apresentam assimetria na distribuição de pressão e magnitude da velocidade.

Figura 55 - Simulações conduzidas por Heo *et al.* (2016) apresentando distribuição assimétrica da (b) pressão e (c) magnitude da velocidade



Fonte: Heo *et al.* (2016)

Observa-se, através de estudos numéricos e experimentais presentes na literatura, que as condições geométricas de um problema não implicam, necessariamente, em resultados simétricos quanto à distribuição de pressões e magnitude da velocidade média do vento, devido à complexidade que o escoamento pode assumir em tais casos. Tal complexidade é demonstrada através das linhas de corrente, que indicam a direção do movimento do fluido no escoamento, apresentadas no Apêndice D. Nos casos C-1 e C-5, onde a edificação principal está isolada, é possível observar uma distribuição simétrica do escoamento do vento.

Em função dos resultados, pode-se concluir que independentemente da simetria adotada, quanto menor for a altura da vizinhança, maiores serão as cargas impostas na fachada à barlavento da edificação principal, pois as edificações da vizinhança, mais especificamente as que se encontram à montante da edificação principal, cumprem o papel de uma barreira que “protege” a edificação principal ao absorver grande parte da energia cinética que lhe seria transferida.

Nos casos com mesma geometria, o ângulo de incidência do vento tem forte influência sobre as cargas, onde a incidência do vento a 0° acaba por impor maiores pressões à fachada barlavento que a incidência a 45° . Esse comportamento se deve ao fato de, a 0° , a direção longitudinal do escoamento ser perpendicular à fachada barlavento das edificações, fazendo com que elas recebam diretamente as cargas do vento. Consequentemente, quando o vento

incide a 45°, e as edificações não recebem de maneira direta as cargas do vento, observa-se que a vizinhança não reduz as pressões no prédio principal de maneira tão efetiva.

Esse comportamento pode ser observado ao comparar os casos C-4 e C-8. No caso C-4 percebe-se que a vizinhança reduz as altas pressões impostas à edificação principal, de maneira que a mesma apenas apresenta valores negativos em suas quatro faces devido a estar na região da esteira. Por outro lado, no caso C-8, a simples mudança da direção do vento de 0° para 45°, não reduziu de maneira significativa as pressões sobre a fachada principal, ao ponto de se observar a presença de regiões com valores de C_p superiores a 0,40.

Com relação aos modelos nos quais a geometria do ambiente urbano não é uniforme e varia-se a direção de incidência do vento, casos C-9 até C-16, resulta impossível achar um padrão na distribuição da pressão devido à complexidade do escoamento. Os casos em que o vento atinge a edificação principal diretamente, isto é, sem a interferência direta de uma edificação vizinha, são os casos que apresentam valores mais elevados do coeficiente de pressão médio (casos C-9, C-11 e C-12). Por sua vez, o caso C-10 apresenta os menores valores de C_p na fachada de barlavento. Isto acontece, em virtude de a edificação E, a mais alta entre as edificações vizinhas, estar a montante e alinhada com a direção do escoamento.

Na Tabela 16, apresentam-se os coeficientes aerodinâmicos de momento (C_M) e de arrasto (C_D) na edificação principal. Os coeficientes são dados em função das componentes x e y .

Tabela 16 – Coeficientes aerodinâmicos dos 16 casos principais

Casos	C_{Dx}	C_{Dy}	C_D	C_{Mx}	C_{My}	C_M
C-1	0,94	0,00	0,94	0,00	0,51	0,51
C-2	0,76	0,01	0,76	0,00	0,46	0,46
C-3	0,39	0,04	0,39	0,01	0,30	0,30
C-4	-0,18	-0,01	0,18	-0,01	-0,09	0,09
C-5	0,77	0,77	1,10	-0,42	0,42	0,59
C-6	0,91	0,69	1,14	0,41	0,44	0,60
C-7	0,62	0,50	0,79	0,28	0,36	0,45
C-8	0,30	0,33	0,44	0,15	0,15	0,22
C-9	0,90	0,08	0,90	0,04	0,48	0,49
C-10	0,17	0,02	0,17	-0,01	0,06	0,06
C-11	0,01	0,91	0,91	0,50	0,00	0,50
C-12	-0,63	0,86	1,07	0,48	-0,36	0,60
C-13	-0,67	-0,12	0,68	-0,04	-0,43	0,43
C-14	-0,67	-0,61	0,91	-0,32	-0,35	0,48
C-15	-0,07	-0,29	0,30	-0,18	0,01	0,18
C-16	0,72	-0,42	0,83	-0,23	0,40	0,46

Fonte: O Autor (2023)

Percebe-se na Tabela 16 que nos exemplos onde o escoamento incide sobre as edificações a 0° , casos C-1 a C-4, o coeficiente de arrasto existe apenas na direção x , enquanto na direção y ele é praticamente nulo. O coeficiente de arrasto atinge seu valor máximo no caso C-1, ou seja, no caso do prédio isolado, e diminui na medida em que se aumenta a altura das edificações vizinhas. O mesmo comportamento do coeficiente de arrasto é observado no coeficiente de momento.

Nos casos C-5 a C-8 o vento incide a 45° , portanto, observa-se a existência dos coeficientes aerodinâmicos nas duas direções. Os coeficientes apresentam maiores valores para o caso isolado e reduzem seu valor ao se aumentar a altura da vizinhança. A mesma tendência foi observada para o escoamento a 0° , entretanto, os valores dos coeficientes são maiores nos casos de 45° .

Percebe-se, que a maior influência da vizinhança sobre os coeficientes aerodinâmicos acontece para o escoamento a 0° em comparação com os casos a 45° . Por exemplo, o caso C-1 apresenta os maiores valores de C_D (0,94) e C_M (0,51) enquanto os menores valores são observados no caso C-4 com $C_D = 0,18$ e $C_M = 0,09$. Ou seja, a presença de vizinhança originou uma redução de 80,85% no coeficiente de arrasto (C_D) e de 82,35% no coeficiente de momento (C_M). Por sua vez, nos casos C-5 e C-8 (casos em que o vento incide a 45°), observa-se que a vizinhança originou uma redução máxima de 61,40% no C_D e de 63,33% no C_M .

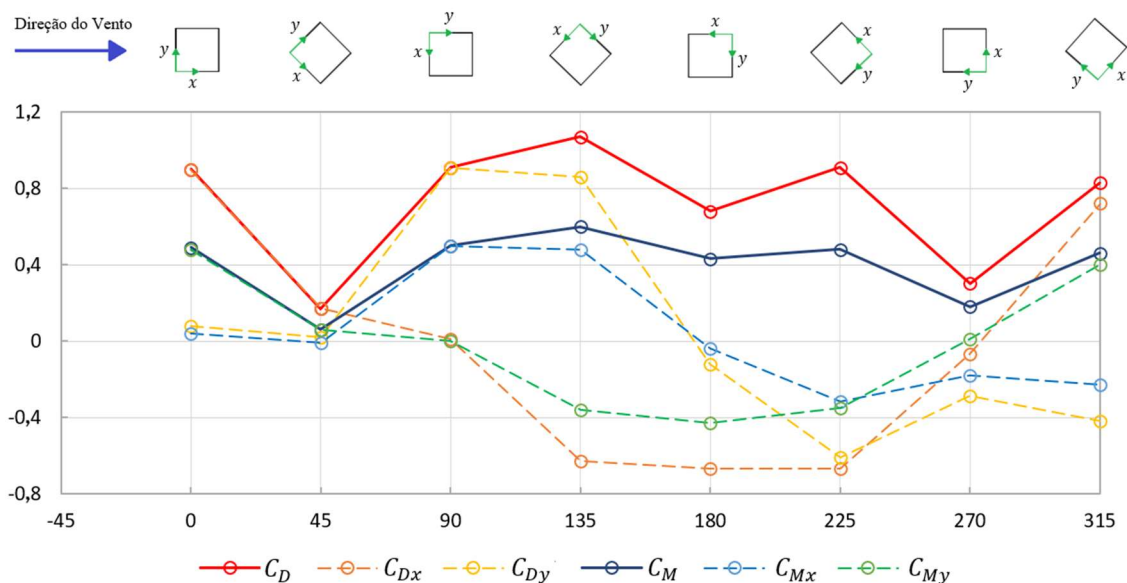
Em termos de valores médios, constata-se que nos casos com incidência a 0° a média dos coeficientes aerodinâmicos foi de 0,57 (C_D) e 0,34 (C_M). Já nos casos com incidência do vento a 45° , a média dos coeficientes aerodinâmicos foi de 0,87 (C_D) e 0,47 (C_M).

Em relação aos casos C-9 a C-16, observa-se que os maiores valores de arrasto e momento (1,07 e 0,60, respectivamente) foram alcançados no caso C-12. Nesse caso, o vento não incide de maneira perpendicular sobre as fachadas da edificação e as edificações vizinhas à montante são baixas, causando pouca interferência no escoamento. Em contrapartida, o caso C-10 apresenta os menores valores nos coeficientes de arrasto e de momento, 0,17 e 0,06, respectivamente. A edificação principal, fica na esteira da edificação E, a mais alta entre as edificações vizinhas.

A diferença relativa entre os valores mínimo e máximo dos coeficientes de arrasto e de momento foi de 529,42% e 900%, respectivamente. Isto, demonstra o quão grande pode ser a variação dos esforços impostos a uma edificação em ambiente urbano apenas pela mudança de direção do vento.

Os dados apresentados na Tabela 16, referentes aos casos C-9 a C-16, são mostrados como um gráfico na Figura 56. Pode-se observar o comportamento dos coeficientes aerodinâmicos e suas componentes em relação ao ângulo de incidência do escoamento em torno da edificação principal.

Figura 56 – Comportamento dos coeficientes aerodinâmicos e suas componentes sob diferentes cenários de escoamento do vento



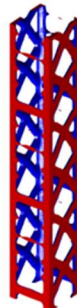
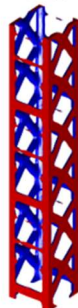
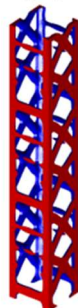
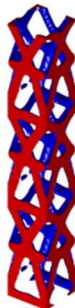
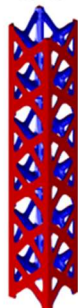
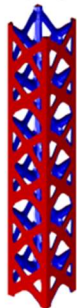
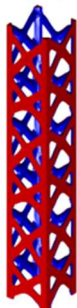
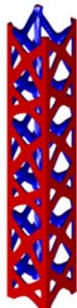
Fonte: O Autor (2023)

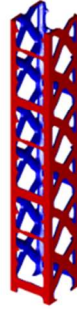
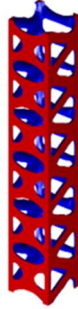
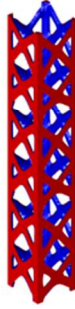
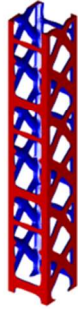
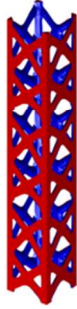
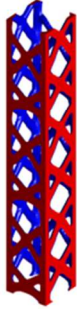
Nota-se que nos casos para $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270° , uma das componentes do coeficiente aerodinâmico sempre se aproxima do zero. As componentes dos coeficientes aerodinâmicos com valores negativos indicam que as forças associadas são opostas à direção do escoamento.

5.2 INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Os resultados da otimização topológica dos 16 casos descritos no Quadro 1 do item 3.1, são apresentados no Quadro 9 onde são apresentadas, além das vistas tridimensionais, os dados referentes à função objetivo OBJ , quantidade de iterações it , tempo de processamento t , e parâmetro $\bar{h}$. Todos os casos foram simulados com o programa *top3dmgcg_BUILDING* empregando-se parâmetros selecionados após o estudo paramétrico, conforme dado na Tabela 15. Os dados apresentados no Quadro 9 são apresentados também no Apêndice B, onde pode-se observar com maior riqueza de detalhes, além das vistas tridimensionais, as fachadas frontal e lateral direita de cada caso.

Quadro 9 - Estruturas Otimizadas com imposição de simetria em xz e yz a 0° e repetição de padrões com 3 células

Vista em Perspectiva	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8
								
OBJ	4305	3869	2023	366	7263	7014	4543	1120
it	95	92	324	208	87	60	91	92
t	1,0	1,04	3,52	2,27	0,92	0,68	1,01	0,98
$\bar{h}$	0,5666	0,5842	0,5880	0,5902	0,5572	0,5621	0,5590	0,5663

Vista em Perspectiva	C-9	C-10	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15	C-16
								
OBJ	3870	146,5	4236	7357	3557	4643	1046	4307
it	92	253	70	124	98	63	226	82
t	0,96	22,81	0,79	1,35	1,03	0,69	2,45	0,87
$\bar{h}$	0,5900	0,6016	0,5939	0,5490	0,5866	0,5586	0,5801	0,5626

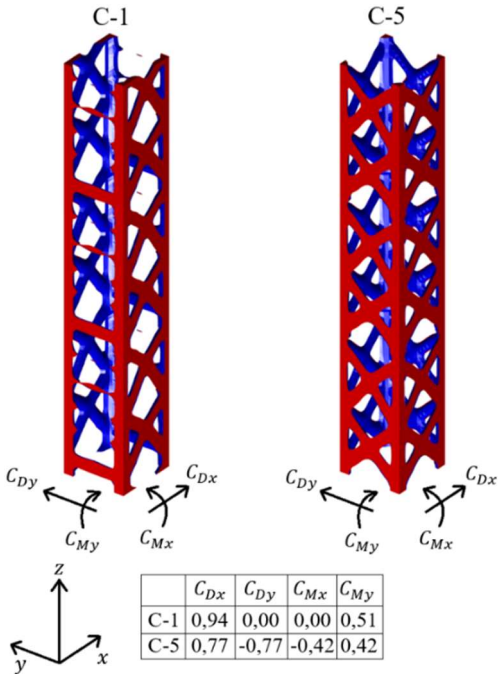
Fonte: O Autor (2023)

Analisando o Quadro 9, pode-se notar que nos casos em que o vento incide de maneira perpendicular às fachadas da edificação principal obtém-se um padrão em que as fachadas a barlavento e sotavento apresentam barras dispostas na horizontal, enquanto as demais fachadas apresentam barras diagonais. Já nos casos em que o vento incide de maneira diagonal ($\alpha = 45^\circ$, 135° , 225° ou 315°) à edificação, nota-se um padrão em que todas as fachadas apresentam barras diagonais. As únicas exceções são os casos C-4 e C-10, ou seja, quando a edificação principal fica na esteira da edificação vizinha com a mesma altura e portanto, apresenta os menores valores dos coeficientes aerodinâmicos.

A topologia da estrutura está diretamente relacionada com os valores dos coeficientes aerodinâmicos: a disposição diagonal das barras tende a surgir nas fachadas paralelas à direção do arrasto e de momento quando estes apresentam valores significativos. Essa relação pode ser

melhor entendida observando-se a Figura 57 que traz os casos C-1 e C-5 com os valores de seus respectivos coeficientes aerodinâmicos.

Figura 57 – Relação entre a disposição das barras e os coeficientes aerodinâmicos



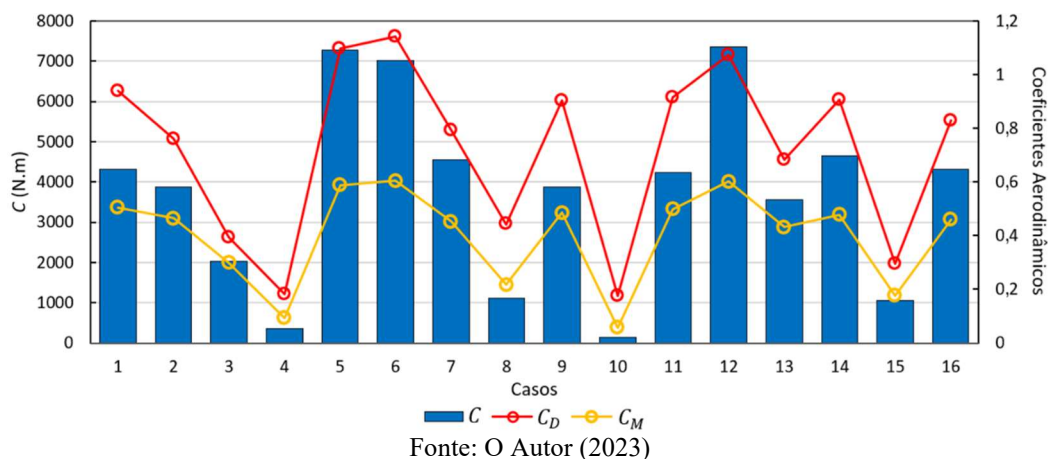
Fonte: O Autor (2023)

No caso C-1, as cargas do vento atuam na direção x , portanto, o coeficiente de arrasto assume um valor significativo ($C_{Dx} = 0,94$) assim como a componente do momento ($C_{My} = 0,51$) que gira em torno do eixo y mas age na direção x . Em virtude disso, observa-se, nas fachadas laterais, que as barras se dispõem na diagonal. Por outro lado, nas fachadas barlavento e sotavento, paralelas à direção y , observa-se valores nulos tanto de arrasto quanto de momento, resultando numa topologia com barras dispostas na horizontal. Já no caso C-5, os coeficientes aerodinâmicos são diferentes de zero em todas as direções, portanto, a topologia otimizada apresenta barras diagonais em todas as fachadas.

Percebe-se que a imposição do controle geométrico de repetição de um padrão (célula unitária) por três vezes ao longo do eixo z gerou em todas as fachadas 6 pares de barras dispostas na diagonal e se cruzam, com exceção dos casos C-4 e C-10. Pode-se concluir que, independentemente da vizinhança ou do ângulo de incidência do vento, a quantidade de barras diagonais por fachada será sempre a mesma. Por sua vez, as barras horizontais, não mostram uma tendencia definida uma vez que há fachadas que apresentam 6 barras horizontais (C-2, por exemplo) e outras são formadas por 9 barras horizontais (C-15).

Na Figura 58, apresenta-se um gráfico com os coeficientes de arrasto e momento e o valor da função objetivo (flexibilidade média) das estruturas otimizadas.

Figura 58 – Relação entre função objetivo (C) e coeficientes de arrasto (C_D) e momento (C_M)

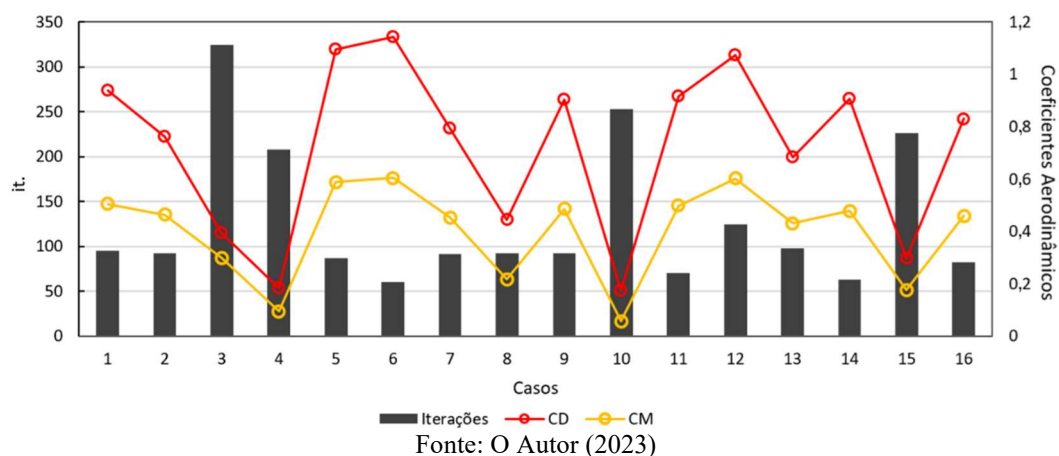


Observa-se que a flexibilidade média de cada estrutura está diretamente relacionada aos esforços aplicados, onde maiores esforços resultam em maiores valores de flexibilidade média. Os menores valores de função objetivo foram alcançados nos casos C-4 (366 N.m) e C-10 (146,5 N.m), casos estes em que a edificação principal sofre interferência direta de edificações vizinhas de mesma altura, já que está localizada na região da esteira. Os maiores valores da função objetivo foram obtidos nos casos C-5 (7263 N.m), C-6 (7014 N.m) e C-12 (7357 N.m), casos em que o vento incide diagonalmente sobre as edificações ($\alpha = 45^\circ$, 45° e 135° , respectivamente) e não há edificações vizinhas altas causando interferência direta no fluxo do ar.

O valor médio da função objetivo nos casos C-1 a C-4 (casos com $\alpha = 0^\circ$) foi de 2.640,75 N.m. Já para os casos C-5 a C-8 (casos com $\alpha = 45^\circ$) a média foi de 4.985,00 N.m. Dessa forma, para um ambiente urbano com edificações vizinhas de altura padronizada, a mudança na direção do vento provocou uma diferença, em valores médios, de 88,77%. Já para os casos C-9 a C-16 a média foi de 3.645,31 N.m e a diferença entre os valores mínimo e máximo foi de 4.921,84%, o que demonstra que, em uma vizinhança formada por prédios de diferentes alturas, a mudança da direção do vento pode implicar em grandes mudanças.

No gráfico da Figura 59, mostram-se as iterações e os coeficientes aerodinâmicos para cada caso. Em média, foram necessárias aproximadamente 129 iterações para que as simulações com o programa *top3dmgcg_BUILDING* atinssem o critério de convergência, sendo C-3 o caso com o maior número de iterações (324) e C-6 o caso com o menor número (60).

Figura 59- Relação entre quantidade de iterações (it) e coeficientes de arrasto (C_D) e momento (C_M)



Pode-se observar que os casos que apresentam os menores esforços necessitam de um maior número de iterações para alcançar a convergência, com os 4 casos com maior número de iterações (C-3, C-4, C-10 e C-12) necessitando, em média, aproximadamente 2,9 vezes mais iterações que os demais casos. Em geral, os casos com maiores esforços sobre a estrutura tendem a atingir a convergência de forma mais rápida do que os casos com menores esforços.

Na Tabela 17, são comparadas as médias dos coeficientes aerodinâmicos com a quantidade de iterações dos quatro casos com maior e menor número de iterações. Observa-se que os casos com menor número de iterações têm coeficiente de arrasto e momento médios de 0,95 e 0,51, respectivamente. Para esses casos, foram necessárias, em média, apenas 69 iterações para alcançar a convergência. Por outro lado, os casos que necessitaram de mais iterações (253 em média) apresentam coeficiente de arrasto e momento médios de 0,26 e 0,16, respectivamente.

Tabela 17 – Comparação entre as médias dos coeficientes aerodinâmicos e número de iterações dos casos com maior e menor número de iterações

	Caso	it.	C_D	C_M
Casos com menor número de iterações	C-6	60	1,14	0,60
	C-14	63	0,91	0,48
	C-11	70	0,91	0,50
	C-16	82	0,83	0,46
	Média	69	0,95	0,51
Casos com maior número de iterações	C-4	208	0,18	0,09
	C-15	226	0,30	0,18
	C-10	253	0,17	0,06
	C-3	324	0,39	0,30
	Média	253	0,26	0,16

Fonte: O Autor (2023)

Esse comportamento pode ser explicado principalmente pelo fato de cargas maiores geralmente facilitarem o processo de otimização através de uma distribuição do material mais definida nas regiões mais solicitadas. No entanto, nas estruturas sujeitas a cargas menores, não há muita diferença entre as áreas mais e menos solicitadas, exigindo um maior esforço do código para achar a distribuição ótima de material no domínio estendido.

O tempo de processamento é diretamente proporcional à quantidade de iterações. Ao dividir o tempo de processamento de cada caso (medido em segundos) pela quantidade de iterações necessárias para se atingir a convergência, obteve-se um tempo médio de 5,61 s por iteração, com desvio padrão de 0,145 s. Os dados referentes ao tempo de processamento apresentados nos Quadros B.1 e B.2 do Apêndice B foram adimensionalizados em relação ao caso C-1 (8 min 35 s).

Por fim, com relação ao parâmetro $\bar{h}$, observa-se um valor médio de 0,5741 com desvio padrão de 0,015, o que demonstra que todas as topologias resultantes apresentam um grau de complexidade bastante aproximado. Os casos com maior e menor valor de $\bar{h}$ foram os casos C-10 e C-12, respectivamente, com diferença relativa de 9,5% entre si.

5.3 INFLUÊNCIA DAS TÉCNICAS DE CONTROLE GEOMÉTRICO

No item anterior, para o processo de otimização foram empregados os parâmetros definidos no item 4.4.5, ou seja, repetição de 3 células ao longo do eixo z e imposição de simetria em xz e yz a 0° . Porém, para enriquecer a análise de OT, neste item serão consideradas outras técnicas de controle de leiaute. Para tanto, são analisados os resultados obtidos através da combinação da repetição de 3 e 6 células unitárias ao longo do eixo z e imposição de simetria em xz e yz tanto a 0° quanto 45° . As vistas das estruturas otimizadas, bem como os valores da função objetivo, número de iterações, tempo de processamento e parâmetro $\bar{h}$, são apresentados no Apêndice C.

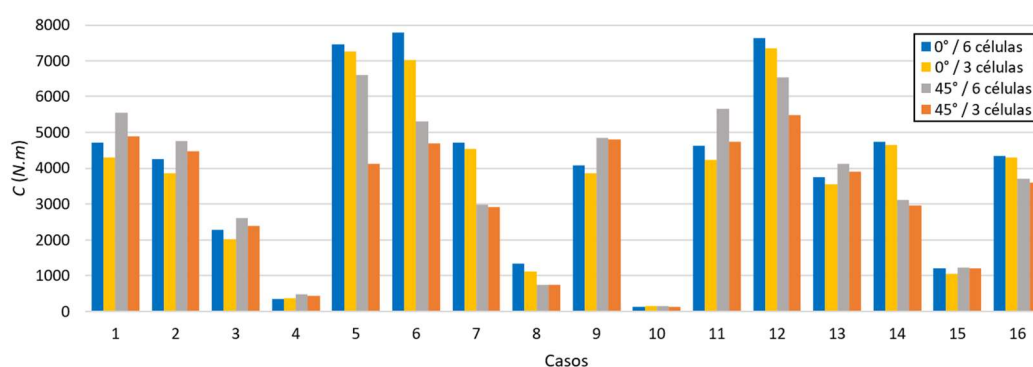
Através dos resultados apresentados no Apêndice C pode-se notar que, ao impor simetria a 0° , a quantidade de repetições ao longo do eixo z tem pouca influência sobre os resultados. Em quase todos os casos, a estrutura otimizada com repetição de 3 células é praticamente igual à estrutura otimizada com repetição de 6 células. As exceções são os casos C-4, C-8 e C-15, que têm em comum o fato de estarem sujeitos a baixos esforços. Por sua vez, nos casos em que se impôs simetria a 45° , observa-se que a variação da quantidade de células repetidas tem uma

maior influência nos resultados. Percebe-se, que a topologia resultante é completamente diferente em praticamente todos os casos.

De forma geral, constata-se que o padrão mais observado é formado por seis pares de barras diagonais que se cruzam, estando presente em 54,68% dos casos em ao menos uma das fachadas. Esse padrão é ainda mais comum nos casos com simetria a 0° , independentemente da quantidade de repetições empregada, sendo observado em ao menos uma fachada de 90,62% dos casos. Outro padrão, encontrado nos casos com simetria a 45° , é o formado por 3 ou 6 (de acordo com a quantidade de repetições) pares de barras diagonais que se cruzam nas extremidades.

Nos casos em que foi imposta simetria a 45° e repetição de 6 células unitárias ao longo do eixo z, percebe-se uma pequena ocorrência de barras horizontais nas fachadas. Apenas dois casos específicos, C-4 e C-15, que apresentam baixos valores nos coeficientes de arrasto e de momento, mostram a formação de barras diagonais. Por fim, pode-se afirmar que os casos com simetria a 45° e três repetições apresentam maior variedade de resultados, havendo topologias diferentes a depender da vizinhança e ângulo de incidência do vento. No gráfico apresentado na Figura 60, pode-se observar o comportamento da flexibilidade média para cada caso empregando-se as diferentes técnicas de controle de leiaute.

Figura 60 – Flexibilidade média dos casos otimizados com diferentes técnicas de controle geométrico



Fonte: O Autor (2023)

Observa-se um padrão consistente em que, independentemente da simetria adotada, os casos com maior número de repetições sempre apresentam os valores mais elevados de flexibilidade média. A média dos casos com 6 repetições (independentemente da simetria imposta) foi de 3806,26 N.m, enquanto a média dos casos com 3 repetições foi de 3472,85 N.m, o que representa um aumento de 9,6%. Esse comportamento pode ser entendido como resultado do aumento das restrições geométricas, levando o código a ter menos liberdade para otimizar a distribuição de material no domínio. Em outras palavras, ao impor mais repetições, o método

de OT fica restrito para encontrar soluções mais eficientes, resultando em valores mais elevados de flexibilidade.

Em relação à direção da simetria imposta, são observados dois padrões para os valores médios da função objetivo: nos casos em que o vento incide de maneira perpendicular às fachadas da edificação principal, isto é, casos com $\alpha = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ ou 270° , a imposição de simetria a 0° resultou em casos com menor flexibilidade média que a imposição de simetria a 45° . Já nos casos com $\alpha = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ ou 315° , a imposição de simetria a 45° foi mais eficiente já que resulta em casos com menor valor da função objetivo.

Os casos em que o vento incide perpendicularmente sobre a edificação principal são os casos C-1 a C-4, C-9, C-11, C-13 e C-15. A valor médio da flexibilidade desses casos, quando imposta a simetria a 0° , foi de 3032,77 N.m, e quando imposta a simetria a 45° , a média foi de 4657,56 N.m. Já nos casos em que $\alpha = 45^\circ$ (C-5 a C-8), 135° (C-10), 225° (C-12) e 315° (C-16), a média da função objetivo, quando imposta a simetria a 0° foi de 3505,43 N.m, e quando para a simetria a 45° foi de 3362,44 N.m. O que demonstra que alinhar a simetria com a direção do vento produz melhores resultados, em termos de menor flexibilidade média das estruturas otimizadas.

Com relação à quantidade de iterações, observa-se que os casos com imposição de simetria a 45° demandam mais iterações para atingir a convergência. Aproximadamente 214 e 276 iterações, em média, para os casos com repetição de 6 e 3 padrões, respectivamente. Enquanto os casos com simetria a 0° precisaram, em média, de aproximadamente 152 e 159 iterações, para repetição de 6 e 3 células unitárias ao longo do eixo z , respectivamente. Ou seja, a mudança de direção da simetria provocou um aumento médio de 74,7% na quantidade de iterações necessárias para se atingir a convergência. A relação entre tempo de processamento e quantidade de iterações foi praticamente a mesma para todos os tipos de controle geométrico analisados. Na Tabela 18, apresenta-se o valor médio da razão entre o tempo de processamento (em segundos) e a quantidade de iterações para cada combinação de técnicas de controle de leiante empregada, bem como o desvio padrão (S).

Tabela 18 – Relação entre tempo de processamento e quantidade de iterações (t/it) e desvio padrão (S) para diferentes combinações de técnicas de controle geométrico

		t/it	S
Simetria em xz e yz a 0°	6 Repetições	5,67	0,18
	3 Repetições	5,61	0,15
Simetria em xz e yz a 45°	6 Repetições	5,60	0,12
	3 Repetições	5,65	0,12

Fonte: O Autor (2023)

Nota-se que as diferentes técnicas de controle de leiaute praticamente não têm influência na relação entre o tempo de processamento e a quantidade de iterações. Uma vez que, para todas as combinações, houve uma média em torno de 5,65 s para cada iteração.

Na Tabela 19 apresenta-se o valor médio de $\bar{h}$ para cada combinação de técnica empregada bem como as diferenças relativas entre as diferentes direções de simetria e repetições de padrão. Percebe-se que há pouca influência sobre a exequibilidade das estruturas otimizadas em função do parâmetro $\bar{h}$ para as diferentes técnicas de controle geométrico empregadas.

Tabela 19 – Valores médios do parâmetro $\bar{h}$ para as diferentes combinações de técnicas de controle geométrico empregadas

	6 Repetições	3 Repetições	Diferença relativa
Simetria em xz e yz a 0°	0,5635	0,5657	0,39%
Simetria em xz e yz a 45°	0,5698	0,5827	2,26%
Diferença relativa	1,12%	3,01%	

Fonte: O Autor (2023)

Os resultados são semelhantes entre as quatro situações analisadas com diferenças relativas na ordem de 3%.

Por fim, ao comparar os resultados dos itens 5.2 e 5.3, conclui-se que as técnicas de controle de leiaute têm maior influência sobre a topologia das estruturas resultantes que as condições geométricas da vizinhança. No item 5.6 as restrições geométricas são as mesmas para todos os casos, isto é, simetria em xz e yz a 0° e repetição de 3 células unitárias ao longo da direção z . Observando os casos C-1 a C-3, nota-se que, apesar da mudança da altura das edificações vizinhas, a topologia dos resultados foi praticamente a mesma. O mesmo pode ser dito dos casos C-5 a C-8, que apresentam o mesmo padrão topológico com poucas diferenças.

Por outro lado, no item 5.3, em que se otimiza cada caso com quatro diferentes combinações de técnicas de controle de leiaute, observa-se que a imposição de diferentes combinações quase sempre leva a diferentes soluções topológicas. A exceção está na imposição de simetria a 0° com 3 repetições que, nos casos C-1 a C-3, C-5 a C-10, C-12 e C-13, resultou em estruturas muito semelhantes àquelas obtidas pela imposição de simetria a 0° com 6 repetições.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a otimização tridimensional de sistemas de contraventamento de edifícios altos, localizados em ambientes urbanos, através do emprego do método de otimização topológica SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization*) e da CFD para determinação das cargas do vento.

O método SIMP foi implementado em ambiente de programação MATLAB para resolver o problema de minimização de flexibilidade, considerando a restrição de volume. Essa implementação foi realizada através do código *top3dmgcg_BUILDING*, desenvolvido pelo autor desta pesquisa, a partir de modificações feitas no código *top3dmgcg* de Amir, Aage e Lazarov (2014), com o propósito de permitir a imposição de simetria e repetição de padrões à estrutura otimizada. Além disso, foram incorporadas funcionalidades para a leitura das cargas provenientes da análise de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Para determinação das cargas do vento, o escoamento turbulento em torno de um conjunto de edificações foi simulado numericamente através da CFD empregando-se o *software* de distribuição livre e código aberto OpenFOAM. A modelagem da turbulência foi realizada através da metodologia baseada nas equações médias de Reynolds (RANS) e do modelo de fechamento de turbulência *Shear Stress Transport $k - \omega$* (SST).

O estudo consistiu em simular o escoamento do vento ao redor de uma edificação principal cercada por oito edificações vizinhas. Foram analisados 16 casos variando a altura das edificações vizinhas e o ângulo de incidência do vento. Nos oito primeiros casos, a vizinhança foi formada por edificações de mesma altura, ao passo que nos últimos oito casos, cada edificação tem uma altura diferente. Através dessas simulações, foi possível determinar como a disposição geométrica da vizinhança e a direção do vento influenciam a distribuição das cargas exercidas sobre a edificação principal.

Dentre os resultados obtidos, podem-se destacar os seguintes:

- Os resultados das simulações de CFD obtidos através do emprego do domínio computacional de base quadrada apresentaram ótima concordância com aqueles obtidos através do emprego do domínio de base retangular e com os resultados dos ensaios experimentais conduzidos em túnel de vento pela TPU.
- A distribuição da pressão nas fachadas das edificações obtida através do emprego da CFD apresentou uma concordância razoável com os resultados obtidos através de ensaios

experimentais. A resultante dos esforços atuando na edificação, isto é, os coeficientes de arrasto e momento, apresentaram resultados bastante satisfatórios, com diferenças relativas da ordem de 5% no caso das malhas mais refinadas.

- O emprego do *top3dmgcg_BUILDING* conduziu a resultados muito similares aos obtidos por outros códigos de OT bem estabelecidos na literatura, apresentando, inclusive, menores valores da função objetivo e menor tempo de processamento.
- O uso de técnicas de controle de leiaute resultou em estruturas com topologia padronizada e simples, especialmente no que diz respeito à repetição de padrões. A não aplicação dessas técnicas resultou em topologias complexas, sem um padrão definido e com barras sem ligação com a estrutura principal. Por outro lado, observou-se que quanto mais restrições geométricas impostas ao código, menor sua eficiência em minimizar a função objetivo.
- Quanto maior a altura das edificações vizinhas a barlavento, menores serão as cargas devidas ao vento impostas à edificação principal. Esse efeito foi mais notável nos casos em que o vento incide perpendicularmente às fachadas.
- A variação no ângulo de incidência do vento alterou completamente as condições de carregamento sobre a edificação principal, uma vez que foram observadas diferenças relativas de até 900% nos valores dos coeficientes aerodinâmicos apenas pela alteração da direção do vento.
- Verificou-se que o valor da função objetivo é diretamente proporcional aos valores dos coeficientes aerodinâmicos, isto é, os casos que apresentaram maiores coeficientes aerodinâmicos também apresentaram maiores valores de flexibilidade média.
- O emprego de simetria em *xz* e *yz* a 0° resultou em menores valores de função objetivo que o emprego de simetria em *xz* e *yz* a 45° apenas nos casos em que o vento incidiu perpendicularmente sobre as fachadas da edificação. Para os casos em que o vento incidiu diagonalmente, a simetria a 45° apresentou melhores resultados, em termos de minimização da função objetivo.
- A imposição de simetria a 45° graus teve forte influência sobre o tempo de processamento e quantidade de iterações necessárias para se atingir a convergência. Os casos com simetria a 45° precisaram de 74,7% mais iterações que os casos com simetria a 0° .
- Foi observado que as técnicas de controle de leiaute são os fatores com maior influência sobre a topologia da estrutura otimizada, seguidas pelo ângulo de incidência do vento. As condições geométricas da vizinhança, apesar de influenciarem fortemente o carregamento

imposto à edificação principal, são os fatores de menor influência sobre a topologia resultante.

6.6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho deu continuidade aos estudos desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Computacional (LECOM) do CAA referentes à Otimização Topológica e Dinâmica dos Fluidos Computacional. Dentre os diversos trabalhos já realizados pelos pesquisadores do LECOM, a presente pesquisa pôde contribuir com os seguintes avanços: a simulação numérica do escoamento do vento em torno de uma edificação localizada em ambiente urbano, isto é, com edificações vizinhas de diferentes alturas; o emprego do método SIMP para otimização tridimensional de estruturas de contraventamento; a imposição de simetria a 45°; o emprego de um domínio computacional para a simulação do escoamento do vento em 8 ângulos de incidência diferentes.

Para futuros trabalhos sugere-se o seguinte:

- Estudar a influência da distância entre a edificação principal e as edificações vizinhas nos carregamentos impostos à edificação principal e, conseqüentemente, na otimização topológica.
- Simular o escoamento do vento em torno das edificações empregando a metodologia das grandes escalas (LES) ou a metodologia híbrida DES (*Detached Eddy Simulation*) para obtenção de resultados mais acurados.
- Implementar os códigos de otimização topológica em uma linguagem de programação compilada, como C++ ou Fortran, a fim de permitir uma maior capacidade de refinamento da malha.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 2023

ALMEIDA, A. C. **Estudo numérico da ventilação natural em arranjo de edificações distribuídas em série**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023.

ALMEIDA, S.R.M.; PAULINO, G.H.; SILVA, E.C.N. Layout and material gradation in topology optimization of functionally graded structures: a global-local approach. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 42, p. 855-868, 2010.

AMINI, S.; GOLZARIAN, M. R.; MAHMOODI, E.; JEROMIN, A.; ABBASPOUR-FARD, M. H. Numerical simulation of the Mexico wind turbine using the actuator disk model along with the 3D correction of aerodynamic coefficients in OpenFOAM. **Renewable Energy**. v. 163, p. 2029-2036, 2021.

AMIR, O.; AAGE, N.; LAZAROV, B.S. On multigrid-CG for efficient topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 48, p. 815-829, 2014.

AN, K.; WONG, S. M.; FUNG, J. C. H. Exploration of sustainable building morphologies for effective passive pollutant dispersion within compact urban environments. **Building and Environment**. v. 148, p. 508-523, 2019.

ANDREASSEN, E.; CLAUSEN, A.; SCHEVENELS, M.; LAZAROV, B. S.; SIGMUND, O. Efficient Topology optimization in Matlab using 88 lines of code. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 43, p. 1-16, 2011.

ANGELUCCI, G.; MOLLAIOLI, F.; ALSHAWA, O. Evaluation of optimal lateral resisting systems for tall buildings subject to horizontal loads. **Procedia Manufacturing**. v. 44, p. 457-464, 2020.

BENDSOE, M. P. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, v. 1, p. 193-202, 1989.

BENDSOE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in Structural design using a homogenization method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. V. 71, p. 197-224, 1988.

BENDSOE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods and applications**. Springer, Berlin, 2003.

BISWAL, R.; VENKATESH, V.; ARUAMAIAKKANNU, G. Investigation on part consolidation for additive manufacturing with SIMP method. **Materials Today: Proceedings**. V. 46, p. 4954-4961. 2021.

BLESSMANN, J. Aerodinâmica das construções. 3ª ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2011.

BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 2ª ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.

BLOCKEN, B. LES over RANS in building simulation for outdoor and indoor applications: a foregone conclusion? **Building Simulation**. v. 11, p. 821 a 870, 2018.

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; BEECK J. P. A. J. Pedestrian-level wind conditions around buildings: review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. **Building and Environment** v. 100, p. 50-81, 2016.

BOBBY, S.; SPENCE, S. M. J.; BERNARDINI, E.; WEI, D.; KAREEM, A. **A complete performance-based optimization framework for the design of tall buildings**. 11ª International Conference on Structural Safety Reliability (ICOSSAR), Nova Iorque, 2014.

BRIGGS, W.L.; HENSON, V.E.; MCCORMICK, S.F. **A Multigrid Tutorial**. 2 ed., Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.

CAVALCANTE, M. C. A. D. **Influência da geometria da edificação na aerodinâmica de sistemas eólicos integrados utilizando OpenFOAM**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

CHEN, H.; HALL, M. CFD simulation of floating body motion with mooring dynamics: Coupling MoorDyn with OpenFOAM. **Applied Ocean Research**. v. 124. 2022.

CHING, F. D. K.; ONOUYE, B. S.; ZUBERBUHLER, D. **Sistemas estruturais ilustrados: padrões, sistemas e projeto**. 1ª ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2009.

DIAZ, A.; SIGMUND, O. Checkerboard patterns in layout optimization. **Structural Optimization**, v. 10, p. 40-45, 1995.

DONG, Z.; LIU, K.; WANG, M.; ZHANG, J.; ZHANG, J.; TIAN, W.; QIU, S.; SU, G. H. Study on the deposition migration and heat transfer characteristics in the reactor core based on OpenFOAM. **Applied Thermal Engineering**. v. 230, 2023.

DRUENEN, T.; HOOF, T.; MONTAREZI, H.; BLOCKEN, B. CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrian-level wind speed. **Building and Environment**. v. 163, 2019.

DU, Y.; BLOCKEN, B.; ABBASI, S.; PIRKER, S. Efficient and high-resolution simulation of pollutant dispersion in complex urban environments by island-based recurrence CFD. **Environmental Modelling and Software**. v. 145, 2021.

ELSHAER, A.; GAIROLA, A. ADAMEK, K.; BITSUAMLAK, G. Variations in wind load on tall buildings due to urban development. **Sustainable Cities and Society**. V. 34, p. 264-277, 2017.

ESCHENAUER, H.A.; OLHOFF, N., Topology optimization of continuum structures: A review. **American Society of Mechanical Engineers**. v. 54, p. 331-390, 2001

FERRARI, F.; SIGMUND, O. A new Generation 99 line Matlab code for compliance Topology optimization and its extension to 3D. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 62, p. 2211–2228, 2020.

FRANCA, M. P. A. **Estudo da eficiência dos contraventamentos treliçados em edifícios com estrutura de aço**. 2003. Tese (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLUNZEN, H.; CARISSIMO, B. **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment**. Reino Unido: COST Office, 2007.

FRANKE, J.; HIRSCH, C.; JENSEN, A.; KRÜS, H.; SCHATZMANN, M.; WESTBURY, P.; MILES, S.; WISSE, J.; Wright, N. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. **Proceedings of the International Conference on Urban Wind Engineering and Building Aerodynamics**, 2004.

GIMENEZ, J. M. BRE, F.; NIGRO, N. M.; FACHINOTTI, V. Computational modeling of natural ventilation in low-rise non-rectangular floor-plan buildings. In: **Building Simulation**. Tsinghua University Press, p. 1255-1271, 2018.

GIMENEZ, J. M.; BRE, F. AN enhanced $\kappa - \omega$ SST model to predict airflows around isolated and urban buildings. **Building and Environment**. v. 237, 2023.

GOLI, A.; ALAGHMANDAN, M.; BARAZANDEH, F. Parametric structural topology optimization of high-rise buildings considering wind and gravity loads. **Journal of Architectural Engineering**. v. 27, 2021.

HABER, R. B.; BENDSOE, M. P.; JOG, C. S. A new approach to variable-topology shape design using a constraint on perimeter. **Structural Optimization**. V. 11, p. 1- 12, 1996.

HADAVI, M.; PARDARSHAHRI, H. Quantifying impacts of wind speed and urban neighborhood layout on the infiltration rate of residential buildings. **Sustainable Cities and Society**. V. 53, 2020.

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of Structural Optimization**. Kuwer, 3^a ed. Dordrecht, 1992.

HE, R.; SUN, H.; GAO, X.; YANG, H. Wind tunnel tests for wind turbines: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 166, 2022b.

HE, Y.; ZHAO, Z. L.; CAI, K.; KIRRBAY, J.; XIONG, Y.; XIE, Y. M. A thinning algorithm based approach to controlling structural complexity in topology optimization. **Finite Elements in Analysis and Design**. V. 207, 2022.a.

HEO, Y. G.; CHOI, N. J.; CHOI, K. H.; JI, H. S.; KIM, K. C. CFD study on aerodynamic power output of a 110 Kw building augmented wind turbine. **Energy and Buildings**. V. 119, p. 162-173, 2016.

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.

JIANG, H.; WEI, X.; CHEN, Z.; ZHU, M.; YAO, Y.; ZHANG, Z. JIA, K. Influence of different soil reflectance schemes on the retrieval of vegetation LAI and FVC from PROSAIL in agriculture region. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 212, 2023.

KAZAKIS, G; KANELLOPOULOS, I; SOTIROPOULOS, S; LAGAROS, N.K. Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing. **Heliyon**, v. 3, 2017.

KELLER, S. C. **O método multigrid de correções aditivas para a solução numérica acoplada das equações de navier-stokes com malhas não-estruturadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

KOSUTOVA, K. *et al.* Cross-ventilation in a generic isolated building equipped with louvers: Wind-tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, v. 154, p. 263-280, 2019.

KIM. W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, Y. Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 147, p. 186-201, 2015.

KIM. W.; TAMURA, Y.; YOSHIDA, Y. Interference effects on local peak pressures between two buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. v. 99, p. 584-600, 2011.

KONCAR, B.; SOTOSEK, J.; BAJŠIĆ, I. Experimental verification and numerical simulation of a vortex flowmeter at low Reynolds numbers. **Flow Measurement and Instrumentation**. v. 88, 2022.

LEDO, L.; KOSASIH, P. B.; COOPER, P. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. **Renewable Energy**. V. 36, p. 1379-1391, 2011.

LEE, S.; BOBBY, S.; SPENCE, S. J. M.; TOVAR, A.; KAREEM, A.; **Shape and Topology sculpting of tall buildings**. 20^a Analysis & Computation Specialty Conference. V. 20, p. 323-334. 2012.

LEE, Y. T.; LO, Y. L.; JUAN, Y. H.; LI, Z.; WEN, C. Y.; YANG, A. S. Effect of void space arrangement on wind power potential and pressure coefficient distributions for high-rise void buildings. **Journal of Building Engineering**. V. 75, 2023.

LIU, K.; TOVAR, A. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. **Struct. Multidisc. Optim**, v.50, p.1175-1196, 2014.

LIU, H.; YANG, D.; HAO, P.; ZHU, X. Isogeometric analysis based topology optimization design with global stress constraint. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 342, p. 625-652, 2018.

LU, B.; LI, Q. S. Investigation of the effects of wind veering and low-level jet on wind loads of super high-rise buildings by large eddy simulations. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**. V. 227, 2022.

MAXWELL, J. C. **On reciprocal figures, frames and diagrams of force**. Transactions of the Royal Society of Edinburgh. V. 26, 1872.

MENDIS, P; NGO, T; HARITOS, N; HIRA, A. SAMALI, B; CHEUNG, J. Wind loading on tall buildings. EJSE Special Issue, v. 7, p. 41-54, 2007.

MENTER F.R. Influence of freestream values on $k - \omega$ turbulence model predictions. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, v. 30, p. 1657-1659, 1992.

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **AIAA journal**, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.

MICHELL, A. G.M. **The limits of economy of material in frame structures**, Phil. Mag, v. 8, p. 589-597, 1904.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. The finite volume method in computational fluid dynamics. Springer, 2016.

NASCIMENTO, A. V., BONO, G. Numerical simulation of wind-driven ventilation of a three-generic low-rise building in various geometrical configurations. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 269-288, 2022.

NICOUD, F. Unsteady flows modeling and computation. **Universidade Montpellier**, França, 2007.

NIKKHO, S. K.; HEIDARINEJAD, M.; LIU, J.; SREBRIC, J. Quantifying the impact of urban wind sheltering on the building energy consumption. **Applied Thermal Engineering**, v. 116, p. 850–865, 2017.

NIORDSON, F. I. Optimal design of plates with a constraint on the slope of the thickness function. **Solids & Structures**. V.19, p. 141-151, 1983.

OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox, version 9.0. Londres, Reino Unido: The OpenFOAM Foundation Ltd, 2021.

PEREIRA, R.E.L. **Otimização topológica de sistemas de contraventamento em edificações considerando os efeitos do vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

PRAGER, W.; ROZVANY, G. I. N. **Optimization of the structural geometry**. In: BEDNAREK, A.R.; CESARI, L. Dynamical systems A critical review of established methods of structural topology optimization (Proceedings of the International Conference, Gainesville, Florida). Academic, New York, 1977.

QUERIN, O. M.; VICTORIA, M.; ALONSO, C.; ANSOLA, R. MARTÍ, P. **Topology Design Methods for Structural Optimization**. Academic Press. Londres, 2017.

RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated Building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**. v. 53, p. 34-48, 2012.

RICCI, A.; KALKMAN, I.; BLOKEN, B.; BURLANDO, M.; REPETTO, M. P. Impact of turbulence models and roughness height in 3D steady RANS simulations of wind flow in an urban environment. **Building and Environment**. v. 171, 2020.

ROZVANY, G. I. N. A critical review of established methods of structural topology optimization. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 37, p. 217-237, 2009.

ROZVANY, G. I. N.; ZHOU, M. Applications of the COC method in layout optimization. In: Eschenauer, H. A.; Mattheck, C.; Olhoff, N. (eds.) **Engineering optimization in design processes** (Proc. Int. Conf. Held in Karlsruhe, 1990), p. 59-70. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1991.

ROZVANY, G. I. N.; ZHOU, M.; BIRKER, T. Generalized shape optimization without homogenization. **Structural Optimization**, v. 4, p. 250-252, 1992.

SALVADOR, S. M. B. **Estudo do efeito dos parâmetros algorítmicos nos critérios de resolução OC, SAO e MMA em problemas tridimensionais com o método de otimização SIMP**. Caruaru, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, p. 93, 2018.

SÁNCHEZ, G. F. G.; VELASCO, J. L. C.; RUEDA-ORDOÑEZ, Y. J.; DÍAZ, D. A. F. MORALES, J. R. M. Solid biomass combustion modeling: Bibliometric analysis and literature review of the latest developments in OpenFOAM based simulations. **Bioresource Technology Reports**. v. 15, 2021.

SARKAR, S.; SAGAN, V.; BHADRA, S.; RHODES, K.; POKHAREL, M. FRITSCHI, F. B. Soybean seed composition prediction from standing crops using PlanetScope satellite imagery and machine learning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**.

SHAHEED, R.; MOHAMMADIAN, A.; GILDEH, K. H. A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels. **Environmental Fluid Mechanics**, 543–568, 2019.

SHIRZADI, M.; TOMINAGA, Y.; MIRZAEI, P. A. Experimental and steady-RANS CFD modelling of cross-ventilation in moderately-dense urban areas. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101849, 2020.

SHUKLA, A.; MISRA, A.; KUMAR, S. Checkerboard problem in finite element based Topology optimization. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**. V. 6, n. 4, 1769-1774, 2013.

SIGMUND, O. A 99 line topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 21, p. 120-127, 2001.

SIGMUND, O. **Design of material structures using Topology optimization**. Thesis of Phd (Department of Mechanical Engineering/Solid Mechanics) – Technical University of Denmark, 1994.

SIGMUND, O; PETERSSON, J. **Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards mesh dependencies and local minima**. *Structural Optimization*. V. 16, p. 68-75, 1998.

SILVA-FREIRE, A. P.; MENUT, P.P.M.; SU, J. **Turbulência: Anais da I Escola de Primavera em Transição e Turbulência**. ABCM - Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, v. 1, 292 p., 2002.

SILVA, L. J. **Otimização topológica de edifícios considerando a influência das cargas de vento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

SILVA, P. U. **Emprego da Otimização topológica e do OpenFOAM na análise de sistemas de contraventamento em ambientes urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2022.

SILVA, P. U.; PEREIRA, R. E. L.; BONO, G. Topology optimization of bracing systems in buildings considering the effects of the wind. **Structural Engineering and Mechanics**. v. 86, p. 473-486, 2023.

SREBRIC, J.; HEIDARINEJAD, M.; LIU, J. Building neighborhood emerging properties and their impacts on multi-scale modeling of building energy and airflows. **Building and Environment**, v. 91, p. 246–262, 2015.

SUN, Y.; SHEN, H.; ZHENG, S.; JIANG, L. A hybrid non-gray radiation heat solver based on OpenFOAM. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**. V. 281, 2022.

TANG, J.; XIE, Y. M; FELICETTI, P. Conceptual design of building structures subjected to wind load by using to topology optimization. **Wind and Structures**, v.18, p. 21-35, 2014.

TARANATH, B.S. **Reinforced concrete design of tall buildings**. 1ª ed., Boca Raton: CRC Press, 2009.

THORDAL, M. S.; BENNETSEN, J. C.; KOSS, H. H. H. Review for practical applications of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**. V. 186, p. 155-168. 2019

TOJA-SILVA, F.; KONO, T.; PERALTA, C.; LOPEZ-GARCIA, O. CHEN, J. A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**. V. 180, p. 66-87. 2018.

TOMEI, V., IMBIMBO, M., MELE, E. Optimization of structural patterns for tall buildings: the case of diagrid. **Engineering Structures**, v. 171, n. 1, p. 280-297, 2018.

TOMINAGA, Y; MOCHIDA, A; YOSHIE, R; KATAOKA, H; NOZU, T; YOSHIKAWA, M; SHIRASAWA, T. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**. V. 96, p. 1749- 1761, 2008.

TORRES, I. .A.; ALMEIDA, S.R.M. On conceptual design of buildings based on topology optimization techniques. Brazil, Pirenópolis, **Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**, v.34, p. 17, 2013.

TSAVDARIDIS, K. D.; NICOLAOU, A.; MISTRY, A. D.; EFTHYMIOU, E. Topology optimization of lattice telecommunication tower and performance-based design considering wind and ice loads. **Structures**. V. 27, p. 2379-2399. 2020.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; TOMINAGA, Y. On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments. **Building and Environment**. v. 114, p. 148-165. 2017.

VISHWANATHAN, A.; VIO, G. A.; KIPOUROS, T.; PARKS, G. T. On the effect of boundary condition uncertainty on robust topology optimization of aerospace structures. **Finite Elements in Analysis and Design**. V. 193, 2021.

WANG, Y.; CHEN, X. Simulation of approaching boundary layer flow and wind loads on high-rise buildings by wall-modeled LES. **Journal of Wind Engineering Industrial Areodynamics**. V. 207, 2020.

WILCOX, D.C. Reassessment of the scale determining equation for advanced turbulence models. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, v. 26, n. 11, p. 1299-1310, 1988.

WILCOX, D. C. Turbulence Modeling for CFD. 3^a ed. San Diego, California. DCW Industries, 2006.

WRIGHT, N. G.; EASOM, G. J. Non-linear k- ϵ turbulence model results for flow over a building at full-scale. **Applied Mathematical Modelling**, v. 27, n. 12, p. 1013-1033, 2003.

WU, C.; ZHENG, K.; FANG, J.; STEVEN, G. P.; LI, Q. Time-dependent topology optimization of bone plates considering bone remodeling. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. V. 359, 2020.

XUE, Q.; ZHENG, X.; MITTAL, R., BIELAMOWICZ, S. Subjective-specific computational modeling of human phonation. **Acoustical Society of America**. v. 135, p. 1445-1456, 2014.

YAGO, D. CANTE, J. LLOBERAS-VALLS, O. OLIVER, J. Topology optimization methods for 3D structural problems: a comparative study. **Archives of Computacional Methods in Engineering**. v. 29, p. 1525-1567, 2021.

YANG, W. M. On the boundary conditions of magnetic field in OpenFOAM and a magnetic field solver for multi-region applications. **Computer Physics Communications**. v. 263, 2021.

YUAN, Y.; YAN, B.; ZHOU, X.; YANG, Q.; HUANG, G.; HE, Y.; YAN, J. RANS simulations of aerodynamic forces on a tall building under twisted winds considering horizontal homogeneity. **Journal of Building Engineering**. v. 54, 2022.

ZAKHAMA, R; ABDALLA, M; GURDAL, Z; SMAOUI, H. **Wind load effect in topology optimization problems**. Journal of Physics, v. 75, n.1, p.12-48, 2007.

ZARIPOV, D.; IVASHCHENKO, V.; MULLYADZHANOV, R.; LI, R.; MARKOVICH, D.; KÄHLER, C.J. Reverse flow phenomenon in duct corners at a low Reynolds number. **Physics of Fluids**. v. 33, 2021.

ZHANG. B.; HU, H.; KIKUMOTO, H.; OOKA, R. Turbulence-induced ventilation of an isolated building: Ventilation route identification using spectral proper orthogonal decomposition. **Building and Environment**. v. 223, 2022.

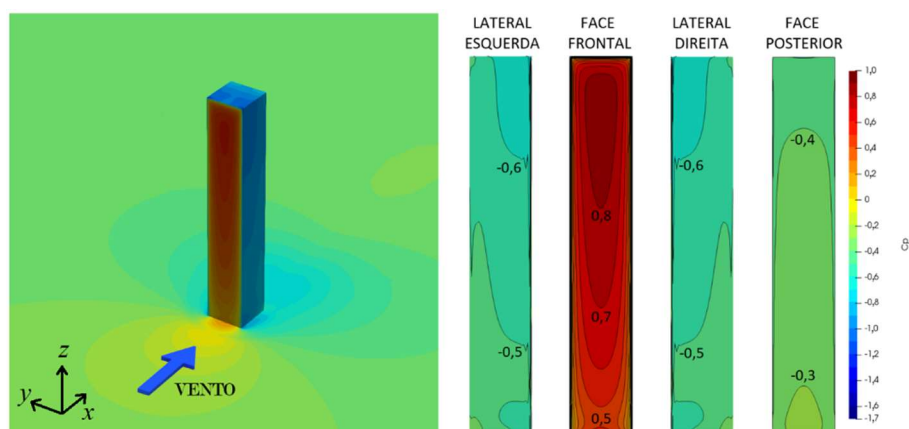
ZHANG, Y.; DENG, S.; WANG, X. RANS and DDES simulations of a horizontal-axis wind turbine under stalled flow condition using OpenFOAM. **Energy**. v.165, p. 1155-1163, 2019.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA MODELAGEM DO ESCOAMENTO VENTO NO OPENFOAM

Neste apêndice são apresentados os resultados das simulações do escoamento obtidas com o OpenFOAM para os 16 casos principais dessa pesquisa. Para cada caso são mostradas duas imagens. A primeira apresenta uma visão tridimensional da edificação e sua vizinhança bem como a direção do escoamento do vento. Na segunda imagem, apresenta-se a distribuição do coeficiente de pressão médio (C_p) nas quatro fachadas da edificação principal.

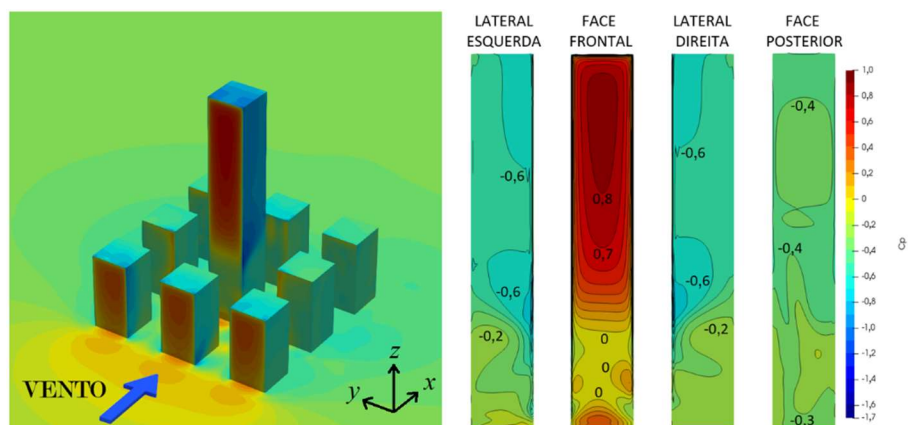
As imagens que retratam a visão tridimensional do ambiente urbano não seguem um padrão para a escala de cores, pois sua escolha foi feita separadamente para cada caso a fim de se obter a melhor visualização possível do problema. Já as imagens que apresentam a distribuição do C_p seguem uma mesma escala de cores a fim de facilitar a compreensão e comparação dos resultados.

Figura A.1 – Caso C-1



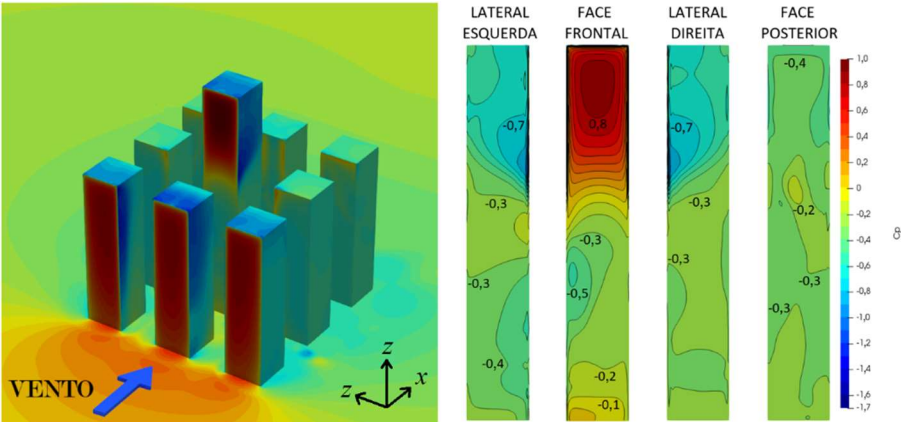
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.2 – Caso C-2



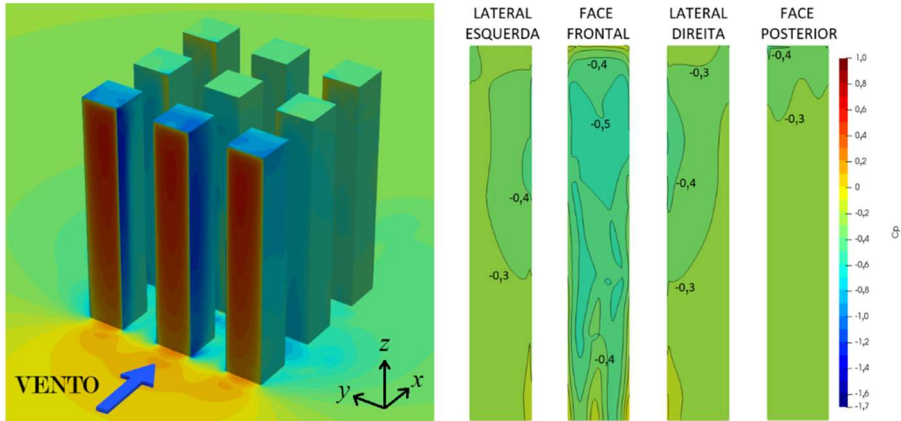
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.3 – Caso C-3



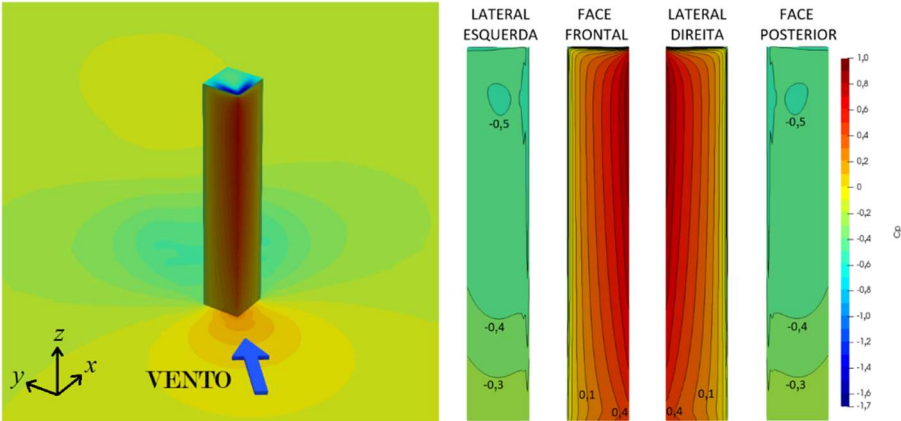
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.4 – Caso C-4



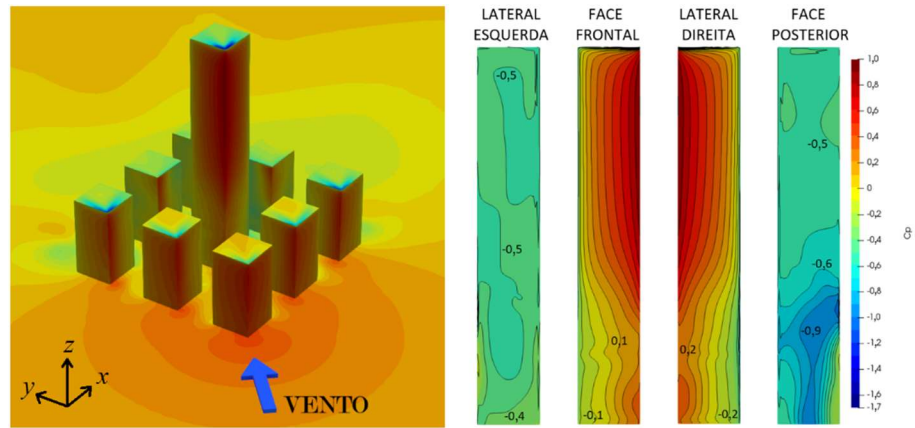
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.5 – Caso C-5



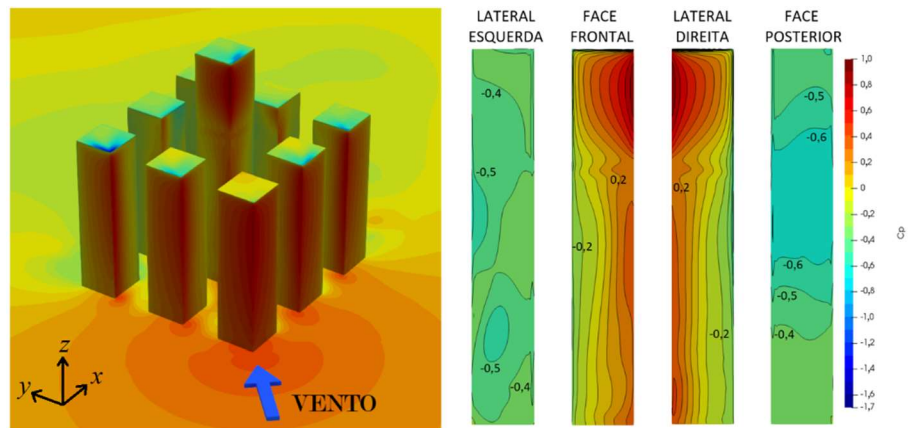
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.6 – Caso C-6



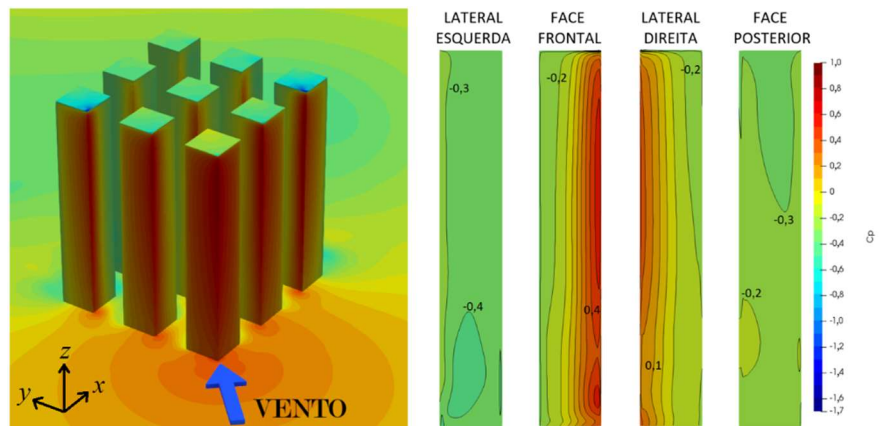
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.7 – Caso C-7



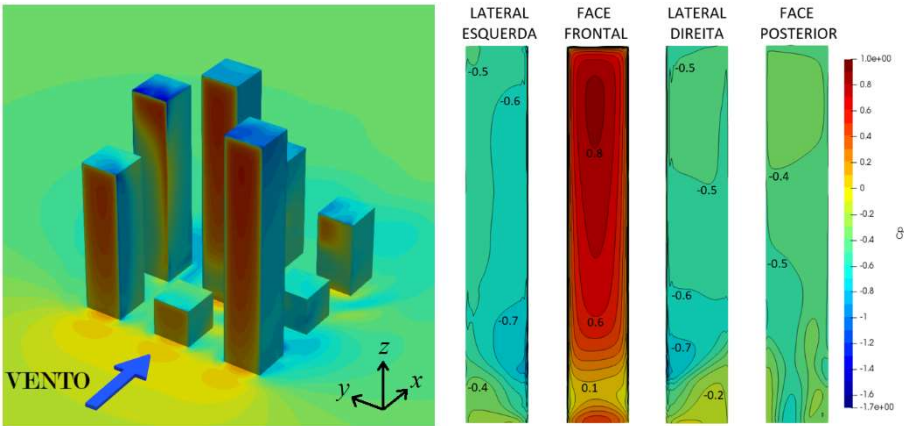
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.8 – Caso C-8



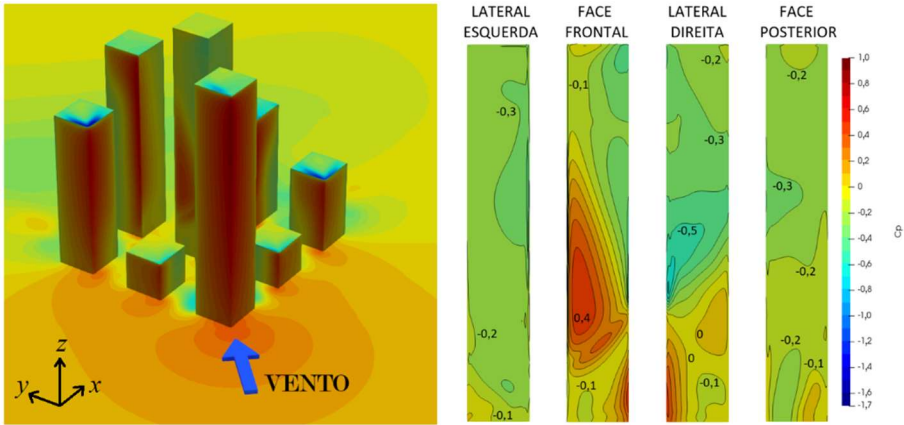
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.9 – Caso C-9



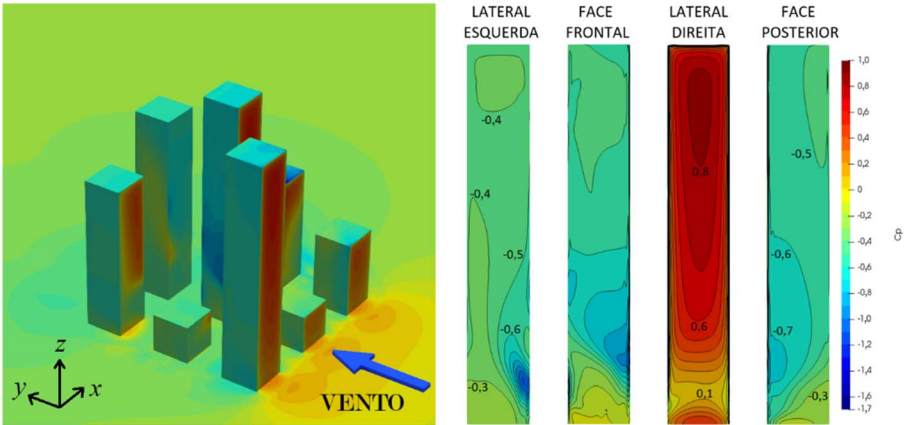
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.10 – Caso C-10



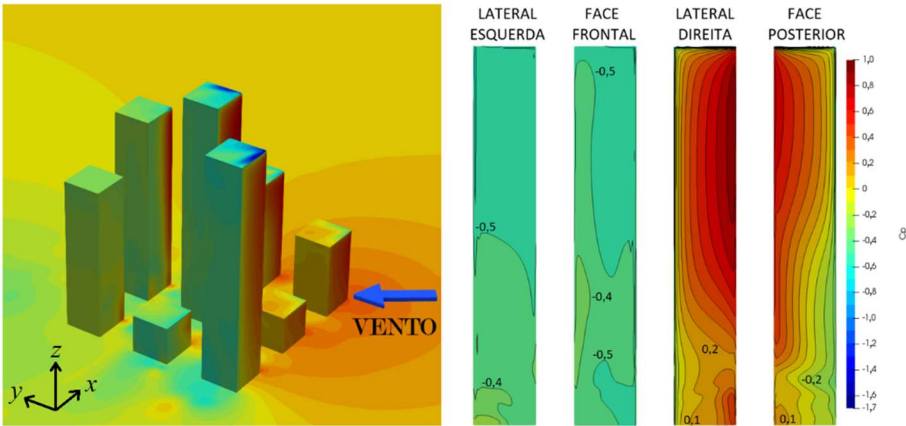
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.11 – Caso C-11



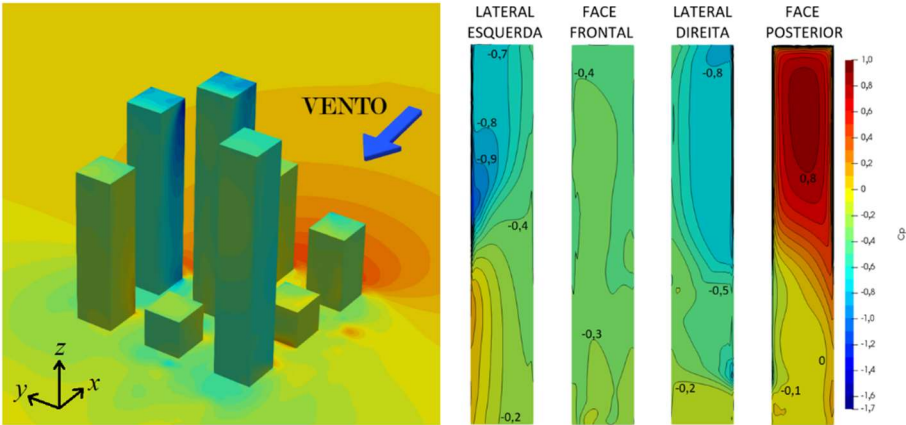
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.12 – Caso C-12



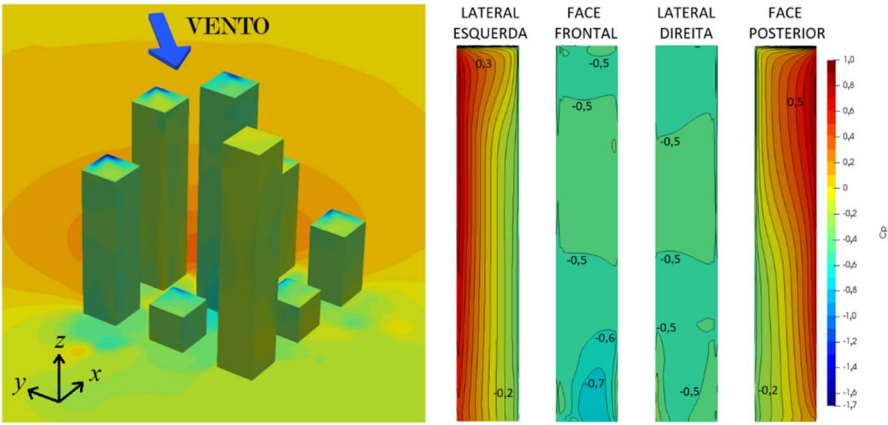
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.13 – Caso C-13



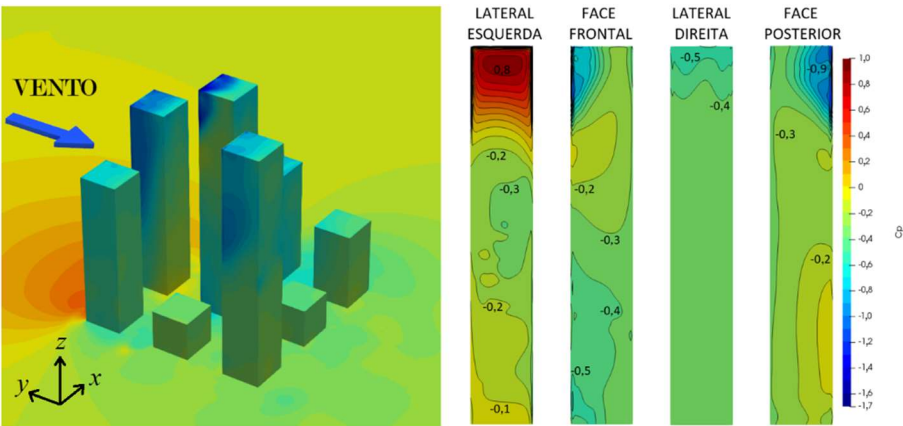
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.14 – Caso C-14



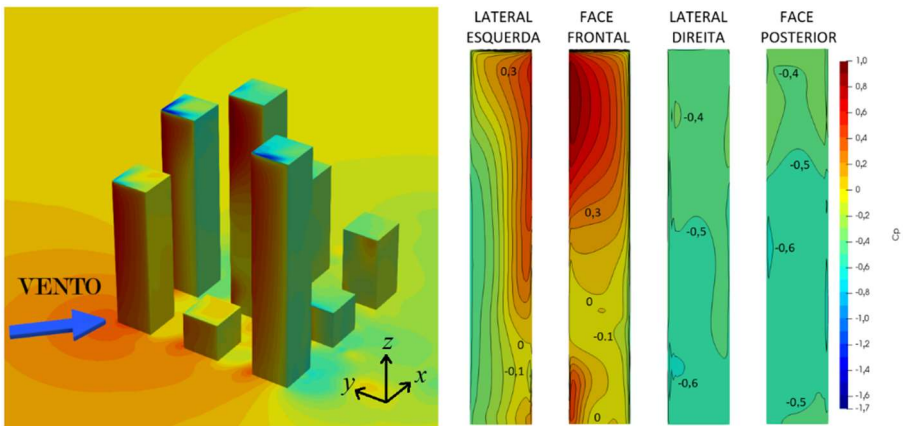
Fonte: O Autor (2023)

Figura A.15 – Caso C-15



Fonte: O Autor (2023)

Figura A.16 – Caso C-16



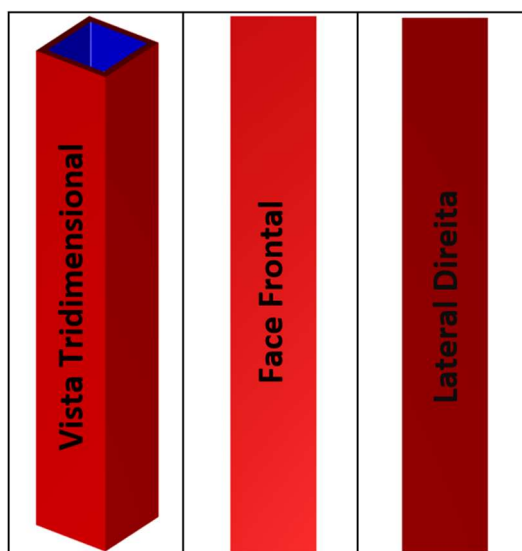
Fonte: O Autor (2023)

APÊNDICE B – ESTRUTURAS OTIMIZADAS COM SIMETRIA A 0° E REPETIÇÃO DE TRÊS CÉLULAS

Neste apêndice são apresentadas as estruturas otimizadas topologicamente pelo método SIMP através do emprego do código *top3dmgcg_BUILDING* com imposição de simetria em xz e yz a 0° e repetição de 3 células unitárias ao longo do eixo z . Cada resultado é composto pelas vistas tridimensional, frontal e lateral da estrutura otimizada, bem como pelos valores da função objetivo (flexibilidade média, em N.m), quantidade de iterações necessárias para se atingir a convergência, tempo de processamento, e parâmetro $\bar{h}$, que quantifica a complexidade da topologia resultante.

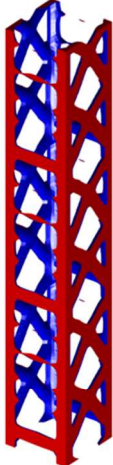
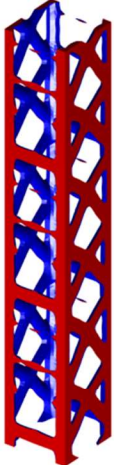
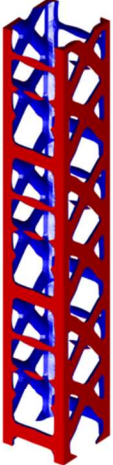
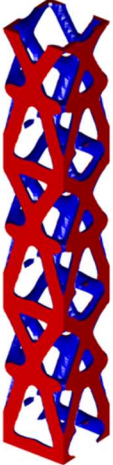
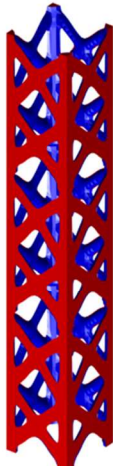
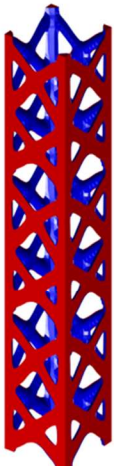
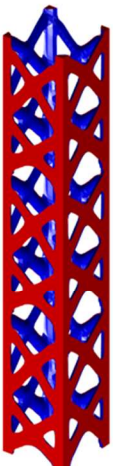
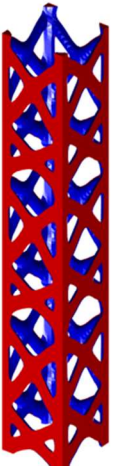
Para todos os casos, o resultado gráfico é apresentado conforme o modelo da Figura B.1.

Figura B.1 – Modelo de representação dos resultados gráficos da Otimização Topológica



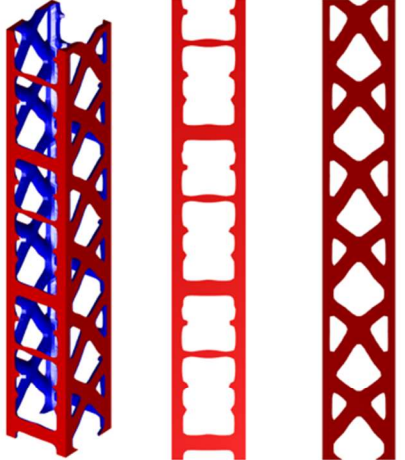
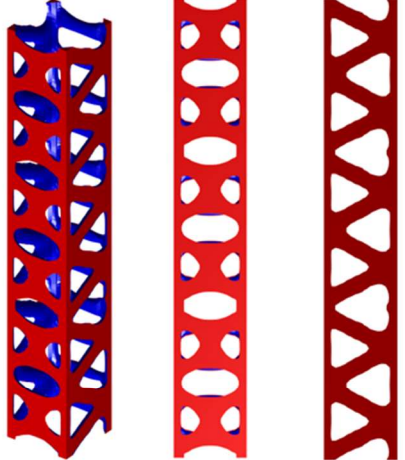
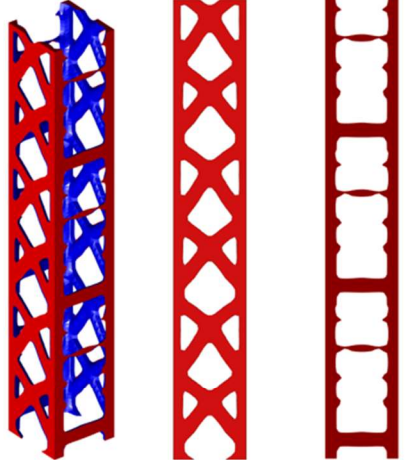
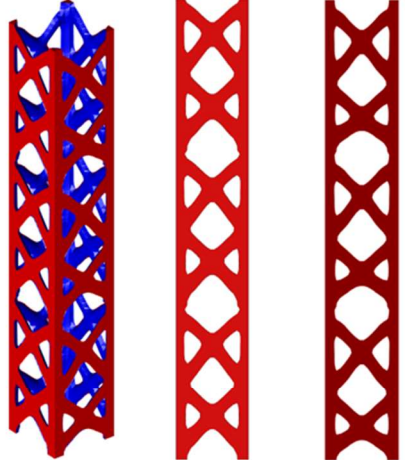
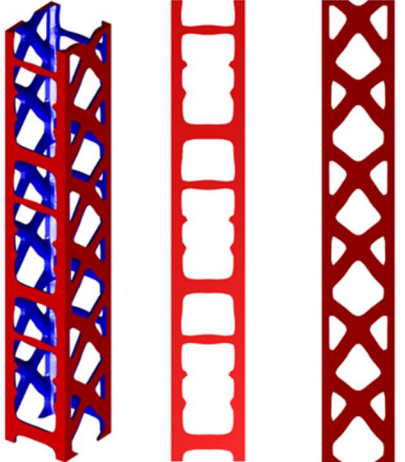
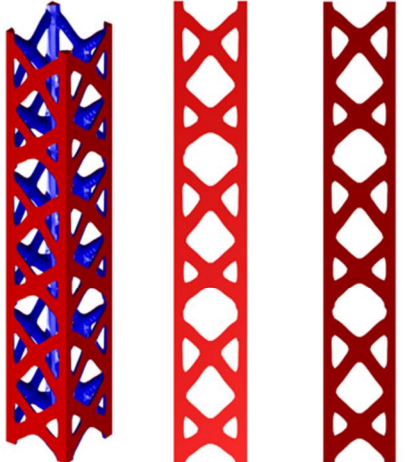
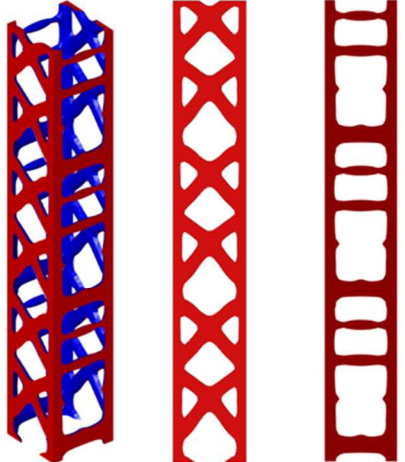
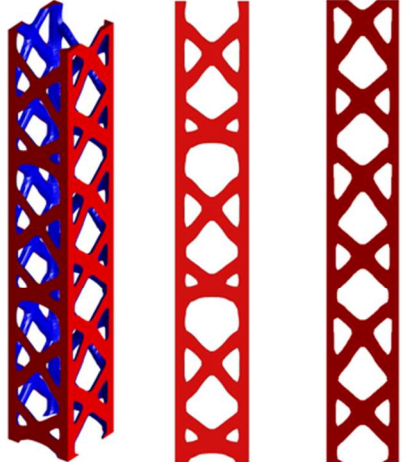
Fonte: O Autor (2023)

Quadro B.1 – Estruturas Otimizadas com imposição de simetria em xz e yz a 0° e repetição de padrões com 3 células - casos C-1 a C-8

$\alpha = 0^\circ$	C-1				C-2				C-3				C-4			
				OBJ: 4305 it.: 95 t: 1,00 $\bar{h}$: 0,5666				OBJ: 3869 it.: 92 t: 1,04 $\bar{h}$: 0,5842				OBJ: 2023 it.: 324 t: 3,52 $\bar{h}$: 0,5880				OBJ: 366 it.: 208 t: 2,27 $\bar{h}$: 0,5902
$\alpha = 45^\circ$	C-5				C-6				C-7				C-8			
				OBJ: 7263 it.: 87 t: 0,92 $\bar{h}$: 0,5572				OBJ: 7014 it.: 60 t: 0,68 $\bar{h}$: 0,5621				OBJ: 4543 it.: 91 t: 1,01 $\bar{h}$: 0,5590				OBJ: 1120 it.: 92 t: 0,98 $\bar{h}$: 0,5663

Fonte: O Autor (2023)

Quadro B.2 – Estruturas Otimizadas com imposição de simetria em xz e yz a 0° e repetição de padrões com 3 células- casos C-9 a C-16

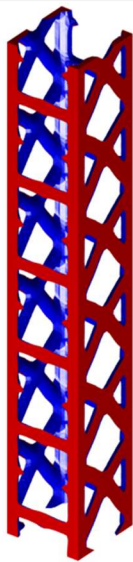
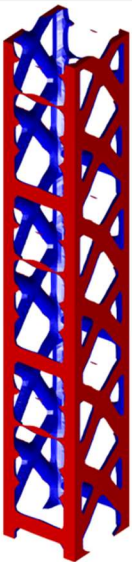
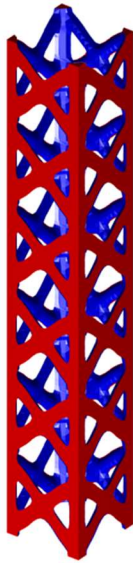
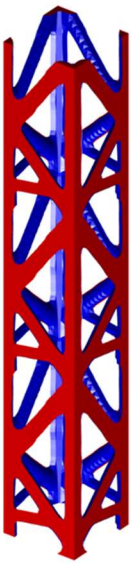
C-9  OBJ: 3870 it.: 92 t: 0,96 $\bar{h}$: 0,5900	C-10  OBJ: 146.5 t.: 253 t: 2,81 $\bar{h}$: 0,6016	C-11  OBJ: 4236 it.: 70 t: 0,79 $\bar{h}$: 0,5939	C-12  OBJ: 7357 it.: 124 t: 1,35 $\bar{h}$: 0,5490
C-13  OBJ: 3557 it.: 98 t: 1,03 $\bar{h}$: 0,5866	C-14  OBJ: 4643 it.: 63 t: 0,69 $\bar{h}$: 0,5586	C-15  OBJ: 1046 it.: 226 t: 2,45 $\bar{h}$: 0,5801	C-16  OBJ: 4307 it.: 82 t: 0,87 $\bar{h}$: 0,5626

Fonte: O Autor (2023)

APÊNDICE C – ESTRUTURAS OTIMIZADAS ATRAVÉS DA IMPOSIÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROLE GEOMÉTRICO

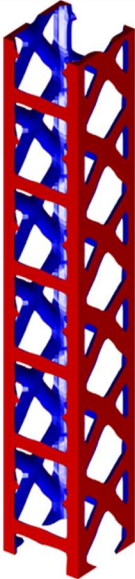
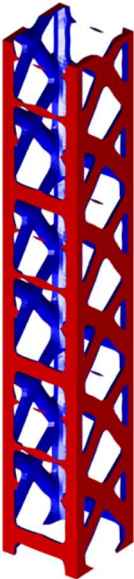
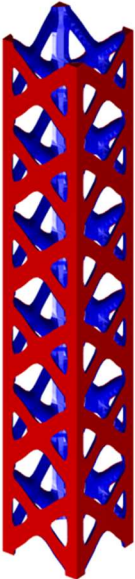
Neste apêndice são apresentadas as estruturas otimizadas através do uso de diferentes técnicas de controle de leiaute. A representação gráfica dos resultados segue o modelo apresentado no Apêndice B. Para todos os casos, o tempo de processamento foi adimensionalizado em relação ao caso C-1 com simetria em xz e yz a 0° e repetição de 3 células ao longo do eixo z (8 minutos e 358 segundos).

Quadro C.1 – Caso C-1

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 4717	it.: 61	t: 0,64	$\bar{h}$: 0,5768	OBJ: 4305	it.: 95	t: 1,00	$\bar{h}$: 0,5666
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 5553	it.: 72	t: 0,76	$\bar{h}$: 0,5401	OBJ: 4882	it.: 154	t: 1,63	$\bar{h}$: 0,4115

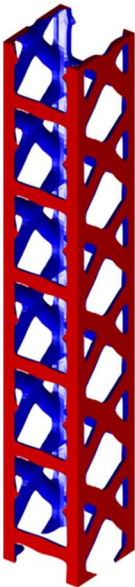
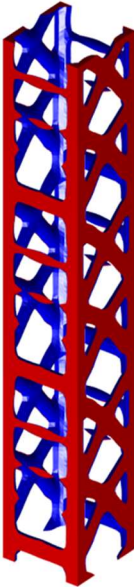
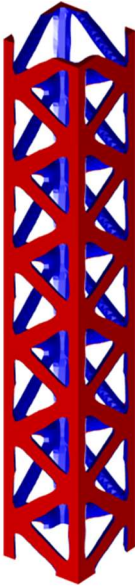
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.2 – Caso C-2

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 4247 it.: 72 t: 0,79 $\bar{h}$: 0,5837				OBJ: 3869 it.: 92 t: 1,04 $\bar{h}$: 0,5842
SIMETRIA 45°				OBJ: 4762 it.: 364 t: 3,94 $\bar{h}$: 0,5560				OBJ: 4473 it.: 103 t: 1,12 $\bar{h}$: 0,5968

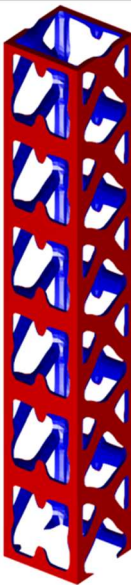
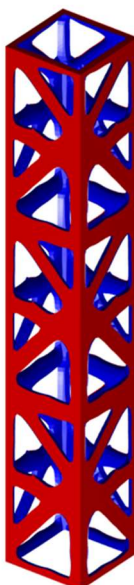
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.3 – Caso C-3

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 2284 it.: 84 t: 0,92 $\bar{h}$: 0,5954				OBJ: 2023 it.: 324 t: 3,52 $\bar{h}$: 0,5883
SIMETRIA 45°				OBJ: 2612 it.: 170 t: 1,83 $\bar{h}$: 0,5648				OBJ: 2391 it.: 109 t: 1,22 $\bar{h}$: 0,6095

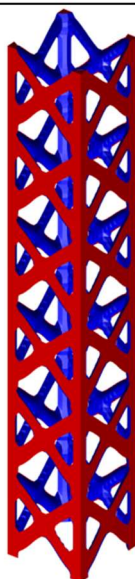
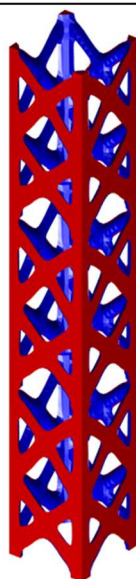
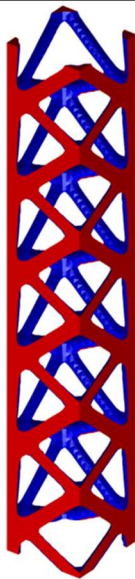
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.4 – Caso C-4

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 358.3	it.: 103	t: 1,21	$\bar{h}$: 0,5746	OBJ: 366	it.: 208	t: 2,27	$\bar{h}$: 0,5902
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 426.5	it.: 184	t: 1,95	$\bar{h}$: 0,5587	OBJ: 469.4	it.: 327	t: 3,68	$\bar{h}$: 0,5984

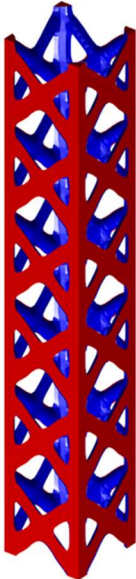
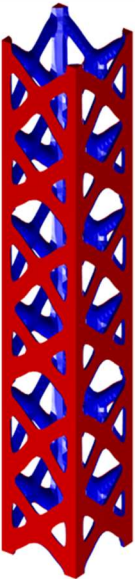
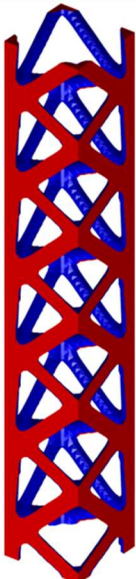
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.5 – Caso C-5

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 7453	it.:134	t: 1,53	$\bar{h}$: 0,4716	OBJ: 7263	it.: 87	t: 0,92	$\bar{h}$: 0,5572
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 6612	it.:140	t: 1,52	$\bar{h}$: 0,5430	OBJ: 4133	it.: 292	t: 3,34	$\bar{h}$: 0,5951

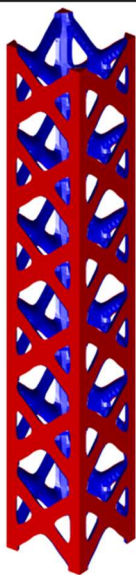
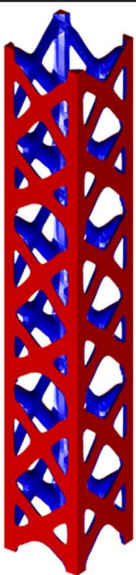
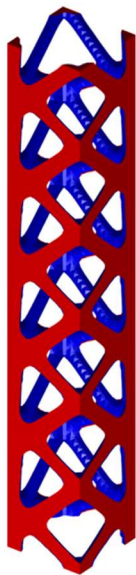
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.6 – Caso C-6

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 7789 it.: 89 t: 0,96 $\bar{h}$ 0,5516				OBJ: 7014 it.: 60 t: 0,68 $\bar{h}$: 0,5621
SIMETRIA 45°				OBJ: 5308 it.: 81 t: 0,86 $\bar{h}$ 0,5873				OBJ: 4695 it.: 258 t: 2,87 $\bar{h}$: 0,5578

Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.7 – Caso C-7

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 4719	it.: 424	t: 4,69	$\bar{h}$: 0,5537	OBJ: 4543	it.: 91	t: 1,01	$\bar{h}$: 0,5590
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 2990	it.: 598	t: 6,63	$\bar{h}$: 0,6000	OBJ: 2910	it.: 662	t: 7,40	$\bar{h}$: 0,6252

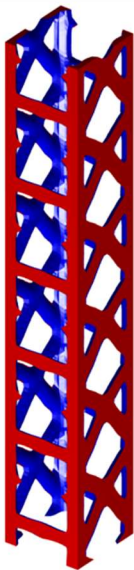
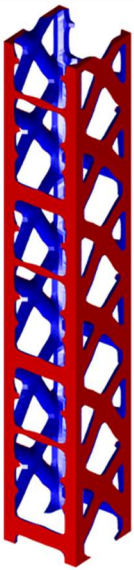
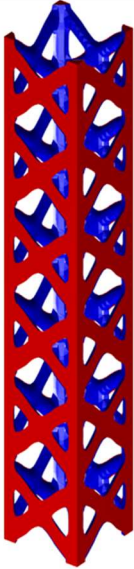
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.8 – Caso C-8

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 1343 it.: 91 t: 0,97 $\bar{h}$: 0,5690				OBJ: 1120 it.: 92 t: ,0.98 $\bar{h}$: 0,5663
				OBJ: 739.8 it.: 62 t: 0,70 $\bar{h}$: 0,6023				OBJ: 734.6 it.: 90 t: 0,98 $\bar{h}$: 0,5943
SIMETRIA 45°				OBJ: 739.8 it.: 62 t: 0,70 $\bar{h}$: 0,6023				OBJ: 734.6 it.: 90 t: 0,98 $\bar{h}$: 0,5943
				OBJ: 1343 it.: 91 t: 0,97 $\bar{h}$: 0,5690				OBJ: 1120 it.: 92 t: ,0.98 $\bar{h}$: 0,5663

Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.9 – Caso C-9

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 4077 it.: 69 t: 0,79 h : 0,5905				OBJ: 3870 it.: 92 t: 0,96 h : 0,5900
				OBJ: 4849 it.: 80 t: 0,90 $\bar{h}$: 0,5586				OBJ: 4799 it.: 75 t: 0,81 $\bar{h}$: 0,6192

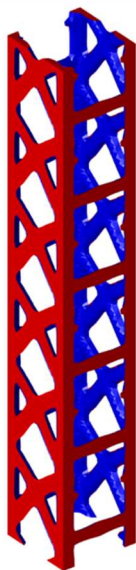
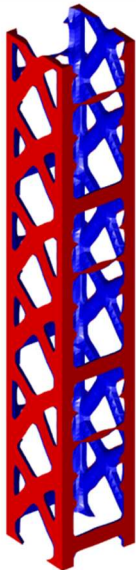
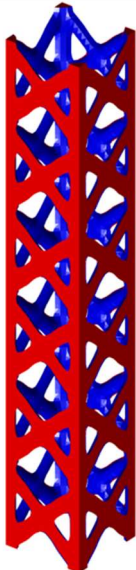
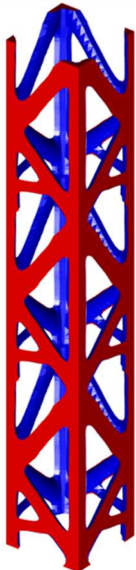
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.10 – Caso C-10

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 127.5	it.: 147	t: 1,64	$\bar{h}$: 0,6041	OBJ: 146.5	it.: 253	t: 2,81	$\bar{h}$: 0,6016
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 153,2	it.: 106	t: 1,12	$\bar{h}$: 0,5998	OBJ: 132.5	it.: 222	t: 2,43	$\bar{h}$: 0,6183

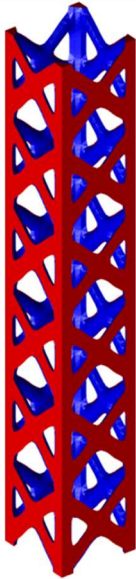
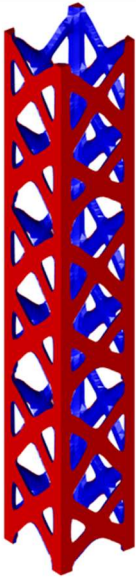
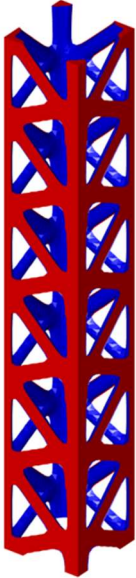
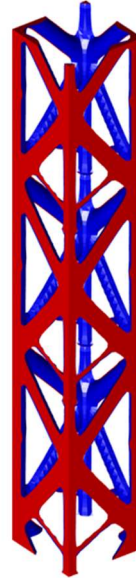
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.11 – Caso C-11

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 4633	it.: 40	t: 0,43	$\bar{h}$ 0,5893	OBJ: 4236	it.: 70	t: 0,79	$\bar{h}$: 0,5839
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 5657	it.: 83	t: 0,91	$\bar{h}$ 0,5581	OBJ: 4745	it.: 106	t: 1,13	$\bar{h}$: 0,5870

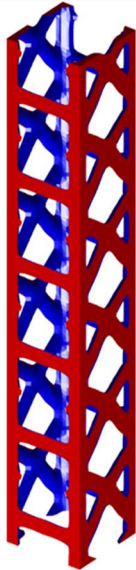
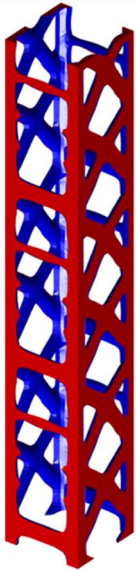
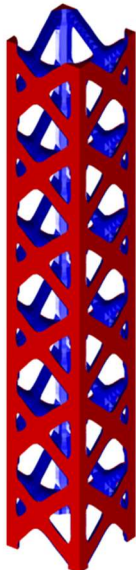
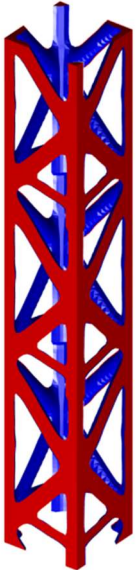
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.12 – Caso C-12

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 7631	it.: 188	t: 2,15	$\bar{h}$: 0,5456	OBJ: 7357	it.: 124	t: 1,35	$\bar{h}$: 0,5490
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 6534	it.: 686	t: 7,38	$\bar{h}$: 0,5699	OBJ: 5478	it.: 753	t: 8,09	$\bar{h}$: 0,5683

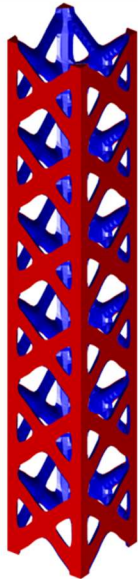
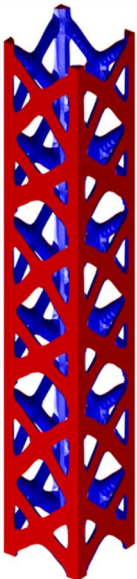
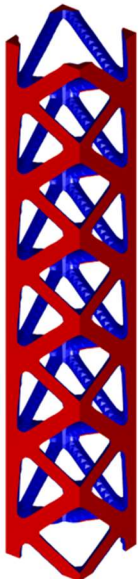
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.13 – Caso C-13

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 3743 it.: 70 t: 0,73 $\bar{h}$: 0,5904				OBJ: 3557 it.: 98 t: 1,03 $\bar{h}$: 0,5866
SIMETRIA 45°				OBJ: 4127 it.: 61 t: 0,68 $\bar{h}$: 0,5241				OBJ: 3904 it.: 126 t: 1,37 $\bar{h}$: 0,5895

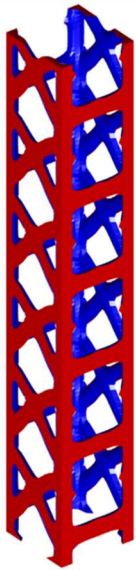
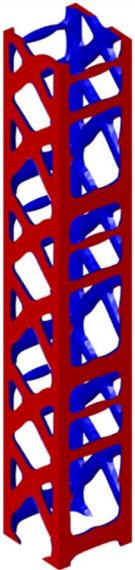
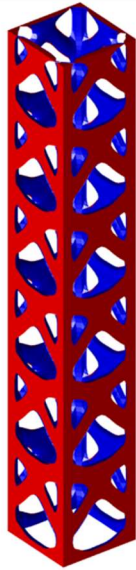
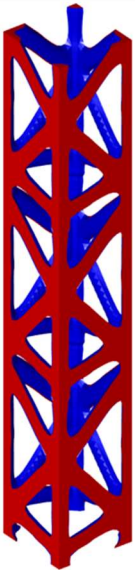
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.14 – Caso C-14

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 4731 it.: 365 t: 4,00 $\bar{h}$: 0,5570				OBJ: 4643 it.: 63 t: 0,69 $\bar{h}$: 0,5586
SIMETRIA 45°				OBJ: 3105 it.: 143 t: 1,54 $\bar{h}$: 0,5880				OBJ: 2961 it.: 358 t: 3,95 $\bar{h}$: 0,5671

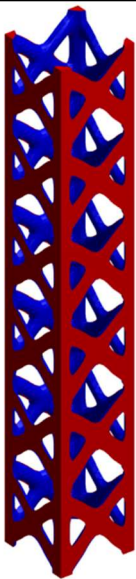
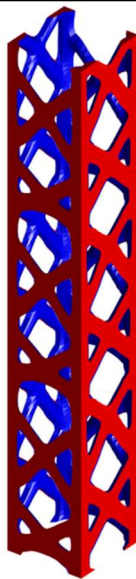
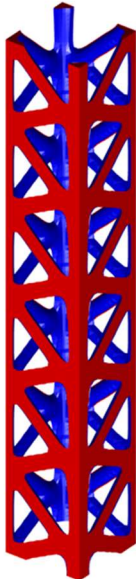
Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.15 – Caso C-15

	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°								
	OBJ: 1193	it.: 139	t: 1,49	$\bar{h}: 0,5950$	OBJ: 1046	it.: 226	t: 2,45	$\bar{h}: 0,5801$
SIMETRIA 45°								
	OBJ: 1236	it.: 133	t: 1,44	$\bar{h}: 0,5903$	OBJ: 1201	it.: 235	t: 2,53	$\bar{h}: 0,6131$

Fonte: O Autor (2023)

Quadro C.16 – Caso C-16

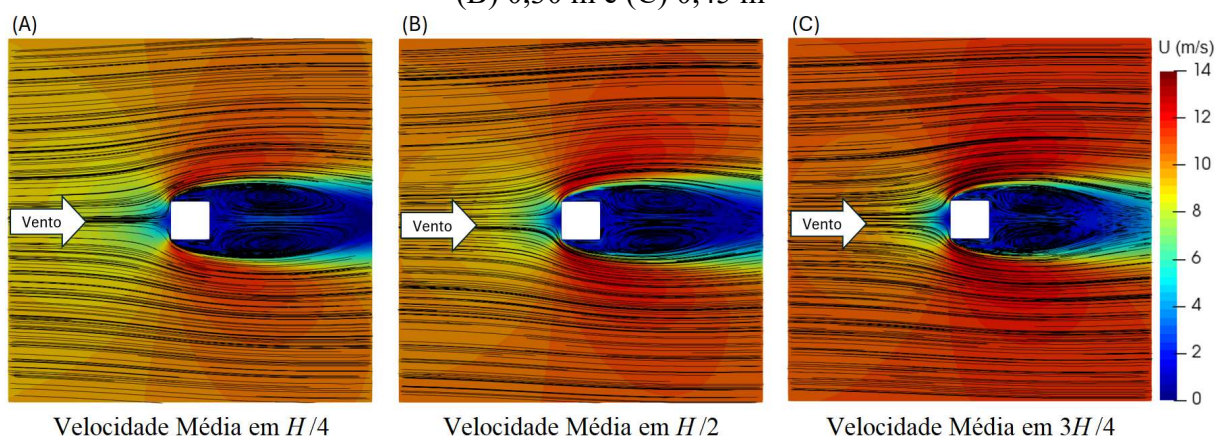
	6 REPETIÇÕES				3 REPETIÇÕES			
SIMETRIA 0°				OBJ: 4334 it.: 353 t: 3,85 $\bar{h}$: 0,5673				OBJ: 4307 it.: 82 t: 0,87 $\bar{h}$: 0,5626
				OBJ: 3713 it.: 455 t: 4,93 $\bar{h}$: 0,5758				OBJ: 3600 it.: 550 t: 6,03 $\bar{h}$: 0,5715

Fonte: O Autor (2023)

APÊNDICE D – VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO EM PLANOS HORIZONTAIS EM TORNO DAS EDIFICAÇÕES

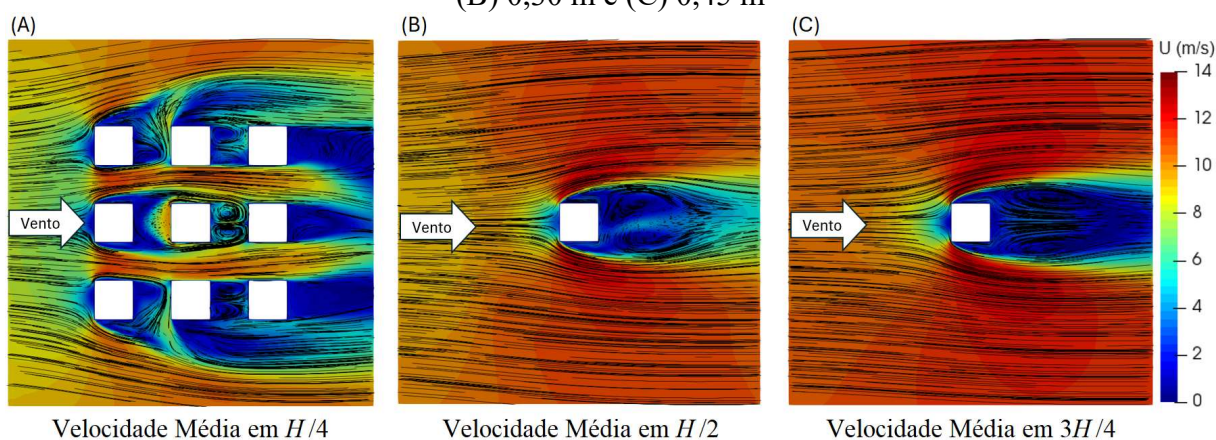
Neste apêndice é apresentada a velocidade média do vento, em torno das edificações analisadas, em planos horizontais em três diferentes alturas para cada caso. As alturas apresentadas são referentes a $H/4$, $H/2$ e $3H/4$, sendo H a altura da edificação principal, igual a 0,6 m. Para todos os casos, a escala de cores varia entre 0 e 14 m/s, facilitando a comparação entre as diferentes alturas e diferentes casos.

Figura 61 – Caso 1: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



Fonte: O Autor (2023)

Figura 62 - Caso 2: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



Fonte: O Autor (2023)

Figura 63 - Caso 3: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m

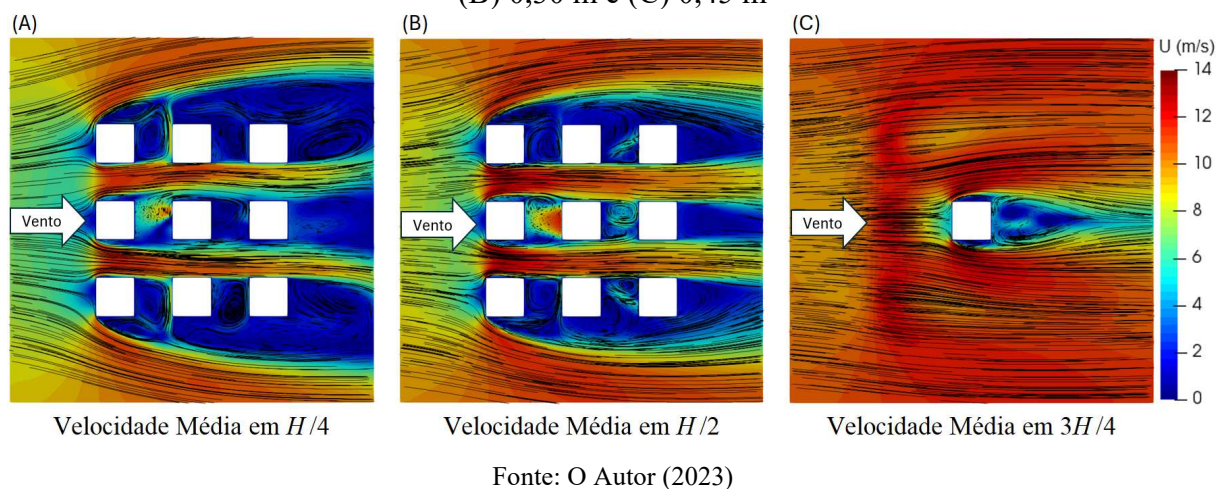


Figura 64 - Caso 4: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m

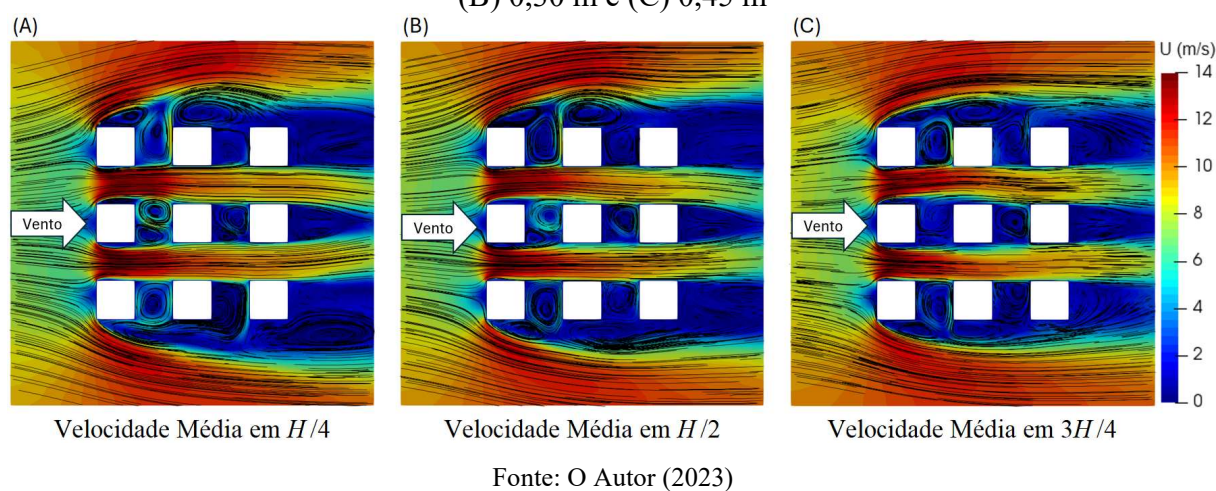


Figura 65 - Caso 5: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m

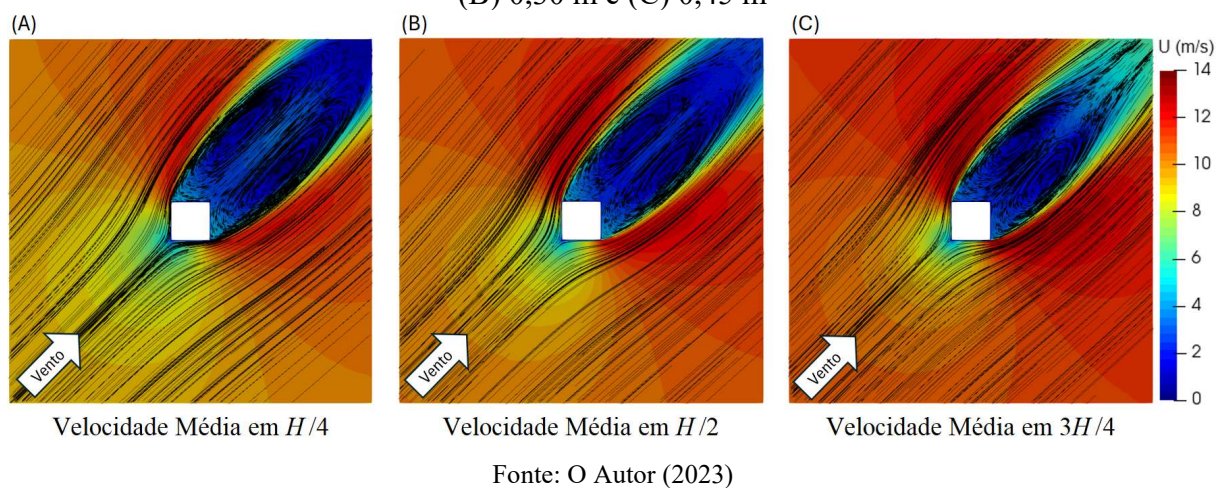
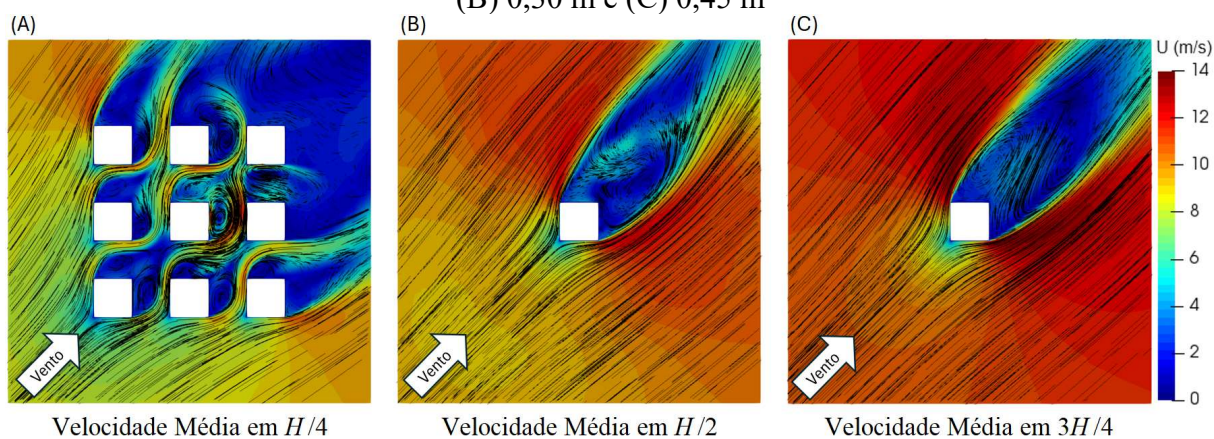
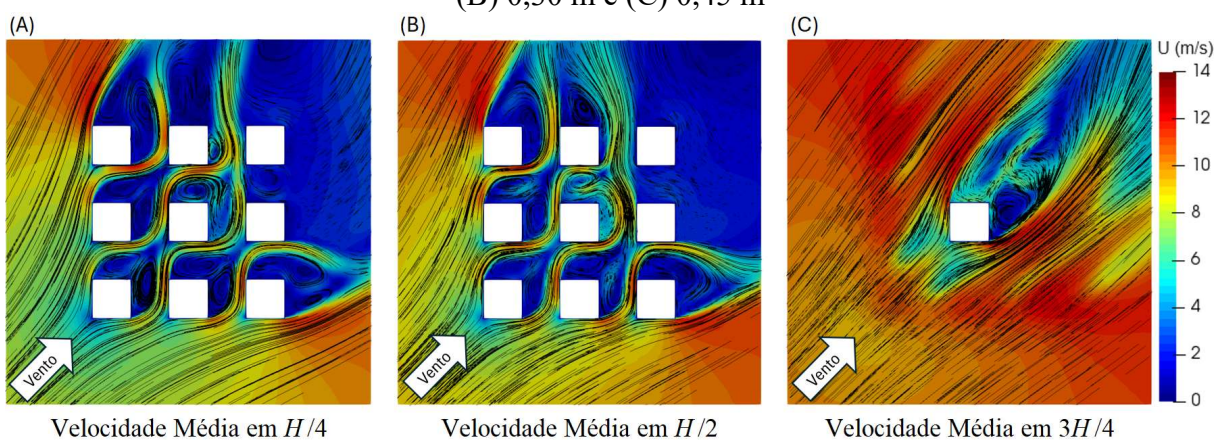


Figura 66 - Caso 6: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



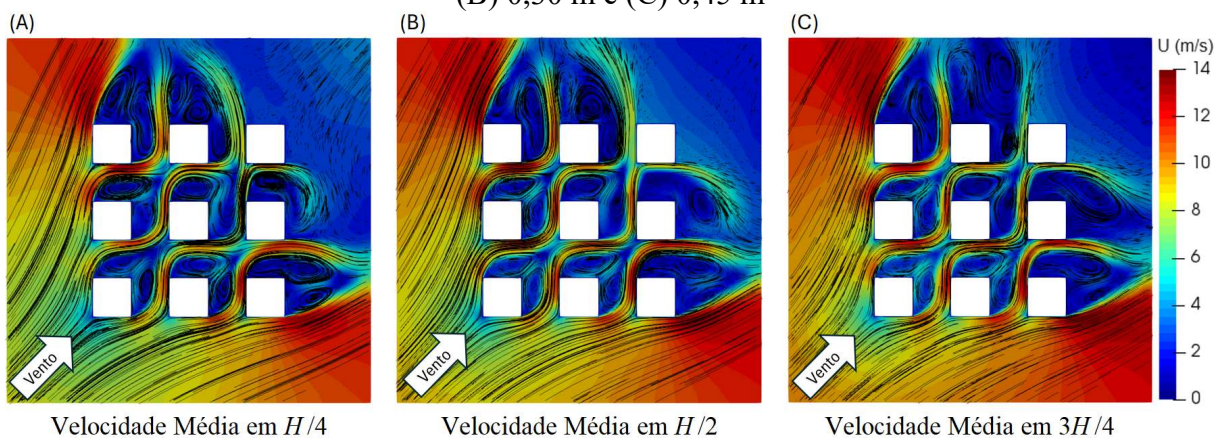
Fonte: O Autor (2023)

Figura 67 - Caso 7: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



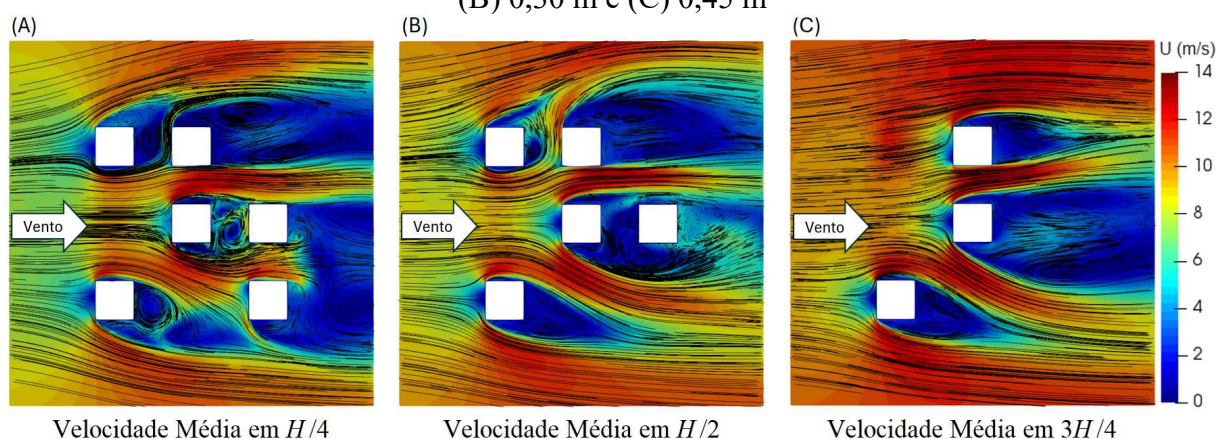
Fonte: O Autor (2023)

Figura 68 - Caso 8: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



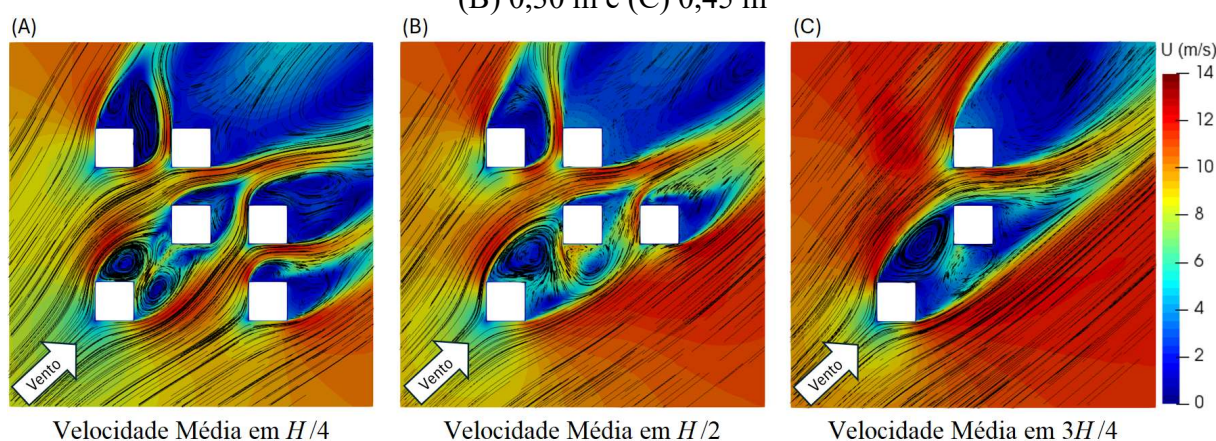
Fonte: O Autor (2023)

Figura 69 - Caso 9: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



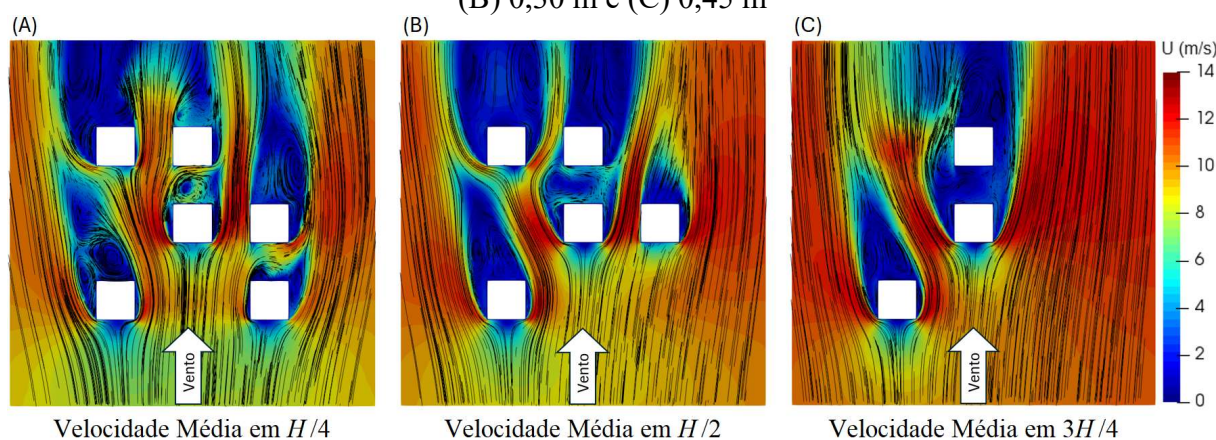
Fonte: O Autor (2023)

Figura 70 - Caso 10: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



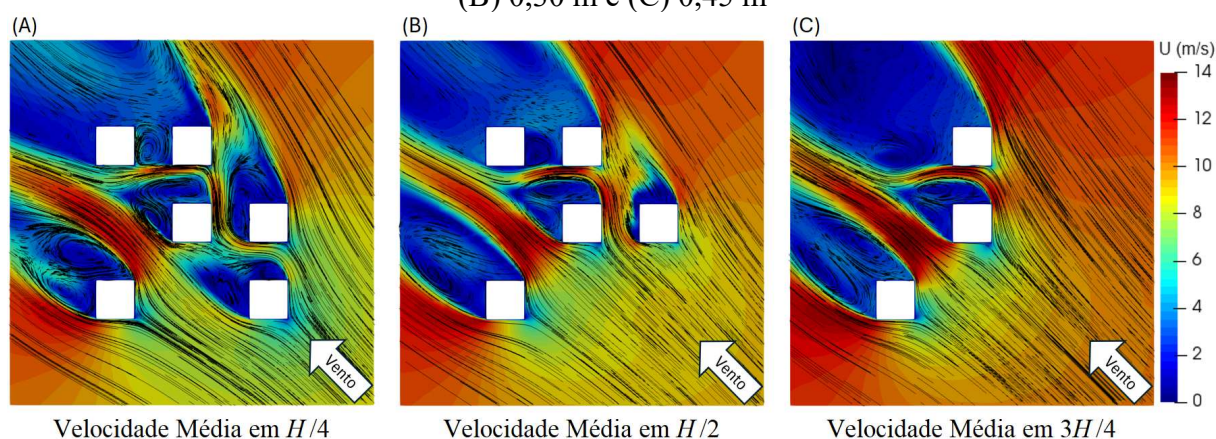
Fonte: O Autor (2023)

Figura 71 - Caso 11: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



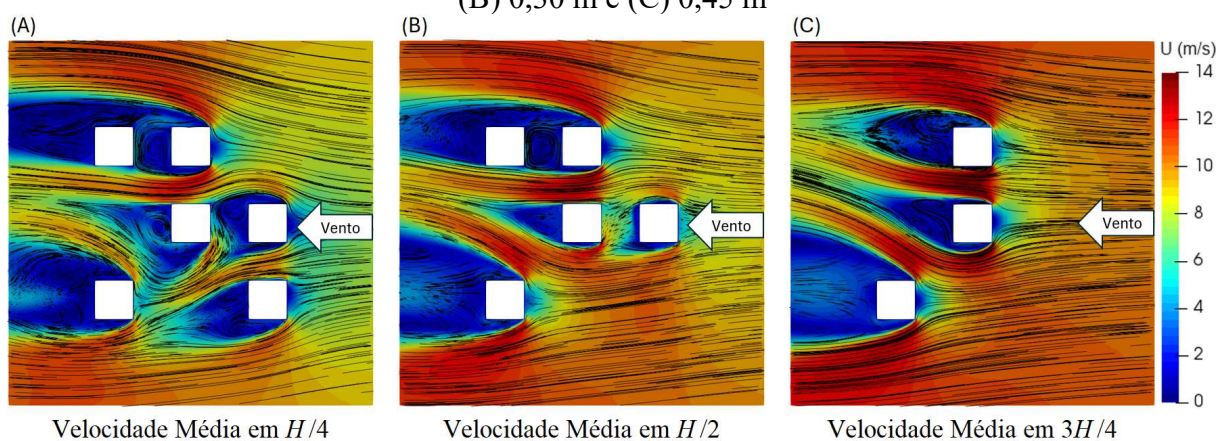
Fonte: O Autor (2023)

Figura 72 - Caso 12: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



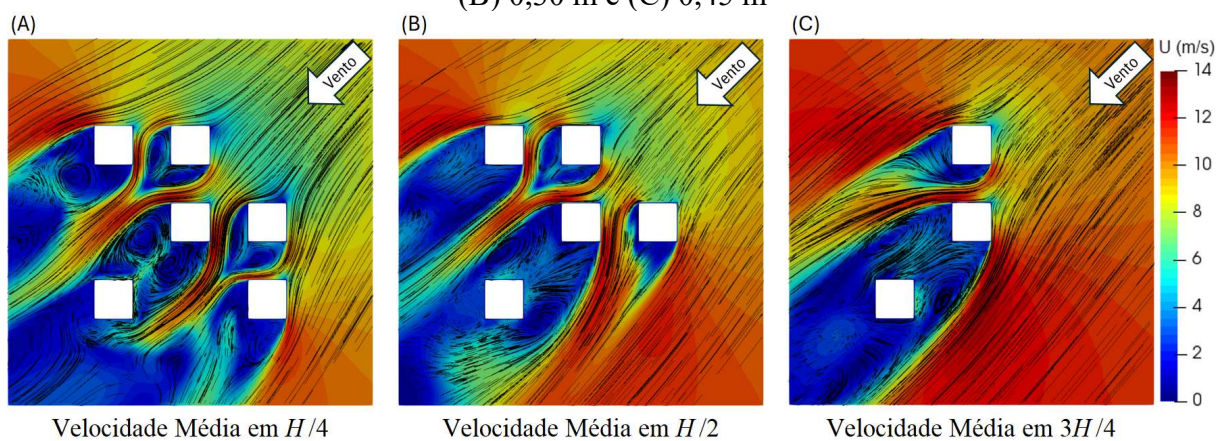
Fonte: O Autor (2023)

Figura 73 - Caso 13: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



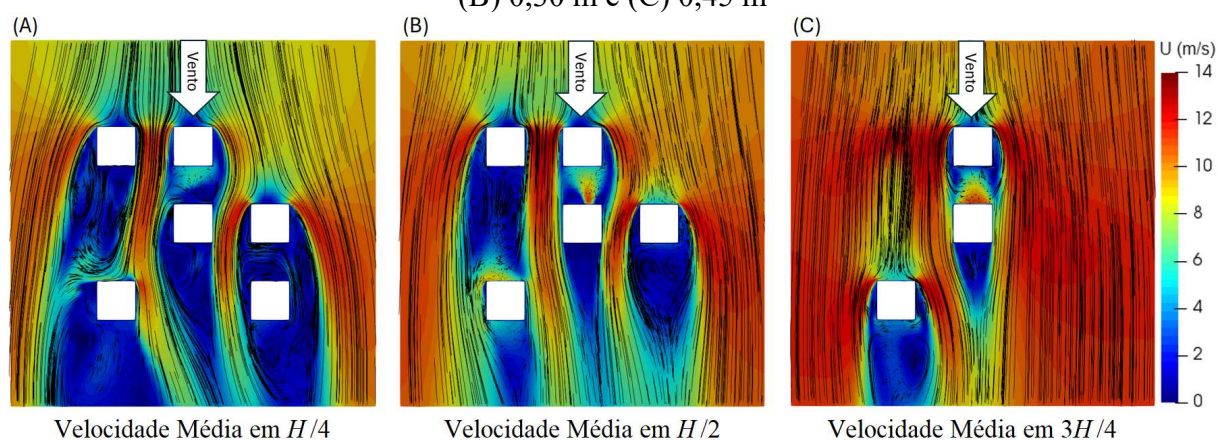
Fonte: O Autor (2023)

Figura 74 - Caso 14: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



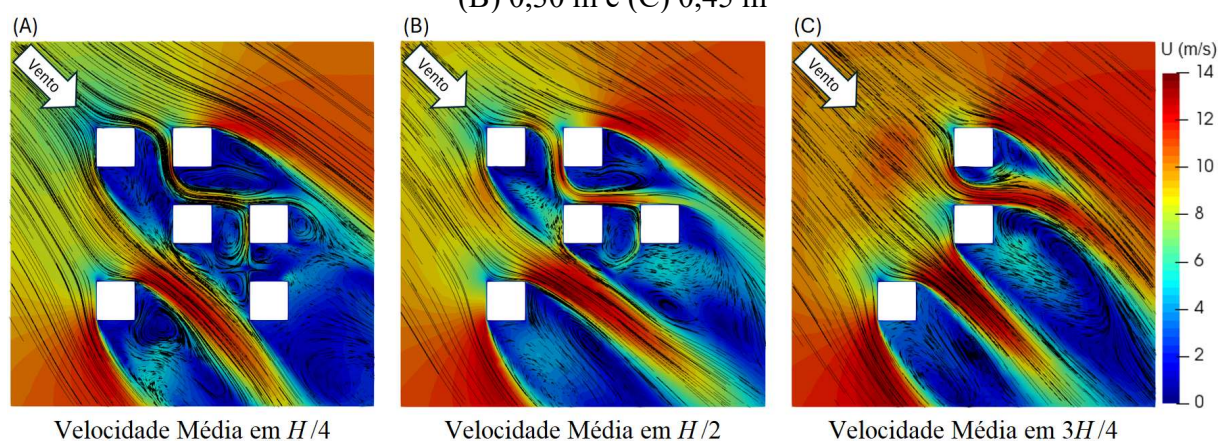
Fonte: O Autor (2023)

Figura 75 - Caso 15: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



Fonte: O Autor (2023)

Figura 76 - Caso 16: velocidade média do vento no plano horizontal na altura de (A) 0,15 m (B) 0,30 m e (C) 0,45 m



Fonte: O Autor (2023)