



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS GURUPI
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

RONALD DA SILVA CARVALHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO EFEITO DA DINÂMICA DO VENTO NAS
ESTRUTURAS - ESTUDO DE CASO**

**GURUPI
2022**

RONALD DA SILVA CARVALHO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO EFEITO DA DINÂMICA DO VENTO NAS
ESTRUTURAS - ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Gurupi.

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Oliveira Junior

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

C331a Carvalho, Ronald da Silva
 Análise Comparativa do Efeito da Dinâmica do Vento nas Estruturas -
 Estudo de Caso / Ronald da Silva Carvalho. – Gurupi, TO, 2022.
 57 f. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Gurupi, Gurupi, TO, 2022.

 Orientador: Esp. Paulo Roberto de Oliveira Júnior

 1. Pressão dinâmica do vento. 2. NBR 6123:1988. 3. Modelo numérico. I.
 Júnior, Paulo Roberto de Oliveira. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

RONALD DA SILVA CARVALHO

ANÁLISE COMPARATIVA DO EFEITO DA DINÂMICA DO VENTO NAS ESTRUTURAS - ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, *Campus Gurupi*.

Aprovado em: 01 / 12 / 2022

BANCA AVALIADORA

Prof. Paulo Roberto de Oliveira Junior
IFTO – Campus Gurupi

Prof. Me. Rodrigo Araújo Fortes
IFTO – Campus Gurupi

Prof. Me. Clerson Dalvani Reis
IFTO – Campus Gurupi

Gurupi, 01 de dezembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto de Oliveira Junior, Servidor**, em 13/12/2022, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clerson Dalvani Reis, Servidor**, em 13/12/2022, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Araujo Fortes, Servidor**, em 13/12/2022, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1834124** e o código CRC **C825EA9A**.

Alameda Madrid, 545, — CEP 77410-470, Gurupi/TO — (63) 3311-5400
portal.iftto.edu.br — reitoria@iftto.edu.br

DEDICATÓRIA

*“Porque Dele, e por Ele, e para Ele,
são todas as coisas; glória, pois, a Ele
eternamente. Amém.” (Romanos
11:36)*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo o dom da minha existência e por ter feito com que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudo, como também, por permitir que eu me mantivesse saudável e determinado, para não desfalecer durante a realização desse trabalho.

À minha amada esposa, por seu inefável amor, cuidado e incentivo nos momentos difíceis e por estar ao meu lado, dando-me apoio durante escrita e dedicação deste trabalho. Amo você!

Aos meus queridos pais, avós e tios, por desde o início da trajetória ser amparo e firmeza em minha vida, obrigado por todo apoio e ajuda.

Ao meu professor Paulo Roberto, por ter sido meu orientador e ter desenvolvido tal função com dedicação e excelência. Obrigado pelas correções e ensinamentos que me permitiram desenvolver um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

A todos os professores, por todas as ajudas e conselhos, pela paciência com o qual guiaram o meu aprendizado durante a minha vida acadêmica.

Ao Instituto de ensino IFTO, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação e por tudo o que aprendi ao longo dos anos de curso.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado, e que de alguma forma, contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

A ação dinâmica do vento nas edificações é um processo difícil para definir, devido à complexidade da interação fluído-estrutura. Com a expansão e verticalização de centros urbanos torna-se necessário e muito importante entender o comportamento dessas ações. Com a evolução repentina de estudos na área, é possível identificar e analisar estruturas complexas no momento do dimensionamento quantificando as ações precisamente. A construção de estruturas altas e esbeltas necessita passar por várias etapas de cálculos para responderem dinamicamente aos efeitos do vento. Atualmente, a utilização de softwares tem propiciado recursos promissores para fazer análises do comportamento da estrutura, obtendo resultados precisos. O presente estudo analisou os resultados obtidos através do software ANSYS, bem como fazer verificação dos métodos abordados pela NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações. Por fim, foi possível fazer uma análise comparativa dos métodos para interpretar os resultados de pressões do vento na estrutura do edifício. O modelo numérico apresentou resultados superiores e consolidados ao da norma, isso pode ser entendido porque a norma usa equações para simplificar o cálculo.

Palavras-chave: Ação dinâmica. Vento. Análise estrutural. ANSYS. NBR 6123:1988.

ABSTRACT

The dynamic action of wind on buildings is a difficult process to define, due to the complexity of the fluid-structure interaction. With the expansion and verticalization of urban centers, it becomes necessary and very important to understand the behavior of these actions. With the sudden evolution of studies in the area, it is possible to identify and analyze complex structures at the time of dimensioning, quantifying the actions precisely. The construction of tall and slender structures needs to go through several stages of calculations to dynamically respond to the effects of wind. Currently, the use of software has provided promising resources for analyzing the behavior of the structure, obtaining accurate results. The present study analyzed the results obtained through the ANSYS software, as well as verifying the methods addressed by NBR 6123:1988 – Forces due to wind in buildings. Finally, it was possible to make a comparative analysis of the methods to interpret the results of wind pressures on the building structure. The numerical model presented better and consolidated results than the norm, this can be understood because the norm uses equations to simplify the calculation.

Keywords: Dynamic action. Wind. Structural analysis. ANSYS. NBR 6123:1988.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação do vento conforme a altura	20
Figura 2 – Ação do vento em uma edificação	21
Figura 3 – O efeito de cargas laterais de vento	22
Figura 4 – F_y é a resposta transversal e F_x é a resposta longitudinal.....	23
Figura 5 – Isopletas de Velocidade Básica V_0 (m/s).....	25
Figura 6 – Fator topográfico S_1	26
Figura 7 – Fator S_3 – coeficiente de arrasto.....	30
Figura 8 – Esquema do modelo discreto da NBR 6123:1988	32
Figura 9 – Malha triangular.....	34
Figura 10 – Diferentes tipos de elementos finitos	35
Figura 11 – Fases do MEF	36
Figura 12 – Localização do Edifício Diamond.....	38
Figura 13 – Fachada do edifício	39
Figura 14 – Modelagem do edifício para estudo	39
Figura 15 – Apresentação da malha fluída para estudo	41
Figura 16 – Condição de contorno para análise	42
Figura 17 – Pressão no Prédio (Vista Isométrica)	48
Figura 18 – Pressão no Prédio (Plano YZ).....	48
Figura 19 – Pressão no Prédio (Plano XY)	48
Figura 20 – Velocidades no Prédio (Plano YZ)	49
Figura 21 – Velocidades no Prédio (Plano XY).....	49
Figura 22 – Diferença de pressões entre as metodologias	51
Figura 23 – Linhas de fluxo do vento (Isométrico)	52
Figura 24 – Linhas de fluxo do vento ao passar o obstáculo (Isométrico)	52
Figura 25 – Coeficiente de amplificação dinâmica	56
Figura 26 – Modelo do Edifício Diamond no ANSYS.....	57
Figura 27 – Pressões atuantes na fachada frontal	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator $S2$	28
Tabela 2 – Fator $S3$	29
Tabela 3 – Expoente p e parâmetro b	31
Tabela 4 – Parâmetros γ e ζ	31
Tabela 5 – Parâmetros para método estático	44
Tabela 6 – Pressão atuante na fachada do edifício pelo Método Estático.....	45
Tabela 7 – Parâmetros do Método Contínuo Simplificado	46
Tabela 8 – Pressão no cilindro pelo método Contínuo Simplificado.....	46
Tabela 9 – Perfil de Velocidade para o modelo numérico	47
Tabela 10 – Pressões na Fachada do Edifício.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS

ANBT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IFTO	Instituto Federal do Tocantins
ANSYS	Swanson Analysis System
MEF	Método dos Elementos Finitos
TO	Tocantins
AutoCAD	Computer Aided Design ou Desenho auxiliado por computador
SAP 2000	Computers and Structures

LISTA DE SÍMBOLOS

q	Pressão dinâmica (N/m ²)
V_0	Velocidade básica do vento (m/s)
V_k	Velocidade característica do vento (m/s)
S_1	Fator topográfico
S_2	Fator de rugosidade do terreno
S_3	Fator probabilístico
z	Altura (m)
F_r	Fator de rajada
d	Diferença de nível entre a base e o topo de morro ou talude
θ	Ângulo de inclinação (°)
p	Expoente da lei potencial de variação de S_2
b	parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2
Φ	Índice de área exposta
A_e	Área efetiva
F_a	Força de arrasto
C_a	Coeficiente de arrasto
$\bar{V}_p$	Velocidade de projeto (m/s)
x	Primeiro modo de vibração
ζ	Razão de amortecimento
ξ	Coeficiente de amplificação dinâmica
A	Área de referência
f_i	Frequência fundamental
F_x	Componente da força do vento na direção x
F_y	Componente da força do vento na direção y
α	Ângulo de incidência do vento
x_i	Deslocamento correspondente à coordenada i
A_i	Área de influência correspondente à coordenada i
m_i	Massa discreta correspondente a à coordenada i
C_{ai}	Coeficiente de arrasto correspondente a coordenada i
z_i	Altura do elemento i da estrutura sobre o nível do terreno
z_r	Altura de referência

n	Número de graus de liberdade
f_j	Frequência natural (Hz)
$q(z)$	Variação da pressão dinâmica
l_i	Largura da edificação
X_i	Força total devida ao vento na direção da coordenada i
$\bar{X}_i$	Força média
$\hat{X}_i$	Componente flutuante
h	Altura total da estrutura
β_i	Ângulo central

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Definição do vento	19
3.2 Dinâmicas do vento	19
3.3 Efeito do vento em edificações	20
3.4 Ação do vento segundo a ABNT NBR 6123:1988	23
3.4.1 Métodos da NBR 6123:1988	24
3.5 Método dos elementos finitos (MEF)	34
3.5.1 Estágios para análise e solução em elementos finitos	36
4 METODOLOGIA	38
4.1 Objeto de estudo	38
4.2 Software computacional	40
4.2.1 Criação da malha	40
4.2.3 Condições de Contorno para Simulação	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 Estudo do edifício no software	43
5.2 Ação do vento no edifício	43
5.2.1 Método Estático	43
5.2.2 Método Contínuo simplificado	45
5.2.3 Modelo numérico	47
6 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54

ANEXO A – Cálculo do Fator S2	56
ANEXO B – Modelagem do edifício Diamod no Ansys	57

1 INTRODUÇÃO

O estudo da ação dinâmica do vento em estruturas tem sido um fator relevante na elaboração de projetos e estudos diversos para obter uma análise mais precisa dos esforços decorrentes de sua aplicação. Com isso, esse fenômeno é um dos principais efeitos para a análise estrutural de edifícios, como prédios altos, coberturas, galpões conforme seu tipo estrutural, entre outros sistemas de construção. A importância dessa análise reside em elaborar um projeto de modo a proteger a edificação contra instabilidades, avaliando o comportamento da estrutura, seus efeitos e a segurança.

Na análise estrutural, o sistema de estrutura aplicado tem como condição predominante a transferência de carga de massas laterais, onde os edifícios estão sujeitos a efeitos na horizontal por causa do vento. A presença desses efeitos ocasiona altas tensões, desse modo começam a surgir oscilações ou vibrações. Em síntese, é aconselhável para a estrutura possuir resistência confortável contra pressões nas superfícies em conjunto com rigidez adequada para resistir às forças laterais.

As recomendações normativas para o estudo do vento em edificações no Brasil, estão aplicadas na NBR 6123 (ABNT, 1988), onde a norma apresenta os parâmetros para quantificar as ações do vento, tratando de condições estáticas e dinâmicas do vento nas construções (LIMA et al., 2019). Com isso, essas condições tornam-se imprescindíveis para avaliação dos esforços oriundos do efeito aerodinâmico do vento nas edificações.

Pitta (2013) retrata que a sequenciação de efeitos dinâmicos é a principal consequência do aumento da flexibilidade das estruturas e da intrepidez em algumas formas. De acordo com o art. 22º do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes do ano de 1983, a consideração das formas geométricas e dinâmica das estruturas, por conseguinte a aplicação do escoamento do ar com a construção implica na necessidade de processos de análise relativamente complexos.

A presença de programas computacionais que utilizam o método dos elementos finitos (MEF) facilita o estudo e a análise do efeito do vento nas estruturas, ou seja, discretizando problemas através de métodos aproximados. Essa aplicação permite uma simulação sistemática e complexa de estruturas com o objetivo de projetar uma estrutura com uma capacidade resistiva maior e com valores de deslocamento não-lineares que se aproximam da realidade (SILVA, 2018).

Portanto, o presente trabalho com o auxílio do software ANSYS, pretende fazer o estudo do escoamento e da interação fluido-estrutura. O propósito consiste em apresentar um modelo

e fazer análise comparativa com os parâmetros e métodos presentes na norma, a fim de quantificar a ação do vento e a influência da pressão sentida nas superfícies do prédio escolhido para estudo, com isso, tornam-se mais acessíveis a análise com a evolução computacional e com os softwares de análise estrutural (MARTINS, 2018).

A verticalização das cidades é um processo existente dentro dos centros urbanos e outras regiões já esgotadas de áreas apropriadas para a construção civil (CURCI et al., 2017). Para edifícios relativamente altos o vento torna-se um problema de instabilidade na estrutura, isso, se não houver uma análise precisa dos seus efeitos. Portanto, as ações provocadas por esse fenômeno podem provocar deslocamentos horizontais, momentos fletores excessivos, que podem trazer ruína ao edifício (ZÚÑIGA et al., 2017).

Para construções baixas e pesadas o vento não é um problema, embora, seja relevante a análise para determinar as ações precisas do projeto estrutural. Portanto, para facilitar o processo de análise estrutural, é possível fazer o uso de simplificações através de um modelo numérico de forma a representar a realidade estrutural?

A natureza afeta e provoca circunstâncias ponderadas para edificações projetadas, com isso, o vento não deixa de ser um critério importante para a realização do projeto mesmo em áreas onde não há ação relevante, a atuação dessa carga horizontal está presente diariamente de forma contínua afetando a estrutura e deformando-a (DO NASCIMENTO et al., 2016).

Com o avanço da tecnologia, resultando na evolução de muitos setores principalmente na área estrutural, os materiais apresentam qualidade e uma capacidade resistiva maior, com isso, essas inovações trouxeram estruturas mais esbeltas e flexíveis. Todavia, o estudo da ação dinâmica do vento tornou-se de suma importância para os projetos, com a finalidade de propositar a segurança da edificação.

A necessidade de conferir se o projeto estrutural está de acordo com a norma é primordial, dessa forma é possível interagir os critérios de forças de vento apresentados na NBR 6123:1988 com estudos com a utilização de *softwares* CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Com os resultados obtidos, é possível fazer uma interpretação detalhada dos esforços na superfície externa do edifício.

Aliado a isso, esta pesquisa permite fazer o estudo da ação do vento em um edifício localizado na cidade Gurupi, na qual é uma região onde permanece em constante crescimento populacional e econômico e, que em um futuro próximo terá a necessidade de mais obras verticalizadas. Portanto, o trabalho consiste em verificar os esforços atuantes recorrentes da ação do vento, fazendo uma análise comparativa da NBR 6123:1998 com um modelo numérico, simulação desenvolvida por um *software* CFD.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa visa fazer uma análise comparativa da ação dinâmica do vento nas estruturas, quantificando as ações do vento, considerando a condição estática e dinâmica do carregamento a partir dos métodos considerados pela norma e método computacional, com o uso do software ANSYS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, pretende-se:

- ✓ Apresentar o estudo do vento e sua ação no edifício em estudo;
- ✓ Apresentar critérios indicados pela NBR 6123:1988;
- ✓ Modelagem do edifício no software AutoCAD;
- ✓ Verificar a interação, fluido-estrutura e a solicitação horizontal do vento no software ANSYS;
- ✓ Comparar os métodos de cálculo da norma com o modelo numérico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DEFINIÇÃO DO VENTO

De acordo Gonçalves et al. (2004, p. 1), o conceito da ação do vento é “o movimento das massas de ar decorrente das diferenças de pressões na atmosfera”, isso acontece devido às energias transmitidas do sol que gera variações de temperatura do ar (BLESSMANN, 2013). Portanto, essa movimentação das massas de ar em zonas de pressão altas para baixa gera o vento.

Os fenômenos que influenciam o tempo e o clima de modo geral podem ser analisados pelo escoamento, pois a origem do vento está ligada a diferenças de temperatura e pressão (BARRETO, 2001). Em uma região quando a parte do ar mais aquecida sobe, sua pressão é diminuída, consequentemente é substituída por ar das vizinhanças, onde a pressão é maior (BLESSMANN, 2013).

3.2 DINÂMICAS DO VENTO

O globo terrestre possui lugares onde irão apresentar características específicas que influenciam no movimento do ar. Então, a dinâmica do vento é influenciada pelas diferentes coberturas vegetais, topografias e edificações (CARVALHO, 2017).

Ching et al. (2010) aborda que os ventos aplicam um carregamento dinâmico, sendo assim, é compreendido como todo carregamento em que o tempo é uma variável ao qual interfere na relação de aplicação da carga (LIMA, 2019 apud AZEVEDO, 2016), ou seja, essas ações surgem de variações no espaço e no tempo. Para analisar edifícios altos é importante abordar os efeitos dinâmicos das ações, pois assume uma abordagem mais profunda do que a análise estática.

Os efeitos dinâmicos dos carregamentos produzidos pela ação do vento geram uma resposta significativa em edifícios de grande altura (GUERZONI, 2020). Analogamente, edifícios com menos pavimentos podem sofrer do mesmo modo ação dinâmica significativa, dependendo de sua geometria e posicionamento dos elementos estruturais, através disso a ação do vento pode induzir esforços de torção (TAPAJÓS, 2016 apud ELSHARAWY, 2015). Portanto, as ações aplicadas pelo o vento tornam-se importantes em estruturas esbeltas e de grande altura. Quanto mais esbeltas, mas sensíveis às ações dinâmicas do vento (BLESSMANN, 1989).

A movimentação dinâmica acontece através das flutuações da velocidade do vento em torno de sua média, aplicada ao deslocamento médio causado pela componente média do vento. A abordagem recorrente a essas flutuações é chamada de rajadas, que ocorrem pela turbulência atmosférica. Segundo Blessmann (2013), as rajadas são determinadas como médias sobre pequenos intervalos de tempo, de ordem de segundos, na qual tem a capacidade de agitação de resposta dinâmica em um confinado espaço de estruturas que definem frequência natural inferior que 1 Hz e baixo amortecimento (MIGUEL, 2003).

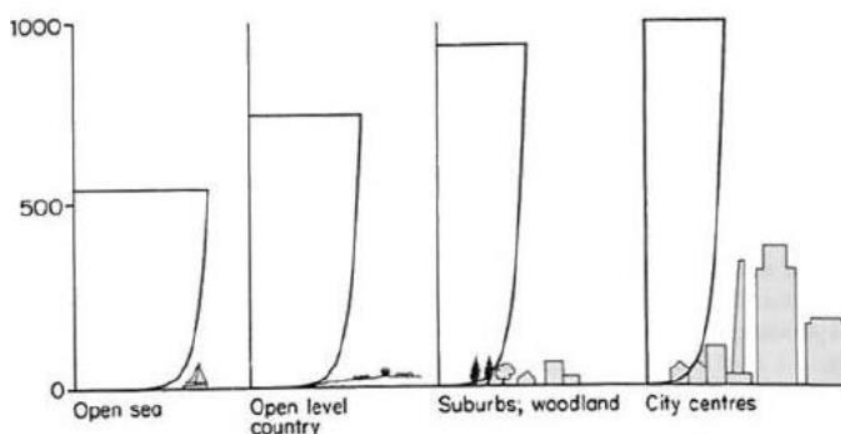
3.3 EFEITO DO VENTO EM EDIFICAÇÕES

Na análise estrutural, uma das atribuições que devem ser tomadas é a ocorrência de vento na superfície do edifício, pois apresenta uma barreira ao escoamento do ar. No entanto, as linhas de corrente se separam ao redor da geometria, num processo denominado deslocamento.

Brady (2012), emprega que para a obtenção dos efeitos do vento nas estruturas, é necessário considerar as características geométricas e dinâmicas da estrutura, além disso, é importante salientar a interação do escoamento do ar com a construção.

Segundo Gonçalves (2004), a ação do vento em edificações depende de duas condições, as meteorológicas e as aerodinâmicas, associadas, entre outros aspectos, à localização do edifício em estudo, ao tipo de terreno no qual se encontra à rugosidade do terreno, altura, formato e dimensões da edificação, tipo de ocupação e, por fim, à aleatoriedade dos eventos de vento, conforme ilustra a Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Variação do vento conforme a altura



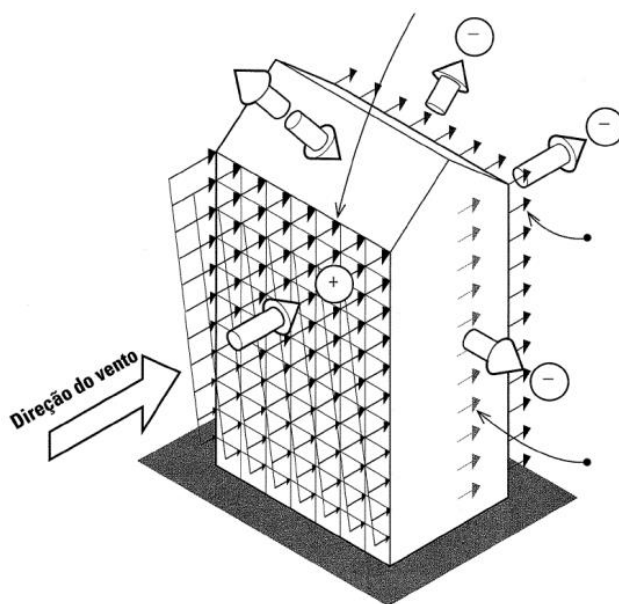
Fonte: Mendis et al. (2007).

Segundo Rios (2016), a altura camada limite da atmosfera é de aproximadamente 450m, na qual a topografia do terreno intervém a velocidade do vento.

Conforme Blessmann (1989) as cargas devidas ao vento têm comportamento dinâmico, pois as pressões efetuadas sobre a edificação variam tanto por meio das flutuações da velocidade do vento, como pelos vórtices e pelas alterações nas linhas de corrente, causados pela própria edificação.

De acordo com Ching *et al.* (2010), as forças produzidas pelas cargas de vento são consequência da energia cinética do movimento de uma massa de ar, que produz pressões diretas ou sucção, podendo ser também, respectivamente, positivas ou negativas, o que impõem esforços a qualquer impedimento em seu caminho, particularmente nas estruturas, e na sua vedação externa. Assim, a magnitude das primeiras depende da altura em relação ao solo, já as segundas são constantes ao longo da estrutura (MARTINS, 2018), conforme ilustra a Figura 2:

Figura 2 – Ação do vento em uma edificação

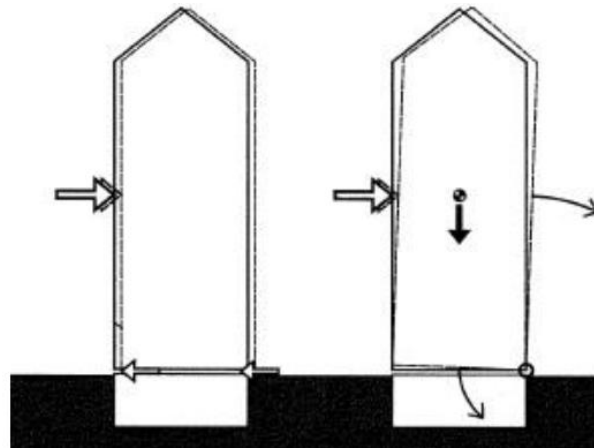


Fonte: CHING et al. (2010).

A ação dinâmica do vento sobre a superfície de uma edificação é maior à medida que a altura da mesma aumenta, assim, seu efeito é significativo em edifícios altos de múltiplos pavimentos (MARTINS, 2018). Para Santos e Lima (2005), as acelerações horizontais médias variam devido o vento de acordo com o número de pavimentos. Sendo assim, com essa variação de altura, os edifícios podem sofrer deslizamentos devido aos esforços de cisalhamento gerados entre a estrutura, ou tombamentos devido à pressão do vento exercida conforme apresentado na

Figura 3. Esses esforços estão correlacionados com a ação de cargas laterais impostas pelo o vento.

Figura 3 – O efeito de cargas laterais de vento



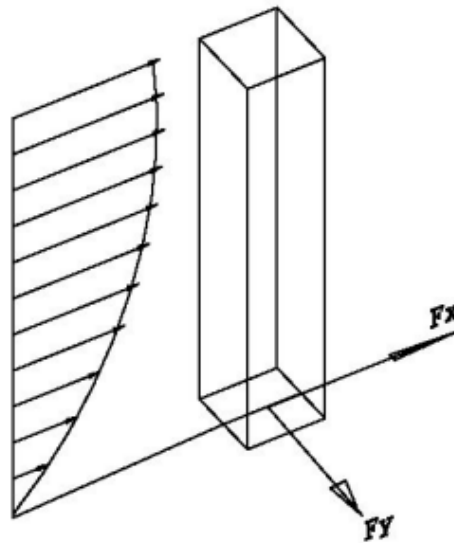
Fonte: CHING et al. (2010).

Ching et al. (2010), contextualiza que para proteger os edifícios de danos causados pelas velocidades e pressões de vento, é recomendado diminuir a área de superfície, assim essa estrutura se comportará de forma considerável contra rajadas.

Santos (2017, apud Vanin, 2011), afirma que as forças estáticas induzidas pelo vento sobre uma edificação são devidas à velocidade média do vento e aos turbilhões existentes em um vento turbulento. Essas forças sujeitam a estrutura a forças de arrasto (na direção longitudinal ao vento), forças de sustentação (na direção transversal ao vento) e a um momento torçor.

Trein (2005) comenta que devido ao fato de o vento atuar em forma de rajadas, os edifícios altos, frente à sua ação em determinada direção, respondem oscilando tanto transversalmente quanto longitudinalmente (Figura 4), gerando resultados dinâmicos onde os carregamentos produzidos por pressões, podem ser superiores do que aquelas produzidas pelos seus efeitos estáticos equivalentes.

Figura 4 – F_y é a resposta transversal e F_x é a resposta longitudinal



Fonte: Terin (2005).

Devido aos ventos turbulentos, os edifícios altos podem ser estudados como uma linha no espaço, já que sua altura é muito maior que suas dimensões longitudinais e transversais (SANTOS, 2017).

Os estudos recorrentes da ação dinâmica do vento refletem para a estrutura uma análise mais precisa a esse tipo de carregamento, viabilizando estruturas esbeltas e edifícios altos. O tipo estrutural referente às ações do vento deve ser avaliado no andamento do projeto estrutural (RIOS, 2015). Segundo Simiu et al. (1986, p. 295), “o projeto de edifícios altos, quanto à ação do vento, é baseado em estimativas das forças globais e locais exercidas pelo vento”.

3.4 AÇÃO DO VENTO SEGUNDO A ABNT NBR 6123:1988

Para a determinação das ações do vento nas estruturas de edifícios são adotadas prescrições da “ABNT NBR 6123 (1988) – *Forças devido ao vento em edificações*”, essa norma regulamenta um procedimento de projeto para o cálculo das forças devido ao vento e seus efeitos nas estruturas. Além disso, a norma retrata duas maneiras de cálculo, sendo por meio de ações estáticas e dinâmicas. O primeiro método é eficaz para estruturas rígidas. Por conseguinte, o segundo em alguns casos (estruturas com período igual ou superior a 1 s) é preciso determinar os efeitos dinâmicos devidos à turbulência atmosférica, para isso a norma apresenta dois métodos: simplificado e discreto.

3.4.1 Métodos da NBR 6123:1988

A norma brasileira traz três metodologias para análise de edifícios sob ação de solicitações de vento, sendo o método estático, contínuo simplificado e discreto, as quais são explicados a seguir:

3.4.1.1 Método Estático

A pressão dinâmica do vento é calculada pela equação (1):

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

Sendo “ ρ ” a massa específica do ar e “ V_k ” a velocidade característica do vento. Em condições normais de temperatura e pressão, segue as seguintes unidades, onde: q em N/m², ρ em kg/m³ e V_k em m/s, conforme a equação (2):

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

E a velocidade característica é obtida pela seguinte formulação, equação (3):

$$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \quad (3)$$

Onde:

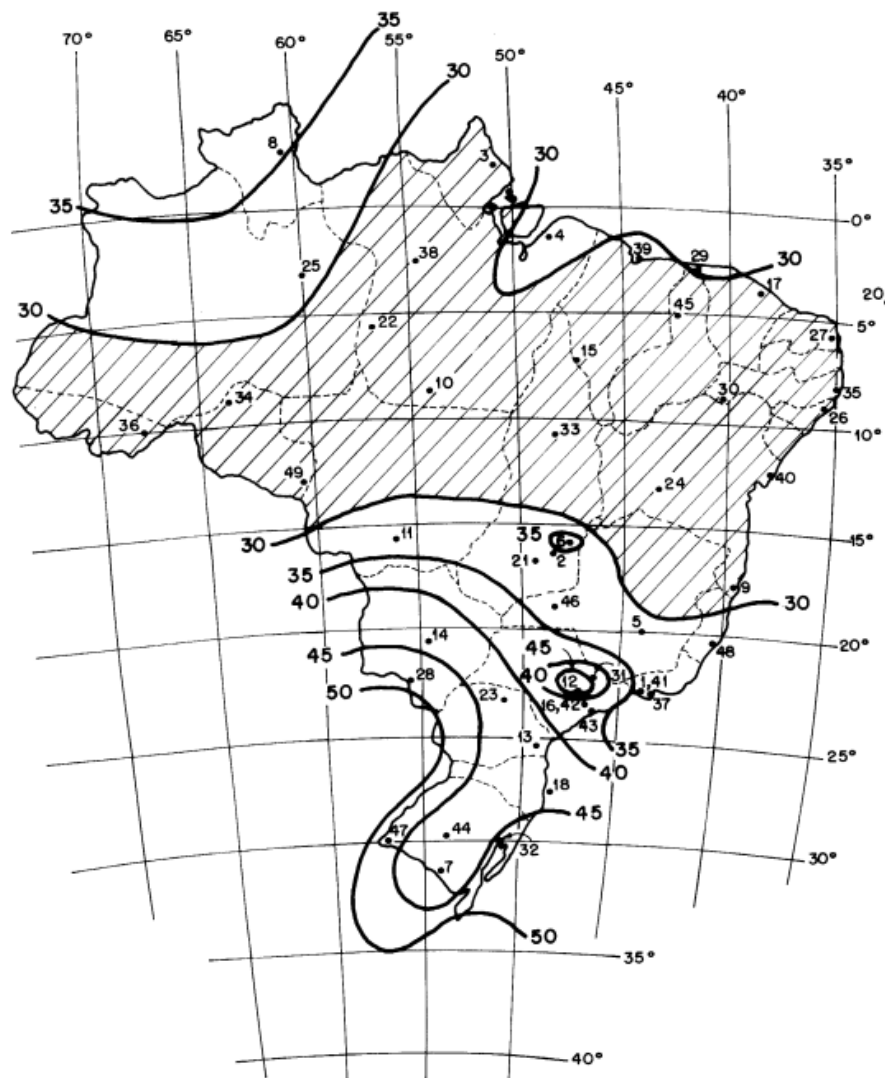
- V_0 é a velocidade básica do vento, em m/s;
- S_1 o fator topográfico, em função do relevo do terreno;
- S_2 o fator que considera o efeito combinado de rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação;
- S_3 o fator estatístico, que depende do grau de segurança requerida e da vida útil das edificações.

➤ Velocidade básica do vento – V_0

A velocidade básica do vento V_0 é conceituada como a velocidade de uma rajada em um período de 3s, excedida em média uma vez em 50 anos, a dez metros de altura do terreno em campo aberto e plano.

Os dados de velocidade são apresentados no gráfico das isopletas de velocidade média (Figura 5), apresentado pela NBR 6123/1988, com intervalos de 5 m/s, o qual foi desenvolvido através de registros de diversas estações meteorológicas espalhadas pelo o Brasil.

Figura 5 – Isopletas de Velocidade Básica V_0 (m/s)

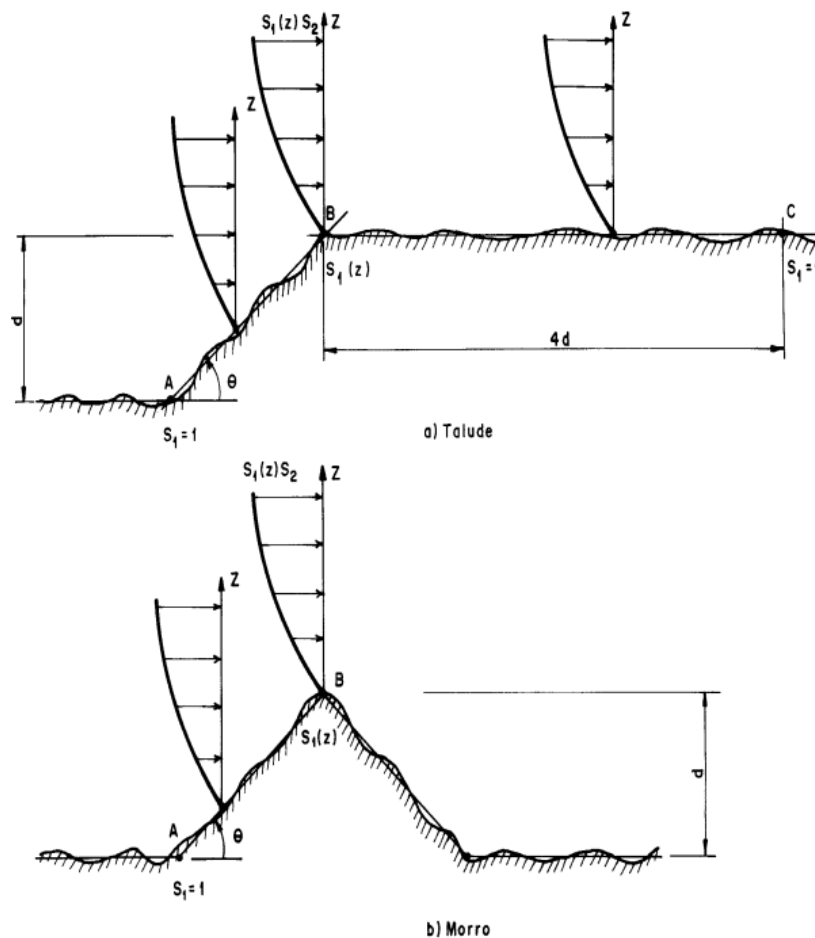


Fonte: NBR 6123 (1988).

➤ Fator topográfico S_1

Para determinar o fator topográfico leva em observação as características do relevo, então, deve seguir os seguintes critérios apresentados na norma, conforme apresentado na Figura 6:

Figura 6 – Fator topográfico S_1



Fonte: NBR 6123 (1988).

Segundo a NBR 6123 (1988), afirma que para terreno plano ou fracamente acidentado o $S_1 = 1,0$; para taludes e morros, apresenta um fluxo de ar bidimensional com o sentido apresentado na Figura, onde que no ponto A em morros e nos pontos A e C em taludes o $S_1 = 1,0$, e no ponto B, em função da cota z , conforme as equações 4, 5 e 6 apresentadas abaixo:

$$\theta \leq 3^\circ \therefore S_1(z) = 1,0 \quad (4)$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ \therefore S_1(z) = 1 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \operatorname{tg}(0 - 3^\circ) \geq 1 \quad (5)$$

$$\theta \geq 45^\circ \therefore S_1(z) = 1 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1 \quad (6)$$

➤ Fator S_2

O fator S_2 leva em conta o efeito combinado que envolve a rugosidade do terreno, as dimensões do edifício e, variação da velocidade do vento com a altura relativa sobre o terreno (ABNT NBR 6123). De acordo com a norma, os terrenos podem ser classificados em uma das categorias apresentadas no Quadro 1 e, além disso leva-se em consideração a altura do edifício de acordo a classe representado na Quadro 2, posteriormente obtém-se o fator S_2 com a determinação da categoria e a classe escolhida conforme apresentado na Tabela 1.

Quadro 1 – Tipo de superfície do terreno

CATEGORIA	TIPO DE SUPERFÍCIE DO TERRENO
I	Superfícies Lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Obstáculos com altura média abaixo de 1,0 metros.
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos. Obstáculos com altura média de 3,0 metros.
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e poucos espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Altura média dos obstáculos de 10 metros.
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Obstáculos com altura média de 25 metros ou mais.

Fonte: Adaptada pelo Autor, NBR 6123 (1988).

Quadro 2 – Dimensões dos edifícios de acordo com a classe

CLASSE	DIMENSÕES DO EDIFÍCIO
A	Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical seja inferior a 20 metros .
B	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20 e 50 metros .
C	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros .

Fonte: Adaptada pelo Autor, NBR 6123 (1988).

Tabela 1 – Fator S_2

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Fonte: NBR 6123 (1988).

➤ Fator S_3

O fator estatístico S_2 é baseado em conceitos estatísticos levando em consideração a segurança e a vida útil da edificação. A vida útil de uma edificação estabelecida pela norma é

de 50 anos e, na qual a velocidade V_0 seja igualada ou excedida neste período com probabilidade de 63%. Os valores são encontrados na Tabela 2 mostrada abaixo:

Tabela 2 – Fator S_3

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

Fonte: Adaptada pelo Autor, NBR 6123 (1988).

➤ Força de Arrasto

A NBR 6123 (ABNT, 1988), aborda que na edificação a força global do vento, é dada por uma soma vetorial das forças do vento, equação (7):

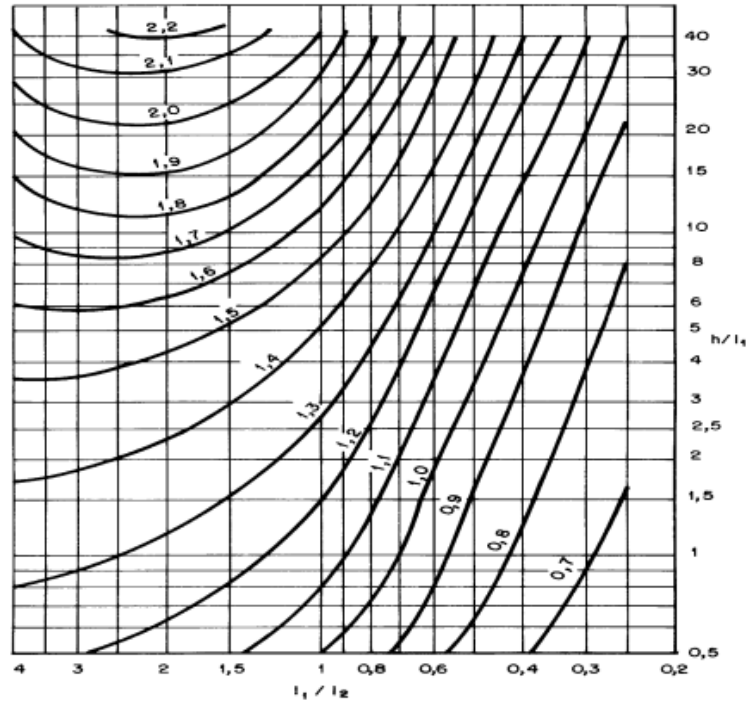
$$F_a = C_a \cdot q(z) \cdot A_e \quad (7)$$

Onde:

- F_a = força de arrasto (N);
- C_a = coeficiente de arrasto;
- $q(z)$ = pressão dinâmica (N/m²);
- A_e = área frontal efetiva (m²).

Para determina o coeficiente de arrasto a NBR 6123 (ABNT, 1988) apresenta um abaco demonstrado na Figura 7, onde estabelece a razão de $h/l_1 e l_1/l_2$.

Figura 7 – Fator S_3 – coeficiente de arrasto



Fonte: NBR 6123 (1988).

3.4.1.2 Método Contínuo Simplificado

Segundo Almeida et al. (2013), as flutuações ocasionam em estruturas de edifícios altos, oscilações na direção da velocidade média, nomeadas como resposta flutuante. O método simplificado é utilizado para estruturas com altura inferior a 150 m, tendo a mesma com apoio na base.

A velocidade do projeto $\bar{V}_p$ é obtida por meio da equação (8):

$$\bar{V}_p = 0,69 \cdot V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \quad (8)$$

Com isso, a pressão dinâmica é calculada em função da altura z conforme a expressão abaixo:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \times \left(\frac{z}{h} \right)^y \times \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (9)$$

$$\bar{q}_0 = 0,613 \times \bar{V}_p^2 \quad (10)$$

Onde:

- $\left(\frac{z}{z_r}\right)^{2p}$ = é a resposta média;
- $\left(\frac{z}{z_r}\right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r}\right)^p \times \left(\frac{z}{h}\right)^y \times \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi$ = é a altitude máxima da resposta flutuante;
- $\bar{q}_0$ = é a pressão dinâmica (N/m);
- z_r = é a altura de referência, na qual é atribuída com o valor de 10m;

Para obter o expoente “p” e o parâmetro “b” a norma fornece os seguintes valores apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Expoente p e parâmetro b

Categoria de rugosidade	I	II	III	IV	V
p	0,095	0,15	0,185	0,23	0,31
b	1,23	1,00	0,86	0,71	0,50

Fonte: Adaptada pelo Autor, NBR 6123 (1988).

Na norma são encontrados os parâmetros γ e ζ , conforme representada na Tabela 4:

Tabela 4 – Parâmetros γ e ζ

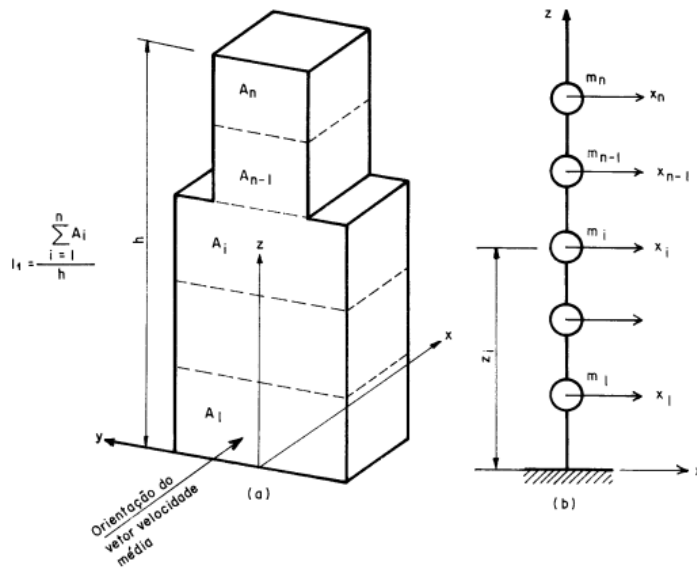
Tipo de edificação	γ	ζ	$T_1 = 1/f_1$
Edifícios com estrutura aporticada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	0,05h + 0,015h (h em metros)
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais	1,6	0,015	0,05h + 0,012h
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	0,02h
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	0,015h
Edifícios com estrutura de aço soltada	1,2	0,010	0,29 $\sqrt{h}$ - 0,4
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008	
Estruturas de madeira	--	0,030	

Fonte: Adaptada pelo Autor, NBR 6123 (1988).

3.4.1.3 Método Discreto

Conforme a NBR 6123 (1988) o método discreto é utilizado para edificações com propriedades variáveis com a altura, ou seja, variação no tamanho da geometria no decorrer da altura. Com isso, avalia-se essas propriedades variáveis através do modelo discreto conforme representado na Figura 8:

Figura 8 – Esquema do modelo discreto da NBR 6123:1988



Fonte: NBR 6123 (1988).

Sendo, x_i o deslocamento correspondente à coordenada i , A_i a área de influência correspondente à coordenada i , m_i a massa discreta correspondente à mesma coordenada, z_i o coeficiente de arrasto, z a altura do elemento i sobre o nível do terreno, e n o número de graus de liberdade.

Para cada modo de vibração n , com componentes $(x_i)_j = x_i$, a força total devida ao vento na direção i dada pela equação (11) apresentada abaixo:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (11)$$

Onde:

- X_i = força total devida ao vento na direção da coordenada i , (N);
- $\bar{X}_i$ = na direção da coordenada i , (N);
- $\hat{X}_i$ = força flutuante na direção da coordenada i , (N).

Sabendo que a força média i é determinado pela Equação (12):

$$\bar{X}_i = q_0 \cdot b^2 \cdot C_{ai} \cdot \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^{2p} \cdot A_i \quad (12)$$

Onde:

- q_0 = pressão dinâmica de projeto;
- Coeficiente b e p apresentados na Tabela 5.

A componente flutuante i é determinada por:

$$\hat{X}_i = F_H \cdot \Psi_i \cdot x_i \quad (13)$$

Onde:

- F_H = força referente à parcela flutuante, (N);
- x_i = deslocamento correspondente à coordenada i , (m).

Segue abaixo as fórmulas para obter os parâmetros da equação (13):

$$F_H = \bar{q}_0 \cdot b^2 \cdot A_0 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \Psi_i x_i^2}\right) \xi \quad (14)$$

$$\Psi_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (15)$$

Onde:

- A_0 = área arbitrária de referência (m²);
- n = número de coordenadas discretizadas;
- Ψ_i = coeficiente de amplificação dinâmica.

Assim, o valor de β_i pode ser determinado pela Equação (16):

$$\beta_i = C_{ai} \cdot \frac{A_i}{A_0} \cdot \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^p \quad (16)$$

Onde:

- β_i = ângulo central entre a direção do vento e o raio que passa pelo ponto em consideração na periferia de um cilindro circular.

3.5 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

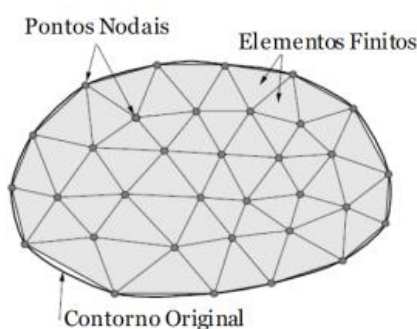
O método dos elementos finitos (MEF) é um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos em pequenos elementos e que são descritos por meio de equações (MELCONIAN, 2014). Na análise estrutural esse método começou a expandir no século XX com trabalhos de vários professores da área de engenharia (DIAS, CRUZ, VALENTE, & SOUSA, 2018). Todavia, no Brasil os trabalhos relacionados a métodos dos elementos finitos começaram a surgir a partir dos anos de 1960.

De acordo com Vaz (2011), o MEF na análise de estruturas serve para formular situações complexas e, a aplicação por meio desse método generalizou e iniciou estudos em várias áreas, como à análise estática de estruturas de comportamento linear elástico e de não linearidade física e geométrica, além disso, a análise dinâmica de estruturas. Portanto, através de campos aprofundados de análise, iniciou-se o estudo da interação fluido-estrutura, implicando em análises de fluxo e pressões exercidas em superfícies.

Hubner et al. (1982), complementa e relata que o MEF é um meio de análise numérica para resultar em soluções precisas em ambiente de pesquisa que há variedades de problemas. No entanto, esse método torna-se eficaz para estudos complexos.

Souza (2003) afirma que o Método dos elementos finitos implica em se dividir o domínio, meio contínuo, do problema em sub-regiões de geometria simples, conforme apresentado na Figura 9, onde esquematiza a malha. Com isso, na engenharia, essa esquematização, usualmente tenta-se resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas simplificados.

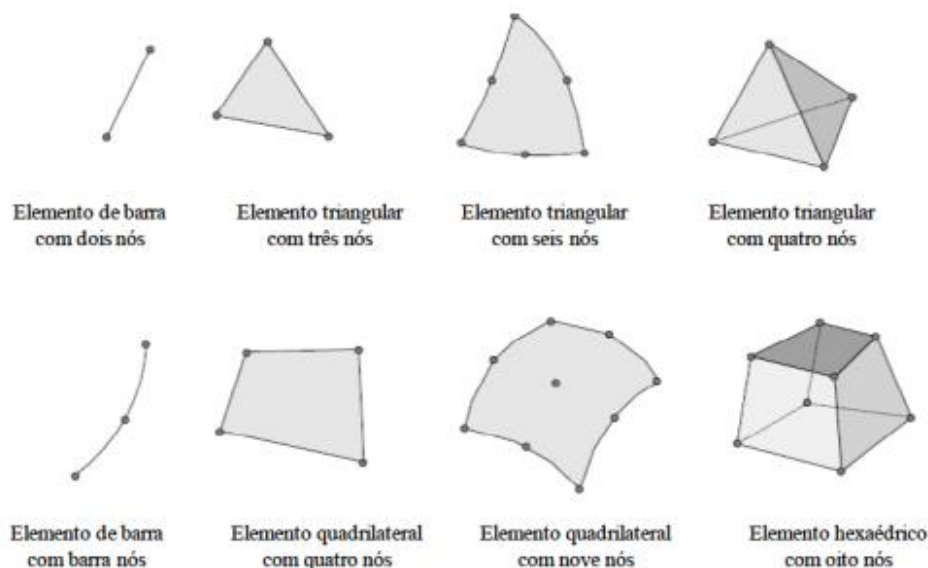
Figura 9 – Malha triangular



Fonte: Souza (2003).

Souza (2003) complementa que pelo fato de as sub-regiões apresentarem dimensões finitas, elas são chamadas de elementos finitos. Através disso, os elementos também podem apresentar diversas formas geométricas conforme apresentado na figura 10:

Figura 10 – Diferentes tipos de elementos finitos



Fonte: Souza (2003).

O número de nós apresentados, o tamanho e tipo de elementos são os fatores que definem a precisão do método (SOUZA, 2003), ou seja, quando menor a dimensão e maior o número de elementos em uma determinada malha, resultando em análise de resultados precisos (MELCONIAN, 2014).

O conjunto de nós resulta em uma malha, na qual é criada para realização dos resultados através da discretização do domínio em estudo. Segundo Melconian (2014) as malhas são geradas com auxílios de *softwares* que relacionam o valor de um conjunto de variáveis definidas em cada nó.

Atualmente, existem muitos programas computacionais comerciais com grande abrangência, assim podendo fazer diversos tipos de análise pelo Método dos Elementos Finitos, como o software SAP 2000, o ANSYS, o ABAQUS, etc.

Pinho et al. (2014) realizaram um estudo dos efeitos dinâmicos provocados pelo o vento, e analisaram através do software comercial ANSYS, que adota o método dos elementos finitos (MEF), com isso, simularam as vibrações induzidas pelo vento obtendo resultados como deslocamentos, pressões e acelerações da estrutura. Portanto, essa aplicação aprimora resultados dos efeitos que ocorrem em estruturas quando submetidas a cargas dinâmicas.

3.5.1 Estágios para análise e solução em elementos finitos

Dias, Cruz et al. (2018) aborda tarefas que exigem a um analista quando este utiliza um programa de simulação pelos métodos dos elementos finitos. Desse modo, é necessário passar por três estágios de análise para obter os resultados esperados.

Melconian (2014) ilustra as três atividades que o MEF apresenta para resolução de um problema, conforme ilustrado na figura 11:

Figura 11 – Fases do MEF



Fonte: Melconian (2014).

3.5.1.1 Pré-processamento

O estágio de pré-processamento se refere ao modelo geométrico estudado, ou seja, inclui a etapa de modelagem do problema, usando ferramentas CAD (*Computer Aided Design*). Nesse processo é feita a escolha do tipo de elementos finitos e da malha a utilizar, discretizando o modelo de estudo e alimentando os dados no programa para compor a malha, como carga aplicada, condições de contorno e propriedades dos materiais, etc.

3.5.1.2 Processamento

O estágio de processamento implica no equacionamento e cálculo para o problema em estudo, validando o modelo apresentado e criado no pré-processamento. Em síntese, o processo de simulação numérica nesse estágio preside a fase em que todos os cálculos serão realizados. Com isso, esta fase é da competência do pós-processamento.

3.5.1.3 Pós-processamento

Por fim, no estágio de pós-processamento são apresentados os resultados obtidos por meio do cálculo das equações definidas no modelo, encarregando de mostrar todas as informações descritas. Os resultados são representados graficamente ou por meio de tabela,

além disso são abordados a forma da superfície em cores recorrente aos efeitos de estudo, como deformações, distribuição de esforços, pressões, entre outras grandezas.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado, precipuamente, por meio de revisão bibliográfica abordando assuntos pertinentes a temática. No entanto, também foi apresentado à caracterização do fenômeno natural vento para que se pudesse entender sobre o assunto desta monografia. Por conseguinte, foi descrita a norma brasileira de vento, a NBR 6123:1988, por meio dos equacionamentos das três metodologias presentes na mesma, na qual são mostradas as equações, tabelas e figuras importantes que permitiram o cálculo das pressões na estrutura devido ao carregamento horizontal de vento.

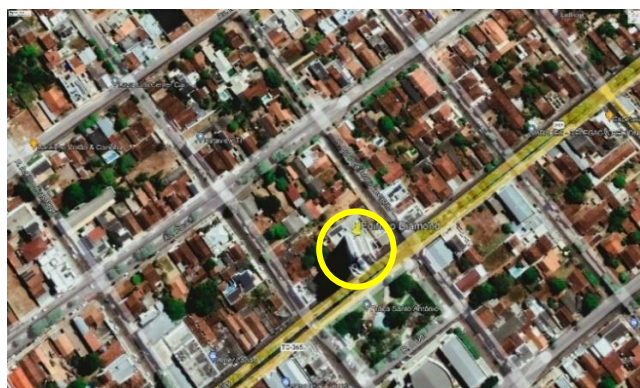
Em suma, o trabalho resultou em fazer um estudo comparativo de um modelo numérico com os métodos encontrados na literatura para a devida estruturação do conhecimento acerca do software. Com a concepção da pesquisa realizada, seguiu-se para a comparação de resultados entre as metodologias normativas e a simulação numérica.

Para isso, foi-se utilizado a estrutura de um edifício alto localizado na cidade de Gurupi/TO, para calcular as pressões por meio da norma brasileira. A análise realizada ocorreu por intermédio de cálculos e simulações do edifício nas condições de vento da região.

4.1 OBJETO DE ESTUDO

Para o estudo de caso considerou-se o Edifício Diamond, localizado na Av. Goiás, Qd. 36, Lt. 1A e 2, Centro, Gurupi/TO. O prédio é constituído pelos seguintes pavimentos: subsolo, térreo, 14 pavimentos tipo e cobertura, totalizando 17 pavimentos. Portanto, a construção totaliza de acordo a quantidade de pavimentos uma altura de 56,18 m. A Figura 12 mostra a posição e localização do edifício em estudo:

Figura 12 – Localização do Edifício Diamond



Fonte: Google Earth (2022).

Figura 13 – Fachada do edifício



Fonte: Autor (2022).

A modelagem do Edifício Diamond foi referenciada por meio dos projetos adquiridos, sendo primordial o arquitetônico e de estruturas. Desse modo, foi possível desenhar a geometria por meio do software AutoCAD (Figura 14), pois facilita todo o processo de modelagem geométrica para importação no software ANSYS, para parametrização e criação da malha.

Figura 14 – Modelagem do edifício para estudo



Fonte: Autor (2022).

4.2 SOFTWARE COMPUTACIONAL

A análise comparativa foi realizada pelo software ANSYS, utilizando a versão estudantil, assim contribuindo para o ambiente universitário. O programa trabalhou com fluidodinâmica computacional (CFD), que é um setor de estudo para analisar e resolver problemas relacionados escoamentos de fluídos por meio de métodos computacionais. O modelo computacional trabalhou com base em equações, onde foram aplicados parâmetros dinâmicos, como velocidade e pressão, ou coeficientes, com isso, avaliou-se os experimentos conforme os dados alimentados no programa. Portanto, o CFD é uma solução para um estudo de estruturas, como uma análise mais precisa, resolvendo problemas complexos com resultados próximos.

O estudo do edifício foi realizado em um módulo presente no ANSYS chamado *Fluid flow (CFX)*, onde envolve processos com base no Método de Volumes Finitos. A análise funcionou através de estágios de pré-processamento, processamento e pós-processamento. Nos processos de simulação é construído primeiramente, a geometria, em seguida é realizada a elaboração da malha e, por último é apresentada as equações necessárias para o cálculo.

Portanto, o ANSYS permitiu fazer uma abordagem de estudo da interação fluído-estrutura, objetivando avaliar as pressões através de simulação numérica conforme as características apresentadas e fazer comparação dos resultados fornecidos pelos métodos analíticos.

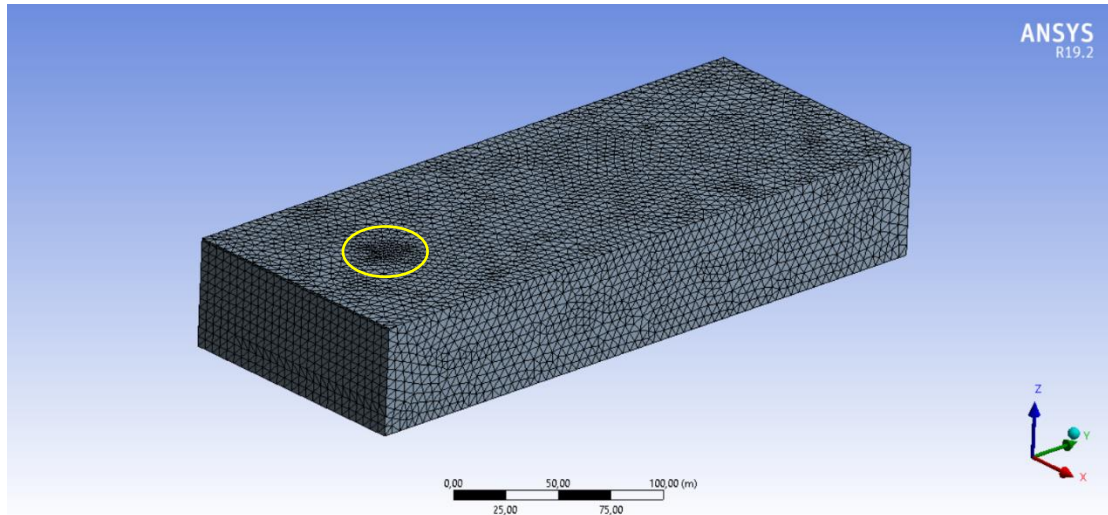
4.2.1 Criação da malha

Esse processo foi uma das etapas mais imprescindíveis em simulações numéricas. O software ANSYS gera a malha de forma automática, mas é necessário definir alguns parâmetros para o processamento. O programa permite um refinamento da malha nos locais de interesses, com isso, permite uma melhor precisão nos resultados. Para este modelo foram usados como parâmetros:

- O espaço mínimo a ser embutido na malha;
- O tamanho mínimo do elemento finito;
- O tamanho máximo global do elemento finito e o seu tamanho máximo nas faces dos objetos.

Em síntese, para a criação da malha, foi definido o número de elementos para o refinamento da malha, dessa forma foi gerada de forma automática conforme apresentado na Figura 15:

Figura 15 – Apresentação da malha fluída para estudo



Fonte: Autor (2022).

É possível observar na Figura 15 que o refinamento da malha onde o objeto de estudo está inserido apresenta dados mais preciso, enquanto o resto da malha apresenta tamanhos maiores. A quantidade de elementos foi limitada para obter resultados de forma rápida de modo que não comprometesse o processador do computador, no entanto ainda com exatidão no cálculo.

4.2.3 Condições de Contorno para Simulação

As condições de contorno servem para identificar os dados de entrada e saída para o processamento no programa, determinando a velocidade, direção e escoamento do volume de controle, na qual simula um túnel de vento usado em laboratório. Foram criados perfis de velocidade para calcular a pressão do vento e simular sua ação estrutural. O Quadro 3 mostra os parâmetros escolhidos:

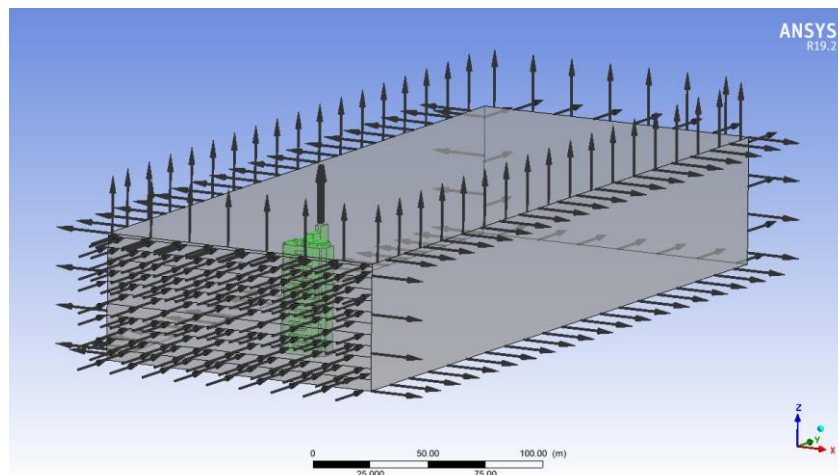
Quadro 3 – Dados de Entrada: Condições de contorno

Contorno	Condições
1 – INLET (Entrada)	Entrada dos perfis de velocidade
2 – OUTLET (Saída)	Saída de pressão
3 – Laterais	Saída de pressão
4 - Piso	Superfície
5 – Objeto de Estudo	Superfície

Fonte: Autor (2022).

Com a inserção desses parâmetros, o objeto de estudo está pronto para análise, sabendo que o número de iteração mínima e máxima foi de 100 e 300, respectivamente. Na figura 16 mostra o modelo preparado para rodagem dos cálculos no software:

Figura 16 – Condição de contorno para análise



Fonte: Autor (2022).

Nessa etapa foi imprescindível a configuração dos parâmetros a serem conduzidos para análise, como as propriedades do material do volume de controle e do objeto de estudo. Portanto, após a finalização da análise e com o relatório gerado dos resultados é possível fazer comparações com as outras metodologias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo abordará os resultados finais da pesquisa, obtidos por meio dos métodos de estudo descritos no decorrer do trabalho. Será apresentado nos resultados os valores encontrados pela NBR 6123:1988 através do método estático e contínuo simplificado e, apresentar valores do modelo numérico desenvolvido no software ANSYS.

5.1 ESTUDO DO EDIFÍCIO NO SOFTWARE

Os parâmetros utilizados para análise no software:

- Fluido: água
- Massa específica: 1.225 kg/m^3
- Altura do prédio: 56,18 m

Propriedades do modelo numérico:

- Número de nós na malha fluída: 21.035
- Número de elementos na malha fluída: 105.226
- Tipo da superfície do sólido (laterais, fundo e topo da malha): Parede sem atrito
- Entrada: Velocidade característica para cada perfil (Tabela 7)
- Saída: Pressão estática igual a 0 Pa.

5.2 AÇÃO DO VENTO NO EDIFÍCIO

Para análise de cálculo da ação do vento no edifício, foram calculadas as pressões atuantes na fachada do condomínio, para isso, utilizou três modos diferentes: Método Estático e Método Contínuo Simplificado da NBR 6123:1988 e modelo numérico do vento no software ANSYS. A seguir são mostrados os parâmetros adotados para cada caso específico:

5.2.1 Método Estático

Segundo as recomendações dadas pela norma, para o método estático foi usado os seguintes parâmetros para a formulação da pressão atuante e força de arrasto:

- i. A edificação em estudo foi analisada nas condições de vento para a localidade de Gurupi/TO, por meio das isopletas, conforme a Figura 5. Portanto, a velocidade básica do vento é de 30 m/s;
- ii. O fator S1 adotado foi 1,0, para terrenos planos ou francamente acidentados, pois está de acordo com a condição do terreno da localidade;
- iii. Para o Fator S2 foram adotadas duas propriedades de projeto imprescindíveis. Primeiramente, é necessário caracterizar a região, estudo local do terreno para determinar a categoria de rugosidade da superfície, por meio do Quadro 1; com isso, adotou-se a Categoria IV “Terrenos Cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada. Altura média dos obstáculos de 10 metros”.
Em seguida, determina-se a classe por meio da dimensão do edifício, por meio do Quadro 2, definindo a Classe C “Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros”.
A norma não inclui na tabela os valores de S2 para todas alturas, então, foi utilizada a equação apresentada no seu Anexo A para encontrar os valores de S2. Os valores calculados são mostrados na Tabela 6.
- iv. Para determinar o Fator S3 foi utilizada a Tabela 2. Desse modo, a edificação estudada se enquadra no valor característico do grupo igual a 1,0, “Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação”.
- v. Por último, determina-se o coeficiente de arrasto para calcular a força resultante.

Tabela 5 – Parâmetros para método estático

Método Estático - NBR 6123:1988			
Velocidade básica do vento (m/s)	Fator S1	Fator S2	Fator S3
30	1	Valores na Tabela 1	1

Fonte: Autor (2022).

Através dos parâmetros apresentados acima e das equações (2) e (3) pôde-se obter as pressões atuantes na fachada do edifício, que são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Pressão atuante na fachada do edifício pelo Método Estático

Altura	Fator S2	Vk (m/s)	q (N/m²)
5	0,73	21,80	291,36
10	0,80	23,94	351,32
15	0,84	25,29	391,97
20	0,88	26,29	423,63
25	0,90	27,09	449,94
30	0,93	27,77	472,64
35	0,95	28,35	492,73
40	0,96	28,87	510,82
45	0,98	29,33	527,32
50	0,99	29,75	542,54
55	1,00	30,14	556,68
56,18	1,01	30,22	559,88

Fonte: Autor (2022).

Portanto, percebe-se proporcionalmente o aumento da pressão “q” em relação à altura da edificação, ou seja, quanto mais alto em relação ao terreno, maior será a pressão atuante. Seguindo o estudo da pesquisa, foi possível encontrar através da equação (7) a força de arrasto igual à 37,57 kN/m².

5.2.2 Método Contínuo simplificado

Para esse mecanismo de cálculo, utilizam-se parâmetros indispensáveis, que são da velocidade básica, Fator S1 e S3, os mesmos utilizados para o método estático. Para encontrar a pressão atuante é preciso determinar os parâmetros p e b através da Tabela 3, com a categoria de rugosidade IV. Posteriormente, determina os parâmetros γ e ζ , encontrados na Tabela 4, tendo como tipo de edificação “Edifícios com estrutura apertada de concreto, sem cortinas”. O parâmetro ξ foi retirado dos ábacos de amplificação dinâmica, referente ao tipo de terreno.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo da pressão equivalente da estrutura frente ao carregamento do vento:

Tabela 7 – Parâmetros do Método Contínuo Simplificado

Método Contínuo Simplificado - NBR 6123:1988				
Velocidade básica do vento V_o (m/s)	Fator S1	Fator S3	Velocidade de projeto V_p (m/s)	Parâmetro b
30	1	1	20,70	0,84
Expoente p	Parâmetro γ	Parâmetro ζ	T1	Amplificação dinâmica ξ
0,135	1,2	0,02	3,65	1,85

Fonte: Autor (2022).

Dessarte, por intermédio das equações (8), (9) e (10), foi possível encontrar os valores das pressões estáticas equivalentes da altura (z) da fachada do edifício, conforme apresentada na Tabela 8:

Tabela 8 – Pressão no cilindro pelo método Contínuo Simplificado

Altura (m)	q_o (N/m²)	Resposta média (N/m²)	Amplitude máxima da resposta flutuante (N/m²)	Resposta equivalente $q(z)$ (N/m²)	q (N/m²)
5	262,66	72,70	2112,10	2184,80	124,23
10	262,66	100,00	4852,33	4952,33	196,66
15	262,66	120,50	7893,32	8013,82	264,07
20	262,66	137,55	11147,72	11285,28	329,74
25	262,66	152,42	14570,62	14723,05	394,75
30	262,66	165,76	18134,08	18299,84	459,59
35	262,66	177,94	21818,84	21996,78	524,51
40	262,66	189,21	25610,74	25799,95	589,64
45	262,66	199,75	29498,85	29698,60	655,07
50	262,66	209,67	33474,50	33684,16	720,85
55	262,66	219,06	37530,58	37749,65	787,00
56,18	262,66	221,21	38498,89	38720,10	802,66

Fonte: Autor (2022).

Portanto, através da resposta equivalente estática na estrutura do edifício, nota-se valores progressivos com o aumento da altura.

5.2.3 Modelo numérico

Para este método de análise, foram utilizados parâmetros de processamento no software. Desse modo, foi usado uma massa específica do ar de $1,225 \text{ kg/m}^3$ e um perfil de velocidade conforme a Tabela 9. O Perfil de velocidade adotado é o mesmo calculado pelo método estático da NBR 6123:188. Essa escolha foi feita para se utilizar os parâmetros de rugosidade do terreno da região de estudo.

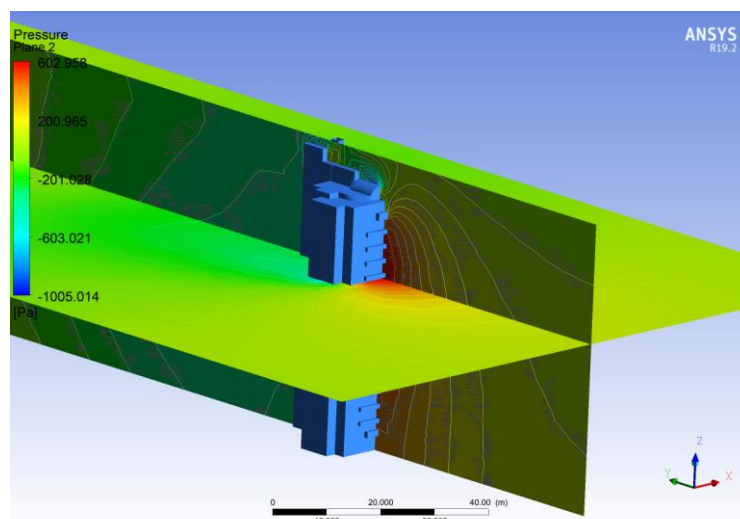
Tabela 9 – Perfil de Velocidade para o modelo numérico

Altura (m)	Velocidade (m/s)
5	21,80
10	23,94
15	25,29
20	26,29
25	27,09
30	27,77
35	28,35
40	28,87
45	29,33
50	29,75
55	30,14
56,18	30,22

Fonte: Autor (2022).

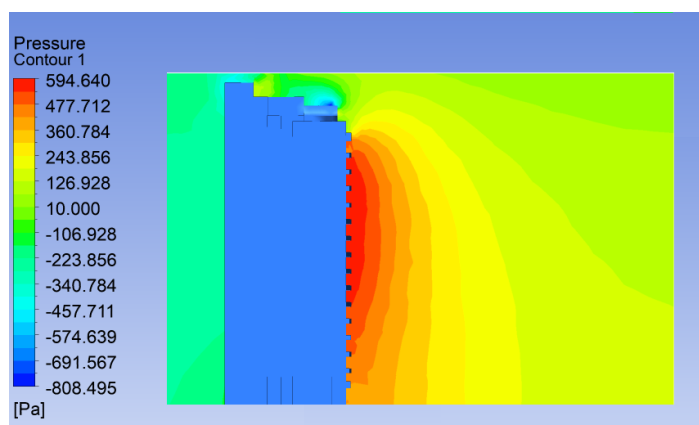
Dessa forma, com os perfis de velocidade atribuídos no software com variação de altura a cada 5 metros, é possível fazer o processamento para obter a análise completa dos resultados no pós-processamento. Portanto, as pressões que exercem na superfície do edifício são mostradas na Figuras 17, 18 e 19, com vistas diferentes. Pode-se notar que seus maiores valores estão nas maiores alturas do prédio.

Figura 17 – Pressão no Prédio (Vista Isométrica)



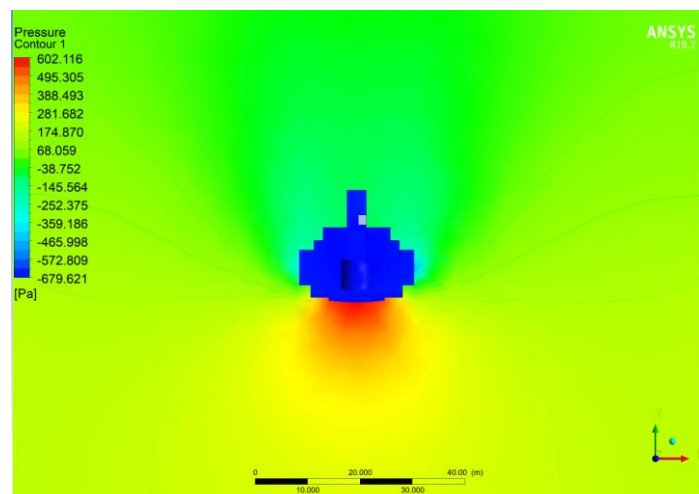
Fonte: Autor (2022).

Figura 18 – Pressão no Prédio (Plano YZ)



Fonte: Autor (2022).

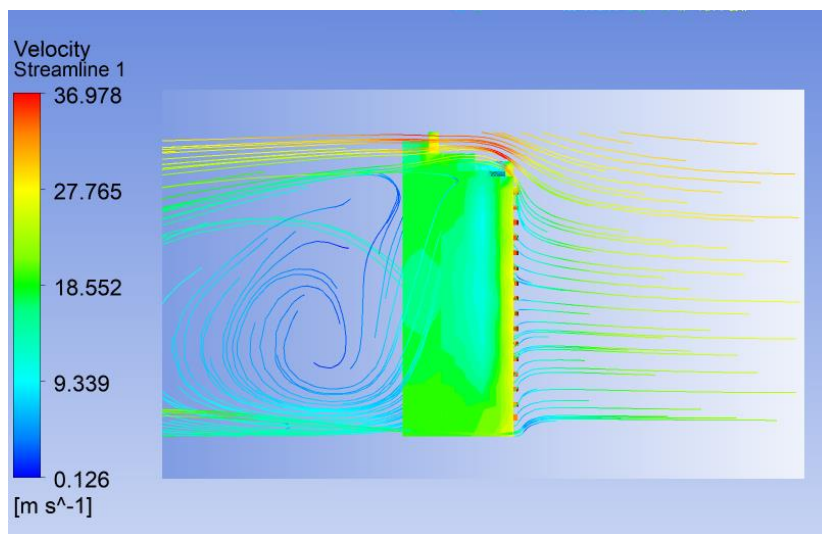
Figura 19 – Pressão no Prédio (Plano XY)



Fonte: Autor (2022).

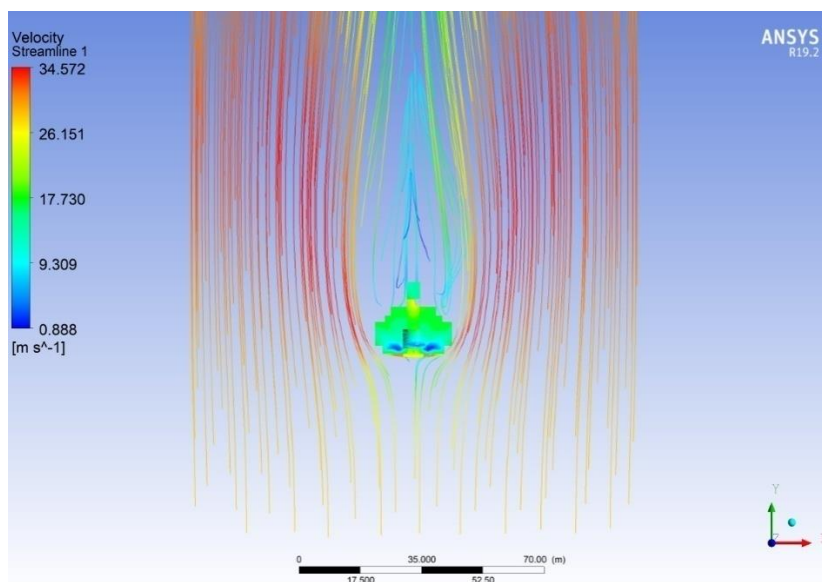
As velocidades do vento na simulação são mostradas nas Figura 20 e 21. É possível notar que a simulação está de acordo com o perfil de velocidade apresentado na Tabela 10. Percebe-se também que quando o ar passa a edificação faz o trajeto de volta, assim formando vórtice, apresentando velocidade próxima de zero, em alguns casos específicos velocidade negativa.

Figura 20 – Velocidades no Prédio (Plano YZ)



Fonte: Autor (2022).

Figura 21 – Velocidades no Prédio (Plano XY)



Fonte: Autor (2022).

Por fim, é possível fazer uma análise comparativa de pressões dos três métodos de cálculo apresentados neste capítulo. No modelo numérico, é possível identificar as pressões

atuantes na superfície da fachada e, os resultados gerados apresentam maior precisão, pois se trata de Método de Elementos finitos. O método contínuo simplificado em relação ao método estático possui valores menores até uma altura de 30 metros e, referente ao modelo numérico até uma altura de 40 metros como ilustrado no gráfico (Figura 22). A Tabela 10 apresenta as comparações de resultados entre os métodos da NBR 6123:1988 e o modelo numérico:

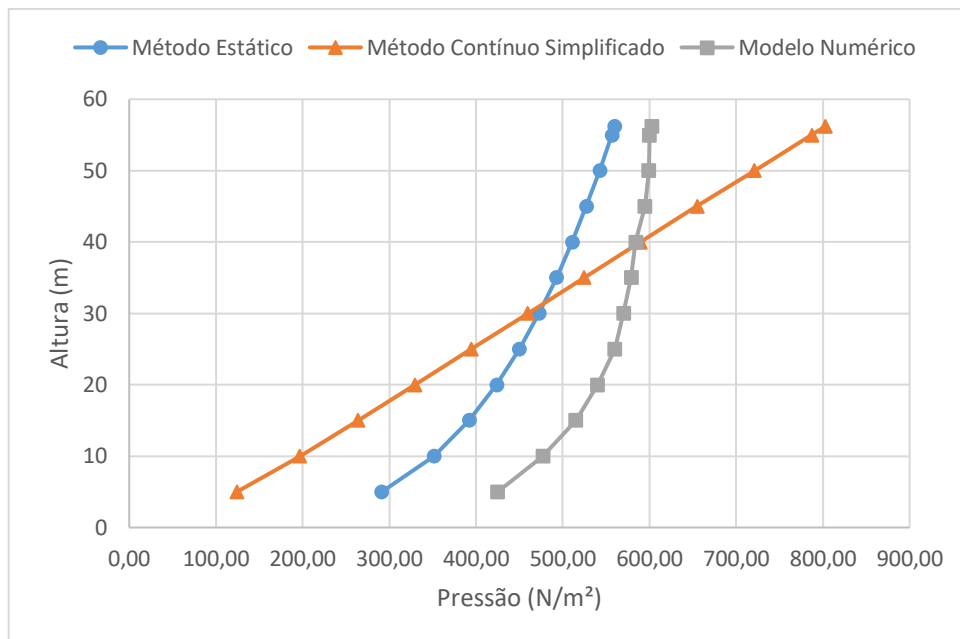
Tabela 10 – Pressões na Fachada do Edifício

	Método Estático	Método Contínuo Simplificado	Modelo Numérico
Altura (m)	q(z) (N/m²)	q(z) (N/m²)	q(z) (N/m²)
5	291,36	124,23	425,0
10	351,32	196,66	477,0
15	391,97	264,07	515,0
20	423,63	329,74	540,0
25	449,94	394,75	560,0
30	472,64	459,59	570,0
35	492,73	524,51	579,0
40	510,82	589,64	584,0
45	527,32	655,07	594,6
50	542,54	720,85	599,0
55	556,68	787,00	600,0
56,18	559,88	802,66	602,9

Fonte: Autor (2022).

A seguir, pode-se ver o gráfico (Figura 22) para melhor compreensão dos resultados, apresentando os valores de pressão encontrados na tabela acima para cada método estudado.

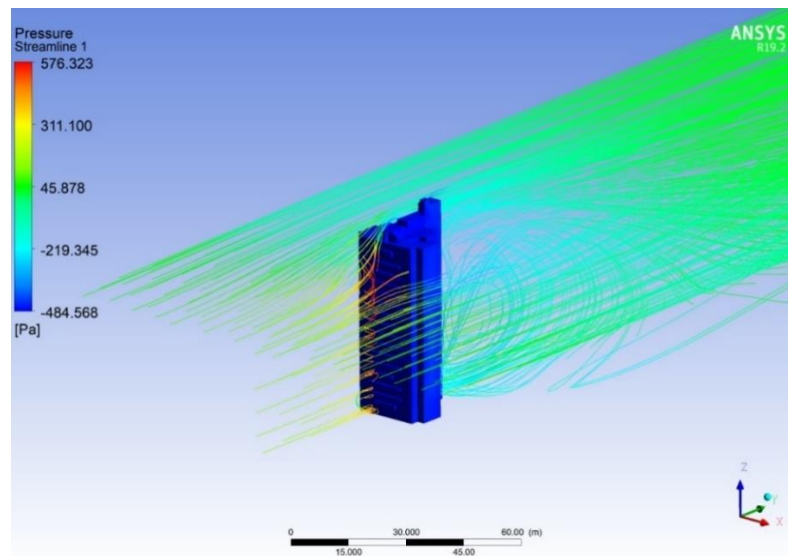
Figura 22 – Diferença de pressões entre as metodologias



Fonte: Autor (2022).

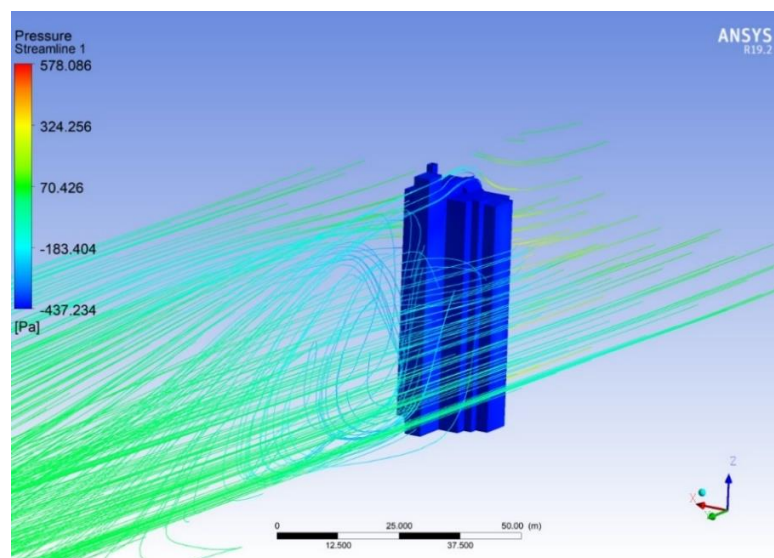
O modelo numérico apresenta valores de pressão superiores e consolidados aos modelos da norma, isso pode ser entendido pelo fato de a norma usar equações para simplificar o cálculo da pressão dinâmica, sendo que no ANSYS esse cálculo é feito por métodos numéricos com maiores precisões. Pelo método contínuo simplificado percebe-se valores progressivos a partir dos 30 m e 40 m, havendo aumento contínuo de pressão conforme o aumento da altura do edifício, enquanto o método estático e modelo numérico apresenta resultados moderados. Nas Figuras 23 e 24 mostra as linhas de fluxo que geram essas pressões no edifício no modelo numérico.

Figura 23 – Linhas de fluxo do vento (Isométrico)



Fonte: Autor (2022).

Figura 24 – Linhas de fluxo do vento ao passar o obstáculo (Isométrico)



Fonte: Autor (2022).

6 CONCLUSÃO

A finalidade no decorrer dessa pesquisa foi fazer uma análise comparativa da ação dinâmica do vento, adotando metodologias distintas como os da NBR 6123:1988, através do método estático, contínuo simplificado e pelo método dos elementos finitos, trazendo uma perspectiva eminente para analisar o comportamento de uma estrutura. Os métodos de análise atenderam o propósito da pesquisa, mostrando que é viável fazer uma análise computacional por meio do MEF para obter resultados precisos e fazer uma simulação virtual.

Com o estudo realizado, observou-se que é preciso fazer uma análise meticulosa em estruturas complexas e edifícios altos, pois há altas pressões atuando no edifício devido a ação do vento conforme a velocidade da região. Portanto, fazer uma análise quantitativa torna-se muito importante para definir parâmetros estruturais.

Analizando o objeto de estudo, o edifício Diamond, percebeu-se a diferença excedente dos valores encontrados de pressão dinâmica entre o método estático, método contínuo simplificado e modelo numérico. O modelo numérico simulado no software ANSYS apresentou resultados maiores do que os métodos da norma, principalmente em relação ao método estático, enquanto o método contínuo simplificado apresenta valores superiores a partir de 40 m de altura. Contudo, a NBR 6123:1988 simplifica os cálculos para o estudo das ações dinâmicas nas estruturas, enquanto o software faz uma análise profunda em estruturas complexas, obtendo conclusões precisas.

No software ANSYS CFX, é possível fazer simulações virtuais, dando importância ao estudo, pois traz melhor visualização da ação do vento atuando na estrutura. Nas Figuras mostradas nos resultados, é notório observar através da simulação o fluxo do vento, os vetores da velocidade, além das pressões atuantes com a variação de altura do prédio. Portanto, no edifício Diamond foi identificado por meio do programa que pressões maiores estão no topo da estrutura.

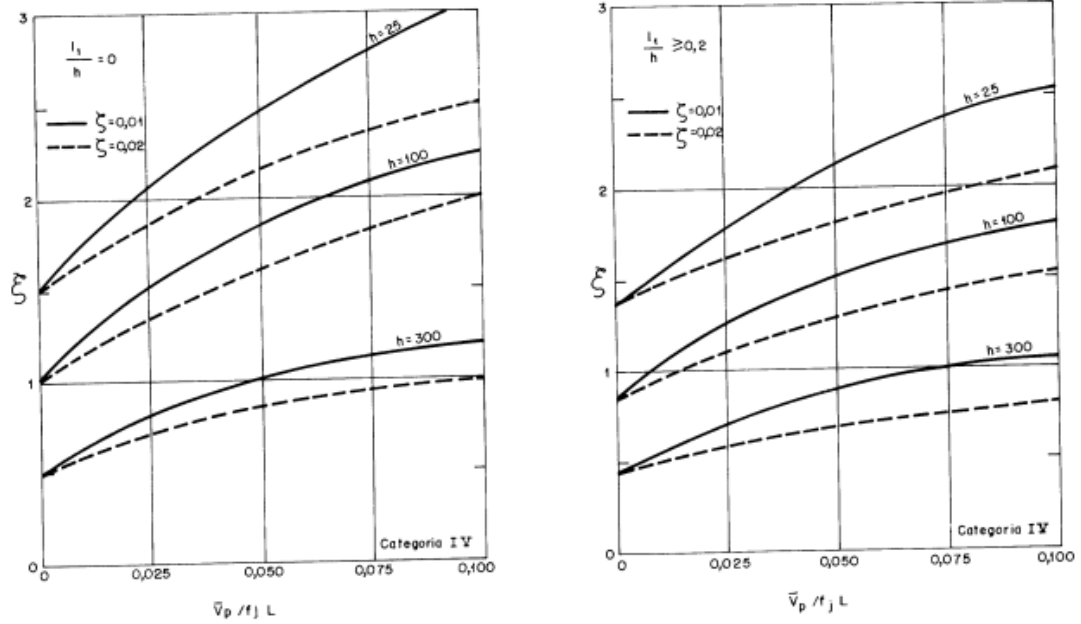
REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro. 1988.
- ALMEIDA, D. C.; VIDOTO, T. A. **Análise comparativa dos métodos estático e dinâmicos da ação do vento em edifícios esbeltos de concreto armado segundo a NBR 6123/1988**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- BARRETO, A. B. **Estudo do ciclo diário do vento à superfície no Nordeste do Brasil**. 2001.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. 2º Edição. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2013.
- BLESSMANN, J. **Ação do vento em edifícios**. 2º Edição. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1989.
- BLESSMANN, J. **O vento na engenharia estrutural**. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 166 p. Porto Alegre, 1995.
- BRADY, L. T. **Aplicação da ação do vento ao dimensionamento de edifícios de acordo com o eurocódigo 1**. 2012. Dissertação de Mestrado. Universidade de Évora.
- CARVALHO, L. **Análise de galpão em estrutura metálica: avaliação das ações do vento típicas para as diversas regiões brasileiras**. 2017.
- CHING, F. D. K.; ONOUE, B. S.; ZUBERBUHLER, D. **Sistemas estruturais ilustrados, padrões, sistemas e projeto**. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- CURCI, Henrique; SAKAI, J. et al. **Estudo da ação do vento em um edifício de múltiplos pavimentos**. Universidade Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.
- DIAS, F.; CRUZ, P.; VALENTE, R. A.; SOUSA, R. J. **Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia**. 2º Edição. ed. Porto: ETEP, 2018.
- DO NASCIMENTO¹, Breno Matias; MORATTI, D; SCOTÁ, N. M. et al. **Abordagem didática e prática da ação do vento em edificações**.
- GONÇALVES, R; SALES, J. J. et al. **Ação do vento nas edificações: teoria e exemplos**. 1º Edição. ed. São Paulo: EESC/USP, 2004.
- GUERZONI, R. **Análise do efeito da ação do vento no projeto de edifícios altos de concreto para diferentes sistemas estruturais**. 2020.
- HUBNER, K.; THORNTON, E. **The finite elements method forengineers**. 2 ed. Ney Work. John Wiley & Sons, 1982.
- LIMA, F. A. R.; SANTOS, R. S. **Análise da ação do vento na estrutura de edificações**. 2019.
- MARTINS, Y. L. **Ação dinâmica do vento em edifícios altos**. 2018.
- MELCONIAN, M. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos: equação preditiva geral para o cálculo da força de retenção em freios de estampagem**. São Paulo: Blucher, 2014.

- MENDIS, P.; NGO, T.; HARITOS, N.; HIRA, A. **Wind Loading on Tall Buildings**. 2007. Publicação: EJSE Special Issue: Loading on Structures (2007).
- MIGUEL, L. F. F. **Estudo teórico e experimental de um edifício alto submetido à ação dinâmica do vento**. 2003.
- PINHO, Felipe; MORAES, L. C. **Vibrações induzidas pelo vento em estruturas metálicas: uma abordagem via elementos finitos**, 2014.
- PITTA, J. **Ações devidas ao vento em edificações**. São Carlos: EdUFSCar, 2013.
- RIOS, M. P. **Efeito de amortecedores no comportamento dinâmico de edifícios altos sob cargas de vento**. Rio de Janeiro, 2015. 136 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2015.
- SANTOS, T. **Uma contribuição ao estudo de ações dinâmicas do vento em edifícios altos comparando diferentes metodologias**. 2017.
- SANTOS, S. H. C.; LIMA, S. S. **Subsídios para uma futura normalização brasileira para resistência anti-Sísmica das estruturas de concreto de edifícios**. Revista IBRACON de Estruturas, v. 1, n. 1, p. 47-62, 2005.
- SILVA, Lucas Lourenço Ferreira da et al. **Análise dinâmica de estruturas submetidas a forças devidas ao vento**. 2018.
- SIMIUI, E.; SCANLAN, R. H. **Wind effects on structures: an introduction to wind engineering**. 2. ed. New York/USA: John Wiley & Sons, 1986.
- SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Apostila da Universidade Federal do Pará do Centro Tecnológico do Departamento de Engenharia Civil – Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia. Belém, maio, 2003.
- TAPAJÓS, L. S.; FERREIRA, J. A.; TEIXEIRA, M. R. et al. **Efeito do vento no dimensionamento de edifícios de concreto armado**. Revista IBRACON de estruturas e materiais, v. 9, p. 883-910, 2016.
- TREIN, C. A. **Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos à ação do vento**. 2005.
- VAZ, L. **Método dos Elementos Finitos: em Análise de Estruturas**. Rio de Janeiro: ELSEVIER, 2011.
- ZÚÑIGA, Lucas de Oliveira; SANTOS, J. et al. **Análise da ação do vento em um edifício de 40 pavimentos e concreto armado utilizando o software CypeCAD**. Revista MIRANTE, v. 10, n. 2, 2017.

ANEXO A – Cálculo do Fator S2

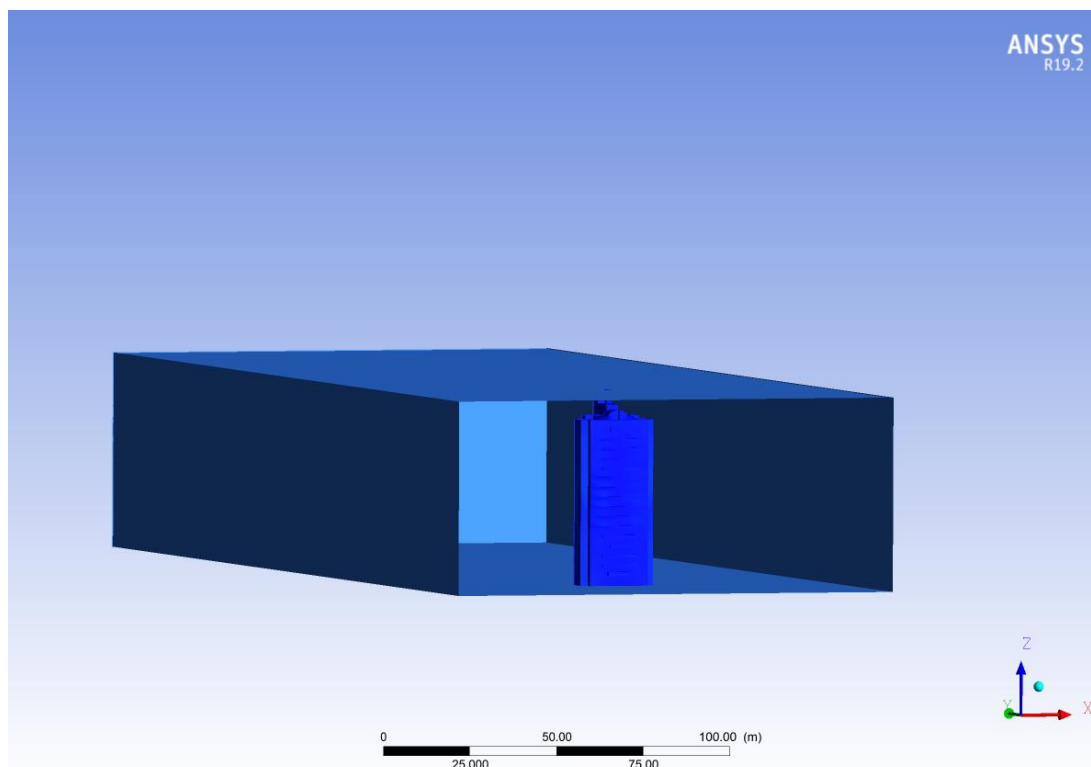
Figura 25 – Coeficiente de amplificação dinâmica



Fonte: NBR 6123 (1988).

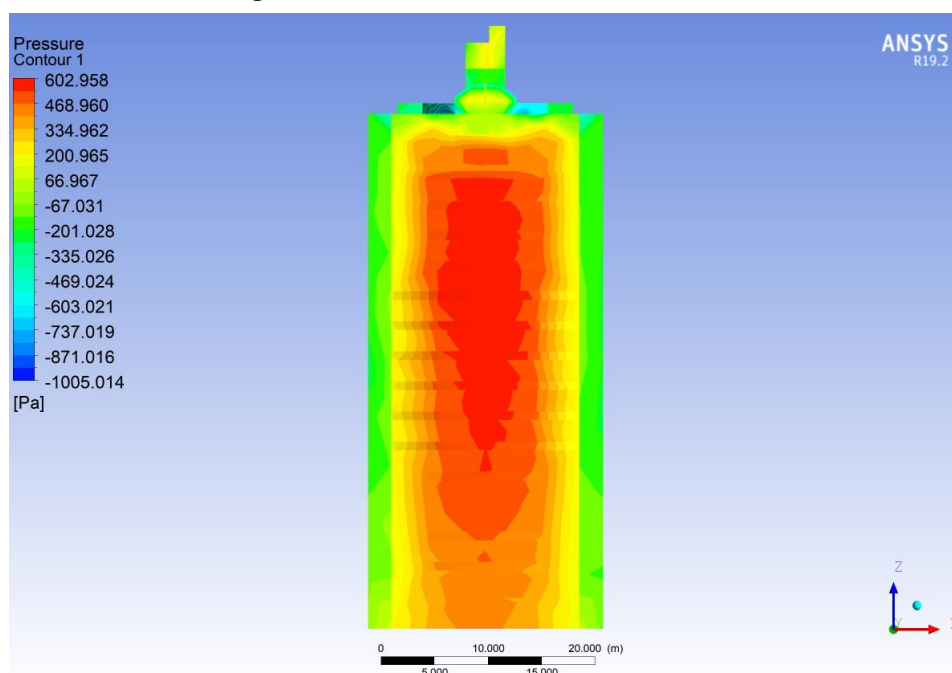
ANEXO B – Modelagem do edifício Diamond no Ansys

Figura 26 – Modelo do Edifício Diamond no ANSYS



Fonte: Autor (2022).

Figura 27 – Pressões atuantes na fachada frontal



Fonte: Autor (2022).