



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Leandro de Andrade de Deus

Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de edifícios submetidos a cargas de vento via utilização de técnicas de CFD e bases de dados aerodinâmicos com testes em túnel de vento

Rio de Janeiro

2022

Leandro de Andrade de Deus

Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de edifícios submetidos a cargas de vento via utilização de técnicas de CFD e bases de dados aerodinâmicos com testes em túnel de vento



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

D486 Deus, Leandro de Andrade de.
Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de edifícios submetidos a cargas de vento via utilização de técnicas de CFD e bases de dados aerodinâmicos com testes em túnel de vento / Leandro de Andrade de Deus. – 2022.
140f.

Orientador: José Guilherme Santos da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Edifícios - Aerodinâmica - Teses. 3. Ventos - Teses. 4. Conforto humano - Teses. 5. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 6. Fluidodinâmica computacional - Teses. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.042.4

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Leandro de Andrade de Deus

**Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de edifícios submetidos
a cargas de vento via utilização de técnicas de CFD e bases de dados
aerodinâmicos com testes em túnel de vento**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva, DSc. (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro, PhD.
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Rodrigo Burgos, DSc.
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Hermes Carvalho, DSc.
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, consolo, abrigo e ajuda nas adversidades. Durante o processo tanto da graduação quanto do mestrado, se não fosse o refúgio e a paz que Nele encontro, eu não suportaria. Por intermédio Dele pude vivenciar nesses anos de estudo infinitamente mais do que pedi ou imaginei.

Aos meus pais pelo intenso amor, carinho, atenção e por sempre acreditar em mim e no meu potencial.

Ao meu filho, que mesmo sem entender devido a sua pouca idade, falava para eu não parar de estudar.

Aos meus amigos Alan Barile e Leonardo de Souza Bastos que pavimentaram a estrada para que eu pudesse desenvolver esse trabalho, além de estarem sempre dispostos em compartilhar seus conhecimentos comigo, seus respectivos trabalhos de pesquisas possibilitaram que eu chegasse até aqui. Em todas as nossas reuniões, ambos sempre se mostraram grandes incentivadores da minha pesquisa.

Aos meus professores, Prof. Dr. Francisco José Cunha Soeiro, Prof. Dr. Rodrigo Bird Burgos pelas excelentes aulas e ensinamentos decorrer do curso. Ambos demonstraram grande generosidade em compartilhar seus conhecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Guilherme, por todos os conhecimentos passados desde quando ingressei no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Deus é poderoso para fazer infinitamente mais do que tudo
quanto pedimos ou pensamos, mediante seu poder que
atua em nós.

Efésios 3

RESUMO

DEUS, Leandro de Andrade de. *Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de edifícios submetidos a cargas de vento via utilização de técnicas de CFD e bases de dados aerodinâmicos com testes em túnel de vento*. 2022. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022

A modelagem e o cálculo das cargas dinâmicas oriundas da ação do vento sobre edifícios necessitam de metodologias de análise mais elaboradas, levando-se em conta a complexidade do fenômeno, além do caráter absolutamente randômico de seu comportamento. Por outro lado, a interação das ações do vento sobre as fachadas de edifícios é preponderante e deve ser considerada ainda na fase de projeto. Cabe destacar que nas últimas décadas, o projeto e construção de edifícios altos e esbeltos têm produzido sistemas estruturais flexíveis, com baixos valores de frequência natural e, portanto, mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas, quando submetidos a cargas de vento não determinísticas. Assim sendo, este trabalho de pesquisa visa estudar a resposta estrutural dinâmica e avaliar os níveis de conforto humano de um edifício de concreto armado composto por 40 pavimentos, com 150 m de altura, e dimensões de piso de 30 m por 60 m. A análise dinâmica do edifício submetido a cargas dinâmicas não determinísticas de vento é realizada com base no emprego do Método da Representação Espectral (MRE). Por outro lado, para respaldar esta investigação, os coeficientes de pressão do vento foram calculados de maneiras distintas, via utilização de técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD: Computational Fluid Dynamics), a partir do uso de bases de dados aerodinâmicos das plataformas HFPI-TPU e DEDM-HR, com testes em túnel de vento; e, ainda, via emprego da norma brasileira de projeto NBR 6123. O modelo numérico desenvolvido para a análise dinâmica do edifício em estudo adota técnicas usuais de discretização presentes nas simulações do método dos elementos finitos e implementadas no programa ANSYS. As principais conclusões obtidas neste trabalho de pesquisa objetivam alertar os engenheiros civis para modificações importantes associadas à resposta dinâmica da estrutura, quando são utilizadas diferentes estratégias para avaliação dos coeficientes de pressão do vento sobre as fachadas de edifícios.

Palavras-chave: Edifícios altos. Coeficientes de pressão do vento. Dinâmica dos Fluidos Computacional. Análise estrutural dinâmica. Avaliação do conforto humano.

ABSTRACT

DEUS, Leandro de Andrade de. *Vibration analysis and human comfort assessment of buildings subjected to wind loads based on CFD techniques and aerodynamic data bases with wind tunnel tests*. 2022. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The modelling and calculation of the dynamic loads coming from the wind action on buildings require more elaborate analysis methodologies, taking into account the complexity of the phenomenon, in addition to the absolutely random nature of its behaviour. On the other hand, the interaction of wind actions on the buildings facades is preponderant and must be considered in the project phase. It should be noted that in recent decades, the design and construction of tall and slender buildings have produced flexible structural systems, with low natural frequency values and, therefore, more susceptible to excessive vibrations problems, when subjected to non-deterministic wind loads. This way, this research work aims to study the dynamic structural response and assess the human comfort of a 40-storey 150 m high reinforced concrete building with floor dimensions of 30 m by 60 m. The building dynamic analysis when subjected to non-deterministic dynamic wind loads is performed based on the use of the Spectral Representation Method (SRM). On the other hand, to support this investigation, the wind pressure coefficients were calculated through different ways, considering Computational Fluid Dynamics (CFD: Computational Fluid Dynamics) techniques, using aerodynamic databases from HFPI-TPU and DEDM-HR platforms, with wind tunnel tests; and also utilising the Brazilian design code NBR 6123. The numerical model developed for the reinforced concrete building dynamic analysis, adopted the usual mesh refinement techniques present in finite element method simulations and implemented in the ANSYS program. The main conclusions obtained in this research work aim to alert the civil engineers to the relevant modifications associated with the structure dynamic response, when different strategies are used to assess the wind pressure coefficients on the building's facades.

Keywords: High buildings. Wind pressure coefficients. Computational Fluid Dynamics. Dynamic structural analysis. Human comfort assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de edifícios com alturas superiores a 100 m no Brasil.	19
Figura 2 - Torres Yachthouse Residence - Balneário Camboriú - Santa Catarina.....	20
Figura 3 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) (Fonte: NBR 6123, 1988).	35
Figura 4 - Fator topográfico S_1 (z) (Fonte: NBR 6123, 1988).	36
Figura 5 - Fluxograma para cálculo das cargas de vento pelo método NBR 6123.	42
Figura 6 - Tela de seleção da geometria da edificação (DEDM-HRP).....	44
Figura 7 - Parâmetros da geometria e características do vento (http://evovw.ce.nd.edu/DEDM_HRP/DEDMP_INT_v3_4evo.html).....	45
Figura 8 - Pressão no domínio do tempo na direção X (DEDM-HRP).....	46
Figura 9 - Pressão no domínio do tempo na direção Y (DEDM-HRP).....	47
Figura 10 - Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método DEDM-HRP.	48
Figura 11 - Página inicial para escolha da geometria e perfil vertical (TPU-DB).....	50
Figura 12 - Escolha das relações geométricas (TPU-DB).....	51
Figura 13 - Página de resultados (TPU-DB).....	51
Figura 14 - Localização dos pontos instrumentados (TPU-DB).	52
Figura 15 - Dados contendo as pressões para ângulos variando entre 0° e 100°.	52
Figura 16 - Exemplo gráfico de isovalores das pressões médias (TPU-DB).....	53
Figura 17 - Pressão no domínio do tempo para o ponto 96 (HFPI-TPU).....	55
Figura 18 - Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método HFPI-TPU.....	56
Figura 19 - Domínio de cálculo para a simulação (Autodesk CFD User Guide).	59
Figura 20 - Túnel de vento virtual (CFD).....	60
Figura 21 - Configuração das faces do domínio de cálculo (CFD).....	61
Figura 22 - Variação da velocidade do vento ao longo da altura do edifício.	62
Figura 23 - Comportamento do fluxo de vento.	62
Figura 24 - Localização dos pontos instrumentados (CFD).....	64
Figura 25 - Variação da velocidade do vento ao longo do tempo.	65
Figura 26 - Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método CFD.	67
Figura 27 - Planta de locação dos pilares do modelo estrutural.....	69
Figura 28 - Planta estrutural do modelo.....	69
Figura 29 - Modelo estrutural.....	70

Figura 30 - Modelo estrutural discretizado em elementos finitos.	71
Figura 31 - 1° Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{01} = 0,309$ Hz.	78
Figura 32 - 2° Modo (Flexão em torno do eixo X): $f_{02} = 0,325$ Hz.	78
Figura 33 - 3° Modo (Torção em torno do eixo Y): $f_{03} = 0,416$ Hz.	78
Figura 34 - 4° Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{04} = 0,965$ Hz.	79
Figura 35 - 5° Modo (Flexão em torno do eixo X): $f_{05} = 1,186$ Hz.	79
Figura 36 - 6° Modo (Torção em torno do eixo Y): $f_{06} = 1,288$ Hz.	79
Figura 37 - 7° Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{07} = 1,753$ Hz.	80
Figura 38 - 8° Modo (Torção em torno do eixo Y): $f_{08} = 2,303$ Hz.	80
Figura 39 - 9° Modo (Flexão em torno do eixo X): $f_{09} = 2,415$ Hz.	80
Figura 40 - 10° Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{10} = 2,548$ Hz.	81
Figura 41 - Densidade espectral da velocidade do vento, Soltys (2012).	81
Figura 42 - Análise harmônica obtida com aplicação de carga de vento longitudinal.	84
Figura 43 - Análise harmônica obtida com aplicação de carga de vento transversal.	84
Figura 44 - Percepção humana aos efeitos da vibração (HIRSCH & BACHMANN,1995).	87
Figura 45 - Curvas de avaliação para vibrações induzidas pelo vento em edifícios em direções horizontais, para um período de retorno de 1 ano – ISO 10137 (2007).	88
Figura 46 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (NBR 6123).	94
Figura 47 - Deslocamento na direção X - Série 1 (NBR 6123).	94
Figura 48 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (NBR 6123)...	94
Figura 49 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (NBR 6123).	95
Figura 50 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (NBR 6123).	95
Figura 51 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (DEDM-HRP).	97
Figura 52 - Deslocamento na direção X - Série 1 (DEDM-HRP).	97
Figura 53 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (DEDM-HRP).	98
Figura 54 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (DEDM-HRP).	98
Figura 55 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (DEDM-HRP).	99
Figura 56 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (HFPI-TPU).	100
Figura 57 - Deslocamento na direção X - Série 1 (HFPI-TPU).	100

Figura 58 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (HFPI-TPU).	101
Figura 59 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (HFPI-TPU).....	101
Figura 60 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (HFPI-TPU).....	102
Figura 61 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (CFD).	103
Figura 62 - Deslocamento na direção X - Série 1 (CFD).	103
Figura 63 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (CFD).	103
Figura 64 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (CFD).	104
Figura 65 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (CFD).	104
Figura 66 - Representação das ações do vento no sistema estrutural do edifício...	106
Figura 67 - Comportamento do vento sobre o modelo estrutural.	107
Figura 68 - Coeficientes de pressão obtidos através do método CFD.....	107
Figura 69 - Avaliação dos deslocamentos provocados pela força do vento.....	108
Figura 70 - Avaliação das acelerações provocadas pela força do vento.....	109
Figura 71 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2020).	122
Figura 72 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2020).	123
Figura 73 - Convergência do tamanho da malha de elementos finitos.	124
Figura 74 – Convergência modal para deslocamento direção Z.	124
Figura 75 – Convergência modal para aceleração na direção Z.....	125
Figura 76 – Convergência modal para deslocamento direção X.....	125
Figura 77 – Convergência modal para aceleração na direção X.	125
Figura 78 - Aplicação das cargas de vento no sentido 0°.....	137
Figura 79 - Unidade de área para aplicação das cargas de vento.....	138
Figura 80 - Aplicação da cargas de vento concentradas.	138
Figura 81 - Força longitudinal.	139
Figura 82 - Força transversal.....	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos (Fonte: NBR 6123, 1988).....	38
Tabela 2 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 (Fonte: NBR 6123, 1988).	39
Tabela 3 - Parâmetros de projeto utilizados de acordo com a Norma Brasileira NBR 6123.....	40
Tabela 4 - Coeficientes de pressão e de forma, externos, edificações de planta retangular.....	41
Tabela 5 - Parâmetros de entrada utilizados pelo DEDM-HRP.....	44
Tabela 6 - Resumo das cargas verticais aplicadas sobre a estrutura.....	72
Tabela 7 - Resumo das cargas estáticas horizontais aplicadas sobre a estrutura. ...	73
Tabela 8 - Deslocamento horizontal provocado pelas cargas de vento longitudinais.	74
Tabela 9 - Deslocamento horizontal provocado pelas cargas de vento transversais.	74
Tabela 10 - Coeficientes ψ_1 e ψ_2 para ações variáveis.....	75
Tabela 11 - Frequências naturais e modos de vibração.	77
Tabela 12 - Valores limites de aceleração (HIRSCH & BACHMANN,1995).....	87
Tabela 13 – Comparativo dos coeficientes de pressão no barlavento.	91
Tabela 14 – Comparativo dos coeficientes de pressão na lateral direita.....	91
Tabela 15 – Comparativo dos coeficientes de pressão no sotavento.....	92
Tabela 16 – Comparativo dos coeficientes de pressão na lateral esquerda.	92
Tabela 17 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método NBR 6123.....	96
Tabela 18 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método DEDM-HRP.....	99
Tabela 19 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método HFPI-TPU.	102
Tabela 20 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método CFD.	105
Tabela 21 – Valores percentuais encontrados para o vento longitudinal.	109
Tabela 22 – Valores percentuais encontrados para o vento transversal.	110

Tabela 23 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.	126
Tabela 24 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.	127
Tabela 25 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.	128
Tabela 26 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.	129
Tabela 27 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do HFPI-TPU.	130
Tabela 28 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do HFPI-TPU.	131
Tabela 29 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do HFPI-TPU.	132
Tabela 30 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.....	133
Tabela 31 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.....	134
Tabela 32 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.....	135
Tabela 33 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Swanson Analysis Systems
AISC	American Institute of Steel Construction
ASCE	American Society of Civil Engineers
NBR	Norma Brasileira
DEDM-HRP	Data-Enabled Design Model for high-rise buildings driven by pressure
HFBB	High Frequency Base Balance
HFPI	High Frequency Pressure Integration
ISO	International Organization for Standardization
MATLAB	MATHWORKS Inc.
MEF	Método dos Elementos Finitos
RMS	Root Mean Square (Valor Quadrático Médio)
TPU	Tokyo Polytechnic University
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{m\acute{a}x}$	aceleração máxima
a_{l_p}	aceleração longitudinal de pico
a_{l_RMS}	aceleração longitudinal RMS
a_{t_p}	aceleração transversal de pico
a_{t_RMS}	aceleração transversal RMS
b	parâmetro meteorológico
c	amortecimento estrutural
CFD	Computational Fluid Dynamics
C_p	coeficiente de pressão
E_c	módulo de elasticidade do concreto
E_s	módulo de elasticidade do aço
f	frequência em Hz
f_{ck}	resistência característica à compressão do concreto
f_j	frequência correspondente ao modo j
$F(t)$	força do vento em função do tempo
S_1	fator topográfico
S_2	fator de rugosidade do terreno
S_3	fator estatístico
S_v	densidade expectral
t	tempo
u	deslocamento na cota z
u^*	velocidade de fricção
V_{10}	velocidade do vento na cota de 10 metros acima do terreno
$V(t)$	parcela flutuante da velocidade do vento
$V_T(t)$	velocidade do vento
V_0	velocidade básica do vento
$V(z)$	parcela média da velocidade do vento
X	frequência adimensional
α	taxa de contribuição da matriz de massa
β	taxa de contribuição da matriz de rigidez

Δf	incremento de frequência
Δt	incremento de tempo
γ_c	peso específico do concreto
γ_s	peso específico do aço
γ_z	coeficiente de instabilidade de 2ª ordem
ν	coeficiente de Poisson
θ_i	ângulo de fase aleatório
μ	média da amostra
σ	desvio padrão da amostra
ω_{0i}	frequência natural circular da estrutura em rad/s
ξ	taxa de amortecimento
p	pressão
s	segundo
t	variável tempo
V_0	velocidade básica do vento
V_k	velocidade característica do vento
$\bar{V}(z)$	velocidade média na direção longitudinal
$v(z, t)$	parcela flutuante do vento na direção longitudinal
$V(z, t)$	velocidade em função da altura e do tempo
λ_L	fator de escala para geometria
λ_v	fator de escala para velocidade
λ_t	fator de escala para o tempo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	19
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
1.1 Introdução	25
1.2 Generalidades	25
2 NBR 6123 - FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES	34
2.1 Introdução	34
2.2 Velocidade básica do vento (V_0).....	34
2.3 Fator topográfico (S_1)	36
2.4 Fator de rugosidade do terreno (S_2).....	36
2.5 Fator estatístico (S_3).....	38
2.6 Velocidade características do vento (V_k)	39
2.7 Pressão dinâmica do vento.....	40
2.8 Coeficiente de pressão	41
2.9 Força do vento.....	42
2.10 Fluxograma para cálculo das cargas de vento pelo método NBR 6123	42
3 BASE DE DADOS AMERICANA (DEDM-HRP)	43
3.1 Introdução	43
3.2 Dimensões da estrutura	43
3.3 Parâmetros de entrada	44
3.4 Normalização da carga de vento gerada pelo método DEDM-HRP	45
3.5 Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método DEDM-HRP	47
4 BASE DE DADOS DO JAPÃO (HFPI-TPU)	49
4.1 Introdução	49
4.2 Escolha da geometria.....	50
4.3 Normalização da carga de vento gerada pelo método HFPI-TPU	53
4.4 Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método HFPI-TPU	55
5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	57
5.1 Introdução	57
5.2 Domínio de cálculo.....	59
5.3 Materiais.....	60

5.4	Condições de contorno	60
5.5	Pontos de monitoração	64
5.6	Força do vento	65
5.7	Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método CFD.....	66
6	MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO	68
6.1	Introdução	68
6.2	Hipóteses simplificadoras	68
6.3	Características físicas e geométricas do modelo teórico.....	69
6.4	Modelagem numérica do modelo	70
7	ANÁLISE ESTÁTICA.....	72
7.1	Introdução	72
7.2	Descrição dos carregamentos	72
7.3	Deslocamentos translacionais	75
8	ANÁLISE MODAL.....	76
8.1	Introdução	76
8.2	Formulação matemática.....	76
8.3	Frequências naturais e modos de vibração	77
8.4	Coefficientes de amortecimento estrutural	82
9	ANÁLISE HARMÔNICA	83
9.1	Introdução	83
9.2	Resposta estrutural	83
10	CONFORTO HUMANO.....	85
10.1	Introdução	85
10.2	Critério de avaliação segundo a NBR 6118 (2004).....	85
10.3	Critério de avaliação segundo a NBR 6123 (1988).....	86
10.4	Critério de avaliação segundo Hirsch & Bachmann (1995)	86
10.5	Crítérios de Avaliação segundo a ISO 10137 (2007).....	87
10.6	Considerações finais	89
11	ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA	90
11.1	Introdução	90
11.2	Análise dos coeficientes de pressão	90
11.3	Análise dinâmica da estrutura: NBR 6123	93
11.4	Análise dinâmica da estrutura: Base de dados DEDM-HRP	96

11.5	Análise dinâmica da estrutura: Base de dados HFPI-TPU	99
11.6	Análise dinâmica da estrutura: Computational Fluid Dynamics - CFD	102
11.7	Avaliação do conforto humano	108
12	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
12.1	Aspectos gerais	111
12.2	Análise estática.....	111
12.3	Análise modal	112
12.4	Análise harmônica	112
12.5	Análise dos coeficientes de pressão	113
12.6	Análise estrutural dinâmica e avaliação do conforto humano do edifício	114
12.7	Sugestões para trabalhos futuros.....	116
	REFERÊNCIAS	117
	APÊNDICE A - ELEMENTOS UTILIZADOS NO ANSYS	122
	APÊNDICE B - CONVERGÊNCIA NUMÉRICA	124
	APÊNDICE C - COEFICIENTES DE PRESSÃO: PROPOSTO PELA NBR 6123 ...	126
	APÊNDICE D - COEFICIENTES DE PRESSÃO: BASE DE DADOS HFPI-TPU	130
	APÊNDICE E - COEFICIENTES DE PRESSÃO: MODELAGEM VIA CFD	133
	APÊNDICE F - APLICAÇÃO DAS CARGAS DE VENTO SOBRE A ESTRUTURA	137

INTRODUÇÃO

A engenharia civil é um setor em constante evolução, os engenheiros de projeto devem estar aptos tecnicamente para transformar em realidade projetos arquitetônicos cada vez mais ousados. Dentro deste contexto, a construção de edifícios altos é um exemplo muito claro desse processo de transformação, em que inúmeras estruturas, imponentes, de alturas bastante elevadas, podem ser observadas em várias partes do mundo.

Edifícios altos no Brasil já se tornaram rotina para a engenharia estrutural. Atualmente, não é raro ergueram-se prédios com altura acima de 100 metros nas principais regiões brasileiras, conforme ilustrado na Figura 1. O número de edifícios altos vem crescendo exponencialmente no país e cidades tais como Balneário Camboriú/SC, Recife/PE, Goiânia/GO, João Pessoa/PB, Salvador/BA e Belém/PA, atualmente, possuem inúmeros edifícios com mais de 120 metros de altura.



Infinity Coast Tower
Balneário Camboriú - SC
Altura = 235 m



Órion Business
Goiânia - GO
Altura = 192 m



Epic Tower
Balneário Camboriú - SC
Altura = 191 m



Tour Geneve
João Pessoa - PB
Altura = 182 m

Figura 1 - Exemplos de edifícios com alturas superiores a 100 m no Brasil.

Em referência aos prédios mais altos do Brasil, podem ser evidenciados os projetos localizados no município de Balneário Camboriú, em Santa Catarina/SC. As edificações concentram-se na orla da cidade, chamando a atenção de turistas e moradores. Destacam-se as torres Yachthouse Residence, ilustrada na Figura 2, que

atualmente detém o título de prédio mais alto do Brasil com 281 metros de altura, tornando-se o maior residencial da América Latina.



Figura 2 - Torres Yachthouse Residence - Balneário Camboriú - Santa Catarina.

Precisamos enfatizar que esta tendência arquitetônica, associada ao projeto e construção de edifícios altos, conduziu a sistemas estruturais bastante esbeltos e flexíveis com valores de frequências naturais muito baixos; e, portanto, mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas, causados pela ação do vento, principalmente relacionadas ao desconforto humano.

Dentro deste âmbito, torna-se obrigatória a correta caracterização do modelo estrutural e do carregamento de vento utilizados no projeto. Usualmente, nas verificações e cálculos estruturais de edifícios, as cargas devido à ação do vento são consideradas puramente estáticas. Todavia, nos casos de projetos de edifícios altos, tal consideração pode ser discutível, pois a ação do vento tem como natureza um caráter dinâmico. Seguindo este conceito, faz-se necessário que a análise estrutural dinâmica e as verificações de conforto humano sejam realizadas mediante a modelagem mais realista possível das ações do vento. Para tal, as cargas de vento

devem ser consideradas com essência não determinística, além de ser importante um adequado tratamento probabilístico dos resultados obtidos (SANTOS, 2018).

Além disso, pesquisas recentes mostram que a ação transversal do vento (across-wind) pode vir a produzir uma resposta estrutural dinâmica superior em relação à ação longitudinal das cargas de vento (along-wind), podendo vir a ser a determinante para avaliações de estado limite de serviço (TOZAN, 2013). Ressalta-se, ainda, que a maioria das normas e recomendações de projeto apresentam resultados considerados aceitáveis para as respostas longitudinais, porém para a direção transversal de ação do vento, ainda persiste a falta de uma metodologia de análise aceita internacionalmente (HOLMES, 2014). Atualmente, esta lacuna é preenchida com base na utilização de ensaios experimentais realizados em túnel de vento, que representam um aumento considerável em relação aos custos e prazos finais do projeto.

Considerando-se todos os aspectos levantados anteriormente, este trabalho de pesquisa se propõe a estudar a resposta estrutural estática e dinâmica de edifícios altos. Para tal, os pontos principais desta investigação são os seguintes, a saber: análise para o cálculo das ações dinâmicas não determinísticas do vento em relação à direção longitudinal (along-wind) e direção transversal (across-wind) através dos métodos estabelecidos pela norma NBR 6123, Computational fluid dynamics (CFD), Data-Enabled Design Model for high-rise buildings driven by pressure datasets (DEDM-HRP) e High Frequency Pressure Integration (HFPI-TPU); estabilidade global da estrutura mediante ao deslocamento máximo no topo do edifício previsto pela norma NBR 6118; e, finalmente, avaliação do conforto humano dos edifícios, mediante cálculo dos valores das acelerações de pico e RMS.

Motivação

Considerando-se a análise estrutural de edifícios, estes devem ser projetados de maneira a atender os Estados Limites Últimos (ELU), objetivando evitar o colapso estrutural, e aos Estados Limites de Serviço (ELS), visando atender aos critérios de utilização e conforto dos ocupantes da edificação. Tendo como foco o projeto estrutural de edifícios altos, o atendimento aos Estados Limites de Serviço levando-

se em conta apenas os resultados de uma análise estática para verificação dos valores dos deslocamentos translacionais horizontais máximos pode não ser suficiente. Por outro lado, a verificação do conforto humano a partir dos valores das acelerações de pico pode vir a ser determinante, uma vez que estas edificações apresentam como características principais, elevados índices de esbeltez, além de valores de frequências naturais muito baixas, e taxas de amortecimento estrutural em níveis muito pequenos; e, conseqüentemente, estão sujeitas a possíveis problemas de vibrações excessivas induzidas pelas ações do vento. Neste sentido, a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa surgiu da necessidade de contribuir, de acordo com este contexto, com base na investigação e avaliação de outras metodologias de análise, além da norma brasileira NBR 6123 vigente, que possam vir a auxiliar os engenheiros e projetistas, através do desenvolvimento de análises estruturais mais próximas da realidade, no que diz respeito ao estudo do comportamento dinâmico e, bem como, avaliações de conforto humano tendo em mente o projeto de edifícios altos, quando submetidos aos efeitos aleatórios das cargas de vento.

Objetivos

Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal a análise de vibrações e avaliação do conforto humano de edifícios submetidos a cargas de vento via utilização de técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD: Computational Fluid Dynamics) e bases de dados aerodinâmicos com testes em túnel de vento. Para tal, os carregamentos oriundos das ações do vento sobre as fachadas das edificações são gerados via modelagem matemática não determinística, com base no emprego do Método da Representação Espectral (MRE). Desta maneira, para respaldar o desenvolvimento desta investigação, os coeficientes de pressão do vento são calculados de maneiras completamente distintas, inicialmente, através do emprego da modelagem utilizando-se CFD (Computational Fluid Dynamics), em seguida, via utilização de bases de dados aerodinâmicos das plataformas HFPI-TPU e DEDM-HRP, com testes experimentais realizados em túnel de vento; e, também, a partir uso da norma brasileira tradicional de projeto NBR 6123. De acordo com este

contexto, a resposta estrutural dinâmica e os níveis de conforto humano serão avaliados através do cálculo dos valores dos deslocamentos translacionais horizontais máximos e das acelerações de pico. Resumidamente, as principais contribuições que norteiam o desenvolvimento desta pesquisa podem ser sintetizadas da seguinte forma:

a) Estudo das metodologias CFD, DEDM-HRP, HFPI-TPU e NBR 6123, para o cálculo dos coeficientes de pressão do vento e posterior geração das cargas dinâmicas não determinísticas atuantes sobre as fachadas das edificações.

b) Avaliação quantitativa e qualitativa acerca do cálculo dos coeficientes de pressão oriundos das cargas de vento, mediante a utilização de metodologias de análise distintas.

c) Verificações sobre os Estados Limites de Serviço (ELS), nomeadamente, vibrações excessivas e conforto humano, via cálculo dos deslocamentos e acelerações máximas da estrutura, tendo em mente as diferenças existentes no cálculo dos coeficientes de pressão para cada metodologia de análise distinta, além de comparações com os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto.

Estrutura da Dissertação

Na introdução, é feita uma abordagem prévia do tema em questão e sua relevância é ressaltada. Em seguida, são apresentadas as motivações e os objetivos do estudo.

No primeiro capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica por meio da citação de diversos trabalhos, com seus respectivos autores, que contribuíram para o desenvolvimento do conhecimento a respeito de edifícios altos, principais características e fatores que influenciam na avaliação estrutural.

No segundo capítulo, apresenta uma fundamentação teórica, em que se descrevem os primeiros estudos de vento e a abordagem do método exposto na NBR 6123 (ABNT, 1988).

O terceiro capítulo, apresenta o método assistido por base de dados, o Data-Enabled Design Model for high-rise buildings driven by pressure datasets (DEDM-HRP). É um sistema online disponibilizado pela Universidade de Notre Dame (Indiana, EUA).

O quarto capítulo, apresenta o método assistido por base de dados (Aerodynamic Database of High-rise Buildings), conhecido como High Frequency Pressure Integration (HFPI-TPU), desenvolvido pela Universidade Politécnica de Tóquio.

No quinto capítulo, apresenta o método matemático, baseado nas equações de Navier-Stokes, Computational Fluid Dynamics (CFD). Esse método permite estudar a dinâmica de processos para escoamento de fluídos.

No sexto capítulo, apresenta o modelo estrutural com suas características geométricas e físicas de um edifício em concreto armado com 150 m de altura e dimensões do piso de 30 m por 60 m.

O sétimo capítulo, apresenta o modelo numérico-computacional. Quanto à modelagem em elementos finitos, são apresentados os tipos de elementos finitos adotados e suas propriedades. Além de apresentar a análise modal da estrutura com seus modos de vibração, amortecimento e as frequências naturais da estrutura investigada.

O oitavo capítulo, as normas e critérios de avaliação do conforto humano utilizados neste trabalho são apresentados, com relevância para o presente estudo.

O nono capítulo, dedica-se à análise dinâmica do modelo numérico-computacional do prédio investigado, descrevendo a resposta dinâmica da estrutura submetida a vibração forçada (cargas de vento não determinísticas) através dos métodos NBR 6123, DEDM-HRP, HFPI-TPU e CFD.

Finalmente, no décimo capítulo, são apresentadas as conclusões alcançadas durante o desenvolvimento do presente trabalho, além das considerações e sugestões para a continuação deste estudo.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Introdução

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica do tema em questão citando diversos trabalhos de pesquisa, e seus respectivos autores, que trataram de assuntos relacionados ao investigado nesta dissertação. São apresentados alguns estudos desenvolvidos por diversos autores, que contemplam os assuntos acerca de edifícios altos, principalmente no que diz respeito ao conforto humano devido à ação do vento.

1.2 Generalidades

Davenport (1963) foi o pioneiro nos estudos relacionados à engenharia de ventos, contribuindo também para o campo da meteorologia, da dinâmica estrutural e da engenharia de terremotos. Davenport investigou os turbilhões de vento, desenvolvendo teorias sobre o assunto; introduziu o método do fator de rajada, que determina a magnitude de pico da resposta dinâmica, incluindo os efeitos provocados pela ressonância.

Shinozuka (1972) apresentou estudos baseados em dados experimentais indicaram que o vento possui características não-determinísticas, apresentando flutuações em torno da velocidade média, designadas por rajadas. O Método da Representação Espectral (MRE) consiste na representação numérica de um sinal com características não determinísticas através do somatório de um número finito de harmônicos superpostos com ângulos de fase randômicos. A amplitude de cada harmônico é definida a partir da densidade espectral e da função de coerência do fenômeno estudado.

Blessmann (1985) analisou as solicitações do vento em edifícios vizinhos de mesma altura. Simulações em túnel de vento foram realizadas no laboratório da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Segundo Blessmann (1985), os resultados dos testes preliminares serviram de base para a definição das posições relativas dos modelos a fim de avaliar os efeitos dinâmicos.

Franco (1993) desenvolveu o método do vento sintético, baseado na simulação de Monte Carlo para o cálculo da parcela flutuante da velocidade do vento, por meio da geração de séries históricas de carregamento. Este método considera as características aleatórias e as propriedades instáveis da carga de vento, sendo amplamente utilizado em trabalhos de pesquisa e na engenharia estrutural.

Para Davenport (1995), a complexidade dos carregamentos de ventos provém de suas variações no espaço e no tempo. Visando investigar o assunto, o autor apresenta em seu trabalho discussões sobre três funções que controlam a magnitude das respostas, que são: as linhas de influência, os modos de vibração, e as distribuições da pressão.

Borges (2009), em sua tese de doutorado, analisou o comportamento estrutural de um edifício de 42 pavimentos, cuidadosamente estudado de forma a apresentar um comportamento estrutural eficiente. Foram apresentados resultados de análises elásticas lineares e não lineares geométricas para ações de serviço, de análises não lineares geométricas e físicas para ações de cálculo, bem como do comportamento para ações dinâmicas, incluindo a interação solo-estrutura. Utilizou, para isso, diversos parâmetros de sensibilidade para análise da estabilidade global, tais como índice de esbeltez de corpo rígido, índice de esbeltez efetiva global, rigidez efetiva global, coeficiente γ_z . Determinou as frequências naturais dos modelos em estudo e verificou o conforto humano induzido pelas vibrações devidas ao vento de acordo com os critérios de avaliação propostos pela NBR 6123 (1988) e por Chang (1967). Como resultados, concluiu que edifícios esbeltos devem merecer tratamento especial desde a concepção arquitetônica, a ter seu comportamento verificado por métodos completos incluindo análises estáticas e dinâmicas.

Chen (2008) apresenta, em sua investigação, um método analítico no domínio da frequência para quantificar a resposta do vento longitudinal em edifícios altos quando submetido a ventos não-estacionários.

Obata (2009) apresentou uma forma de considerar a característica aleatória e instável do carregamento dos ventos em estruturas. Sugere uma metodologia com

base no método do vento sintético através da simulação de Monte Carlo para o cálculo das cargas aleatórias do vento.

Huang et al. (2009) apresentaram uma estrutura para a análise dinâmica da resposta de torção lateral induzida pelo vento de edifícios altos. Para tal é utilizado um edifício assimétrico misto (aço e concreto) de 60 andares para ilustrar a resposta dinâmica do modelo de análise proposto.

Franco e Medeiros (2011) apresentaram novas considerações para o método do vento sintético com a possibilidade de emprego de um grande número de harmônicos e de combinações de ângulos de fase sem a perda de precisão da resposta estrutural e a correção que existia no método original torna-se desnecessária.

Rafael Rangel Barboza (2012), em sua dissertação de mestrado, apresentou o comportamento estrutural estático e dinâmico (linear e não linear) de um edifício misto (aço-concreto) de 20 pavimentos. O estudo apresenta os resultados de análises estáticas e dinâmicas lineares e não lineares para ações de serviço. O comportamento estrutural do edifício, quando submetido às ações dinâmicas induzidas pelo vento.

Genival da Silva Filho (2012), em sua dissertação de mestrado, apresentou o comportamento estrutural estático e dinâmico de um edifício misto (aço-concreto) de 20 pavimentos quando submetido às ações dinâmicas do vento não determinísticas. O desenvolvimento do modelo computacional via método dos elementos finitos, por meio do programa ANSYS. O estudo apresenta os resultados de uma análise linear-elástica para ações de serviço, a resposta dinâmica não determinística do modelo estrutural investigado, em termos dos valores máximos médios dos deslocamentos e das acelerações.

Soltys (2012) utilizou os dados de um anemômetro ultrassônico para obter os parâmetros estatísticos e as densidades espectrais do vento nas três direções. O trabalho experimental possibilitou o ajuste dos parâmetros do espectro que foi utilizado na geração de séries temporais de vento através do Método da Representação Espectral proposto por Shinozuka (1972). A comparação entre os sinais de vento gerados numericamente com os dados coletados experimentalmente exibiu boa concordância.

Blessmann (2013) enfatiza que além da solicitação estática do vento depende de sua velocidade média. As estruturas são submetidas a solicitações dinâmicas, que

dependem da energia cinética contida nas flutuações e de como esta energia se distribui pelas diversas frequências. A resposta da estrutura depende muito mais da energia contida em uma sequência de rajadas do que da intensidade de uma única rajada. E, nesta sequência, serão mais importantes as componentes em ressonância com a estrutura.

Segundo Brasil & Silva (2013), as excitações como as decorrentes de ventos, ondas do mar, sismos e outras desse gênero são, naturalmente, aleatórias. No nível atual do conhecimento, sua descrição só pode ser realizada no sentido estatístico, por meio de valores médios, desvios desses valores e distribuições de probabilidade. O autor salienta que atualmente existem modelos capazes de realizar a análise estocástica de estruturas de comportamento linear sob esforços de vento de maneira bastante satisfatória. Uma rotina para análise estocástica da resposta dinâmica das estruturas é denominada “vento sintético” (FRANCO, 2011). Esse método pode ser encarado como algoritmo de simulação tipo Monte Carlo.

Vinícius Calazans Morais (2014), em sua dissertação de mestrado, apresentou o comportamento estrutural de um edifício de 20 pavimentos misto (aço-concreto) submetido às ações dinâmicas do vento não determinísticas. No núcleo interno da edificação, três tipos de contraventamentos são analisados e comparados. De forma semelhante, no desenvolvimento do modelo computacional são empregadas técnicas via método dos elementos finitos, por meio do programa ANSYS.

Oliveira (2014), em sua dissertação de mestrado, apresenta uma série de conceitos fundamentais relacionados com a ação do vento em edifícios altos, estabelecendo algumas considerações acerca da circulação do vento na camada limite atmosférica e da sua interação com as estruturas. Assim, é obtida a resposta dinâmica ao longo do tempo em termos de vários parâmetros, comparando a resposta dinâmica e estática.

Davi de Souza da Ponte (2015), em sua dissertação de mestrado, apresentou o comportamento e otimização do projeto estrutural de edifícios. Foi considerado uma edificação de concreto armado com 15 pavimentos e 47 metros de altura, submetida às ações das cargas usuais de projeto atuantes sobre edifícios residenciais, além das cargas de vento. Foi criado um modelo computacional via método dos elementos finitos, por meio do programa ANSYS. A partir de análises o objetivo é modificar e aprimorar o desempenho estrutural do edifício analisado.

Leonardo de Souza Bastos (2015), em sua dissertação de mestrado, investigou quatro modelos estruturais de edifícios altos de concreto armado, com base no estudo da variação entre o número de pavimentos e a quantidade de vigas existentes em cada modelo, objetivando-se verificar quais os efeitos que tais variações podem vir a gerar sobre a estabilidade global e, bem como, sobre o conforto humano dos sistemas estruturais investigados. A modelagem numérica dos edifícios em estudo foi realizada através do emprego do programa ANSYS, por meio do método dos elementos finitos.

Fábio Paiva Teixeira (2015), em sua dissertação de mestrado, apresentou o estudo do comportamento estrutural e avaliação de conforto humano de edifícios de concreto armado. Foram considerados quatro projetos de edificações de concreto armado distintos, com alturas variando na faixa de 30m a 70m (11 a 24 pavimentos), submetidos às ações das cargas usuais de projeto atuantes sobre edifícios residenciais, além das cargas de vento.

Algaba (2016) comparou os resultados alcançados com a utilização do método discreto da NBR 6123 (1988) e do método pelo Eurocode 1-4/2005 com resultados obtidos experimentalmente para os modelos de edifício padrão da CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) e do projeto “International HFBB Comparison Project”. Os resultados da NBR 6123 (1988) ficaram em média 50% menores do que os resultados experimentais. No trabalho, foi apresentada uma revisão dos ábacos utilizados da NBR 6123 (1988) para o cálculo do fator de amplificação dinâmica.

K. Roy (2016), em um artigo publicado pelo Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology Roorkee, apresentou a análise de pressão, velocidade e coeficiente de força do vento feito no software ANSYS usando simulação CFD (modelo k- ϵ) para plano assimétrico para edifício alto para um ângulo de incidência do vento variando de 0° a 360° com um intervalo de 45° na proporção de 1:300. O estudo visa estabelecer a semelhança entre os códigos IS875-(PART 3)(1987), AS/NZS: 1170.2 (2011), ASCE: 7-02 (2002), e o modelo experimental retangular. Os padrões de fluxo ao redor do edifício são considerados para diferentes alturas e para diferentes ângulos de vento que ajudam a entender a diferença na variação de pressão para fins de projeto do edifício.

Rafael Rangel Barboza (2016), em sua tese de doutorado, investigou o comportamento dinâmico, avaliação do conforto humano e o estudo de estratégias

para o controle de vibrações excessivas de edifícios altos, quando submetidos à ação não determinística do vento, com base na consideração do efeito proveniente da interação solo-estrutura. Foram investigados dois modelos estruturais: o primeiro edifício é de concreto armado, com 42 pavimentos e altura total de 123,9 m, e o outro modelo corresponde a um edifício misto (aço-concreto), com 48 pavimentos e altura total de 172,8m.

Vieira (2016), em sua tese de doutorado, fez um estudo experimental dos esforços solicitantes para um edifício alto devidos à ação do vento, levando em conta a influência de edificações vizinhas. Foram propostas oito configurações de vizinhanças e quatro diferentes contornos, num total de trinta e duas diferentes situações. Os resultados concluíram que a presença das edificações vizinhas altera os resultados de todos os esforços estudados em uma quantidade significativa de direções consideradas. Observou-se que os parâmetros atuais estabelecidos pela norma NBR 6123 (1988) para se majorar os esforços devidos aos efeitos de vizinhança, assim como a distância em que uma edificação deve estar posicionada para ser considerada vizinha, não contemplam grande parte dos resultados obtidos nos ensaios.

Yadav Varsha (2016), em um artigo publicado pela Global Research and Development Journal for Engineering, realizou uma simulação para um arranjo particular de um grupo de edifícios altos. Coeficientes de pressão sobre o mesmo foram estudados usando a técnica de Computational Fluid Dynamics (CFD). Edifícios de diferentes alturas são levados em consideração. O efeito de diferentes ângulos de incidência do vento sobre os coeficientes de pressão em todas as faces do Edifício Principal foi investigado. Além disso, os contornos do coeficiente de pressão em todas as faces de todos os edifícios para os ângulos de incidência do vento de 0°, 30°, 60° e 90° são plotados. ANSYS CFX é usado para realizar a simulação CFD.

Rodrigo Cesar de Oliveira Drummond (2017), em sua dissertação de mestrado, investigou a resposta estrutural dinâmica e posterior avaliação do conforto humano de edifícios, quando submetidos à ação não determinística das cargas de vento, com base na consideração do efeito proveniente da interação solo-estrutura e da contribuição das alvenarias dos modelos. Deste modo, investiga-se a resposta estrutural dinâmica de um edifício de concreto armado composto por 22 pavimentos e apresentando uma altura total de 63,8 m.

Souvik Chakraborty (2017), em um artigo publicado pela Bengal Engineering and Science University Shibpur - India, apresentou um estudo experimental e numérico da pressão de superfície em edifício alto. A técnica de Computational Fluid Dynamics (CFD) é usada para avaliar a pressão em diferentes faces do modelo para ângulo de incidência do vento de 0° e 45° . A análise é realizada usando ANSYS FLUENT com k-modelo de viscosidade ϵ e os resultados obtidos são comparados com os resultados do teste em túnel de vento.

A. K.B Airagi e S. K. Dalui (2018), em um artigo publicado pelo Indian Institute of Engineering Science and Technology - Shibpur, apresentou um estudo da avaliação de efeitos de interferência em arranha-céus paralelos para diferentes orientações do vento usando a técnica de Computational Fluid Dynamics (CFD), a fim de verificar o espaçamento ótimo entre o edifício interferente e o principal.

Alan Barile (2019), em sua dissertação de mestrado, apresentou testes experimentais em túneis de vento, sendo ainda a forma mais confiável de avaliar a resposta estrutural dinâmica de edifícios. Dentro deste contexto, destacam-se os métodos normativos que geralmente são baseados no Método do Fator de Rajada de Davenport, os Métodos Assistidos por Base de Dados, que consideram os dados obtidos em ensaios realizados em túneis de vento, considerando-se geometrias padronizadas para o cálculo das respostas, e o Método da Representação Espectral, utilizado para gerar o carregamento de vento considerando suas características dinâmicas.

H. Haghifard e M. Tavakol (2019), em um artigo publicado pelo International Journal of Engineering Research and Advanced Technology, no presente estudo, o campo de fluxo de vento turbulento em torno de edifícios montados em superfície e apoiados em linha foi investigado numericamente. Para modelar a turbulência, são empregados os modelos de turbulência k- ϵ e k- ϵ realizável.

Rama Prasad (2019), em um artigo publicado pelo International Journal of Engineering Research and Advanced Technology, apresentou a avaliação de modelos de turbulência e comportamentos de fluxo de vento ao redor do edifício.

Amlan Bairagi (2020), em um artigo publicado pela Advances in Structures, Systems and Materials, Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering, apresentou os resultados da distribuição da pressão do vento ao redor do edifício alto de forma diferente. Foi observada alguma quantidade de bulbo de pressão no lado de

sotavento do modelo de recuo, o que significa o aumento da sucção nessa região em particular. A quantidade excessiva de envoltória de sucção reconhecida no teto superior do modelo de recuo em comparação com o modelo quadrado.

Leonardo de Souza Bastos (2020), em sua tese de doutorado, investigou o comportamento estrutural dinâmico não determinístico e análise de conforto humano de edifícios altos. Deste modo, ao longo do estudo são considerados três projetos de edifícios, a saber: dois edifícios em concreto armado com alturas de 90 m e 140 m, respectivamente, e um edifício em estrutura mista aço-concreto com altura total de 173 m. O Método da Representação Espectral (MRE) foi utilizado para caracterizar as ações dinâmicas longitudinais do vento. O efeito das ações dinâmicas do vento em relação à direção transversal (efeito de vórtices) foi concebido a partir do desenvolvimento de uma metodologia de análise denominada de Método da Representação Espectral Modificado (MRE-M).

Souvik Chakraborty e Sujit Kumar Dalui (2020), em um artigo publicado no Symposium on Sustainable Infrastructure Development (SID), Bhubaneswar, Odisha - Índia, apresentou um estudo numérico de pressão de superfície para edifício alto de forma quadrada. Os resultados obtidos para o ângulo normal de incidência do vento são comparados com as disposições da IS: 875 – 1987 (Parte 3) para validar o código utilizado. O trabalho também inclui o estudo do padrão de escoamento em torno do modelo. Os coeficientes de pressão média de superfície para diferentes ângulos de vento apresentados neste artigo podem fornecer informações úteis para o cálculo de cargas de vento em tais estruturas com maior grau de confiança.

Lucas Willian Aguiar Mattias (2021), em sua dissertação de mestrado, apresentou um ensaio em modelo computacional por meio de Computational Fluid Dynamics (CFD), validando os resultados comparativamente com dados obtidos em túnel de vento para um edifício de 120 m de altura com seção H, onde a carga dinâmica do vento é aplicada ao modelo de elementos finitos (Hilber-Hughes-Taylor) através método do vento sintético.

A. K. Mittala e D. Ghoshb (2021), em uma pesquisa realizada no CSIR-Central Building Research Institute, Roorkee - Índia, apresentou simulações de fluxo de vento nas proximidades de edifícios altos por meio de Computational Fluid Dynamics (CFD). Onde as forças laterais são o principal fator que distingue os edifícios altos de outros edifícios baixos e a força do vento é a força lateral mais significativa nos edifícios altos.

Haitao Zhu (2021), em uma pesquisa realizada no College of Civil Engineering - Tongji University, apresentou os efeitos do vento para os edifícios modernos baseados na utilização do Computational Fluid Dynamics (CFD). Sua pesquisa concentra-se principalmente em quatro questões, são elas: excitação e resposta do vento, amortecimento aerodinâmico, modificações aerodinâmicas e efeito de proximidade.

Rahul Kumar Meena e Ritu Raj (2021), em um artigo escrito para o Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE), apresenta o efeito do vento na razão lateral de edifícios altos em forma de L usando Computational Fluid Dynamics (CFD). Os resultados mostram que a distribuição de pressão é diferente na parede de barlavento dos modelos de construção em forma de L. Descobriu-se que o layout e o tamanho da planta do modelo têm um impacto direto na distribuição da pressão do vento na face da estrutura de todos os modelos considerados.

Thet Mon Soe e San Yu Khaing (2021), em um artigo escrito para o International Journal of Scientific and Research Publications, apresentou comparações de modelos de turbulência para simulação computacional de Computational Fluid Dynamics (CFD) de vento em aglomerados de edifícios em Mandalay. O padrão $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, realizável $k-\epsilon$ produzem de forma semelhante mapa de contorno de pressão, mas com diferenças significativas em magnitude.

Nikhil Gaura e Ritu Raj (2022), em um artigo escrito para o Ain Shams Engineering Journal, apresentou uma análise do vento e suas comparações com as experimentações convencionais em túnel de vento e com Computational Fluid Dynamics (CFD). Este estudo está centrado na resposta ao vento de modelos de edifícios em formato quadrado e canto e sua otimização causada pela variação do ângulo de incidência do vento. A análise numérica foi realizada com o modelo padrão de turbulência $k-\epsilon$ para avaliar os coeficientes de força, momentos de base, espectros de potência, coeficientes de pressão superficial externa e características do campo de escoamento dos modelos com ângulos de incidência variáveis do vento.

2 NBR 6123 - FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

2.1 Introdução

O presente capítulo aborda as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo de edificações. Entretanto, a norma NBR 6123 não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos.

As limitações do uso desta norma são enfatizadas pela própria em seu item 1.2, onde diz: “Esta norma não se aplica a edificações de formas, dimensões ou localização fora do comum, casos estes em que estudos especiais devem ser feitos para determinar as forças atuantes do vento e seus efeitos. Resultados experimentais obtidos em túnel de vento, com simulação das principais características do vento natural, podem ser usados em substituição do recurso aos coeficientes constantes nesta norma”. Ou seja, fica claro que ela foi elaborada para cobrir as estruturas consideradas mais comuns, não sendo adequada para estruturas com geometrias complexas.

2.2 Velocidade básica do vento (V_0)

A norma caracteriza a velocidade básica do vento dependente da região a qual se pretende construir a estrutura em questão. Ela pontua que é considerada 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. A Figura 3 apresenta o gráfico das isopletras da velocidade básica do vento no Brasil, com limite entre 30 m/s e 50 m/s, onde deve ser consultada a velocidade básica do vento na região onde se pretende realizar a construção do edifício.

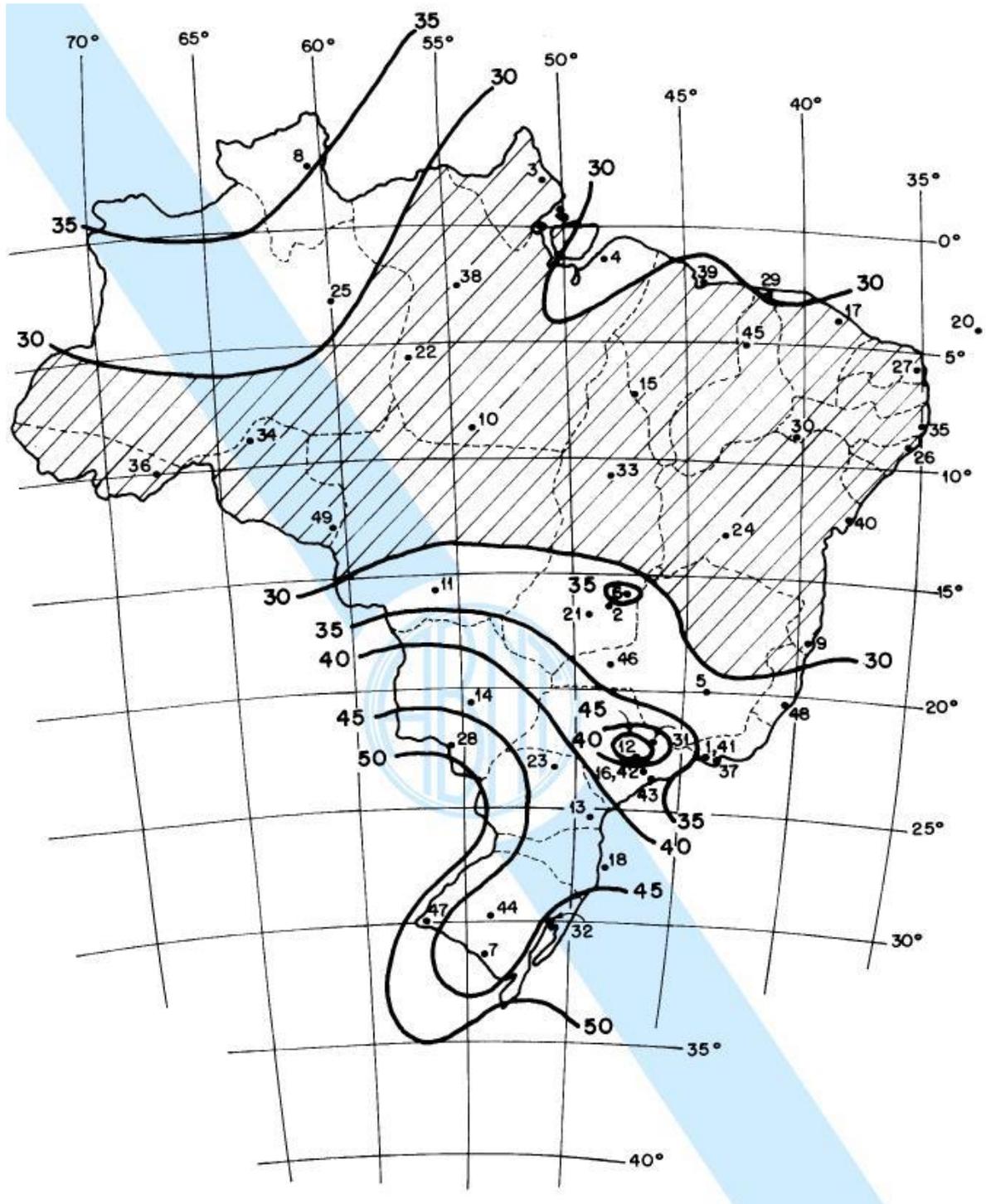


Figura 3 - Isopletras da velocidade básica V_0 (m/s) (Fonte: NBR 6123, 1988).

Para o presente trabalho de pesquisa, foi considerada que a estrutura seria construída na região do Rio de Janeiro, cuja a norma, indica velocidade básica do vento de 35 m/s.

2.3 Fator topográfico (S_1)

O fator topográfico (S_1), leva em consideração o relevo do local onde a estrutura ou edificação está instalada. Para o presente trabalho de pesquisa, foi considerado $S_1=1$, ou seja, terreno plano ou fracamente acidentado como apresentado na Figura 4.

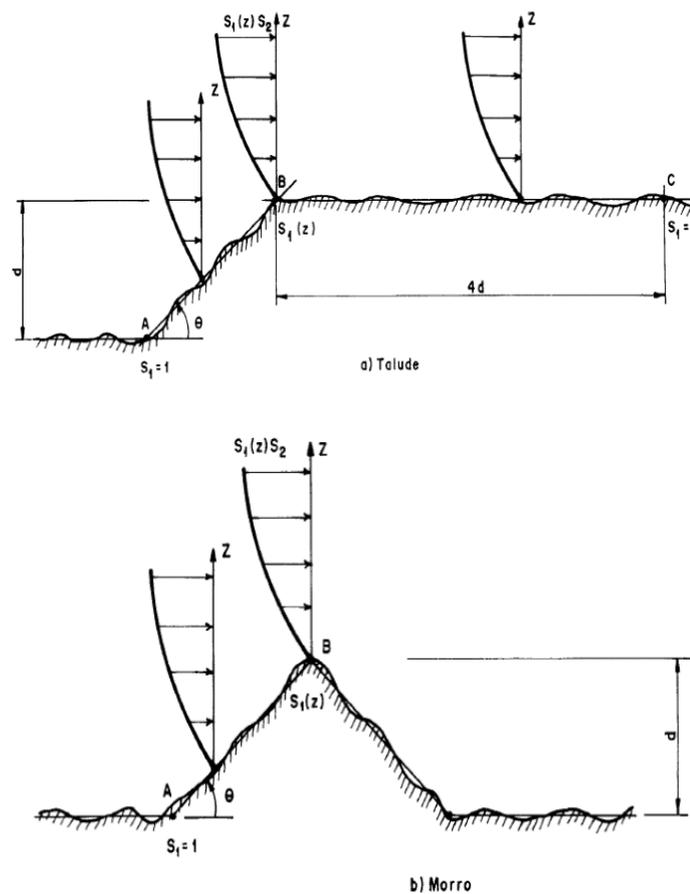


Figura 4 - Fator topográfico $S_1(z)$ (Fonte: NBR 6123, 1988).

2.4 Fator de rugosidade do terreno (S_2)

A NBR 6123 define que: “o fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração”.

Para os fins desta Norma, a rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias:

- a) Categoria I: Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
- b) Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
- c) Categoria III: Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.
- d) Categoria IV: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.
- e) Categoria V: Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

Para a definição das partes da edificação a considerar na determinação das ações do vento, é necessário considerar características construtivas ou estruturais. Podendo ser é classificada em três classes:

- a) Classe A: Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20 m.
- b) Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 m e 50 m.
- c) Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 m.

Para calcular o coeficiente de rugosidade do terreno será necessário utilizar a Equação (1).

$$S_2 = b F_r \left(\frac{Z}{10} \right)^p \quad (1)$$

Onde:

b - parâmetro meteorológico.

F_r - fator de rajada.

Z - cota acima do terreno.

p - expoente da lei potencial de variação.

De acordo com a classificação da estrutura e do terrono, precisamos selecionar o valor dos parâmetros meteorológicos na Tabela 1. Para o presente trabalho de pesquisa, foram consideradas a Categoria 4 e a Classe C. Conseqüentemente, os valores dos parâmetros são: $b = 0,84$; $F_r = 0,95$; $p = 0,135$.

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos (Fonte: NBR 6123, 1988).

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

2.5 Fator estatístico (S_3)

O fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Tendo que a velocidade básica do vento V_0 é a velocidade do vento que apresenta um período de recorrência médio de

40 anos, a probabilidade de que a velocidade V_0 seja igualada ou excedida neste período é de 63%.

O nível de probabilidade (0,63) e a vida útil (50 anos) adotados são considerados adequados para edificações normais destinadas a moradias, hotéis, escritórios, etc. (Grupo 2). Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações ou de indicações correspondentes na norma estrutural, os valores mínimos do fator S_3 são os indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores mínimos do fator estatístico S_3 (Fonte: NBR 6123, 1988).

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção	0,83

2.6 Velocidade características do vento (V_k)

A velocidade característica do vento é a velocidade do vento utilizada em projeto, podendo ser majorada ou minorada de acordo com os parâmetros meteorológicos definidos pelo projetista.

A velocidade característica do vento é determinada através da Equação (2):

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (2)$$

Onde:

V_0 - Velocidade básica do vento: velocidade de uma rajada de 3 s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano;

S_1 - Fator topográfico;

S_2 - Fator que considera a influência da rugosidade do terreno, das dimensões da edificação ou parte da edificação em estudo, e de sua altura sobre o terreno;

S_3 - Fator baseado em conceitos probabilísticos.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados nesse trabalho de pesquisa para gerar as cargas de vento.

Tabela 3 - Parâmetros de projeto utilizados de acordo com a Norma Brasileira NBR 6123.

Tipo	Valor	Descrição
Velocidade básica do vento	$V_0 = 35 \text{ m/s}$	Isopletas: Rio de Janeiro/RJ
Terreno	IV	Região urbana
Classe	C	Uma das dimensões > 90 m
Fator S_1	1	Terreno plano
Fator S_3	1	63% em 10 anos
Fator F_r	0,95	Fator de rajada
b	0,84	Parâmetro meteorológico
p	0,135	Expoente da lei da variação S_2
Tempo de análise	600s	Intervalo de tempo padrão

2.7 Pressão dinâmica do vento

A pressão dinâmica é uma grandeza que depende diretamente da velocidade característica do vento (V_k) e é calculada pela Equação (3). Sendo (unidades SI) onde q em N/m^2 e V_k em m/s .

$$q = \frac{1}{2} \rho V_k^2 \quad (3)$$

Onde:

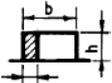
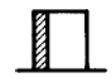
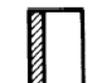
ρ - massa específica do ar (1,2253 kg/m³).

2.8 Coeficiente de pressão

A ação do vento em estruturas é obtida através de coeficientes de resistência aerodinâmica, também conhecido como coeficientes de arrasto ou de pressão (C_{pe}). Estes coeficientes correlacionam a ação exercida em um corpo com a pressão dinâmica exercida sobre ele.

A NBR 6123 fornece uma tabela de coeficientes de pressão e de forma para edificações de geometria retangular, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 4 - Coeficientes de pressão e de forma, externos, edificações de planta retangular.

Altura relativa	Valores de C_e para								C_{pe} médio 	
	$\alpha = 0^\circ$				$\alpha = 90^\circ$					
	A_1 e B_1	A_2 e B_2	C	D	A	B	C_1 e D_1	C_2 e D_2		
 $0,2 b$ ou h (o menor dos dois) $\frac{h}{b} \leq \frac{1}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,8	-0,5	+0,7	-0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-0,4	-0,9
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,8	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,0
 $\frac{1}{2} < \frac{h}{b} \leq \frac{3}{2}$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-0,9	-0,5	+0,7	-0,5	+0,7	-0,5	-0,9	-0,5	-1,1
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-0,9	-0,4	+0,7	-0,3	+0,7	-0,6	-0,9	-0,5	-1,1
 $\frac{3}{2} < \frac{h}{b} \leq 6$	$1 \leq \frac{a}{b} \leq \frac{3}{2}$	-1,0	-0,6	+0,8	-0,6	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2
	$2 \leq \frac{a}{b} \leq 4$	-1,0	-0,5	+0,8	-0,3	+0,8	-0,6	-1,0	-0,6	-1,2

De acordo com a Tabela 3, o presente trabalho utilizou os coeficientes de pressão (C_{pe}) para o barlavento = 0,7; laterais = -0,9 e sotavento = -0,5 para o vento na direção 0°.

2.9 Força do vento

A força do vento sobre um elemento plano de edificação de área A atua em direção perpendicular a ele, sendo dada pela Equação (4).

$$F = C_{pe} q A \quad (4)$$

Onde:

C_{pe} - coeficiente de pressão externa;

q - pressão dinâmica do vento;

A - área de atuação do vento.

2.10 Fluxograma para cálculo das cargas de vento pelo método NBR 6123

Visando resumir a metodologia de cálculo da consideração da ação do vento pelo método normativo da NBR 6123 (ABNT, 1988) adotada neste trabalho, a Figura 5 apresenta um fluxograma do passo a passo desta metodologia.

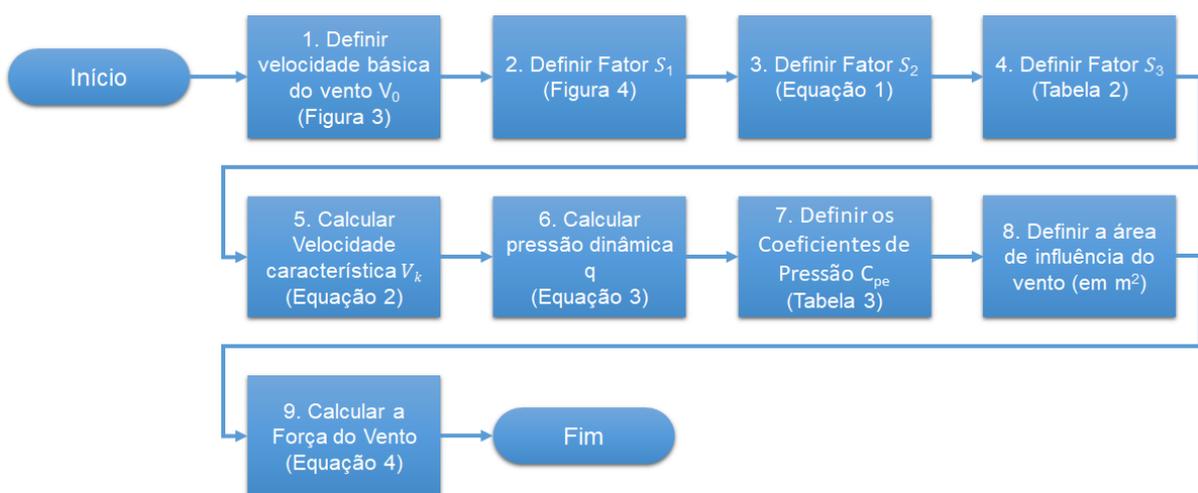


Figura 5 - Fluxograma para cálculo das cargas de vento pelo método NBR 6123.

3 BASE DE DADOS AMERICANA (DEDM-HRP)

3.1 Introdução

A plataforma VORTEX-Winds, Virtual Organization for Reducing the Toll of EXtreme Winds, é um sistema online disponibilizado pela Universidade de Notre Dame (Indiana, EUA). A plataforma oferece um novo paradigma de estrutura de laboratório colaborativo para modelagem e simulação de cargas de ventos em modelos estruturais, com o objetivo de acelerar os avanços em pesquisa e educação.

Dentre os módulos disponibilizados, o módulo Data-Enabled Design Model for high-rise buildings driven by pressure datasets (DEDM-HRP) fornece os resultados das forças do vento no domínio do tempo de forma não determinística para o tipo de edificação fornecida pelo usuário a partir dos resultados armazenados para diversas geometrias de modelos retangulares padronizados que foram ensaiados em túneis de vento de instituições americana (base NatHaz), através do método da HFBB (High Frequency Base Balance), KAREEM & KWON (2017).

3.2 Dimensões da estrutura

Antes de fazer o download da base com as cargas de vento, é preciso informar para a plataforma a relação entre as dimensões em planta da edificação, considerando a direção do vento, conforme apresentado na Figura 6.

Primeiramente precisamos entender a relação entre B (Breadth, em português Largura), D (Depth, em português Profundidade) e H (Height, em português Altura). Para o presente trabalho de pesquisa, foi considerada a relação geométrica 1:2:5 para o modelo estrutural. Onde $B = 2$ e $D = 1$, significa que a largura é o dobro da profundidade enquanto $H = 5$, significa que a altura é 5 vezes maior do que a profundidade.

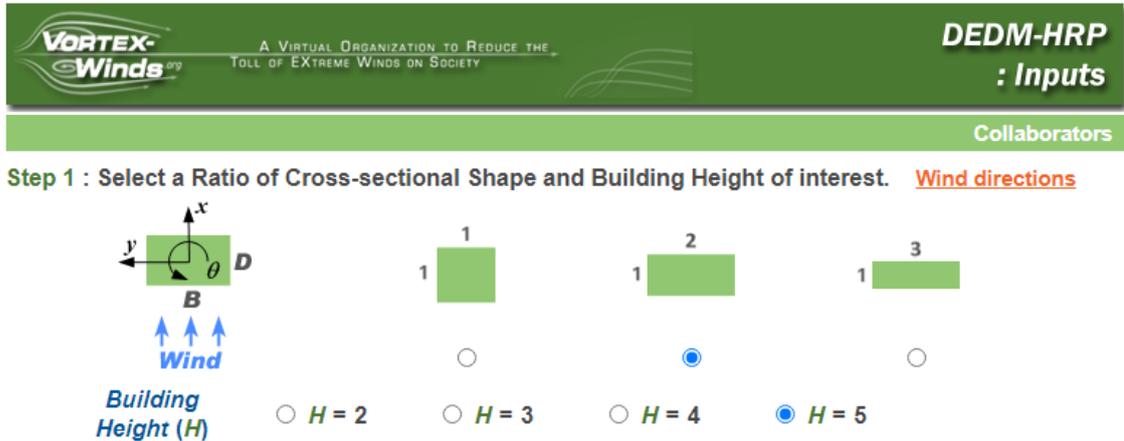


Figura 6 - Tela de seleção da geometria da edificação (DEDM-HRP).
(http://evovw.ce.nd.edu/DEDM_HRP/DEDMP_INT_v3_4evo.html)

3.3 Parâmetros de entrada

O segundo passo se destina a informar para a plataforma o sistema métrico, a categoria de terreno, as dimensões da edificação e a velocidade básica do vento a 10 metros considerando uma rajada de 3 segundos e frequência natural da estrutura conforme a Tabela 5. Para o presente trabalho de pesquisa, foram considerados os parâmetros apresentados na Figura 7.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada utilizados pelo DEDM-HRP

Parâmetro	Descrição
Exposure condition	Categoria de Terreno de acordo com a norma americana ASCE-7.
Averaging time	Tempo de análise ao qual a estrutura foi exposta ao vento.
U_H	Velocidade para uma rajada de vento medida a 10 m de altura.
B, D e H	Dimensões em planta da estrutura (largura, profundidade e altura).
Nfloors	Número de pavimentos da estrutura.
ρ_B	Densidade da edificação.
Mass eccentricity	Coordenadas do pavimento.
Natural frequencies	Conjunto de frequências de um corpo em vibração livre.
Damping ratios	Taxa de amortecimento.

Step 2 : Please fill out analysis/design inputs below.

■ Exposure Condition **Note**

Urban/Suburban area Open terrain

■ Averaging time for the response estimation (T)

$T = 10\text{-min.}$ $T = 1\text{-hour}$

■ Inputs of Mean wind velocity at building top for the designs of Ultimate limite state (U_{Hult}), Serviceability (U_{Hser}) and Habitability (U_{Hhab}) **Important Note**

U_{Hult} : m/s U_{Hser} : m/s U_{Hhab} : m/s

■ Building Width (B), Depth (D) and Height (H)

B : m D : m H : m

■ Number of building floors (N_{floors}) and Building density (ρ_B)

N_{floors} : ρ_B : kg/m³

■ Mass eccentricity (e_x, e_y) and Locations where the responses are computed **Coordinate example**

Mass eccentricity e_x : m e_y : m

Displacement Δ_{dx} : m Δ_{dy} : m

Interstory drift dr_x : m dr_y : m

Acceleration Δ_{ax} : m Δ_{ay} : m

■ Gaussian or Non-Gaussian peak factor

Gaussian peak factor Non-Gaussian peak factor

■ Uncoupled First Mode Shape or Uncoupled/Coupled Multiple Mode Shapes

Uncoupled Normalized First Mode: $\varphi=(z/H)^k$ Uncoupled/Coupled Multiple Mode Shapes

Natural frequencies and damping ratios
: Comma or space separated format (e.g., 0.05,0.1,0.15,... or 0.05 0.1 0.15 ...)

Natural frequencies :

Damping ratios :

Coupled mode shapes (copy and paste is available) **Note**

Figura 7 - Parâmetros da geometria e características do vento (http://evovw.ce.nd.edu/DEDM_HRP/DEDMP_INT_v3_4evo.html)

3.4 Normalização da carga de vento gerada pelo método DEDM-HRP

Uma vez feito o download da carga de vento, gerada pela plataforma Vortex-Winds pelo método DEDM-HRP, é necessário normatizá-la para podermos aplicar ao

modelo de elementos finitos. Essa normatização tem o objetivo de dividir a carga de vento gerada para a área de toda a fachada em partes menores a fim de aplica-las por pavimento, KAREEM & KWON (2017).

Para o presente trabalho de pesquisa, foi considerada uma área de 45m^2 por ponto de aplicação da carga de vento.

Utilizando o software MATLAB® pode-se calcular a força (em Newtons) atuando na fachada do modelo estrutural (em uma área de 45m^2) a partir do algoritmo abaixo:

```
t = 1:1:Sample_period*Sample_frequency;
t = t*0.2;
F = modal_force_x_serviceability(:,1);
L_Fachada = 60;
H_Fachada = 150;
Area_Total = H_Fachada * L_Fachada;
F_DEDM_HRP = (F/Area_Total)*45;
plot(t,F_DEDM_HRP);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Força do vento (kN)');
```

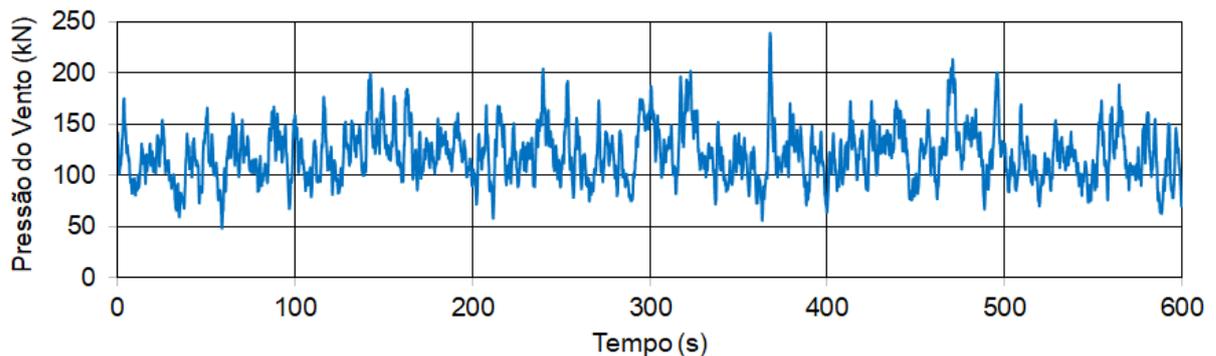


Figura 8 - Pressão no domínio do tempo na direção X (DEDM-HRP).

De acordo com método proposta pela plataforma Vortex-Winds, a Figura 8 apresenta a carga de vento somadas as forças do Barlavento (pressão) e Sotavento (sucção). O mesmo algoritmo deve ser utilizado para calcular a força do vento no sentido Y, conforme apresentado na Figura 9.

```

t = 1:1:Sample_period*Sample_frequency;
t = t*0.2;
F = modal_force_y_serviceability(:,1);
L_Fachada = 30;
H_Fachada = 150;
Area_Total = H_Fachada * L_Fachada;
F_DEDM_HRP = (F/Area_Total)*45;
plot(t,F_DEDM_HRP);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Força do vento (kN)');

```

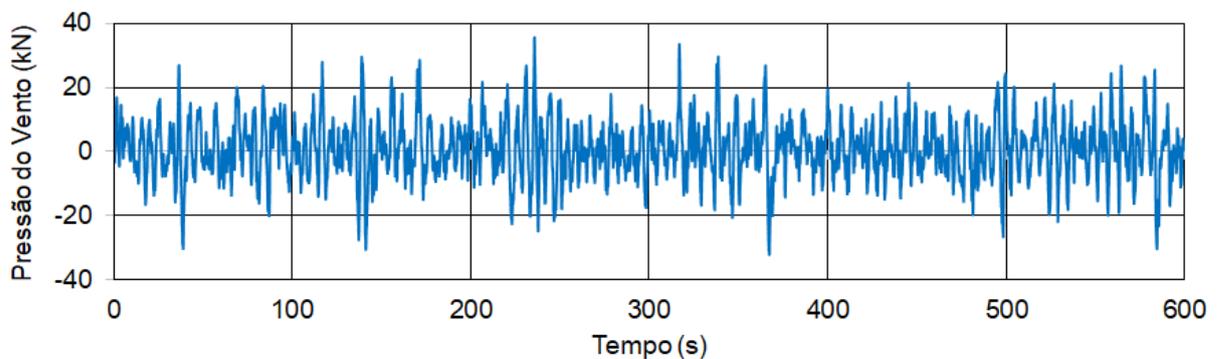


Figura 9 - Pressão no domínio do tempo na direção Y (DEDM-HRP).

Desta forma será aplicada uma carga de vento para cada área de 45m², tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal do vento simultaneamente para todos métodos estudados.

3.5 Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método DEDM-HRP

Visando resumir a metodologia para gerar as cargas de vento pelo método DEDM-HRP adotado neste trabalho, a Figura 10 apresenta um fluxograma do passo a passo desta metodologia.

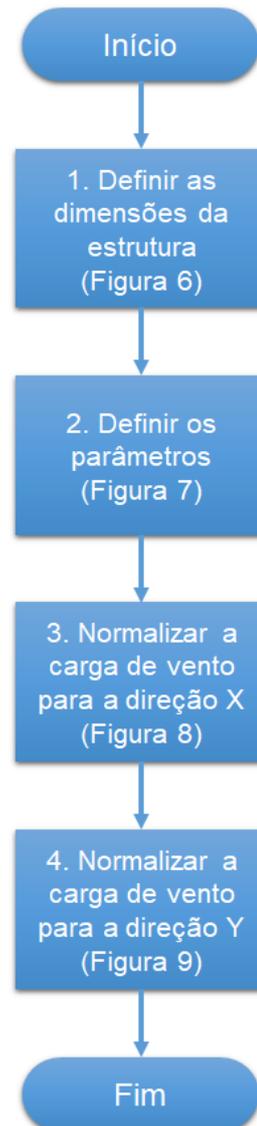


Figura 10 - Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método DEDM-HRP.

A Plataforma VORTEX-Winds via método DEDM-HRP, portanto, se apresenta como uma excelente ferramenta para auxiliar os projetistas de estruturas. Sendo necessário ao projetista realizar apenas uma análise modal prévia da sua estrutura e descobrir os primeiros modos de vibração e respectivas frequências, KAREEM & KWON (2017).

4 BASE DE DADOS DO JAPÃO (HFPI-TPU)

4.1 Introdução

A Universidade Politécnica de Tóquio disponibiliza um banco de dados aerodinâmico (TPU-DB) [Aerodynamic Database of High-rise Buildings], que trata dos efeitos do vento sobre edifícios altos em ambiente urbano. Este banco de dados aerodinâmicos foi elaborado, via método HFPI (High Frequency Pressure Integration), com o objetivo de fornecer aos engenheiros projetistas dados de testes em túneis de vento simulando a ação de cargas de vento, em que 22 modelos de edifícios altos foram testados. Os contornos dos valores estatísticos dos coeficientes de pressão, gráficos de valores médios e dados de séries temporais de 394 situações distintas simuladas são disponibilizados. Esses dados podem ser usados para calcular as pressões de vento, coeficientes de pressão e na aplicação das séries temporais para estudar a resposta dinâmica dos edifícios altos, HFPI-TPU (2003).

A plataforma on-line (TPU-DB) disponibiliza o resultado das pressões armazenadas através de ensaios em túnel de vento para modelos com geometria retangular. A plataforma oferece a escolha de modelos com proporções em planta variando entre 1:1, 1:2 e 1:3, e proporção entre a menor dimensão com a altura do modelo variando entre 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 e 1:5. Os dados do vento são definidos através da escolha de um perfil vertical de acordo com a Equação 5, caracterizado pelo seu expoente (α) que pode ser 1/4 ou 1/6.

$$\bar{V}(z) = \bar{V}_H \left(\frac{z}{H} \right)^\alpha \quad (5)$$

Onde:

z - altura considerada;

\bar{V} - velocidade média;

\bar{V}_H - velocidade média no topo do modelo;

H - altura total do modelo;

α - coeficiente.

4.2 Escolha da geometria

A página inicial da plataforma (TPU-DB) on-line é ilustrada na Figura 11. A primeira etapa na utilização da plataforma é a escolha da geometria do modelo em planta. Em seguida, deve-se escolher a relação altura versus a menor dimensão em planta, finalizando com a escolha do perfil vertical do vento (Figura 12).

The screenshot shows the homepage of the Aerodynamic Database of High-rise Buildings. At the top, there are logos for KOGEI (Tokyo Polytechnic University), Faculty of Engineering, Department of Architecture, and COE Program. The main banner reads "The 21st Century COE program Wind Effects on Buildings and Urban Environment". Below this is the title "Aerodynamic Database of High-rise Buildings" and an "Introduction" section. The introduction describes the database's purpose and the data it provides. A link is provided for vertical profiles of incoming flow. The "Query of test results" section includes a form to select a model (Breadth:Depth:Height_Test type) and a diagram illustrating the geometry and exposure factor.

Introduction

An aerodynamic database has been constructed by the Tokyo Polytechnic University as one part of the Wind Effects on Buildings and Urban Environment, the 21st Century Center of Excellence Program, funded by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan. Present work is the high-rise building part of the aerodynamic database. Its objective is to provide structural design engineers with wind tunnel test data of wind loads on high-rise buildings. 22 models of high-rise buildings were tested. Contours of statistical values of local wind pressure coefficients, graphs of statistical values of area averaged wind pressure coefficients on the wall surfaces and time series data of point wind pressure coefficients for 394 test cases are shown on this web site. These data can be used to calculate local wind pressures, area averaged wind pressure coefficient on wall surfaces, and even wind induced dynamic responses of high-rise buildings. The aerodynamic database of high-rise buildings can be queried from the lower part of this webpage.

The vertical profiles of incoming flow are shown in this [pdf file](#).

Query of test results

Please select model on the list (Breadth:Depth:Height_Test type)

Query of test results

The diagram shows a 3D rectangular prism representing a building. The vertical axis is labeled "Height", the horizontal axis is "Depth", and the depth axis is "Breadth". Two curves are shown: a red curve labeled $n = \frac{1}{4}$ and a yellow curve labeled $n = \frac{1}{6}$. The label "The exposure factor" is placed near the curves.

Breadth:Depth

Please select value on the list ▾

Figura 11 - Página inicial para escolha da geometria e perfil vertical (TPU-DB).

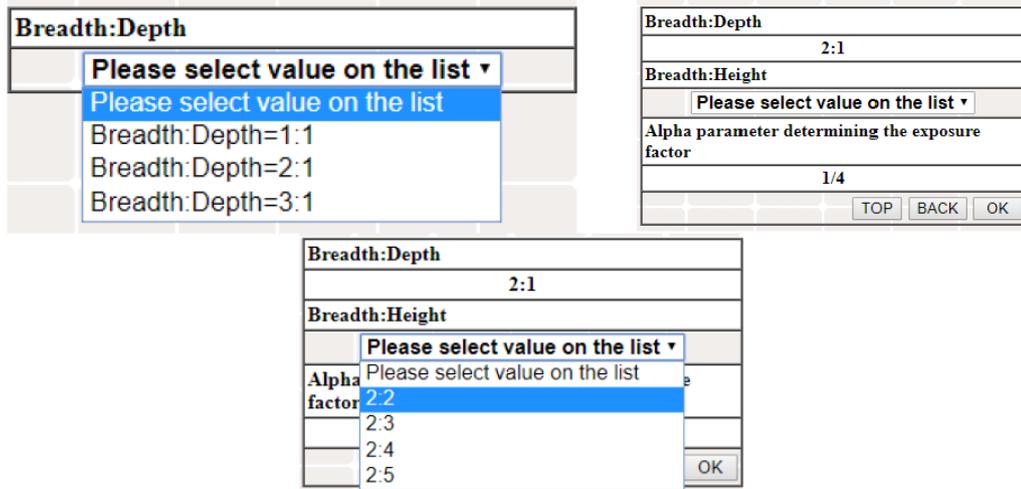


Figura 12 - Escolha das relações geométricas (TPU-DB).

Após a escolha dos dados do modelo e perfil vertical mostrado na Figura 13, a plataforma fornece imagens do coeficiente de pressão considerando valores médios, RMS, máximos e mínimos.

Wind tunnel test result																					
Contours of local wind pressure coefficients																					
Wind direction	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	95°	100°
Mean values																					
RMS values																					
Max values																					
Min values																					
Graphs of area-average wind pressure coefficients																					
Windward surface	Right sideward surface					leeward surface					Left sideward surface										
Time series of point wind pressure coefficients (Data files)																					
Wind direction	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	95°	100°
Data files(.mat)																					

Figura 13 - Página de resultados (TPU-DB).

A plataforma disponibiliza, para cada modelo escolhido, uma figura com a localização dos pontos onde foram realizadas as tomadas de pressão ao longo do

tempo (Pressure tap locations). A Figura 14, como exemplo, mostra os pontos instrumentados para o modelo com a geometria igual a 1:2:5.

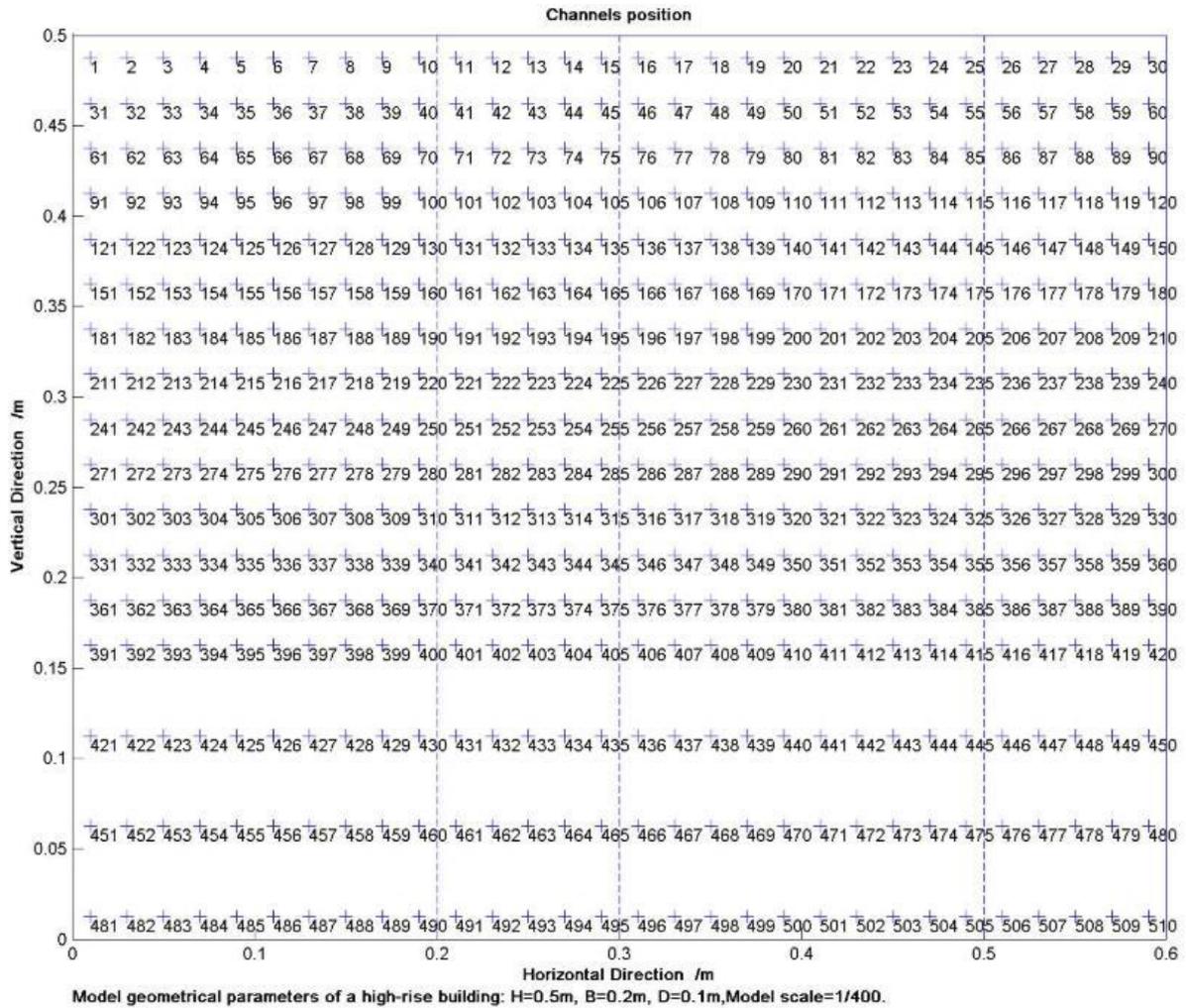


Figura 14 - Localização dos pontos instrumentados (TPU-DB).

A base de dados (TPU-DB) fornece arquivos no formato do programa MATLAB® contendo os dados do ensaio e as pressões medidas ao longo do tempo considerando ângulos de incidência do vento variando entre 0° e 100°, conforme apresentado pela Figura 15.

Time series of point wind pressure coefficients (Data files)																					
Wind direction	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	95°	100°
Data files(.mat)	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶

Figura 15 - Dados contendo as pressões para ângulos variando entre 0° e 100°.

Além dos dados disponibilizados em arquivos formato MATLAB®, é possível visualizar várias imagens representativas dos resultados obtidos. Como exemplo, a Figura 16 fornece um gráfico de isovalores das pressões médias nas fachadas do modelo monitorado.

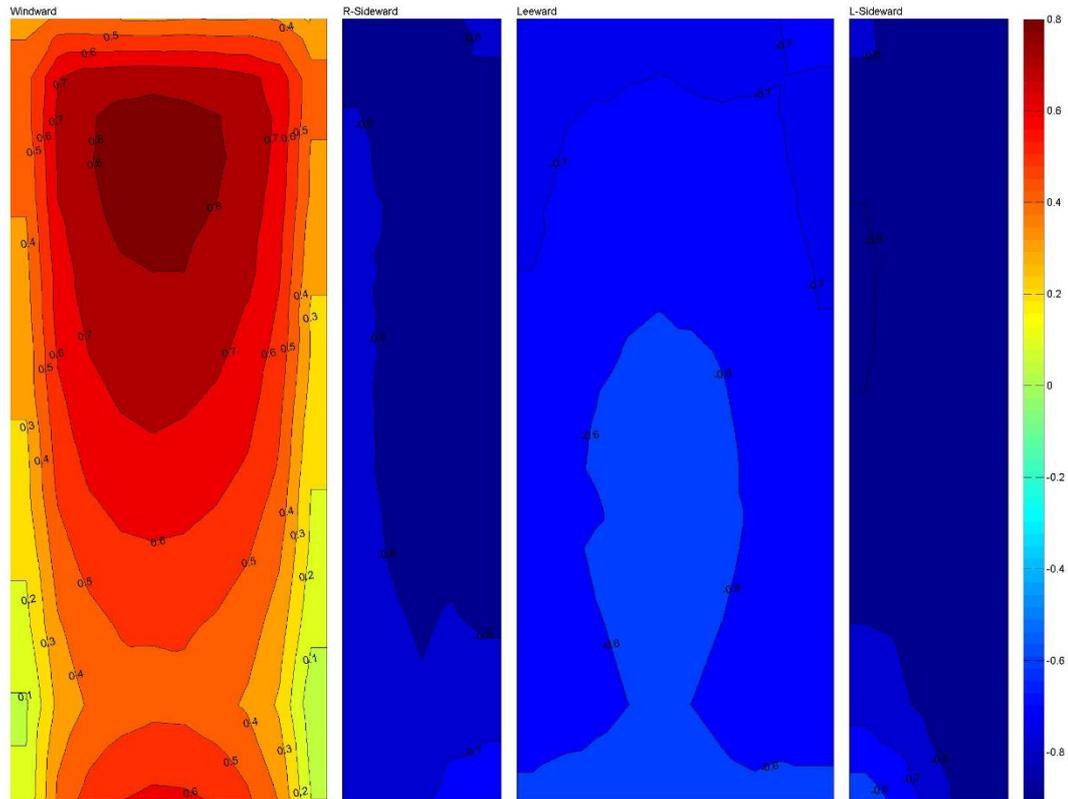


Figura 16 - Exemplo gráfico de isovalores das pressões médias (TPU-DB).

A grande vantagem desta técnica é que o carregamento de vento, obtido em túnel de vento, é aplicado nas quatro faces do modelo numérico simultaneamente, representando com exatidão as propriedades do vento real, levando em consideração todos os possíveis efeitos do vento (efeito de vórtice, efeito transversal, sucção e etc.).

4.3 Normalização da carga de vento gerada pelo método HFPI-TPU

Para determinar a força a ser aplicada no modelo numérico é necessário aplicar as Equações 6 a 9 a fim de adequar dos dados disponibilizados pela plataforma da TPU-DB para o modelo estrutural a ser estudado, HFPI-TPU (2003).

Fator de escala para geometria:

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_r} \quad (6)$$

Onde:

L_m - altura do modelo HFPI-TPU;

L_r - altura do modelo analisado.

Fator de escala para a velocidade:

$$\lambda_v = \frac{V_m}{V_r} \quad (7)$$

Onde:

V_m - velocidade do vento (m/s) usada pelo HFPI-TPU;

V_r - velocidade básica do vento (m/s) considerada neste trabalho (ver Tabela 3).

Fator de escala para o tempo:

$$\lambda_t = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} \quad (8)$$

Cálculo do novo incremento de tempo:

$$t_r = \frac{t_m}{\lambda_t} \quad (9)$$

Onde:

t_m - novo tempo de integração (s).

A análise numérica utilizando elementos finitos pode ser realizada com a obtenção das forças nodais no domínio do tempo a partir das pressões determinadas com a Equação 10.

$$F_i = C_{pi} \frac{1}{2} \rho V^2 A_i \quad (10)$$

Onde:

C_{pi} - coeficiente de pressão;

ρ - densidade do ar com o valor de $1,2253 \text{ kg/m}^3$ (conforme a NBR 6123);

V - velocidade básica do vento (m/s);

A_i - área de influência calculada através da distância entre pontos utilizada no HFPI-TPU Database, corrigida pelo fator de escala para geometria (λ_L).

Para o modelo selecionado na plataforma da Universidade Politécnica de Tóquio, o banco de dados possui 510 pontos de monitoração distribuídos por todas as fachadas da estrutura, conforme mostrado na Figura 14. Cada ponto de monitoração possui diversos coeficientes de pressão no domínio do tempo, quando normalizados, geram as cargas de vento conforme mostrado na Figura 17, na qual é visível o caráter aleatório do vento ao longo do tempo, não podendo ser observada uma tendência do sinal.

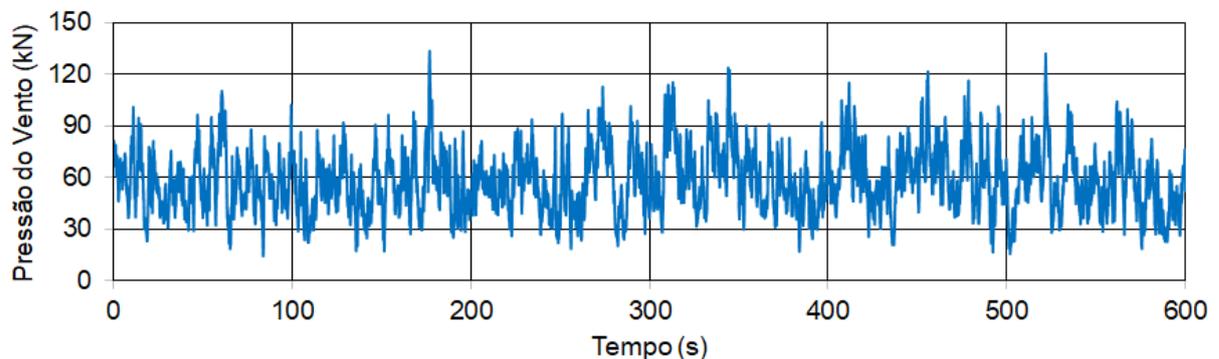


Figura 17 - Pressão no domínio do tempo para o ponto 96 (HFPI-TPU).

4.4 Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método HFPI-TPU

Visando resumir a metodologia para gerar as cargas de vento pelo método HFPI-TPU adotado neste trabalho, a Figura 18 apresenta um fluxograma do passo a passo desta metodologia.

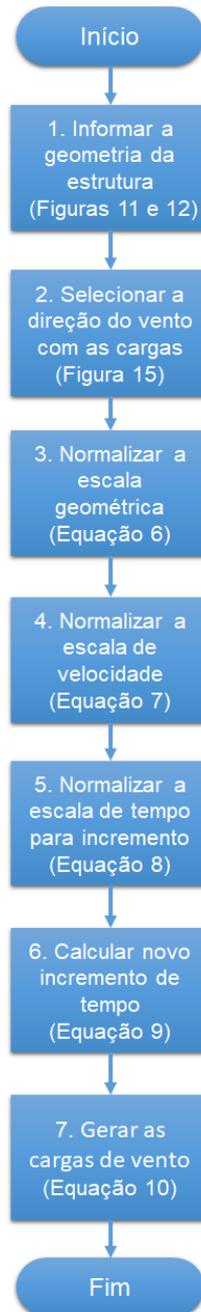


Figura 18 - Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método HFPI-TPU.

5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

5.1 Introdução

O Computational Fluid Dynamics (sigla CFD) é uma tecnologia computacional que permite estudar a dinâmica de processos que apresentam escoamento de fluidos. A base fundamental de problemas de CFD são as equações de Navier-Stokes, que definem qualquer fluxo de fluido monofásico - gás ou líquido, mas não ambos. Estes são discretizados, a fim de ser resolvidos por meio de computadores (Autodesk CFD User Guide, 2022).

Assim como no método de elementos finitos, onde uma malha é gerada, o método de volumes finitos também gera uma malha para analisar o deslocamento do fluido no meio em questão. A predição dos campos de concentração, velocidades, pressão, temperaturas e propriedades turbulentas, é efetuada através de modelos microscópicos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, no domínio do espaço e do tempo. Para a geração e monitoramento das cargas de vento sobre a superfície do modelo estrutural, foi utilizado o programa Autodesk CFD, que trabalha com as equações de Navier-Stokes (equação do momento) e a Primeira Lei da Termodinâmica (equação de energia), como pode ser observado nas Equações 11 a 16:

Equação de continuidade

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial pu}{\partial x} + \frac{\partial pv}{\partial y} + \frac{\partial pw}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Equação do momento em X

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \quad (12)$$

Equação do momento em Y

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ & \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (13)$$

Equação do momento em Z

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ & \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (14)$$

Os dois termos de origem nas equações de momento são para coordenadas de rotação e resistências distribuídas, respectivamente. Podem ser escritas como:

$$S_\omega = -2\rho\omega_i V_i - \rho\omega_i^2 r_i \quad (15)$$

$$S_{DR} = - \left(K_i + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - C\mu V_i \quad (16)$$

Onde:

C - coeficiente de viscosidade;

D_H - diâmetro hidráulico;

f - fator de atrito;

g_x, g_y, g_z - aceleração gravitacional nas direções x, y, z;

H - entalpia;

i - direção da coordenada global;

K - condutividade térmica;

r - distância do eixo de rotação;

t - tempo;

u, v, w - componente de velocidade na direção x, y, z;

V - fonte de calor volumétrico;

μ - viscosidade;
 ρ - densidade;
 ω - velocidade de rotação.

5.2 Domínio de cálculo

Para fluxos externos, costuma-se inverter a geometria. Isso significa que o objeto se torna estacionário e o fluxo é soprado sobre ele na velocidade igual e oposta do objeto físico. Para implementar isso como geometria de análise, duas peças de geometria são necessárias: o próprio objeto (míssil, carro, projétil, prédio e etc.) e um grande domínio de cálculo no qual o objeto é posicionado.

A forma do domínio geralmente não é muito crítica e pode ser um círculo, semicírculo, retângulo, esfera ou caixa. Como o fluxo ao redor do objeto está sendo modelado, é necessário tornar o domínio de cálculo substancialmente maior do que o próprio objeto. Para isso, o manual do software define as especificações mínimas para dimensionar o domínio de cálculo, conforme Figura 19.

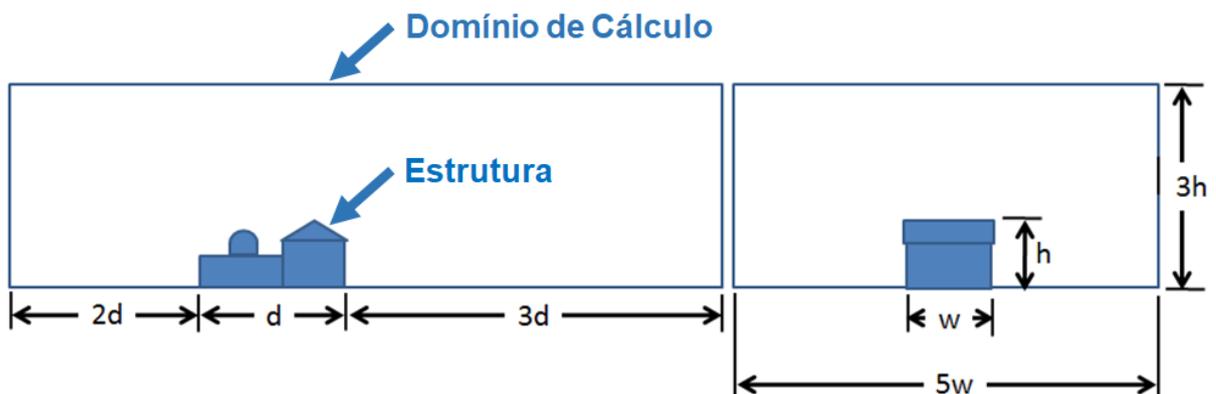


Figura 19 - Domínio de cálculo para a simulação (Autodesk CFD User Guide, 2022).

Sendo que:

d - profundidade (depth);
 h - altura (height);
 w - largura (width).

5.3 Materiais

De acordo com os materiais contidos no banco de dados do software, nós precisamos definir o(s) material(is) da estrutura em estudo (alumínio, concreto, aço, madeira, vidro e etc), além de definir em qual o tipo de fluído (água, ar, CO₂, vapor e etc) essa estrutura estará imersa. Para o modelo estrutural analisado, foi selecionado o concreto para a estrutura e ar para o fluído, como pode ser observado na Figura 20.

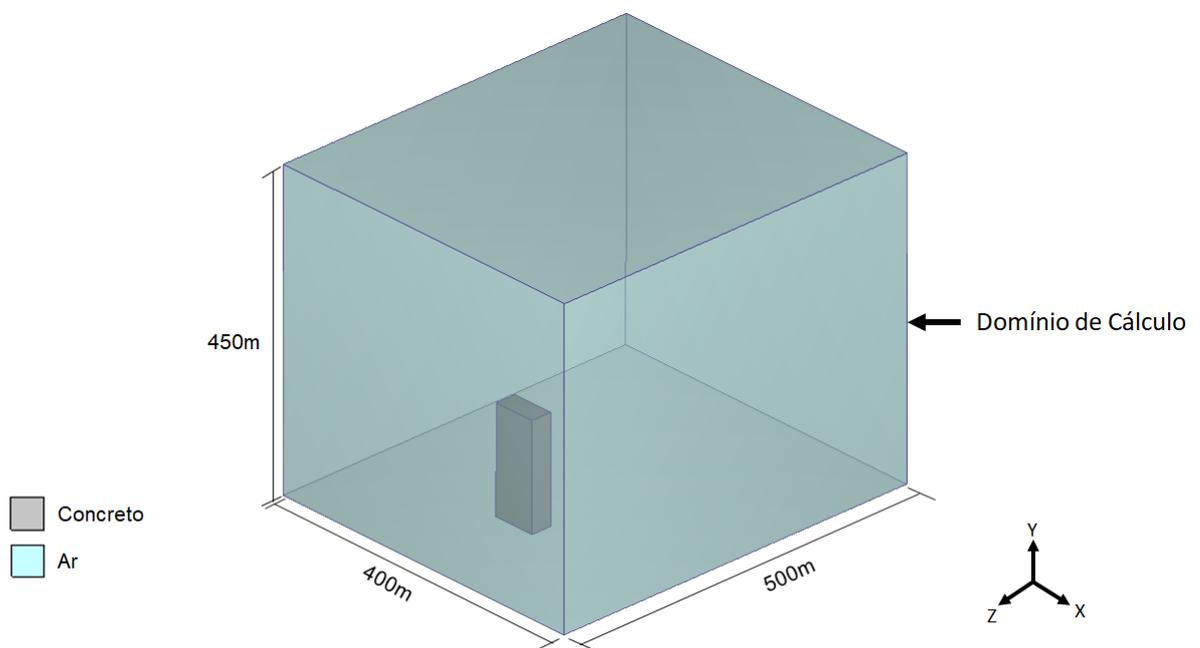


Figura 20 - Túnel de vento virtual (CFD).

Dessa forma o domínio de cálculo ou volume finito tem um total de $90 \times 10^6 \text{ m}^3$. Isto equivale a um volume superior ao mínimo recomendado pelo manual do software Autodesk CFD, que para dimensões da estrutura utilizada nesse estudo seria de $24,3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

5.4 Condições de contorno

Outro passo importante para a realizar a simulação são as condições de contorno para análises de carregamento de vento, são elas:

- Definir a entrada (inlet) do volume de ar atribuindo a velocidade do vento como uma condição de limite de velocidade;
- Definir a saída (outlet) do volume de ar atribuindo a pressão de medição estática = 0;
- Definir as regiões laterais, base e topo como área de deslizamento (slip). Essas regiões tem o comportamento de paredes.

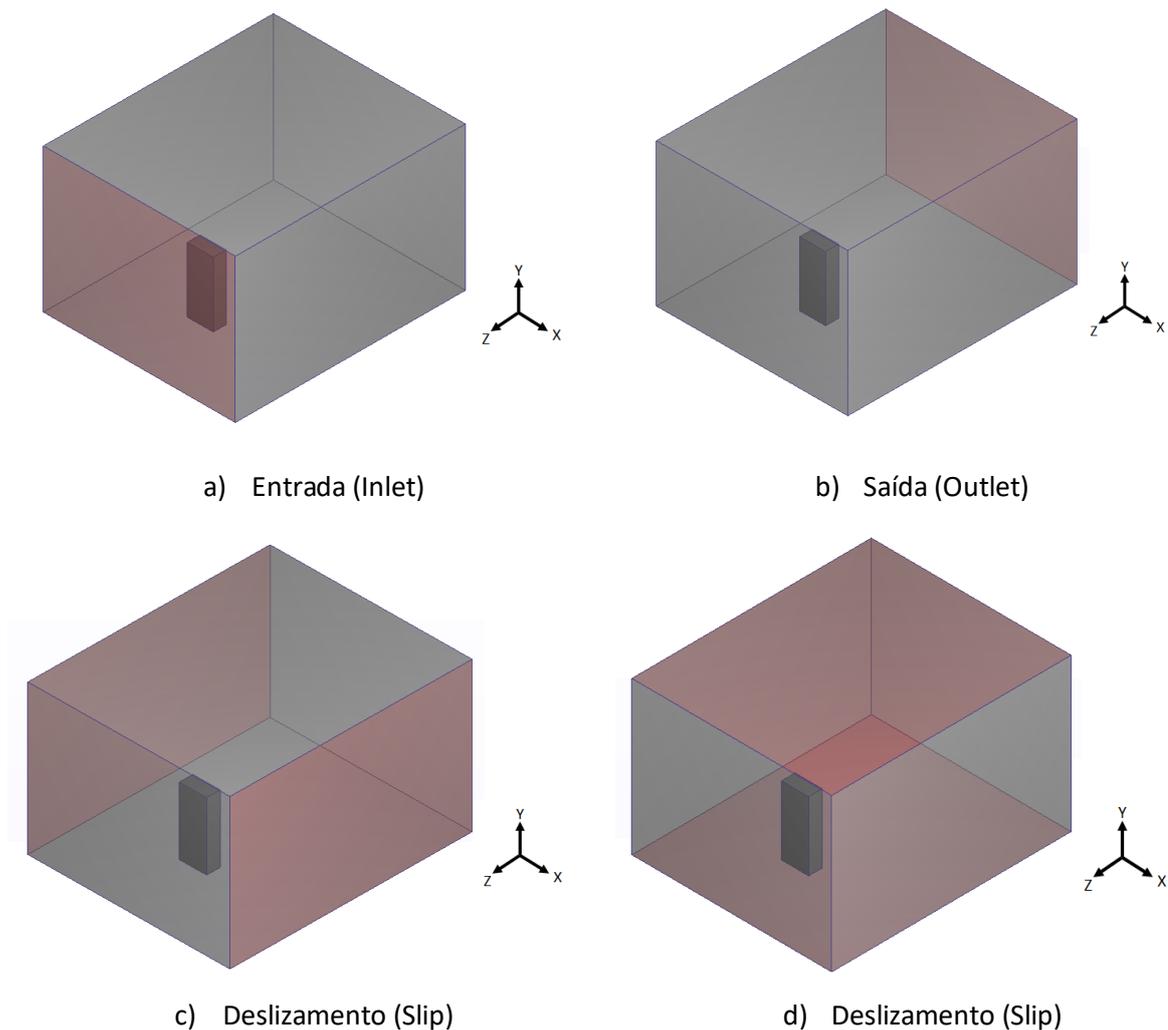


Figura 21 - Configuração das faces do domínio de cálculo (CFD).

O volume de entrada do ar deverá ser configurado com velocidades diferentes de acordo com a altura em relação ao solo, isso se deve ao coeficiente de rugosidade do terreno, veja a Equação (1).

A Figura 22 mostra a variação de velocidade do vento em relação à altura do edifício que deverá ser utilizada para as simulações no túnel de vento virtual.

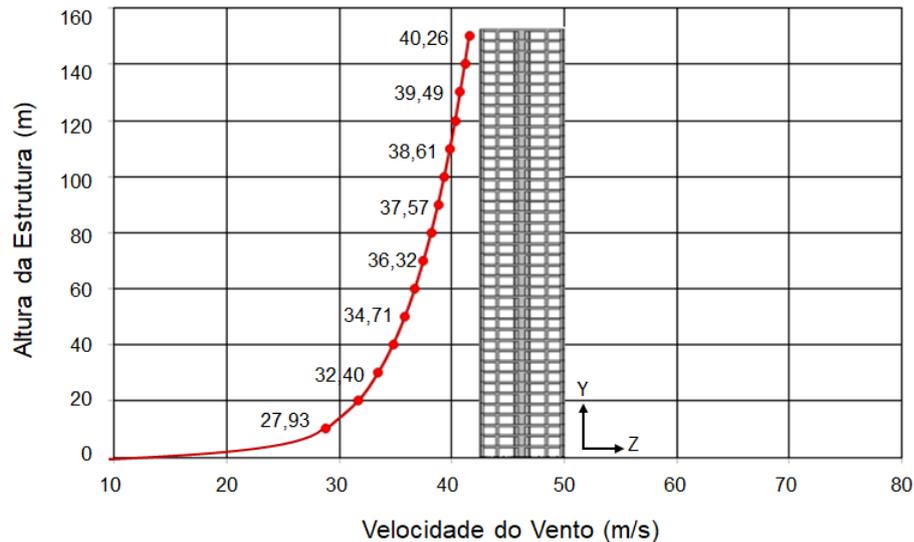


Figura 22 - Variação da velocidade do vento ao longo da altura do edifício.

Outro fator importante para realizar as simulações é escolher entre o fluxo de vento laminar ou turbulento. De acordo com a geografia, a única forma de termos um fluxo de vento laminar é se a estrutura está à beira de um lago ou à beira da praia, para todos os demais casos, o fluxo de vento será turbulento (WILCOX, 1988). Veja a Figura 23.

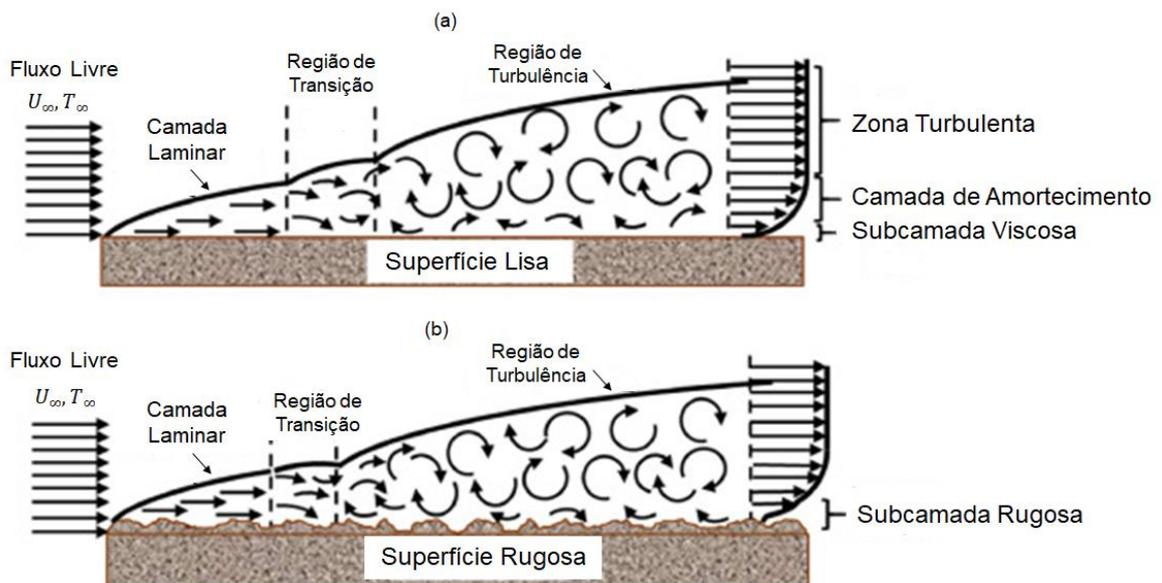


Figura 23 - Comportamento do fluxo de vento.

Para o presente trabalho de pesquisa, foi considerado do modelo de turbulência K-Epsilon. Esse modelo se baseia em duas variáveis, a primeira variável transportada é a energia cinética turbulenta (k) e a segunda variável transportada é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ε), como pode ser observado nas Equações 17 e 18:

Para energia cinética turbulenta (k)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (17)$$

Para dissipação (ε)

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (18)$$

Onde:

E_{ij} - componente da taxa de deformação;

k - energia cinética turbulenta;

ε - taxa de dissipação da energia cinética turbulenta;

t - tempo;

u_i - componente de velocidade na direção correspondente;

μ_t - viscosidade de redemoinho;

ρ - densidade.

Constantes:

$\sigma_k = 1,00$;

$\sigma_\varepsilon = 1,30$;

$C_{1\varepsilon} = 1,44$;

$C_{2\varepsilon} = 1,92$.

5.5 Pontos de monitoração

Para o modelo instrumentado no CFD, foram estabelecidos 600 pontos de monitoração onde foram realizadas as tomadas de pressão ao longo do tempo (Pressure tap locations). A Figura 24, mostra os pontos instrumentados para o modelo com a geometria igual a 1:2:5. Cada ponto de monitoração possui uma área de 45m².

Barlavento										Lateral Direita					Sotavento										Lateral Esquerda				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300
301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330
331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360
361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390
391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420
421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450
451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480
481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510
511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540
541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570
571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600

Figura 24 - Localização dos pontos instrumentados (CFD).

O Autodesk CFD permite que sejam criados uma quantidade indeterminada de pontos de monitoração na estrutura, todavia, o custo computacional é proporcional ao número de pontos de monitoração. Eles fornecem uma maneira de rastrear tendências e monitorar a convergência em locais específicos (críticos) no modelo de análise.

Cada ponto de monitoração definido no modelo (Figura 24) fornecerá um coeficiente de pressão externa que será utilizado para gerar as cargas de ventos, conforme a Equação 4.

5.6 Força do vento

Ao longo de um período de tempo t , a uma determinada altura z , a velocidade total $V(z,t)$ pode ser decomposta em duas parcelas: parcela média $\bar{V}(z)$ mais a parcela flutuante $\hat{V}(z,t)$. Conforme a Equação 19.

$$V(z,t) = \bar{V}(z) + \hat{V}(z,t) \quad (19)$$

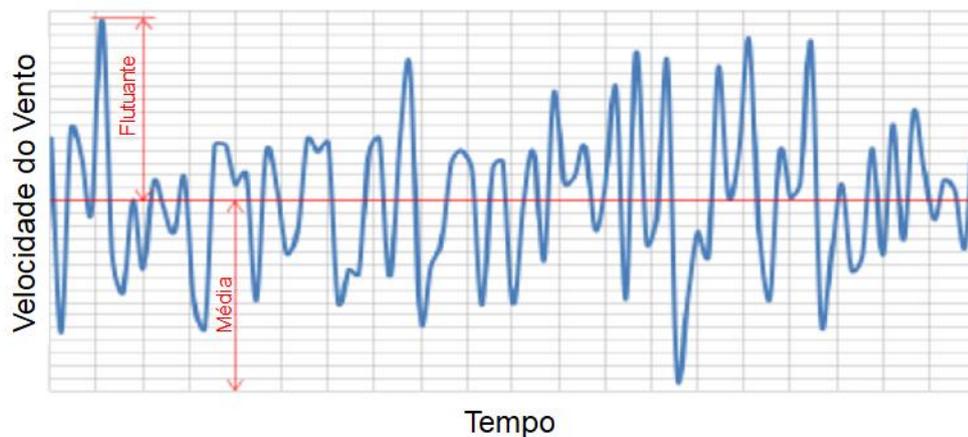


Figura 25 - Variação da velocidade do vento ao longo do tempo.

A parcela média, para uma determinada região, pode ser obtida pela Equação 2, descrita na NBR 6123 (1988). A parcela flutuante da velocidade do vento apresenta características não determinísticas e, dessa forma, para sua representação, são utilizados os parâmetros estatísticos como média, desvio padrão e função de densidade espectral.

A Série de Fourier possibilita a representação de um sinal, descrito por uma função analítica $\hat{V}(z,t)$, como um somatório finito de harmônicos com amplitudes, frequências e ângulos de fase a serem determinados de acordo com as características do sinal, conforme a Equação 20.

$$V(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S(f_i, z)} \Delta f \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (20)$$

Onde:

f_i - frequências;

$S(f_i, z)$ - densidade espectral;

Δf - incremento de frequência;

t - tempo;

θ_i - ângulos de fase gerados randomicamente.

Neste trabalho será utilizado o espectro de potência de Kaimal (Blessmann, 2013), que considera a influência da altura da estrutura em sua formulação. As Equações 21 e 22 definem o Espectro de Kaimal, onde f é a frequência em Hz, $S(f_n, z)$ corresponde à densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência (f), X é a frequência adimensional, u_* é a velocidade de fricção e $\bar{V}(z)$ representa a velocidade média do vento na cota considerada z .

$$\frac{fS(f, z)}{u_*^2} = \frac{200X}{(1 + 50X)^{5/3}} \quad (21)$$

$$X(f, z) = \frac{fz}{\bar{V}(z)} \quad (22)$$

A velocidade de fricção (u_*) associada aos espectros de potência, dada em m/s, é determinada pela Equação 23, onde k corresponde à constante de Kármán igual a 0,4 e z_0 refere-se ao comprimento de rugosidade.

$$u_* = \frac{k\bar{V}(z)}{\ln(z/z_0)} \quad (23)$$

5.7 Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método CFD

Visando resumir a metodologia para gerar as cargas de vento pelo método CFD adotado neste trabalho, a Figura 26 apresenta um fluxograma do passo a passo desta metodologia.

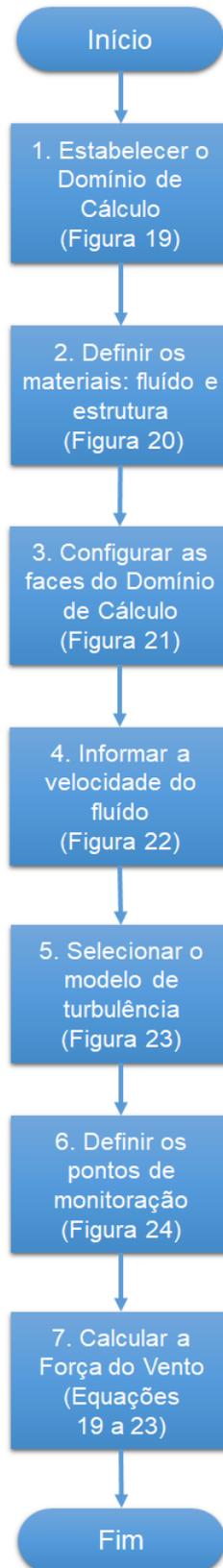


Figura 26 - Fluxograma para gerar as cargas de vento pelo método CFD.

6 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

6.1 Introdução

No intuito de validar os quatro métodos (NBR 6123, DEDM-HRP, HFPI-TPU e CFD) anteriormente citados, no que tange à determinação dos deslocamentos máximos (Estado Limite Último) e das acelerações (Conforto Humano) das edificações quando sujeitas as ações do vento, neste capítulo, o modelo estrutural teórico de um edifício retangular em concreto armado será avaliado.

O modelo desenvolvido possui proporções volumétricas padrões que coincidem com as medidas investigadas pela Universidade Politécnica de Tóquio [TPU-DB]. Sendo assim, torna-se possível a utilização de pressões de vento oriundas de dados disponibilizadas por esta plataforma bem como da plataforma VORTEX-Winds disponibilizada pela Universidade de Notre Dame (Indiana, EUA).

6.2 Hipóteses simplificadoras

Consideram-se, de modo a simplificar a modelagem do edifício, as seguintes hipóteses: a estrutura trabalha no regime linear elástico (linearidade física); não são levados em conta os efeitos da geometria deformada (linearidade geométrica); o material (concreto) apresenta isotropia; e as seções transversais permanecem planas após as solicitações de carregamento (hipótese de Bernoulli).

Em se tratando de ligações entre os elementos BEAM44 e SHELL63, são utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “off-set”, onde pode ser considerado a excentricidade do plano central da laje em relação ao eixo central da viga, conforme configuração do elemento BEAM44.

As condições de contorno consideradas nesta análise restringem os nós da base, de modo que os mesmos estejam impedidos de se deslocarem translacionalmente, na horizontal e na vertical, enquanto a rotação permanece sem restrições nos três eixos x, y e z, configurando, assim, em apoios do 2º gênero.

6.3 Características físicas e geométricas do modelo teórico

O modelo estrutural avaliado neste trabalho de pesquisa é constituído por pilares, vigas e lajes em concreto armado. O concreto estrutural utilizado nesses modelos possui resistência à compressão (f_{ck}) igual a 45 MPa, módulo de elasticidade (E_{cs}) igual a 34 GPa, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2, peso específico (γ_c) de 25 kN/m³ e densidade de 211 kg/m³. O modelo apresenta proporções volumétricas iguais a 1:2:5 e suas características estão apresentadas nas Figuras 27 a 29.

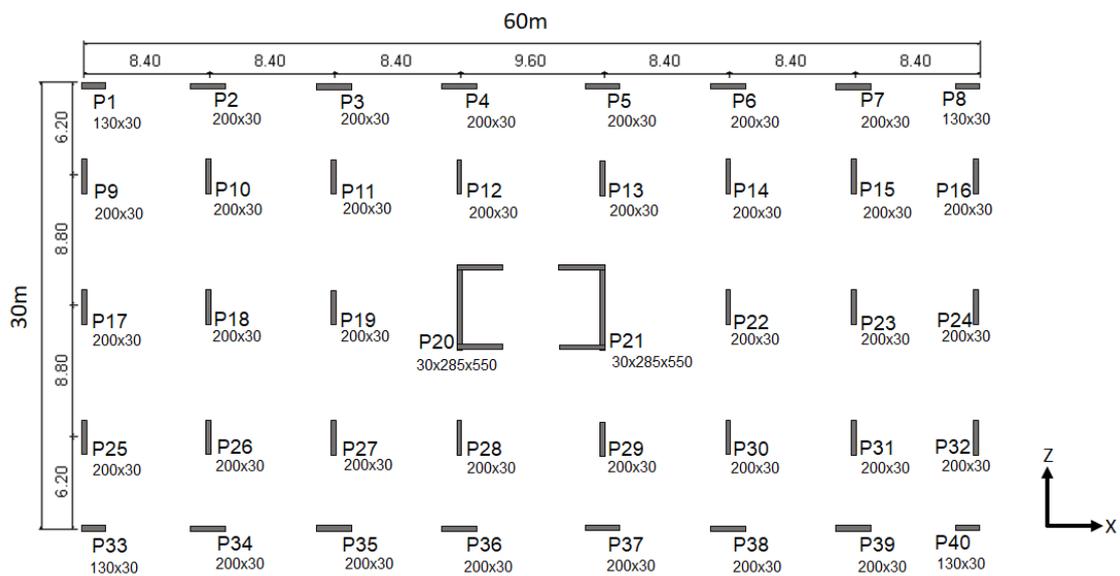


Figura 27 - Planta de localização dos pilares do modelo estrutural.

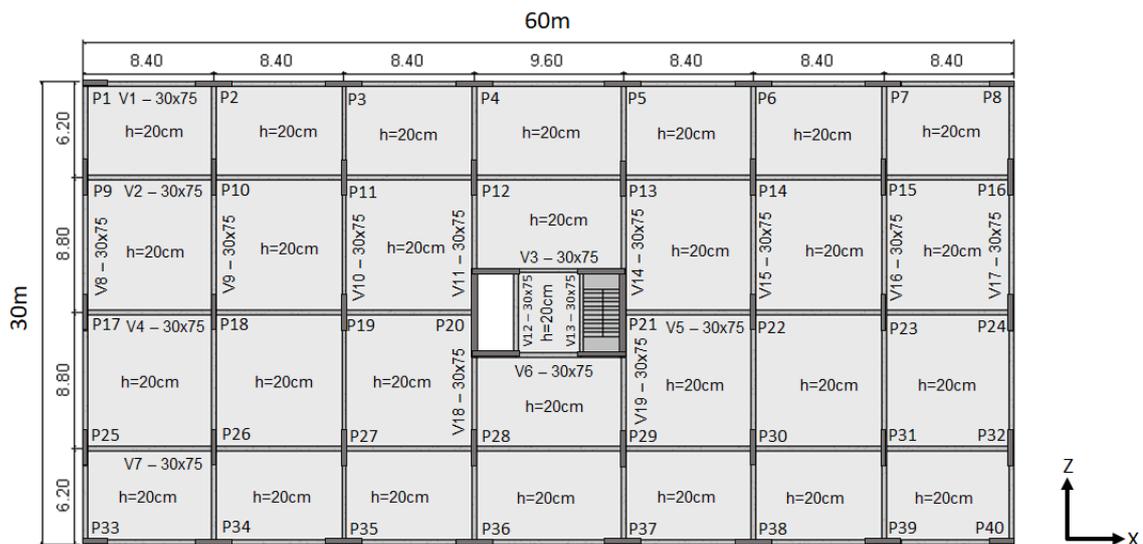


Figura 28 - Planta estrutural do modelo.

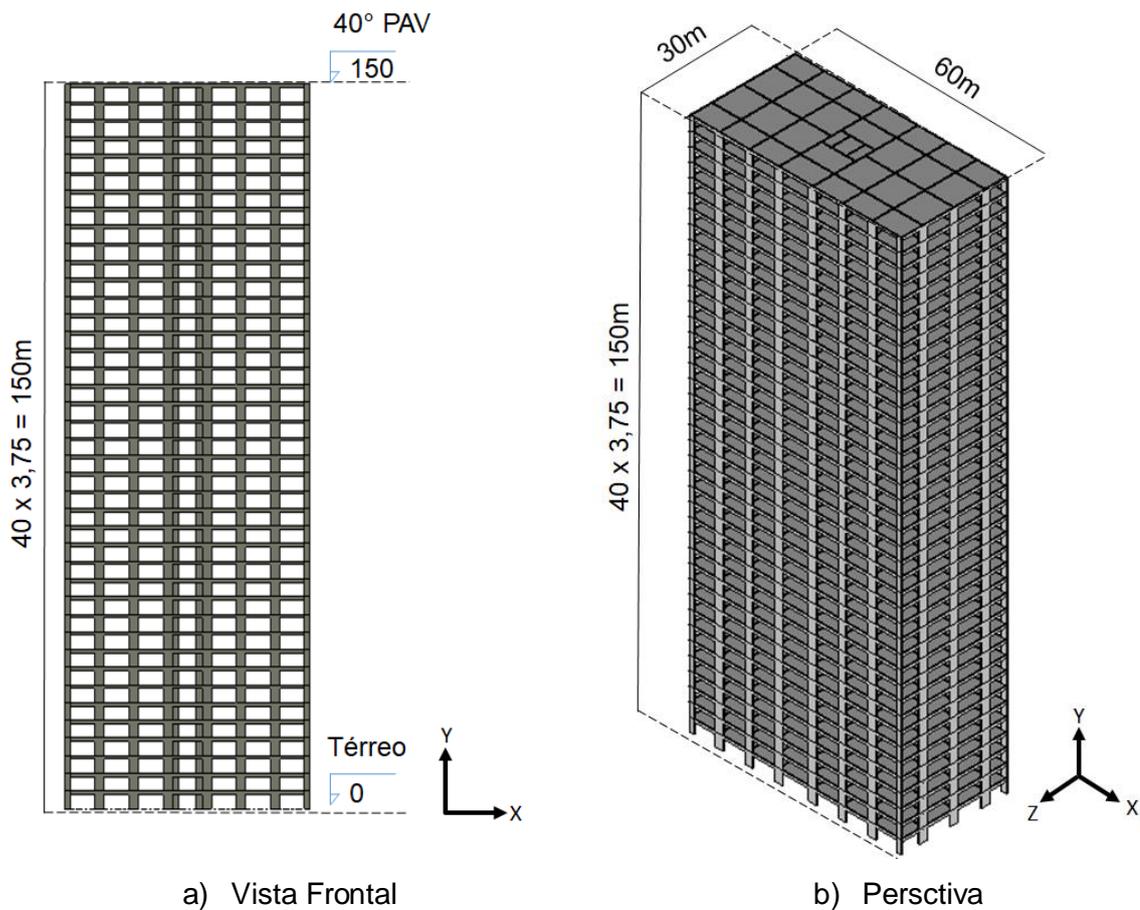


Figura 29 - Modelo estrutural.

6.4 Modelagem numérica do modelo

O modelo estrutural é investigado utilizando o programa computacional ANSYS (2020), empregando técnicas usuais de discretização através do método dos elementos finitos (Figura 30). O refinamento da malha é ordem de 75 por 75 centímetros, demonstrando um bom refinamento para os modelos estudados.

Os pilares e vigas foram simulados através do elemento finito tridimensional de viga BEAM44 (ANSYS, 2020). Este é um elemento uniaxial composto por dois nós e cada nó possui seis graus de liberdade: translação nas direções x, y e z e rotação nos eixos x, y e z. Permite a utilização de qualquer tipo de seção transversal, desde que se definam as propriedades necessárias para tal.

Para as lajes foi utilizado o elemento finito de casca SHELL63 (ANSYS, 2020). Este elemento considera os efeitos de flexão e membrana, como também se caracteriza por possuir seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas

direções x, y e z. As cargas podem ser aplicadas ortogonalmente e também paralelamente sobre este elemento.

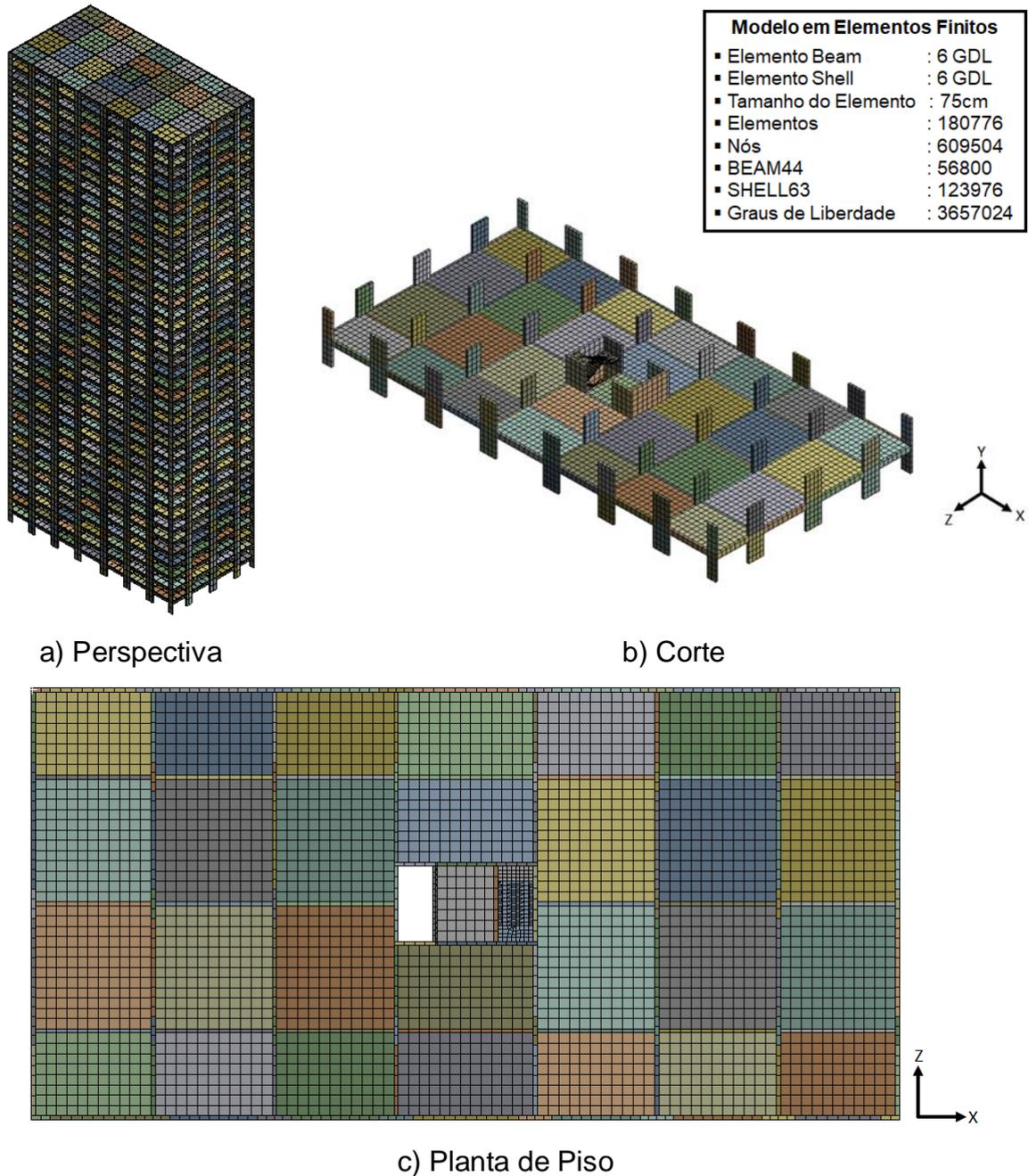


Figura 30 - Modelo estrutural discretizado em elementos finitos.

Os elementos numéricos BEAM44 e o SHELL63, utilizados neste modelo computacional, tem suas características e comportamentos discriminados no Apêndice A. A convergência numérica do tamanho da malha adotada encontra-se no Apêndice B.

7 ANÁLISE ESTÁTICA

7.1 Introdução

Nesse capítulo, são apresentados os resultados das análises estáticas. Considerou-se a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos na estrutura, levando-se em conta o estado-limite de serviço e o estado limite último.

7.2 Descrição dos carregamentos

Os carregamentos adotados para a análise estática foram separados em cargas verticais (peso próprio da estrutura, cargas permanentes de revestimentos, cargas permanentes devido às alvenarias, sobrecargas de utilização e cargas horizontais (devido ao vento). O peso próprio dos elementos estruturais foi calculado diretamente pelo programa ANSYS, considerando toda a estrutura em concreto armado com peso específico (γ_c) de 25 kN/m³. Para vedação da fachada do prédio, considerou-se cortina de vidro com peso específico 1,5 kN/m². Foi considerada também uma carga permanente de revestimento sobre os pisos igual a 1,0 kN/m². A Tabela 6 apresenta os valores das cargas verticais aplicados na estrutura.

Tabela 6 - Resumo das cargas verticais aplicadas sobre a estrutura.

Cargas	Abreviatura	Tipo	Valores
Peso próprio da estrutura	PP	Permanente	2500 Kg / m ³
Revestimentos no piso	CP ₁	Permanente	100 Kg / m ²
Cortina de vidro	CP ₂	Permanente	150 Kg / m ²
Sobrecarga de utilização	SC	Variável	150 Kg / m ²

Para determinação das cargas horizontais devido ao vento, de acordo com a NBR 6123 (1988), primeiramente é necessário classificar a edificação e o terreno onde a mesma será executada, veja a tabela 3. Para simplificar o entendimento da

aplicação das cargas de ventos, os mesmos foram nomeados em força longitudinal (eixo Z) e força transversal (eixo X).

Tabela 7 - Resumo das cargas estáticas horizontais aplicadas sobre a estrutura.

Piso	Cota (m)	Força Longitudinal	Força Transversal
40° Pav	150,00	76,59	28,72
39° Pav	146,25	76,07	28,53
38° Pav	142,50	75,54	28,33
37° Pav	138,75	75,00	28,12
36° Pav	135,00	74,45	27,92
35° Pav	131,25	73,88	27,71
34° Pav	127,50	73,31	27,49
33° Pav	123,75	72,72	27,27
32° Pav	120,00	72,12	27,04
31° Pav	116,25	71,50	26,81
30° Pav	112,50	70,87	26,58
29° Pav	108,75	70,22	26,33
28° Pav	105,00	69,56	26,09
27° Pav	101,25	68,88	25,83
26° Pav	97,50	68,18	25,57
25° Pav	93,75	67,47	25,30
24° Pav	90,00	66,73	25,02
23° Pav	86,25	65,96	24,74
22° Pav	82,50	65,18	24,44
21° Pav	78,75	64,36	24,14
20° Pav	75,00	63,52	23,82
19° Pav	71,25	62,65	23,49
18° Pav	67,50	61,74	23,15
17° Pav	63,75	60,79	22,80
16° Pav	60,00	59,81	22,43
15° Pav	56,25	58,77	22,04
14° Pav	52,50	57,69	21,63
13° Pav	48,75	56,55	21,20
12° Pav	45,00	55,34	20,75
11° Pav	41,25	54,05	20,27
10° Pav	37,50	52,68	19,75
9° Pav	33,75	51,20	19,20
8° Pav	30,00	49,60	18,60
7° Pav	26,25	47,84	17,94
6° Pav	22,50	45,89	17,21
5° Pav	18,75	43,69	16,38
4° Pav	15,00	41,13	15,43
3° Pav	11,25	38,06	14,27
2° Pav	7,50	34,11	12,79
1° Pav	3,75	28,29	10,61
Térreo	0,00	0,00	0,00

Tabela 8 - Deslocamento horizontal provocado pelas cargas de vento longitudinais.

Modelo Estrutural	Cota (m)	Deslocamento (mm)
	150,00	40,68
	142,50	39,62
	135,00	38,48
	127,50	37,13
	120,00	36,29
	112,50	35,15
	105,00	34,10
	97,50	31,91
	90,00	30,72
	82,50	28,83
	75,00	27,53
	67,50	25,34
	60,00	23,14
	52,50	21,95
	45,00	19,88
	37,50	18,76
	30,00	16,57
	22,50	14,38
	15,00	12,91
	7,50	9,99
	0,00	0,00

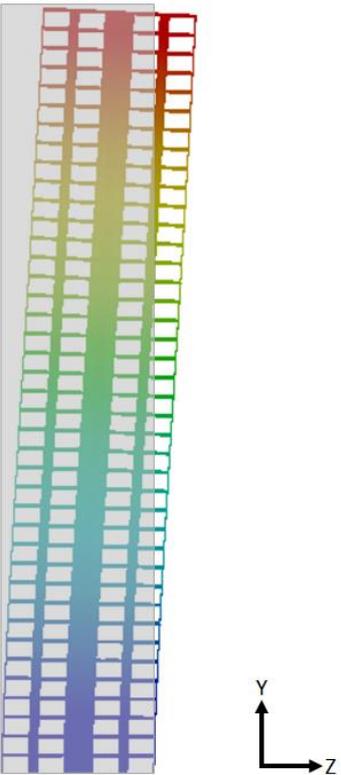
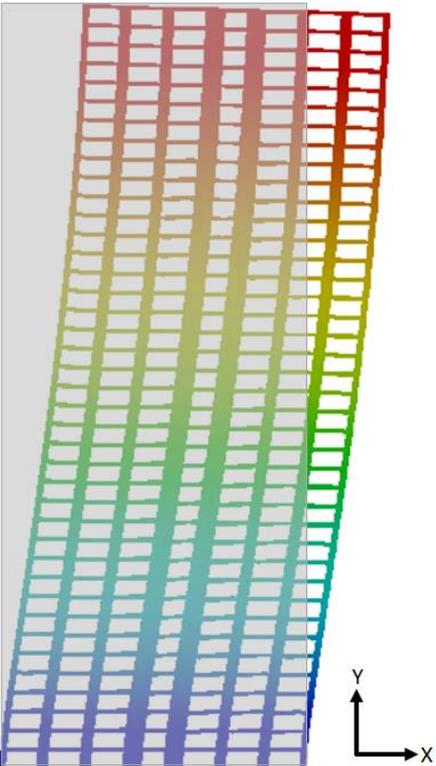


Tabela 9 - Deslocamento horizontal provocado pelas cargas de vento transversais.

Modelo Estrutural	Cota (m)	Deslocamento (mm)
	150,00	16,23
	142,50	15,99
	135,00	15,42
	127,50	14,88
	120,00	14,62
	112,50	14,01
	105,00	13,92
	97,50	13,67
	90,00	13,02
	82,50	12,78
	75,00	12,21
	67,50	12,01
	60,00	11,42
	52,50	11,19
	45,00	10,61
	37,50	10,23
	30,00	9,81
	22,50	9,39
	15,00	9,02
	7,50	8,50
	0,00	0,00



7.3 Deslocamentos translacionais

O cálculo do Estado Limite de Serviço tem como objetivo calcular as ações solicitantes na estrutura analisada, levando em consideração o conforto humano e a durabilidade. Estas ações são classificadas em dois tipos: permanentes e variáveis. As cargas variáveis presentes no edifício analisado podem ser classificadas como frequentes, logo, a Equação (24) será utilizada para a combinação.

$$F_{d,ser} = \sum F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \sum \psi_{2j} F_{qjk} \quad (24)$$

A NBR 6118 determina que todas as ações devem ser ponderadas por um coeficiente γ_f que, para o Estado Limite de Serviço é $\gamma_f = 1,00$. Considerando o vento como a ação principal, e as demais ações como secundárias, a Tabela 10 apresenta os valores dos respectivos fatores de redução de acordo com a NBR 6118. Conforme a Equação (24) e os coeficientes apresentados na Tabela 10, a Equação (25) apresenta a combinação para o Estado Limite de Serviço.

Tabela 10 - Coeficientes ψ_1 e ψ_2 para ações variáveis.

Pressão dinâmica do vento	$\psi_1 = 0,3$
Sobrecarga acidental	$\psi_2 = 0,3$

$$F_{d,ser} = \gamma_f(\text{cargas permanentes}) + \gamma_f \psi_2(\text{cargas acidentais}) + \gamma_f \psi_1(\text{carga de vento}) \quad (25)$$

De acordo com a NBR 6118, o deslocamento no topo de uma edificação provocado pela ação do vento para combinação frequente não deve ultrapassar o limite de $h/1700$, onde h é a altura total da edificação. Portanto, para a edificação em estudo com altura $H = 150$ m, o deslocamento limite é de 88 mm. O valor máximo de deslocamento horizontal na direção Z obtido no topo da edificação foi de $u_z = 40,68$ mm e $u_x = 16,23$ mm. O deslocamento encontrado se apresenta de forma satisfatória, pois atende ao deslocamento limite imposto pela norma brasileira para verificações do Estado Limite de Serviço.

8 ANÁLISE MODAL

8.1 Introdução

Com base na simulação numérica realizada, são obtidos as frequências naturais e os modos de vibração do edifício em concreto armado investigado. Neste capítulo são apresentadas as dez primeiras frequências naturais do edifício em estudo e seus respectivos modos de vibração, através da aplicação do programa computacional ANSYS (2020).

8.2 Formulação matemática

A análise modal está associada ao problema da vibração livre não amortecida, e pode ser expressa pela Equação (26), cuja solução trivial é uma função do tempo (t) e possui a forma apresentada na Equação (27).

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (26)$$

$$\{u\} = \{U\} \text{sen}(\omega t + \theta) \quad (27)$$

Onde:

[M]: Massa (kg);

{ \ddot{u} }: Aceleração (m^2/s);

[K]: Rigidez (N/m);

{u}: Deslocamento (m);

{U}: Amplitude da função modal senoidal (m);

ω : Frequência angular (rad/s);

θ : Ângulo de fase (rad).

A Equação (19) para ser resolvida recai em um problema de autovalores e autovetores, onde cada autovalor corresponde a uma frequência natural da estrutura, e o respectivo autovetor representa o modo de vibração correspondente à frequência em questão.

8.3 Frequências naturais e modos de vibração

Para avaliação do modelo estudado neste capítulo foram considerados os dez primeiros modos de vibração. Os três primeiros modos são os preponderantes para as respostas dinâmicas. As frequências naturais e modos de vibração do modelo são obtidos através de análises numéricas modais utilizando o ANSYS (2020).

Tabela 11 - Frequências naturais e modos de vibração.

Frequências naturais do edifício de múltiplos andares (Hz)					
Φ_i	Frequência (Hz)	Massa (kg)	Rigidez (kN/m)	Amortecimento (Ns/m)	Fenômeno Físico
f_{01}	0,309	$2,21 \times 10^7$	$8,33 \times 10^7$	$1,72 \times 10^6$	Flexão em torno do eixo Z
f_{02}	0,325	$1,71 \times 10^7$	$7,12 \times 10^7$	$1,40 \times 10^6$	Flexão em torno do eixo X
f_{03}	0,416	$1,01 \times 10^7$	$6,89 \times 10^7$	$1,10 \times 10^6$	Torção em torno do eixo Y
f_{04}	0,965	$2,24 \times 10^7$	$8,24 \times 10^8$	$9,27 \times 10^6$	Flexão em torno do eixo Z
f_{05}	1,186	$2,13 \times 10^7$	$1,18 \times 10^9$	$1,29 \times 10^7$	Flexão em torno do eixo X
f_{06}	1,288	$1,01 \times 10^7$	$6,62 \times 10^8$	$7,14 \times 10^6$	Torção em torno do eixo Y
f_{07}	1,753	$2,28 \times 10^7$	$2,77 \times 10^9$	$2,91 \times 10^7$	Flexão em torno do eixo Z
f_{08}	2,303	$1,03 \times 10^7$	$2,15 \times 10^9$	$2,23 \times 10^7$	Torção em torno do eixo Y
f_{09}	2,415	$2,15 \times 10^7$	$4,95 \times 10^9$	$5,12 \times 10^7$	Flexão em torno do eixo X
f_{10}	2,548	$2,41 \times 10^7$	$6,17 \times 10^9$	$6,38 \times 10^7$	Torção em torno do eixo Z

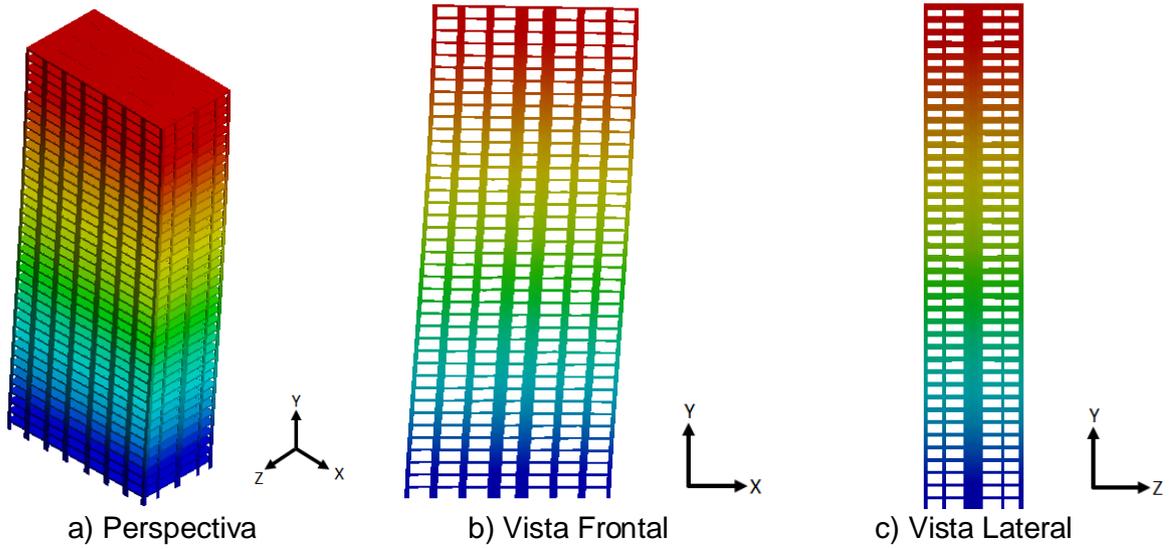


Figura 31 - 1º Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{01} = 0,309$ Hz.

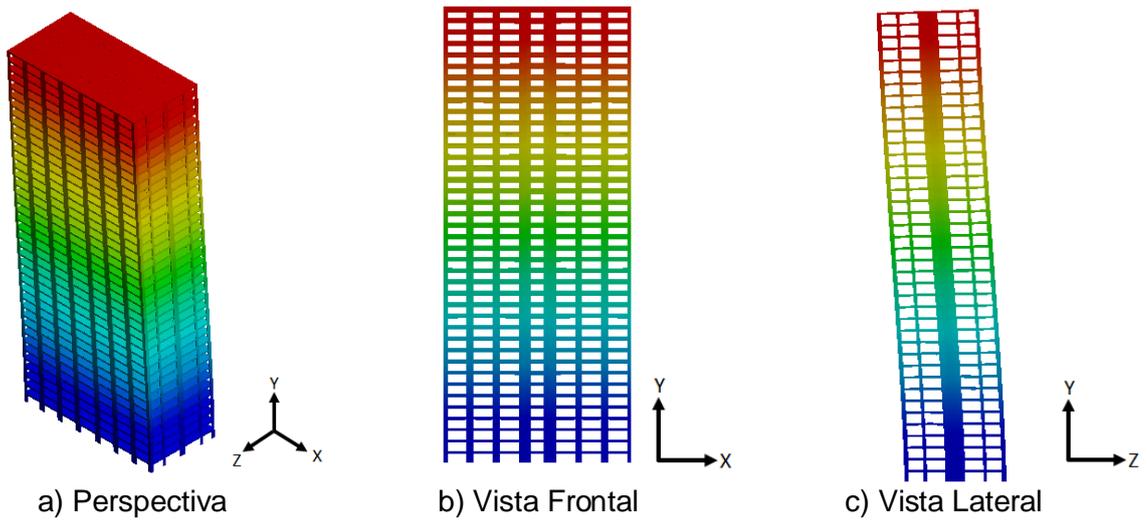


Figura 32 - 2º Modo (Flexão em torno do eixo X): $f_{02} = 0,325$ Hz.

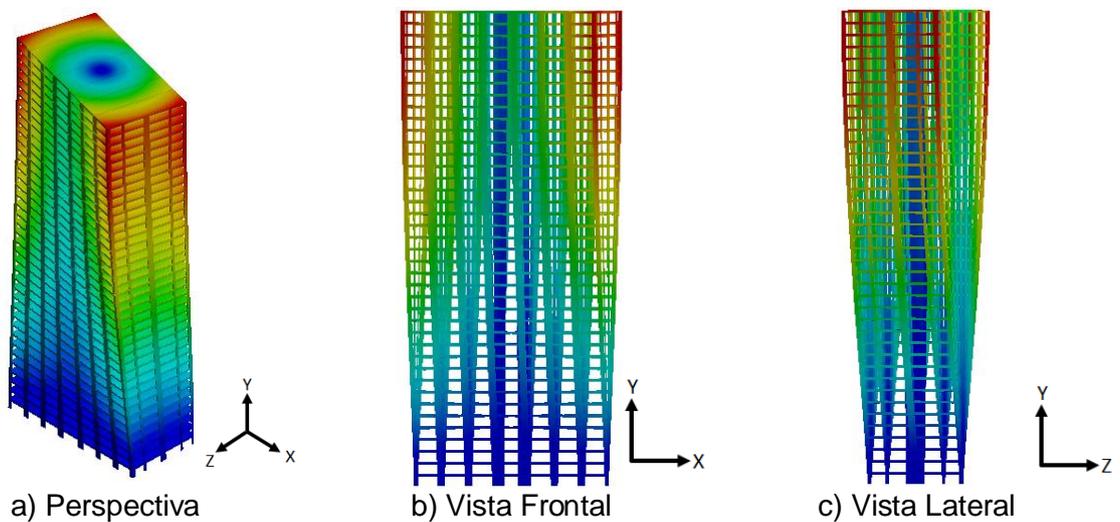


Figura 33 - 3º Modo (Torção em torno do eixo Y): $f_{03} = 0,416$ Hz.

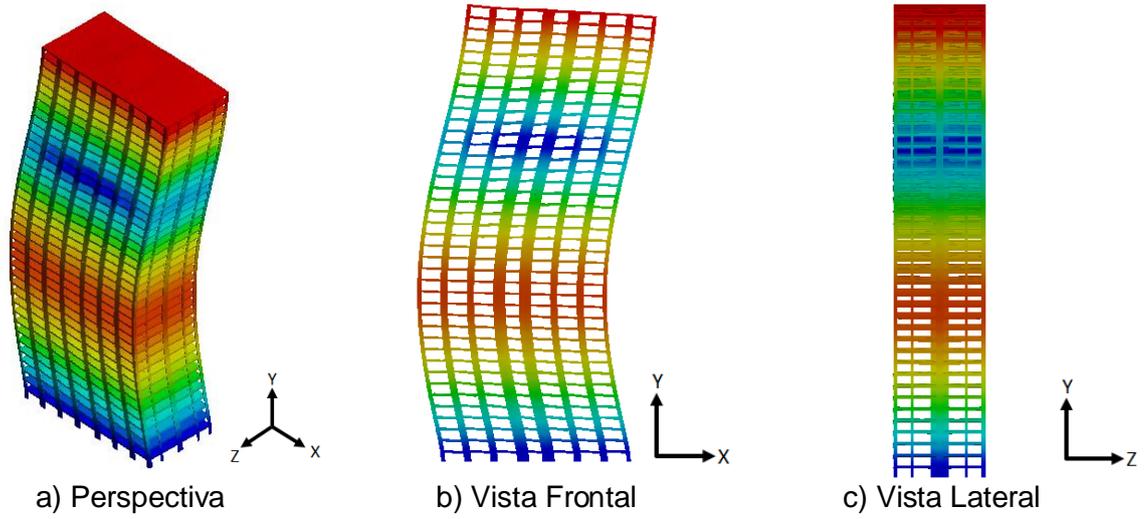


Figura 34 - 4° Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{04} = 0,965$ Hz.

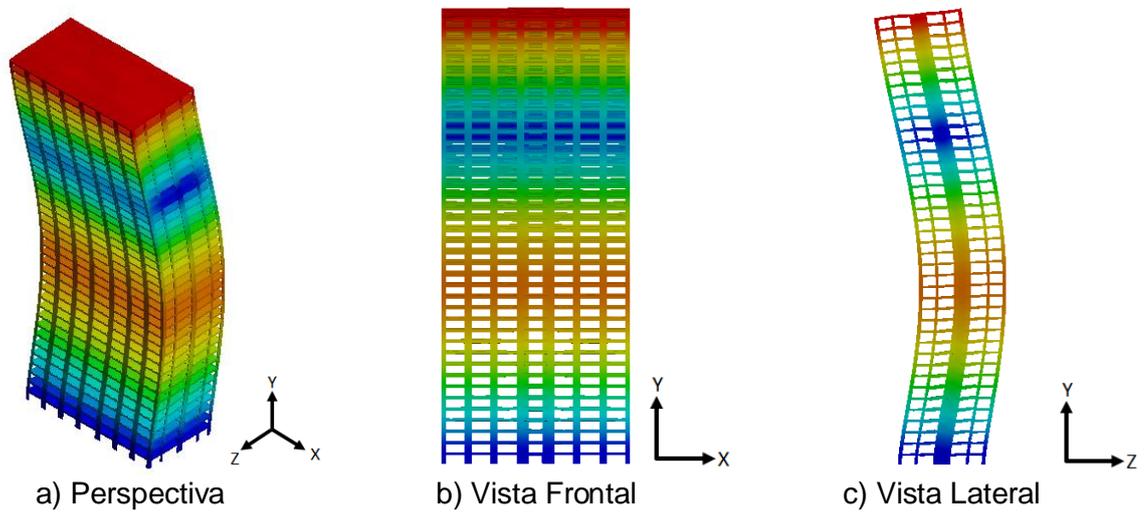


Figura 35 - 5° Modo (Flexão em torno do eixo X): $f_{05} = 1,186$ Hz.

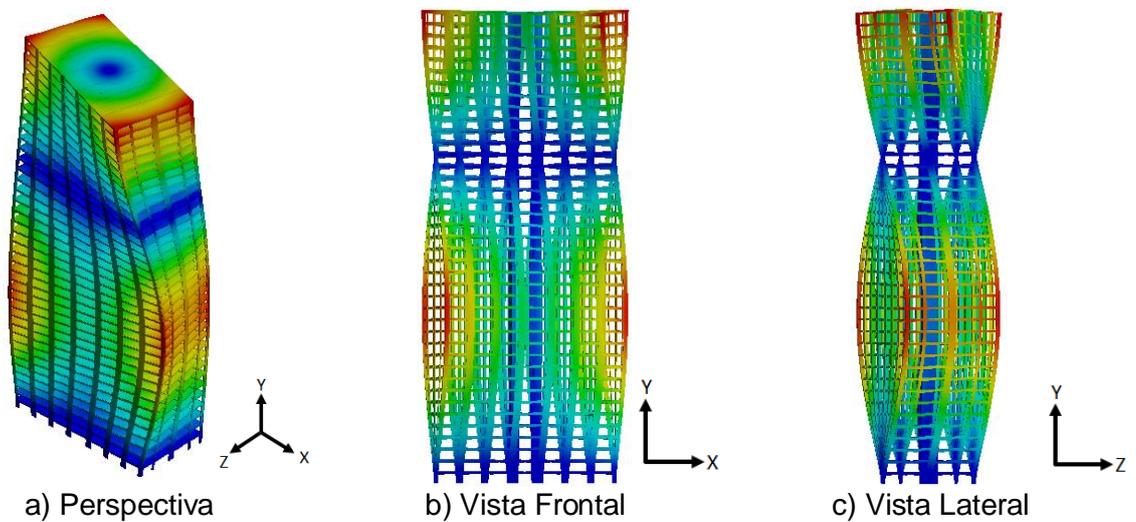


Figura 36 - 6° Modo (Torção em torno do eixo Y): $f_{06} = 1,288$ Hz.

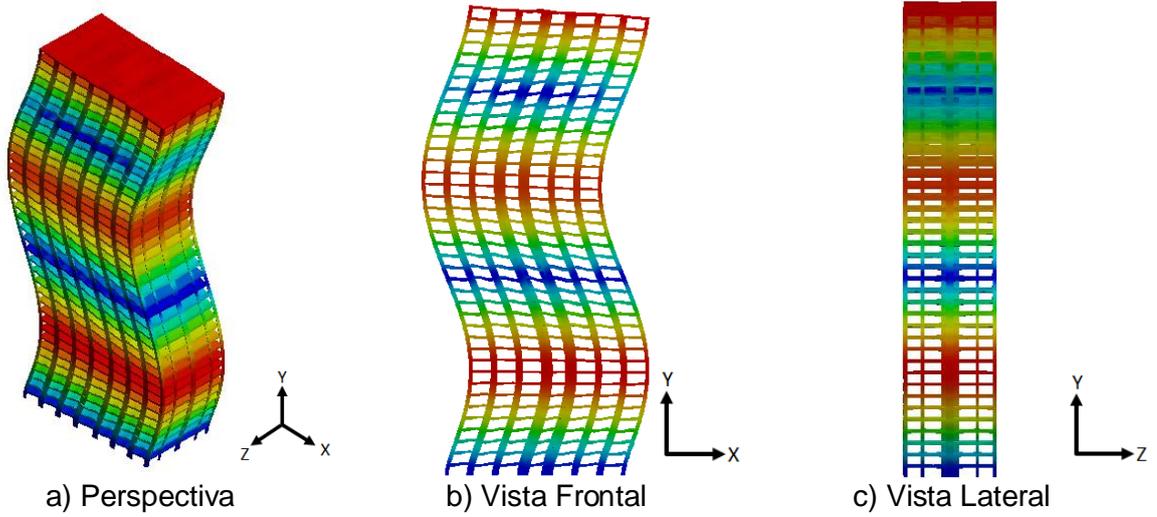


Figura 37 - 7º Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{07} = 1,753$ Hz.

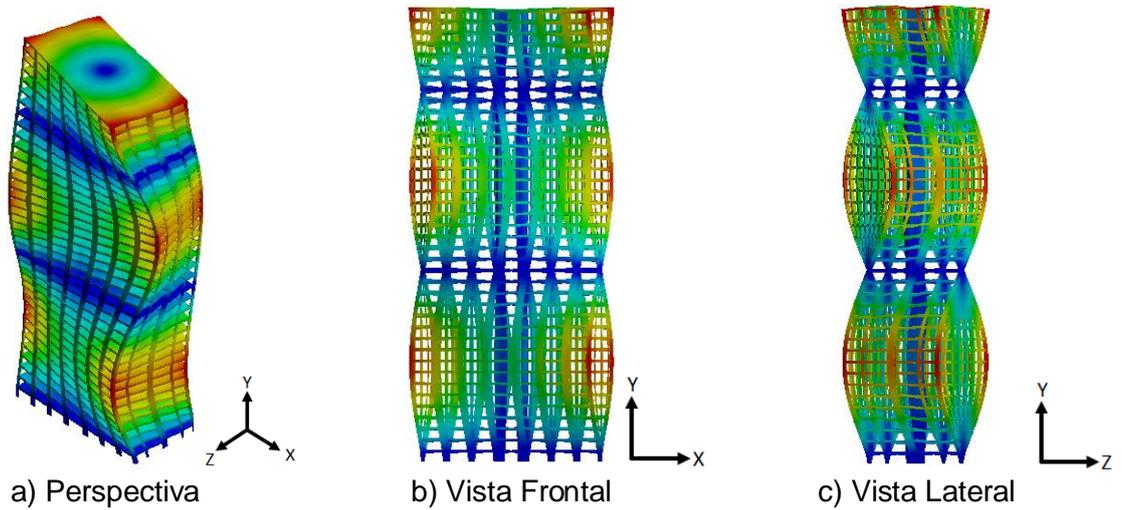


Figura 38 - 8º Modo (Torção em torno do eixo Y): $f_{08} = 2,303$ Hz.

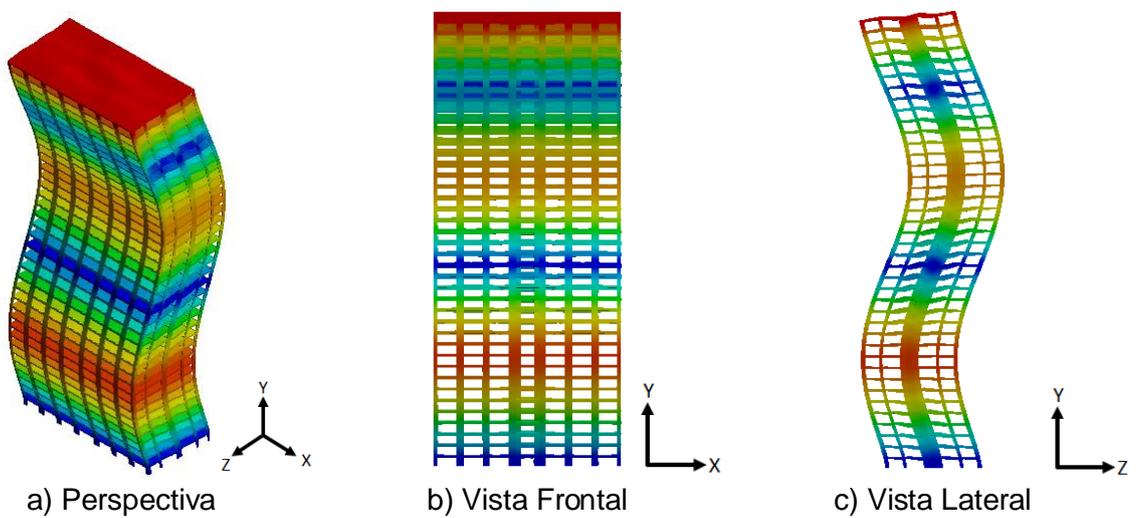


Figura 39 - 9º Modo (Flexão em torno do eixo X): $f_{09} = 2,415$ Hz.

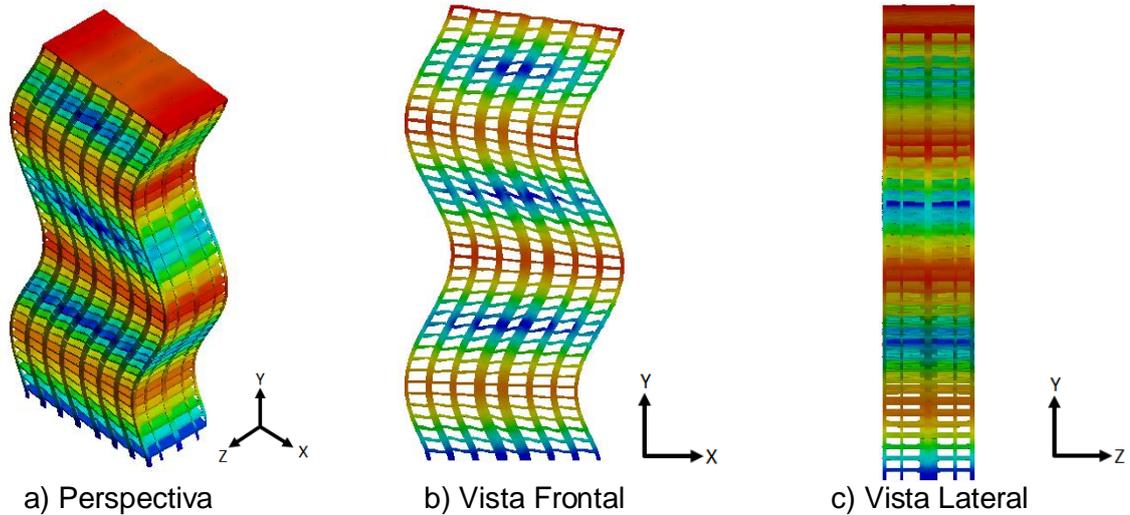


Figura 40 - 10º Modo (Flexão em torno do eixo Z): $f_{10} = 2,548$ Hz.

Verifica-se que o valor da frequência fundamental do edifício em estudo ($f_{01} = 0,3$ Hz) é relativamente baixo, o que demonstra a alta rigidez da estrutura. Tal rigidez enfatiza a necessidade de se analisar a resposta dinâmica da estrutura. Os cinco primeiros modos de vibração são de especial interesse para a análise do comportamento dinâmico da estrutura, quando submetida aos carregamentos de vento, por apresentar uma frequência de vibração dentro do espectro de maior energia eólica, no caso até 1 Hz.

Soltys (2012) utilizou os dados de um anemômetro ultrassônico para obter os parâmetros estatísticos e as densidades espectrais do vento nas três direções. Com esses estudos foi possível observar que as frequências abaixo de 1 Hz concentram as maiores amplitudes de velocidade.

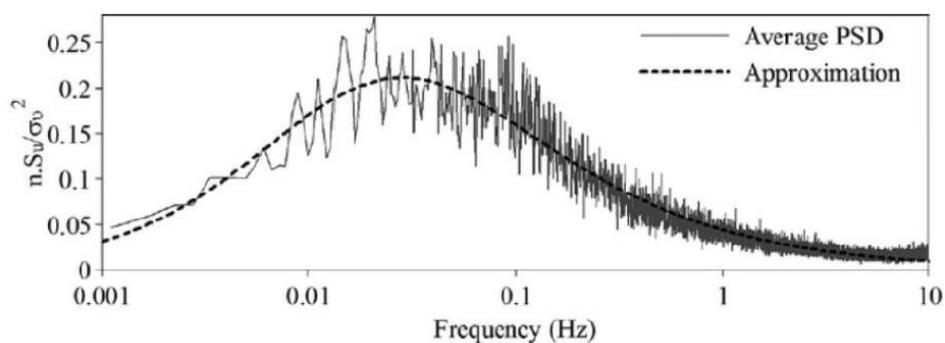


Figura 41 - Densidade espectral da velocidade do vento, Soltys (2012).

8.4 Coeficientes de amortecimento estrutural

O amortecimento estrutural foi considerado de acordo com a formulação de amortecimento de Rayleigh. A matriz de amortecimento foi definida pelos parâmetros α e β , determinados em função do coeficiente modal de amortecimento. A matriz de amortecimento do sistema $[C]$ é proporcional à matriz de massa e rigidez. Vejas as Equações (28 - 31).

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (28)$$

$$\alpha = 2\xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (29)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2 \omega_{02} - \xi_1 \omega_{01})}{\omega_{02} \omega_{02} - \omega_{01} \omega_{01}} \quad (30)$$

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (31)$$

A frequência ω_{01} adotada foi a frequência fundamental da estrutura e a frequência ω_{02} considerada foi a segunda frequência natural do sistema. O coeficiente de amortecimento modal adotado nesta investigação foi igual a 2% ($\xi = 0,02$), de acordo com a NBR 6123 (1988). Na literatura, existem diversos valores para o amortecimento estrutural. Porém, estes valores apresentam uma grande variação, dificultando sua utilização em projetos estruturais. Chopra (2007) recomenda de 2% a 3% para a taxa de amortecimento (ξ) de estruturas de aço soldadas, concreto protendido e concreto aramado (levemente fissurado). Bachmann (1995) sugere para edifícios mistos taxa de amortecimento (ξ) entre 1% e 2% e de 1% a 4% para edifícios em concreto armado.

9 ANÁLISE HARMÔNICA

9.1 Introdução

A finalidade desta análise é avaliar os modos de vibração que possuem a maior contribuição na resposta dinâmica estrutural. Deste modo, foi aplicado sobre a estrutura em estudo um carregamento variando harmonicamente no tempo a fim de obter-se os resultados dos deslocamentos nodais em termos de frequência.

9.2 Resposta estrutural

Diante do cenário exposto, uma carga senoidal de 150 kN (equivalente a força no vento aplicada em uma área de 450m²) foi aplicada no ponto de maior amplitude modal da estrutura (topo do edifício no eixo Z). Na sequência, uma carga senoidal de 55 kN (equivalente a força no vento aplicada em uma área de 225m²) foi aplicada na direção transversal da estrutura (topo do edifício no eixo X).

Esta análise foi realizada com a frequência variando entre 0 e 3 Hz com um intervalo de integração de 0,01 considerando a contribuição da taxa de amortecimento estrutural de 1% (NBR 6118, 2004).

Pode-se observar que a Figura 42 apresenta o espectro de resposta do modelo estrutural, onde verifica-se a existência de três picos de resposta bem definidos coincidentes com a segunda, quinta e nona frequência natural do edifício em estudo, possuindo a maior amplitude de deslocamento no primeiro pico de resposta ($f_{02} = 0,325$ Hz). Enquanto que a Figura 43 apresenta o espectro de resposta do modelo estrutural, onde verifica-se também a existência outros três picos de resposta bem definidos coincidentes com a primeira, quarta e sétima frequência natural do edifício em estudo, possuindo a maior amplitude de deslocamento no primeiro pico de resposta ($f_{01} = 0,309$ Hz).

Desta forma, é necessário ter maior atenção na frequência $f_{02} = 0,325$ Hz, uma vez que os maiores picos se encontram em uma faixa de frequência onde existe uma

tendência de vibrações excessivas devido a maior energia eólica concentra-se entre 0 a 1 Hz.

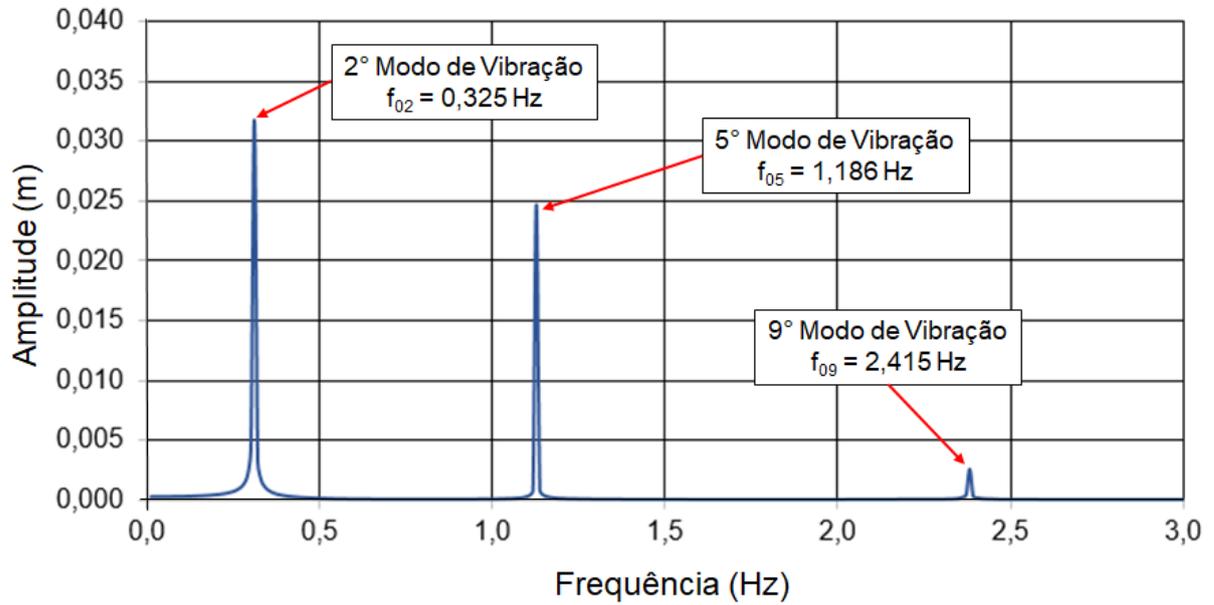


Figura 42 - Análise harmônica obtida com aplicação de carga de vento longitudinal.

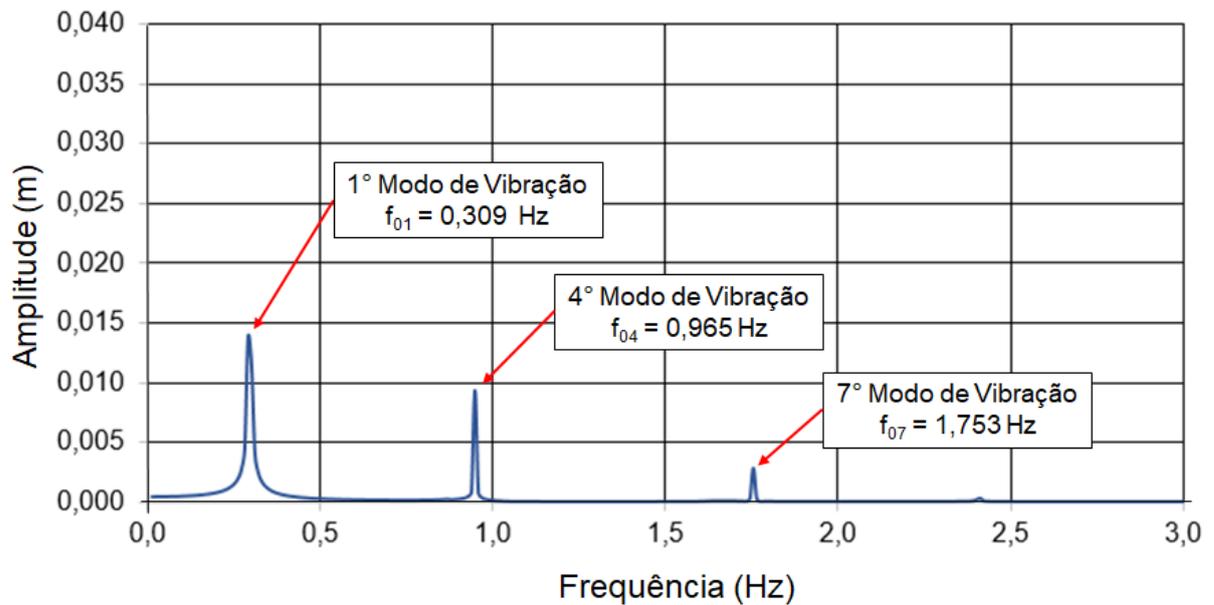


Figura 43 - Análise harmônica obtida com aplicação de carga de vento transversal.

10 CONFORTO HUMANO

10.1 Introdução

Em edificações altas e esbeltas, o vento pode provocar vibrações na estrutura, que por sua vez podem gerar desconforto aos ocupantes. Apesar de ser improvável que essas vibrações possam provocar danos físicos aos ocupantes, elas podem afetar a saúde de forma indireta, causando por exemplo, uma diminuição da concentração nas pessoas, da eficiência no trabalho e até mesmo náuseas. Outro problema que pode surgir na percepção das vibrações pelos usuários é o estresse causado, baseado no medo de colapso ou danos estruturais.

No passado, documentos normativos estabeleciam um limite para a aceleração da edificação determinado através de ensaios considerando apenas a percepção das pessoas à amplitude da vibração. No entanto, experimentos realizados em salas montadas em bases vibratórias indicam que a percepção das pessoas está relacionada não só à amplitude, como também à frequência da aceleração (BURTON, 2015). Esse critério passou a ser utilizado em documentos normativos mais recentes, como a ISO 10137 (2007).

10.2 Critério de avaliação segundo a NBR 6118 (2004)

De acordo com a NBR 6118 (2004), Estados Limite de Serviço (ELS) são aqueles relacionados ao conforto do usuário, durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas.

Para deslocamentos horizontais provocados pela ação do vento em edifícios, a NBR 6118 (2004), limita esses deslocamentos de acordo com a Equação (32).

$$D_{\text{hor}} \leq \frac{H}{1700} \quad (32)$$

Onde:

H = altura do edifício.

Seus efeitos estão associados ao desconforto causado ao usuário na utilização da edificação e podem ser divididos em:

- Efeitos visuais desconfortáveis aos usuários;
- Efeitos que podem impedir a utilização adequada da edificação;
- Vibrações excessivas (geralmente relacionados à pequena rigidez da estrutura).

10.3 Critério de avaliação segundo a NBR 6123 (1988)

De acordo com a NBR 6123 (1988), em edificações com período fundamental T_1 igual ou inferior a 1s, a influência da resposta flutuante é pequena, sendo seus efeitos já considerados na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator S_2 . Entretanto, edificações com período fundamental superior a 1s, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta dinâmica na direção do vento médio.

Segundo a NBR 6123 (1988), no caso de edificações destinadas à ocupação humana, as oscilações induzidas pelas forças flutuantes podem provocar desconforto nos ocupantes e como indicação geral, a aceleração máxima encontrada não deve superar $0,1 \text{ m/s}^2$. Considera-se admissível que amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos.

10.4 Critério de avaliação segundo Hirsch & Bachmann (1995)

Hirsch & Bachmann (1995), mostraram, através de estudos e pesquisas, que o nível de tolerância das pessoas aos efeitos das vibrações, induzidas pela ação do vento em edifícios, é dado em função de valores limites expostos pela aceleração, conforme a Tabela 12, e pela frequência e amplitude máxima, ilustrado na Figura 44.

Tabela 12 - Valores limites de aceleração (HIRSCH & BACHMANN,1995).

Percepção humana	Valores limites de aceleração	em m/s^2
Imperceptível (IMP)	$a < 0,005g$	$a < 0,049$
Perceptível (P)	$0,005g < a < 0,015g$	$0,049 < a < 0,147$
Incômodo (I)	$0,015g < a < 0,05g$	$0,147 < a < 0,49$
Muito Incômodo (MI)	$0,05g < a < 0,15g$	$0,49 < a < 1,47$
Intolerável (INT)	$0,15g < a$	$1,47 < a$

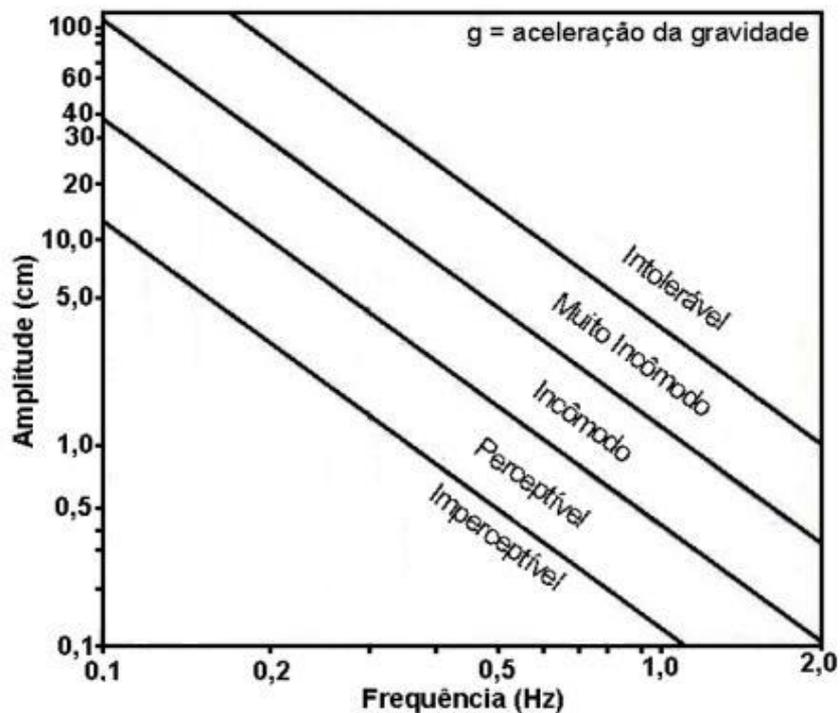


Figura 44 - Percepção humana aos efeitos da vibração (HIRSCH & BACHMANN,1995).

10.5 Critérios de Avaliação segundo a ISO 10137 (2007)

Atualmente, as normas europeias indicam como referência de avaliações do conforto humano a ISO 10137 (2007). Basicamente, o critério apresentado se dá por avaliação do pico de aceleração para a primeira frequência natural. São apresentados ábacos em que aparecem as curvas de aceitabilidade para escritórios e residências. O nível de aceitabilidade para residências é dois terços do nível de aceitação para

escritórios. A curva resultante para residência é próxima do nível de 90% de probabilidade de percepção. As curvas foram obtidas através de dados para muitos edifícios reais. As acelerações de pico, para um período de retorno de 1 ano, não devem exceder às curvas de avaliação apresentada na Figura 45.

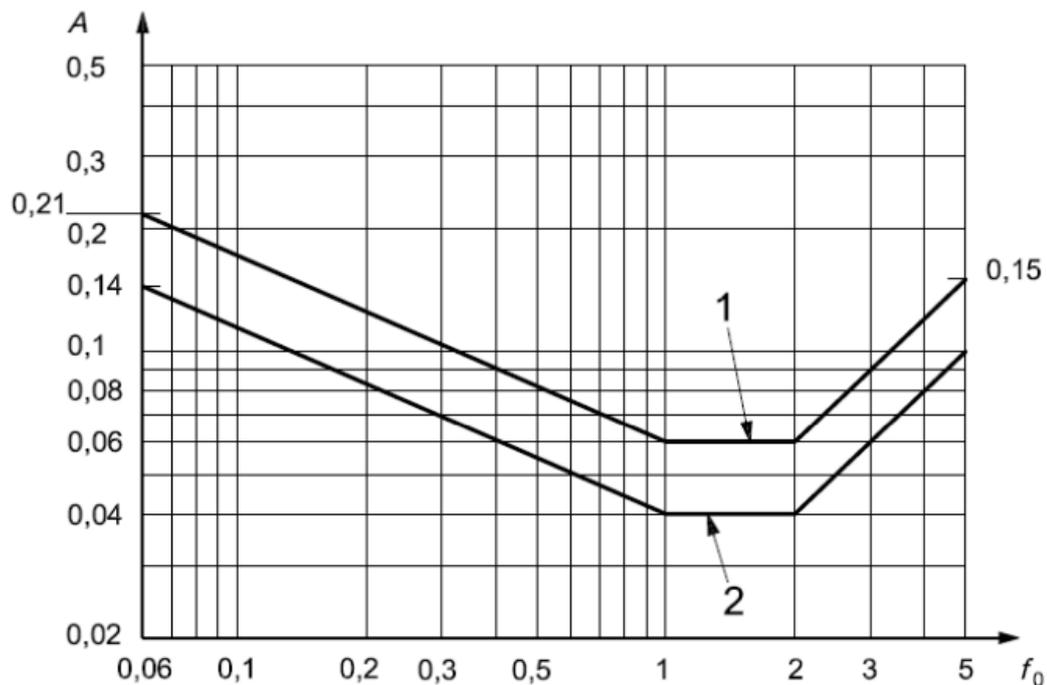


Figura 45 - Curvas de avaliação para vibrações induzidas pelo vento em edifícios em direções horizontais, para um período de retorno de 1 ano – ISO 10137 (2007).

Onde:

A - pico de aceleração (m/s²);

f_0 - primeira frequência natural da estrutura;

1 - curva para escritórios;

2 - curva para residências.

Comparando-se o limite da NBR 6123 (1988) com o gráfico acima, pode-se verificar que, no caso de residências, para frequências acima de 0,15 Hz, a curva de aceitabilidade fica abaixo de 0,1 m/s², o que aparentaria ser a avaliação proposta pela ISO 10137 (2007) mais rigorosa que a NBR 6123 (1988). Porém, as duas avaliações não podem ser comparadas diretamente, pois os tempos de recorrência propostos em cada critério de avaliação são bastante diferentes.

Enquanto que a NBR 6123 (1988) estipula-se que o limite $0,1\text{m/s}^2$ deve ser avaliado para um período de recorrência de 10 anos, o critério da ISO 10137 (2007) diz respeito a um período de recorrência de apenas um ano. A intensidade da pressão do vento para um período de recorrência de 1 ano é inferior a intensidade para um período de 10 anos e, desta forma, os valores das acelerações também são menores.

10.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados critérios utilizados para a avaliação do conforto humano em estruturas submetidas a vibrações devido à ação dinâmica do vento, indicando os parâmetros e limites adotados por normas vigentes que tratam do assunto. Em destaque, foi apresentado o limite de aceleração [$a_{\text{lim}}=0,100\text{ m/s}^2$] presente na norma brasileira NBR 6123 (1988), critério a ser adotado nos projetos de edifícios construídos no Brasil.

11 ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA

11.1 Introdução

O modelo estrutural estudado neste capítulo se trata de um edifício hipotético, em concreto armado, com altura igual a 150 metros. Este edifício apresenta a particularidade de ser esbelto, possui proporções volumétricas iguais a 1:2:5, conforme detalhado no Capítulo 6. O estudo realizado se trata de análises dinâmicas (vibração forçada) com base nos parâmetros já apresentados na Tabela 3. As análises, realizadas considerando uma duração de 10 minutos, têm como objetivo avaliar a resposta dinâmica do modelo estrutural quando submetido ao carregamento não determinístico oriundo do vento. Para geração das cargas de vento serão utilizadas as metodologias: NBR 6123, DEDM-HRP, HFPI-TPU e CFD. Cabe ressaltar que as análises dinâmicas transientes realizadas nesse capítulo consideram as seguintes hipóteses simplificadoras: não são consideradas a não-linearidade física e geométrica; é adotado que o modelo apresenta modo de vibração linear; a aceleração torsional não foi considerada.

11.2 Análise dos coeficientes de pressão

O coeficiente de pressão é um número adimensional (sem unidade especificado no SI) que descreve a pressão relativa através de um campo de fluxo em dinâmica de fluidos. O coeficiente de pressão é usado em aerodinâmica e hidrodinâmica. Qualquer ponto imerso no fluxo de um fluido tem seu próprio e único coeficiente de pressão (C_p).

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (33)$$

Onde:

p - é a pressão estática do fluido no ponto em que o coeficiente de pressão é avaliado.

p_{∞} - é a pressão do fluxo livre.

ρ_{∞} - é a densidade do fluido no fluxo (a do ar ao nível do mar e 15 °C é 1,225 kg/m³).

V_{∞} - é a velocidade de fluxo livre do fluido, ou a velocidade do corpo através do fluido.

Tabela 13 – Comparativo dos coeficientes de pressão no barlavento.

Barlavento										Coeficiente de pressão						
										C_{p95}	C_{p185}	C_{p275}	C_{p365}	C_{p455}		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	HFPI-TPU	Valor	1,899	1,718	1,668	1,450	1,182
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40		Perc. %	100	100	100	100	100
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	NBR 6123	Valor	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100		Perc. %	36,86	40,75	41,97	48,28	59,22
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	CFD	Valor	1,823	1,581	1,568	1,407	1,059
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160		Perc. %	96,00	92,03	94,00	97,03	89,59
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	DEDM-HRP	Valor	-	-	-	-	-
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220		Perc. %	-	-	-	-	-
241	242	243	244	245	246	247	248	249	250							
271	272	273	274	275	276	277	278	279	280							
301	302	303	304	305	306	307	308	309	310							
331	332	333	334	335	336	337	338	339	340							
361	362	363	364	365	366	367	368	369	370							
391	392	393	394	395	396	397	398	399	400							
421	422	423	424	425	426	427	428	429	430							
451	452	453	454	455	456	457	458	459	460							
481	482	483	484	485	486	487	488	489	490							
511	512	513	514	515	516	517	518	519	520							
541	542	543	544	545	546	547	548	549	550							
571	572	573	574	575	576	577	578	579	580							

Tabela 14 – Comparativo dos coeficientes de pressão na lateral direita.

Lateral Direita															Coeficiente de pressão					
															C_{p103}	C_{p193}	C_{p283}	C_{p373}	C_{p463}	
11	12	13	14	15	HFPI-TPU	Valor	-2,620	-2,968	-3,085	-2,871	-3,023									
41	42	43	44	45		Perc. %	100	100	100	100	100									
71	72	73	74	75	NBR 6123	Valor	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900									
101	102	103	104	105		Perc. %	34,35	30,32	29,17	31,35	29,77									
131	132	133	134	135	CFD	Valor	-2,279	-2,790	-2,653	-2,814	-2,517									
161	162	163	164	165		Perc. %	86,98	94,00	86,00	98,01	83,26									
191	192	193	194	195	DEDM-HRP	Valor	-	-	-	-	-									
221	222	223	224	225		Perc. %	-	-	-	-	-									
251	252	253	254	255																
281	282	283	284	285																
311	312	313	314	315																
341	342	343	344	345																
371	372	373	374	375																
401	402	403	404	405																
431	432	433	434	435																
461	462	463	464	465																
491	492	493	494	495																
521	522	523	524	525																
551	552	553	554	555																
581	582	583	584	585																

Tabela 15 – Comparativo dos coeficientes de pressão no sotavento.

Sotavento		Coeficiente de pressão	C_{p111}	C_{p201}	C_{p291}	C_{p381}	C_{p471}
HFPI-TPU	Valor	-1,887	-1,420	-1,530	-1,700	-1,925	
	Perc. %	100	100	100	100	100	
NBR 6123	Valor	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	-0,500	
	Perc. %	26,50	35,21	32,68	29,41	25,97	
CFD	Valor	-1,850	-1,349	-1,377	-1,596	-1,829	
	Perc. %	98,04	95,00	90,00	93,88	95,01	
DEDM-HRP	Valor	-	-	-	-	-	
	Perc. %	-	-	-	-	-	

Tabela 16 – Comparativo dos coeficientes de pressão na lateral esquerda.

Lateral Esquerda		Coeficiente de pressão	C_{p118}	C_{p208}	C_{p298}	C_{p388}	C_{p478}
HFPI-TPU	Valor	-2,688	-3,404	-3,207	-4,000	-3,614	
	Perc. %	100	100	100	100	100	
NBR 6123	Valor	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	-0,900	
	Perc. %	33,48	26,44	28,06	22,50	24,90	
CFD	Valor	-2,500	-2,927	-3,143	-3,640	-2,996	
	Perc. %	93,01	85,99	98,00	91,00	82,90	
DEDM-HRP	Valor	-	-	-	-	-	
	Perc. %	-	-	-	-	-	

Vale enfatizar que a base de dados DEDM-HRP, fornecida pela plataforma americana VORTEX-Winds, não disponibiliza os coeficientes de pressão do vento. Neste sentido, a referida plataforma apesar de utilizar os coeficientes de pressão para posterior geração das cargas de vento, informa somente o valor da carga total (em

kN), no domínio do tempo, considerando uma área total (em m^2), no que tange a cada fachada do edifício analisado.

De acordo com este contexto, ao longo desta investigação os coeficientes de pressão do vento para o edifício de concreto armado em estudo ($H = 150$ m) foram determinados via emprego da norma brasileira de projeto NBR 6123 (1988), com base no uso de modelagem computacional via CFD; e, ainda, através da utilização da base HFPI-TPU. Analisando-se os resultados obtidos neste estudo e tendo em mente que a norma brasileira de projeto NBR 6123 (1988) recomenda o uso de um coeficiente de pressão único para cada fachada do edifício, as diferenças em termos quantitativos são significativas quando comparadas com os resultados fornecidos pelo HFPI-TPU. Por exemplo, considerando-se, novamente, uma área da fachada da edificação com maior incidência do vento no barlavento (C_{p95} : $h = 138,75$ m), em termos percentuais, o valor do C_{p95} via uso da base de dados HFPI-TPU é cerca de 270% superior ao valor do mesmo coeficiente de pressão de acordo com a NBR 6123 (1988). Por outro lado, cabe ressaltar que tais discrepâncias, de ordem quantitativa, não ocorrem de maneira significativa quando são comparados os valores dos coeficientes de pressão do vento obtidos via uso da base de dados HFPI-TPU e aqueles determinados via emprego de técnicas de modelagem computacional via emprego de CFD [(C_{p95} : $h = 138,75$ m): diferenças da ordem de 5%].

11.3 Análise dinâmica da estrutura: NBR 6123

Com o objetivo de estender o estudo do comportamento dinâmico da estrutura, apresentado na metodologia NBR 6123, o modelo estrutural foi submetido as cargas de vento não determinísticas geradas de acordo com a Figura 5. Essas cargas de vento foram simultaneamente aplicadas na direção Z (vento longitudinal) e na direção X (vento transversal). Uma vez aplicada as cargas de vento, com auxílio do programa ANSYS (2020), foi possível observar o comportamento do modelo estrutural no domínio do tempo e da frequência, conforme apresentado nas Figuras (46-50).

As Figuras 46, 47 e 48 apresentam respectivamente o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido Z (vento longitudinal); o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido X (vento transversal); as

acelerações provocadas pelas cargas de vento aplicadas, nas direções Z e X da estrutura, no domínio do tempo para a Série 1.

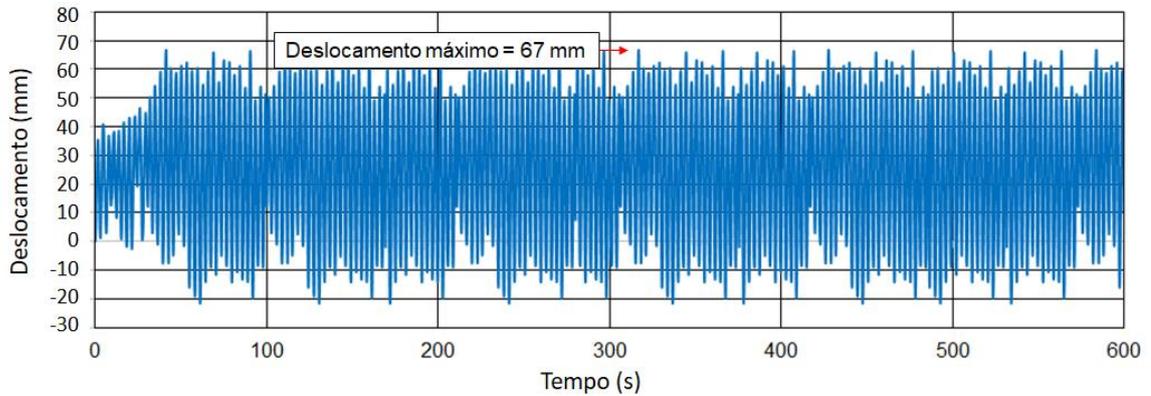


Figura 46 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (NBR 6123).

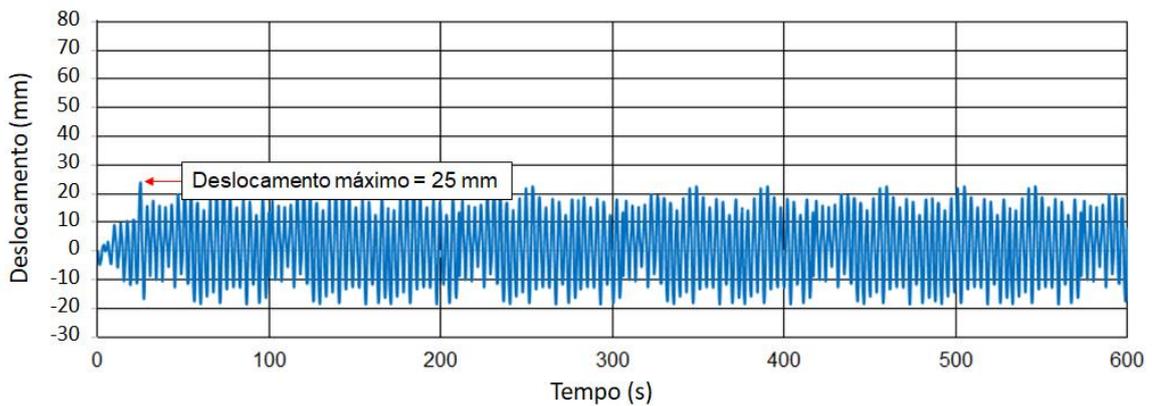


Figura 47 - Deslocamento na direção X - Série 1 (NBR 6123).

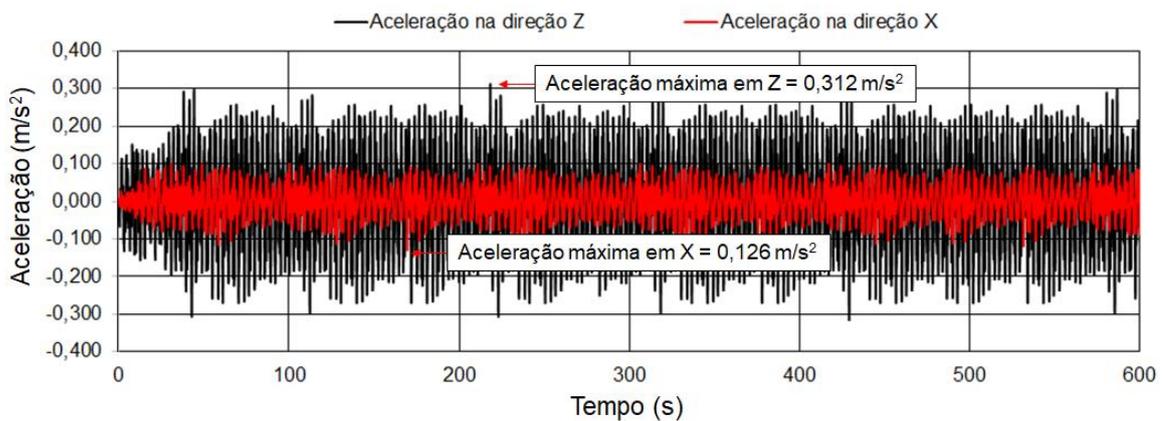


Figura 48 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (NBR 6123).

As Figuras 49 e 50 indicam as acelerações no domínio da frequência, sendo possível visualizar que as maiores transferências de energia se dão nas frequências

coincidentes com os 1º e 2º harmônicos, relacionados as flexões em torno do eixo X e Z respectivamente. Destaca-se a maior amplitude obtida (0,045 m/s²), relacionada com a aceleração longitudinal, indicando ser este o comportamento crítico da estrutura em termos de acelerações máximas para o vento 0°.

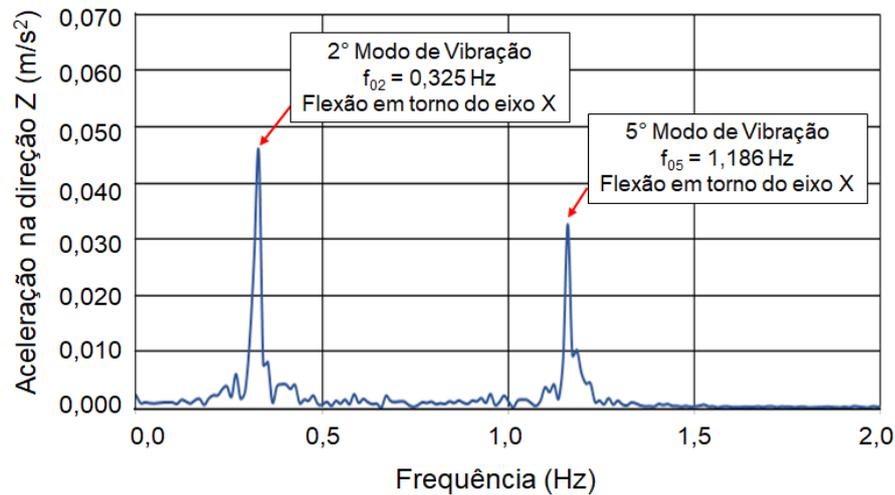


Figura 49 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (NBR 6123).

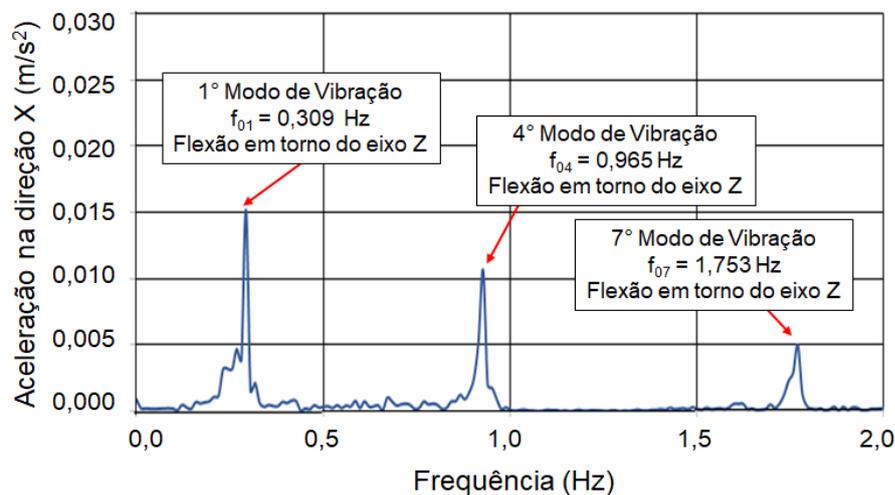


Figura 50 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (NBR 6123).

Com os parâmetros descritos Tabela 3 e utilizando a metodologia para geração das cargas através das Equações (1-4), foram geradas 30 séries de carregamento com vento a 0° com resultados indicados na Tabela 17.

Tabela 17 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método NBR 6123.

Séries de Carregamentos	Direção Z			Direção X		
	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)
1	67	0,045	0,014	25	0,015	0,005
2	65	0,044	0,015	24	0,015	0,005
3	67	0,049	0,016	14	0,017	0,006
4	66	0,043	0,015	22	0,015	0,005
5	71	0,046	0,014	25	0,016	0,006
6	73	0,047	0,016	15	0,016	0,006
7	66	0,047	0,016	23	0,016	0,006
8	76	0,043	0,015	28	0,015	0,005
9	76	0,049	0,017	16	0,018	0,007
10	69	0,048	0,017	23	0,016	0,005
11	77	0,050	0,019	27	0,017	0,005
12	67	0,045	0,013	24	0,018	0,005
13	68	0,044	0,013	14	0,015	0,004
14	59	0,048	0,015	21	0,016	0,004
15	69	0,043	0,012	25	0,017	0,005
16	73	0,047	0,013	15	0,015	0,005
17	68	0,047	0,013	23	0,016	0,005
18	74	0,048	0,016	26	0,019	0,006
19	76	0,044	0,013	16	0,014	0,004
20	64	0,049	0,013	23	0,016	0,005
21	79	0,047	0,015	27	0,017	0,006
22	66	0,050	0,015	24	0,016	0,005
23	71	0,046	0,014	14	0,015	0,005
24	59	0,044	0,013	21	0,016	0,005
25	72	0,049	0,016	25	0,018	0,007
26	68	0,043	0,013	13	0,014	0,004
27	69	0,046	0,013	22	0,016	0,005
28	67	0,047	0,013	24	0,017	0,006
29	75	0,049	0,020	14	0,015	0,005
30	63	0,043	0,014	23	0,017	0,006
Média	69	0,046	0,015	21	0,016	0,005
Desvio padrão	5	0,002	0,002	5	0,001	0,001
Valor caract. (95%)	79	0,050	0,019	31	0,018	0,007

Os coeficientes de pressão utilizados para gerar as 30 séries de carregamentos de vento não determinísticos, responsáveis pelas respostas estruturais dinâmicas descritas na tabela acima, podem ser encontrados listados no Apêndice C e a forma como essas cargas foram aplicadas à estrutura, encontra-se no Apêndice F.

11.4 Análise dinâmica da estrutura: Base de dados DEDM-HRP

Com o objetivo de estender o estudo do comportamento dinâmico da estrutura, apresentado na metodologia DEDM-HRP, o modelo estrutural foi submetido as cargas de vento não determinísticas geradas de acordo com a Figura 10.

É necessário enfatizar que o método DEDM-HRP se trata de uma base dados experimental realizada em túnel de vento real com modelos em escala reduzida. Desta forma é mandatório a utilização do algoritmo descrito no item 3.4 para normalizar os dados fornecidos para a escala real da estrutura.

Essas cargas de vento foram simultaneamente aplicadas na direção Z (vento longitudinal) e na direção X (vento transversal). Uma vez aplicada as cargas de vento, com auxílio do programa ANSYS (2020), foi possível observar o comportamento do modelo estrutural no domínio do tempo e da frequência, conforme apresentado nas Figuras (51-55).

As Figura 51, 52 e 53 apresentam respectivamente o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido Z (vento longitudinal); o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido X (vento transversal); as acelerações provocadas pelas cargas de vento aplicadas, nas direções Z e X da estrutura, no domínio do tempo para a Série 1.

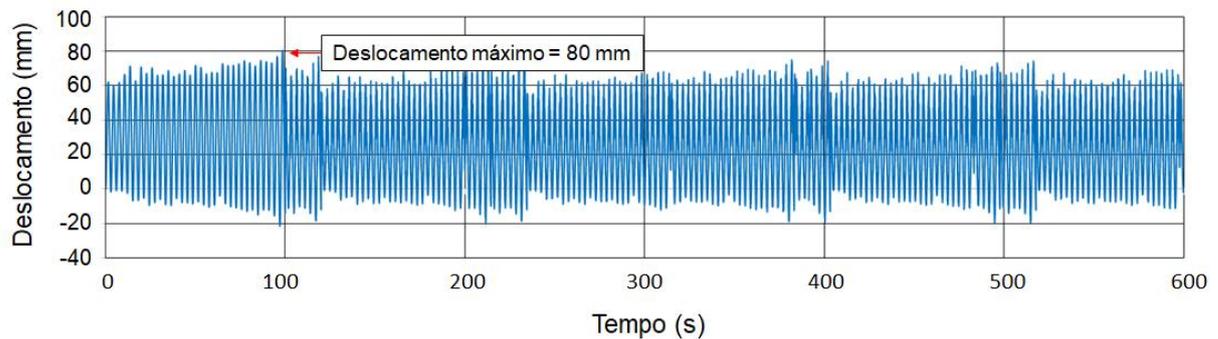


Figura 51 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (DEDM-HRP).

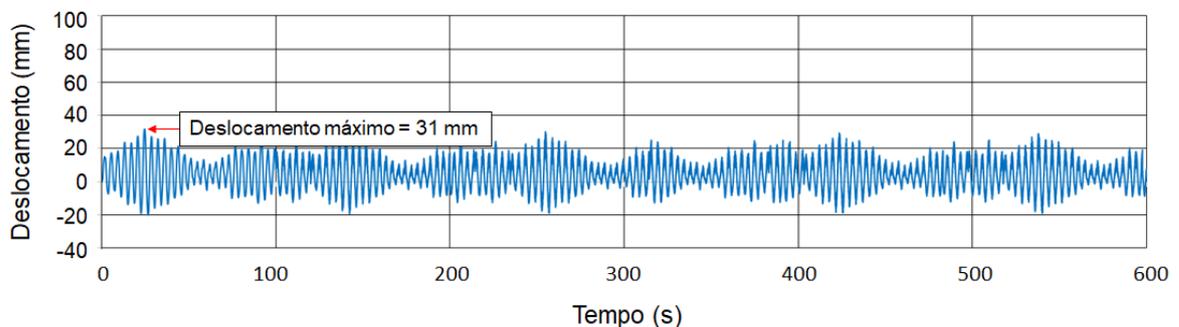


Figura 52 - Deslocamento na direção X - Série 1 (DEDM-HRP).

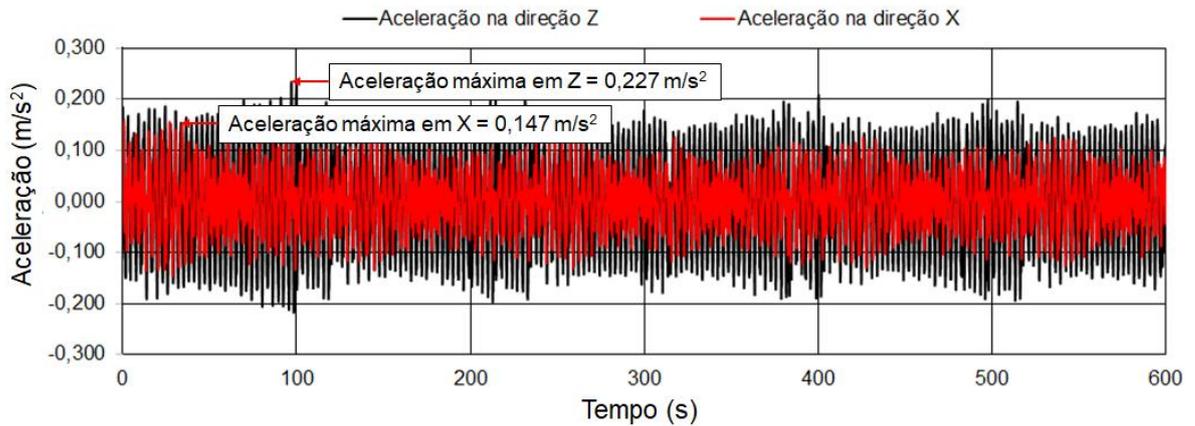


Figura 53 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (DEDM-HRP).

As Figuras 54 e 55 indicam as acelerações no domínio da frequência, sendo possível visualizar que as maiores transferências de energia se dão nas frequências coincidentes com os 1º e 2º harmônicos, relacionados as flexões em torno do eixo X e Z respectivamente. Destaca-se a maior amplitude obtida ($0,077 \text{ m/s}^2$), relacionada com a aceleração longitudinal, indicando ser este o comportamento crítico da estrutura em termos de acelerações máximas para o vento 0° .

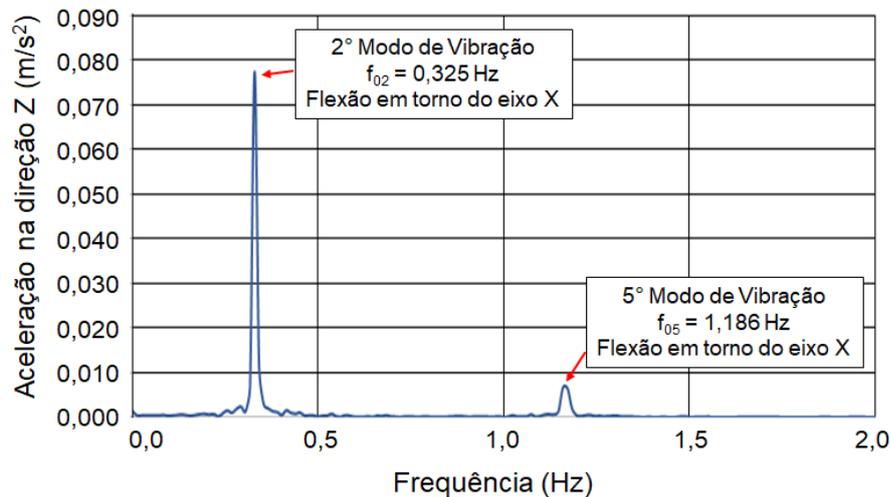


Figura 54 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (DEDM-HRP).

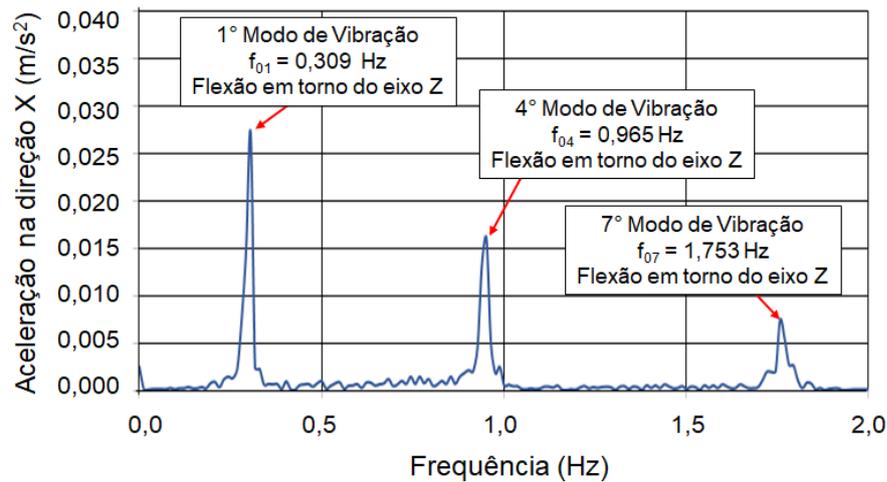


Figura 55 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (DEDM-HRP).

Conforme os parâmetros descritos nas Figuras 6 e 7, a plataforma VORTEX-Winds, através de seu banco de dados, disponibiliza uma única série de dados experimentais. Os resultados obtidos com a análise transiente foram apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método DEDM-HRP.

Série de Carregamento	Direção Z			Direção X		
	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)
1	80	0,077	0,022	31	0,027	0,007

Diferentemente dos demais métodos apresentados nesse trabalho, a plataforma VORTEX-Winds não disponibiliza os coeficientes de pressão que resultaram nas cargas de vento utilizadas. A plataforma informa a carga total (em kN), no domínio do tempo, considerando a área total (em m²) de cada fachada da estrutura. A forma como essas cargas foram aplicadas à estrutura, encontra-se no Apêndice F.

11.5 Análise dinâmica da estrutura: Base de dados HFPI-TPU

Com o objetivo de estender o estudo do comportamento dinâmico da estrutura, apresentado na metodologia HFPI-TPU, o modelo estrutural foi submetido as cargas de vento não determinísticas geradas de acordo com a Figura 18.

É necessário enfatizar que o método HFPI-TPU se trata de uma base dados experimental realizada em túnel de vento real com modelos em escala reduzida. Desta forma é mandatório a utilização das Equações (6-10) para normalizar os dados fornecidos para a escala real da estrutura.

Essas cargas de vento foram simultaneamente aplicadas na direção Z (vento longitudinal) e na direção X (vento transversal). Uma vez aplicada as cargas de vento, com auxílio do programa ANSYS (2020), foi possível observar o comportamento do modelo estrutural no domínio do tempo e da frequência, conforme apresentado nas Figuras (56-60).

As Figura 56, 57 e 58 apresentam respectivamente o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido Z (vento longitudinal); o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido X (vento transversal); as acelerações provocadas pelas cargas de vento aplicadas, nas direções Z e X da estrutura, no domínio do tempo para a Série 1.

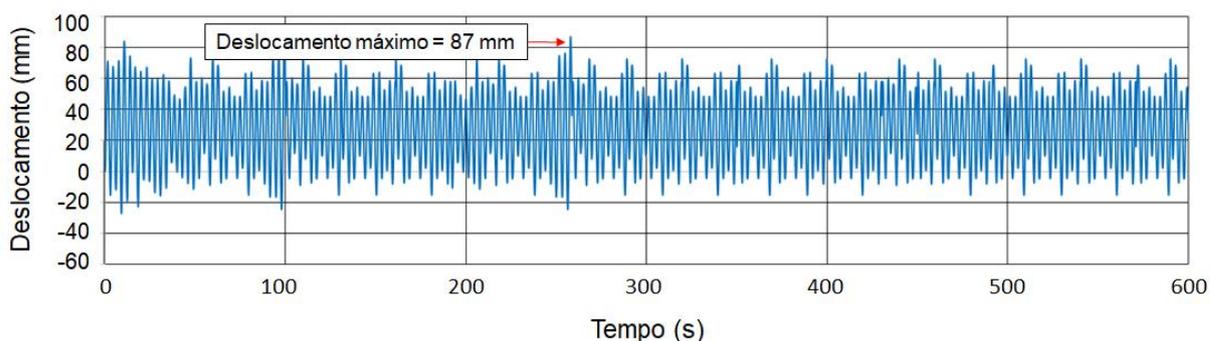


Figura 56 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (HFPI-TPU).

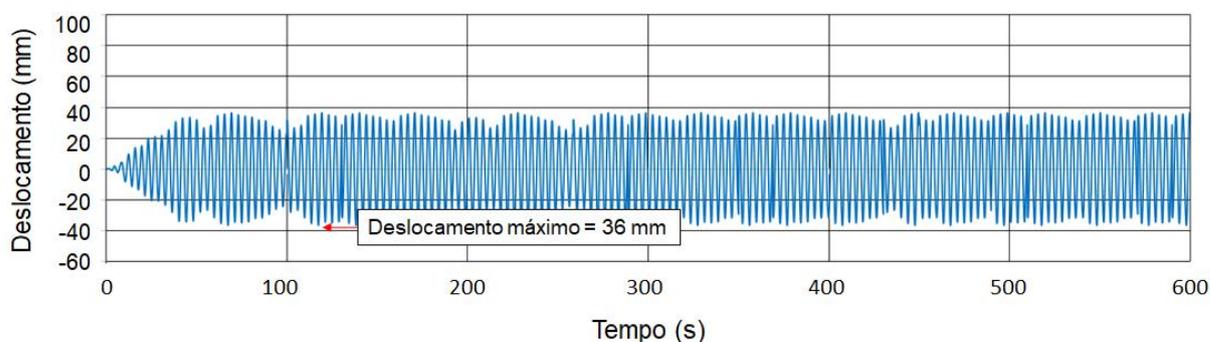


Figura 57 - Deslocamento na direção X - Série 1 (HFPI-TPU).

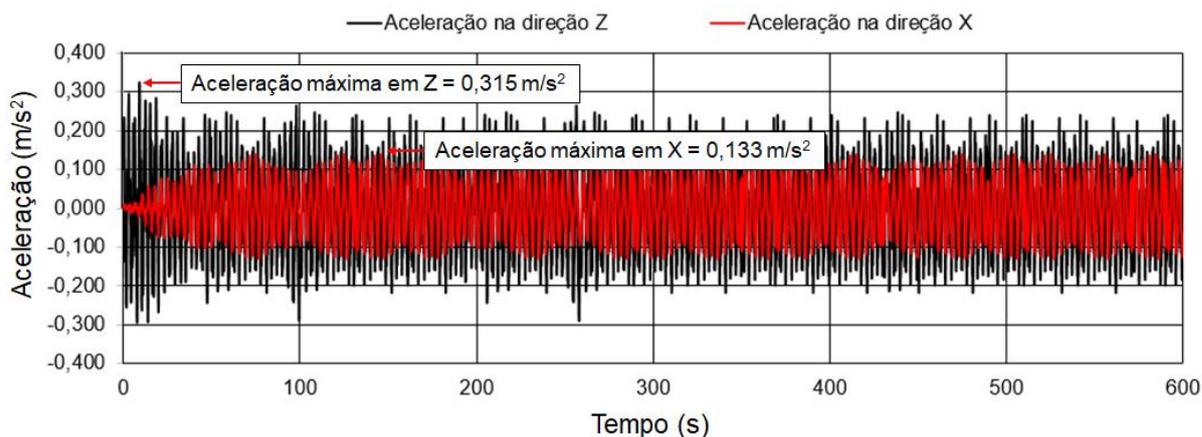


Figura 58 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (HFPI-TPU).

As Figuras 59 e 60 indicam as acelerações no domínio da frequência, sendo possível visualizar que as maiores transferências de energia se dão nas frequências coincidentes com os 1º e 2º harmônicos, relacionados as flexões em torno do eixo X e Z respectivamente. Destaca-se a maior amplitude obtida ($0,074 \text{ m/s}^2$), relacionada com a aceleração longitudinal, indicando ser este o comportamento crítico da estrutura em termos de acelerações máximas para o vento 0° .

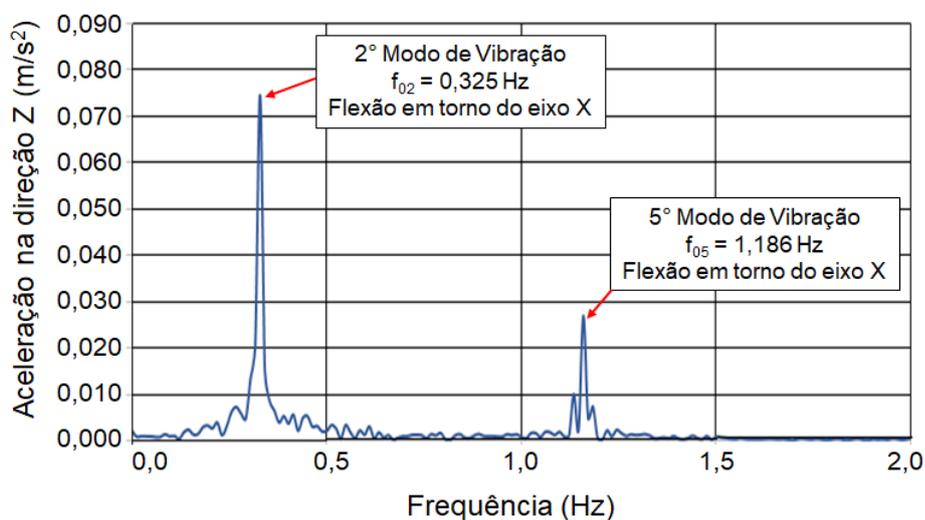


Figura 59 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (HFPI-TPU).

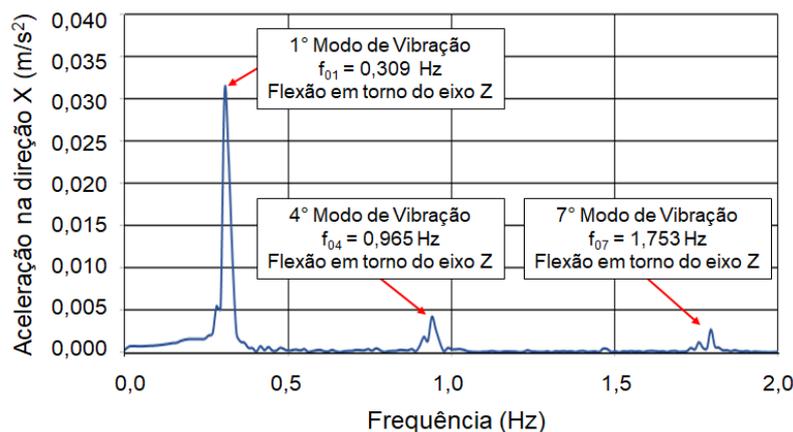


Figura 60 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (HFPI-TPU).

Conforme os parâmetros descritos nas Figuras 11 e 12, a plataforma TPU, através de seu banco de dados, disponibiliza uma única série de dados experimentais. Os resultados obtidos com a análise transiente foram apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método HFPI-TPU.

Série de Carregamento	Direção Z			Direção X		
	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)
1	87	0,074	0,021	36	0,031	0,009

Os coeficientes de pressão utilizados nesta simulação foram disponibilizados pela plataforma da Universidade Politécnica de Tóquio (TPU-DB) e estão listados no Apêndice D. A forma como essas cargas foram aplicadas à estrutura, encontra-se no Apêndice F.

11.6 Análise dinâmica da estrutura: Computational Fluid Dynamics - CFD

Com o objetivo de estender o estudo do comportamento dinâmico da estrutura, apresentado na metodologia CFD, o modelo estrutural foi submetido as cargas de vento não determinísticas geradas de acordo com a Figura 26. Essas cargas de vento foram simultaneamente aplicadas na direção Z (vento longitudinal) e na direção X (vento transversal). Uma vez aplicada as cargas de vento, com auxílio do programa ANSYS (2020), foi possível observar o comportamento do modelo estrutural no domínio do tempo e da frequência, conforme apresentado nas Figuras (61-65).

As Figuras 61, 62 e 63 apresentam respectivamente o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido Z (vento longitudinal); o deslocamento estrutural no domínio do tempo para a Série 1 no sentido X (vento transversal); as acelerações provocadas pelas cargas de vento aplicadas, nas direções Z e X da estrutura, no domínio do tempo para a Série 1.

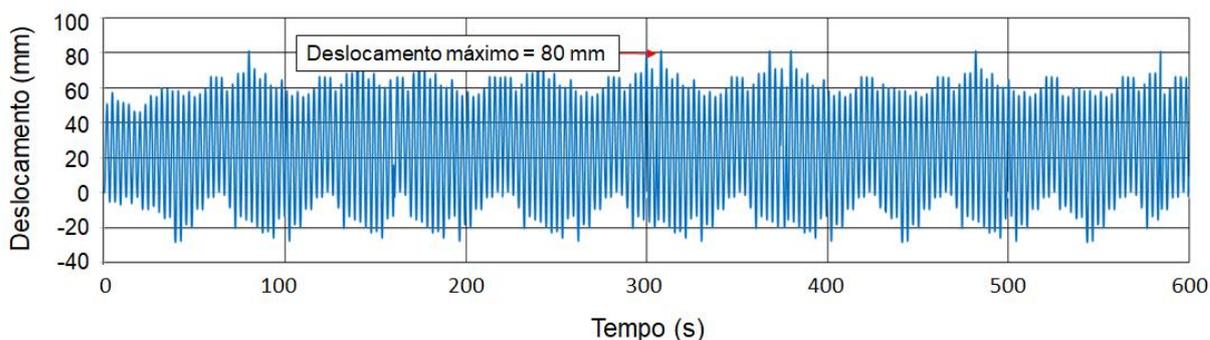


Figura 61 - Deslocamento na direção Z - Série 1 (CFD).

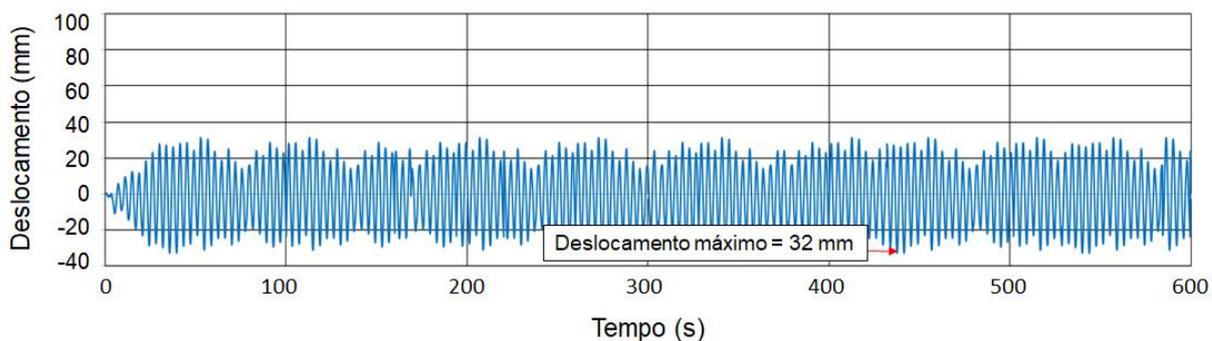


Figura 62 - Deslocamento na direção X - Série 1 (CFD).

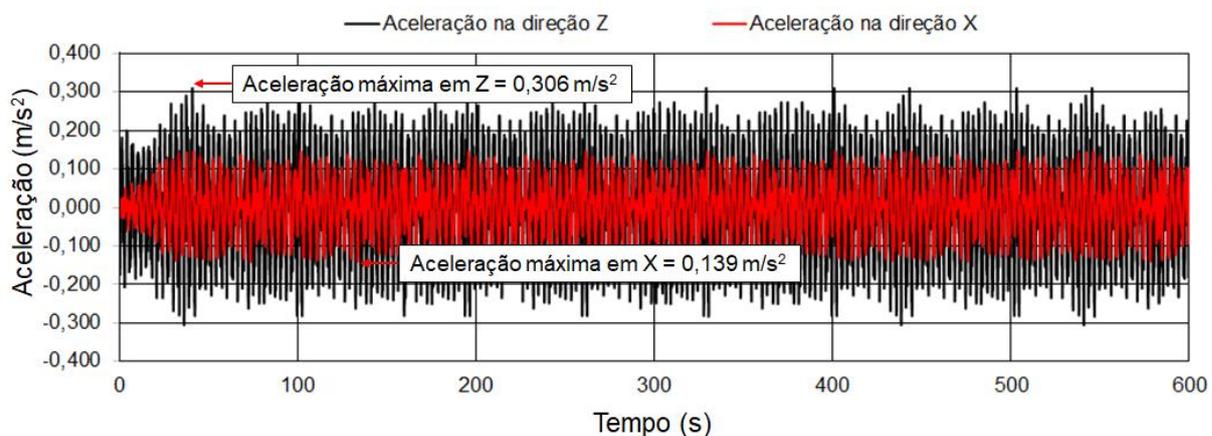


Figura 63 - Acelerações provocadas pelas cargas de vento - Série 1 (CFD).

As Figuras 64 e 65 indicam as acelerações no domínio da frequência, sendo possível visualizar que as maiores transferências de energia se dão nas frequências coincidentes com os 1º e 2º harmônicos, relacionados as flexões em torno do eixo X e Z respectivamente. Destaca-se a maior amplitude obtida (0,073 m/s²), relacionada com a aceleração longitudinal, indicando ser este o comportamento crítico da estrutura em termos de acelerações máximas para o vento 0°.

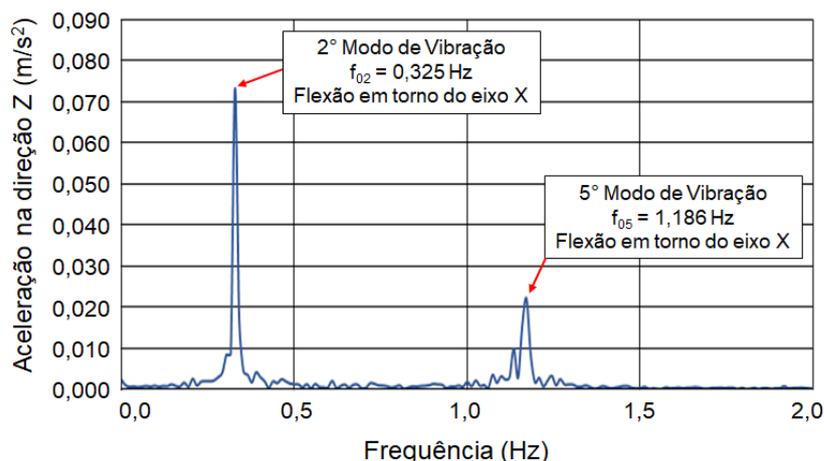


Figura 64 - Pico de aceleração na direção Z - Série 1 (CFD).

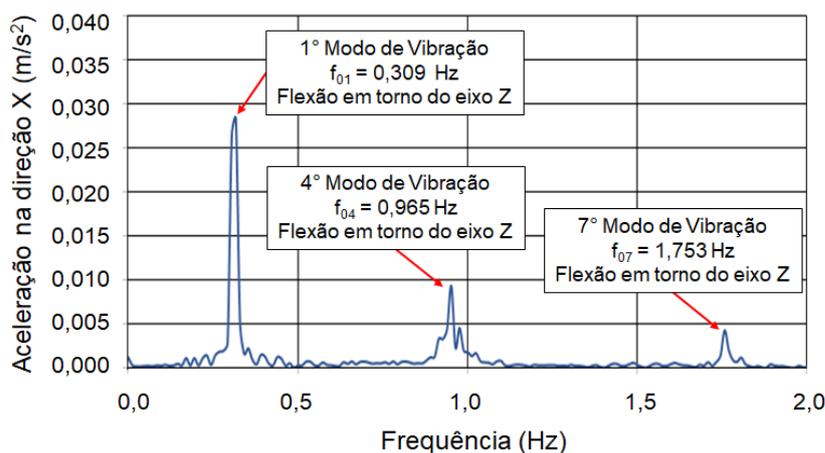


Figura 65 - Pico de aceleração na direção X - Série 1 (CFD).

Com os parâmetros descritos Tabela 3 e utilizando a metodologia para geração das cargas através das Equações (19-23), foram geradas 30 séries de carregamento com vento a 0° com resultados indicados na Tabela 20.

Tabela 20 - Respostas dinâmicas da estrutura para cargas geradas pelo método CFD.

Séries de Carregamentos	Direção Z			Direção X		
	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)	Deslocamento (mm)	Pico (m/s ²)	RMS (m/s ²)
1	80	0,073	0,023	32	0,028	0,010
2	80	0,071	0,024	22	0,027	0,009
3	82	0,075	0,023	22	0,029	0,009
4	79	0,070	0,024	24	0,028	0,010
5	84	0,075	0,026	22	0,030	0,011
6	75	0,068	0,024	23	0,026	0,011
7	83	0,070	0,026	21	0,027	0,008
8	83	0,074	0,027	23	0,029	0,009
9	74	0,067	0,026	23	0,025	0,008
10	78	0,069	0,022	21	0,027	0,010
11	78	0,070	0,022	22	0,026	0,008
12	82	0,071	0,021	37	0,026	0,008
13	85	0,076	0,023	26	0,028	0,009
14	80	0,070	0,020	26	0,026	0,007
15	84	0,076	0,024	28	0,029	0,008
16	75	0,067	0,019	26	0,025	0,007
17	83	0,072	0,021	27	0,026	0,007
18	86	0,076	0,023	25	0,028	0,008
19	72	0,066	0,018	27	0,024	0,007
20	80	0,070	0,022	27	0,026	0,007
21	80	0,071	0,022	24	0,025	0,007
22	77	0,072	0,022	26	0,025	0,008
23	83	0,078	0,022	39	0,028	0,008
24	76	0,071	0,020	30	0,025	0,008
25	82	0,078	0,024	29	0,028	0,008
26	74	0,068	0,018	32	0,024	0,007
27	80	0,074	0,023	30	0,025	0,008
28	86	0,077	0,021	32	0,027	0,008
29	71	0,066	0,019	28	0,024	0,007
30	78	0,072	0,020	29	0,025	0,007
Média	80	0,072	0,022	27	0,027	0,008
Desvio padrão	4	0,004	0,002	4	0,002	0,001
Valor caract. (95%)	88	0,080	0,026	35	0,031	0,010

Os coeficientes de pressão utilizados para gerar as 30 séries de carregamentos de vento não determinísticos, responsáveis pelas respostas estruturais dinâmicas descritas na tabela acima, podem ser encontrados listados no Apêndice E e a forma como essas cargas foram aplicadas à estrutura, encontra-se no Apêndice F.

Leonardo de Souza Bastos em sua tese (2020), afirmou que a vibração causada pelo vento transversal pode ser tão nociva quanto a vibração causada pelo vento longitudinal em termos de acelerações para o conforto humano. Ele apresentou que a diferença de pressão nas laterais da estrutura, ao longo do tempo, gera zonas de baixa pressão também chamadas de desprendimentos de vórtices.

O vórtice é um escoamento giratório onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular ou espiral. São movimentos espirais ao redor de um centro de rotação.

Tecnicamente um vórtice pode ser qualquer escoamento circular ou rotacional que possui vorticidade. A vorticidade é um conceito matemático utilizado na dinâmica dos fluidos, ela pode ser entendida como a quantidade de circulação ou rotação de um fluido por unidade de área de um ponto no campo de escoamento.

A Figura 66 apresenta a vista superior da estrutura dentro do túnel de vento virtual. No decorrer da simulação, é possível observar a formação dos vórtices não apenas no lado oposto (vento longitudinal) ao impacto do vento na estrutura quanto nas laterais (vento transversal) da mesma.

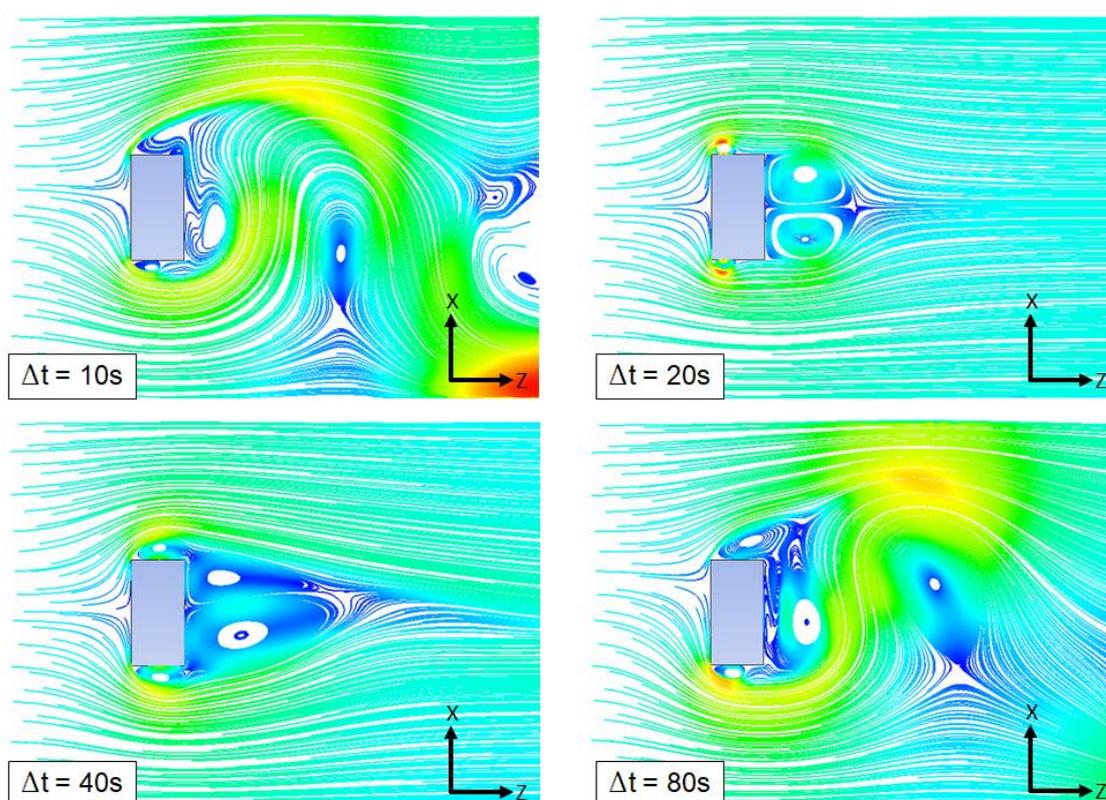


Figura 66 - Representação das ações do vento no sistema estrutural do edifício.

Os vórtices geram forças ora positivas ora negativas na superfície da estrutura, essas forças são também conhecidas como pressão (força positiva) e sucção (força negativa). Conforme apresentado na Figura 66, a cada intervalo de tempo, a força do vórtice está mais intensa em determinada lateral ocasionando assim a vibração transversal na estrutura, comprovando assim a tese apresentada por Leonardo de Sousa Bastos (2020).

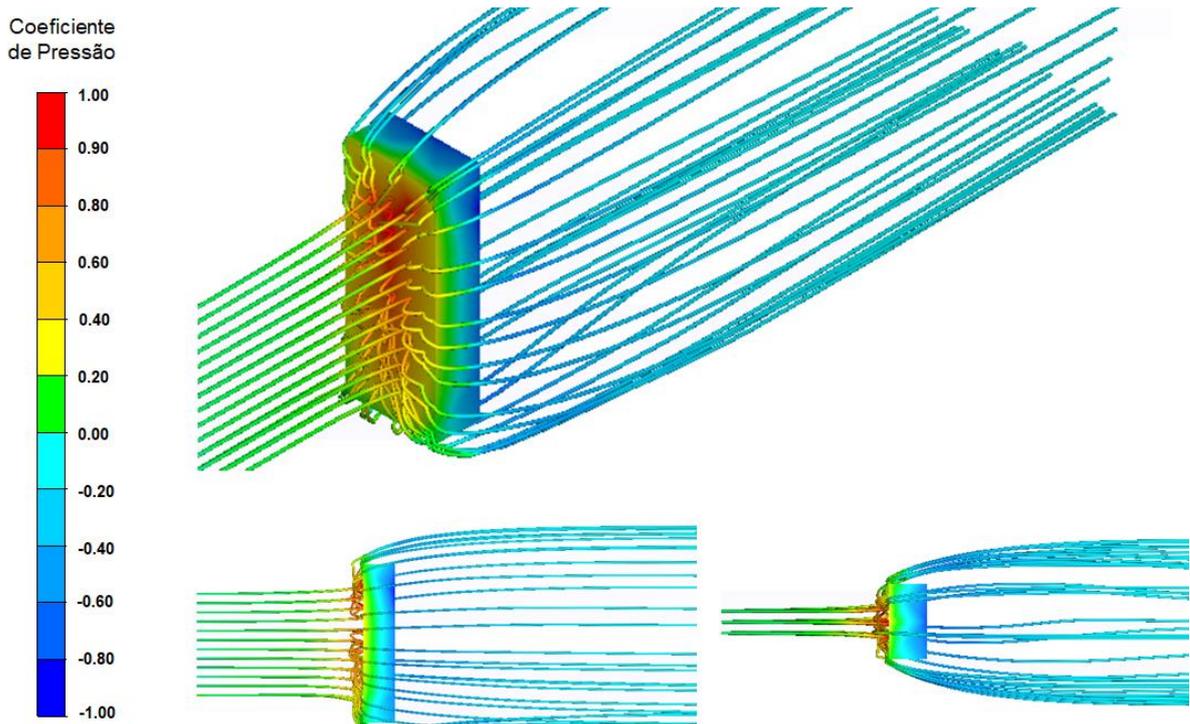


Figura 67 - Comportamento do vento sobre o modelo estrutural.

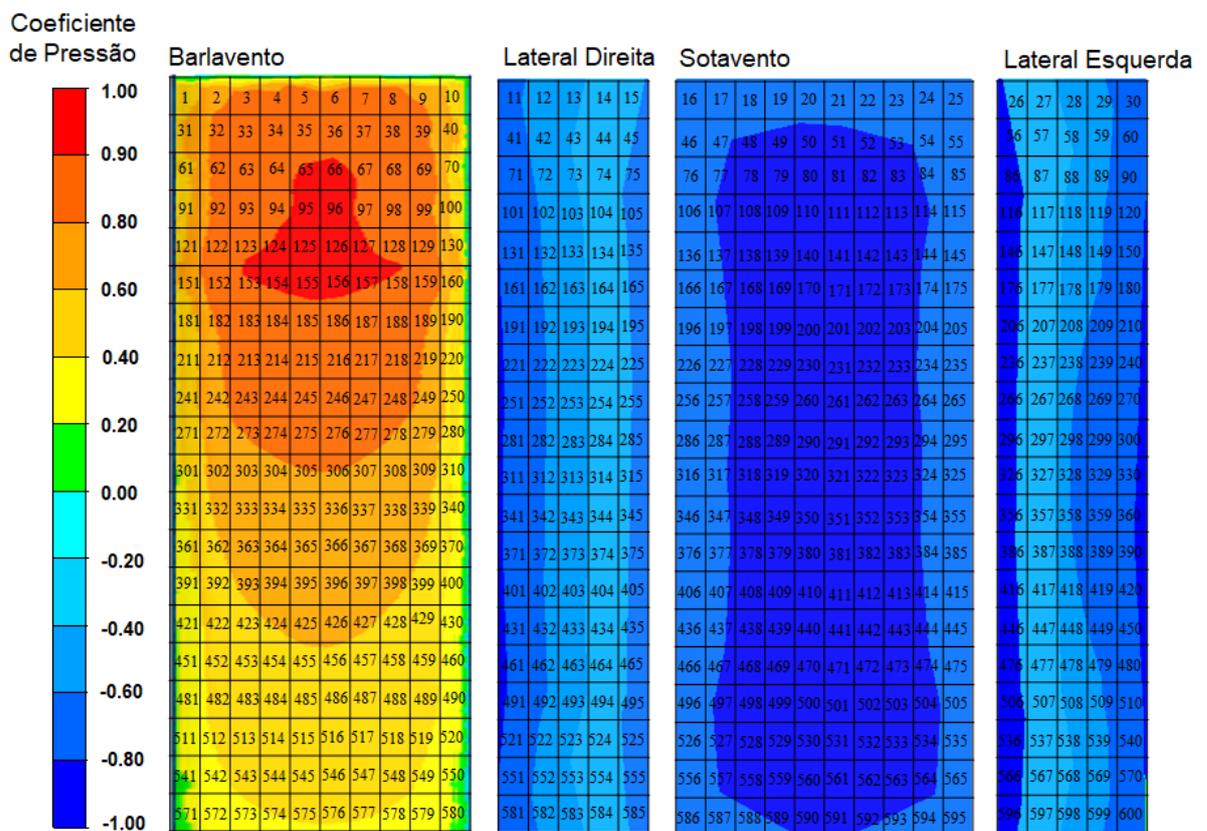


Figura 68 - Coeficientes de pressão obtidos através do método CFD.

11.7 Avaliação do conforto humano

Com referência as avaliações de conforto humano do edifício investigado neste estudo, pode-se afirmar que o atendimento ao estado limite de serviço considerando apenas uma análise estática para verificação dos deslocamentos translacionais horizontais máximos pode não ser suficiente.

Tendo em mente apenas a análise estática, este modelo estrutural atendeu aos requisitos normativos, propostos pela NBR 6118, no que tange aos deslocamentos translacionais horizontais máximos no topo da edificação. Porém, segundo os critérios avaliados por Hirsch & Bachmann (1995), os deslocamentos longitudinais obtidos por todos os métodos estudados, estão na faixa de incômodo enquanto que os deslocamentos transversais estão na faixa de perceptível para o conforto humano.

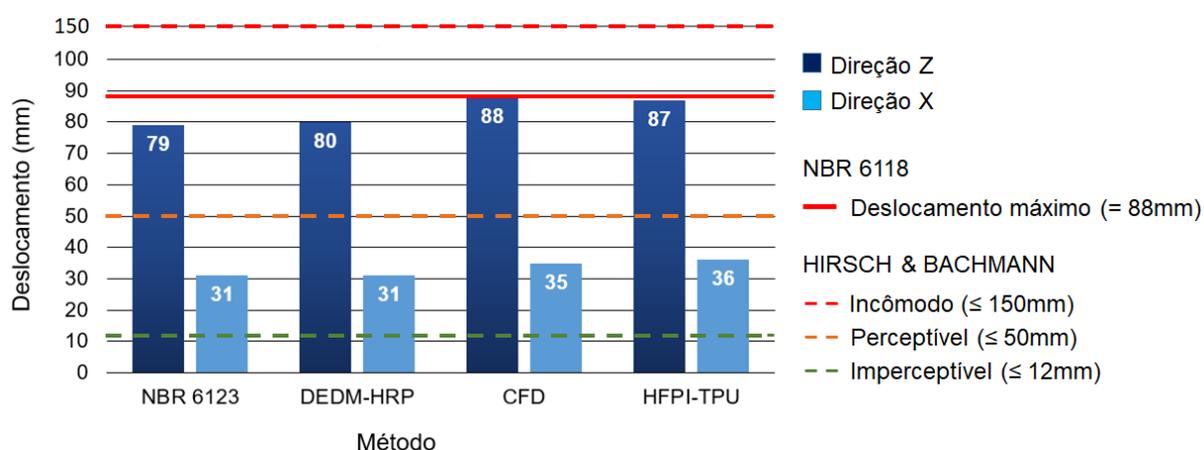


Figura 69 - Avaliação dos deslocamentos provocados pela força do vento.

As análises dinâmicas, considerando a ação não determinística do vento, efetuadas no modelo estrutural indicaram valores de aceleração de pico na direção longitudinal e transversal inferiores aos limites de $0,10 \text{ m/s}^2$ proposto pela norma NBR 6123 (1988).

Entretanto, estes valores de aceleração longitudinais encontram-se na faixa caracterizada como perceptível, segundo proposto por Hirsch & Bachmann (1995). Apenas os valores de aceleração transversais atendem aos critérios propostos por Hirsch & Bachmann (1995), ficando dentro da faixa caracterizada como imperceptível ao conforto humano.

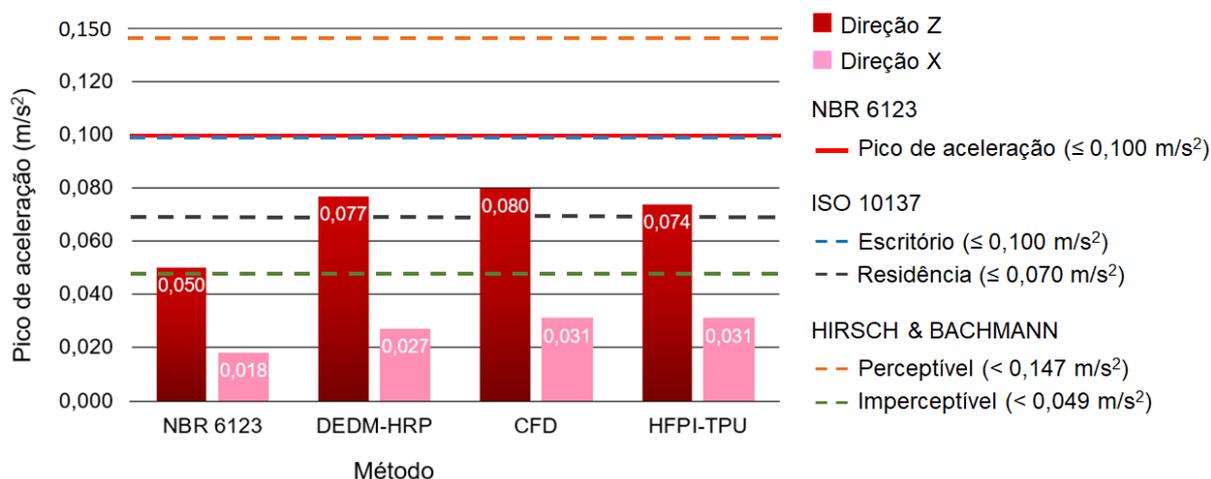


Figura 70 - Avaliação das acelerações provocadas pela força do vento.

Faz-se necessário enfatizar que a ocorrência dos picos de acelerações tratados pela ISO 10137 são anuais enquanto que os picos de acelerações tratados pela NBR 6123 ocorre a cada década.

O modelo estrutural, submetido a cargas de vento não determinísticas, atendeu aos critérios estabelecidos pelas normas NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto e NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações. Assim como aos critérios da ISO 10137, desde que esse prédio seja utilizado como escritório. Porém, para os critérios estabelecidos por Hirsch & Bachmann (1995) tanto os deslocamentos horizontais quanto as acelerações máximas obtidas provocariam situações de incômodo nos usuários desta edificação. Tendo em vista as modernas instalações na Pontifícia Universidade de Tóquio e pioneirismo no estudo do comportamento não determinístico do vento, seus dados experimentais foram considerados os mais fidedignos a realidade. As Tabelas 21 e 22 apresentam os valores percentuais encontrados para cada método quando comparados com o método HFPI-TPU.

Tabela 21 – Valores percentuais encontrados para o vento longitudinal.

Método	Direção Z	
	Deslocamento	Pico de Aceleração
NBR 6123	91%	68%
DEDM-HRP	92%	104%
CFD	101%	108%
HFPI-TPU	100%	100%

Tabela 22 – Valores percentuais encontrados para o vento transversal.

Método	Direção X	
	Deslocamento	Pico de Aceleração
NBR 6123	64%	58%
DEDM-HRP	86%	87%
CFD	97%	100%
HFPI-TPU	100%	100%

Entre todos os métodos analisados, o método computacional CFD foi o que mais se aproximou do método experimental HFPI-TPU, atingindo o valor mínimo de assertividade de 97% para deslocamentos e 92% para as acelerações.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

12.1 Aspectos gerais

Inicialmente, destaca-se que este trabalho de pesquisa representa uma primeira contribuição desenvolvida no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com base na utilização da Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics: CFD), cujo objetivo principal diz respeito à determinação dos coeficientes de pressão oriundos das cargas de vento atuantes sobre fachadas de edifícios de maneira mais realista, em consonância com a realidade prática de projeto. Considerando-se que edifícios altos podem vir a apresentar problemas de vibrações excessivas, esta dissertação de mestrado investigou, via análise estrutural dinâmica não determinística, quais os efeitos da ação do vento sobre os níveis de conforto humano destas estruturas. Assim sendo, os coeficientes de pressão do vento atuantes sobre as fachadas do edifício investigado ao longo deste trabalho foram calculados mediante o emprego de metodologias de análise distintas a partir do emprego de bases de dados aerodinâmicos das plataformas HFPI-TPU e DEDM-HR, com testes em túnel de vento; e, ainda, via emprego da norma brasileira de projeto NBR 6123, visando a posterior análise dinâmica e avaliação do conforto humano.

12.2 Análise estática

Com base nos resultados alcançados durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, destaca-se que, de acordo com a NBR 6118 (2004), os valores dos deslocamentos translacionais horizontais máximos no topo de uma edificação provocados pelas ações das cargas de vento não deve ultrapassar o limite de $H/1700$, onde H representa a altura total da edificação. Portanto, para a edificação em estudo, com altura $H = 150$ m, o deslocamento limite é de 88 mm. Assim sendo, considerando-se que os valores máximos calculados para os deslocamentos translacionais horizontais no topo da edificação foram iguais a $U_Z = 40,68$ mm (direção Z) e $U_X =$

16,23mm (direção X), respectivamente, estes valores se apresentam de forma satisfatória, em atendimento ao valor do deslocamento limite recomendado pela norma brasileira para verificações do Estado Limite de Serviço (ELS)..

12.3 Análise modal

A realização da análise modal para a determinação dos valores das frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores) indicou a suscetibilidade do edifício de concreto armado investigado neste estudo, no que tange a problemas relacionados a vibrações excessivas. Tal fato ocorre devido aos valores das duas primeiras frequências naturais estrutura ($f_{01} = 0,309$ Hz e $f_{02} = 0,325$ Hz), pois estas frequências naturais se encontram dentro da faixa de maior transferência de energia referente às ações das cargas de vento ($f < 1$ Hz). Deste modo, em função dos valores das frequências naturais do edifício de concreto armado, vibrações excessivas e desconforto humano são esperados em função de possíveis ressonâncias entre as frequências de excitação oriundas da ação do vento e frequências naturais da estrutura.

12.4 Análise harmônica

A análise harmônica foi desenvolvida no sentido de verificar as principais transferências de energia da resposta estrutural dinâmica do edifício analisado. Assim sendo, os resultados obtidos indicaram a existência de três picos de transferência de energia bem definidos e coincidentes com a segunda, quinta e nona frequências naturais da estrutura com referência a direção global Z ($f_{02} = 0,325$ Hz; $f_{05} = 1,186$ Hz; $f_{09} = 2,415$ Hz); e outros três picos de transferência de energia associados à direção X global ($f_{01} = 0,309$ Hz; $f_{04} = 0,965$ Hz; $f_{07} = 1,753$ Hz). Cabe ressaltar, também, que a principal contribuição referente à maior transferência de energia da resposta dinâmica do edifício de concreto armado corresponde à segunda frequência natural do sistema ($f_{02} = 0,325$ Hz; modo de vibração com flexão em torno do eixo X). Desta

maneira, tendo como base os valores das frequências naturais do sistema e a contribuição dos modos de vibração do edifício, verifica-se, inicialmente, uma tendência de possíveis problemas relacionados a vibrações excessivas.

12.5 Análise dos coeficientes de pressão

Inicialmente, cabe ressaltar que o cálculo dos coeficientes de pressão oriundos das cargas de vento atuantes sobre as fachadas do edifício é de fundamental relevância para a modelagem matemática das funções não determinísticas representativas da ação do vento, e posterior análise dinâmica e avaliação do conforto humano da estrutura.

De acordo com este contexto, ao longo desta investigação os coeficientes de pressão do vento para o edifício de concreto armado em estudo ($H = 150$ m) foram determinados via emprego da norma brasileira de projeto NBR 6123 (1988), com base no uso de modelagem computacional via CFD (Computational Fluid Dynamics); e, ainda, através da utilização da base de dados aerodinâmicos do Japão (HFPI-TPU). Assim sendo, tomando-se como base uma área de interesse da fachada mais próxima do topo do topo do edifício (C_{p95} : $h = 138,75$ m), foram obtidos os seguintes valores para os referidos coeficientes de pressão, respectivamente: Barlavento: 0,700; 1,823; 1,899. Face Lateral Direita: -0,900; -2,279; -2,620. Sotavento: -0,500; -1,850; -1,887. Face Lateral Esquerda: -0,900; -2,500; -2,688.

Analisando-se os resultados obtidos neste estudo e tendo em mente que a norma brasileira de projeto NBR 6123 (1988) recomenda o uso de um coeficiente de pressão único para cada fachada do edifício, as diferenças em termos quantitativos são significativas quando comparadas com os resultados fornecidos pela base de dados aerodinâmicos do Japão (HFPI-TPU). Por exemplo, considerando-se, novamente, uma área da fachada da edificação com maior incidência do vento no barlavento (C_{p95} : $h = 138,75$ m), em termos percentuais, o valor do C_{p95} via uso da base de dados HFPI-TPU é cerca de 270% superior ao valor do mesmo coeficiente de pressão de acordo com a NBR 6123 (1988). Tal fato deve servir como um alerta para os projetistas de estruturas no sentido de que o desenvolvimento de estudos e pesquisas devem ser continuamente aprofundados no sentido da atualização e

melhoramento das recomendações da NBR 6123 (1988), considerando-se que a base de dados do Japão (HFPI-TPU) é respaldada por uma série extensa de testes experimentais realizados em túnel de vento. Por outro lado, cabe ressaltar que tais discrepâncias, de ordem quantitativa, não ocorrem de maneira significativa quando são comparados os valores dos coeficientes de pressão do vento obtidos via uso da base de dados aerodinâmicos do Japão (HFPI-TPU) e aqueles determinados via emprego de técnicas de modelagem computacional via emprego de CFD (Computational Fluid Dynamics) [(C_{p95} : $h = 138,75$ m): diferenças da ordem de 5%].

Finalmente, faz-se necessário ressaltar que a base de dados DEDM-HRP, fornecida pela plataforma americana VORTEX-Winds, não disponibiliza os coeficientes de pressão do vento. Neste sentido, a referida plataforma informa somente o valor da carga total (em kN), no domínio do tempo, considerando uma área total (em m^2), no que tange a cada fachada do edifício analisado. Evidentemente, apesar de utilizar os coeficientes de pressão para posterior geração das cargas de vento, a plataforma VORTEX-Winds disponibiliza para os usuários somente os valores das cargas de vento.

12.6 Análise estrutural dinâmica e avaliação do conforto humano do edifício

Inicialmente, com base no cálculo dos valores dos coeficientes de pressão do vento, via emprego de quatro metodologias de análise distintas, as cargas dinâmicas não determinísticas foram determinadas, mediante modelagem matemática das ações do vento. Em seguida, foram utilizadas 30 séries de carga não determinísticas, objetivando o tratamento estatístico da resposta estrutural dinâmica (deslocamentos e acelerações) do edifício de concreto armado ($H = 150$ m), e posterior investigação dos níveis de conforto humano do sistema.

Ressalta-se que os valores máximos médios dos deslocamentos translacionais horizontais e acelerações de pico, determinados via análise estrutural dinâmica não determinística do edifício submetido às cargas de vento, considerando-se todas as metodologias de análises e casos de carregamento investigados, foram calculados via emprego da modelagem CFD [$U_{max} = 88$ mm e $a_{max} = 0,080$ m/s^2].

Assim sendo, tendo em mente os estes valores máximos médios, destaca-se que nenhum valor de deslocamento (direções X e Z) excedeu o limite estabelecido pela norma NBR 6118 (2014) [$U_{lim} = 88 \text{ mm}$]. Todavia, cabe ressaltar que quando os valores limites propostos por Hirsch et al. (1995) são considerados para a análise da estrutura, os valores dos deslocamentos associados a direção global Z da edificação encontram-se na faixa denominada de “Incômodo”; e, de outra maneira, os deslocamentos referentes a direção X encontram-se no limite de “Perceptível” para o conforto humano. Com relação aos valores máximos médios das acelerações de pico encontradas via análise da resposta dinâmica do modelo estrutural investigado, nenhum valor excedeu o limite estabelecido pela norma NBR 6123 (1988) [$a_{lim} = 0,10 \text{ m/s}^2$]. Todavia, para os limites propostos por Hirsch et al. (1995), apenas as acelerações calculadas segundo a direção global X da estrutura encontram-se na faixa denominada de “Imperceptível”, enquanto que as acelerações determinadas de acordo com a direção global Z do edifício encontram-se no limite de “Perceptível” para o conforto humano.

Com referência a norma ISO 10137 (2007), os valores de aceleração de pico encontrados nesta investigação, atendem aos limites de conforto humano caso a utilização do edifício se destine a escritórios. De outra forma, para o caso do edifício ser utilizado com finalidade residencial, seus ocupantes sentiram desconforto. Contudo, deve-se enfatizar que a ocorrência dos picos de acelerações tratados no âmbito da ISO 10137 (2007) são anuais, enquanto que os picos de acelerações tratados pela NBR 6123 (1988) ocorrem a cada década.

Finalmente, de acordo com a taxa de assertividade utilizando a NBR 6123 (1988), os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa sugerem que as recomendações da norma NBR 6123 (1988) sejam reavaliadas e rediscutidas, objetivando a inclusão das variações dos coeficientes de pressão do vento atuantes sobre as fachadas dos edifícios. Além disso, sugere-se, ainda, que os limites para avaliação final do conforto humano possam ser estabelecidos através de faixas de conforto humano, mediante análise dos valores máximos médio dos deslocamentos e acelerações, determinadas via tratamento estatístico dos resultados.

12.7 Sugestões para trabalhos futuros

1. Considerar outras geometrias de edifícios, condições de terreno e ação de vento, ao longo da investigação, por exemplo, com variação da altura e das características dinâmicas do sistema estrutural [edifícios em aço e mistos (aço-concreto)].
2. Incluir o efeito do amortecimento aerodinâmico dos edifícios investigados, de maneira a sofisticar os modelos matemáticos, para a avaliação do conforto humano.
3. Realizar um programa de monitoração experimental sobre edifícios reais para comparar a resposta dinâmica medida com a utilização de acelerômetros com a resposta obtida com as análises em elementos finitos, objetivando avaliar a taxa de assertividade dos modelos numéricos desenvolvidos.
4. Aprofundar as análises via uso de técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics), considerando-se, por exemplo, os seguintes aspectos de projeto: diferentes ângulos de incidência das cargas de vento sobre as fachadas da estrutura; modelos com diferentes geometrias, condições de terreno e ação de vento; consideração do efeito de vizinha no escoamento do fluido sobre a estrutura.

REFERÊNCIAS

ANSYS Swanson Analysis Systems Inc., 2020. Theory Reference (versão 20 R1).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento*. Rio de Janeiro, 2014.

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

AVELINO, A. F. *Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica*. Ed. Érica, 2008.

BAIRAGI, A. 2019. *Distribution of Wind Pressure Around Different Shape Tall Building*. Advances in Structures, Systems and Materials, Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering.

BAIRAGI, A. 2020. *Evaluation of interference effects on parallel high-rise buildings for different orientation using CFD*. Advances in Structures, Systems and Materials, Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering.

BASTOS, L. de S., 2020. *Avaliação do comportamento estrutural dinâmico não determinístico de edifícios altos considerando-se o efeito da ação transversal do vento e a modelagem da interação solo-estrutura*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

BASTOS, L. de S., 2015. *Estudo do comportamento estrutural e análise de conforto humano de edifícios de concreto armado*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

BASTOS, L. de S., 2019. *Projeto e construção de um túnel de vento didático para o estudo de vibrações em edifícios utilizando vídeos e processamento de imagens*. XLVII

Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia e II Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE, Fortaleza, Ceará, 2019.

BARBOZA, R. R., SILVA, J. G. S. *Análise de conforto humano em edifícios altos submetidos à ação não determinística do vento*. XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), pp. 1-18, 2015.

BARILE, Alan. *Avaliação da resposta estrutural dinâmica de edifícios submetidos à ação do vento com base na comparação entre metodologias distintas para estimativa das acelerações*. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

BLESSMANN, J. *Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2ª Edição, Porto Alegre, 2001.

BRASIL, R. & SILVA, M. *Introdução à dinâmica das estruturas para engenharia civil*. 1ª edição. Editora Blucher, São Paulo, 2013.

BURTON, M. D., KWOK, K. C. S., ABDELRAZAQ, A. *Wind-induced motion of tall buildings: designing for occupant comfort*. International Journal of High-Rise Buildings, v. 4, n. 1, pp. 1-8, 2015.

CHAKRABORTY, S. 2017. *Experimental and Numerical Study of Surface Pressure on Plan Shape Tall Building*. Bengal Engineering and Science University Shibpur, India.

CHAKRABORTY, S. and DALUI, S. K. 2017. *Wind load on irregular plan shaped tall building*. Indian Institute of Engineering Science and Technology – Shibpur, India.

CHANG, F. *Wind and movement in tall buildings*. Civil Engineering. ASCE, New York, 1967.

CLOUGH, R. W. & PENZIEN, J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, Second Edition, 1993.

DALUI, S. K. 2018. *Experimental and Numerical Study of Surface Pressure on '+' Plan Shape Tall Building*. Indian Institute of Engineering Science and Technology – Shibpur, India.

DEUS, L. A. and SILVA, J. G. S. 2022. Vibration Analysis and Human Comfort Assessment of Building Subjected to Wind Dynamic Loads. International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS), University of Aveiro, Portugal.

DRUMMOND, Rodrigo C. O. *Modelagem do comportamento estrutural de edifícios submetidos à ação randômica do vento considerando-se o efeito da interação solo-estrutura*. 2017. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ELLIS, B. R. An Assesement of the Accuracy of Predicting the Fundamental Natural Frequencies of Buildings and Implications Concerning the Dynamic Analysis of Structure. Institution of Civil Engineers Proceedings, London. V. 69, p. 763-776, Sep 1980.

EWINS, D. J. *Modal testing: Theory and practice*. Editora Research studies press Ltd. England, 1984.

FERRARETO, J. A. *Human Comfort in tall buildings subjected to wind-induced motion*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

FRANCO, M., MEDEIROS, S. R. P. *O método do “vento sintético” - Novas considerações*. Revista TQS News. n 33, pp. 38-46, 2011.

HIRSCH & BACHMANN. *Wind-induced vibrations*. In: BACHMANN et al. Vibration problems in structures: practical guidelines. Boston, Belim: Birkhäuser, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, Switzerland, 2007.

KAREEM, A. & KWON, D. K. (2017). *A Cyber-Based Data-Enabled Virtual Organization for Wind Load Effects on Civil Infrastructures: VORTEX-Winds*. *Frontiers in Built Environment*, 3, 1-32.

KIM, B. *Prediction of Wind Loads on Tall Buildings: Development and Applications of an Aerodynamic Database*. Thesis. University of Western Ontario, Ontario, Canada, 2013.

LIN, N. and LETCHFORD, C. *Characteristics of wind forces acting on tall buildings*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Texas, USA, 2015.

MING, G. *Study on wind loads and responses of tall buildings and structures*. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan, 2009.

OLIVEIRA, B. D. C. *Efeito do Vento como Ação Dinâmica em Edifícios Altos*. 2014. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.

Petrini F. and Ciampoli. M. 2012. *Performance-based wind design of tall buildings*. Department of Structural and Geotechnical Engineering, University of Rome, Italy.

ROY, K. *Wind pressure and velocity around stepped unsymmetrical plan shape tall building*. Department of Civil Engineering Indian Institute of Technology Roorkee, India, 2016.

SOLTYS, R., TOMKO, M., KMET, S. *Study Of Local Turbulent Wind Characteristics And Wind Velocity Simulations*. *Building Research Journal*, v. 60, pp. 31-50, 2012.

THE SCHOOL OF ARCHITECTURE & WIND ENGINEERING. Graduate School of Engineering. Tokyo Polytechnic University. Global COE Program. The 21st Century COE Program. *Wind effects on buildings and urban environment*, 2003.

VIEIRA, G. S. *Estudo experimental dos esforços solicitantes em um edifício alto devidos à ação do vento considerando a influência de edificações vizinhas*. Tese de Doutorado.

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

WASEF, A. *Serviceability-Based Design of Tall Buildings Subjected to Vortex Shedding. Masters Thesis*. Department of Civil and Environmental Engineering. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States, 2014.

WILCOX, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, Anaheim, CA - USA, 1998.

APÊNDICE A - ELEMENTOS UTILIZADOS NO ANSYS

Os modelos computacionais são necessários para a avaliação do comportamento estrutural dos edifícios investigados no presente trabalho de pesquisa. Os modelos são desenvolvidos empregando-se técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio da utilização do programa computacional ANSYS (2020). Estes modelos possuem um grau de refinamento adequado, permitindo uma ótima representação do comportamento estrutural dinâmico dos edifícios.

Os pilares e vigas foram simulados através do elemento finito tridimensional de viga BEAM44 (ANSYS, 2020). Este é um elemento uniaxial composto por dois nós e cada nó possui seis graus de liberdade: translação nas direções x , y , e z e rotação nos eixos x , y , e z . Permite a utilização de qualquer tipo de seção transversal, desde que se definam as propriedades necessárias para tal. Os eixos principais y e z estão localizados na seção transversal. A Figura 66 representa o elemento BEAM44.

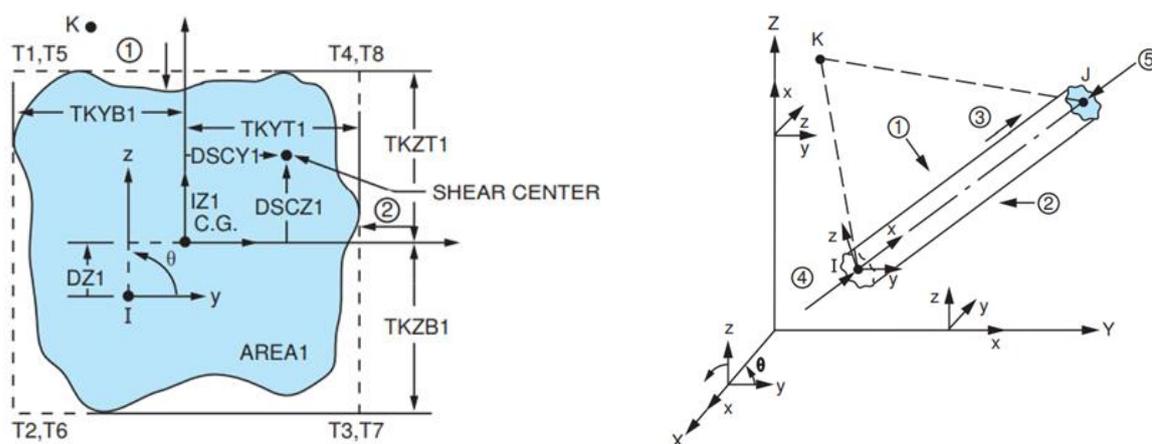


Figura 71 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2020).

Para representar as lajes maciças, os modelos numéricos tridimensionais foram desenvolvidos utilizando o elemento finito de casca SHELL63 (ANSYS, 2020). Este elemento considera os efeitos de flexão e membrana, como também se caracteriza por possuir seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções x , y e z . As cargas podem ser aplicadas ortogonalmente e também paralelamente sobre este elemento.

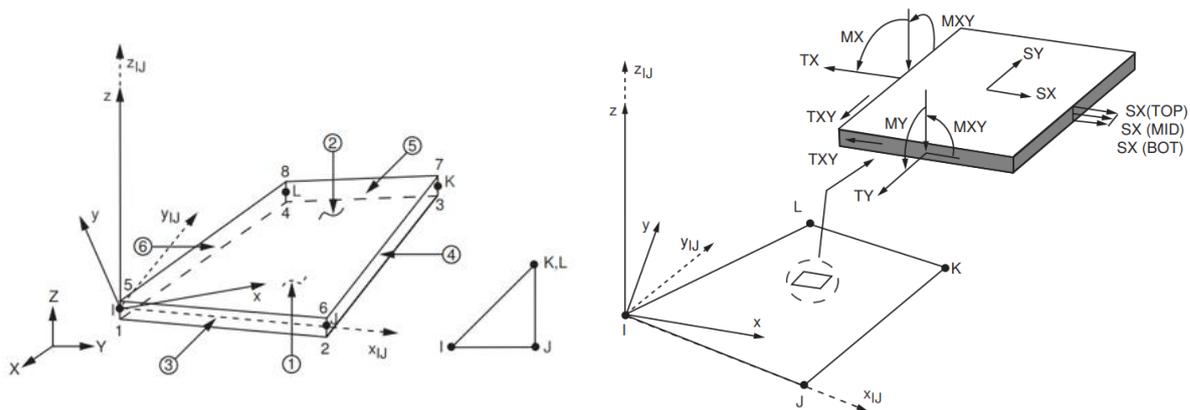


Figura 72 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2020).

Na modelagem numérico-computacional dos sistemas estruturais investigados foi considerado que todos os materiais trabalham no regime linear-elástico e que as seções planas permanecem planas no estado deformado.

APÊNDICE B - CONVERGÊNCIA NUMÉRICA

Conforme apresentado na Figura 73, a convergência numérica quanto ao tamanho da malha adotada, foi de 75x75cm para cada elemento. De acordo com o método proposto por Ellis (1980), esse tamanho de malha apresentou a frequência fundamental (f_{01}) que mais se aproximou da fórmula $46/H$, onde H representa a altura do edifício.

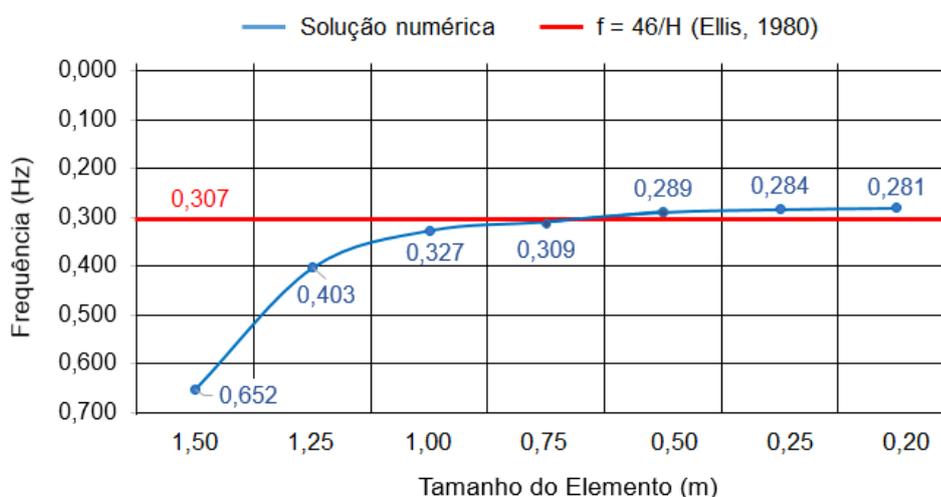


Figura 73 - Convergência do tamanho da malha de elementos finitos.

As 30 séries executadas tanto para o método NBR 6123 quanto para o método CFD, foram realizadas através do cálculo de superposição modal. As figuras 74 e 75 informam que foram utilizados os 10 primeiros modos de vibração, todavia convergência numérica foi a alcançada no 6º modo de vibração.

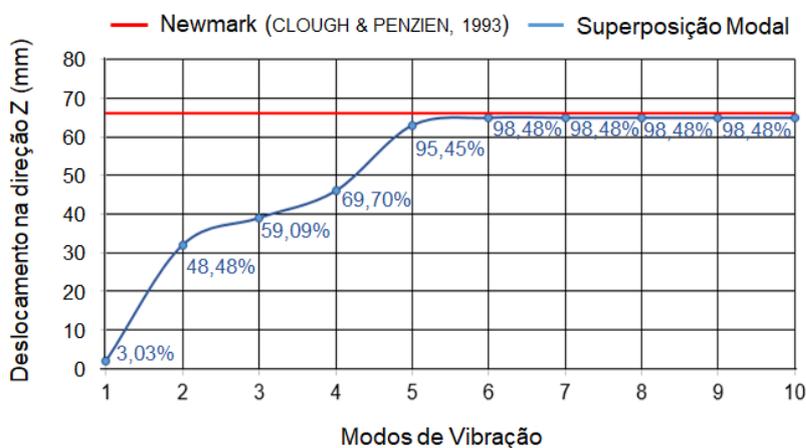


Figura 74 – Convergência modal para deslocamento direção Z.

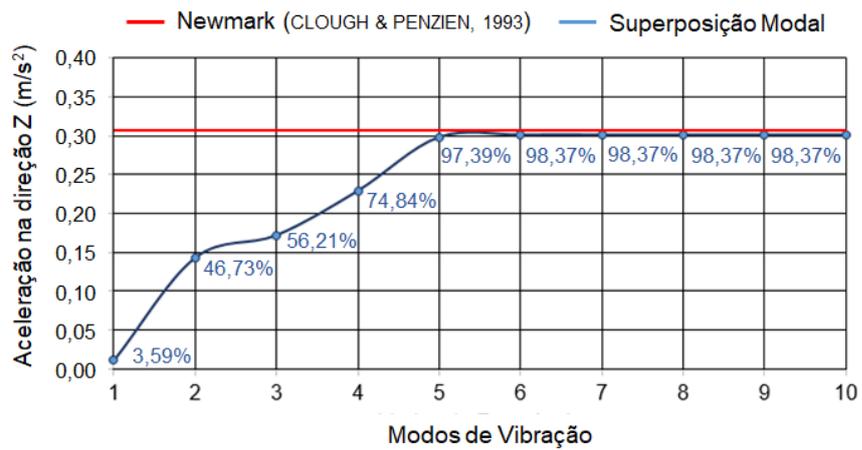


Figura 75 – Convergência modal para aceleração na direção Z.

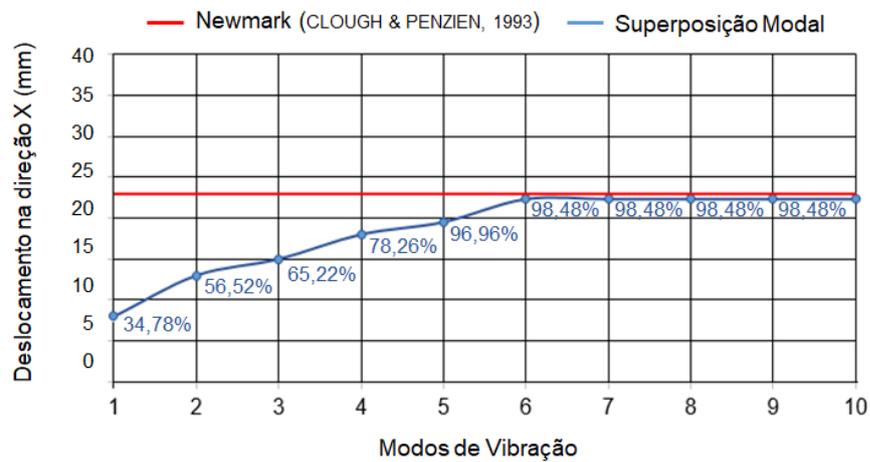


Figura 76 – Convergência modal para deslocamento direção X.

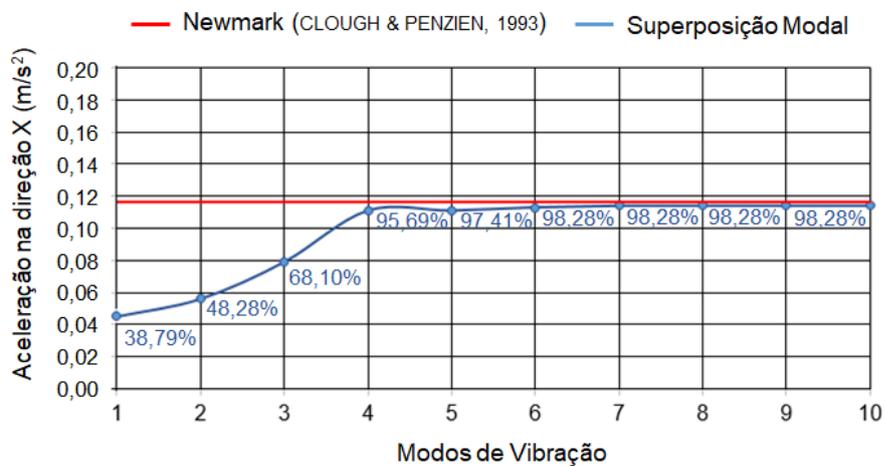


Figura 77 – Convergência modal para aceleração na direção X.

APÊNDICE C - COEFICIENTES DE PRESSÃO: PROPOSTO PELA NBR 6123

Nas Tabelas 23 a 26 encontram-se os coeficientes de pressão, valores adimensionais, para cada ponto de monitoração do modelo estrutural representado na Figura 24.

Tabela 23 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
1	0,700	39	0,700	77	-0,500	115	-0,500
2	0,700	40	0,700	78	-0,500	116	-0,900
3	0,700	41	-0,900	79	-0,500	117	-0,900
4	0,700	42	-0,900	80	-0,500	118	-0,900
5	0,700	43	-0,900	81	-0,500	119	-0,900
6	0,700	44	-0,900	82	-0,500	120	-0,900
7	0,700	45	-0,900	83	-0,500	121	0,700
8	0,700	46	-0,500	84	-0,500	122	0,700
9	0,700	47	-0,500	85	-0,500	123	0,700
10	0,700	48	-0,500	86	-0,900	124	0,700
11	-0,900	49	-0,500	87	-0,900	125	0,700
12	-0,900	50	-0,500	88	-0,900	126	0,700
13	-0,900	51	-0,500	89	-0,900	127	0,700
14	-0,900	52	-0,500	90	-0,900	128	0,700
15	-0,900	53	-0,500	91	0,700	129	0,700
16	-0,500	54	-0,500	92	0,700	130	0,700
17	-0,500	55	-0,500	93	0,700	131	-0,900
18	-0,500	56	-0,900	94	0,700	132	-0,900
19	-0,500	57	-0,900	95	0,700	133	-0,900
20	-0,500	58	-0,900	96	0,700	134	-0,900
21	-0,500	59	-0,900	97	0,700	135	-0,900
22	-0,500	60	-0,900	98	0,700	136	-0,500
23	-0,500	61	0,700	99	0,700	137	-0,500
24	-0,500	62	0,700	100	0,700	138	-0,500
25	-0,500	63	0,700	101	-0,900	139	-0,500
26	-0,900	64	0,700	102	-0,900	140	-0,500
27	-0,900	65	0,700	103	-0,900	141	-0,500
28	-0,900	66	0,700	104	-0,900	142	-0,500
29	-0,900	67	0,700	105	-0,900	143	-0,500
30	-0,900	68	0,700	106	-0,500	144	-0,500
31	0,700	69	0,700	107	-0,500	145	-0,500
32	0,700	70	0,700	108	-0,500	146	-0,900
33	0,700	71	-0,900	109	-0,500	147	-0,900
34	0,700	72	-0,900	110	-0,500	148	-0,900
35	0,700	73	-0,900	111	-0,500	149	-0,900
36	0,700	74	-0,900	112	-0,500	150	-0,900
37	0,700	75	-0,900	113	-0,500	151	0,700
38	0,700	76	-0,500	114	-0,500	152	0,700

Tabela 24 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
153	0,700	202	-0,500	251	-0,900	300	-0,900
154	0,700	203	-0,500	252	-0,900	301	0,700
155	0,700	204	-0,500	253	-0,900	302	0,700
156	0,700	205	-0,500	254	-0,900	303	0,700
157	0,700	206	-0,900	255	-0,900	304	0,700
158	0,700	207	-0,900	256	-0,500	305	0,700
159	0,700	208	-0,900	257	-0,500	306	0,700
160	0,700	209	-0,900	258	-0,500	307	0,700
161	-0,900	210	-0,900	259	-0,500	308	0,700
162	-0,900	211	0,700	260	-0,500	309	0,700
163	-0,900	212	0,700	261	-0,500	310	0,700
164	-0,900	213	0,700	262	-0,500	311	-0,900
165	-0,900	214	0,700	263	-0,500	312	-0,900
166	-0,500	215	0,700	264	-0,500	313	-0,900
167	-0,500	216	0,700	265	-0,500	314	-0,900
168	-0,500	217	0,700	266	-0,900	315	-0,900
169	-0,500	218	0,700	267	-0,900	316	-0,500
170	-0,500	219	0,700	268	-0,900	317	-0,500
171	-0,500	220	0,700	269	-0,900	318	-0,500
172	-0,500	221	-0,900	270	-0,900	319	-0,500
173	-0,500	222	-0,900	271	0,700	320	-0,500
174	-0,500	223	-0,900	272	0,700	321	-0,500
175	-0,500	224	-0,900	273	0,700	322	-0,500
176	-0,900	225	-0,900	274	0,700	323	-0,500
177	-0,900	226	-0,500	275	0,700	324	-0,500
178	-0,900	227	-0,500	276	0,700	325	-0,500
179	-0,900	228	-0,500	277	0,700	326	-0,900
180	-0,900	229	-0,500	278	0,700	327	-0,900
181	0,700	230	-0,500	279	0,700	328	-0,900
182	0,700	231	-0,500	280	0,700	329	-0,900
183	0,700	232	-0,500	281	-0,900	330	-0,900
184	0,700	233	-0,500	282	-0,900	331	0,700
185	0,700	234	-0,500	283	-0,900	332	0,700
186	0,700	235	-0,500	284	-0,900	333	0,700
187	0,700	236	-0,900	285	-0,900	334	0,700
188	0,700	237	-0,900	286	-0,500	335	0,700
189	0,700	238	-0,900	287	-0,500	336	0,700
190	0,700	239	-0,900	288	-0,500	337	0,700
191	-0,900	240	-0,900	289	-0,500	338	0,700
192	-0,900	241	0,700	290	-0,500	339	0,700
193	-0,900	242	0,700	291	-0,500	340	0,700
194	-0,900	243	0,700	292	-0,500	341	-0,900
195	-0,900	244	0,700	293	-0,500	342	-0,900
196	-0,500	245	0,700	294	-0,500	343	-0,900
197	-0,500	246	0,700	295	-0,500	344	-0,900
198	-0,500	247	0,700	296	-0,900	345	-0,900
199	-0,500	248	0,700	297	-0,900	346	-0,500
200	-0,500	249	0,700	298	-0,900	347	-0,500

Tabela 25 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.

349	-0,500	398	0,700	447	-0,900	496	-0,500
350	-0,500	399	0,700	448	-0,900	497	-0,500
351	-0,500	400	0,700	449	-0,900	498	-0,500
352	-0,500	401	-0,900	450	-0,900	499	-0,500
353	-0,500	402	-0,900	451	0,700	500	-0,500
354	-0,500	403	-0,900	452	0,700	501	-0,500
355	-0,500	404	-0,900	453	0,700	502	-0,500
356	-0,900	405	-0,900	454	0,700	503	-0,500
357	-0,900	406	-0,500	455	0,700	504	-0,500
358	-0,900	407	-0,500	456	0,700	505	-0,500
359	-0,900	408	-0,500	457	0,700	506	-0,900
360	-0,900	409	-0,500	458	0,700	507	-0,900
361	0,700	410	-0,500	459	0,700	508	-0,900
362	0,700	411	-0,500	460	0,700	509	-0,900
363	0,700	412	-0,500	461	-0,900	510	-0,900
364	0,700	413	-0,500	462	-0,900	511	0,700
365	0,700	414	-0,500	463	-0,900	512	0,700
366	0,700	415	-0,500	464	-0,900	513	0,700
367	0,700	416	-0,900	465	-0,900	514	0,700
368	0,700	417	-0,900	466	-0,500	515	0,700
369	0,700	418	-0,900	467	-0,500	516	0,700
370	0,700	419	-0,900	468	-0,500	517	0,700
371	-0,900	420	-0,900	469	-0,500	518	0,700
372	-0,900	421	0,700	470	-0,500	519	0,700
373	-0,900	422	0,700	471	-0,500	520	0,700
374	-0,900	423	0,700	472	-0,500	521	-0,900
375	-0,900	424	0,700	473	-0,500	522	-0,900
376	-0,500	425	0,700	474	-0,500	523	-0,900
377	-0,500	426	0,700	475	-0,500	524	-0,900
378	-0,500	427	0,700	476	-0,900	525	-0,900
379	-0,500	428	0,700	477	-0,900	526	-0,500
380	-0,500	429	0,700	478	-0,900	527	-0,500
381	-0,500	430	0,700	479	-0,900	528	-0,500
382	-0,500	431	-0,900	480	-0,900	529	-0,500
383	-0,500	432	-0,900	481	0,700	530	-0,500
384	-0,500	433	-0,900	482	0,700	531	-0,500
385	-0,500	434	-0,900	483	0,700	532	-0,500
386	-0,900	435	-0,900	484	0,700	533	-0,500
387	-0,900	436	-0,500	485	0,700	534	-0,500
388	-0,900	437	-0,500	486	0,700	535	-0,500
389	-0,900	438	-0,500	487	0,700	536	-0,900
390	-0,900	439	-0,500	488	0,700	537	-0,900
391	0,700	440	-0,500	489	0,700	538	-0,900
392	0,700	441	-0,500	490	0,700	539	-0,900
393	0,700	442	-0,500	491	-0,900	540	-0,900
394	0,700	443	-0,500	492	-0,900	541	0,700
395	0,700	444	-0,500	493	-0,900	542	0,700
396	0,700	445	-0,500	494	-0,900	543	0,700
397	0,700	446	-0,900	495	-0,900	544	0,700

Tabela 26 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através da NBR 6123.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
545	0,700	559	-0,500	573	0,700	587	-0,500
546	0,700	560	-0,500	574	0,700	588	-0,500
547	0,700	561	-0,500	575	0,700	589	-0,500
548	0,700	562	-0,500	576	0,700	590	-0,500
549	0,700	563	-0,500	577	0,700	591	-0,500
550	0,700	564	-0,500	578	0,700	592	-0,500
551	-0,900	565	-0,500	579	0,700	593	-0,500
552	-0,900	566	-0,900	580	0,700	594	-0,500
553	-0,900	567	-0,900	581	-0,900	595	-0,500
554	-0,900	568	-0,900	582	-0,900	596	-0,900
555	-0,900	569	-0,900	583	-0,900	597	-0,900
556	-0,500	570	-0,900	584	-0,900	598	-0,900
557	-0,500	571	0,700	585	-0,900	599	-0,900
558	-0,500	572	0,700	586	-0,500	600	-0,900

APÊNDICE D - COEFICIENTES DE PRESSÃO: BASE DE DADOS HFPI-TPU

Nas Tabelas 27 a 29 encontram-se os coeficientes de pressão, valores adimensionais, para cada ponto de monitoração do modelo estrutural representado na Figura 14.

Tabela 27 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do HFPI-TPU.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
1	1,790	39	1,753	77	-1,859	115	-1,950
2	1,732	40	1,347	78	-1,797	116	-3,743
3	1,649	41	-2,359	79	-1,796	117	-3,116
4	1,634	42	-2,577	80	-1,708	118	-2,688
5	1,597	43	-2,520	81	-1,701	119	-2,367
6	1,586	44	-2,451	82	-1,769	120	-2,132
7	1,716	45	-2,428	83	-1,861	121	1,285
8	1,686	46	-1,720	84	-1,945	122	1,693
9	1,692	47	-1,684	85	-1,921	123	1,821
10	1,488	48	-1,736	86	-2,648	124	1,956
11	-2,582	49	-1,952	87	-2,607	125	1,978
12	-2,580	50	-1,842	88	-2,704	126	1,965
13	-2,663	51	-1,657	89	-2,296	127	2,071
14	-2,594	52	-1,667	90	-2,071	128	1,921
15	-2,358	53	-1,684	91	1,336	129	1,809
16	-2,162	54	-1,749	92	1,706	130	1,294
17	-1,882	55	-1,881	93	1,791	131	-2,201
18	-1,692	56	-2,478	94	1,984	132	-2,245
19	-1,816	57	-2,396	95	1,899	133	-2,647
20	-1,739	58	-2,645	96	1,969	134	-2,480
21	-1,705	59	-2,784	97	1,931	135	-4,134
22	-1,718	60	-2,263	98	1,912	136	-2,012
23	-1,677	61	1,694	99	1,805	137	-2,143
24	-1,696	62	1,862	100	1,396	138	-1,826
25	-1,827	63	1,884	101	-2,073	139	-1,665
26	-2,286	64	1,981	102	-2,276	140	-1,729
27	-2,709	65	1,969	103	-2,620	141	-1,738
28	-2,701	66	1,947	104	-2,486	142	-1,955
29	-2,723	67	1,967	105	-3,605	143	-2,050
30	-3,500	68	1,932	106	-1,901	144	-2,043
31	1,664	69	1,726	107	-2,025	145	-2,142
32	1,855	70	1,319	108	-1,788	146	-4,081
33	1,767	71	-2,126	109	-1,677	147	-2,464
34	1,898	72	-2,247	110	-1,780	148	-2,655
35	1,999	73	-2,446	111	-1,887	149	-2,777
36	1,982	74	-2,310	112	-1,842	150	-2,274
37	1,923	75	-2,618	113	-1,938	151	1,265
38	1,906	76	-1,720	114	-1,982	152	1,648

Tabela 28 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do HFPI-TPU.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
153	1,771	202	-1,660	251	-2,339	300	-2,849
154	1,850	203	-1,842	252	-2,548	301	1,195
155	1,858	204	-2,037	253	-2,960	302	1,643
156	1,850	205	-2,022	254	-2,910	303	1,785
157	1,768	206	-3,229	255	-3,772	304	1,735
158	1,797	207	-2,983	256	-1,829	305	1,639
159	1,585	208	-3,404	257	-1,979	306	1,546
160	1,249	209	-2,492	258	-1,917	307	1,528
161	-2,195	210	-2,388	259	-1,520	308	1,463
162	-2,696	211	1,349	260	-1,382	309	1,459
163	-2,941	212	1,539	261	-1,466	310	1,175
164	-2,696	213	1,719	262	-1,610	311	-2,498
165	-3,871	214	1,799	263	-1,744	312	-2,847
166	-1,909	215	1,761	264	-1,968	313	-3,213
167	-2,230	216	1,737	265	-2,050	314	-2,746
168	-1,775	217	1,716	266	-3,920	315	-3,984
169	-1,550	218	1,700	267	-3,034	316	-1,958
170	-1,540	219	1,621	268	-3,035	317	-2,086
171	-1,606	220	1,159	269	-2,933	318	-1,783
172	-1,769	221	-2,448	270	-2,725	319	-1,636
173	-2,020	222	-2,645	271	1,268	320	-1,591
174	-2,106	223	-2,959	272	1,575	321	-1,663
175	-2,045	224	-2,672	273	1,604	322	-1,756
176	-3,133	225	-3,229	274	1,586	323	-2,007
177	-2,401	226	-1,929	275	1,668	324	-2,110
178	-2,575	227	-2,041	276	1,650	325	-2,195
179	-2,918	228	-1,755	277	1,714	326	-4,062
180	-2,534	229	-1,527	278	1,614	327	-3,003
181	1,307	230	-1,378	279	1,472	328	-3,422
182	1,561	231	-1,376	280	1,054	329	-3,670
183	1,658	232	-1,566	281	-2,300	330	-3,501
184	1,707	233	-1,806	282	-2,846	331	1,159
185	1,718	234	-1,983	283	-3,085	332	1,565
186	1,781	235	-2,057	284	-2,847	333	1,696
187	1,703	236	-3,663	285	-4,026	334	1,624
188	1,720	237	-2,660	286	-1,870	335	1,562
189	1,718	238	-3,094	287	-1,966	336	1,479
190	1,307	239	-2,772	288	-1,999	337	1,409
191	-2,241	240	-2,455	289	-1,922	338	1,334
192	-2,688	241	1,197	290	-1,706	339	1,255
193	-2,968	242	1,539	291	-1,530	340	0,999
194	-2,909	243	1,652	292	-1,722	341	-2,446
195	-3,764	244	1,668	293	-1,834	342	-3,079
196	-1,947	245	1,709	294	-1,976	343	-3,311
197	-2,180	246	1,714	295	-2,065	344	-2,894
198	-1,742	247	1,714	296	-4,117	345	-3,644
199	-1,529	248	1,626	297	-2,961	346	-2,181
200	-1,420	249	1,416	298	-3,207	347	-2,105

Tabela 29 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do HFPI-TPU.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
349	-1,789	390	-2,985	431	-3,006	472	-2,972
350	-1,616	391	1,265	432	-3,679	473	-3,496
351	-1,627	392	1,226	433	-3,022	474	-2,968
352	-1,980	393	1,291	434	-3,271	475	-2,407
353	-1,990	394	1,365	435	-4,037	476	-3,177
354	-2,077	395	1,415	436	-2,245	477	-4,002
355	-2,077	396	1,444	437	-2,306	478	-3,614
356	-4,639	397	1,376	438	-2,277	479	-3,651
357	-3,162	398	1,301	439	-1,877	480	-3,947
358	-3,136	399	1,194	440	-1,716	481	0,707
359	-3,451	400	0,892	441	-2,096	482	1,122
360	-3,123	401	-3,353	442	-2,628	483	1,341
361	1,179	402	-3,234	443	-2,880	484	1,428
362	1,364	403	-2,955	444	-2,724	485	1,541
363	1,489	404	-3,745	445	-2,404	486	1,459
364	1,477	405	-3,505	446	-3,364	487	1,435
365	1,450	406	-2,025	447	-3,501	488	1,478
366	1,440	407	-2,413	448	-3,396	489	1,247
367	1,472	408	-2,005	449	-3,642	490	0,766
368	1,339	409	-1,870	450	-3,459	491	-3,378
369	1,204	410	-1,544	451	0,815	492	-3,840
370	0,982	411	-1,791	452	0,956	493	-3,171
371	-3,121	412	-2,265	453	1,156	494	-2,948
372	-2,871	413	-2,551	454	1,209	495	-3,160
373	-2,871	414	-2,669	455	1,182	496	-2,644
374	-2,965	415	-2,386	456	1,189	497	-2,263
375	-3,684	416	-3,075	457	1,157	498	-2,353
376	-2,262	417	-3,888	458	1,069	499	-2,318
377	-2,267	418	-3,204	459	0,959	500	-1,807
378	-2,118	419	-2,984	460	-0,623	501	-1,808
379	-1,845	420	-4,144	461	-2,642	502	-2,442
380	-1,509	421	0,980	462	-3,201	503	-3,354
381	-1,700	422	1,145	463	-3,023	504	-2,882
382	-1,995	423	1,172	464	-2,841	505	-2,649
383	-2,244	424	1,253	465	-3,628	506	-3,085
384	-2,312	425	1,214	466	-2,264	507	-3,123
385	-2,290	426	1,280	467	-2,723	508	-3,631
386	-3,135	427	1,222	468	-2,435	509	-4,681
387	-3,076	428	1,179	469	-2,110	510	-3,546
388	-4,000	429	1,062	470	-1,503		
389	-3,911	430	0,809	471	-1,925		

APÊNDICE E - COEFICIENTES DE PRESSÃO: MODELAGEM VIA CFD

Nas Tabelas 30 a 33 encontram-se os coeficientes de pressão, valores adimensionais, para cada ponto de monitoração do modelo estrutural representado na Figura 24.

Tabela 30 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
1	1,575	39	1,700	77	-1,618	115	-1,696
2	1,576	40	1,252	78	-1,635	116	-3,668
3	1,567	41	-2,052	79	-1,652	117	-2,991
4	1,503	42	-2,190	80	-1,503	118	-2,500
5	1,422	43	-2,293	81	-1,667	119	-2,296
6	1,507	44	-2,157	82	-1,503	120	-1,983
7	1,545	45	-2,331	83	-1,786	121	1,246
8	1,517	46	-1,497	84	-1,692	122	1,490
9	1,625	47	-1,499	85	-1,806	123	1,785
10	1,413	48	-1,684	86	-2,436	124	1,819
11	-2,247	49	-1,913	87	-2,529	125	1,899
12	-2,270	50	-1,731	88	-2,407	126	1,749
13	-2,290	51	-1,442	89	-1,997	127	2,009
14	-2,283	52	-1,467	90	-1,760	128	1,691
15	-2,264	53	-1,465	91	1,256	129	1,700
16	-2,075	54	-1,644	92	1,621	130	1,242
17	-1,769	55	-1,806	93	1,612	131	-2,135
18	-1,539	56	-2,429	94	1,686	132	-1,931
19	-1,598	57	-2,109	95	1,823	133	-2,461
20	-1,548	58	-2,486	96	1,910	134	-2,431
21	-1,484	59	-2,589	97	1,719	135	-3,804
22	-1,461	60	-2,037	98	1,874	136	-1,851
23	-1,626	61	1,626	99	1,642	137	-1,928
24	-1,594	62	1,825	100	1,312	138	-1,589
25	-1,626	63	1,639	101	-1,887	139	-1,549
26	-2,172	64	1,743	102	-2,208	140	-1,608
27	-2,547	65	1,831	103	-2,279	141	-1,616
28	-2,539	66	1,791	104	-2,113	142	-1,740
29	-2,423	67	1,868	105	-3,245	143	-1,906
30	-3,150	68	1,662	106	-1,863	144	-1,777
31	1,531	69	1,554	107	-1,863	145	-1,992
32	1,818	70	1,148	108	-1,716	146	-3,958
33	1,697	71	-2,020	109	-1,627	147	-2,119
34	1,822	72	-2,157	110	-1,602	148	-2,283
35	1,759	73	-2,103	111	-1,850	149	-2,471
36	1,705	74	-2,218	112	-1,805	150	-2,206
37	1,769	75	-2,539	113	-1,763	151	1,214
38	1,849	76	-1,582	114	-1,724	152	1,615

Tabela 31 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
153	1,506	202	-1,494	251	-2,152	300	-2,564
154	1,647	203	-1,768	252	-2,446	301	1,075
155	1,617	204	-1,874	253	-2,783	302	1,610
156	1,757	205	-1,942	254	-2,590	303	1,535
157	1,574	206	-2,874	255	-3,282	304	1,613
158	1,761	207	-2,774	256	-1,683	305	1,475
159	1,347	208	-2,927	257	-1,860	306	1,484
160	1,086	209	-2,168	258	-1,821	307	1,467
161	-2,151	210	-2,173	259	-1,337	308	1,302
162	-2,561	211	1,228	260	-1,175	309	1,313
163	-2,853	212	1,370	261	-1,246	310	1,105
164	-2,589	213	1,616	262	-1,401	311	-2,198
165	-3,523	214	1,565	263	-1,674	312	-2,704
166	-1,870	215	1,567	264	-1,928	313	-2,859
167	-1,940	216	1,703	265	-1,824	314	-2,637
168	-1,668	217	1,682	266	-3,450	315	-3,466
169	-1,519	218	1,547	267	-2,700	316	-1,782
170	-1,509	219	1,573	268	-2,944	317	-1,857
171	-1,365	220	1,008	269	-2,699	318	-1,729
172	-1,681	221	-2,105	270	-2,589	319	-1,587
173	-1,717	222	-2,513	271	1,154	320	-1,528
174	-2,000	223	-2,811	272	1,402	321	-1,563
175	-1,840	224	-2,539	273	1,460	322	-1,633
176	-3,008	225	-3,132	274	1,364	323	-1,826
177	-2,353	226	-1,678	275	1,568	324	-1,920
178	-2,421	227	-1,837	276	1,551	325	-2,064
179	-2,655	228	-1,597	277	1,525	326	-3,656
180	-2,483	229	-1,359	278	1,404	327	-2,673
181	1,189	230	-1,268	279	1,295	328	-3,114
182	1,327	231	-1,266	280	0,981	329	-3,560
183	1,608	232	-1,456	281	-2,139	330	-3,431
184	1,570	233	-1,679	282	-2,676	331	0,997
185	1,581	234	-1,765	283	-2,653	332	1,440
186	1,603	235	-1,872	284	-2,790	333	1,560
187	1,447	236	-3,370	285	-3,946	334	1,429
188	1,479	237	-2,527	286	-1,721	335	1,359
189	1,649	238	-2,630	287	-1,868	336	1,331
190	1,268	239	-2,384	288	-1,779	337	1,282
191	-2,017	240	-2,209	289	-1,749	338	1,227
192	-2,420	241	1,114	290	-1,655	339	1,067
193	-2,790	242	1,477	291	-1,377	340	0,919
194	-2,647	243	1,503	292	-1,636	341	-2,128
195	-3,501	244	1,567	293	-1,558	342	-2,986
196	-1,674	245	1,674	294	-1,917	343	-3,113
197	-1,853	246	1,474	295	-1,756	344	-2,720
198	-1,568	247	1,662	296	-3,870	345	-3,316
199	-1,331	248	1,512	297	-2,902	346	-2,006
200	-1,349	249	1,246	298	-3,143	347	-1,832

Tabela 32 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
349	-1,681	398	1,197	447	-3,046	496	-1,947
350	-1,584	399	1,039	448	-3,057	497	-2,315
351	-1,448	400	0,785	449	-3,241	498	-2,265
352	-1,841	401	-3,085	450	-3,113	499	-1,836
353	-1,891	402	-2,846	451	0,817	500	-1,473
354	-1,994	403	-2,689	452	1,099	501	-1,887
355	-1,911	404	-3,595	453	1,022	502	-2,675
356	-4,176	405	-3,365	454	1,204	503	-3,426
357	-2,719	406	-1,985	455	1,059	504	-2,850
358	-2,979	407	-2,123	456	1,142	505	-2,238
359	-2,933	408	-1,704	457	1,066	506	-3,050
360	-2,936	409	-1,609	458	1,028	507	-3,521
361	1,155	410	-1,436	459	0,885	508	-3,181
362	1,200	411	-1,576	460	0,682	509	-3,432
363	1,444	412	-2,062	461	-2,799	510	-3,592
364	1,403	413	-2,245	462	-3,245	511	0,727
365	1,407	414	-2,535	463	-2,517	512	0,835
366	1,339	415	-2,314	464	-3,014	513	1,032
367	1,413	416	-2,798	465	-3,442	514	1,126
368	1,205	417	-3,305	466	-2,112	515	0,965
369	1,180	418	-2,852	467	-1,944	516	1,027
370	0,923	419	-2,865	468	-2,075	517	1,000
371	-2,903	420	-3,564	469	-1,766	518	0,903
372	-2,469	421	0,833	470	-1,446	519	0,865
373	-2,814	422	1,122	471	-1,829	520	-0,514
374	-2,876	423	1,043	472	-2,472	521	-2,258
375	-3,463	424	1,228	473	-2,512	522	-2,919
376	-2,104	425	1,081	474	-2,322	523	-2,583
377	-2,222	426	1,165	475	-2,285	524	-2,619
378	-1,885	427	1,088	476	-2,901	525	-2,960
379	-1,697	428	1,049	477	-2,985	526	-1,869
380	-1,328	429	0,903	478	-2,996	527	-2,222
381	-1,496	430	0,696	479	-3,176	528	-2,174
382	-1,735	431	-2,856	480	-3,051	529	-1,762
383	-2,176	432	-3,311	481	0,758	530	-1,414
384	-2,150	433	-2,569	482	0,870	531	-1,811
385	-2,061	434	-3,075	483	1,075	532	-2,568
386	-2,790	435	-3,512	484	1,173	533	-3,289
387	-2,676	436	-2,155	485	1,005	534	-2,736
388	-3,640	437	-1,984	486	1,070	535	-2,149
389	-3,833	438	-2,118	487	1,041	536	-2,928
390	-2,716	439	-1,802	488	0,940	537	-3,381
391	1,176	440	-1,476	489	0,902	538	-3,053
392	1,153	441	-1,866	490	-0,536	539	-3,294
393	1,201	442	-2,523	491	-2,352	540	-3,448
394	1,215	443	-2,563	492	-3,041	541	0,678
395	1,231	444	-2,369	493	-2,690	542	1,021
396	1,386	445	-2,332	494	-2,728	543	1,247

Tabela 33 - Coeficientes de pressão encontrados na estrutura através do CFD.

Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp	Ponto	Cp
545	1,479	559	-2,179	573	1,160	587	-1,978
546	1,327	560	-1,663	574	1,129	588	-1,992
547	1,292	561	-1,573	575	1,375	589	-2,026
548	1,360	562	-2,344	576	1,235	590	-1,546
549	1,085	563	-3,052	577	1,201	591	-1,463
550	0,735	564	-2,825	578	1,265	592	-2,180
551	-2,939	565	-2,410	579	1,009	593	-2,839
552	-3,380	566	-2,962	580	0,684	594	-2,627
553	-2,981	567	-2,998	581	-2,733	595	-2,242
554	-2,594	568	-3,123	582	-3,143	596	-2,755
555	-2,939	569	-4,447	583	-2,772	597	-2,788
556	-2,353	570	-3,227	584	-2,412	598	-2,904
557	-2,127	571	0,631	585	-2,733	599	-4,135
558	-2,141	572	0,950	586	-2,189	600	-3,001

APÊNDICE F - APLICAÇÃO DAS CARGAS DE VENTO SOBRE A ESTRUTURA

Conforme apresentado na Figura 78, as cargas de vento longitudinais e transversais são aplicadas simultaneamente ao modelo numérico com auxílio do programa ANSYS (2020). Apesar dessas cargas de vento serem geradas de acordo com cada método apresentado nesse trabalho (com intensidade e sentido diferentes ao longo do tempo), as mesmas foram aplicadas de forma semelhante a fim de realizar uma comparação equitativa (entre os métodos analisados) tanto para os deslocamentos quanto para as acelerações. Também é necessário enfatizar que essa forma para a aplicação das cargas de vento foi utilizado para a realização da análise estática assim como para a realização da análise dinâmica.

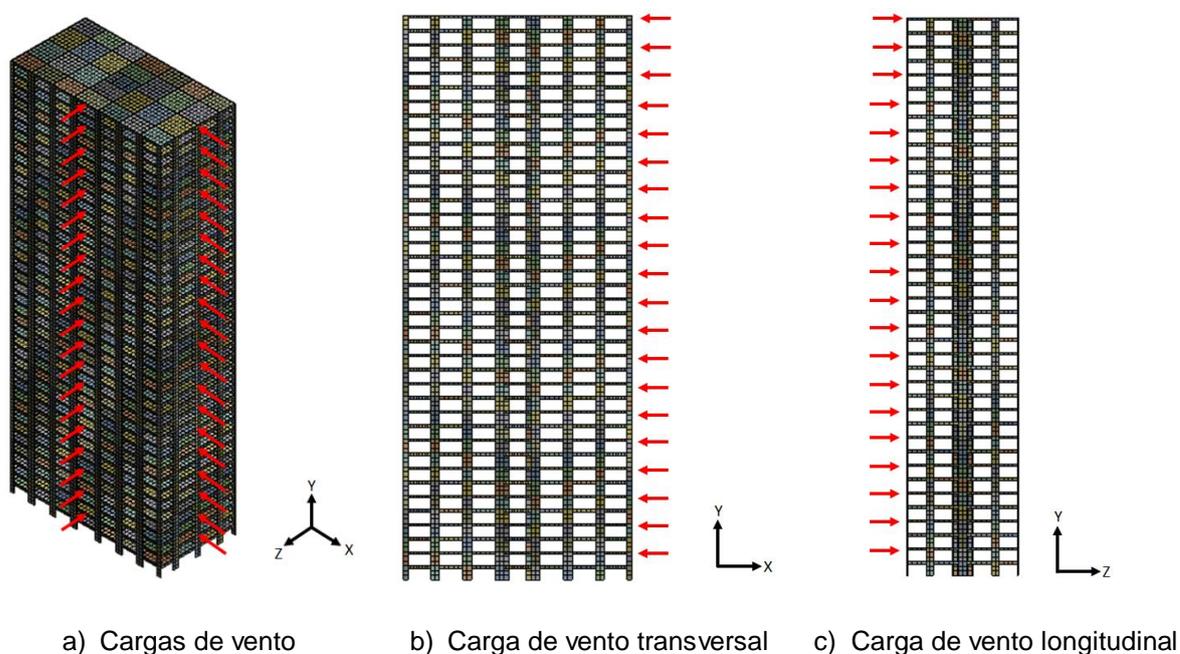


Figura 78 - Aplicação das cargas de vento no sentido 0°.

Vale enfatizar que cada ponto de aplicação da carga de vento (veja a Figura 24) possui uma área de 45m^2 . Essa informação é fundamental uma vez que a pressão exercida pelo vento sobre a estrutura é determinada pela Equação (4). A altura de 7,5m equivale a altura de 2 pavimentos.

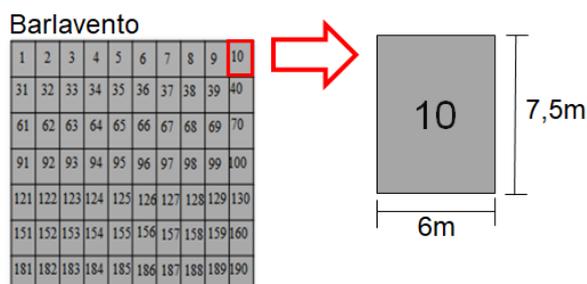


Figura 79 - Unidade de área para aplicação das cargas de vento.

A forma de aplicação das cargas de vento estabelecida nesse trabalho de pesquisa é o somatório das cargas encontradas na mesma cota e face da estrutura e aplicada de forma concentrada na parte superior central dessa mesma cota. Essa forma aplicação das cargas de vento somente é possível devido a perfeita simetria da estrutura tanto no eixo Z quanto no eixo X. Veja a Figura 80.

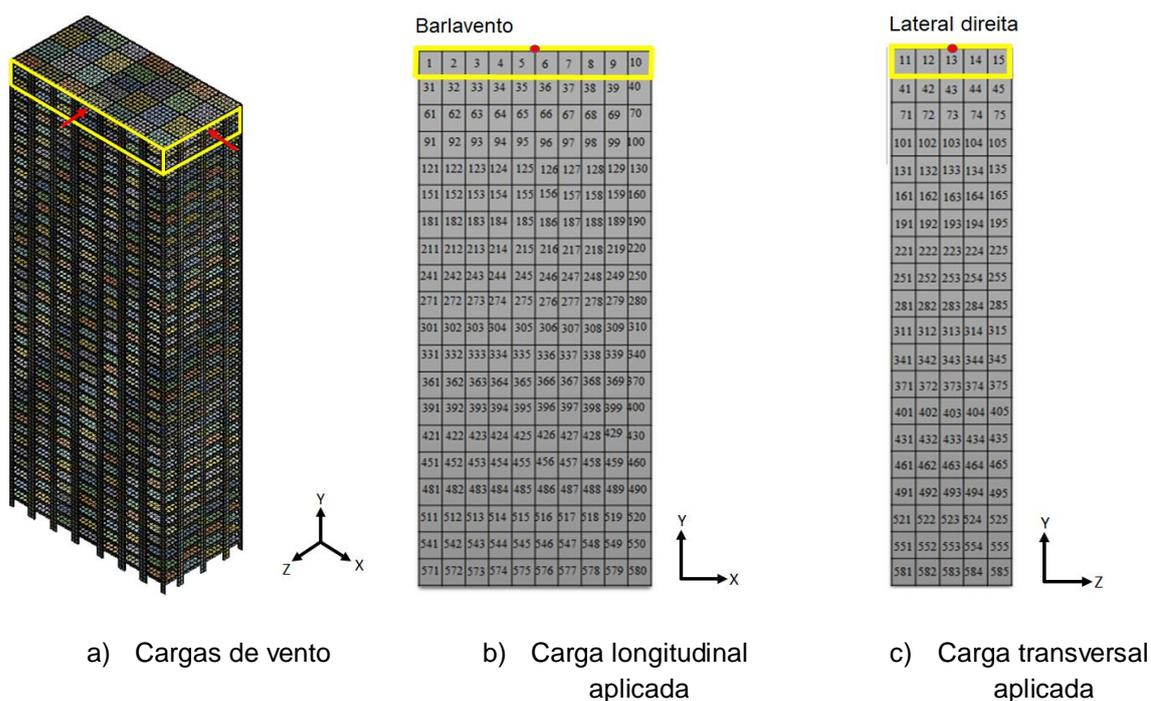


Figura 80 - Aplicação da cargas de vento concentradas.

As cargas de vento longitudinais são geradas a partir da combinação entre as forças de pressão e sucção no eixo Z. Uma vez que o vento atinge o Barlavento, um vortice é criado no Sotavento, criando assim uma força de sucção (veja a Figura 66). Convencionou-se nesse trabalho de pesquisa que as forças de pressão possuem

valor positivo e as forças de sucção valor negativo. Dessa forma, a carga de vento aplicada no Barlavento é calculada através da Equação (33).

$$F_{\text{long } k} = \sum_{i=1}^{i=i+10} F_{\text{bar } i} - \sum_{j=16}^{j=j+10} F_{\text{sot } j} \quad (33)$$

Onde:

$F_{\text{long } k}$ - vetor de força longitudinal;

$F_{\text{bar } i}$ - vetor de força do barlavento;

$F_{\text{sot } j}$ - vetor de força do sotavento;

No caso das cargas de vento longitudinas, o Barlavento sempre terá cargas positivas (pressão) e o Sotavento, sempre terá cargas negativas (sucção). Todavia, o mesmo não acontece quando se trata de cargas de vento transversais.

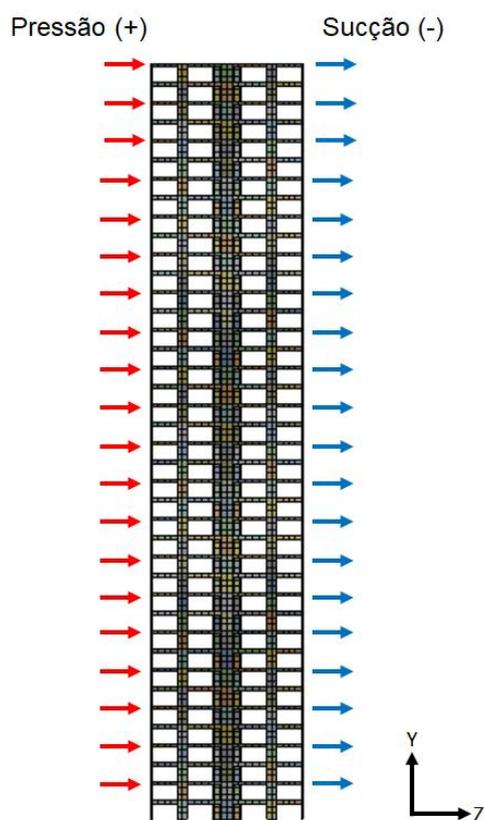


Figura 81 - Força longitudinal.

As cargas de vento transversais são geradas a partir da diferença entre as forças laterais direita e as forças laterais esquerda. Uma vez que o presente trabalho de pesquisa considerou apenas o vento da direção 0°, o escoamento do ar pelas laterais do edifício gera vortices de sentido e intensidade diferentes no domínio do tempo (veja a Figura 66). Isto significa que as forças aplicadas na lateral direita bem como as forças aplicadas na lateral esquerda da estrutura, a cada intervalo de tempo, apresenta uma força positiva (pressão) ou uma força negativa (sucção). Dessa forma, a carga de vento transversal aplicada na lateral direita é calculada através da Equação (34).

$$F_{\text{trans } k} = \sum_{i=11}^{i=i+15} F_{\text{ldir } i} - \sum_{j=26}^{j=j+30} F_{\text{lesq } j} \quad (34)$$

Onde:

$F_{\text{trans } k}$ - vetor de força transversal;

$F_{\text{ldir } i}$ - vetor de força da lateral direita;

$F_{\text{lesq } j}$ - vetor de força da lateral esquerda;

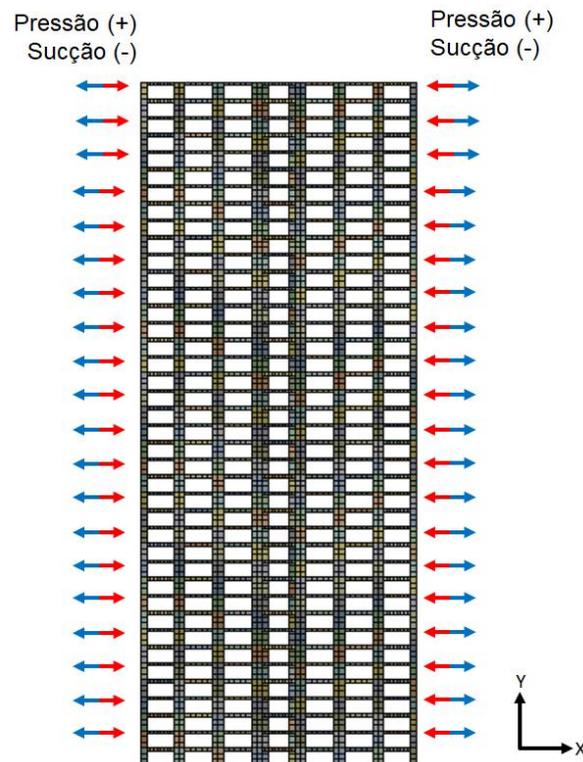


Figura 82 - Força transversal.