# UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

# LUCAS WILLIAN AGUIAR MATTIAS

# ANÁLISE DINÂMICA DE EDIFÍCIO DE SEÇÃO H SOB AÇÃO DO VENTO

DISSERTAÇÃO

CURITIBA 2021

# LUCAS WILLIAN AGUIAR MATTIAS

# ANÁLISE DINÂMICA DE EDIFÍCIO DE SEÇÃO H SOB AÇÃO DO VENTO

## DYNAMICS ANALYSIS OF AN H-SHAPE TALL BUILDING ON WIND ACTION

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em engenharia civil, do Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho

CURITIBA 2021



Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, desde que atribuam ao autor o devido crédito. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.



Ministério da Educação Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Curitiba



# FOLHA DE APROVAÇÃO

# LUCAS WILLIAN AGUIAR MATTIAS

# ANÁLISE DINÂMICA DE EDIFÍCIO DE SEÇÃO H SOB AÇÃO DO VENTO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 29 de Abril de 2021

Prof Joao Elias Abdalla Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Rafael Holdorf Lopez, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Prof.a Renata Sa Brito Stramandinoli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Roberto Carlos Moro Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

Documento gerado pelo sistema acadêmico da UTFPR a partir dos dados da ata de defesa em 29/04/2021.

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu pai, Irineu, minha mãe, Marlene, e meus irmãos, Luana e Luann.

#### AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado, protegendo e iluminando meus caminhos, por ser fonte de sabedoria e saúde e pelas constantes bençãos concedidas.

Agradeço ao meu pai Irineu e minha mãe Marlene pelo constante apoio dado às minhas jornadas, por todo carinho e amor e por suportar saudade causada pela distância e minhas ausências. Aos meus irmãos Luann e Luana e aos demais familiares (tios, primos, avós, padrinhos...) por acreditarem e me apoiarem em meus objetivos.

Agradeço aos meus inúmeros amigos que torcer pelo meu sucesso e ajudamme dentro do possível. Cita-se os companheiros de mestrado na UTFPR Leilson, Gustavo e Lucas; e em outras instituições Ilames, Guilherme, Ícaro, João Marcos e Rafael, Ray; Aos demais aqui não listados, mas que fazem parte e estão comigo, que são o suporte no dia a dia e representam a verdadeira amizade.

Agradeço ao meu orientador João Elias por ter aceitado este desafio de conduzir-me no processo de estudo, pesquisa e elaboração desta dissertação.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES por apoiar e fomentar esta pesquisa no período de março/2019 a janeiro/2020.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas?"

Isaac Newton

#### RESUMO

MATTIAS, Lucas Willian Aguiar. **Análise dinâmica de edifício de seção h sob ação do vento**. 2021. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A verticalização dos grandes centros urbanos é uma tendência arquitetônica e necessidade, visto a escassez de terrenos e o seu alto custo. Enquanto edifícios baixos e pesados não sofrem com os efeitos dinâmicos do vento, edifícios altos, leves e esbeltos enfrentam essa dificuldade. Desta forma, surge a necessidade de aplicação de métodos mais precisos na determinação do carregamento devido ao vento e também na análise dinâmica da estrutura. Neste trabalho analisa-se um edifício alto de secão H. Este tipo de geometria é utilizado por questões arquitetônicas para atender a critérios de ventilação, iluminação e, por vezes, para atender aos coeficientes de aproveitamento e taxa de ocupação. Os códigos normativos normalmente adotam geometrias regulares para a determinação da carga do vento, surgindo assim a necessidade de se buscar meios mais confiáveis, como o ensaio de modelo reduzido em túnel de vento. Neste trabalho, realiza-se o ensaio em modelo computacional por meio de Computational Fluid Dynamics (CFD), validando os resultados comparativamente com dados obtidos em túnel de vento. A carga dinâmica do vento é aplicada pelo método do vento sintético. Determinar a carga do vento é uma etapa do problema, visto que também é necessário a determinação da resposta da estrutura por meio de uma análise dinâmica e entender quais os efeitos que a simplificação da obtenção do carregamento gera no edifício. A análise da estrutura é realizada por meio de elementos finitos e do método Hilber-Hughes-Taylor (HHT) com duração de 30s. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento dinâmico do edifício com seção do tipo H pela ação do vento. Este trabalho apresenta importante contribuição no campo da análise dinâmica, destacando como ocorre as amplificações de deslocamentos e o comportamento da função resposta da estrutura. Para a análise estrutural com incidência de vento a 0º houve redução das respostas, destacando-se os deslocamentos frontais que reduziram 32%. Para 45°, os deslocamentos no topo tiveram uma redução na ordem de 25% na seção H. O caso crítico da análise foi para incidência a 90°, onde os deslocamentos frontais sofreram aumento de aproximadamente 15%, que pode levar a subdimensionamento e consequente a um possível colapso da estrutura.

**Palavras-chave:** Edifício de seção H. Carga do evento. Análise dinâmica estrutural; Método do Vento Sintético. Análise de edifícios altos.

## ABSTRACT

MATTIAS, Lucas Willian Aguiar. **Dynamics analysis of an h-shape tall building on wind action**. 2021. 129 p. Dissertation (Master Degree in civil engineering) – Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2021.

The verticalization of large urban centers is an architectural trend and a necessity, given the scarcity of land and its high cost. While low and heavy buildings do not suffer from the dynamic effects of the wind, tall, light and slender buildings face this difficulty. Thus, there is a need to apply more precise methods in determining the load due to the wind and also in the dynamic analysis of the structure. This work analyzes a tall building of H-shape. This type of geometry is used for architectural reasons to meet the criteria of ventilation, lighting and, sometimes, to meet the utilization coefficients and occupancy rate. Normative standards usually adopt regular geometries for determining the wind load, thus arises the need to seek more reliable means, such as the reduced model test in a wind tunnel. In this work, the computational model test was performed using Computational Fluid Dynamics (CFD), validating the results in comparison with data obtained in a wind tunnel. Dynamic wind load is applied by the Synthetic Wind Method. Determining the wind load is only one step in the problem, since it is also necessary to determine the structure's response by means of a dynamic analysis and understand what effects the simplification of obtaining the load generates on the building. The structure analysis is performed using Finite Elements Method and the Hilber-Hughes-Taylor (HHT) Method lasting 30s. Thus, the objective of this paper is to evaluate the dynamic behavior of the building with type H-shape by the action of the wind. This work presents an important contribution in the field of dynamic analysis. highlighting how displacement amplifications occur and the behavior of the structure response function. For the structural analysis with incidence of wind at 0° there was a reduction in the responses, highlighting the frontal displacements that reduced 32%. At 45°, the displacements at the top had a reduction in the order of 25% in the H-shape. The critical case of the analysis was for incidence at 90°, where the frontal displacements suffered an increase of approximately 15%, which can lead to underdimensioning and consequent to a possible collapse of the structure.

**Keywords:** H-shaped building. Wind load. Dynamic Structural Analysis. Synthetic Wind Method. Tall Building Analysis.

# **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Edifícios do tipo "H"	16
Figura 2 – Elemento de barra com dois nós e dois graus de liberdade	20
Figura 3 – Elemento finito de casca triangular com três nós	24
Figura 4 – Formulação do elemento de casca	25
Figura 5 – Estrutura idealizada com 1 grau de liberdade	27
Figura 6 – Considerações do Método de Newmark	29
Figura 7 – Tipos de elementos aplicados em geometria 3D	34
Figura 8 – Gráficos do espectro de potência	37
Figura 9 – Rajadas equivalentes	41
Figura 10 – Escoamento em torno de corpos aerodinâmicos e rombudos	45
Figura 11 – Afunilamento geométrico que ocasiona o efeito Venturi	46
Figura 12 – Esquema de geração de momento torsor por distribuição assimétrica	/17
Figura 13 – Fator de magnificação dinâmica	. 48
Figura 14 – Espectro de potência do estudo de Wong e Lam (2013)	51
Figura 15 – Eluxo de desenvolvimento do estudo	56
Figura 16 – Planta do pavimento tipo	
Figura 17– Perspectiva do edifício	58
Figura 18 – Modelo estrutural com malha de elementos finitos	60
Figura 19 – Malha discretizada na simulação em CFD	63
Figura 20 – Comparativo de resultados entre túnel de vento e CFD	64
Figura 21 – Representação dos modos de vibração 1 e 2	67
Figura 22 – Representação dos modos de vibração 3 e 4	68
Figura 23 – Representação dos modos de vibração 5 e 6	68
Figura 24 – Representação dos modos de vibração 7 e 8	69
Figura 25 – Representação dos modos de vibração 9 e 10	69
Figura 26 – Representação dos modos de vibração 11 e 12	70
Figura 27 – Convenção do ângulo de incidência	71
Figura 28 – Pressão estática na face frontal ao vento	72
Figura 29 – Pressão estática na face lateral	73
Figura 30 – Pressão estática na face posterior (sotavento)	73
Figura 31 – Pressão estática na face frontal ao vento	74
Figura 32 – Pressão estática na face frontal da cavidade recuada	75
Figura 33 – Pressão estática na face lateral da cavidade a barlavento	75
Figura 34 – Pressão estática na face lateral	.76
Figura 35 – Pressão estática na face posterior (sotavento)	.76
Figura 36 – Pressão estática na face posterior na cavidade recuada (sotavento)	77
Figura 37– Pressão estática na face lateral da cavidade recuada a sotavento	77
Figura 38 – Pressão estática nas faces frontais	79

Figura 39 – Pressão estática nas faces posteriores	79
Figura 40 – Pressão estática nas faces frontais	80
Figura 41 – Pressão estática nas faces posteriores	81
Figura 42– Pressão estática na face frontal	82
Figura 43– Pressão estática na face lateral	82
Figura 44– Pressão estática na face lateral nos fundos da cavidade recuada	83
Figura 45– Pressão estática na face posterior (sotavento)	83
Figura 46 – Esquema geral: edificação de interesse com edificações vizinhas.	114
Figura 47 – Coeficiente de Arrasto para edificações com planta retangular em de baixa turbulência	região 115
Figura 48– Coeficiente de Arrasto para edificações com planta retangular em r de alta turbulência	egião 116
Figura 49 – Isopletas da velocidade básica do vento (m/s)	117
Figura 50 – Fator topográfico em função da inclinação do talude	118
Figura 51 – Parâmetros meteorológicos para diferentes categorias e classes d terreno	e 119
Figura 52 – Esquema para modelo dinâmico discreto	122
Figura 53 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria I	124
Figura 54 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria II.	124
Figura 55 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria III	125
Figura 56 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria IV	125
Figura 57 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria V.	126

# LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil de deflexão da velocidade do vento	.61
Gráfico 2 – Parcela flutuante da carga do vento para 600s	.61
Gráfico 3 – Perfil de deflexão da velocidade do vento para o estudo de validação	.64
Gráfico 4 – Gráfico de convergência das iterações em CFD	.72
Gráfico 5 – Gráfico de convergência das iterações em CFD	.74
Gráfico 6 – Gráfico de convergência das iterações em CFD	.78
Gráfico 7 – Gráfico de convergência das iterações em CFD	.80
Gráfico 8 – Gráfico de convergência das iterações em CFD	.81
Gráfico 9 – Deslocamentos no topo do edifício para H0	.84
Gráfico 10 – Acelerações no topo do edifício para H0	.85
Gráfico 11 – Rotações em torno do eixo Z para H0	.86
Gráfico 12 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez	.86
Gráfico 13 – Deslocamentos no topo do edifício para R0	.87
Gráfico 14 – Acelerações no topo do edifício para R0	.88
Gráfico 15 – Rotações em torno do eixo Z para R0	.88
Gráfico 16 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez	.89
Gráfico 17 – Respostas máximas da estrutura para vento em 0º	.90
Gráfico 18 – Deslocamentos no topo do edifício para H45	.91
Gráfico 19 – Acelerações no topo do edifício para H45	.92
Gráfico 20 – Rotações em torno do eixo Z para H45	.92
Gráfico 21 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez	.93
Gráfico 22 – Deslocamentos no topo do edifício para R45	.93
Gráfico 23 – Acelerações no topo do edifício para R45	.94
Gráfico 24 – Rotações em torno do eixo Z para R45	.95
Gráfico 25 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez	.95
Gráfico 26 – Respostas máximas da estrutura para vento em 45º	.96
Gráfico 27 – Deslocamentos no topo do edifício para H90	.97
Gráfico 28 – Acelerações no topo do edifício para H90	.98
Gráfico 29 – Rotações em torno do eixo Z para H90	.98
Gráfico 30 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez	.99
Gráfico 31 – Deslocamentos no topo do edifício para R90	.99
Gráfico 32 – Acelerações no topo do edifício para R901	100
Gráfico 33 – Rotações em torno do eixo Z para R901	101
Gráfico 34 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez1	101
Gráfico 35 – Respostas máximas da estrutura para vento em 90º1	102
Gráfico 36 – Deslocamentos para todos os casos1	103

# LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

А	Área
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a1	coeficientes dos polinômios para elementos do MEF
a2	coeficientes dos polinômios para elementos do MEF
	parâmetro meteorológico referente à categoria de rugosidade do
b	terreno e à classe da edificação
Bmax	dimensão máxima em planta
С	coeficiente de amortecimento
Ca	Coeficiente de Arrasto
CFD	Fluido Dinâmica Computacional
Cij	coeficientes dos polinômios para elementos do MEF
	fator encontrado pela integração do espectro de potência nos intervalos
Ck	de frequência dos harmônicos m
coh≞(d,t)	Correlação espacial das velocidades
Ср	Coeficiente de pressão do vento
Cr	coeficientes de redução das pressões flutuantes
Cr	amortecimento crítico
CST	Constant Strain Triangle
Cz, Cy	coeficientes de decaimento exponencial
DKT	Discrete Kirchhoff Theory
d	deslocamento
D	Matriz constitutiva
f	frequência das rajadas
F	Forço no MEF
Fa	Força de Arrasto
FH	Coeficiente de força horizontal
Fr	fator de rajada
Gc	centro de rajada
h	altura total da edificação
HFFB	high-frequency force balance
K	Harmônico em questão
K	Rigidez
k	energia cinética turbulenta
m	número de harmônicos
m	Massa
MEF	Método dos Elementos Finitos
Mz	momento torsor médio
Ν	funções interpoladoras ou funções de forma para MEF
NBCC	National Building Code of Canada
р	expoente da lei potencial de variação de S2
р	pressão termodinâmica
p(t)	carregamento externo

p'(t)	componente flutuante do carregamento do vento
q	Pressão do vento
q	Pressão do vento
q0	valor da pressão dinâmica do vento
qf	pressão gerada pelo vento
qn (t)	função harmônica do sistema
R	Harmônico ressonante
rk	relação entre o harmônico K e o harmônico ressonante R
S(f)	Espectro de potência do vento
S1	Fator topográfico
S2	Fator de rugosidade
S3	Fator estatístico
t	tempo
Tn	Período natural
Tr	período fundamental da estrutura
U	Energia interna de deformação
u(x)	deslocamento ao longo do eixo x no MEF
U2	velocidade de fricção ou velocidade de cisalhamento
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V	componente do vetor velocidade segundo a direção i
V0	Velocidade básica do vento
Vk	Velocidade característica do vento
Vp	velocidade média de projeto
W	Trabalho externo
Х	força volumétrica
X(f)	Frequência adimensional
Z	altura medida a partir da superfície do terreno
Z	altura da coordenada
z1, z2,	
y1, y2	coordenadas de dois pontos da face da estrutura atingida pelo vento
Zg	contorno superior da camada atmosférica

# LISTA DE LETRAS GREGAS

γ	expoente da forma modal
Δz	variação de altura
ζ	razão de amortecimento crítico
θk	ângulo de fase gerado aleatoriamente
ρ	Massa específica do ar
ψ1	relação entre massa da coordenada i e a massa de referência
ω	frequência
ωn	frequência natural
Ai	Área de influência correspondente à coordenada i.
Mi	Massa discreta correspondente à coordenada i.
Xi	Deslocamento correspondente à coordenada i.
Zi	Altura do elemento i sobre o nível do terreno.
n	Número de graus de liberdade
β	coeficiente que depende do coeficiente de arrasto, da relação entre a área de incidência do vento e a área de referência do pavimento e a altura da coordenada em questão
ξ	coeficiente de amplificação dinâmica
ε	deformação
Пе	Energia potencial
Δt	Intervalo de tempo
γ	Coeficiente do Método de Newmark
β	Coeficiente do Método de Newmark
$\phi_n$	função de forma
μ	viscosidade dinâmica
$\delta_{ij}$	delta de Kroneker
λ	viscosidade
ε	taxa de dissipação de turbulência
С.,	constante obtida de dados experimentais

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	19
2.2 ANÁLISE DINÂMICA	26
2.3 MECÂNICA DOS FLUÍDOS E SIMULAÇÃO NÚMERICA COMPUTACIONAI	_ 32
2.4 MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO	36
2.5 EFEITOS DINÂMICOS EM EDIFÍCIOS ALTOS	43
2.6 TORÇÃO CAUSADA PELO VENTO	46
2.7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49
3 METODOLOGIA	56
3.1 MODELAGEM DA ESTRUTURA	57
3.2 SIMULAÇÃOAERODINÂMICA	60
3.3 VALIDAÇÃO DO CFD COM RESULTADOS EM TÚNEL DE VENTO	63
3.4 ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA EM ELEMENTOS FINITOS	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 ANALISE AERODINÂMICA	71
4.1.1 Seção retangular	71
4.1.2 Seção H com vento a 0º	74
4.1.3 Seção retangular com vento a 45º	78
4.1.4 Seção H com vento a 45º	80
4.1.5 Seção H com vento a 90º	81
4.2 ANALISE DINAMICA	83
4.2.1 Incidência de vento a 0º	83
4.2.2 Incidência de vento a 45º	91
4.2.3 Incidência de vento a 90º	96
4.2.4 Análise comparativa geral	103
5 CONCLUSAO	105
	107
APENDICE	113

# SUMÁRIO

## 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No século XXI a concentração da população nos centros urbanos, o alto custo dos terrenos e espaços cada vez mais escassos fizeram com que a construção civil investe cada vez mais na verticalização dos edifícios. "Dentro de um contexto global de forte crescimento da população urbana, com a valorização de imóveis e a elevação do custo do metro quadrado nos centros de grandes cidades, observa-se uma tendência de verticalização e agrupamento das edificações nestes centros" (VOGADO, 2018). "Dessa maneira a valorização imobiliária faz com que as edificações sofram uma verticalização, maximizando o potencial construtivo dessas áreas centrais e minimizando o custo dos espaços urbanos." (SANTOS, 2018).

O homem sempre almejou alcançar alturas elevadas. Ao longo dos séculos foram sendo construídos edifícios cada vez mais altos e imponentes para promover as cidades, a cultura e como uma forma de demonstração de poder econômico e tecnológico (SCHARNBERG, 2018). Registros datam de 1880 a primeira geração de aranha-céus, com 12 andares em Chicago – Estados Unidos. É previsto para se inaugurar em Gidá, na Arábia Saudita, a Jeddah Tower, um arranha-céu com mais de 1000 metros de altura.

O vento não é considerado um problema em edificações baixas e pesadas de paredes espessas, nas quais o carregamento vertical é predominante. Porém, na medida em que as edificações foram se tornando mais leves e esbeltas, o vento passou a ter grande importância, originando carregamentos horizontais que muitas vezes produzem as principais solicitações da estrutura. Desta maneira, as características mecânicas da estrutura, como a rigidez, o fator de amortecimento, as frequências naturais e a massa tornaram-se imprescindíveis para a determinação da resposta e do dimensionamento (BLESSMANN, 2001).

Segundo Vogado (2018), os códigos normativos, em geral, fornecem apenas instruções para o cálculo de estruturas com formatos regulares e simétrico. Na prática dos projetos usuais, no entanto, tem se observado arquiteturas cada vez mais diferenciadas e não convencionais, seja pela otimização do espaço ou pela demanda de padrões estéticos mais atrativos.

Nesse contexto, aborda-se os edifícios com geometria da planta em "H", como no exemplo da Figura 1. Este tipo de geometria é utilizado por questões arquitetônicas para atender a critérios de ventilação, iluminação e, por vezes, para atender aos coeficientes de aproveitamento e taxa de ocupação.



Figura 1 – Edifícios do tipo "H"

Fonte: Google Maps

A Figura 1 apresenta 4 edifícios com seção H, situados na Rua Dep. Heitor Alencar Furtado, próximo da UTFPR, em Curitiba. Essa Figura ilustra o tipo de edifício trabalhado nesta dissertação.

Conforme Vieira (2016), caso a edificação apresente uma geometria mais complexa ou grande altura, torna-se necessário a procura por informações mais precisas a respeito de seu comportamento estrutural frente as ações do vento. Tais informações podem ser obtidas através de realização de ensaios em modelos reduzidos em túnel de vento ou por simulação computacional. Ressalva ainda que neste caso os resultados necessitariam de validação através de experimentos, devido ao comportamento complexo do escoamento do vento turbulento.

#### **1.2 JUSTIFICATIVA**

Para justificar a temática em estudo neste trabalho, aborda-se alguns pontos importantes: variações geométricas influenciam na carga aerodinâmica do vento;

métodos padronizados trabalham com geometrias regulares; o carregamento dinâmico pode gerar amplificações no deslocamento quando comparado com o carregamento estático.

Os coeficientes aerodinâmicos e o comportamento da construção para seções H vêm sendo estudados desde 2009 [Lam (2009) e (2013)] que constataram pontos importantes nessa linha de estudo. Um dos pontos abordados é o momento de torção que o vento gera no edifício, resultando em valores maiores que em seções sem as cavidades recuadas.

Lam (2009) estudou os efeitos aerodinâmicos em edifícios de seção H em 9 casos variando as proporções das cavidades recuadas por meio de túnel de vento, verificando que resultam em níveis maiores de flutuações de torção em todos os ângulos de vento.

Autores como Miguel (2003), Lavor (2017), Vogado (2018) e Liang *et al.* (1997) demonstram a importância de se ter um estudo mais aprofundado no comportamento que as rajadas de vento têm ao atingiram a edificação para as variadas formas geométricas, o consequente carregamento e os efeitos dinâmicos gerados e sua influência nos deslocamentos que a edificação sofre.

Com isso, mostra-se a importância do estudo dos efeitos dinâmicos nos edifícios altos, assim como que a variação geométrica apresenta influência que torna relevante o estudo da resposta dinâmica em edifícios de seção H.

Considerando que as normas técnicas se limitam a padrões arquitetônicos regulares e considerando a escassez de informações sobre a seção H, justifica-se a necessidade de melhor compreender o comportamento aerodinâmico e a resposta dinâmica desse modelo de edifício por meio de estudos específicos.

#### **1.3 OBJETIVOS**

#### Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é avaliar computacionalmente o comportamento dinâmico de edifício com seção do tipo "H" pela ação dinâmica do vento.

## Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar a análise dos efeitos das cavidades recuadas na pressão causada pelo vento;
- Estudar o sistema com variação do fluxo de vento para 0°, 45° e 90°;
- Analisar a resposta dinâmica por meio das amplitudes máximas de deslocamentos, acelerações e rotações;
- Analisar os esforços no núcleo de rigidez;
- Fazer um estudo comparativo dos efeitos da carga do vento entre seção "H" e seção retangular.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O matemático Richard Courant publicou em 1943 um trabalho sobre o problema de torsão de *Saint-Venant* que é considerado até hoje como um dos pioneiros do método dos elementos finitos, o qual dependeu da evolução da computação científica para ser mais difundido. Na década de 1950 dois trabalhos quase simultâneos e independentes deram projeção ao método, os trabalhos foram desenvolvidos pelo *Imperial College* em Londres e por engenheiros da Boeing. Em 1967 Zienkiewicz publicou o livro que se tornou referência no estudo desse método. (VAZ, 2011)

O Método dos Elementos Finitos é, segundo Cook *et al.* (2001), um método para resolução de problemas de campo. Um problema de campo requer que seja determinado a distribuição espacial de uma ou mais variáveis dependentes. Matematicamente, um problema de campo pode ser expresso por meio de equações diferenciais ou por expressões integrais.

Neste método, um problema de estrutura contínua é discretizado em uma malha formada pela união de elementos determinados e calcula-se o estado de tensão-deformação para os nós dos quais se distribui pelo elemento por meio de funções interpoladoras. Condições de contorno, carregamentos e propriedades do material é representado matematicamente pela malha. A solução é aproximada e apresenta tendência de convergência ou estabilização à solução exata.

A solução para problemas da mecânica dos sólidos pode ser dada pela Equação 1.

$$F = K * d \tag{Eq. 1}$$

Onde:

F = Força;

K = rigidez;

d = deslocamento.

#### Funções interpoladoras ou funções de forma (matriz [N])

Considerando um elemento unidirecional de dois nós e um grau de liberdade por nó, conforme a Figura 2.





Fonte: Azevedo (2003)

Os deslocamentos ocorrem apenas ao longo do eixo x e a função que descreve esse comportamento pode ser apresentada como:

$$u(x) = \frac{a_1 + a_2}{2} + \frac{(a_2 - a_1)x}{2}$$
 (Eq. 2)

Onde:

$$u(x) = \frac{u(-1) = a_1}{u(+1) = a_2}$$
 (Eq. 3)

Colocando  $a_1$  e  $a_2$  em evidência na Equação 2, chega-se a uma soma de produtos de funções lineares de x pelos deslocamentos nodais  $a_1$  e  $a_2$  dada pela Equação 4:

$$u(x) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}x\right)a_1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}x\right)a_2$$
 (Eq. 4)

Escrevendo de forma matricial tem-se:

$$u(x) = \left[ \begin{pmatrix} \frac{1}{2} - \frac{1}{2}x \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \frac{1}{2} + \frac{1}{2}x \end{pmatrix} \right] \begin{bmatrix} a_1\\a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(x) & N_2(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1\\a_2 \end{bmatrix}$$
(Eq. 5)

As funções  $N_1$  e  $N_2$  são chamadas de funções interpoladoras ou funções de forma e têm como principal característica representar valor unitário para o nó correspondente e nulo para os demais.

Considerando que a barra tenha comprimento L:

$$u(x) = \left[ \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{L} x \right) \quad \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{L} x \right) \right] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1(x) & N_2(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$
(Eq. 6)

A partir da Eq. 6 conclui-se que:

$$\left[N_{1}(x) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{L}x\right) \quad N_{2}(x)\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{L}x\right)\right]$$
(Eq. 7)

#### Matriz [B]

O campo de deformações na barra é dado pela derivada dos deslocamentos.

$$\varepsilon = \frac{d}{dx}u(x) = \frac{d}{dx}[N_1(x)a_1 + N_2(x)_1a_2]$$
 (Eq. 8)

Aplicando o operador diferencial às funções interpoladoras, tem-se:

$$\varepsilon = \left[\frac{dN_1}{dx} \quad \frac{dN_2}{dx}\right] \begin{bmatrix} a_1\\a_2 \end{bmatrix} = [B]\{a\}$$
(Eq. 9)

Desta forma, conclui-se que a matriz [B] é obtida pelo produto do operador diferencial do elemento pela matriz [N] das funções interpoladoras. Para o elemento unidirecional de dois nós com dois graus de liberdade e comprimento L:

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix}$$
(Eq. 10)

O cálculo da deformação deste elemento é dado pela Equação 11.

$$\varepsilon = [B]\{a\} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \frac{a_2 - a_1}{L} = \frac{\Delta L}{L}$$
 (Eq. 11)

Percebe-se que o campo de deformações corresponde ao que se considera usualmente para uma barra sujeita a um esforço axial.

#### Energia potencial e matriz de rigidez [k]

Cook *et al.* (2001) apresenta um procedimento geral e sistemático para a produção de aproximações por elementos finitos usando o método de Rayleigh-Ritz que requer apenas que um funcional esteja disponível. Segundo Cook *et al.* (2001), um funcional é uma expressão integral que contém implicitamente as equações diferenciais governantes para um problema particular.

"O princípio da mínima energia potencial total enuncia que os deslocamentos d de uma estrutura em equilíbrio estável tornam mínima a energia potencial total da estrutura" (VAZ, 2011). Ou seja, há um equilíbrio estável se o modo em que a estrutura se deformou gastou o mínimo de energia potencial total. Matematicamente é dito que a derivada da energia potencial em relação ao deslocamento é nula.

> "Considere-se um corpo sujeito a um conjunto de forças de volume e de superfície que lhe provocam uma deformação. Com base no seu estado de equilíbrio estático, a configuração do corpo é modificada por um conjunto de deslocamentos muito pequenos e compatíveis com as condições fronteira, que se designam deslocamentos virtuais. O princípio dos trabalhos virtuais ou princípio dos deslocamentos virtuais estabelece que o trabalho realizado pelas tensões internas na deformação virtual do corpo é igual ao trabalho realizado pelas forças exteriores nos deslocamentos virtuais dos seus pontos de aplicação" (AZEVEDO, 2003).

A energia potencial  $\Pi_e$  da estrutura é dada pela diferença entre a energia interna U de deformação e o trabalho externo W realizado.

$$\Pi_{e} = U - W = \frac{1}{2} \int \{\varepsilon\}^{T} \{\sigma\} dV - \int \{u\}^{T} \{p\} dL$$
 (Eq. 12)

Onde dV = hdA e os seguintes termos têm estas equivalências:

- $\varepsilon = [B]a$
- $\varepsilon^T = a^T [B]^T$
- $\sigma = [D]\varepsilon = [D][B]a$ , onde [D] é a matriz constitutiva do material
- u = [N]a
- $u^T = a^T [N]^T$

Realizando o procedimento de minimização da energia potencial e considerando que dA = dxdy e os deslocamentos nodais  $a^T$  e a os quais são independentes de x e y se obtém:

$$\frac{\partial}{\partial u}\Pi_e = \int [B]^T [D] [B] h dA * a - \int [N]^T \{p\} dL = 0$$
 (Eq. 13)

Comparando com a Equação 1, F = K \* d, é determinado a matriz de rigidez (Equação 14) e o vetor de forças (Equação 15).

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] h dA \qquad (Eq. 14)$$

$$\{F\} = \int [N]^T \{p\} dL$$
 (Eq. 15)

#### Triângulo plano com 3 nós e 18 graus de liberdade (elemento de casca)

Nesta dissertação, adota-se os elementos triangular e quadrilátero, respectivamente com 18 e 24 graus de liberdade. Apresenta-se na sequência a teoria para formulação do elemento triangular, sendo a teoria do elemento quadrilátero análoga a esta.

Os elementos de placas e cascas são casos particulares de sólidos com uma das dimensões significativamente menor do que as outras duas. Estes elementos

apresentam algumas simplificações da formulação teórica, podendo ser formulado a partir da Teoria de Kirchhoff (elemento delgado) e a Teoria de Reissner-Mindlin (elemento espesso). A Figura 3 apresenta a idealização matemática do elemento triangular com 3 nós e 18 graus de liberdade.





Fonte: Alves (2017)

A metodologia de formulação é baseada na soma do elemento *Discrete Kirchhoff Theory* – DKT, responsável pela parcela de flexão do elemento, com o elemento *Constant Strain Triangle* – CST, responsável pelos efeitos de membrana do elemento (ALVES, 2017).

"Nessa formulação adotada aparece uma dificuldade quando todos os elementos que concorrem em um mesmo ponto são coplanares. Isso ocorre porque impõe-se um valor nulo à rigidez ma direção  $\theta_z$ . Se nesse ponto considerando-se o sistema das equações de equilíbrio em coordenadas locais, ter-se-á seis equações, a última das quais apenas é: 0=0." (CARRIJO, 1995)

Para resolver esse problema adota-se um coeficiente de rigidez arbitrário ou fictício para a rotação em Z, o qual não altera as tensões. A Figura 4 ilustra a soma dos graus de liberdade para formar a matriz de rigidez do elemento de casca.

Figura 4 – Formulação do elemento de casca



Fonte: Autor.

A matriz de rigidez do elemento CST é dada pela equação:

$$K_{CST} = \int_{A} B_m^{T} h D B_m da$$
 (Eq. 16)

Onde a matriz  $B_m$  e D são:

$$[B_m] = \begin{bmatrix} (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) \\ (x_3 - x_2) & (x_1 - x_3) & (x_2 - x_1) & (y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \end{bmatrix}$$
(Eq. 17)

$$D = \frac{Eh}{(1-\nu^2)} \tag{Eq. 18}$$

- y<sub>2</sub> e y<sub>2</sub>: coordenadas do nó;
- E: Módulo de elasticidade;
- *h*: Espessura;
- *v*: coeficiente de Poisson;

A matriz de rigidez do elemento DKT é dada pela equação:

$$K_{DKT} = 2A \int_0^1 \int_0^{1-\eta} B_b^{\ T} D_b B_m d\xi d\eta$$
 (Eq. 19)

Onde a matriz  $B_b$  e  $D_b$  são:

$$[B_b] = \begin{bmatrix} y_{31}H_{x,\xi}^T + y_{12}H_{x,\eta}^T \\ -x_{31}H_{y,\xi}^T - x_{12}H_{y,\eta}^T \\ -x_{31}H_{x,\xi}^T + -x_{12}H_{x,\eta}^T + y_{31}H_{y,\xi}^T + y_{12}H_{y,\eta}^T \end{bmatrix}$$
(Eq. 20)

$$D_b = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu/2) \end{bmatrix}$$
(Eq. 21)

Onde  $H_{x,\xi}^T$ ,  $H_{x,\eta}^T$ ,  $H_{y,\xi}^T$  e  $H_{y,\eta}^T$  podem ser encontrados em Carrijo (1995).

$$K_c = \begin{bmatrix} K_{CST} & & \\ & K_{DKT} & \\ & & K_D \end{bmatrix}$$
(Eq. 22)

Onde  $K_D$  é a rigidez imaginária à rotação transversal ao plano do elemento (*drilling*), a qual existe para evitar o surgimento de valores nulos na diagonal principal da matriz.  $K_c$  é a matriz de rigidez do elemento com 18 graus de liberdade.

# 2.2 ANÁLISE DINÂMICA

#### Equação diferencial governante

Segundo Clough e Penzien (2003), a dinâmica pode ser definida de forma simples como a variação ao longo do tempo, portanto os carregamentos (magnitude, direção e posição) e a resposta (deslocamento, tensão e deformação) são variáveis ao longo do tempo.



#### Figura 5 – Estrutura idealizada com 1 grau de liberdade



Para a estrutura idealizada apresentada pela Figura 5, com a massa concentrada m e suportada por uma barra com rigidez k e massa desprezível, que apresenta 1 grau de liberdade de deslocamento lateral u e, segundo Chopra (2012), tem a equação diferencial governante dada pela Equação 23.

$$m\ddot{u} + ku = 0 \tag{Eq. 23}$$

A Equação 23 define o sistema não amortecido de vibração livre. Caso haja uma força externa excitadora o sistema passa a ser chamado de vibração forçada. Há ainda a possibilidade de haver um mecanismo de dissipação de energia por meio de amortecimento. A equação diferencial governante para vibração forçada amortecida é dada pela Equação 24.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \tag{Eq. 24}$$

Onde *c* é o coeficiente de amortecimento e p(t) é o carregamento externo. Pode-se definir um valor de amortecimento para o qual gera inibição do movimento oscilatório chamado de amortecimento crítico  $c_r = 2\sqrt{km}$  e uma razão de amortecimento  $\zeta = c/c_r = c/(2m\omega_n)$ , onde  $\omega_n = \sqrt{(k/m)}$  é a frequência natural.

É denominado amortecimento supercrítico caso  $\zeta > 1$  e ocorre decaimento da amplitude sem oscilação, e é denominado de amortecimento subcrítico se  $\zeta < 1$  e ocorre decaimento da amplitude com oscilação.

Para um sistema de vibração forçada harmônica e amortecido, é possível solucionar a equação diferencial governante pela soma da solução particular e da solução complementar. A solução particular representa o regime permanente e a solução complementar o regime transiente.

A solução particular  $u_p(t)$  é dada pela Equação 25.

$$u_{p}(t) = Csen(\omega t) + Dcos(\omega t)$$

$$C = \frac{P_{0}}{K} \frac{1 - (\omega/\omega_{n})^{2}}{[1 - (\omega/\omega_{n})^{2}]^{2} + [2\zeta(\omega/\omega_{n})]^{2}}$$

$$D = \frac{P_{0}}{K} \frac{-2\zeta(\omega/\omega_{n})}{[1 - (\omega/\omega_{n})^{2}]^{2} + [2\zeta(\omega/\omega_{n})]^{2}}$$
(Eq. 25)

A solução complementar  $u_c(t)$  é dada pela Equação 26.

$$u_{c}(t) = e^{-\zeta \omega_{n} t} \left( A \cos(\omega_{d} t) + B \sin(\omega_{d} t) \right)$$

$$A = u(0)$$

$$B = \frac{u(0) + \zeta \omega_{n} u(0)}{\omega_{d}}$$
(Eq. 26)

Onde  $\omega_d$  é a frequência natural amortecida dada por  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ .

#### Método de Newmark

Para o caso de um sistema com múltiplos graus de liberdade, a equação 24 é escrita na forma matricial e pode ser resolvida de maneira numérica, entre outras formas, pelo Método de Newmark.

O método propõe duas maneiras diferentes de considerar a aceleração para uma dada variação de tempo. Segundo Clough e Penzien (2003), o método da aceleração constante é incondicionalmente estável e da aceleração linear é condicionalmente estável. A Figura 6 apresenta um resumo das considerações sobre o Método de Newmark.



#### Figura 6 – Considerações do Método de Newmark

#### Fonte: Chopra (2012)

Segundo Clough e Penzien (2003), a utilização de aceleração linear fornece uma melhor aproximação do real comportamento para cada etapa de incremento de tempo comparado com a aceleração constante, inclusive tendo sido demonstrado por experimentos numéricos a superioridade.

Para aplicar o método deve-se determinar o intervalo de tempo  $\Delta t$  que mantenha uma estabilidade numérica atendendo à seguinte condição.

$$\frac{\Delta t}{T_n} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}}$$
(Eq. 27)

Onde  $T_n$  é o período (inverso da frequência natural). Os coeficientes  $\gamma$  e  $\beta$  são próprios do Método de Newmark e dependem da consideração do tipo de aceleração. Calcula-se a condição inicial.

$$\ddot{u_0} = \frac{p_0 - cu_0 - ku_0}{m}$$
(Eq. 28)

Calcula-se os parâmetros *a*1, *a*2, e *a*3.

$$a_{1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^{2}}m + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}c$$

$$a_{2} = \frac{1}{\beta\Delta t}m + \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right)c$$

$$a_{3} = \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)m + \Delta t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)c$$
(Eq. 29)

Calcular-se a rigidez incrementada  $\hat{k}$  para os próximos passos de tempo.

$$\hat{k} = k + a_1 \tag{Eq. 30}$$

A partir deste momento calcula-se  $\hat{p}_{i+1}$  para cada intervalo de tempo  $i = 1,2,3 \dots$ 

$$\hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i$$
(Eq. 31)

Com o cálculo da rigidez e da carga incrementada pode-se calcular o deslocamento para i + 1 e suas derivadas.

$$u_{i+1} = \frac{\hat{p}_{i+1}}{\hat{k}}$$
 (Eq. 32)

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i$$
(Eq. 33)

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)^2} (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{u}_i$$
(Eq. 34)

#### Análise modal

Neste tópico estará sendo apresentado o procedimento matemático para determinação dos modos de vibração. Este processo na fase de análise estrutural é importante para investigar as tendências de vibrações e possível ressonância, além de ser etapa metodológica da geração de carga dinâmica pelo Método do Vento Sintético.

Os deslocamentos sofridos pela estrutura na análise modal podem ser escritos matematicamente por:

$$u(t) = q_n(t)\phi_n \tag{Eq. 35}$$

Onde  $q_n$  é a função harmônica do sistema e  $\phi_n$  é a função de forma que independe do tempo. A função  $q_n$  pode ser escrita como:

$$q_n = A_n \cos(\omega_n t) + B_n sen(\omega_n t)$$
(Eq. 36)

Onde  $\omega_n$  é a frequência natural e, assim como  $\phi_n$ , é termo desconhecido. A Equação 32 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$[-\omega_n^2 m \phi_n + \phi_n k] q_n(t) = 0$$
 (Eq. 37)

Há duas formas de resolver a Equação 37, uma delas é para  $q_n(t) = 0$ , o que representa que não há deslocamento na estrutura ou solucionando algebricamente o problema matricial de autovalor por meio de  $\omega_n$  e  $\phi_n$ .

$$[k-\omega_n^2 m]\phi_n = 0 \tag{Eq. 38}$$

Esta equação tem a solução trivial  $\phi_n = 0$  e a solução não trivial dada por:

$$det[k-\omega_n^2 m] = 0 \tag{Eq. 39}$$

Obtém-se um polinômio de grau n (quantidade de graus de liberdade) quando ocorre a expansão do determinante. A matriz autovetor que contém as funções de forma, chamada de matriz modal, é dada pela Equação 40.

$$\Phi = \phi_n = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1n} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \phi_{n1} & \phi_{n2} & \dots & \phi_{nn} \end{bmatrix}$$
(Eq. 40)

A matriz autovalor, chamada de matriz espectral, é dada pela Equação 41.

$$\Omega^{2} = \begin{bmatrix} \omega_{1}^{2} & & & \\ & \omega_{2}^{2} & & \\ & & \dots & \\ & & & & \omega_{n}^{2} \end{bmatrix}$$
(Eq. 41)

Usando as matrizes modal e espectral é possível representar as relações de autovalor e autovetor por meio da Equação 42.

$$k\Phi = \mathbf{m}\Phi\Omega^2 \tag{Eq. 42}$$

## 2.3 MECÂNICA DOS FLUÍDOS E SIMULAÇÃO NÚMERICA COMPUTACIONAL

#### Formulação matemática básica

Em um fluido é necessário considerar a ação de dois tipos de forças: as que atuam sobre a massa (gravitacionais) e as que atuam na superfície do corpo (pressão e fricção). A segunda Lei de Newton expressa em uma descrição cinemática Euleriana que fornece o balanço *de momentum* válido para fluído newtoniano dado pela Equação 43 (SCHLICHTING, 1979). "As equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento consistem o sistema que descreve o escoamento de um fluido" (PETRY, 2002).

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial x_j} = X - \frac{\partial p}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left[ \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \right\}$$
(Eq. 43)

Sendo:

 $\rho$  = massa específica do fluido;

 $\mu$  = viscosidade dinâmica;

X = força volumétrica;

p = pressão termodinâmica;

V = componente do vetor velocidade segundo a direção i;

 $\delta_{ij}$  = delta de Kroneker, se i=j tem-se 1  $\delta_{ij}$ =1, caso contrário  $\delta_{ij}$ =0;

t = tempo;

x = direções dos eixos cartesianos retangulares.

Stokes propôs uma relação entre as viscosidades volumétrica e dinâmica, fundamentada em conectar a dissipação que ocorre quando um elemento de fluido sofre modificações em seu volume, bem como prover uma relação entre o tensor de tensões totais com a pressão termodinâmica (SCHLICHTING, 1979). A hipótese adotada por Stokes é dada pela Equação 44.

$$3\lambda + 2\mu = 0 \tag{Eq. 44}$$

Onde:

 $\lambda$  = viscosidade volumétrica;

 $\mu$  = viscosidade dinâmica ou absoluta.

A equação da continuidade busca relacionar o balanço entre quantias de massa que entram e saem de um volume unitário por unidade de tempo. A sua expressão em uma formulação Euleriana é dada pela Equação 45 (SCHLICHTING, 1979).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_j)}{\partial x_i} = 0$$
, com  $j = 1, 2, 3$  (Eq. 45)

Para um fluido newtoniano, a relação constitutiva apresentada pela Equação 46 é válida. Segundo Bono (2008), para a água e quase todos os gases é válida a aproximação como um fluido newtoniano, o que significa que as componentes do tensor viscoso dependem linearmente das taxas de deformação.

$$\sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial V_i}{\partial X_i} + \frac{\partial V_j}{\partial X_j} \right) + \lambda \left( \frac{\partial V_k}{\partial X_k} \right) \delta_{ij}$$
 (Eq. 46)

#### <u>Simulação em Computational Fluid Dynamics – CFD</u>

Segundo Cóstola e Alucci (2011), quando a definição do coeficiente de pressão por meio de túnel de vento não for possível uma alternativa é a dinâmica dos fluidos computacional para a simulação do escoamento ao redor dos edifícios e determinação dos coeficientes.

A fluidodinâmica computacional utiliza métodos numéricos de análise do problema como o Método dos Volumes Finitos, esta técnica fora desenvolvida por McDonald e MacCormack & Paullay na década de 1970. Conforme Vergel (2013), este método divide o domínio em volumes elementares para determinar equações aproximadas e satisfazer a conservação das propriedades de transporte para cada volume.

"Quando não é possível uma solução analítica, podemos fazer aproximações numéricas da equação diferencial utilizando um número discreto de pontos com um erro associado a eles. Assim, quando se deseja aumentar a precisão dos cálculos, se deverão aumentar o número de pontos a serem utilizados para aproximar-se da solução exata. Não obstante, pelo aumento dos cálculos a serem efetuados o esforço computacional também crescerá, mas de forma não linear" (VERGEL, 2013)

O domínio do problema é dividido em volumes elementares que compõem a malha computacional, a qual pode ser composta por elementos de diferentes geometrias e tamanhos. Para se adequar as superfícies de contorno é comum se utilizar elementos com superfícies curvilíneas. A Figura 7 apresenta os elementos que podem ser utilizados para discretizar o domínio em uma malha 3D.



Figura 7 – Tipos de elementos aplicados em geometria 3D

Fonte: Vergel (2013)

É possível adotar malha híbrida com associação de mais de um desses elementos para melhor se adequar ao problema. Após a definição e criação da malha é necessário a definição das condições de contorno do problema.

Ramponi e Blocken (2012) abordam os parâmetros e configurações computacionais para simulações em CFD. Sobre as condições de contorno, os autores recomendam que na face de entrada do fluxo seja adotado perfis verticais incidentes de velocidade média do vento e intensidade de turbulência. Para as paredes laterais limitantes deve-se adotar uma rugosidade para representar o sistema, ou pode ser sem rugosidade para apenas delimitar a condição de não deslizamento. A pressão estática zero é aplicada no plano de saída.

A turbulência é um fenômeno físico de alta complexidade que exerce grande influência em escoamentos. Contudo, sua natureza ainda não é totalmente clara e, ao longo dos anos, várias técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de calcular seus efeitos no desenvolvimento dos escoamentos (DAVIDSON, 2004 *apud* CÓSTOLA; ALUCCI, 2011).

Para realizar a modelagem da turbulência em CFD uma alternativa bastante utilizada é a abordagem Navier-Stokes com Média de Reynolds – RANS. Dentro desta técnica encontra-se expressões para determinar os tensores de Reynolds.

"Ainda não existe um modelo de turbulência que pode predizer, com certeza, todos os escoamentos turbulentos com a suficiente precisão, já que, todos os modelos de turbulência utilizam algum nível de aproximação para atingir seu objetivo" (VERGEL, 2013).

Segundo Feng, Gu e Zheng (2019), a abordagem da média de Reynolds para modelagem de turbulência requer que os componentes de tensão turbulenta sejam modelados apropriadamente, e um método comumente utilizado emprega a hipótese de Boussinesq para relacionar as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média. Segundo Kasper (2003), os modelos baseados na hipótese de Boussinesq apresentam comportamento isotrópico dos tensores de Reynolds, e ainda há modelos de segunda ordem que apresentam comportamento anisotrópico destes tensores.

Um dos modelos de turbulência dentro da técnica RANS é o modelo  $k - \varepsilon$  (képsilon), que é, conforme Vergel (2013), um dos modelos disponíveis mais robustos principalmente pela sua estabilidade numérica. É um modelo semiempírico de dois parâmetros baseado em observações de escoamentos com alto número de Reynolds. Para Feng, Gu e Zheng (2019), são escritas as equações de *momentum*, para uma simulação de fluxo com camada de contorno atmosférico, de forma horizontalmente homogêneo e estável. Segundo Blocken, Stathopoulos e Carmeliet (2007), o termo horizontalmente homogêneo refere-se à ausência de gradientes de fluxo nos perfis verticais da velocidade média do vento e quantidades de turbulência, ou seja, esses perfis são conservados após uma distância a jusante.
No modelo  $k - \varepsilon$  é calculado a viscosidade turbulenta  $\mu_t$  por meio da energia cinética turbulenta k e da taxa de dissipação de turbulência  $\varepsilon$ , segundo:

$$\mu_t = C_u \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$
 (Eq. 47)

Onde  $C_u$  é uma constante obtida de dados experimentais.

# 2.4 MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

O Método do Vento Sintético (Franco, 1993) consiste na consideração do carregamento em duas parcelas, uma média e uma flutuante, sendo esta gerada de forma aleatória pelo somatório de m harmônicos.

É possível listar as seguintes etapas para a aplicação do Método do Vento Sintético:

- Adotar uma velocidade básica de projeto;
- Encontrar o espectro de potência;
- Decompor o espectro de potência;
- Fazer uma correlação espacial de velocidades;
- Buscar o centro de rajada;
- Calcular a parcela média e parcela flutuante;
- Redividir os harmônicos de força nos nós.

### Velocidade básica de projeto

A velocidade média de projeto utilizada no cálculo da pressão dinâmica é admitida na NBR 6123 (ABNT, 1988) com duração de 10 minutos a 10 metros de altura e em terreno de categoria II podendo ser calculada pela Equação 48:

$$V_p = 0,69 * V_0 * S_1 * S_2$$
 (Eq. 48)

### Espectro de potência

Segundo Blessmann (2005), o espectro de potência é a distribuição nas diversas frequências da energia contida no fenômeno. Dentre as aplicações está: a determinação da composição, em frequência, de um processo aleatório; termo de comparação entre o fenômeno natural e simulação em laboratório; a escala de turbulência pode ser obtida a partir da frequência de pico da curva. A Figura 8 apresenta alguns espectros de potência, dentre eles o de Davenport.



Fonte: Bastos e Silva (2016)

O espectro de potência utilizado será o de Davenport, que é o mesmo espectro utilizado no trabalho de FRANCO (1993), dado pela Equação 49.

$$\frac{fs(f)}{u^2} = 4 * \frac{x(f)^2}{(1+x(f)^2)^{\frac{4}{3}}}$$
 (Eq. 49)

$$x(f) = \frac{1220f}{V_p}$$
 (Eq. 50)

onde

 $f - \acute{e}$  a frequência das rajadas;

 $V_p$  – é a velocidade do vento (velocidade de projeto);

 $u^2$  – Velocidade de fricção ou velocidade de cisalhamento no escoamento do vento;

s(f) – Espectro de potência do vento;

x(f) – Frequência adimensional

#### Decomposição do espectro de potência

A parcela p'(t) é a componente flutuante do carregamento do vento que é composta por determinado número de funções harmônicas com períodos entre 600s e 0,5s de modo que se inclua pelo menos o primeiro modo de vibração da estrutura, que será ressonante com um dos harmônicos, denotado por R. O número mínimo de harmônicos adotados para o Método do Vento Sintético é m =11.

p'(t) é dado pela Eq. 51.

$$p'(t) = \sum_{k=1}^{m} Ck * \cos\left(\frac{2\pi}{T_r * r_k} * t - \theta\right)$$
 (Eq. 51)

m - número de harmônicos;

Tr – período fundamental da estrutura;

 $\theta k$ – ângulo de fase gerado aleatoriamente;

K - Harmônico em questão;

r<sub>k</sub> = 2k-R – relação entre o harmônico K e o harmônico ressonante R;

R - Harmônico ressonante;

t - tempo de 0 a 600s;

55:

Ck – fator encontrado pela integração do espectro de potência nos intervalos de frequência dos harmônicos m;

Os valores de Ck são determinados por integração do espectro de potência (Equação 52) nos intervalos de frequência dos harmônicos m. Os intervalos de integração são dados pelas Equação 53 e Equação 54.

$$Ck = \sqrt{2\int_{fpk}^{fak} S(f)df}$$
 (Eq. 52)

$$fak = \frac{k}{2^{(k-0,5-R)}}$$
 (Eq. 53)

$$fpk = \frac{k}{2^{(k+0,5-R)}}$$
 (Eq. 54)

Normaliza-se os coeficientes *Ck* e chega-se aos coeficientes *ck* pela Equação

$$ck = \frac{Ck}{\sum_{1}^{m} Ck}$$
(Eq. 55)

### Correlação espacial das velocidades

A correlação espacial (Equação 56) pode ser descrita em função da frequência de rajada e da distância entre dois pontos.

$$\cosh(d, f) = e^{-\hat{f}}$$
 (Eq. 56)

 $\hat{f}$  é determinado pela Equação 57.

$$\hat{f} = \frac{f\sqrt{Cz^2(z1-z2) + cy^2(y1-y2)}}{Vp}$$
(Eq. 57)

Onde *z*1, *z*2, *y*1 e *y*2 são coordenadas de dois pontos da face da estrutura atingida pelo vento (perpendicular ao fluxo) e *Cz* e *Cy* são coeficientes de decaimento exponencial determinados experimentalmente. Pode-se adotar valores de *Cz* = 7 e Cz = 12, favorável à segurança, conforme orientações de Franco (1993). Para estruturas predominantemente verticais, pode-se considerar apenas a correlação espacial no eixo Z (Eq. 58).

$$coh(\Delta z, f) = \exp\left(-\frac{7\Delta zf}{Vp}\right)$$
 (Eq. 58)

A correlação tem decaimento de 1 até 0. Desta forma, para  $\Delta z \rightarrow \infty$  a correlação tende a 0 e para  $\Delta z \rightarrow 0$  a correlação tende a 1 (onde  $\Delta z$  é a variação de altura). FRANCO (1993) propôs o conceito de tamanho de rajada, no qual a dimensão de uma rajada é perfeitamente correlacionada. A Figura 9 demonstra o centro de rajada e o decaimento ao longo de  $\Delta z$ .

#### Figura 9 – Rajadas equivalentes



Fonte: Franco (2003, apud Leite, 2015)

Uma aproximação da equivalência de efeitos é obtida igualando-se as resultantes das pressões p', assim a altura da rajada equivalente pode ser determinada como:

$$coh(p')(\Delta z, f) = \left[\exp\left(-\frac{7\Delta zf}{Vp}\right)\right]^2 = \exp\left(-\frac{14\Delta zf}{Vp}\right)$$
 (Eq. 59)

$$\Delta z = 2 \int_0^\infty \exp\left(-\frac{14\Delta zf}{Vp}\right) d(\Delta z) = \frac{Vp}{7f}$$
(Eq. 60)

O centro da rajada é determinado como a diferença entre a cota mais alta do edifício e o Δz calculado. O centro de rajada (Gc) encontrado é de utilização facultativa, uma vez que poderá ser adotado um centro de rajada cuja resposta seja mais significativa.

Uma vez adotado o centro de rajada, é preciso calcular os coeficientes de redução das pressões flutuantes Cr, dados pelas relações das Equações 61 e 62:

$$Cr = \left(\frac{1}{\Delta z}\right)(Gc - z) + 1$$
 (Eq. 61)

Para Gc≤z≤Gc +  $\Delta z$ , sendo z a cota em análise.

$$Cr = \left(\frac{-1}{\Delta z}\right)(Gc - z) + 1$$
 (Eq. 62)

Para Gc -  $\Delta z \le z \le Gc$ , sendo z a cota em análise.

#### Pressões flutuantes e pressões médias

O método de FRANCO (1993) baseia-se na relação entre a velocidade média (t=600 segundos) e a velocidade de rajada (t=3 segundos), válida para a categoria II da NBR 6123 (ABNT, 1988) à altitude de 10 metros, para definir a relação entre as pressões flutuantes e as pressões médias. A razão é dada por:

$$\frac{q_{600}}{q_3} = \left(\frac{V_{600}}{V_3}\right)^2 = 0,69^2 = 0,48$$
 (Eq. 63)

Desta forma, 48% da força total representa o valor médio e 52% representa o valor flutuante dado pelas rajadas. CARRIL (2000) sugeriu uma modificação do método do vento sintético, para considerar cada categoria do terreno e altitude com as expressões contidas na NBR 6123 (ABNT, 1988) para a velocidade média e a velocidade de rajada. Portanto a relação entre a pressão média e a pressão máxima flutuante, (pressão de pico), é diferente para cada altura da estrutura e cada categoria de terreno.

Após ser determinadas as pressões flutuantes, elas são multiplicadas pelos coeficientes de redução Cr e pelos harmônicos corrigidos pelos fatores Ck. Assim, chega-se as pressões flutuantes corrigidas, que variam conforme o tempo, a altura e o harmônico k.

$$Q(t, z, k) = q_f(z)Cr(z, k)p'(t, k)$$
 (Eq. 64)

Onde  $q_f$  é a pressão gerada pelo vento.

Com a área de influência (A) e o coeficiente de arrasto ( $C_a$ ), é possível determinar a força aplicada pela Equação 65.

$$F(t, z, k) = C_a AQ(t, z, k)$$
(Eq. 65)

### Adaptações deste trabalho

Como nesta dissertação para a determinação do carregamento do vento há a união dos métodos CFD e Vento Sintético, teve-se que fazer algumas adaptações.

Por meio do CFD já se determina a parcela média da carga e o coeficiente de arrasto, então estas parcelas não foram inseridas no script do Python para determinar a carga pelo vento sintético. Desta forma multiplica-se a carga média obtida em CFD por *1+(parcela flutuante do vento sintético)* no recurso de análise do histórico de tempo no Robot, esta multiplicação gera o efeito oscilatório em torno da carga média e amplificada até o pico de rajada. O processo de análise dinâmica por elementos finitos será realizado no software Robot Autodesk.

Da mesma forma, as etapas de correção espacial e determinação do centro de rajada não foram implementadas em Pyhton por serem obtidas implicitamente no CFD.

Como é lançado na estrutura a pressão do vento e não a força do vento, a carga fica em função da área de contato, outra parcela suprimida da implementação computacional.

# 2.5 EFEITOS DINÂMICOS EM EDIFÍCIOS ALTOS

### Martelamento (Buffeting)

No caso em que uma edificação localizada a sotavento de outra (ou de obstáculos naturais ou artificiais), na região da esteira de vento, sofra impactos constantes, chama-se este fenômeno dinâmico de "martelamento". Segundo Vogado (2018), a ocorrência do fenômeno depende das dimensões e configurações de posicionamento, e se a frequência dominante dos turbilhões se aproximar da

frequência natural da estrutura em questão, ocorrerão efeitos dinâmicos de maior intensidade.

Segundo Blessmann (2005), a turbulência naquela região é do mesmo tipo da turbulência existente no vento natural incidente nos obstáculos, com uma gama grande de frequências e dimensões dos turbilhões.

Se a intensidade da turbulência for pequena, a esteira de vento que se desprende será bem organizada, desprendendo-se vórtices de forma cadenciada e periódica. Caso a intensidade da turbulência for alta, a esteira terá uma desorganização dos turbilhões e a energia se distribui em uma gama maior de frequências, causando vibrações de menor amplitude.

Blessmann (2005) concluiu que em localidades de menor rugosidade submetidas a uma determinada velocidade de referência do vento será mais importante o fenômeno de martelamento do que em regiões de alta rugosidade. A alta rugosidade gera uma dispersão da energia em várias frequências diferentes, o que diminui o efeito do martelamento.

### Galope e Drapejamento

Estruturas ou elementos flexíveis e leves, como o modelo que será abordado nesta dissertação, e com pequeno amortecimento podem sofrer oscilações causadas por instabilidade aerodinâmicas.

Estes fenômenos estão relacionados à propriedade de amortecimento. Vale destacar que existem dois tipos de amortecimento: o primeiro é inerente à estrutura, e sempre tem valor positivo, contribuindo para a diminuição da resposta; o segundo é o aerodinâmico, e em casos específicos pode apresentar valores negativos. Quando o valor negativo do amortecimento aerodinâmico supera em módulo o amortecimento da estrutura, o valor resultante desta propriedade se torna negativo, o que provoca uma instabilidade na estrutura.

Quando a instabilidade gera oscilações na direção transversal, chama-se de galope. Quando está associado a dois graus de liberdade, oscilações transversais e torcionais, chama-se drapejamento.

### Desprendimento de vórtices

Segundo Blessmann (2005), em corpos rombudos imersos em um escoamento com determinado número de Reynolds, pode haver desprendimento alternado de vórtices de forma periódica e frequência bem definida, são os chamados Vórtices de Karmán. O efeito mais significativo é na direção transversal à direção do vento, gerando forças laterais. A diferença entre corpos rombudos e aerodinâmicos é mostrado na Figura 10.



Figura 10 – Escoamento em torno de corpos aerodinâmicos e rombudos

Fonte: Holmes (2014, apud Vogado (2018))

No corpo aerodinâmico apresentado na Figura 10, observa-se que as linhas de corrente seguem o contorno do corpo, sendo que o escoamento é separado da superfície do aerofólio apenas por uma fina camada. Já no corpo rombudo, ocorre separação do escoamento nos vértices das arestas frontais. A região de desprendimento é caracterizada por uma fina camada de alto cisalhamento e vorticidade.

### Efeito Venturi

Edificações vizinhas podem, por suas dimensões, forma e orientação, causar um afunilamento do vento acelerando o escoamento de ar, com uma consequente alteração nas pressões (CARPEGGIANI, 2004). A Figura 11 ilustra o afunilamento do escoamento, gerando o Efeito Venturi.



Figura 11 – Afunilamento geométrico que ocasiona o efeito Venturi

Fonte: Carpegiani (2004)

Como visto na Figura 11, o afunilamento ocasiona que o fluido passe a escoar em menor área, o que causa maiores velocidades e altera as pressões nas faces laterais dos edifícios.

### 2.6 TORÇÃO CAUSADA PELO VENTO

O estudo das causas da torção em edifícios pode ser dividido em três tipos de fatores, conforme proposto por Boggs *et al.*(2000), em: a forma do edifício, efeitos de vizinhança e as características dinâmicas da estrutura.

### Forma da edificação

Segundo Carini (2017), "o efeito de torção aerodinâmica ocorre na maioria dos prédios de formas convencionais (excluindo os de formas circulares) sempre que o ângulo de incidência do vento for oblíquo ao eixo de simetria". A Figura 12 ilustra este conceito.



Figura 12 – Esquema de geração de momento torsor por distribuição assimétrica das pressões

#### Fonte: Boggs et al. (2000)

A Figura 12 apresenta esquematicamente as linhas de corrente e a distribuição de pressões nas fachadas de um edifício de seção quadrada para um ângulo de ataque entre 5º e 20º. Surge um pequeno momento torsor devido a assimetria da distribuição de pressões.

Tanaka *et al.* (2012) concluem que os coeficientes médios de pressão do vento nas direções longitudinal e transversal ao vento e o coeficiente de momento torsor são maiores para seção quadrada que para os modelos de canto chanfrando e canto cortado através de toda a altura.

### Efeito de vizinhança

A turbulência gerada por um edifício a barlavento causa não uniformidades no escoamento, podendo induzir um esforço de torção.

Efeitos dinâmicos, como os de martelamento, drapejamento ou Efeito Venturi estudados no capítulo 2.5, induzidos pela configuração de vizinhança podem causar torção no edifício em estudo, situado a sotavento.

### Características dinâmicas da estrutura

"as características estruturais que afetam a resposta torcional são: a frequência natural, o amortecimento e existência de excentricidades entre os centros elástico, geométrico e de massa" (CARINI, 2017).

O mecanismo pelo qual a amplitude das vibrações é reduzida é chamado de amortecimento ( $\zeta$ ). No amortecimento, a energia do sistema vibratório é dissipada por vários mecanismos, e muitas vezes mais de um mecanismo pode estar presente ao mesmo tempo (CHOPRA, 2012). A força de amortecimento associada a esta

dissipação é bastante complexa, sendo função das características intrínsecas dos materiais, dos detalhes construtivos, das tensões, da amplitude das oscilações, da existência de elementos não estruturais (paredes, pisos, móveis e outros), do estado de fissuração da estrutura e das paredes, e outros (BLESSMANN, 2005).

A resposta dinâmica depende, além da dissipação de energia pelo amortecimento, da frequência natural da estrutura. Quanto mais a frequência da força excitadora se aproximar da frequência natural, maior será a resposta dinâmica. A Figura 13 apresenta o fator de resposta dinâmica de deformação em função da razão entre a frequência de excitação  $\omega$  e frequência natural  $\omega_n$ .



Figura 13 – Fator de magnificação dinâmica.

Fonte: Chopra (2012)

Na Figura 13, no eixo vertical apresenta a razão do deslocamento dinâmico pelo estático (fator de magnificação dinâmica), e no eixo horizontal a razão da frequência de excitação  $\omega$  e frequência natural  $\omega_n$ . Observa-se na Figura 13 que quanto mais a razão  $\omega/\omega_n$  se aproxima de 1, maior é o fator de resposta (depende do valor da razao de amortecimento  $\zeta$ ). É mostrado também como o amortecimento  $\zeta$  interfere na resposta da estrutura, em que quanto maior o amortecimento menor é a resposta.

Caso a frequência de excitação e frequência natural coincidam, ocorre o fenômeno de ressonância. Neste caso, o amortecimento torna-se importante, pois sem seu efeito de diminuição das amplitudes a resposta da estrutura tenderia ao

infinito. Após a ressonância, a função de amplificação dinâmica decresce, de modo que a excitação exerce pouca influência na estrutura para valores acima da freqüência de ressonância. Embora esses conceitos sejam gerais, o gráfico da Figura 13 é próprio para carregamentos harmônicos.

Liang *et al.* (1997) estudaram os efeitos do acoplamento entre os deslocamentos laterais e torcional devido a excentricidades dos centros de massa e elástico em relação ao centro geométri0co da seção transversal. Verificaram que excentricidades de massa ou de rigidez da ordem de 5% podem causar um aumento de 30% nos deslocamentos e acelerações quando comparadas à estrutura sem excentricidade.

### 2.7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Li *et al.* (2017), já é amplamente conhecido que o formato externo da estrutura desempenha um papel importante na geração dos carregamentos devidos ao vento em edifícios altos, podendo torná-los mais sensíveis às excitações dinâmicas.

Liang *et al.* (2002) e (2004) propuseram expressões para determinar a ação dinâmica transversal e torcional ao vento em edifícios altos de seção retangular.

Li e Li (2016) e Li, Li e Chen (2017) sugeriram fórmulas empíricas para determinar as cargas de vento transversais e torcionais em edifícios altos com formato em "L".

Alminhana (2017) estudou as características aerodinâmicas modificando as formas da seção transversal, concluindo que as modificações nas arestas vivas de um edifício alto, inicialmente retangular, são capazes de propiciar reduções significativas nas cargas de arrasto e laterais às quais a edificação estaria sujeita sem as modificações propostas.

Vogado (2018) realizou a caracterização aerodinâmica de edifícios altos com planta em formato de "V". Avaliando os carregamentos atuando global e localmente, tanto para o modelo considerado isolado quanto incluindo as condições de vizinhança, estudou-se, além das ações, o espectro do vento que se aproxima, e determinou-se as funções de admitância aerodinâmica correspondentes e verificou a direção crítica de incidência do vento.

Zhang, Xu e Kwork (1993) constataram que uma excentricidade do centro elástico de 10% causou um aumento de até três vezes na resposta média.

Boggs, Hosoya e Cochran (2000), em um estudo de caso, mostraram que o acoplamento entre o movimento translacional e torcional em algumas formas modais resultou numa correlação entre a força de arrasto e o momento torsor, conduzindo a uma situação de cálculo na qual a máxima força de arrasto é considerada simultaneamente ao máximo momento torsor. O reposicionamento e o aumento da espessura de paredes de contraventamento diminuram o acoplamento entre as formas modais, consequentemente diminuindo em 50% o momento torsor e em 54% a aceleração resultante no último pavimento.

Carpegiani (2004) concluiu por meio de ensaios em túnel de vento que as distribuições de pressões, ao longo das fachadas dos prédios, sejam por efeitos de vizinhança ou pela incidência obliqua do vento, originam efeitos de torção, sendo esses mais significativos para edificações com secção transversal não retangular. Ainda segundo Carpegiani (2004), a estimativa de força de arrasto na base é superior para a NBR 6123 do que para resultados experimentais, na maioria dos casos e os efeitos de torção são subestimados.

### Formato H

Lam, Wong e To (2009) estudaram carregamento dinâmico devido ao vento em edifícios altos de seção H. Os dados foram baseados em testes em túnel de vento, determinando os coeficientes médios, RMS (root-mean square) de momento longitudinal e transversal e o momento torsional, os quais são medidos em modelos rígidos de edifícios altos pelo método HFFB (high-frequency force balance).

Nesse estudo acima, verifica-se que a presença de cavidades recuadas nos dois lados do edifício não leva a modificações significativas de distribuições médias de carga do vento. No entanto, é evidente que a presença de cavidades recuadas leva a uma torção média diferente de zero em  $\theta$  = 45°. As cavidades recuadas também

resultam em níveis aumentados de flutuações de torção em todos os ângulos do vento.

Wong e Lam (2013) perceberam que a presença das cavidades recuadas não leva a significativas modificações nos coeficientes aerodinâmicos, exceto para os coeficientes transversais com a incidência frontal às cavidades. A presença das cavidades a barlavento e sotavento leva a significativas reduções. Em geral, a redução é maior para cavidades mais largas. Esses valores são inferiores ao valor de referência para edifício alto quadrado em 12% ou mais.

Para o estudo de Wong e Lam (2013), o espectro de potência do edifício para incidência de vento frontal com as cavidades a barlavento e sotavento teve redução superior a 70% para W/B=0,75 e D/B=0,375 (Figura 14-c),onde W é a largura da cavidade, D a profundidade e B a base do edifício. Observa-se que o gráfico em vermelho (seção H) apresenta redução em relação ao preto (seção quadrada) mais acentuada conforme maiores são as cavidades recuadas.



Figura 14 – Espectro de potência do estudo de Wong e Lam (2013)

Fonte: Wong e Lam (2013)

Para incidência frontal à cavidade, ocorre a maior redução do coeficiente médio para a situação de ressonância, correspondendo o edifício de seção H a 73% do edifício de seção quadrada.

Análise de edifícios altos sob ação do vento

O trabalho de Miguel (2003) tem o objetivo de determinar as respostas longitudinal e transversal através de um estudo teórico e experimental, em modelo reduzido, da ação e efeitos do vento sobre um edifício alto de seção transversal retangular. Foi proposto comparar as respostas obtidas pela metodologia das normas brasileira e canadense e com ensaio aeroelástico em túnel de vento.

Pelo trabalho de Miguel (2003) percebe-se que os valores experimentais são superiores aos apresentados pela NBR 6123 enquanto os resultados da norma canadense são inferiores aos do túnel de vento para velocidades iniciais e superiores para velocidades mais altas.

Miguel (2003) conclui que para a resposta transversal, a formulação da norma canadense apresenta uma discrepância muito elevada aos obtidos experimentalmente. Explica que a NBCC – 1985 (*National Building Code of Canada*) apresenta uma equação empírica, apenas fornecendo uma noção da dimensão da força transversal. Foi verificado, de forma experimental, que a resposta longitudinal flutuante apresenta grande relevância na resposta total, chegando a valores em torno de 50% da resposta média.

A dissertação de Lavôr (2017) teve como objetivo fazer a avaliação da aplicabilidade de métodos teóricos de estimativa de respostas geradas nos edifícios altos sob ação longitudinal de ventos turbulentos, por meio de comparação entre os resultados de método teórico, procedimentos normativos e resultados obtidos de ensaios em túnel de vento com modelos padrões.

Lavôr (2017) conclui que, de modo geral, há uma ótima correlação entre os resultados, o que leva a dizer que o método do fator de rajada de Davenport, o qual separa as respostas quase-permanente e ressonante e com o auxílio das linhas de influência, é válido para aplicação em edifícios paralelepipédicos.

Hao e Yang (2020) por meio de ensaios estudaram as características de vibração acopladas de edifícios altos excitados pelo vento. Atualmente os edifícios altos são construídos com materiais mais resistentes e mais leves, o que, segundo os autores, causam maior flexibilidade e menor razão de amortecimento, o que pode causar excessivas vibrações sob a ação do vento. Os ensaios foram realizados em túnel de vento com modelo aeroelástico reduzido.

Hao e Yang (2020), por meio dos resultados, evidenciaram que os deslocamentos longitudinais sofreram um comportamento típico para a ação das rajadas enquanto os deslocamentos transversais sofreram aumento rápido conforme a velocidade do vento superou a velocidade de desprendimento de vórtices. Percebeu-se também um bom comportamento no comparativo entre os deslocamentos transversais e o efeito acoplado dos deslocamentos conforme se aumentou a velocidade, o que revelou a correlação entre a resposta acoplada e a resposta transversai e confirmou os efeitos de acoplamento entre as vibrações longitudinais e transversais ao vento.

Li *et al.* (2019) estudaram os efeitos de redução da força do vento em edifícios altos com a modificação das arestas. O estudo combina ensaios em túnel de vento e análise das propriedades dinâmicas por meio do software ANSYS para o cálculo da resposta induzida pelo vento. Além da seção quadrada, analisa-se as seções com cantos chanfrados, recuados e arredondados.

Segundo Li *et al.* (2019), expressões empíricas simplificadas para a seção podem conduzir a estimativas conservadoras para edifícios altos e que as três modificações podem efetivamente reduzir os carregamentos do vento. Para a seção quadrada, conclui-se que as fórmulas empíricas dos códigos normativos estão inseguras na metade superior dos edifícios.

Tanaka *et al.* (2012) conduziram uma série de experimentos para avaliar o desempenho de edifícios altos com as mais variadas modificações aerodinâmicas: cantos chanfrados ou cortados, seções helicoidais, em tronco de pirâmide, em patamares ou com aberturas. Analisaram a força resultante do vento e os coeficientes de pressão para as direções longitudinal e transversal e momento torsor.

Segundo Tanaka *et al.* (2012), para o coeficiente médio máximos de momento, os modelos piramidais apresentaram melhor comportamento aerodinâmico na direção longitudinal enquanto os modelos com modificação nos cantos, helicoidal e com aberturas cruzadas apresentaram melhor comportamento na direção transversal. Para o coeficiente flutuante máximo de momento, modelos com cantos modificados e os piramidais apresentaram o melhor comportamento aerodinâmica em ambas as direções.

Vogado (2018) promoveu uma caracterização aerodinâmica, avaliando os carregamentos atuando global e localmente, tanto para o modelo considerado isolado quanto incluindo as condições de vizinhança. Além das ações, foi estudado o espectro de potência do vento que se aproxima, e determinou-se as funções de admitância aerodinâmica correspondentes.

Vogado (2018) constatou que a incidência do vento na direção aproximadamente perpendicular à fachada externa de uma das abas se mostrou crítica nas duas estruturas. Nesse ângulo, o comportamento global dos dois modelos foi muito similar, sugerindo que o formato dos espectros obtidos para os carregamentos poderia ser extrapolado a outros prédios com o mesmo padrão arquitetônico. Vogado destaca que de modo geral, os espectros dos carregamentos globais em termos de Fx e Fy apresentaram grandes similaridades entre os dois edifícios, exceto pela incidência de 90º em que apenas o Prédio A apresentou picos emergentes.

Li e Li (2016) e Li, Li e Chen (2017) estudaram o carregamento dinâmico transversal ao vento para edifícios altos de seção L com variadas dimensões por meio de testes em túnel de vento. Pegando a razão entre os lados e a categoria do terreno como variáveis chaves, desenvolveu-se formulas empíricas para estimar o carregamento dinâmico com bases nos ensaios realizados. Perceberam que quanto maior a razão de D/B (dimensões dos lados), maiores são os coeficientes de força causados na direção mais desfavorável e que quanto maior a razão de H/B (altura pela base), mais significativos se tornam os coeficientes de força. Percebe-se também que quando se considera a envoltória retangular como seção padrão, os coeficientes apresentam um comportamento bem diferente: são menores em alturas menores, e maiores para cotas mais elevadas.

Os autores concluem que as mudanças nas categorias de terreno não influenciam nos coeficientes médios de força para todas as direções do vento. A razão entre os lados da edificação tem forte influência nos coeficientes de força, aumentando-os com o aumento da razão D/B. Desenvolveu-se também fórmulas empíricas do espectro adimensional de momento de base, coeficientes de força e correlação vertical de coeficientes para edifícios de seção L. Comparação entre os resultados pelas formulas propostas e pelos ensaios em túnel de vento mostram que há acurácia.

Tse *et al.* (2021) estudaram os efeitos que a modificação dos cantos de edifícios quadrados causam nas características aerodinâmicas. Os ensaios foram realizados para incidência do vento a 0º e 15º. Confirmou-se que as modificações nos cantos reduziram os coeficientes de força do vento. Contudo, para pequenas taxas de modificação houve aumento da pressão local extrema.

### 3 METODOLOGIA

A Figura 15 a seguir mostra um fluxograma amplo das etapas de trabalho, incluindo os softwares que auxiliam nas etapas. As informações detalhadas são apresentadas em tópicos deste capítulo.





#### Fonte: Autor

O Fluxograma de trabalho pode ser compreendido como:

- A estrutura é modelada no Revit<sup>1</sup> adotando dimensões propostas por Lam (2009) e inserindo pilares com rigidez suficiente para garantir a estabilidade global;
- A análise modal é realizada no Robot e determina-se os 12 primeiros modos de vibração que serão utilizados no Método do Vento Sintético;
- Por meio do Autodesk CFD<sup>2</sup> é determinada a pressão estática do vento;
- Com auxílio do Python é determinado a função do fator multiplicador que representa a carga dinâmica determinada pelo Método do Vento Sintético;
- No modelo estrutural do Robot, insere-se as cargas do vento, permanente e acidental;
- O modelo é processado com a determinação e aplicação de cargas para geometria em H;

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Autodesk® Revit (versão estudante) 2019 © 2018 Autodesk, Inc. All rights reserved.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Autodesk Simulation CFD (versão estudante) 2019 © 2018 Autodesk, Inc. All rights reserved.

- O modelo é processado com a geração de carga do vento para geometria retangular que envolve o edifício e aplicada diretamente na estrutura;
- Comparam-se os resultados para uma mesma estrutura e ângulo de incidência do vento com a carga gerada na seção H e na envoltória retangular (que é um processo simplificado pelos códigos normativos, mesmo não se seguindo as cargas recomendadas pelas normas).

Pode-se dividir a metodologia de trabalho em 4 grandes etapas: a modelagem da estrutura; a análise aerodinâmica; validação do modelo em CFD; e a análise dinâmica da resposta da estrutura.

# 3.1 MODELAGEM DA ESTRUTURA

A estrutura foi modelada com base quadrada de 20 metros de lado, com altura de 120 metros. Isto garante uma razão de 6 entre altura e base, classificando-se assim como um elemento esbelto. O tamanho das cavidades recuadas foi adotado conforme o modelo proposto por Lam (2009) que gerou respostas mais significativas. A Figura 16 apresenta a planta da seção transversal.





#### Fonte: Autor

Os pilares estão destacados em cinza e as vigas em marrom enquanto os traços claros representam elementos não estruturais que dividem os apartamentos assim como a escada e os elevadores. Na região central está localizado o núcleo de rigidez composto por 3 painéis que formam o pilar-parede em U.

O edifício modelado em seção H tem cavidades recuadas com a profundidade de 40% da largura e abertura de 36,75% da largura total. Essas medidas tendem a realçar os efeitos das cavidades na ação do vento, conforme os estudos de Lam (2009).

A Figura 17 apresenta o edifício modelado no software Revit<sup>3</sup>. A estrutura é posteriormente exportada ao software Robot para análise. Os pilares foram considerados engastados na fundação, que aqui não foi objeto de análise.

Figura 17- Perspectiva do edifício

### Fonte: Autor

A razão de amortecimento da estrutura de concreto armado foi admitida como de 2%, este valor foi adotado pela recomendação da NBR 6123 (ABNT, 1988). As características dos materiais utilizados são:

Concreto Fck 30 MPa (Vigas e lajes)

Módulo de Elasticidade: 27000 MPa

Coeficiente de Poisson: 0,20

Módulo de Elasticidade Transversal: 11250 MPa

Concreto Fck 50 MPa (Pilares)

Módulo de Elasticidade: 39598 MPa

Coeficiente de Poisson: 0,20

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Para todos os softwares necessários para este trabalhou utilizou-se licença estudantil em nome do autor.

### Módulo de Elasticidade Transversal: 16499 MPa

A estabilidade global foi calculada por meio do método  $\gamma$ -z e teve como resultado 1,11 para o eixo X e 1,08 para o Y. Este método determina que as estruturas com até 1,10 apresentam nós que podem ser considerados como fixos, o que diminui os efeitos de segunda ordem. Desta maneira, não se considerou a não-linearidade geométrica da estrutura.

A análise modal foi realizada por meio do software Robot utilizando o método da iteração de subespaço<sup>4</sup> e com a matriz de massa consistente. Os valores dos 12 primeiros modos são utilizados no método do vento sintético.

A malha de elementos finitos é composta por elementos retangulares de 4 nós e triangulares de 3 nós gerada automaticamente com elementos de casca com dimensões máximas de 0,50m. A Figura 18 apresenta o modelo com a malha de elementos finitos e destaca em vermelho o ponto de referência para plotagem dos gráficos de respostas da estrutura, conforme capítulo 4.2.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> O Método da iteração de subespaço (proposto por Bathe em 1971) é adequado quando se busca autovalores em sistemas com grande número de elementos finitos. A necessidade de uma quantidade de autovalores muito menor que os disponíveis faz com que o método seja muito adequado.



Figura 18 – Modelo estrutural com malha de elementos finitos

Fonte: Autor

# 3.2 SIMULAÇÃOAERODINÂMICA

### Caracterização dos parâmetros

A velocidade básica do vento adotada foi de 42 m/s, estimada por interpolação das linhas de isopletas da NBR 6123 (ABNT, 1988) para a cidade de Curitiba. O perfil de deflexão do vento é apresentado na Gráfico 1 obtido pela multiplicação da velocidade básica pelos fatores S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub> variando ao longo da altura.



Fonte: Autor

A rugosidade adotada foi de categoria II, definida como terrenos abertos com poucos obstáculos. A topografia foi considerada plana. Não houve simulação de efeitos de vizinhança.

Com auxílio da linguagem Python foi gerado a parcela flutuante da carga de vento, a qual se soma a parcela média para se gerar a carga dinâmica do vento. Utilizou-se o Método do Vento Sintético (Franco, 1993), que é um método de combinação randômica de forças harmônicas para a geração da máxima resposta segundo as características da estrutura. As cargas são geradas pela decomposição do Espectro de Potência de Davemport.

O histórico da aplicação da carga ao longo do tempo é apresentado no Gráfico 2 que apresenta o fator p', o qual corresponde a um coeficiente de amplificação para a carga estática, expressando desta forma o somatório das parcelas médias e flutuantes. Nota-se que o fator oscila em torno de 1, ou seja, o fator oscila em torno da carga média (estática).





Fonte: Autor.

A parcela média da carga do vento é determinada por simulação pelo software CFD Autodesk. A simulação é realizada em um túnel de vento fictício com 1000 metros de comprimento, sendo o edifício localizado no meio, 400 metros de largura e 300 metros de altura. O edifício é inserido em escala real (20x20x120m). O modelo é simulado em escala geométrica de 1:1, diferentemente do túnel de vento convencional que utiliza uma escala geométrica de redução, 1:100 por exemplo.

A simulação consiste em 3 etapas de 300 iterações cada, sendo refinada a malha entra cada uma destas etapas. O fluido, considerado incompressível, é simulado em situação de turbulência, utilizando a modelagem da turbulência pelo método k-ε. O software utiliza o método de Petrov-Garlekin Modificado.

O Método Petrov-Garlekin foi desenvolvido por Brooks e Hughes (1982). Denomina-se desta maneira os métodos cujas funções de ponderação não coincidem com as funções de forma para os termos da equação.

"A função de ponderação é composta pela função de forma, acrescida de um termo convectivo. Este último é modulado por um coeficiente dependente do número de Peclet no elemento discretizado. Uma vez desenvolvidas algebricamente, as expressões se simplificam para as formas típicas derivadas a partir do método de Galerkin para os elementos finitos, porém acrescidas de um novo termo originado do termo convectivo presente na função peso. O termo adicional assemelha-se a uma difusão adicional, atuante na direção do escoamento, e age localmente em cada elemento. Fato este, que estabiliza a resolução numérica iterativa dos sistemas lineares, sem no entanto provocar uma dissolução da solução de problemas convectivo dominantes" (HWANG, 2008)

O Método de Petrov-Garlekin Modificado apresenta as seguintes vantagens: precisão dos fluxos de recirculação e secundários; previsão de queda de pressão; estabilidade de convecção natural; precisão e estabilidade do fluxo compressível; estabilidade do balanço energético; resistências distribuídas atribuídas a volumes.

A Figura 19 apresenta a malha gerada pelo Autodesk CFD para a simulação aerodinâmica, tanto da estrutura do edifício como no contorno externo do túnel fictício.



Figura 19 – Malha discretizada na simulação em CFD



### 3.3 VALIDAÇÃO DO CFD COM RESULTADOS EM TÚNEL DE VENTO.

Para considerar validado a metodologia de modelagem em CFD e poder extrapolar para demais estudos, compara-se resultados em túnel de vento com a simulação computacional e considera-se um modelo adequado caso haja similaridade dos resultados.

A etapa de validação não utiliza o edifício estudado nesta dissertação, mas é reproduzido em CFD o estudo em túnel de vento apresentados por Kim e Kand (2013), assim é considerado validado se os resultados do túnel de vento e do CFD forem similares.

Comparou-se os resultados em túnel de vento com os obtidos pelo Autodesk CFD para um edifício com lado frontal de 40m e altura de 160m. Estas dimensões e proporções relativamente próximas ao modelo proposto nesta dissertação (20x120m), sendo este o um dos aspectos avaliados para a escolha.

O Gráfico 3 apresenta o perfil de deflexão do vento adotado para validação. Este perfil é diferente do adotado na dissertação visto que foi o adotado no estudo em túnel de vento por Kim e Kand (2013).



Gráfico 3 – Perfil de deflexão da velocidade do vento para o estudo de validação



A Figura 20 apresenta os resultados obtidos em túnel de vento (a) e os obtidos em simulação computacional pelo CFD (b). As imagens apresentam os coeficientes de pressão – Cp. O estudo em CFD apresenta um pico de pressão na parte superior não encontrado no estudo em túnel de vento, possivelmente proveniente por erro numérico da discretização de malha. No restante da estrutura, ambas apresentam a região central superior com Cp próximo de 0,8 regredindo para as bordas e regiões mais baixas com menor pressão.



Figura 20 – Comparativo de resultados entre túnel de vento e CFD



Considerando que os resultados apresentarem similaridade das zonas de distribuição de pressões e valores próximos para ambos resultados, julga-se o modelo

em CFD adequado e validado para estudos de caracterização aerodinâmica em edifícios. Ressalva-se que os resultados não são idênticos, contudo, estão dentro de uma faixa de variação aceitável dos resultados.

A validação é justificada por: apresentar resultados próximos ao túnel de vento, método considerado mais preciso para determinação de carga de vento; por ter geometria similar ao modelo em análise nesta dissertação.

As ressalvas são: nesta simulação adotou-se um perfil de velocidade diferente do adotado na dissertação para seguir o padrão de Kim e Kand (2013); os resultados são para geometria retangular, enquanto nesta dissertação haverá também cavidades recuadas formando a seção H.

### 3.4 ANÁLISE DINÂMICA DA ESTRUTURA EM ELEMENTOS FINITOS

Os elementos da estrutura foram discretizados em: elementos de barras (pórtico) para vigas e pilares; elementos de casca, para pilares parede; elementos de placa com características de diafragma rígido, para lajes. Os elementos de casca são formados por elementos triangulares de 3 nós e elementos quadriláteros de 4 nós, adaptando-se automaticamente à geometria.

Nesta dissertação adota-se, para a análise dinâmica, o método Hilber-Hughes-Taylor – HHT (HILBER, H. M.; HUGHES, T. J. R.; TAYLOR, 1977), que é um aprimoramento do método de Newmark (1959). O intervalo de tempo é de 0,01s com duração de 30s.

O método de integração de Newmark (1959) é um dos mais populares e usados em análises dinâmicas. O método adota dois parâmetros, gama e beta, que garantem a estabilidade incondicional da solução dentro de algumas restrições de valores. Quando for condicionalmente estável, deve-se adotar um intervalo de acréscimo de tempo (dt) menor que dt crítico.

"O método HHT é um algoritmo incondicionalmente estável, o que significa que o tamanho do passo de tempo não necessita ser limitado como ocorre com os algoritmos explícitos onde existe um tamanho de passo de tempo que não deve ser excedido" (GRECO *et al.*, 2010). Contudo, vale ressaltar que o incremento de tempo deve ser controlado e satisfatório para não implicar em perda de precisão, diminuição da amplitude e alargamento do período. Segundo Fonseca (2008), uma das

diferenças do Método HHT para o de Newmark é que se tem "a aceleração variando quadraticamente ou cubicamente no passo de tempo dt, ou seja, a precisão máxima possível é de quarta ordem".

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi realizado o processamento da estrutura a fim de determinar os primeiros modos de vibração, passo importante para inserção dos dados no método do vento sintético com propósito de obter o carregamento com séries de harmônicos ressonantes. Da Figura 21 a 26 apresenta-se graficamente os resultados da análise modal para os 12 primeiros modos de vibração.



Fonte: Autor



Fonte: Autor



Figura 23 – Representação dos modos de vibração 5 e 6

Fonte: Autor



Fonte: Autor



Figura 25 – Representação dos modos de vibração 9 e 10

Fonte: Autor



Figura 26 – Representação dos modos de vibração 11 e 12

Fonte: Autor

Observa-se que o 1º modo de vibração foi de 0,25. Segundo Cachuço (2004 *apud* Scharnberg (2018)), a frequência natural pode ser estimada como 25/H, onde H é a altura da edificação. Desta forma, o 1º modo de vibração é estimado em 0,208 Hz. A Norma NBR 6123 (ABNT, 1988) também fornece um método teórico para estimar a frequência natural, resultando em 0,128 Hz.

O valor obtido neste trabalho é maior visto que se prezou muito em manter a estrutura estável e com deslocamentos horizontais à ação do vento no estado limite de serviço, aumentou-se a rigidez tanto pelo núcleo de rigidez com um pilar-parede em U como em pilar-paredes periféricos em L. Todavia, o valor ainda é próximo do sugerido pelo método de Cachuço (2004).

Observa-se visualmente que os dois primeiros modos de vibração são de flexão em X e em Y, respectivamente, e os demais são predominantemente relacionados a flexão e torsão. A análise dos modos de vibração é uma maneira de avaliar como os fenômenos observados podem se manifestar na prática.

# 4.1 ANÁLISE AERODINÂMICA

Para as análises feitas e resultados que serão apresentados, utilizou-se a convenção apresentada na Figura 27 com a incidência a 0º sendo frontal às cavidades recuadas e os eixos adotados.



Figura 27 – Convenção do ângulo de incidência

### Fonte: Autor

A convenção de nomenclatura para apresentação dos resultados será a seguinte:

- H0: Seção H com incidência de vento a 0°;
- R0: Seção retangular com incidência de vento a 0°;
- H45: Seção H com incidência de vento a 45°;
- R45: Seção retangular com incidência de vento a 45°;
- H90: Seção H com incidência de vento a 90°;
- R90: Seção retangular com incidência de vento a 90°;

# 4.1.1 Seção retangular

Para determinação do esforço estático do vento na seção retangular, não se fez distinção do ângulo de incidência de 0º ou de 90º, pela simetria. O Gráfico 4 apresenta o gráfico com o processo iterativo da simulação em CFD para geração dos valores de pressão.


Na face frontal, visto pela Figura 28, ocorre o acréscimo de pressão conforme há o acréscimo de altura até a parte final onde ocorre uma diminuição. Observa-se também que próximo das arestas laterais há uma forte redução da pressão. Entre 60 e 110 metros de altura as pressões variam predominantemente em 1200 Pa.





## Fonte: Autor

A Figura 29 mostra a face lateral sofrendo sucções com a ocorrência de diminuição da magnitude ao longo do comprimento paralelo ao fluxo de vento. Desta forma, em regiões mais elevadas a pressão mais a barlavento chega a -900 Pa e sofre redução até -500 Pa. Observa-se que quanto menor a cota, menor a magnitude.



A Figura 30 apresenta as pressões na face posterior (sotavento) sofrendo sucção na região superior de -470 Pa e na região central de -400 Pa.





## Fonte: Autor

Os resultados obtidos pelo ensaio em CFD para o edifício com seção retangular demonstram que na face frontal ao fluxo de vento ocorre sobrepressão enquanto nas demais ocorre sucção. Este comportamento já era esperado, tendo em vista o conhecimento já difundido a respeito deste tipo de geometria.

Este ensaio apresenta os dados de referência para que haja comparação com os dados da seção H, visando analisar a influência das cavidades recuadas.

## 4.1.2 Seção H com vento a 0º

O Gráfico 5 apresenta o processo iterativo da simulação em CFD para geração dos valores de pressão no caso de geometria com seção H e incidência do vento a 0º.



### Fonte: Autor

A Figura 31 apresenta as pressões geradas na face frontal, desprezando a região da cavidade recuada. Percebe-se que a faixa mais próxima da aresta apresenta valores menores. Na região mais interna os valores são crescentes de 900 a 1600 Pa, ao longo da altura.





## Fonte: Autor

A Figura 32 apresenta as pressões na face frontal da cavidade recuada a barlavento. Observa-se que a pressão se mantém próximo de 1000 Pa para a região mais baixa e atinge 1200 Pa para a região mais alta. Nas extremidades há redução da pressão.



Figura 32 – Pressão estática na face frontal da cavidade recuada

Fonte: Autor

A Figura 33 mostra que a face lateral da cavidade a barlavento tem valores menores nas extremidades e maior na região central, entre 40 e 100 metros de altura, atingindo 1100 Pa.



Figura 33 – Pressão estática na face lateral da cavidade a barlavento

Fonte: Autor

A Figura 34 mostra a face lateral sofrendo sucções com a ocorrência de diminuição da magnitude ao longo do comprimento paralelo ao fluxo de vento. Desta forma, em regiões mais elevadas a pressão mais a barlavento chega a -1300 Pa e sofre redução até -550 Pa. Observa-se que quanto menor a cota, menor a magnitude.



Pela Figura 35 percebe-se que as sucções geradas na face posterior ao fluxo do vento são maiores nas extremidades e menor na região central. Nas extremidades alcançam -550 Pa enquanto na região central (entre 20 e 80 metros de altura) apenas -475 Pa.





## Fonte: Autor

Pela Figura 36 percebe-se que pressão gerada na face da cavidade a sotavento é crescente ao longo da altura com valores de -500 Pa para alturas acima de 90 metros.



Figura 36 – Pressão estática na face posterior na cavidade recuada (sotavento)



Pela Figura 37 percebe-se que as sucções geradas na face lateral da cavidade recuada na região posterior ao fluxo do vento são maiores nas extremidades e menor na região central. Nas extremidades alcançam -550 Pa enquanto na região central (entre 20 e 90 metros de altura) apenas -450 Pa.



Figura 37- Pressão estática na face lateral da cavidade recuada a sotavento

Fonte: Autor

Na seção H com incidência de vento a 0º, frontal à cavidade recuada, percebese que ocorre sobrepressão nas faces da cavidade a barlavento e sucção na cavidade a sotavento.

Isto faz com que haja esforços que tendem empurrar (alargar) as paredes da cavidade a barlavento e puxar as paredes a sotavento (estreitar). Esse fenômeno pode não ser percebido na análise global devido à possível simetria de esforço, anulando-se no somatório, mas causando efeitos locais.

Nesse sentido, vale uma analogia com dimensionamento de vigas metálicas de seção I. Verifica-se a flambagem lateral por torsão (efeito global) e também as flambagem local da alma e da mesa. Esse fenômeno pode não ser percebido na análise global, mas não pode ser desprezada.

4.1.3 Seção retangular com vento a 45º

O gráfico 6 apresenta o processo iterativo da simulação em CFD para geração dos valores de pressão no caso de geometria com seção R e incidência do vento a 45º.



## Fonte: Autor

A Figura 38 apresenta as pressões geradas na face frontal. Percebe-se que a faixa mais próxima da aresta frontal apresenta valores maiores cujos valores variam de 600 a 725 Pa.



A Figura 39 apresenta as pressões geradas na face posterior (sotavento). Percebe-se que a faixa mais próxima da aresta traseira apresenta valores menores cujos valores variam de -250 a -450 Pa.





Percebe-se que o escoamento do vento com a seção a 45º ocorre de forma mais aerodinâmica do que com a face perpendicular ao fluxo, o que resulta em menores magnitudes de pressão no edifício. Este comportamento já era esperado, pois estruturas aerodinâmicas geram menos pressões do que estruturas rombudas.

## 79

# 4.1.4 Seção H com vento a 45º

O Gráfico 7 apresenta o gráfico com o processo iterativo da simulação em CFD para geração dos valores de pressão no caso de geometria com seção H e incidência do vento a 45°.



### Fonte: Autor

A Figura 40 apresenta as pressões geradas na face frontal. Percebe-se que a faixa mais próxima da aresta frontal apresenta valores maiores cujos valores variam de 600 a 750 Pa. Dentro da cavidade recuada os valores variam de 350 a 500 Pa, e na extremidade da face a pressão é de 175 Pa.



Fonte: Autor

A Figura 41 apresenta as pressões geradas na face posterior. Percebe-se que a faixa mais próxima da aresta traseira apresenta valores menores cujos valores variam de -350 a -400 Pa. Dentro da cavidade recuada os valores variam de -300 a - 400 Pa.



Assim como na seção retangular, na seção H o escoamento do vento com a seção a 45º ocorre de forma mais aerodinâmica do que com a face perpendicular ao fluxo, o que resulta em menores magnitudes de pressão no edifício.

4.1.5 Seção H com vento a 90°

O Gráfico 8 apresenta o gráfico com o processo iterativo da simulação em CFD para geração dos valores de pressão no caso de geometria com seção H e incidência do vento a 90°.



### Fonte: Autor

A Figura 42 apresenta as pressões geradas na face frontal. Percebe-se que a faixa mais próxima da aresta apresenta valores menores. Na região mais interna os valores são crescentes de 700 a 1200 Pa, ao longo da altura.





A Figura 43 mostra a face lateral sofrendo sucções com a ocorrência de diminuição da magnitude ao longo do comprimento paralelo ao fluxo de vento. Desta forma, na região mais a barlavento, as pressões são de magnitude maior e variam de -900 Pa a -1300 Pa, enquanto na região mais a sotavento, as pressões variam de -350 Pa a - 450 Pa.





A Figura 44 apresenta as sucções geradas na parede dentro da cavidade recuada na face lateral. Observa-se, assim como nos demais casos de face lateral ao fluxo, sucções com magnitude crescente ao longo da altura, variando de -550 Pa a - 700 Pa.



# Figura 44– Pressão estática na face lateral nos fundos da cavidade recuada



A Figura 45 apresenta as pressões na face posterior (sotavento) sofrendo sucção na região superior de -450 Pa e na região central de -350 Pa.





### Fonte: Autor

No caso da seção H com fluxo a 90º ocorre comportamento similar à seção retangular na face frontal e posterior. Na face lateral, as sução nas paredes paralelas ao fluxo também apresenta comportamento similar, mas dentro da cavidade as paredes são succionadas, causando um efeito de puxa-las.

4.2 ANÁLISE DINÂMICA 4.2.1 Incidência de vento a 0°

# SEÇÃO H (H0)

Nas análises apresentadas neste capítulo, os resultados para o topo do edifício serão em relação ao ponto da extremidade do canto superior esquerdo. Os deslocamentos são negativos quando ocorrem no sentido contrário ao eixo do plano cartesiano em questão.

Para análises da tensão de cisalhamento do núcleo de rigidez, adotou a base do pilar-parede (Figura 17), onde tende a estar a maior tensão. Os valores da tensão de cisalhamento são apresentados em 3 gráficos, cada um deles correspondem a um dos painéis do pilar parede.

O Gráfico 9 apresenta os deslocamentos no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 0°. Observa-se que no eixo X os deslocamentos são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de -35,5 cm. No eixo Y o pico é de 17,6 cm.





### Fonte: Autor

No Gráfico 9 os deslocamentos em X estão em verde e os deslocamentos em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical o deslocamento, variando de -40 a 20 cm.

Observa-se que a amplitude dos deslocamentos em X ocorre de maneira quase constante no intervalo de -30 a 10 cm com um pequeno aumento das amplitudes entre 12 e 19 s, enquanto as amplitudes dos deslocamentos em Y vão aumentando ao longo do tempo até 15 s quando ocorre uma tendência de estabilização das oscilações. As faces transversais apesar de estarem sujeitas a pressões iguais em direção oposta sofrem este processo de oscilação crescente até determinada amplitude causada por efeitos dinâmicos como o despendimento de vórtices e a concentração de energia nos picos de rajadas expresso pelo espectro de potência.

O Gráfico 10 apresenta as acelerações no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 0º. Observa-se que no eixo X as acelerações são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de -75 cm/s². No eixo Y o pico é de 47,6 cm/s².



### Gráfico 10 – Acelerações no topo do edifício para H0

### Fonte: Autor

No Gráfico 10 as acelerações em X estão em verde e as acelerações em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a aceleração, variando de -100 a 100 cm/s<sup>2</sup>.

Percebe-se que as acelerações ocorrem de maneira inversa aos deslocamentos visto que as concavidades ficam invertidas. Este comportamento já é esperado para movimentos oscilatórios, visto que enquanto ocorre um deslocamento positivo há uma desaceleração até um ponto limite em que a velocidade é nula e o corpo passa a ser acelerado no sentido contrário. Nota-se que o comportamento de crescimento da magnitude ao longo do tempo até uma estabilização também ocorre para as acelerações em Y, assim como os deslocamentos.

O Gráfico 11 apresenta as rotações em torno do eixo Z, tanto para rotação quanto para aceleração angular. A Rotação apresenta pico de -0,007 Rad e a aceleração angular -0,022 Rad/s<sup>2</sup>.



Gráfico 11 – Rotações em torno do eixo Z para H0



No Gráfico 11 as rotações estão em verde e as acelerações angulares em roxo no eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical, que varia de -0,03 a 0,03, estão a rotação (Rad) e a aceleração angular (Rad/s<sup>2</sup>).

O Gráfico 12 apresenta a tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez do edifício. A torção causada pelo vento no edifício causa torções nos pilares, destes o núcleo de rigidez é o principal. Desta forma, escolheu-se analisar o núcleo de rigidez para analisar a influência da torção. Contudo, vale ressaltar que todos os pilares estão sujeitos a torção e devem ser verificados para tal caso. O pico de cisalhamento gerado é de 4,94 Mpa.







No Gráfico 12 as cores verde, roxo e amarelo representam cada um dos 3 painéis que compõem o núcleo de rigidez. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a tensão de cisalhamento, variando de 0 a 4 Mpa.

# SEÇÃO RETANGULAR (R0)

O Gráfico 13 apresenta os deslocamentos no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 0°. Observa-se que no eixo X os deslocamentos são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de -52,1 cm. No eixo Y o pico é de 20,5 cm.





#### Fonte: Autor

No Gráfico 13 os deslocamentos em X estão em verde e os deslocamentos em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical o deslocamento, variando de -60 a 30 cm.

O comportamento dos gráficos de deslocamento para a seção retangular é similar ao desenvolvido para a seção H (Gráfico 8). Observa-se o desenvolvimento progressivo dos deslocamentos transversais causados pelos efeitos dinâmicos e uma faixa de amplitude maior dos deslocamentos em X entre 10 e 17 s.

O Gráfico 14 apresenta as acelerações no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 0º. Observa-se que no eixo X as acelerações são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de -160,2 cm/s². No eixo Y o pico é de -59 cm/s².



Gráfico 14 – Acelerações no topo do edifício para R0



No Gráfico 14 as acelerações em X estão em verde e as acelerações em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a aceleração, variando de -200 a 200 cm/s<sup>2</sup>.

Percebe-se que os gráficos das acelerações são compostos pela superposição das parcelas estacionárias e flutuantes havendo, todavia, o desenho claro das concavidades e da relação com o movimento oscilatório e inversão em relação ao deslocamento. As acelerações em Y são crescentes até a estabilidade em um movimento com amplitudes mais constantes.

O Gráfico 15 apresenta as rotações em torno do eixo Z, tanto para rotação quanto para aceleração angular. A Rotação apresenta pico de -0,007 Rad e a aceleração angular 0,025 Rad/s<sup>2</sup>.





### Fonte: Autor

No Gráfico 15 as rotações estão em verde e as acelerações angulares em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical, que varia de -0,03 a 0,03, estão a rotação (Rad) e a aceleração angular (Rad/s<sup>2</sup>).

O Gráfico 16 apresenta a tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez do edifício. O pico de cisalhamento gerado é de 7,61 Mpa.





### Fonte: Autor

No Gráfico 16 as cores verde, roxo e amarelo representam cada um dos 3 painéis que compõem o núcleo de rigidez. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a tensão de cisalhamento, variando de 0 a 8 Mpa.

# **ANÁLISE COMPARATIVA**

Após a análise dos Gráficos de 9 a 16, nota-se que as cavidades recuadas causam efeito favorável à estrutura caso se considere, para efeito do vento, a envoltória retangular. Causou-se menores esforços e respostas. O Gráfico 17 apresenta uma comparação entre os dois casos.

Percebe-se que para todos os casos, a consideração das cavidades na seção H reduziram as respostas (deslocamento, aceleração, rotação e aceleração angular) e a tensão máxima de cisalhamento no núcleo de rigidez.



Gráfico 17 – Respostas máximas da estrutura para vento em 0°

Nota-se que os deslocamentos no topo tiveram uma redução na ordem de 30% na seção H. As cavidades recuadas na direção do vento geraram um efeito benéfico ao sistema e contribuíram para a redução dos deslocamentos e demais esforços, o que pode significar uma considerável economia para executar a estrutura.

A tensão de cisalhamento, que sofre forte influência pela ação do vento por causa do carregamento transversal e da torção causada em torno do eixo Z, teve um considerável aumento da seção H para a retangular. Os valores maiores para a seção retangular já poderiam ser esperados, visto os resultados dos testes em túnel de vento encontrados por Lam (2009).

O espectro de potência, apresentado na Figura 13, sofre uma considerável redução com as cavidades recuadas. Esta redução do esforço do vento leva a menores esforços e resposta da estrutura.

O espectro de potência aqui discutido foi gerado por simulação em túnel de vento para a seção H, enquanto o método do vento sintético (FRANCO, 1993) adota, de forma padrão, o espectro de potência de Davenport. Esta consideração pode levar a variações no resultado, assim como a utilização de simulação em CFD e não em túnel de vento. Apesar dessas ressalvas, os resultados demonstram coerência.

A geração de carga do vento por processos que consideram a envoltória retangular e posterior aplicação na geometria, para a direção de 0º, não gerou perda de segurança, visto que as cavidades causam um efeito favorável à estrutura.

Contudo, essa consideração pode levar a superdimensionamento e elevação dos custos de construção.

## 4.2.2 Incidência de vento a 45°

# SEÇÃO H (H45)

O Gráfico 18 apresenta os deslocamentos no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 45°. Observa-se que no eixo X os deslocamentos são maiores, por estar numa direção com menor rigidez, e alcançam um pico de -48 cm. No eixo Y o pico é de 28 cm.



### Fonte: Autor

No Gráfico 18 os deslocamentos em X estão em verde e os deslocamentos em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical o deslocamento, variando de -50 a 30 cm.

Para o caso de incidência de vento a 45° não há uma face transversal definida, sendo duas faces simultaneamente frontais e duas posteriores. Esta situação ocasiona nos gráficos a ausência do fenômeno observado a 0° dos deslocamentos crescentes para Y até uma faixa de amplitudes constantes. Mesmo com os efeitos dinâmicos, as duas direções comportam-se como sob ação direta das rajadas do vento, o que proporciona aos gráficos um comportamento de amplitudes mais constante. Os deslocamentos em X variam predominantemente na faixa de -50 a 15 cm com redução das amplitudes a partir de 23 s, enquanto os deslocamentos em Y variam entre 0 e 20 cm com alguns intervalos de tempo extrapolando estes limites.

O Gráfico 19 apresenta as acelerações no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 45º. Observa-se que no eixo X as acelerações são maiores e alcançam um pico de -152,4 cm/s². No eixo Y o pico é de -135,5 cm/s².





### Fonte: Autor

No Gráfico 19 as acelerações em X estão em verde e as acelerações em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a aceleração, variando de -200 a 200 cm/s<sup>2</sup>.

Para a incidência a 45º a parcela flutuante das acelerações passam a ser mais relevantes em relação a estacionária, o que torna o gráfico menos claro em relação as concavidades estacionárias.

O Gráfico 20 apresenta as rotações em torno do eixo Z, tanto para rotação quanto para aceleração angular. A Rotação apresenta pico de -0,018 Rad e a aceleração angular 0,075 Rad/s<sup>2</sup>.





### Fonte: Autor

No Gráfico 20 as rotações estão em verde e as acelerações angulares em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical, que varia de -0,01 a 0,01, estão a rotação (Rad) e a aceleração angular (Rad/s<sup>2</sup>).

O Gráfico 21 apresenta a tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez do edifício. O pico de cisalhamento gerado é de 6,40 Mpa.





### Fonte: Autor

No Gráfico 21 as cores verde, roxo e amarelo representam cada um dos 3 painéis que compõem o núcleo de rigidez. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a tensão de cisalhamento, variando de 0 a 7 Mpa.

# **SEÇÃO RETANGULAR (R45)**

O Gráfico 22 apresenta os deslocamentos no topo da estrutura para a carga de vento com incidência a 45°. Observa-se que no eixo X os deslocamentos são maiores, por estar na direção de menor rigidez, e alcançam um pico de -64,0 cm. No eixo Y o pico é de 22,5 cm.



Fonte: Autor

No Gráfico 22 os deslocamentos em X estão em verde e os deslocamentos em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical o deslocamento, variando de -70 a 40 cm.

O comportamento dos gráficos para deslocamentos em R45 é similar ao apresentado para H45, não havendo uma definição de deslocamentos transversais e um comportamento de amplitudes mais constantes.

O Gráfico 23 apresenta as acelerações no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 45°. Observa-se que no eixo X as acelerações são maiores e alcançam um pico de 498,2 cm/s². No eixo Y o pico é de 154,8 cm/s².





#### Fonte: Autor

No Gráfico 23 as acelerações em X estão em verde e as acelerações em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a aceleração, variando de -400 a 500 cm/s<sup>2</sup>.

Se para H45 as parcelas flutuantes ganharam destaque nos gráficos, para R45 tornam-se ainda mais relevantes e já não é mais possível definir claramente as acelerações estacionárias.

O Gráfico 24 apresenta as rotações em torno do eixo Z, tanto para rotação quanto para aceleração angular. A Rotação apresenta pico de -0,019 Rad e a aceleração angular 0,110 Rad/s<sup>2</sup>.





No Gráfico 24 as rotações estão em verde e as acelerações angulares em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical, que varia de -0,02 a 0,02, estão a rotação (Rad) e a aceleração angular (Rad/s<sup>2</sup>).

O Gráfico 25 apresenta a tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez do edifício. O pico de cisalhamento gerado é de 8,19 Mpa.





### Fonte: Autor

No Gráfico 25 as cores verde, roxo e amarelo representam cada um dos 3 painéis que compõem o núcleo de rigidez. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a tensão de cisalhamento, variando de 0 a 9 Mpa.

# ANÁLISE COMPARATIVA

Após a análise dos Gráficos 18 a 25, nota-se que na maioria dos casos as cavidades recuadas causam efeito favorável à estrutura, com exceção aos

deslocamentos no eixo Y que aumentaram de magnitude na análise H45. O Gráfico 26 apresenta uma comparação entre os dois casos.

Percebe-se que o efeito geral das cavidades para incidência de vento a 45° gera uma variação significativa na comparação das respostas para os casos H45 e R45. O principal deslocamento (eixo X) da estrutura apresenta uma redução de 25% para a seção H.





### Fonte: Autor

Nota-se que os deslocamentos no topo tiveram uma redução na ordem de 25% na seção H. As cavidades recuadas obliquas a direção do vento geraram um efeito benéfico ao sistema e contribuíram para a redução dos deslocamentos e demais esforços, o que pode significar uma considerável economia para executar a estrutura.

A tensão de cisalhamento, que sofre forte influência pela ação do vento por causa do carregamento transversal e da torção causada em torno do eixo Z, teve uma redução na seção H comparado com a retangular.

A geração de carga do vento por processos que consideram a envoltória retangular e posterior aplicação na geometria, para a direção de 45°, causa superdimensionamento e elevação dos custos de construção visto que as cavidades causam efeito favorável. Vale ressaltar que não gerou perda de segurança.

4.2.3 Incidência de vento a 90°

# **SEÇÃO H (H90)**

O Gráfico 27 apresenta os deslocamentos no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 90°. Observa-se que no eixo Y os deslocamentos são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de -65,4 cm. No eixo X o pico é de 18,7 cm.







No Gráfico 27 os deslocamentos em X estão em verde e os deslocamentos em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical o deslocamento, variando de -100 a 100 cm.

Para os deslocamentos longitudinais em Y as amplitudes são mais constantes enquanto os deslocamentos transversais em X começam crescentes e depois tornamse decrescentes ficando quase nulo ao fim do ciclo de análise de 30 s. O comportamento em X de começar nulo e crescer ao longo do tempo era esperado, a novidade na análise foi as cavidades causarem esse efeito do ciclo se tornar decrescente novamente.

O Gráfico 28 apresenta as acelerações no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 90°. Observa-se que no eixo Y as acelerações são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de 170,7 cm/s<sup>2</sup>. No eixo X o pico é de -102,4 cm/s<sup>2</sup>.



Gráfico 28 – Acelerações no topo do edifício para H90

No Gráfico 28 as acelerações em X estão em verde e as acelerações em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a aceleração, variando de -200 a 200 cm/s<sup>2</sup>.

Percebe-se que as acelerações ocorrem de maneira inversa aos deslocamentos visto as posições das concavidades dos gráficos ao longo do tempo. Nota-se que o comportamento de crescimento da magnitude ao longo do tempo até uma estabilização também ocorre para as acelerações em Y, assim como os deslocamentos. Percebe-se ainda que as acelerações são compostas pela superposição das parcelas estacionárias e flutuantes.

O Gráfico 29 apresenta as rotações em torno do eixo Z, tanto para rotação quanto para aceleração angular. A Rotação apresenta pico de -0,029 Rad e a aceleração angular -0,017 Rad/s<sup>2</sup>.



### Gráfico 29 – Rotações em torno do eixo Z para H90

#### Fonte: Autor

No Gráfico 29 as rotações estão em verde e as acelerações angulares em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical, que varia de -0,03 a 0,03, estão a rotação (Rad) e a aceleração angular (Rad/s<sup>2</sup>).

O Gráfico 30 apresenta a tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez do edifício. O pico de cisalhamento gerado é de 4,48 Mpa.





### Fonte: Autor

No Gráfico 30 as cores verde, roxo e amarelo representam cada um dos 3 painéis que compõem o núcleo de rigidez. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a tensão de cisalhamento, variando de 0 a 5 Mpa.

# **SEÇÃO RETANGULAR (R90)**

O Gráfico 31 apresenta os deslocamentos no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 90°. Observa-se que no eixo Y os deslocamentos são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de -56,9 cm. No eixo X o pico é de 28,6 cm.





Fonte: Autor

No Gráfico 31 os deslocamentos em X estão em verde e os deslocamentos em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical o deslocamento, variando de -60 a 40 cm.

O comportamento dos gráficos para R90 é similar aos H90, havendo o crescimento das amplitudes em X e posterior decréscimo enquanto os deslocamentos longitudinais em Y se estabilizam em uma faixa quase constante de amplitudes após 10s.

O Gráfico 32 apresenta as acelerações no topo do edifício para a carga de vento com incidência a 90°. Observa-se que no eixo Y as acelerações são maiores, por estar sob ação frontal do vento, e alcançam um pico de 148,8 cm/s<sup>2</sup>. No eixo X o pico é de -123,5 cm/s<sup>2</sup>.





#### Fonte: Autor

No Gráfico 32 as acelerações em X estão em verde e as acelerações em Y em roxo. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a aceleração, variando de -200 a 200 cm/s<sup>2</sup>.

O Gráfico 33 apresenta as rotações em torno do eixo Z, tanto para rotação quanto para aceleração angular. A Rotação apresenta pico de -0,028 Rad e a aceleração angular -0,100 Rad/s<sup>2</sup>.



Gráfico 33 – Rotações em torno do eixo Z para R90

No Gráfico 33 as rotações estão em verde e as acelerações angulares em roxo no eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical, que varia de -0,01 a 0,02, estão a rotação (Rad) e a aceleração angular (Rad/s²).

O Gráfico 34 apresenta a tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez do edifício. O pico de cisalhamento gerado é de 4,70 Mpa.

# Gráfico 34 – Tensão de cisalhamento no núcleo de rigidez



### Fonte: Autor

No Gráfico 34 as cores verde, roxo e amarelo representam cada um dos 3 painéis que compõem o núcleo de rigidez. No eixo horizontal do gráfico, está o tempo, variando de 0 a 30 s e no eixo vertical a tensão de cisalhamento, variando de 0 a 5 Mpa.

# ANÁLISE COMPARATIVA

Após a análise dos Gráficos 27 a 34 nota-se que na maioria dos casos as cavidades recuadas causam efeito desfavorável à estrutura. Contudo, os deslocamentos e aceleração transversais em X e a aceleração angular sofreram

aumento na análise R90. O gráfico 35 apresenta uma comparação entre os dois casos.

Percebe-se que o efeito geral das cavidades para incidência de vento a 90° gera menor variação nas respostas comparado com os resultados para 0°, sendo menor que 15% para todos os casos com exceção para os deslocamentos e aceleração em X e aceleração angular.





### Fonte: Autor

Pelo Gráfico 35, percebe-se que os maiores deslocamentos foram gerados para o caso H90 em Y (frontal ao fluxo do vento), o qual as cavidades ficam na direção transversal à incidência do vento. Se nos casos com vento a 0° as cavidades causaram efeito favorável, para este caso o efeito foi desfavorável.

Esta é a direção que sofre o maior efeito de torção causado pela excentricidade entre o núcleo de rigidez e o núcleo geométrico. O efeito de torção pode acentuar as diferenças de deslocamento.

Os deslocamentos apresentados com incidência a 90° foram maiores do que com incidência a 0°, estando perpendicular a face plana (sem cavidades). Li *et al.* (2016) e (2017) obtiveram resultado de destaque dos efeitos dinâmicos para a incidência com a face frontal para o formato L, já para o estudo do formato V de Vogado (2018) os picos foram com um pequeno ângulo de defasagem com a perpendicular da face plana. Desta forma apresenta uma coerência dos resultados com a tendência observada por outros autores.

A tensão de cisalhamento, que sofre forte influência pela ação do vento por causa do carregamento transversal e da torsão causada em torno do eixo Z, teve um pequeno aumento da seção H para retangular.

A geração de carga do vento por processos que consideram a envoltória retangular e posterior aplicação na geometria, para a direção de 90°, não apresentou considerável variação para a maioria das análises com exceção dos deslocamentos transversais, visto que as cavidades estão localizadas nesta direção. Os deslocamentos frontais tiveram um aumento que causam perda de segurança, menor que 15% para a direção longitudinal.

# 4.2.4 Análise comparativa geral

O Gráfico 36 apresenta uma comparação entre todos os casos analisados para deslocamentos frontais e transversais. Percebe-se que os maiores deslocamentos foram gerados para o ângulo de incidência de 90º, tanto frontal como transversal.



Gráfico 36 - Deslocamentos para todos os casos



O deslocamento em H0 corresponde a 54,3% do deslocamento em H90, enquanto o deslocamento em R0 corresponde a 91,6% do R90. Estes dados evidenciam que a posição das cavidades recuadas é relevante e causam significativas variações na resposta da estrutura. A variação nos casos retangulares (R0 e R90) foi pouco significativa quando comparada com a variação nos casos de seção H (H0 e H90). Para o deslocamento frontal, para os casos H0 e H45 a redução do deslocamento com a presença das cavidades recuadas é mais significativo do que quando há acréscimo (H90). Em percentual, as variações favoráveis foram maiores que as variações desfavoráveis.

Para deslocamento transversal, apenas no caso H45 houve aumento do deslocamento. Nota-se que a cavidade recuada perpendicular ao fluxo de vento (H90) causou redução do deslocamento transversal.

Vários fatores (massa, amortecimentos, rigidez, altura, velocidade do vento, condições de contorno, etc) influenciam nos deslocamentos laterais, o que pode dificultar a comparação entre trabalhos. Para efeito de comparação, calcula-se a razão entre o deslocamento lateral e a altura dos edifícios.

Neste trabalho, a razão de deslocamento varia 0,0030 e 0,0055. Mohammadi et al. (2019) apresenta uma avaliação baseada na performance do vento de um arranha-céu com 47 andares, que obtém uma razão 0,0050. Sy, Yamada e Katsuchi (2019) realiza testes de interferência estática e dinâmica para examinar a existência e características do fluxo de vento do topo (wind-over-top flow) sobre edifícios altos, que obtém uma razão entre 0,0020 e 0,0190. Fernández-Cabán et al. (2020) investiga uma abordagem de sistema cyber-física para otimizar estruturas altas e delgadas, que obtém uma razão de 0,0014. Martinez-Paneda e Elghazouli (2020) propõe um sistema de amortecimento integrado que visa fornecer níveis de amortecimento relativamente altos através da mobilização de uma proporção da própria massa da estrutura e o trabalho apresenta um estudo de caso com razão de deslocamento de 0,0092. Wijesooriya et al. (2020) apresenta uma abordagem numérica para prever respostas dinâmicas induzidas pelo vento de edifícios altos, estudou-se um edifício alto com 184 m de altura que apresentou razão de deslocamento de 0,0030. Kim, Yoshida e Tamura (2019) investigou as características dinâmicas e instabilidade aerodinâmica de edifício super alto, para um tempo de retorno de 100 anos que apresentou uma razão de deslocamento 0,0035.

Em analise adimensional, considerando as ressalvas, os valores da razão de deslocamento lateral estão na mesma ordem de grandeza, o que reforça os resultados deste trabalho.

# 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, gerou-se cargas estáticas e dinâmicas para o modelo de edifício alto analisado com seção H e comparou com cargas para com uma envoltória retangular. Desta forma, pode-se verificar quais os efeitos que a simplificação geométrica causa para cálculo da carga de vento e na análise dinâmica. Utilizou-se, para a geração da carga do vento, simulação em CFD e o Método do Vento Sintético (Franco, 1993).

Os resultados obtidos pelo ensaio em CFD para o edifício com seção retangular demonstram que na face frontal ao fluxo de vento ocorre sobrepressão enquanto nas demais ocorre sucção. Este ensaio apresenta os dados de referência para que haja comparação com os dados da seção H, visando analisar a influência das cavidades recuadas.

No processo de geração da carga do vento por CFD percebeu-se um efeito local agindo nas regiões internas das cavidades que tendem a abrir as abas a barlavento (sobrepressão) e fechar as abas a sotavento (sucção).

Para a análise estrutural com incidência de vento a 0°, nota-se que as cavidades recuadas causam efeito favorável à estrutura caso se considere, para efeito do vento, a envoltória retangular. Percebe-se que para todos os casos, a consideração das cavidades na seção H reduziram as respostas, destacando-se os deslocamentos frontais que reduziram 32%.

Para a análise estrutural com incidência de vento a 45°, os deslocamentos no topo tiveram uma redução na ordem de 25% na seção H. As cavidades recuadas obliquas a direção do vento geraram um efeito benéfico ao sistema e contribuíram para a redução dos deslocamentos e demais esforços, o que pode significar uma considerável economia para executar a estrutura.

Para a análise estrutural com incidência de vento a 90°, nota-se que os deslocamentos longitudinais e totais sofreram aumento com a consideração das cavidades recuadas, evidenciando seu efeito desfavorável.

O caso crítico da análise foi para incidência a 90°, onde os deslocamentos frontais sofreram aumento de aproximadamente 15% para a seção H, este caso é considerado crítico pois a metodologia de simplificação geométrica pode levar a subdimensionamento e consequente a um possível colapso da estrutura.

Este trabalho, além de analisar os efeitos aerodinâmicos das cavidades recuadas, abordou o comportamento e a resposta estrutural para um tempo de análise de 30s. Evidenciou os efeitos transversais do vento que, apesar da simetria de carregamentos, geram instabilidade e ocasiona o surgimento de deslocamento ao longo do tempo. Notou-se também o comportamento oscilatório dos deslocamentos frontais e sua defasagem de fase com as acelerações, estas que podem sofrer maior ou menor influência da parcela flutuante em relação a estacionária.

Este trabalho apresenta importante contribuição no campo da análise dinâmica, destacando como ocorre as amplificações de deslocamentos e o comportamento da função resposta da estrutura, assim como a variação da intensidade e forma dos carregamentos dinâmicos do vento para a variação geométrica que a seção H ocasiona.

Fica evidente a necessidade de se realizar um estudo mais aprofundado para edifícios altos com seção geométrica não regular. Estudo em túnel de vento é recomendado, por gerar com segurança e precisão as cargas do vento, considerar os efeitos dinâmicos do carregamento (despendimento de vórtices e rajadas) e outras variáveis, como efeitos de vizinhança e topográficos.

Recomenda-se, desta maneira, que edifícios esbeltos de seção não regular sejam estudados com maior rigor e precisão que apenas pelos códigos normativos e que os efeitos dinâmicos sejam considerados. Desta maneira, pode-se garantir com maior efetividade a relação de segurança e economia dos projetos.

Para trabalhos futuros, sugere-se realização de estudo com maior quantidade de ângulos de incidência; variação das proporções das dimensões; análise da não linearidade física e geométrica; maior tempo de análise.

# REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações. 1988

ALMINHANA, G. W. ESTUDO COMPARATIVO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DAS CARACTERÍSTICAS AERODINÂMICAS DE UMA EDIFICAÇÃO ALTEADA EMPREGANDO DISTINTAS MODIFICAÇÕES DE FORMA NA SEÇÃO TRANSVERSAL. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

ALVES, F. T. Análise Estrutural de Cascas com o Elemento Finito CST-DKT. UFRJ, 2017.

AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1 ed. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

BASTOS, L. D. S.; SILVA, J. G. S. DA. MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DINÂMICO E ANÁLISE DE CONFORTO HUMANO. XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, v. 1, p. 19, 2016.

BLESSMANN, J. Acidentes causados pelo vento. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2001.

BLESSMANN, J. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. Porto Alegre: UFRGS, 2005.

BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 2, p. 238–252, 2007.

BOGGS, D.; HOSOYA, N.; COCHRAN, L. Sources of Torsional Wind Loading on Tall Buildings : Lessons From the Wind Tunnel. v. 40492, 2000.

BONO, G. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS EM DIFERENTES REGIMES UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

BROOKS, A.; HUGHES, T. J. R. treamline Upwind/Petrov-Galerkin Formulations for Convection Dominated Flow with Particular Emphasis on the Incompressible Navier-Stokes Equations. **Comp. Meths. Appl. Mech. Engng**, v. 32, p. 199–259, 1982.

CARINI, M. R. **Resposta dinâmica em torção de edifícios sob ação do vento**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

CARPEGGIANI, E. A. Determinação dos Efeitos Estáticos de Torção em Edifícios Altos Devidos à Ação do Vento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

CARRIJO, E. C. APLICAÇÃO DO ELEMENTO FINITO DKT À ANÁLISE DE CASCAS. USP, 1995.

CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures. 4<sup>a</sup> ed. Boston: Pearson, 2012.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **DYNAMICS OF STRUCTURES**. 3 ed. Berkeley: Computers & Structures, Inc, 2003.

COOK, R. D. et al. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4 ed. Madison: John Wiley & Sons, 2001.

CÓSTOLA, D.; ALUCCI, M. P. Application of CFD simulations for the calculation of external wind pressure coefficients on openings of a building. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 1, p. 145–158, 2011.

FENG, C.; GU, M.; ZHENG, D. Numerical simulation of wind effects on super high-rise buildings considering wind veering with height based on CFD. **Journal of Fluids and Structures**, v. 91, n. 1239, 2019.

FERNÁNDEZ-CABÁN, P. L. et al. Cyber-physical design and optimization of tall building dynamics using aeroelastic wind tunnel modeling. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 198, 2020.

FONSECA, F. T. DA. Sistema computacional para análise dinâmica geometricamente não-linear través do método dos elementos finitos. n. August 2008, p. 240, 2008.

FRANCO, M. Direct along-wind dynamic analysis of tall strucutures. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, p. 22, 1993.

GONÇALVES, R. M. et al. **Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos**. 2. ed. São Carlos / SP: SET/EESC/USP, 2007.

GRECO, M. et al. Análise dinâmica não linear geométrica de uma viga treliçada. **Nono Simpósio de Mecânica Computacional**, 2010.

HAO, W.; YANG, Q. Experimental investigation on coupled vibration characteristics of wind-excited tall buildings. **Advances in Structural Engineering**, v. 23, n. 9, p. 1948–1959, 2020.

HILBER, H. M.; HUGHES, T. J. R.; TAYLOR, R. L. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. **Earthq Eng Struct Dynam**, p. 283–292, 1977.

HWANG, E. Simulação Numérica De Escoamentos : Uma Implementação Com O Método Petrov-Galerkin. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

KASPER, F. R. S. Modelagem e simulação de motores à combustão interna por técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2003.

KIM, W.; YOSHIDA, A.; TAMURA, Y. Wind-induced aerodynamic instability of supertall buildings with various cross-sectional shapes. **International Journal of High-Rise Buildings**, v. 8, n. 4, p. 303–311, 2019.

KIM, Y. C.; KAND, J. Wind pressures on tapered and set-back tall buildings. **Journal** of Fluids and Structures, v. 39, p. 306–321, 2013.

LAM, K. M.; LI, A. Mode shape correction for wind-induced dynamic responses of tall buildings using time-domain computation and wind tunnel tests. **Journal of Sound and Vibration**, v. 322, n. 4–5, p. 740–755, 2009.

LAM, K. M.; WONG, S. Y.; TO, A. P. DYNAMIC WIND LOADING OF H- SHAPED TALL BUILDINGS. 2009.

LI, Y.; LI, Q. S; CHEN, F. Wind tunnel study of wind-induced torques on L-shaped tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 167, p. 41–50, 2017.

LI, Y.; LI, Q. S. Across-wind dynamic loads on L-shaped tall buildings. **Wind and Structures**, v. 23, p. 385–403, 2016.

LI, Y. et al. Investigation of wind effect reduction on square high-rise buildings by corner modification. **Advances in Structural Engineering**, v. 22, n. 6, p. 1488–1500, 2019.

LIANG, B.; TAMURA, Y.; SUGANUMA, S. Simulation of wind-induced lateral-torsional motion of tall buildings. **Computers & Structures**, 1997.

LIANG, S.; LIU, S.; LI, Q. S.; ZHANG, L.; GU, M. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, p. 1757–1770, 2002.

LIANG, S.; LIU, S.; LI, Q. S.; ZHANG, L.; GU, M. Torsional dynamic wind loads on rectangular tall buildings. **Engineering Structures**, v. 26, p. 129–137, 2004.

MARTINEZ-PANEDA, M.; ELGHAZOULI, A. Y. An integrated damping system for tall buildings. **Structural Design of Tall and Special Buildings**, v. 29, n. 7, p. 1–26, 2020.

MIGUEL, L. F. F. Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2003.

MOHAMMADI, A. et al. Performance Assessment of an Existing 47-Story High-Rise Building under Extreme Wind Loads. **Journal of Structural Engineering**, v. 145, n. 1, p. 04018232, 2019.

NEWMARK, N. M. A method of computation for structural dynamics. **ASCE J Enge Mach Div**, v. 85, p. 67–94, 1959.

PETRY, A. P. ANÁLISE NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS TRIDIMENSIONAIS EMPREGANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. RAMPONI, R.; BLOCKEN, B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. **Building and Environment**, v. 53, p. 34–48, 2012.

SANTOS, V. H. DOS. Comparação do método discreto da NBR 6123 e do método do vento sintético para edificações em concreto armado de múltiplos pavimentos. 2018.

SCHARNBERG, F. A. CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS ATRAVÉS DO ESPECTRO DAS CARGAS TOTAIS MEDIDAS EM TÚNEL DE VENTO. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

SCHLICHTING, H. Boundary-Layer Theory. 2. ed. New York: McGraw-Hill Inc, 1979.

SY, L. D.; YAMADA, H.; KATSUCHI, H. Interference effects of wind-over-top flow on high-rise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 187, n. November 2018, p. 85–96, 2019.

TANAKA, H. et al. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configuration. **Jnl. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 107–108, p. 179–191, 2012.

TSE, K. T. et al. Effects of corner modifications on wind loads and local pressures on walls of tall buildings. **Building Simulation**, v. 14, n. 4, p. 1109–1126, 2021.

VAZ, L. E. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

VERGEL, J. L. G. Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT usando Malhas Não-estruturadas. Universidade Estadual de Campinas, 2013.

VIEIRA, G. S. ESTUDO EXPERIMENTAL DOS ESFORÇOS SOLICITANTES EM UM EDIFÍCIO ALTO DEVIDOS À AÇÃO DO VENTO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DE EDIFICAÇÕES VIZINHAS. Universidade de Brasília, 2016.

VOGADO, M. W. CARACTERIZAÇÃO AERODINÂMICA DE EDIFÍCIOS ALTOS COM PLANTA EM FORMATO DE "V" ATRAVÉS DE ALTOS COM PLANTA EM **FORMATO DE "V" ATRAVÉS DE**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

WIJESOORIYA, K. et al. An uncoupled fluid structure interaction method in the assessment of structural responses of tall buildings. **Structures**, v. 25, p. 448–462, 2020.

WONG, S. Y.; LAM, K. M. Effect of recessed cavities on wind-induced loading and dynamic responses of a tall building. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 114, p. 72–82, 2013.

ZHANG, W. J.; XU, Y. L.; KWOK, K. C. S. Torsional vibration and stability of windexcited tall buildings with eccentricity. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 50, p. 299–308, 1993.

# **APÊNDICE**

# A - CARGA DO VENTO SEGUNDO A NBR 6123 (ABNT, 1988)

## AÇÃO ESTÁTICA DO VENTO (NBR 6123:1988)

## Força de Arrasto e Coeficiente de Arrasto

Gonçalves *et al.* (2007) comentam que para edificações cuja altura supera em muito as dimensões em planta, bem como possuem condições de aberturas dominantes à barlavento e à sotavento, a consideração da ação do vento passa a receber um tratamento dentro de um contexto global, na qual ocorre a superposição dos efeitos externos (forma) e internos (aberturas) obtendo um coeficiente único, Ca, denominado Coeficiente de Arrasto.

Consideração a formulação matemática abordada na NBR 6123 (ABNT, 1988), pode-se calcular a Força de Arrasto em uma face por meio da seguinte expressão (Equação 66):

$$Fa = Ca * q * A \tag{Eq. 66}$$

Onde a expressão para a Força de Arrasto, Fa, é função do coeficiente de arrasto Ca, pressão dinâmica do vento q e área frontal efetiva A.

A aplicação pratica do Coeficiente de Arrasto mais comum é em edifícios de múltiplos pavimentos, torres e estruturas isoladas, como destaca Gonçalves *et al.* (2007). A Força de Arrasto é a componente da força global na direção do vento e permite determinar ações com características globais.

O Coeficiente de Arrasto é determinado para o caso de baixa turbulência (Figura 47) e de alta turbulência (Figura 48). Segundo o item 6.5.3 da NBR 6123 (ABNT, 1988), a edificação é considerada de alta turbulência sob a condição de que a altura da mesma não exceda duas vezes a altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas na direção e sentido do vento incidente, a uma distância mínima de:

- 500 metros, para uma edificação de 40 metros de altura;
- 1000 metros, para uma edificação com até 55 metros de altura;
- 2000 metros, para uma edificação com até 70 metros de altura;
- 3000 metros, para uma edificação com até 80 metros de altura.

Segundo Gonçalves *et al.* (2007), para definir se dada edificação está situada em região de vento de alta turbulência, basta que se obtenha uma média das alturas das edificações vizinhas situadas a uma distância mínima da edificação de interesse, conforme a Figura 46.





Fonte: Gonçalves et al. (2007)

A Figura 46 ilustra a altura média dos edifícios situados na zona de interesse d<sub>min</sub> do edifício em estudo, destacado pela hachura cinza.

Conforme Santos (2018), para determinação dos coeficientes de arrasto, desenvolveram-se gráficos que são função das dimensões da edificação em planta L1 e L2, e função da altura H da edificação pela sua face de incidência de vento.



Figura 47 – Coeficiente de Arrasto para edificações com planta retangular em região de baixa turbulência

Fonte: Gonçalves (2007)

Pelas Figuras 47 e 48, percebe-se que quanto maior a relação da altura pela dimensão em planta maior será o Coeficiente de Arrasto. Tornando a esbeltez do edifício um fator relevante nos carregamentos devido ao vento.

# Figura 48– Coeficiente de Arrasto para edificações com planta retangular em região de alta turbulência



Fonte: Gonçalves (2007)

## Pressão do vento

A velocidade característica do vento V<sub>k</sub> é determinada por meio da velocidade básica do vento V<sub>0</sub> adequada ao local da construção e dos fatores S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>. Em que S<sub>1</sub> é o fator topográfico que considera as variações do terreno, S<sub>2</sub> é o fator de rugosidade, que considera a combinação da rugosidade do terreno e a variação da velocidade com a altura acima do terreno, e o S<sub>3</sub> é o fator estatístico que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

$$Vk = Vo * S1 * S2 * S3$$
 (Eq. 67)

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), a velocidade básica do vento,  $V_0$ , é a velocidade de uma rajada de 3s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano.

A pressão do vento q  $(N/m^2)$  é expressa pela formulação que leva em consideração a velocidade característica V<sub>k</sub> (m/s) do vento e a massa específica do ar  $\rho$ .

$$q = \frac{1}{2} * \rho * Vk^2$$
 (Eq. 68)



Figura 49 – Isopletas da velocidade básica do vento (m/s)

Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988) apud Santos (2018)

O fator S1 para o cálculo da velocidade característica leva em consideração as variações do relevo no entorno da edificação. Para terrenos planos ou fracamente acidentados, seu valor é igual a 1,0. Quando a edificação se localizar no topo de taludes ou morros, o valor de S1 será uma função da altura z, medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado.

Inclinação do talude/ morro (θ)	Fator topográfico (S <sub>1</sub> ) $S_1(z) = 1,0$		
θ≤3°			
$6^{\circ} \le \theta \le 17^{\circ}$	$S_1(z) = 1.0 + (2.5 - \frac{z}{d}) \tan (\theta - 3^\circ) \ge 1$		
θ≥45°	$S_1(z) = 1,0 + (2,5 - \frac{z}{d}) 0,31 \ge 1$		

Figura 50 – Fator topográfico em função da inclinação do talude

#### Fonte: Santos (2018)

Deve-se interpolar linearmente para  $3^{\circ} < \theta < 6^{\circ} < 17^{\circ} < \theta < 45^{\circ}$ . Para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção, adotar S1 = 0,9.

Onde: z = altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado; d = diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro;  $\theta$  = inclinação média do talude ou encosta do morro.

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), o fator S2 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.

Conforme Santos (2018):

"Este fator é função da altura da edificação, sendo dividida em 3 classes, A, B e C, sendo elas caracterizadas da seguinte maneira: Classe A: edificações com altura (ou dimensão horizontal) máxima de 20 metros e duração da rajada de vento em 3s. Classe B: edificações com altura (ou dimensão horizontal) entre 20 e 50 metros e duração da rajada de vento em 5s. Classe C: edificações com altura (ou dimensão horizontal) acima de 50 metros e duração da rajada de vento em 10s. Para esse mesmo fator S2, existem outras 5 subcategorias que levam em conta a rugosidade do terreno, a saber:

Categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões.

Categoria II: terrenos abertos com poucos obstáculos.

Categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos.

Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados.

Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e poucos espaçados." (SANTOS, 2018).

O fator S<sub>2</sub> usado no cálculo da velocidade do vento em uma altura Z acima do nível geral do terreno é obtido pela Equação 69. O fator de rajada Fr é sempre o correspondente à categoria II. A expressão acima é aplicável até a altura Zg, que define o contorno superior da camada de escoamento. Os parâmetros que permitem determinar S<sub>2</sub> para as cinco categorias da Norma são apresentados na Figura 51.

$$S2 = b * Fr * \left(\frac{z}{10}\right)^p$$
 (Eq. 69)

Figura 51 – Parâmetros meteorológicos para diferentes categorias e classes de terreno

Categoria	z <sub>g</sub> (m)	Parâmetro	Classes			
			Α	В	С	
1	250	b	1,10	1,11	1,12	
		р	0,06	0,065	0,07	
н		b	1,00	1,00	1,00	
	300	F,	1,00	0,98	0,95	
		р	0,085	0,09	0,10	
ш	350	b	0,94	0,94	0,93	
		р	0,10	0,105	0,115	
IV	420	b	0,86	0,85	0,84	
		р	0,12	0,125	0,135	
v	500	b	0,74	0,73	0,71	
		р	0,15	0,16	0,175	

#### Fonte: Santos (2018)

Onde:

Z = altura, em metros, medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

b = parâmetro meteorológico referente à categoria de rugosidade do terreno
 e à classe da edificação;

p = expoente da lei potencial de variação;

Fr = fator de rajada.

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), o fator estatístico S<sub>3</sub> é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. A velocidade básica V<sub>0</sub> é a velocidade do vento que apresenta um período

de recorrência médio de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade V<sub>0</sub> seja igualada ou excedida neste período é de 63%.

Os valores mínimos do fator S<sub>3</sub> são os indicados a seguir, baseado na Tabela 3 da NBR 6123 (ABNT, 1988).

S<sub>3</sub>= 1,10: para edificações onde comprometimentos estruturais das edificações devido a fatores destrutivos naturais possam afetar a prestação de serviços emergenciais (ex: hospitais, quartéis, bombeiros e forças de segurança).

S<sub>3</sub>= 1,00: Edificações residenciais, hoteleiras, industriais e comerciais com alto fator ocupacional.

S<sub>3</sub>= 0,95: Edificações industriais com baixo fator ocupacional.

S<sub>3</sub>= 0,88: Vedações em telhas, vidros e painéis.

S<sub>3</sub> = 0,83; Edificações temporárias.

# AÇÃO DINÂMICA DO VENTO (NBR 6123:1988)

Segundo Blessmann (2005), o processo da análise dos efeitos dinâmicos do vento é baseado em três hipóteses fundamentais. a) as componentes flutuantes do vento (rajadas) são processos estacionários<sup>5</sup>, com média zero; b) na determinação da resposta estrutural na direção do vento só é considerada a influência da componente flutuante nesta direção (resposta calculada sobre a estrutura na posição deformada causada pela ação estática do vento); c) a estrutura é discretizada em *n* partes.

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), "o modelo contínuo simplificado<sup>6</sup> pode ser adotado para edificações com seção constante, distribuição uniforme de massa,

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> "Um processo aleatório é estacionário se os seus parâmetros estatísticos (média, variância, autocorrelação, etc), determinados sobre a totalidade dos registros possíveis, são invariantes para qualquer deslocamento da origem do tempo" (BLESSMANN, 2005)

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> O modelo contínuo simplificado é calculado de forma usual para esforços internos e deslocamento seguindo um carregamento (estático + flutuante) resultante da pressão do vento q(z) variável ao longo da altura.

altura máxima de 150m e apoiadas exclusivamente na base". A norma considera na resposta dinâmica apenas a contribuição do modo fundamental que, em geral, a retenção só do primeiro modo na solução conduz a erros inferiores a 10%.

Admite-se que o primeiro modo de vibração pode ser representado com precisão pela Equação 70.

$$x = \left(\frac{z}{h}\right)^{\gamma}$$
 (Eq. 70)

Onde: z é a altura da coordenada, h é a altura total da edificação e γ é o expoente da forma modal.

A Tabela 1 mostra os valores  $\gamma$ , razão de amortecimento crítico  $\zeta$  e período fundamental.

Tabela 1 – Parâmetros para determinação dos efeitos dinâmicos						
Tipo de edificação	γ	ζ	$T_1 = 1 / f_1$			
Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem	1,2	0,020	0,05h+0,015h			
cortinas						
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas	1,6	0,015	0,05h + 0,012h			
para absorção de forças horizontais						
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	0,02h			
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção	1,7	0,010	0,015h			
uniforme						
Edifícios com estrutura de aço soldada	1,2	0,010	0,29√h – 0,4			
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008				
Estruturas de madeira	-	0,030				

# h = altura, em metros, do edifício. Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988)

Para uma edificação com propriedades variáveis com a altura, deve-se representar por meio de um modelo discreto, conforme Figura 52.



Figura 52 – Esquema para modelo dinâmico discreto.

Fonte: Blessmann (2015)

*Xi* – Deslocamento correspondente à coordenada i.

Ai – Área de influência correspondente à coordenada i.

Mi – Massa discreta correspondente à coordenada i.

Zi – Altura do elemento i sobre o nível do terreno.

n - Número de graus de liberdade.

Para cada modo j de vibração a força total é dada pela superposição das parcelas das forças média e flutuante em cada coordenada i. A força média é dada pela Equação 71.

$$\bar{X}i = q_0 b^2 C_{ai} \left(\frac{zi}{Zr}\right)^{2p}$$
(Eq. 71)

Onde:  $q_0$  é o valor da pressão dinâmica do vento ( $q_0 = 0,613Vp^2(N/m^2)$ ), a velocidade média de projeto (Vp) é dado pela Equação 72, Ai é a área de influência

para cada coordenada, Zi é a altura de cada coordenada em relação ao terreno, Zr é a altura de referência, sendo 10 metros. As variáveis b e p são valores em função da categoria de rugosidade do terreno (tabela 2), Cai é o coeficiente de arrasto.

Tabela 2 – Expoente p e b							
Categoria de rugosidade	Ι	П	Ш	IV	V		
р	0,095	0,15	0,185	0,23	0,31		
b	1,23	1,00	0,86	0,71	0,50		

$$\bar{V}p = 0.69V_0S_1S_3$$
 (Eq. 72)

## Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988)

A parcela flutuante da velocidade do vento, segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), é determinada pelas equações 73, 74 e 75.

$$\hat{X}i = F_H \psi_1 X_i \tag{Eq. 73}$$

$$\psi_1 = \frac{mi}{m_0} \tag{Eq. 74}$$

$$F_{H} = q_{0}b^{2}A_{0}\frac{\sum_{i=1}^{n}\beta iXi}{\sum_{i=1}^{n}\psi_{1}Xi^{2}}\xi$$
(Eq. 75)

Onde:  $\psi_1$  é a relação entre massa da coordenada i "*mi*" e a massa de referência " $m_{0i}$ ",  $F_H$  é o coeficiente de força,  $\beta i$  é um coeficiente que depende do coeficiente de arrasto, da relação entre a área de incidência do vento e a área de referência do pavimento e a altura da coordenada em questão e  $\xi$  é o coeficiente de amplificação dinâmica.

As Figuras 53-57 apresentam os gráficos para determinação do coeficiente de amplificação dinâmica para as cinco categorias de terreno. Com esses gráficos podem ser determinados os valores através de interpolação ou extrapolação.



Figura 53 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria I (L=1800 m), NBR 6123.

Fonte: Blessmann (2015)

Figura 54 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria II (L=1800 m), NBR 6123.



Fonte: Blessmann (2015)



Figura 55 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria III (L=1800 m), NBR 6123.

Fonte: Blessmann (2015)

Figura 56 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria IV (L=1800 m), NBR 6123.



Fonte: Blessmann (2015)



Figura 57 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria V (L=1800 m), NBR 6123.

Fonte: Blessmann (2015)

# **B – MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO PELO PYTHON**

import numpy as nu import pandas as pd import sympy as sym from math import pow

**#PROGRAMA PARA CALCULO DO VENTO SINTETICO - FRANCO 1993** 

print ("ESTE PROGRAMA CALCULA A DECOMPOSICAO DO ESPECTRO DE POTENCIA \nFORNECE A FUNCAO DA PARCELA DINAMICA DO CARREGAMENTO") t=float(input("Tempo de analise: ")) dt=float(input("Intervalo de tempo: ")) vp=float(input("Digite a velocidade de projeto: ")) print ("AGORA DEVE INFORMAR OS MODOS DE VIBRACAO DA EDIFICACAO (min 12)") qfm=int(input("Quantidade de modos de vibracao: "))

fm=nu.zeros((qfm,1), dtype=nu.float64)
ckmatriz=nu.zeros((qfm,1), dtype=nu.float64)

```
for i in range(0,qfm):
    fm1 = float(input("digite f: "))
    fm[i,0] = fm1
```

print ("As frequencias naturais sao: ") print (fm)

```
#xf=(1220*f/vp)
#sp=4*(1220*f/vp)*(1220*f/vp)/(1+(1220*f/vp)*(1220*f/vp))**(4/3)
```

```
#SOMATORIO DOS COS PARA CADA MODO HARMONICO
```

for i in range(0,qfm): k=float(fm[i,0]) R=float(fm[0,0]) fak=float() fbk=float()

fak=(k)/(pow(2,(k-0.5-R)))

fbk=(k)/(pow(2,(k+0.5-R)))

from scipy.integrate import quad def integrand(f): return 4\*(1220\*f/vp)\*(1220\*f/vp)/(1+(1220\*f/vp)\*(1220\*f/vp))\*\*(4/3)

```
ck=quad(integrand, fbk, fak)
```

```
ck=float(nu.sqrt(2*ck[0]))
  ckmatriz[i,0]=ck
print ("A matriz Ck e: ")
print (ckmatriz)
nt=int(t/dt)
plinha=nu.zeros((nt,1), dtype=nu.float64)
tt=0+dt
cksoma=0
for i in range(0,qfm):
  cksoma=cksoma+ckmatriz[i,0]
for i in range(0,nt):
  p1=0
  p2=0
  for j in range (0,qfm):
     for jj in range (0,19):
        tr=ckmatriz[0,0]
        k=float(fm[j,0])
        R=float(fm[0,0])
        rk=2**(k-R)
        dteta=jj/20*2*3.14159265359
        teta=0+dteta
        p1=ckmatriz[j,0]/cksoma*nu.cos(2*nu.pi*tt/tr/rk - teta)
        p2=p2+p1
  plinha[i,0]=p2
  tt=tt+dt
print ("A matriz de carga dinamica e: ")
```

print (plinha)