



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE AÇÕES
DINÂMICAS DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS
COMPARANDO DIFERENTES METODOLOGIAS**

THARCIO CASTRO SANTOS

Brasília, 12 de Dezembro de 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE AÇÕES
DINÂMICAS DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS
COMPARANDO DIFERENTES METODOLOGIAS**

THARCIO CASTRO SANTOS

ORIENTADOR: PROF. LINEU JOSÉ PEDROSO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II

BRASÍLIA – DF, 12 DE DEZEMBRO DE 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE AÇÕES DINÂMICAS
DO VENTO EM EDIFÍCIOS ALTOS COMPARANDO
DIFERENTES METODOLOGIAS

THARCIO CASTRO SANTOS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof. Lineu José Pedroso, Dr. Ing (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (ENC-UnB)
(Examinador interno)

Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing. (ENC-UnB)
(Examinador interno)

BRASÍLIA/DF, 12 DE DEZEMBRO DE 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, THARCIO CASTRO

Uma Contribuição Ao Estudo De Ações Dinâmicas Do Vento Em Edifícios Altos Comparando Diferentes Metodologias [Distrito Federal] 2017.

xv, 57 p., 210 x 279 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Análise dinâmica

2.Ação de Vento

3.Fluido-Dinâmica Computacional

4.Edifícios Altos

5.Método dos Elementos Finitos

6.ANSYS CFX

I ENC/FT/UnB

II Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, T.C. (2017). Uma contribuição ao estudo de ações dinâmicas do vento em Edifícios Altos comparando diferentes metodologias. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xv, 57 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Tharcio Castro Santos

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Uma Contribuição Ao Estudo De Ações Dinâmicas Do Vento Em Edifícios Altos Comparando Diferentes Metodologias

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Tharcio Castro Santos
QNN 26 Conjunto D casa 34
72.220-264 - Ceilândia/DF - Brasil
tharciocsantos@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A Deus que me permitiu a dádiva da vida e do aprender.

Aos meus pais Valdeires Castro de M. Santos e Francisco Valdemir da S. Santos por todo amor, incentivo e sacrifícios feitos para que eu pudesse ter uma educação de qualidade.

À minha irmã Thays Castro Santos por todo o incentivo, conselhos valiosos passados e apoio dado durante toda a graduação. Ao meu irmão Tharcísio Castro Santos por todo apoio e ajuda, sem o qual esse trabalho não estaria finalizado.

Ao meu orientador Lineu José Pedroso por todo o conhecimento passado, pela disponibilidade para tirar dúvidas em qualquer momento e pelas oportunidades oferecidas na busca do conhecimento.

Aos professores Luciano Mendes Bezerra e William Taylor Matias Silva pela disponibilidade em participar da banca examinadora e pelos conselhos, correções e conhecimentos passados.

À minha família por sempre estarem ao meu lado me dando suporte em todos os momentos felizes e tristes, especialmente meus avós Marçal e Letice, minha cunhada Isabela, minha tia Salete, meu tio Vandir (*in memoriam*) e meus primos Haianne e Harisson.

Aos meus amigos da Civil Karoline, Lucas Rincon, Bruno, André, Amanda Borges, Aline, Nicholas e Jéssyca por todos os sofrimentos e conhecimentos compartilhados nos 4 anos de engenharia civil.

Aos meus amigos da FGA Taís, Jimmy (Lucas), Danilo, Joacy, Lívia, Paulo, Kamilla, Renato, Larissa e Kaio pelos três semestres de convivência diária e depois 4 anos que mesmo de longe sempre me incentivaram a lutar pela busca do conhecimento.

Às minhas amigas de infância Thaís e Darana por todo amor, carinho e incentivo nos últimos 12 anos da minha vida.

Aos meus colegas de curso que direta ou indiretamente me ajudaram nesse período de graduação. Assim como à professora Cláudia Gurjão que sempre foi solícita para ajudar no que pudesse durante a graduação.

Ao Eng. Leandro Farinha e ao Eng. Leonardo Katori por todos os conhecimentos a respeito de projetos em engenharia passados durante o período de estágio na CODHAB.

“A tarefa não é tanto ver aquilo
que ninguém viu, mas pensar o que
ninguém ainda pensou sobre aquilo
que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Com o crescimento da população e a redução dos espaços físicos, a verticalização das cidades tem surgido como um processo contínuo e repleto de inovações. Edifícios cada vez mais altos e esbeltos são construídos nas grandes cidades. Em consequência, estas construções têm se tornado mais suscetíveis as solicitações dinâmicas, tais como ventos e sismos, sendo então necessário estudos das mesmas nessas edificações. Este trabalho trata dos efeitos dinâmicos em edifícios altos devido à ação dos ventos, que provocam deslocamentos e vibrações ao longo da estrutura. Utilizando o método dos elementos finitos, disponível no software ANSYS, foram confeccionados modelos numéricos para análise e comparação das pressões do vento em edificações usando modelos simplificados. Posteriormente o edifício Burj Khalifa foi modelado considerando as pressões pela norma brasileira.

Palavras-chave: ações dinâmicas, vento, edifícios altos, elementos finitos, análise dinâmica.

ABSTRACT

The verticalization of cities has emerged as a continuous process full of innovations due to population growth and reduction of physical spaces. Tall and slender buildings are built in large cities. As a consequence, these constructions have become more susceptible to dynamic actions such as winds and earthquakes, and therefore wind and earthquake dynamic studies are required in these buildings. This work deals with the dynamic effects in tall buildings due to the action of the winds, which cause displacements and vibrations along the structure. Using the finite element method, available in ANSYS software, numerical models were prepared to analyze the wind pressures on building using simplified models. Subsequently, a the Burj Khalifa building was modeled considering the wind pressures by the Brazilian Standard.

Key-words: dynamic loads, wind, tal buildings, Finite Element Method, dynamic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Metodologia aplicada.....	5
Figura 2 - Variação do vento em relação à altura dos obstáculos	11
Figura 3 - Deflexão típica de um edifício sujeito a ventos turbulentos.....	12
Figura 4 - Isopletas de Velocidade Básica do Vento.....	14
Figura 5 - Fator topográfico S1	15
Figura 6 - Coeficiente de arrasto para ventos turbulentos.....	18
Figura 7 – Representação do modelo discreto da NBR 6123:1988.....	21
Figura 8 - Burj Khalifa	23
Figura 9 - a) Núcleo reforçado hexagonal. b) Variação da planta dos andares com a altura ..	24
Figura 10 - Direção do vento na edificação.....	25
Figura 11 – Formação do desprendimento de Vórtices – cópia do projeto original	26
Figura 12 - Burj Khalifa (Nível 1).....	27
Figura 13 - Burj Khalifa (Térreo).....	28
Figura 14 - Burj Khalifa (Nível 120).....	28
Figura 15 - Modelo do Burj Khalifa.....	29
Figura 16 - Elemento FLUID142	32
Figura 17 - Malha fluída do cilindro simplificado	33
Figura 18 - Força de arrasto da água no cilindro.....	36
Figura 19 - Força de arrasto apresentada por Ferreira (2012)	36
Figura 20 - Pressão no cilindro de calibragem	37
Figura 21 - Pressão no cilindro de acordo com Ferreira (2012).....	38
Figura 22 - Pressão no cilindro (Vista Isométrica).....	42
Figura 23 - Pressão no cilindro (Plano XY)	43
Figura 24 - Pressão no cilindro (Plano XZ).....	43
Figura 25 - Velocidades no cilindro (Plano ZY)	44
Figura 26 - Velocidades no cilindro (Plano XZ)	44
Figura 27 - Pressões no cilindro para diferentes metodologias	46
Figura 28 - Linhas de fluxo do vento após passar pelo cilindro (Isométrico).....	47
Figura 29 - Desprendimento de vórtices no cilindro	47
Figura 30 - Pressões no Burj Khalifa pela NBR 6123:1988	49
Figura 31 - Coeficiente de amplificação dinâmica (Fonte: NBR 6123:1988).....	55
Figura 32 - Modelo do Burj Khalifa no ANSYS.....	56

Figura 33 - Malha do Burj Khalifa	56
Figura 34 - Detalhe da malha do Burj Khalifa	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de superfície do terreno.....	16
Tabela 2 - Classes de dimensões dos edifícios	16
Tabela 3 - Fator S2	17
Tabela 4 - Fator S3	17
Tabela 5 - Coeficiente b e p para análise dinâmica	19
Tabela 6 - Parâmetros γ e ζ para método contínuo simplificado	20
Tabela 7 - Parâmetros para método estático	39
Tabela 8 - Pressão atuante na estrutura pelo Método Estático	39
Tabela 9 - Parâmetros do Método Contínuo Simplificado	40
Tabela 10 - Pressão equivalente no cilindro pelo Método Contínuo Simplificado	41
Tabela 11 - Perfil de Velocidade para modelagem numérico de cilindro	41
Tabela 12 - Resumo das pressões no cilindro.....	44
Tabela 13 - Pressões no Burj Khalifa pela NBR 6123:1988	48

LISTA DE SÍMBOLOS

- V_0 – velocidade básica do vento (m/s)
- V_k – velocidade característica do vento (m/s)
- S_1 – fator topográfico
- S_2 – fator que pondera a rugosidade do terreno
- S_3 – fator probabilístico
- z – altura (m)
- d – diferença de nível entre a base e o topo de morro ou talude;
- θ – ângulo de inclinação (em graus)
- b – parâmetro meteorológico usado na determinação de S_2
- F_r – fator de rajada
- p – expoente da lei potencial de variação de S_2
- Φ – índice de área exposta
- A_e – área efetiva
- A_0 – área total do contorno do reticulado
- q – pressão dinâmica (N/m²)
- A – área de referência
- F_a – força de arrasto
- C_a – coeficiente de arrasto
- 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
- \bar{V}_p – velocidade de projeto (m/s)
- x – primeiro modo de vibração
- ζ – razão de amortecimento crítico
- f_1 – frequência fundamental
- 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 (10 m)

n – número de graus de liberdade

f_j – frequência natural (Hz)

$q(z)$ – variação da pressão dinâmica

ξ – coeficiente de amplificação dinâmica

l_i – largura ou diâmetro da edificação

X_i – força total devida ao vento na direção da coordenada i

\bar{X}_i – força média

\hat{X}_i – componente flutuante.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação	2
1.2	Colocação do problema	2
1.3	Justificativa	2
1.4	Objetivo geral	3
1.5	Objetivos específicos	3
1.6	Metodologia	3
1.7	Abrangência e limitações	5
1.8	Organização do trabalho	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.	ASPECTOS TEÓRICOS: AÇÃO DO VENTO SEGUNDO NBR 6123:1988	11
3.1	Norma Brasileira NBR 6123/1988.	12
3.1.1	Método Estático	12
3.1.2	Método Contínuo Simplificado	19
3.1.3	Método Discreto	20
4.	GENERALIDADES E MODELAGEM DO BURJ KHALIFA	23
4.1	Modelagem do Burj Khalifa	26
5.	ASPECTOS COMPUTACIONAIS E METODOLOGIA	30
5.1	Revisão bibliográfica e fundamentação teórica	30
5.2	Fluido-dinâmica computacional (CFD)	30
5.3	ANSYS	30
5.3.1	ANSYS CFX	31
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
6.1	Estudo progressivo de cilindro	35
6.2	Ação do vento no cilindro.....	38

6.2.1	Método Estático.....	38
6.2.2	Método Contínuo simplificado.....	40
6.2.3	Modelo numérico.....	41
6.3	Ação do vento no Burj Khalifa.....	47
7.	Conclusões.....	50
8.	Recomendações e perspectivas futuras.....	51
9.	Referências Bibliográficas.....	52
	Anexo A – Cálculo do fator S_2	55
	Anexo B – Modelagem do burj khalifa no ansys.....	56

1. INTRODUÇÃO

Com o grandioso avanço técnico da humanidade e o crescimento intensificado dos grandes centros urbanos, a construção civil vem se impulsionando. Porém, devido à pouca disponibilidade de espaços horizontais, o uso de grandes edificações se torna a solução mais viável para o crescimento. Esse processo de verticalização dos centros urbanos deve ser estudado de forma a garantir a segurança das edificações frente a ações dinâmicas, como o carregamento horizontal oriundo da ação de ventos.

Conforme afirma Blessmann (2001), *“O vento passou a ser considerado um fator relevante conforme as construções foram adquirindo mais esbeltez, e as estruturas promovendo cada vez mais uma menor quantidade de material”*. Com isso, como parte do projeto estrutural de edificações, o estudo do vento deve ser feito de forma a mitigar eventuais problemas causados pelas oscilações e deslocamentos horizontais nos prédios.

Dentre os problemas causados pela ação do vento, podem ser destacados problemas do estado limite de serviço, como vibrações excessivas ou fadiga dos materiais, causando desconforto aos usuários. Em casos extremos, essas ações podem levar a edificação ao seu estado limite último, provocando a ruína da mesma, como por exemplo em 2011 na cidade de Belém-PA.¹

Atualmente, a ação estática devido ao carregamento do vento é contemplada em várias normas internacionais. Isso se deve ao trabalho desenvolvido por profissionais dedicados a compreensão e caracterização do vento. Porém, com o avanço da tecnologia e dos processos computacionais, o comportamento dinâmico das edificações pode ser cada vez mais estudado como forma de estimar a resposta dos edifícios frente a essas solicitações.

No Brasil, tem-se como norma para tratar do efeito do vento sobre as estruturas a NBR 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações). Ela apresenta métodos que devem ser usados para o estudo do vento em edificações. As metodologias utilizam-se da carga estática equivalente a carga real dinâmica e assim podem ser obtidos os efeitos do vento sobre a estrutura por três maneiras distintas: Forças Estáticas Devidas ao Vento, Modelo Dinâmico Simplificado e Modelo Dinâmico Discreto.

Assim, para uma análise estrutural devido à pressão do vento, podem ser utilizados diversos tipos de modelagem. Como forma de simplificar o estudo, pode-se utilizar exemplos

¹ Fonte: <http://noticias.r7.com/cidades/noticias/erro-de-calculo-sobre-efeito-do-vento-provocou-desabamento-de-predio-em-belem-20110314.html>

de somente um grau de liberdade, fazendo uma distribuição da massa e rigidez ao longo da estrutura. Por outro lado, pode-se usar sistema com N graus de liberdade para uma pesquisa mais aprofundada de sistema complexos. Porém a análise deve ser feita de forma a chegar no melhor resultado, independente da simplificação ou não da estrutura.

Dentro da gama de software de modelagem, pode-se destacar o ANSYS, que por meio do módulo CFX permite o estudo do escoamento e da interação fluido-estrutura. Assim, por meio da caracterização do escoamento através das pressões e forças de arrasto e do objeto estudado, pode-se chegar numa etapa posterior (não abordado nesse trabalho) a resultados de deslocamentos e vibrações na estrutura.

1.1 Motivação

O Burj Khalifa como o mais alto edifício feito pelo homem na atualidade, assim como os desafios técnicos e construtivos apresentados no processo de sua concepção, projeto e execução representou a inspiração e motivo maior da escolha desse tema de projeto final. Ou seja, ele se constitui ao longo do texto deste trabalho como plano de fundo e um objeto, ainda que distante, a ser sempre perseguido.

1.2 Colocação do problema

Para o projeto de grandes edifícios, não somente a carga de uso da estrutural deve ser o foco dos estudos. As cargas de vento podem ser tão importantes quanto em casos de edificações de grande esbeltez e/ou altura. Assim, primeiro se faz necessário conhecer esse tipo de ação a fim de caracterizá-la e permitir uma modelagem de forma eficiente e acurada.

Após o desenvolvimento do projeto da edificação em estudo, é necessário o uso de simplificações para desenvolver o modelo numérico de forma a representar a realidade estrutural. Assim, inicia-se as etapas de validação do modelo estrutural e do fluido, permitindo as futuras análises de maior complexidade.

1.3 Justificativa

Conforme exposto nos itens anteriores, o estudo da ação do vento em edifícios se faz necessário para a maioria dos projetos estruturais de edifícios, de forma a garantir a segurança dos usuários e a vida útil da edificação. Então a determinação e compressão desse fenômeno deve ser feita para engenheiros civis em geral.

Com isso, correlacionar as metodologias apresentadas pela norma NBR 6123:1988 com estudos de modelos numéricos simplificados compõem-se uma forma de mostrar as diferenças, vantagens e desvantagens de cada análise e de se avaliar os resultados obtidos por metodologias diferentes.

1.4 Objetivo geral

Essa monografia possui como objetivo estudar a ação de ventos em grandes edifícios, a partir de métodos normativos e computacionais com auxílio do software ANSYS. Assim, analisar as forças atuantes na estrutura a partir dos métodos indicados pela norma brasileira NBR 6123:1988 e por meio da modelagem simplificada do edifício em estudo.

1.5 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Apresentar o estudo do vento e sua ação em edifícios
- Apresentar as metodologias indicadas pela norma de vento.
- Apresentar algumas características importantes do edifício estudado, Burj Khalifa.
- Modelar o edifício de forma simplificada.
- Estudar a interação fluido-estrutura por meio de software compatíveis, de forma progressiva.
- Validar o modelo simplificado por meio de comparação com a literatura.
- Verificar a solicitação horizontal do vento por meio da modelagem e dos cálculos pela norma brasileira.
- Verificar a compatibilidade dos valores encontrados.

1.6 Metodologia

Inicialmente é abordado a caracterização do fenômeno natural vento para que se possa entender sobre o assunto desta monografia. Após isso, é descrita a norma brasileira de vento, NBR 6123:1988, por meio dos equacionamentos das três metodologias presentes na mesma. São mostradas as equações, tabelas e figuras importantes que permitem o cálculo das pressões na estrutura devido ao carregamento horizontal de vento.

Após isso, são apresentadas as principais características do edifício Burj Khalifa (Dubai) para que se possa observar a complexidade da estrutura e sua magnitude em relação a

outros prédios comuns. Também é relatado como foi desenvolvido o modelo 3D para as simulações futuras. Por fim são mostrados os aspectos computacionais implementados para o estudo.

Assim, se faz um estudo comparativo do modelo numérico feito com o modelo numérico encontrado na literatura para a devida calibração e consolidação do conhecimento acerca do software. Com a validação feita, segue-se para a comparação de resultados entre as metodologias normativas e a simulação numérica.

Por último é utilizada a estrutura do Burj Khalifa para calcular as pressões por meio da norma brasileira. Esse estudo é feito simulando a construção de um edifício similar nas condições de vento do Brasil.

A Figura 1 apresenta de forma resumida o processo utilizado para o estudo deste material.

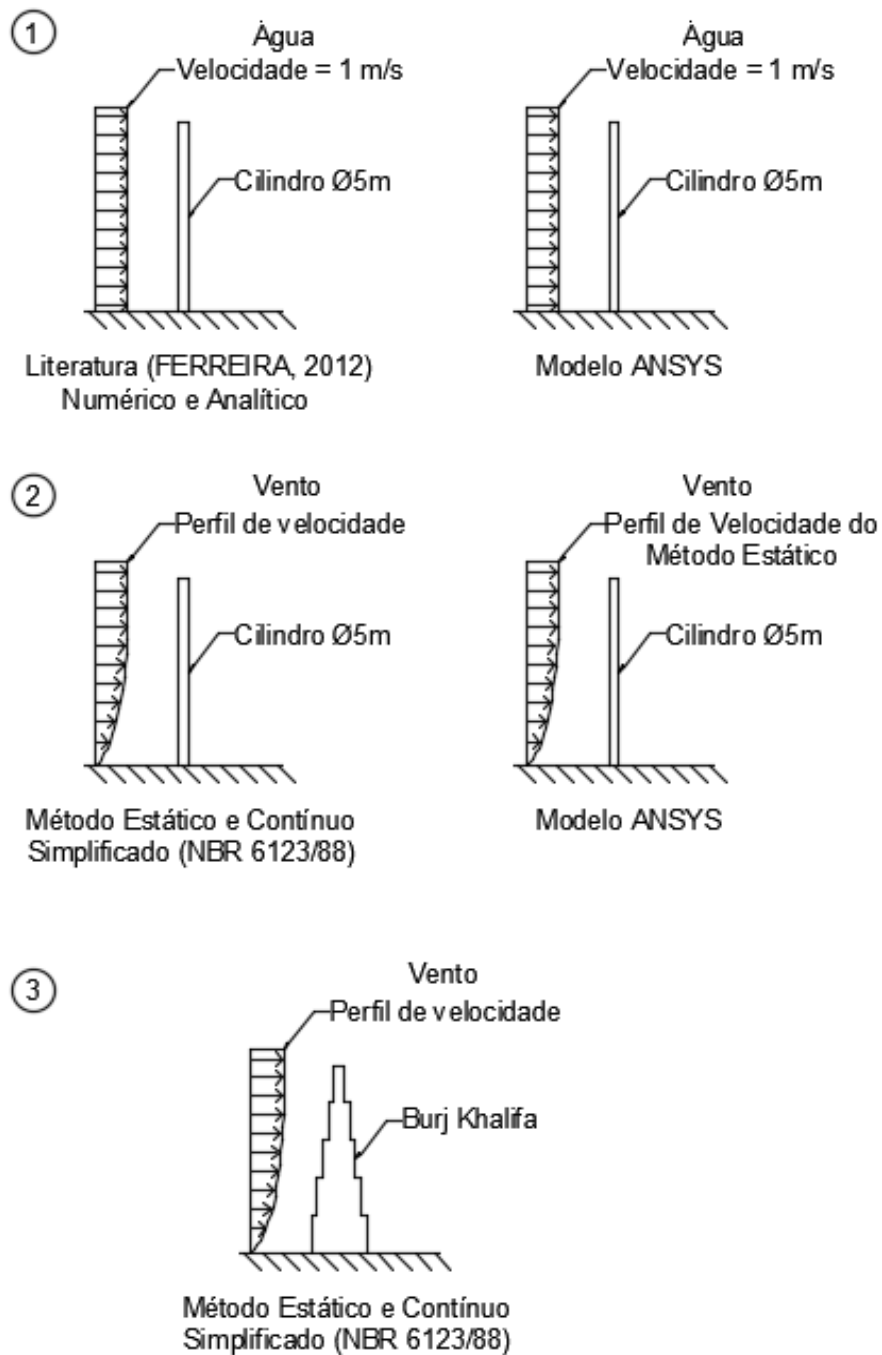


Figura 1 - Metodologia aplicada

1.7 Abrangência e limitações

O presente estudo possui como abrangência:

1. A ação do vento em edificações;
2. O equacionamento das metodologias da norma NBR 6123:1988;
3. Cálculo das pressões estática e dinâmica equivalente para estrutura cilíndrica simplificada;

4. Estudo do prédio mais alto do mundo atualmente, Burj Khalifa – Modelagem da geometria no AutoCAD, mas a análise numérica não foi possível de ser realizada em função das limitações computacionais;

As limitações do trabalho são:

1. Uso do edifício como uma estrutura rígida;
2. Não abordagem de outras ações dinâmicas como o sismo;
3. Modelo com características aproximadas, já que não foi possível encontrar os dados exatos do prédio;
4. Estudo do Burj Khalifa somente para as metodologias da norma brasileira, não tendo o estudo numérico no ANSYS.
5. Aspectos da forma da seção exigem refinamento mais representativo na zona de perturbação do escoamento de seções do Burj Khalifa.
6. Conservando-se as mesmas relações de malha usadas no modelo cilindro simplificado, o número de elementos finitos seria da ordem de 10 milhões de elementos. Fato impeditivo de ser realizado com o computador convencional, mesmo com a segregação da forma em trechos mais curtos.

1.8 Organização do trabalho

O capítulo 1 traz uma introdução ao assunto abordado na monografia, assim como os seus objetivos, justificativas, colocação, abrangência e limitações do estudo e uma relação dos capítulos subsequentes.

O capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica sobre o assunto, trazendo um resumo de alguns trabalhos realizados na área com as teorias e conclusões de cada autor.

No capítulo 3 é tratado a teoria por trás da ação dos ventos nas edificações, por meio da descrição desse fenômeno. Também são apresentadas as metodologias apresentadas na NBR 6123:1988, assim como seus parâmetros e simplificações.

No capítulo 4 são relatadas algumas importantes informações sobre o edifício Burj Khalifa, que será utilizado nesse estudo. É também exposto a forma de modelagem, limitações e simplificações utilizados no edifício em questão.

No capítulo 5 são apresentados os aspectos computacionais e a metodologia empregada. É apresentado o software ANSYS, assim como os elementos de simulação e

características do estudo. Por fim, é detalhado como ocorre o estudo progressivo para a realização deste.

O capítulo 6 aborda primeiramente o estudo progressivo para validação do modelo numérico utilizado na monografia. Após isso, é mostrado um comparativo entre os resultados numéricos e calculados pela norma brasileira para o cilindro estudo. Por fim, são colocados os resultados para as forças no edifício Burj Khalifa.

O capítulo 7 abrange as conclusões retiradas deste estudo que permitiram a solidificação dos conhecimentos e análise crítica dos modelos de cálculo.

No capítulo 8 são relatadas as recomendações e perspectivas para trabalhos futuros na área e estrutura.

No capítulo 9 são referenciados os trabalhos utilizados para a confecção desta monografia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Merce (2003) realizou um estudo de análise estática e dinâmica de torres metálicas autoportantes devido à ação de ventos por meio de programas desenvolvidos para este propósito. Foi feita a simulação de uma torre de 40 metros de altura, por meio dos métodos estatísticos de Davenport e de simulação de Monte Carlo. Os resultados do primeiro método mostraram-se muito próximo do método discreto da NBR 6123:1988 e corresponderam a aproximadamente 85% dos valores encontrados pela simulação de Monte Carlo.

Trein (2005) faz ensaio em túnel de vento para comparação entre a norma brasileira e a norma canadense *Supplement to the NBCC/85*. O autor executa a construção de um modelo aeroelástico de um protótipo para ser ensaiado, fornecendo respostas dinâmicas nas direções longitudinal e transversas. Como conclusões do estudo obteve-se que para respostas transversais, não há técnicas analíticas genéricas existentes e as respostas dinâmicas na direção transversal da incidência do vento apresentaram-se maiores que as respostas dinâmicas na direção longitudinal.

Mendis *Et Al.* (2007) apresenta um estudo do comportamento do vento para análise simplificadas por meio do *Australian Wind Code*. Seu texto apresenta as principais características a serem levadas em conta em um estudo, além de fazer um comparativo das vantagens e desvantagens do formato quase-estável/pico de rajada.

Chávez (2006) em sua tese analisou os deslocamentos, acelerações e esforços de um edifício alto por meio do carregamento aleatório de vento. A autora utilizou o software ANSYS para a análise dinâmica no domínio do tempo por meio da simulação do efeito turbulento do vento. Os carregamentos do vento foram obtidos pela superposição de funções harmônicas consistentes com um espectro de vento adotado e aplicada a técnica de Monte Carlo para avaliação estatística das respostas. Para a avaliação do efeito dinâmico provocado pelas rajadas do vento foram utilizadas duas metodologias de análise: o método simplificado da NBR6123:1988 e método do Vento Sintético apresentado por FRANCO (1993). Como resultados, a autora obteve:

- Para o dimensionamento, o método estático da NBR 6123 é mais prático, porém limitado para situações em que o efeito de flutuação do vento não cause vibrações.
- O método dinâmico simplificado da norma apresentou valores elevados, comparados ao Método do vento sintético, em relação a aceleração no topo do edifício.
- Esse último método se mostra mais viável a economia da construção e conforto do usuário, porém exige mais esforço computacional.

Silva (2009) realizou um estudo comparativo entre a ação estática e dinâmica contínua simplificada estabelecida pela norma brasileira de vento. Foi modelado um edifício de 29 pavimentos, metálico e com contraventamento, no software SAP 2000. A estrutura foi submetida primeiro ao método estático de ação do vento e após isso à ação dinâmica. Como resultado, foram determinados 15 modos de vibração, sendo 5 com frequência inferior ao sugerido por norma, assim havendo necessidade de uma análise modal para cálculos mais preciso.

Vanin (2011) estudou o efeito dinâmico em edifícios altos devidos à ação do vento, provocando oscilações devidas ao desprendimento de vórtices. Por meio de uma balança dinâmica de três graus de liberdade (BD3GDL), determinou-se os deslocamentos longitudinais e transversais na direção do vento, torção e flexão utilizando modelos em escala reduzida em ensaios em túnel de vento. Como conclusões, foi observado que para ventos perpendiculares às fachadas os resultados do método experimental estiveram com concordância com outras respostas de autores e métodos teórico-numéricos. Observou-se também que a balança utilizada apresentou-se uma ferramenta muito útil para ensaios em túnel de vento, simulando satisfatoriamente os efeitos dinâmicos de desprendimentos cadenciado de vórtices.

Almeida e Vidota (2013) fizeram um estudo comparativo entre os métodos estático e dinâmicos sugeridos pela norma NBR 6123:1988. Foram feitas a modelagem de três tipos de edifícios com diferentes esbeltezes e alturas, com seção constante, por meio do software SAP 200 v.15. Assim, acharam as frequências naturais, modos de vibração e deslocamentos tanto para vibração livre quanto para forçada devido ao carregamento de vento. Como resultado, verificaram que o método estático apresenta resultado mais conservador para projeto estrutural, quando comparado aos métodos dinâmicos da norma.

Oliveira (2014) realizou um estudo de três edifícios alto com diferentes seções geométricas aplicando as metodologias propostas pelo RSA (*Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes*) e EUROCODE 1 para a quantificação estática da ação do vento. Como resultado, foi obtida a resposta dinâmica ao longo do tempo com a variação de características dos edifícios. O autor conclui que para edifícios com a mesma área em planta e inércias semelhantes, a forma do edifício possui uma grande importância no que refere à resposta dinâmica do edifício relativamente à ação do vento.

Cachuço (2014) apresenta em sua dissertação um estudo sobre as incertezas acerca da determinação das frequências naturais de estruturas de vibrações livre em edifícios altos de

concreto. Foram comparadas diferentes metodologias para a definição das frequências naturais. Os resultados apresentaram boas relações entre baixas frequências naturais e medições de resposta sísmica. Também se observou uma boa convergência para diferentes métodos computacionais.

Rios (2015) apresenta uma análise numérica para um edifício hipotético sujeito a cargas de ventos com amortecedores. Primeiramente realizou-se uma análise estática e após foi feita uma análise dinâmica com definido pelo método dos ventos sintéticos. Assim, foi analisada a resposta da estrutura para deslocamento, velocidade e aceleração para os critérios de segurança e conforto. Observou-se que a resposta estrutural nos primeiros segundos de aplicação da carga apresenta resultados muito elevados, sendo reduzido ao longo do tempo, por meio do funcionamento dos amortecedores.

Ferreira (2012) faz um estudo progressivo da ação de ondas em plataformas offshore. Primeiramente foi feita a simplificação de um cilindro engastado ao fundo com a ação da corrente marinha superficial e profunda, ondas progressivas de baixa inclinação em águas profundas e vento oceânico. Assim, foram desenvolvidas equações cinemáticas e determinadas as pressões na estrutura comparando os resultados analíticos com os numéricos encontrados pelo software ANSYS. Com os resultados encontrados sendo próximos dos resultados esperados na literatura, foi desenvolvido uma análise dinâmica de uma plataforma simplificada.

3. ASPECTOS TEÓRICOS: AÇÃO DO VENTO SEGUNDO NBR 6123:1988

O vento é a expressão utilizada para designar os movimentos do ar relativos à superfície terrestre. Ele é provocado essencialmente por forças geradas através de diferenças de pressões na atmosfera e através do movimento de rotação da terra (OLIVEIRA, 2014). Assim, pode ser caracterizado como um fenômeno natural instável no tempo, que apresenta variações aleatórias em torno de um valor médio de velocidades, conhecidas como rajadas ou turbulências. Assim, apresenta uma ocorrência sequencial de frequência e intensidade de curta duração. O fato de apresentar acontecimentos irregulares das flutuações dificulta o seu estudo de forma determinística, tendo que ser utilizadas metodologias de probabilidade e de médias estatísticas (CHÁVEZ, 2006).

Conforme Blessamann (1995, *apud* ALMEIDA e VIDOTO, 2013), as características do vento são dependentes de alguns fatores, como topografia do terreno, a dimensões e forma dos obstáculos naturais e artificiais e a variação de temperatura. Por conta disso, o vento apresenta um gradiente de velocidade na direção vertical, tendo velocidade aproximada de zero na superfície e uma velocidade alta em grandes altitudes, como mostrado na Figura 2.

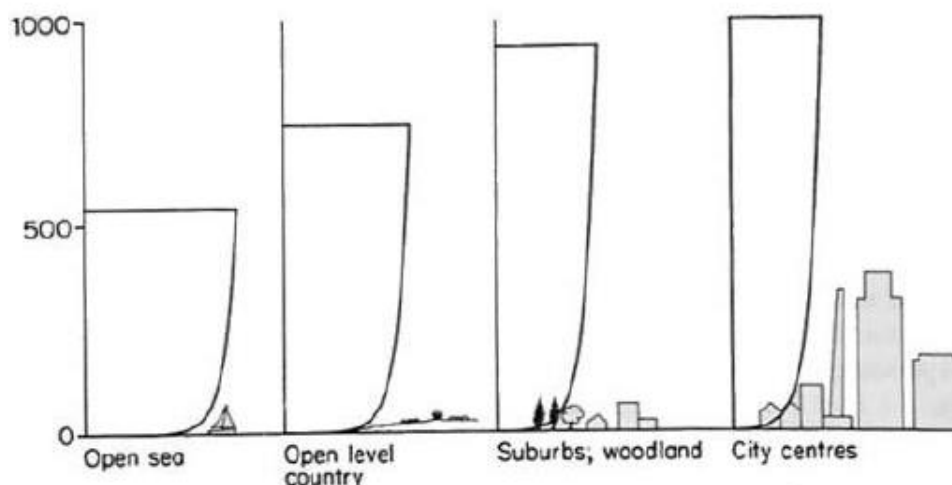


Figura 2 - Variação do vento em relação à altura dos obstáculos
Fonte: Mendis et al., 2007

Assim, conforme a configuração do terreno, haverá uma altura de camada limite (Camada Limite Atmosférica – CLA). Ela possui seu limite máximo numa altura onde a ação do vento não afeta diretamente a superfície terrestre. Estima-se que a altura da camada em que a topografia do terreno influencia a velocidade do vento é de aproximadamente 450m, assim, a maioria das atividades humanas ocorre dentro dela (RIOS, 2015).

Segundo Vanin (2011), 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.

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. Assim, a Figura 3 apresenta essa caracterização dos edifícios.

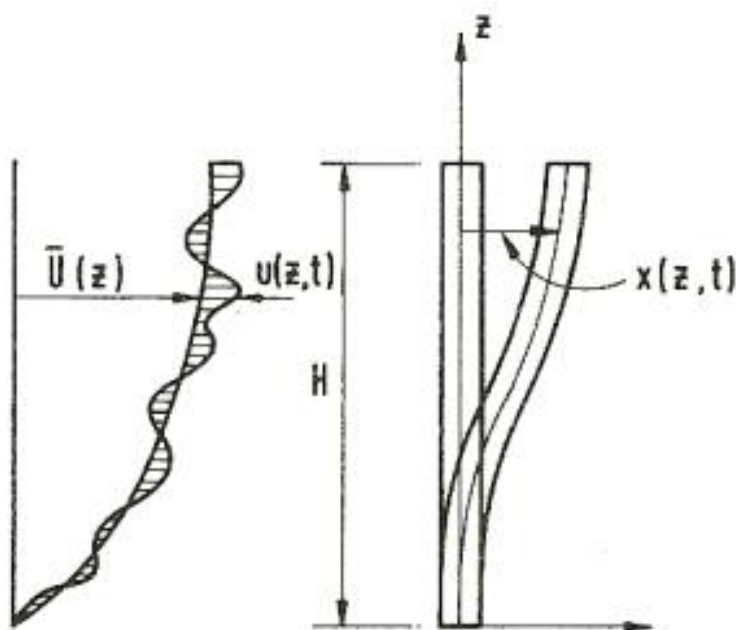


Figura 3 - Deflexão típica de um edifício sujeito a ventos turbulentos
Fonte: Balendra (2003, apud Vanin, 2011)

3.1 Norma Brasileira NBR 6123/1988.

A norma apresenta 3 métodos para análise de edifícios sob ação de solicitações de vento. As metodologias são explicadas a seguir:

3.1.1 Método Estático

Para as estruturas em geral são fixadas condições para considerar a ação do vento, cujos fundamentos baseiam-se no estudo estatístico aproximado proposto por Davenport na década de 60, com algumas modificações ao calcular a resposta flutuante (CHÁVEZ, 2006).

Por esse método, o cálculo da pressão do vento é obtido por meio da equação 1:

$$q = \frac{1}{2} * \rho * V_k^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo “ ρ ” a massa específica do ar e “ V_k ” a velocidade característica do vento. Em condições normais de temperatura e pressão, os parâmetros possuem as seguintes unidades: q em N/m^2 , ρ em kg/m^3 e V_k em m/s . E a equação acima pode ser transformada para estudo de vento em:

$$q = 0,613 * V_k^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Por sua vez, a velocidade característica do vento pode ser calculada por meio da seguinte equação 3:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

- 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.
- V_0 é a velocidade básica do vento, em m/s .

→ Velocidade básica do vento – V_0

A velocidade básica do vento V_0 é definida 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. Esta velocidade é determinada pelas isopletras de velocidade básica (Figura 4), mostradas a seguir, retiradas da NBR6123:1988, para diferentes regiões do Brasil.

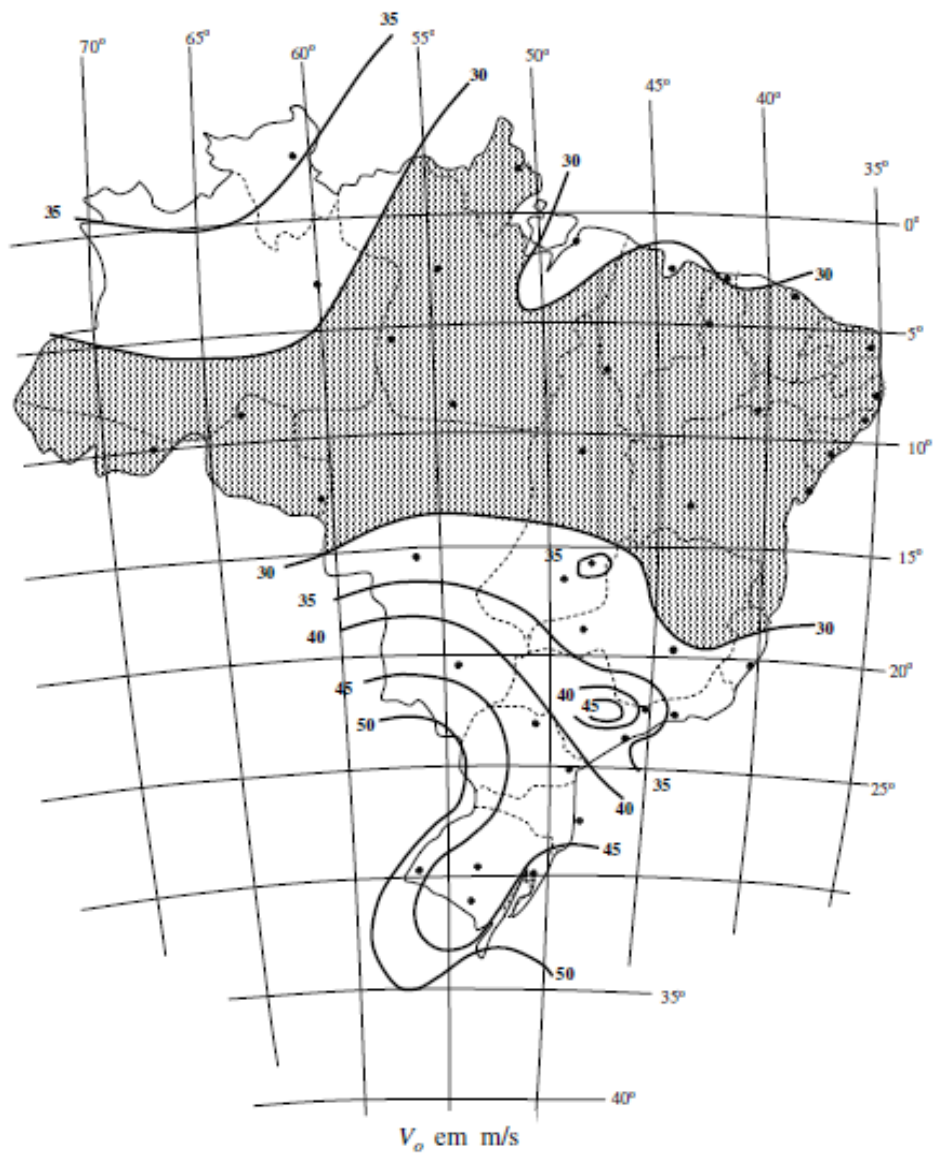


Figura 4 - Isopletas de Velocidade Básica do Vento
Fonte: NBR6128:1988

→ Fator topográfico S1

O fator topográfico S1 depende das variações locais na superfície do terreno nos arredores da edificação em estudo e a norma brasileira fornece valores padronizados para condições típicas topográficas. Os valores são dados pela Figura 5:

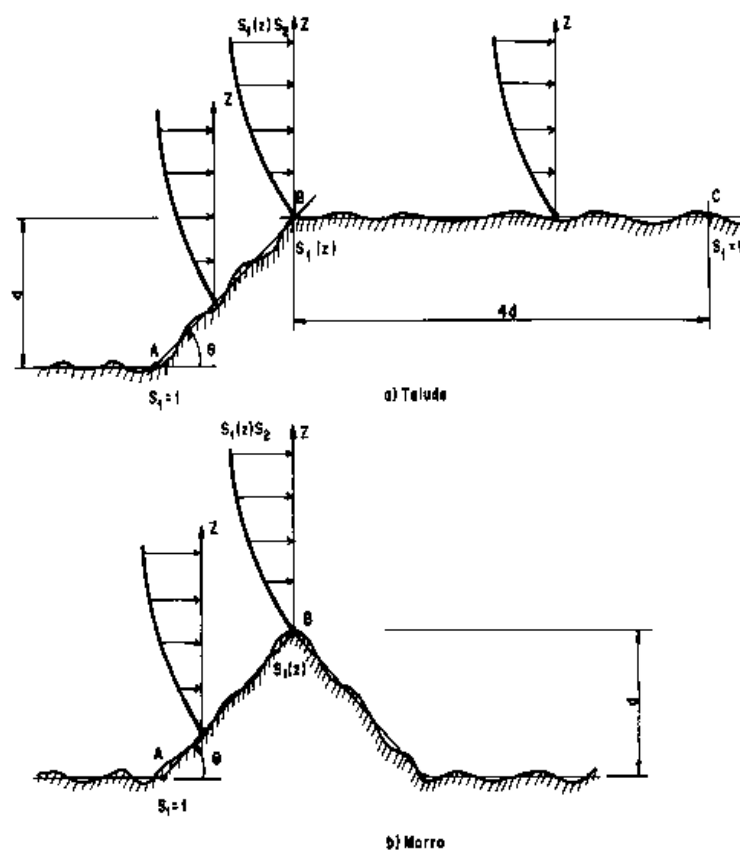


Figura 5 - Fator topográfico S1

Fonte: NBR 6123/1988

$$\begin{aligned} \text{tg } \theta < 0,05: S_1 &= 1,0; \\ 0,10 \leq \text{tg } \theta < 0,31: S_1 &= 1,0 + (2,5 - z/d) \text{tg } \theta \geq 1; \\ \text{tg } \theta \geq 0,31: S_1 &= 1,0 + (2,5 - z/d)0,31 \geq 1. \end{aligned}$$

Deve-se interpolar linearmente para $0,05 < \text{tg } \theta < 0,1$.

Para terrenos planos ou fracamente acidentados seu fator é igual a 1,0 e para vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção, a fator valerá 0,9 (NBR 6123:1988).

→ Fator S2

O fator S2 é considerado como uma velocidade adimensional, normalizada em “V₀”, que leva em conta o efeito combinado da rugosidade média geral do terreno em grandes extensões, da variação da velocidade do vento com a altura sobre o terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade (ALMEIDA e VIDOTO, 2013).

De acordo com a NBR 6123:1988, os terrenos podem ser classificados em uma das categorias apresentadas na Tabela 1:

Tabela 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 pouco 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: NBR 6123/1988

Além das características de rugosidade do terreno, devemos levar em consideração as dimensões do edifício, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Classes de dimensões dos edifícios

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: NBR 6123/1988

Assim, juntando a categoria do terreno com a classe do edifício, pode-se utilizar a Tabela 3 para se obter o Fator Rugosidade S2 para diversas alturas de edifício:

Tabela 3 - Fator S2

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 estatístico S3

O fator estatístico S3 é baseado em conceitos estatísticos e leva em consideração o grau de segurança necessário para a vida útil da edificação. A probabilidade de que a velocidade o V_0 seja igualada ou excedida no período de recorrência de 50 anos é de 63%. Seus valores são encontrados na Tabela 4 mostrado logo abaixo:

Tabela 4 - Fator S3

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: NBR 6123/1988

→ Força de Arrasto

Com a pressão dinâmica demonstrada anteriormente, é possível calcular a força de arrasto do vento na edificação. Essa é a força global do vento na sua direção perpendicular, sendo representada por meio da equação 4:

$$F_a = C_a * q(z) * A_e \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

C_a = coeficiente de arrasto, em função da altura 'z' analisada;

A_e = área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento (área de sombra).

Segundo Loredou-Souza et al. (2008, *apud* Bronzatto, 2012), “Os valores dos coeficientes de arrasto (C_a) apresentados em normas e relatórios valem somente para a forma geométrica específica do módulo da torre ensaiado e dependem diretamente do valor da área efetiva (A_e) adotada como referência para o cálculo de C_a .”

Assim, como exemplo, para uma edificação paralelepípedica com ventos turbulentos, o coeficiente de arrasto pode ser encontrado por meio da Figura 6:

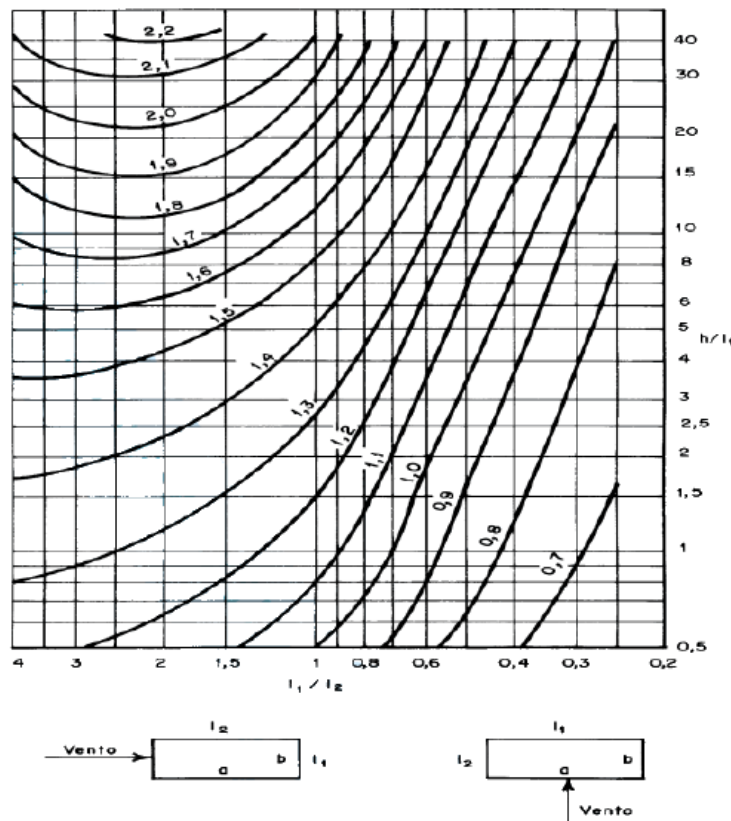


Figura 6 - Coeficiente de arrasto para ventos turbulentos
Fonte: NBR 6123/1988

3.1.2 Método Contínuo Simplificado

As flutuações da velocidade podem induzir em estruturas de edifícios altos e esbeltos, oscilações importantes na direção da velocidade média, nomeadas como resposta flutuante (ALMEIDA e VIDOTO, 2013). Assim, o procedimento de cálculo considera somente a contribuição do primeiro modo de vibração para o cálculo da resposta flutuante. Neste caso a frequência fundamental do edifício, o correspondente modo de vibração e o amortecimento modal são obtidos de forma aproximada em função da altura z da edificação e das características do seu sistema estrutural (CHÁVEZ, 2006).

A velocidade de projeto \bar{V}_p é calculada por meio da velocidade básica V_0 por meio da equação 5:

$$\bar{V}_p = 0,69 * V_0 * S_1 * S_3 \quad (\text{m/s}) \quad (\text{Eq. 5})$$

Com isso, a resposta dinâmica pode ser calculada considerando a variação da pressão do vento em relação à altura z . Para isso, utiliza-se a equação 6 e equação 7:

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p * \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma * \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\bar{q}_0 = 0,613 * \bar{V}_p^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde,

$\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p}$ é a resposta média;

$\left(\frac{h}{z_r} \right)^p * \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma * \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi$ é a amplitude máxima da resposta flutuante;

\bar{q}_0 é a pressão dinâmica, em N/m; e

Z_r é a altura de referência (10m).

Os expoentes b e p são apresentados na Tabela 5 e dependem da rugosidade do terreno:

Tabela 5 - Coeficiente b e p para análise dinâmica

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: NBR 6123/1988

Os parâmetros γ e ζ são encontrados na tabela apresentada na norma, representada pela figura abaixo:

Tabela 6 - Parâmetros γ e ζ para método contínuo simplificado

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 soldada	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: NBR 6123/1988

A pressão $q(z)$ é uma função contínua da altura z sobre o terreno. A força estática equivalente, que engloba as ações estáticas e dinâmicas do vento por unidade de altura é obtida pela equação 8:

$$F = q_z * l_1 * C_a \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

“ l_1 ” é a largura ou o diâmetro da estrutura;

“ C_a ” é o coeficiente de arrasto.

3.1.3 Método Discreto

Conforme explicitado no texto da norma NBR 6123:1988, para edificações com propriedades geométricas variáveis com a altura devem ser feitas as suas representações, para efeito de cálculo, por meio de um modelo discreto conforme apresentado na Figura 7:

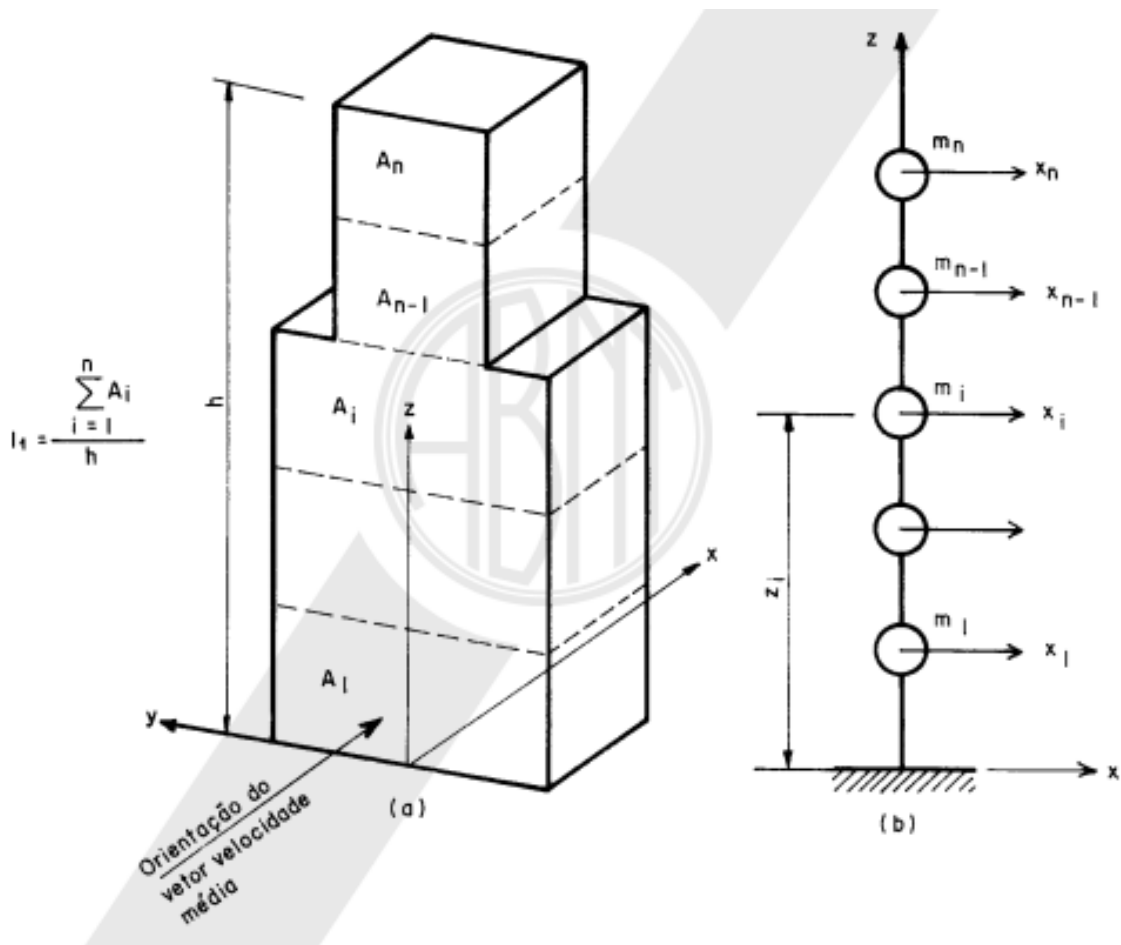


Figura 7 – Representação do modelo discreto da NBR 6123:1988
Fonte: NBR 6123/1988

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_i a altura do elemento sobre o nível do terreno, z_r a altura de referência, com valor igual a 10 metros, e n o número de graus de liberdade.

Para esse método, é necessário que sejam determinadas a frequência natural F_j (Hz) e a forma modal X_j , correspondente ao modo j , para $j = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de modos que serão utilizados para a solução. (NBR 6123:1988).

- Determinação das contribuições modais

Conforme Blessmann (2005, *apud* ALMEIDA e VIDOTO, 2013), em um dado instante a ação do vento na direção da velocidade média em cada parte da estrutura é composta de duas parcelas: uma ação média e uma flutuante.

Segundo a NBR 6123:1988 para cada modo de vibração n , com componentes $(x_i)_j = x_{ij}$, a força total devida ao vento na direção da coordenada i é dada pela equação 9:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde, \bar{X}_i é a força média expressa pela equação 10:

$$\bar{X}_i = q_0 * b^2 * C_{ai} * \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^{2p} * A_i \quad (\text{Eq. 10})$$

Sendo: $q_0=0,613\bar{V}_p^2$ (com q_0 em N/m², e V_p em m/s)

A componente flutuante é representada por \hat{X}_i e possui a seguinte formulação:

$$\hat{X}_i = F_H * \Psi_i * x_i \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo os parâmetros utilizados tendo as seguintes fórmulas:

$$F_H = \bar{q}_0 * b^2 * A_0 * \left(\frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \Psi_i x_i^2}\right) \xi \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\Psi_i = m_i / m_0 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\beta_i = C_{ai} * \frac{A_i}{A_0} * \left(\frac{z_i}{z_r}\right)^p \quad (\text{Eq. 14})$$

No qual m_0 e A_0 representam uma massa e uma área arbitrárias de referência. “ ξ ” é o coeficiente de amplificação dinâmica, apresentado nas Figura 31 no anexo “A” para as cinco categorias de terreno da norma NBR 6123:1988.

- Combinação das contribuições modais

De acordo com a NBR 6123, quando r modos são retidos na solução ($r > 1$), o efeito combinado por ser computado pelo critério da raiz quadrada da soma dos quadrados. Após a obtenção da resposta para cada modo j ($j=1,2... r$), devem ser determinadas todas as variáveis de interesse associadas a cada modo. Assim, a superposição de efeitos é calculada pela equação 15:

$$\hat{Q} = \left[\sum_{j=1}^r \hat{Q}_j^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde Q_j é uma variável estática (força, momento fletor, tensão, etc...) ou geométrica (deformação, deslocamento, giro) correspondente ao modo j .

4. GENERALIDADES E MODELAGEM DO BURJ KHALIFA

O Burj Khalifa, Figura 8, é o mais alto prédio construído até a presente data, localizado em Dubai nos Emirados Árabes Unidos. Seu projeto se desenvolveu na perspectiva de tornar a região como um dos maiores centros econômicos do mundo. Por isso, envolveu um grande número de profissionais desde sua concepção até sua construção.

O início da sua construção data de 21 de setembro de 2004, tendo a inauguração no dia 4 de janeiro de 2010. Seu projeto inclui a torre principal, condomínios residenciais, cinco hotéis, dois shoppings e imóveis comerciais. Estima-se que o projeto da torre principal custe cerca de 1,5 bilhões de dólares.



Figura 8 - Burj Khalifa
(Fonte: TripAdvisor2)

Estima-se que foram utilizados 330 mil m³ de concreto e 31400 toneladas de aço para a construção da edificação, que é de concreto armado. De acordo com o documentário “*Megastructure Burj Khalifa*” da *National Geographic* o concreto utilizado variou-se entre C60 e C80, porém a empresa de concretagem responsável pela obra conseguiu entregar, em algumas situações, concreto com resistência de até 100 MPa. Apesar de ser uma estrutura

² Site: https://www.tripadvisor.com/LocationPhotoDirectLink-g295424-d676922-i223521027-Burj_Khalifa-Dubai_Emirate_of_Dubai.html#223521027">3</sup>. b) Variação da planta dos andares com a altura⁴

³ <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=717590&page=52>

⁴ https://pt.wikipedia.org/wiki/Burj_Khalifa

Porém, para se chegar a essa tipologia estrutural usada no projeto, foi necessário uma série de estudos relativos a resposta estrutural com relação a ação do vento. Para isso, foi utilizado ensaios em túnel de vento que permitiram a otimização da estrutura, desde o formato de suas “asas” até a altura final do edifício.

Esses ensaios determinaram também a direção em que a torre foi construída. Devido ao seu formato Y, o vento pode atuar em seis pontos importantes da estrutura. Três delas nas pontas (nariz) do Y e três dela na “cauda” (Figura 10). Assim, com as direções mais frequentes do vento sendo noroeste, sul e leste, o prédio foi construído de modo a garantir a diminuição da ação do vento com o vento principal atuando majoritariamente na cauda do edifício.

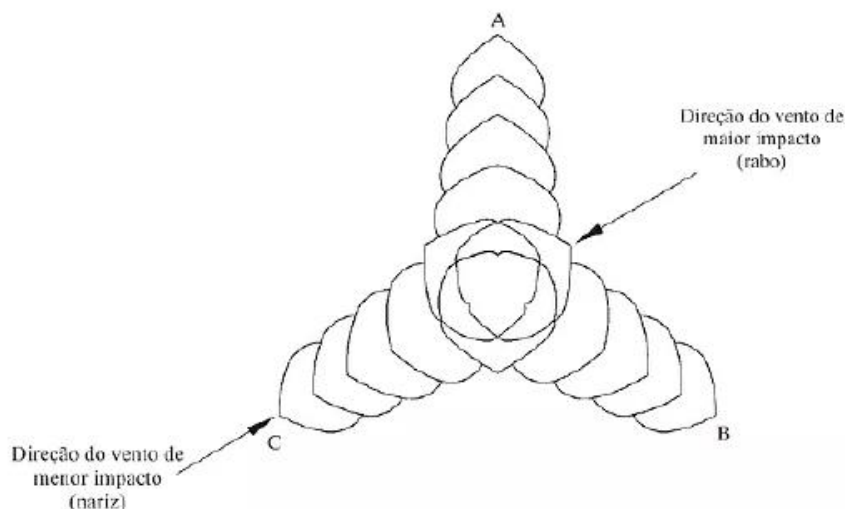


Figura 10 - Direção do vento na edificação
(Fonte: TADA, 2011)

Assim, com a Figura 11 é possível notar o desprendimento de vórtices no Burj Khalifa. É possível ver que devido sua seção variar conforme sua altura, os vórtices não possuem uma uniformização, assim mitigando seu efeito na edificação.



Figura 11 – Formação do desprendimento de Vórtices – cópia do projeto original
(Fonte: Abdelrazaq, 2011).

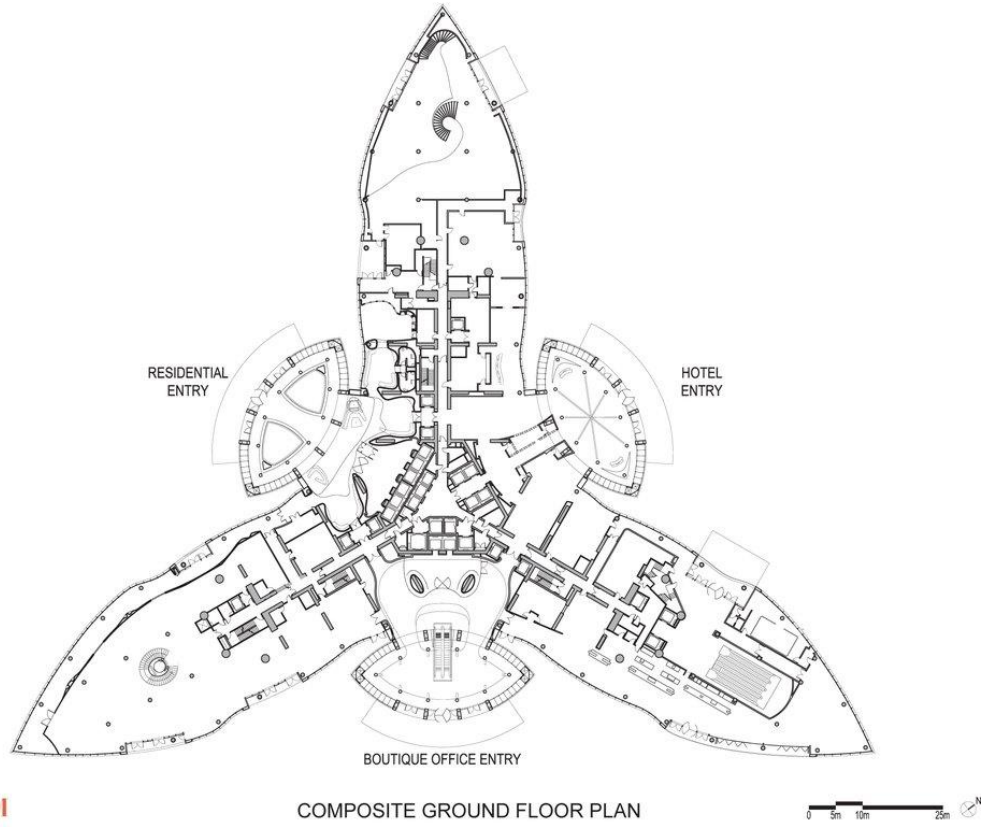
4.1 Modelagem do Burj Khalifa

A modelagem do Burj Khalifa foi feita no software AutoCAD da Autodesk. Esse software possui versão estudantil, o que facilita seu uso em ambiente universitário. Assim, para o começo da construção do modelo foram feitas pesquisas sobre as principais características do edifício.

Não foi possível achar as plantas com as dimensões exatas do edifício, porém nas pesquisas foram encontradas algumas plantas sem as dimensões, porém com escalas, no site World Floor Plans, como mostrado na Figura 12, Figura 13 e Figura 14.



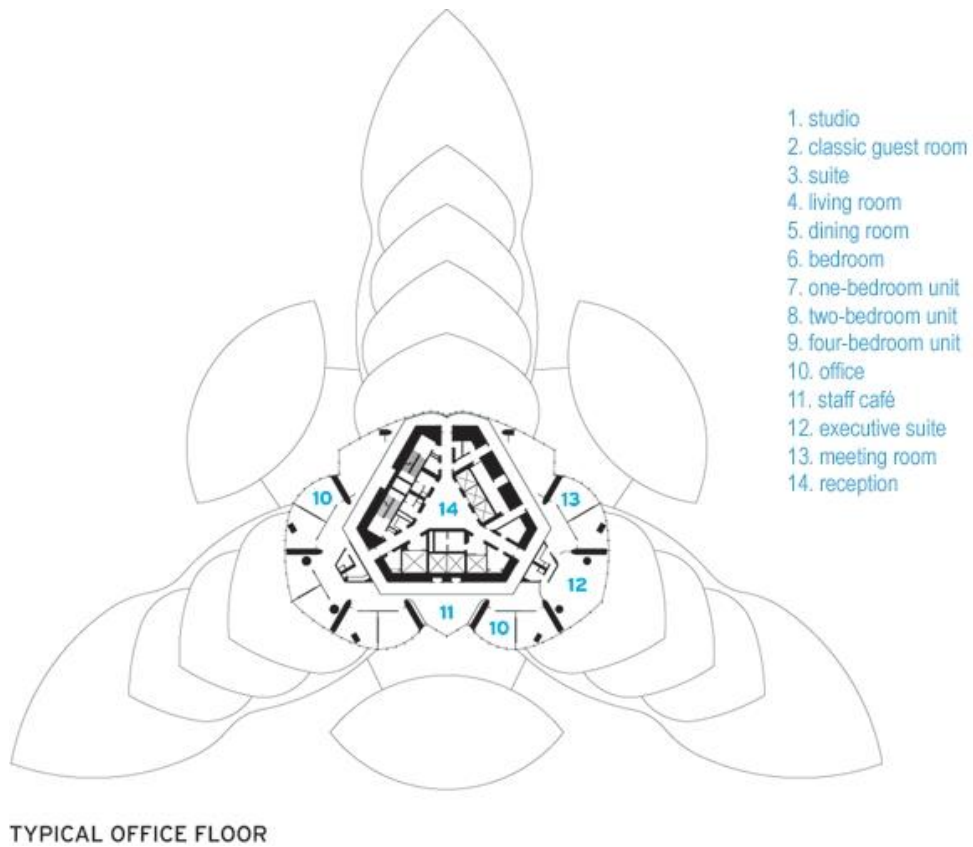
Figura 12 - Burj Khalifa (Nível 1)



SOM

COMPOSITE GROUND FLOOR PLAN

Figura 13 - Burj Khalifa (Térreo)



TYPICAL OFFICE FLOOR

Figura 14 - Burj Khalifa (Nível 120)

Assim, por meio de pesquisas, foram encontrados modelos 3D da estrutura do Burj modeladas. A partir de um arquivo *Drawing* do AutoCAD encontrado no site GrabCAD Community⁵, começou-se a modelagem da estrutura utilizada nesse estudo. Com as escalas e as dimensões aproximadas, foram ajustadas as alturas dos pavimentos para cada tipo de seção, já que sua estrutura varia com sua altura.

Por fim, chegou-se no modelo apresentado na Figura 15 para a utilização em futuras pesquisas que utilizem esse edifício.

Foram utilizadas algumas simplificações para a modelagem, como:

- Não foi utilizado o raio real para o desenho da fachada em forma circular variável;
- A altura dos andares se aproxima da altura real, com uma média de 3,90m por pavimento;
- Atentou-se somente na construção da fachada do edifício, sem contar as aberturas, varandas e outros elementos construtivos;
- O núcleo do edifício foi simplificado para um triângulo.

Assim, o resultado da modelagem da estrutura é apresentado logo abaixo na Figura 15:

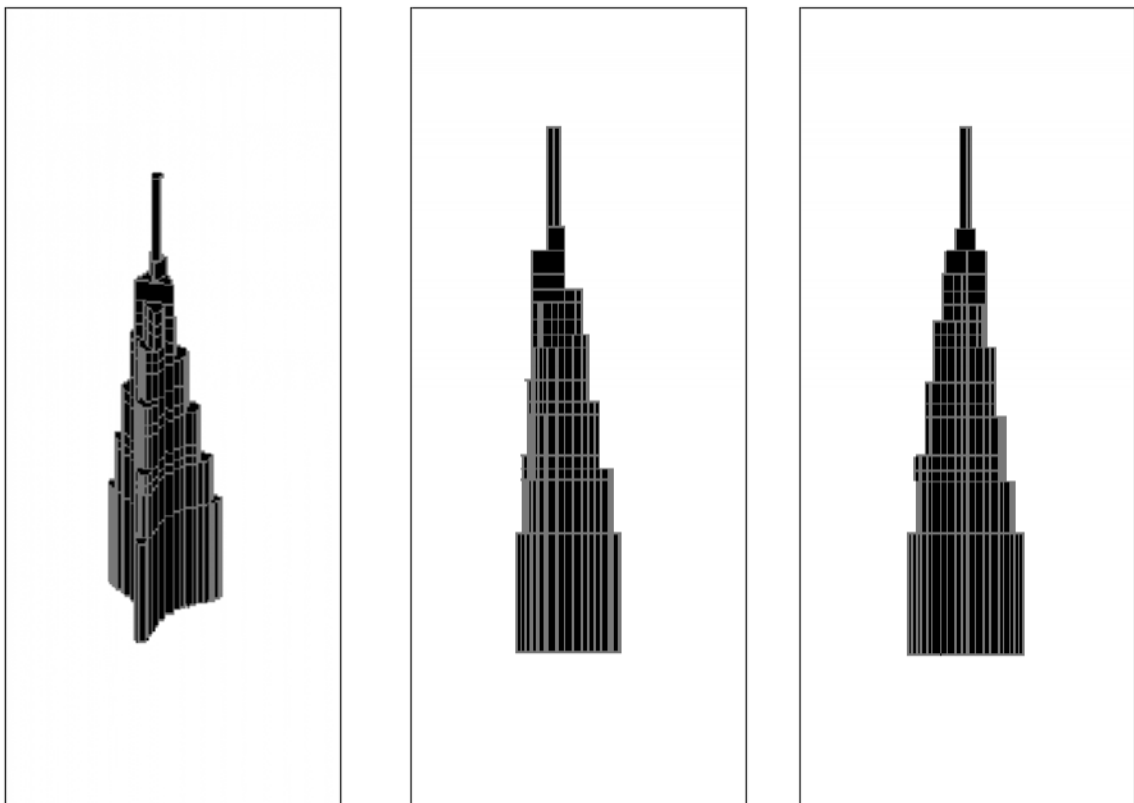


Figura 15 - Modelo do Burj Khalifa

⁵ Site: <https://grabcad.com/library/burj-khalifa-dubai-1>

5. ASPECTOS COMPUTACIONAIS E METODOLOGIA

Esta monografia foi desenvolvida por meio das seguintes etapas:

5.1 Revisão bibliográfica e fundamentação teórica

Primeiramente foram realizados os estudos referentes ao tema abordado nessa monografia. Por meio da leitura de livros, artigos, monografias, testes e dissertações, foram apresentados conceitos importantes para a caracterização do fenômeno do vento e sua ação em estruturas.

A partir da leitura da norma brasileira NBR 6123:1988 foi possível o equacionamento das três metodologias de cálculo para a resposta de um edifício frente às ações dinâmicas de vento. Com isso, é realizado um embasamento teórico para os cálculos realizados posteriormente nesse trabalho.

Foi também realizada uma pesquisa sobre características importantes do Burj Khalifa de forma a permitir a modelagem do edifício.

5.2 Fluido-dinâmica computacional (CFD)

Neste trabalho foram utilizados softwares para o uso de modelos numéricos que representasse estruturas reais. Por meio de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos, busca-se soluções aproximadas para determinação da ação do vento. Assim, a fluido-dinâmica computacional (CFD) é uma alternativa para análise estrutural de problemas simples e complexos com resultados aceitáveis, desde feitas simulações de forma prudente.

5.3 ANSYS

Dentre os programas de fluido-dinâmica computacional, um que se destaca no meio de pesquisas é o ANSYS. Este programa possui versão estudantil, facilitando seu uso dentro do ambiente universitário. Ele possui vários ambientes e complementos que permitem estudo simples e complexos dentro de várias áreas na engenharia.

O programa possui como principal ambiente de interface gráfica o Workbench, que permite ao usuário uma melhor visualização da estrutura criada. Nesse ambiente, pode-se destacar o módulo Fluid Flow CFX, que foi utilizado nesse trabalho também e será explanado a seguir.

5.3.1 ANSYS CFX

O Fluid Flow CFX é um módulo do software ANSYS utilizado nos estudos de fluidodinâmica computacional. O módulo possui uma interface gráfica de fácil uso e de forma que o usuário consiga interagir de maneira a visualizar a estrutura perfeitamente.

Ele é composto por quatro módulos, onde são executadas as simulações por meio de etapas que se iniciam na confecção do modelo estrutural a ser estudado e terminam no tratamento e análise dos resultados (MORAIS e LABAKI, 2017). De forma simplificada, a simulação segue os seguintes passos: Inicialmente é desenvolvido o modelo a partir da construção da geometria (*geometry*) e determinação do domínio. Após isso, é feita a parametrização e elaboração da malha (*mesh*) a serem calculados. Em seguida, no *CFX-Pre*, definem-se o regime da simulação, as equações necessárias para cálculo, as condições iniciais, as condições de contorno (*initial e boundary conditions*) e o modelo de turbulência (*turbulence model*). Por fim, é feita a simulação no *CFX-Solver*, e os resultados são visualizados por meio de imagens do modelo, gráficos ou tabelas no *CFX-Post*.

- Definição da malha

Segundo Ferreira (2012), o ANSYS faz o refinamento da malha de regiões de elevados gradientes de forma automática, por meio da definição de funções de regulagem de tamanho avançadas. São 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;
- As regiões críticas onde a malha deverá ser expandida a partir de um determinado tamanho de refinamento.

Assim, para a definição da malha, é necessário fazer a definição dos elementos a serem utilizados na análise. Isso se faz necessário pois cada elemento possui suas características de grau de liberdade e equações. Para este trabalho foi utilizado o seguinte elemento:

- FLUID142

Esse elemento é utilizado para modelagem de transientes ou estados permanentes em sistemas fluidos ou térmicos que possuem ou não regiões não fluídicas. Assim, na região fluídica são resolvidas as equações de conservação para escoamento viscoso e energia, enquanto na região não-fluídica é resolvida somente a equação de energia. É definido por oito nós e pelas propriedades do material fluido a ser utilizado.

São utilizados os princípios de conservação de momento linear para se obter as velocidades e conservação de massa para se obter a pressão. O escoamento é tratado não linearmente e as equações governantes são resolvidas por sistemas. Ao selecionar o modelo de turbulência, as duas grandezas de turbulência serão calculadas (energia cinética turbulenta e sua razão de dissipação, no caso “k” e “ ω ”).

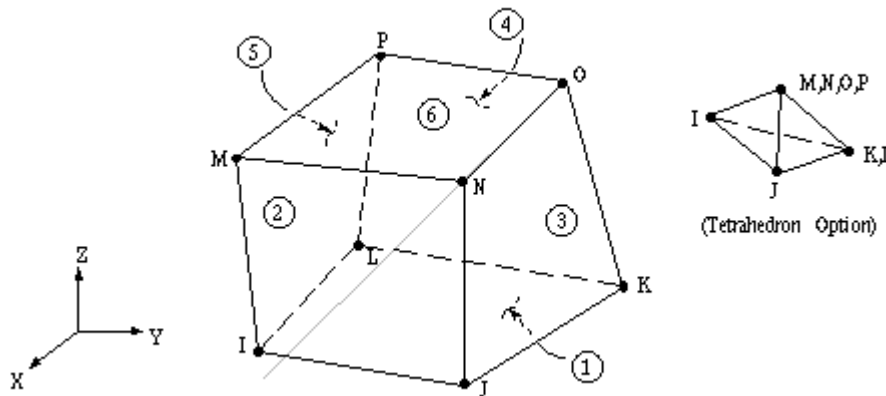


Figura 16 - Elemento FLUID142

Fonte: ANSYS Help

- Malha Fluida

Para a construção da malha fluída para o escoamento do vento, é necessário ter alguns cuidados para evitar distorção nos dados adquiridos. Para a análise desse escoamento, faz-se uma estrutura simulando um túnel de vento para o vento. Assim, foram utilizadas distâncias de três diâmetros para as paredes laterais e entrada do escoamento. Para a saída do escoamento foi utilizada uma distância de doze diâmetros. Essa escolha foi feita para se analisar o comportamento do vento após o contato com a estrutura.

Para a geração da malha, primeiramente foi permitido o programa fazê-la de forma automática, sem nenhuma restrição. Após essa geração, fez-se cortes na estrutura para analisá-la afim de se refinar a malha em regiões que não apresentava valores ótimos para a simulação.

Assim, após essa geração regularização da malha, chegou-se aos seguintes dados principais para simulações:

- Physics Preference: CFD
- Solver Preference: CFX
- Element Midsides Nodes: Dropped
- Size function: Curvature
- Relevance Center: Course
- Initial Size Seed: Active Assembly
- Transition: Slow
- Span Angle Center: Fine
- Curvature Normal Angle: Default (18°)
- Min Size: $7,34 \cdot 10^{-2}$
- Max Face Size: 2,00 m
- Max tet Size: Default (14,685 m)
- Growth Rate: Default (1,20)
- Minimum Edge Length: 7,854 m
- Use Automatic Inflation: No
- Inflation Option: Smooth Transition

A Figura 17 apresenta a malha fluída para o estudo progressivo por meio do cilindro:

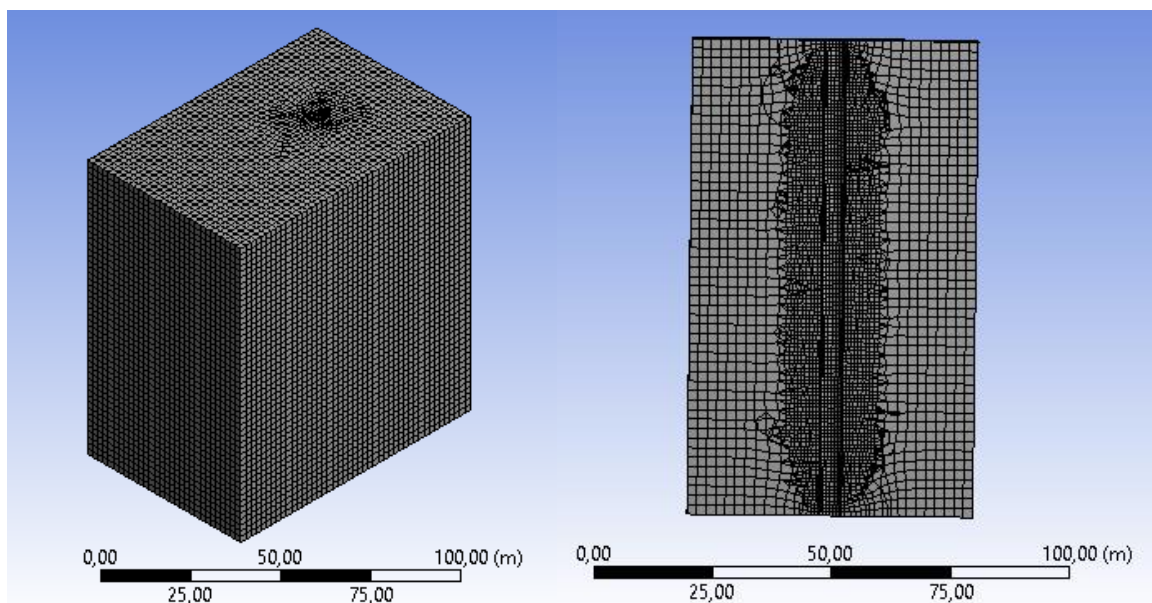


Figura 17 - Malha fluída do cilindro simplificado

É possível notar o refinando da malha para a região onde se encontra o objeto de estudo de forma a obter-se dados mais preciso. O resto da malha apresenta tamanho maiores, não superiores a 1,5 metro, para que a simulação ocorresse de forma rápida sem o comprometimento do processador do computador, porém ainda com precisão no cálculo. A região onde a malha apresenta diferenças mais significativas no tamanho apresenta-se com uma distância de aproximadamente dois diâmetros do cilindro (10 metros). Com isso, julgou-se que o refinamento para o cálculo de pressão no cilindro estaria de forma aproximada, porém correta.

É importante ressaltar também que em virtude dos resultados obtidos e mostrados posteriormente terem uma grande aproximação com os resultados da literatura, não foi feito um teste de convergência de malha.

- Turbulência

Um importante problema a ser vencido na modelagem de turbulência é a forma correta de separar o escoamento em uma superfície lisa. Os modelos padrões de duas equações por vezes falham em prever a posição e a intensidade da separação do escoamento sob severos gradientes de pressão (FERREIRA, 2012).

Desta forma, neste trabalho foi utilizado o modelo de turbulência híbrido conhecido pela sigla SST. Nele está reunido dois tipos de modelos: o $k-\varepsilon$ (k-Epsilon), mais usado para escoamentos externos; e o $k-\omega$ (k-ômega), mais usado em escoamentos confinados ou nas paredes (MORAIS e LABAKI, 2017). Esse modelo é baseado na equação de transporte de tensões de cisalhamento e foi projetado no intuito de não apresentar sensibilidade ao combinar-se com a função “ ε ” (razão de dissipação), diminuindo a sensibilidade da energia cinética com a dissipação específica nas regiões de cisalhamento (ANSYS HELP).

- Camada limite

Esse estudo deve ser feito a fim de se evitar que as “paredes” laterais do túnel de vento virtual possam oferecer alguma interferência sobre o resultado no cilindro. Para isso, como já foi explicado, adotou-se distâncias de seis diâmetros para cada lateral, com esse valor se repetindo para a parede de fundo e um valor de doze diâmetros para a face dianteira (MORAIS, 2017).

Com isso, pode-se observar que o escoamento era quase constante para um plano, conforme será apresentado nos resultados.

Ainda assim a rugosidade da superfície ou “chão” do túnel interfere no perfil de velocidade do vento. Para isso, pode-se utilizar a equação 16 para o cálculo da velocidade do vento em relação à sua altura:

$$V = V_0 * \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0,32} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde:

V_0 é a velocidade determinada na altura z_0 ;

z = altura requerida para a velocidade.

Por essa velocidade não levar em consideração fatores de topografia e rugosidade do terreno, deve-se ter estudo mais detalhado sobre seu uso.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das análises feitas por meio das metodologias descritas anteriormente, foi possível encontrar os seguintes resultados:

6.1 Estudo progressivo de cilindro

Uma das formas mais estudadas para modelagem CFD é a forma cilíndrica. Assim, primeiro foi feito o estudo para se encontrar o valor da força de arrasto atuante em um cilindro. O resultado é comparado com resultados da literatura, mais precisamente, com a monografia do Ferreira (2012). Esse estudo visa então a calibragem do modelo numérico para o estudo da ação do vento no mesmo cilindro e permitir o aprendizado com a interface do programa.

Os parâmetros utilizados então foram:

- Fluido: água
- Massa específica: 1000 kg/m³
- Raio do cilindro: 5 metros
- Altura do cilindro: 100 metros

O modelo numérico utilizado possui as seguintes características:

- Número de nós na malha fluida: 94.193
- Número de elementos na malha fluida: 97.885
- Tipo das paredes laterais, fundo e topo da malha: Parede sem atrito

- Tipo das paredes do cilindro: Parede lisa
- Entrada: Velocidade constante igual à 1 m/s de baixa turbulência (1%)
- Saída: Pressão estática igual a 0 Pa.

Com os dados de entrada, chegou-se então na força de arrasto mostrada na Figura 18. A figura mostra a convergência do valor para as iterações ou “passos” do ANSYS.

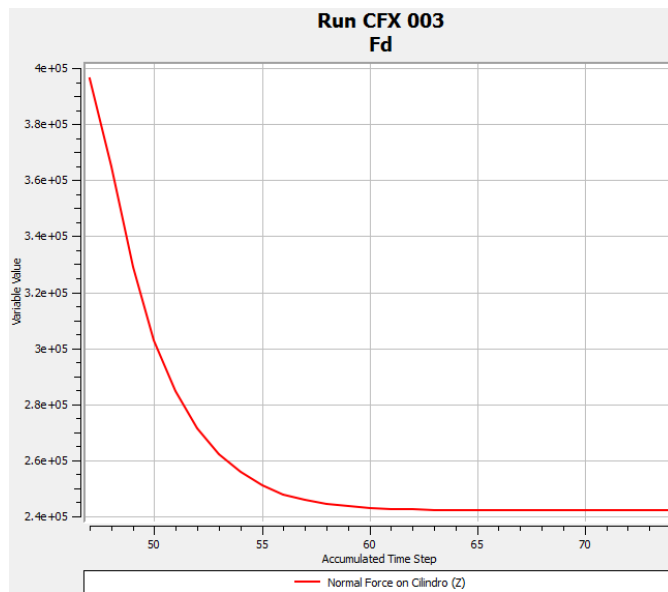


Figura 18 - Força de arrasto da água no cilindro

A força de arrasto encontrada foi de 242,24 kN. Esse resultado se aproxima do resultado encontrado por Ferreira em seu estudo de monografia. A Figura 19 mostra o resultado de 248,4 kN para um cilindro de mesmas características encontrado pelo autor.

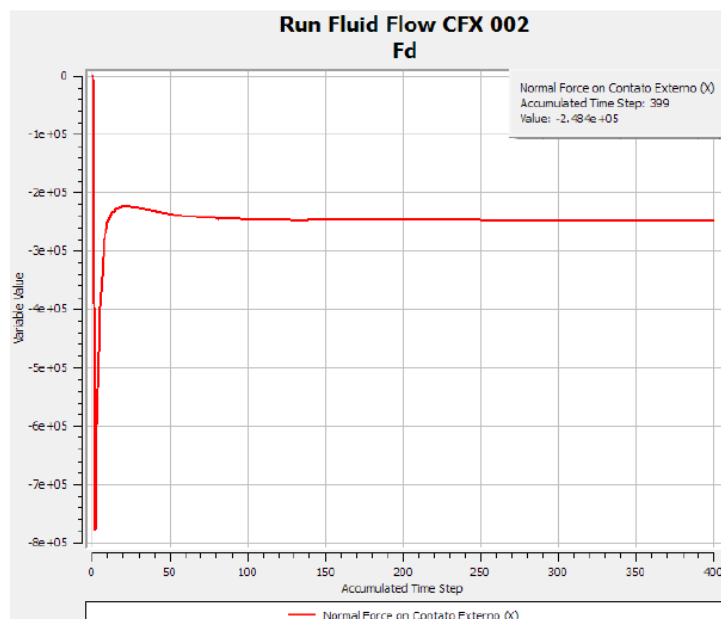


Figura 19 - Força de arrasto apresentada por Ferreira (2012)

Assim, foi possível verificar a que as condições impostas no modelo numérico foram feitas de forma satisfatória para esse estudo de caso. Possuindo somente um erro de 2,48% para o valor encontrado por Ferreira e um erro de 3,1% para o valor esperado pelo autor em seu estudo analítico. Assim, por meio dessa premissa, deu-se prosseguimento para o estudo da ação do vento no mesmo cilindro.

As Figura 20 e Figura 21 mostram a pressão atuante no cilindro como parte do estudo progressivo.

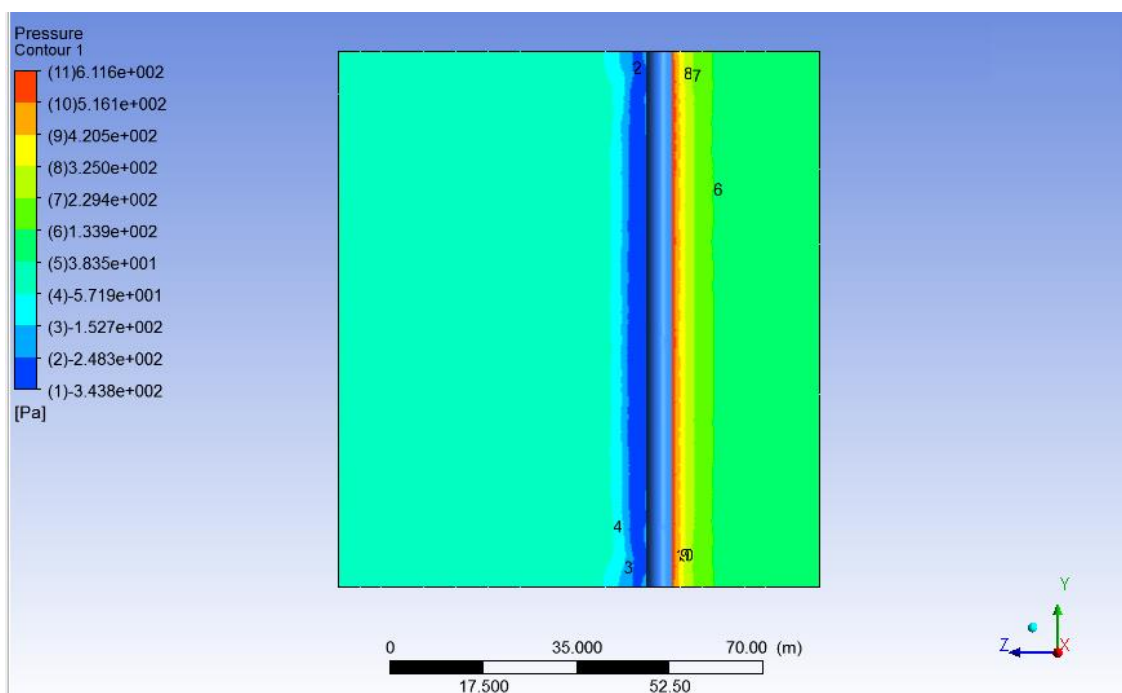


Figura 20 - Pressão no cilindro de calibragem

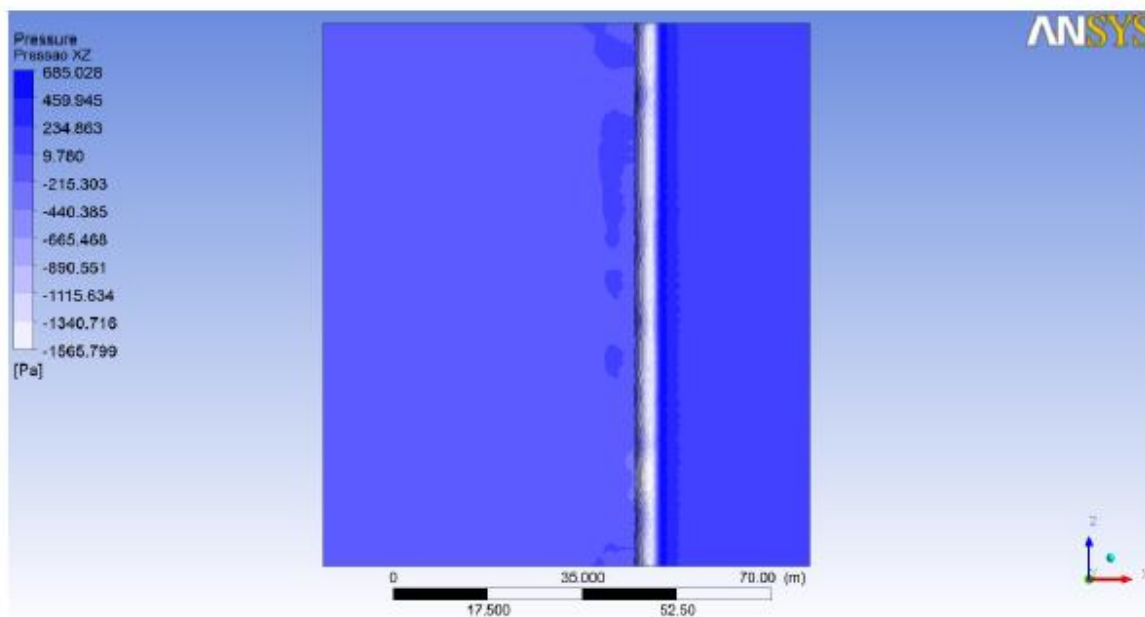


Figura 21 - Pressão no cilindro de acordo com Ferreira (2012)

Percebe-se também que a pressão atuante no cilindro está bem próxima no seu valor de máximo.

6.2 Ação do vento no cilindro

Para o estudo da ação do vento no cilindro, foram calculadas as pressões atuantes no corpo cilíndrico de três formas diferentes: Método Estático e Método Contínuo Simplificado da NBR 6123:1988 e modelagem numérica do vento. Logo abaixo são apresentando os parâmetros utilizados em cada método, assim como o resultado de força de arraste deles:

6.2.1 Método Estático

Para o método estático recomendado pela norma, foram utilizados os seguintes parâmetros para a equação da força de arrasto:

a) Devido a edificação simplificada em estudo ser projetada para a localidade de Brasília, por meio das isopletras da Figura 4, determinou-se a velocidade básica do vento como 35 m/s.

b) O parâmetro estatístico S1 utilizado foi de 1,0, para terrenos planos ou francamente acidentados, pois se assemelha aos terrenos na localidade em estudo.

c) Para parâmetro S2 foram determinadas duas importantes características de projeto. Primeiro avaliou-se a categoria de rugosidade da superfície do terreno, por meio da Tabela 1, escolhendo-se a V “terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco

espaçados. Obstáculos com altura média de 25 metros ou mais”. Não foi considerada uma mudança da rugosidade com a aproximação da edificação.

Após isso, avaliou-se a classe por meio da dimensão do edifício, por meio da Tabela 2, escolhendo a C “Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50 metros”.

Vale ressaltar que a norma não apresenta em seu quadro os valores de S2 para todas as alturas, sendo assim, foi utilizada a fórmula apresentada no seu Anexo A para o cálculo desses valores. Porém, pode-se verificar a precisão de alguns desses valores em tabelas da mesma. Os valores calculados são apresentados na Tabela 8.

d) Para fator S3 foi utilizada a Tabela 4. Assim o valor característico do grupo para a edificação estudada é 1,0, “Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação”.

e) O coeficiente de arrasto apresentado na norma é utilizável somente para edificações paralelepípedicas, assim não foram utilizadas nessa monografia.

Assim, a Tabela 7 resume os parâmetros utilizados nesse método:

Tabela 7 - Parâmetros para método estático

<i>Método Estático - NBR 6123:1988</i>			
Velocidade básica do vento (m/s)	Fator S1	Fator S2	Fator S3
35	1	Valores na Tabela 8	1

Por meio dos parâmetros acima e das eq. 2, eq. 3 e eq. 4 encontrou-se as pressões atuantes na estrutura, que são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Pressão atuante na estrutura pelo Método Estático

Altura (m)	Fator S2	Vk (m/s)	q (N/m²)
5	0,67	23,45	337,09
10	0,67	23,61	341,63
15	0,72	25,34	393,72
20	0,76	26,65	435,43
25	0,79	27,71	470,80
30	0,82	28,61	501,83
35	0,84	29,39	529,64
40	0,86	30,09	554,99

45	0,88	30,72	578,34
50	0,89	31,29	600,07
55	0,91	31,81	620,42
60	0,92	32,30	639,61
65	0,94	32,76	657,78
70	0,95	33,19	675,06
75	0,96	33,59	691,56
80	0,97	33,97	707,36
85	0,98	34,33	722,53
90	0,99	34,68	737,13
95	1,00	35,01	751,21
100	1,01	35,32	764,82

Pode-se observar a relação proporcional da pressão ‘q’ com o aumento da altura em estudo do cilindro, o que era esperado acontecer.

6.2.2 Método Contínuo simplificado

Para esse método, são utilizados os parâmetros de velocidade básica e fatores S1 e S3 do método estático. Para a determinação da pressão atuante determina-se os parâmetros p e b utilizando a Tabela 5, com categoria de rugosidade V. Para os parâmetros γ e ζ , utilizou-se a Tabela 6, 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 e apresentados em anexo.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros necessários para o cálculo da pressão equivalente da estrutura frente ao carregamento do vento:

Tabela 9 - Parâmetros do Método Contínuo Simplificado

<i>Método Contínuo Simplificado - NBR 6123:1988</i>				
Velocidade básica do vento V_0 (m/s)	Fator S1	Fator S3	Velocidade de projeto V_p (m/s)	Parâmetro b
35	1	1	24,15	0,5
Expoente p	Parâmetro γ	Parâmetro ζ	T1	Amplificação dinâmica ξ
0,31	1,2	0,02	9,75	1,85

Assim, por meio das eq. 6 e eq. 7, foi possível calcular as pressões estáticas equivalentes da altura z do cilindro, mostradas na Tabela 10.

Tabela 10 - Pressão equivalente no cilindro pelo Método Contínuo Simplificado

Altura (m)	q_0 (N/m ²)	Resposta média (N/m ²)	Amplitude máxima da resposta flutuante (N/m ²)	Resposta equivalente $q(z)$ (N/m ²)
5	357,52	58,16	12,56	70,72
10	357,52	89,38	28,85	118,23
15	357,52	114,92	46,94	161,86
20	357,52	137,36	66,29	203,65
25	357,52	157,75	86,64	244,39
30	357,52	176,62	107,83	284,46
35	357,52	194,34	129,75	324,08
40	357,52	211,11	152,29	363,41
45	357,52	227,10	175,41	402,52
50	357,52	242,44	199,06	441,49
55	357,52	257,19	223,18	480,37
60	357,52	271,45	247,74	519,19
65	357,52	285,26	272,71	557,97
70	357,52	298,67	298,08	596,75
75	357,52	311,73	323,81	635,53
80	357,52	324,45	349,88	674,33
85	357,52	336,88	376,28	713,16
90	357,52	349,03	403,00	752,03
95	357,52	360,93	430,01	790,94
100	357,52	372,59	457,31	829,90

Pode-se notar que a resposta equivalente estática na estrutura também apresenta valores maiores com o aumento da altura da mesma.

6.2.3 Modelo numérico

Para essa análise, foram utilizados os mesmos parâmetros do estudo progressivo, excetuando-se as características do fluido agora em estudo. Assim, utilizou-se uma massa específica do ar de 1,225 kg/m³ e um perfil de velocidade conforme a Tabela 11. Esse perfil de velocidade é o mesmo gerado pelo método estático da NBR 6123:1988. Essa escolha foi feita para se utilizar os parâmetros de rugosidade do terreno da região estudada.

Tabela 11 - Perfil de Velocidade para modelagem numérica de cilindro

Altura (m)	Velocidade (m/s)
------------	------------------

5	20,91
10	23,61
15	25,34
20	26,65
25	27,71
30	28,61
35	29,39
40	30,09
45	30,72
50	31,29
55	31,81
60	32,30
65	32,76
70	33,19
75	33,59
80	33,97
85	34,33
90	34,68
95	35,01
100	35,32

Assim, por meio da simulação no ANSYS CFX, encontrou-se como resultado da força de arrasto resultante de 265,307 kN. As pressões atuantes no corpo do cilindro são mostradas na Figura 22, Figura 23 e Figura 24. Pode-se notar que seus maiores valores estão nas maiores alturas do cilindro.

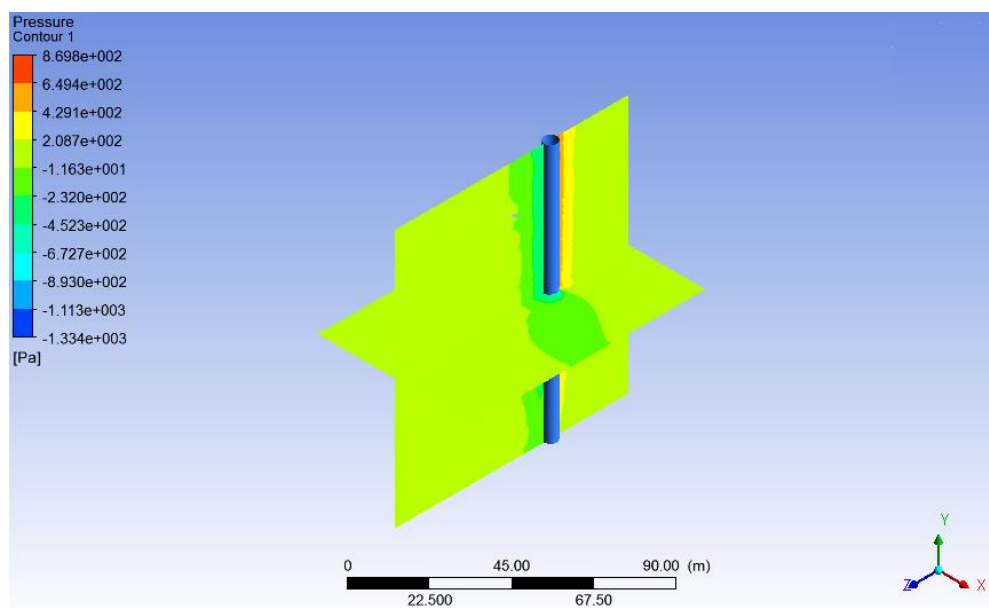


Figura 22 - Pressão no cilindro (Vista Isométrica)

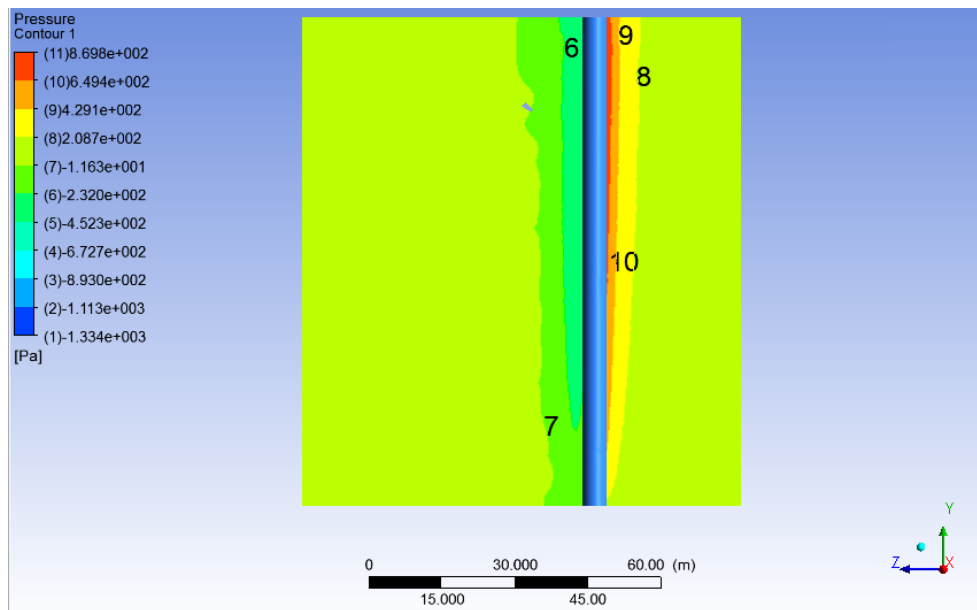


Figura 23 - Pressão no cilindro (Plano XY)

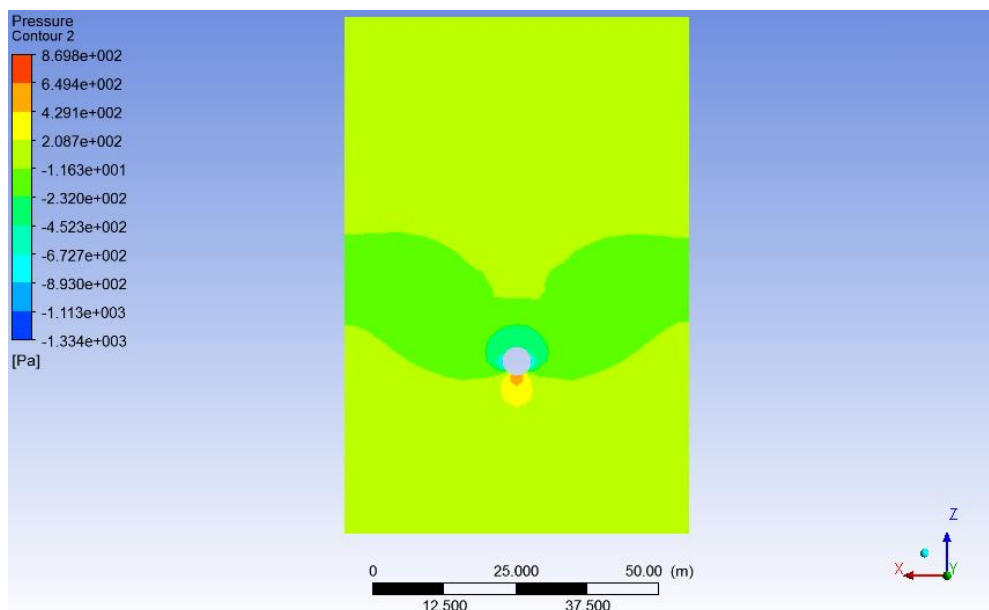


Figura 24 - Pressão no cilindro (Plano XZ)

As velocidades do vento na simulação são mostradas nas Figura 25 e Figura 26. É possível notar que estão de acordo com o perfil de velocidade da Tabela 11. Também é possível notar que na face oposta do cilindro a velocidade é negativa, ou seja, o ar após passar o cilindro faz o trajeto de volta para essa região, formando vórtices.

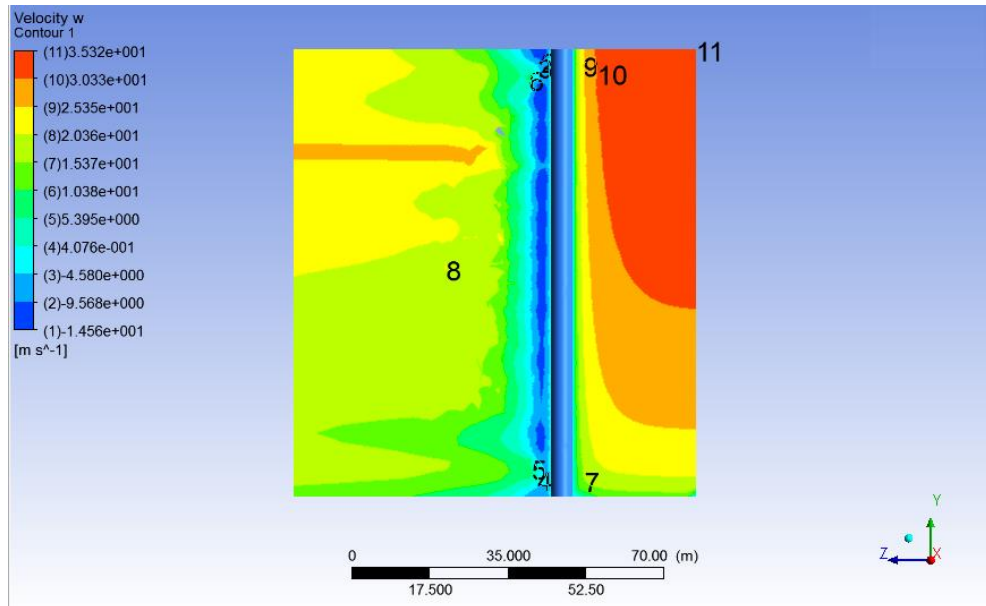


Figura 25 - Velocidades no cilindro (Plano ZY)

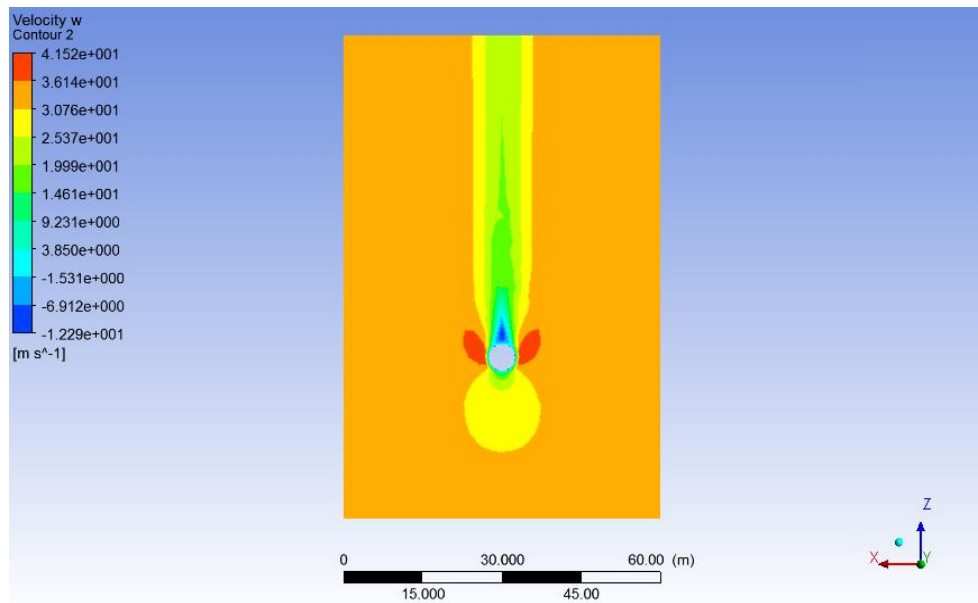


Figura 26 - Velocidades no cilindro (Plano XZ)

Por fim, pode-se fazer uma tabela comparativa das pressões para os três métodos aplicados nessa seção. A Tabela 12 apresenta esses resultados:

Tabela 12 - Resumo das pressões no cilindro

Método Estático	Método Contínuo Simplificado	Modelo Numérico
-----------------	------------------------------	-----------------

Altura (m)	q(z) (N/m ²)	q(z) (N/m ²)	q(z) (N/m ²)
5	337,09	70,72	336,0
10	341,63	118,23	415,6
15	393,72	161,86	477,8
20	435,43	203,65	511,4
25	470,80	244,39	544,4
30	501,83	284,46	570,6
35	529,64	324,08	608,1
40	554,99	363,41	641,1
45	578,34	402,52	673,9
50	600,07	441,49	699,3
55	620,42	480,37	713,0
60	639,61	519,19	721,0
65	657,78	557,97	738,9
70	675,06	596,75	778,7
75	691,56	635,53	785,4
80	707,36	674,33	802,6
85	722,53	713,16	838,3
90	737,13	752,03	858,9
95	751,21	790,94	858,9
100	764,82	829,90	869,7

Logo abaixo, pode-se ver um gráfico (Figura 27) para melhor compreensão dos valores de pressão encontrados para cada método.

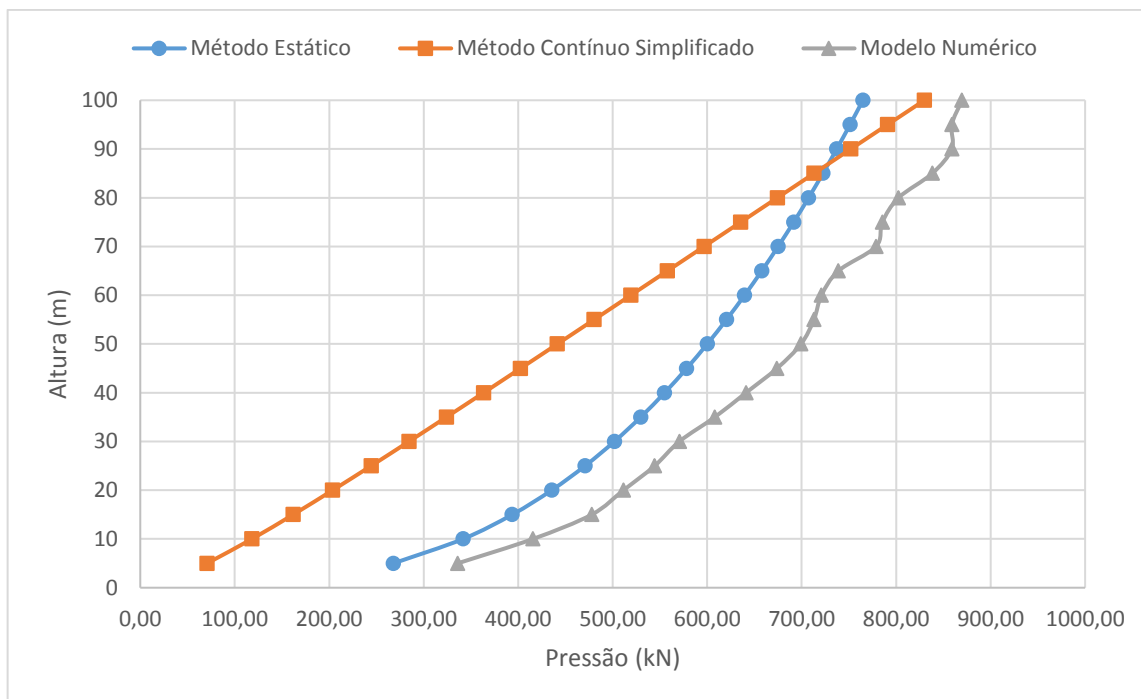


Figura 27 - Pressões no cilindro para diferentes metodologias

O modelo numérico apresenta valores de pressão superiores aos modelos da norma, isso pode ser entendido pelo fato da norma usar equações para simplificar o cálculo da pressão, sendo que no ANSYS esse cálculo é feito por métodos numéricos com maiores precisões.

O método contínuo simplificado possui valores menores que os outros dois métodos até uma altura de 85 metros, depois possui valores maiores que o estático. Assim, pode-se notar a importância de se utilizar métodos dinâmicos para edificações de grande altura.

Na Figura 28 e Figura 29 ainda é possível observar o regime do vento após passar pelo cilindro. No detalhe é possível ver o desprendimento de vórtices na parte posterior da estrutura, comprovando a velocidade negativa encontrada na Figura 25.

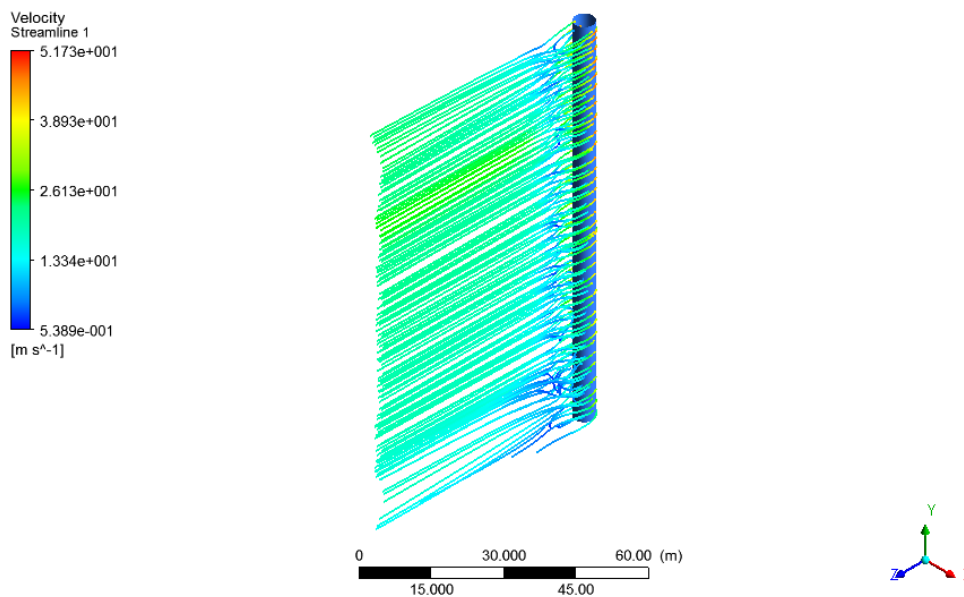


Figura 28 - Linhas de fluxo do vento após passar pelo cilindro (Isométrico)

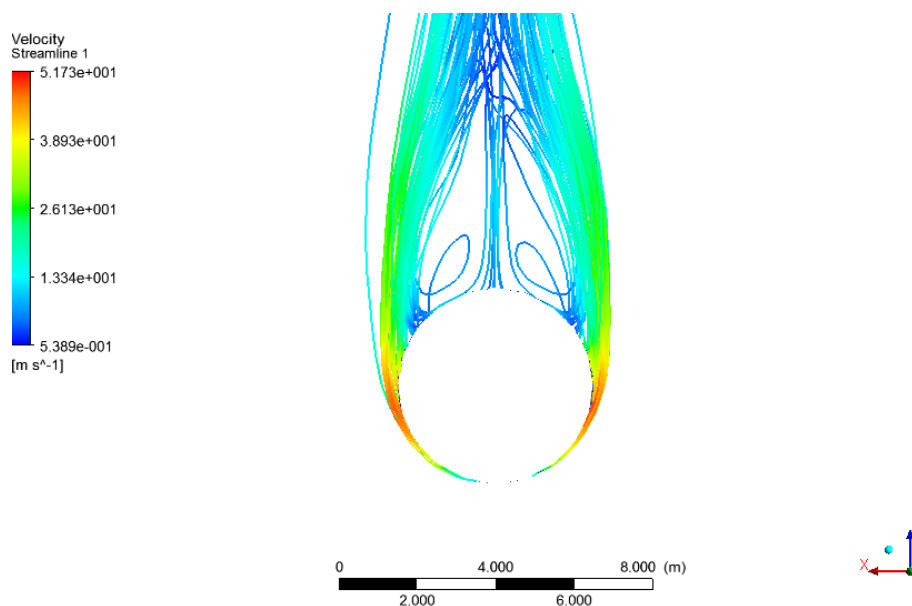


Figura 29 - Desprendimento de vórtices no cilindro

6.3 Ação do vento no Burj Khalifa

Para a ação de vento no Burj Khalifa, foram utilizados dois métodos da norma utilizados no item anterior. Assim, todos os parâmetros de cálculo são iguais aos já apresentados, mudando somente a altura do edifício. Logo na Tabela 13 é possível observar os valores de pressões pelo método estático e contínuo simplificado:

Tabela 13 - Pressões no Burj Khalifa pela NBR 6123:1988

	Estático	Contínuo Simplificado
Altura (m)	q (N/m²)	q (N/m²)
25	337,09	244,39
50	600,07	441,49
75	691,56	635,53
100	764,82	829,90
125	826,95	1025,61
150	881,44	1222,99
175	930,30	1422,20
200	974,81	1623,25
225	1015,84	1826,14
250	1054,00	2030,81
275	1089,75	2237,23
300	1123,45	2445,35
325	1155,37	2655,11
350	1185,73	2866,47
375	1214,71	3079,37
400	1242,46	3293,76
425	1269,10	3509,61
450	1294,75	3726,87
475	1319,48	3945,50
500	1343,38	4165,47
525	1366,52	4386,73
550	1388,95	4609,26
575	1410,73	4833,02
600	1431,90	5057,98
625	1452,51	5284,11
650	1472,58	5511,39
675	1492,16	5739,79
700	1511,28	5969,29
725	1529,96	6199,85
750	1548,22	6431,47
775	1566,09	6664,12
800	1583,59	6897,77
825	1600,73	7132,42

É possível notar que as maiores pressões estão no topo no edifício, sendo que o método Contínuo Simplificado possui valores bem superiores na pressão do que o estático.

Assim, é possível notar que estudo a respeito dos efeitos dinâmicos são necessários para análise de edifícios de grandes proporções, como o Burj Khalifa.

O gráfico mostrado na Figura 30, demonstra de forma mais clara a variação da pressão com a altura do Burj Khalifa.

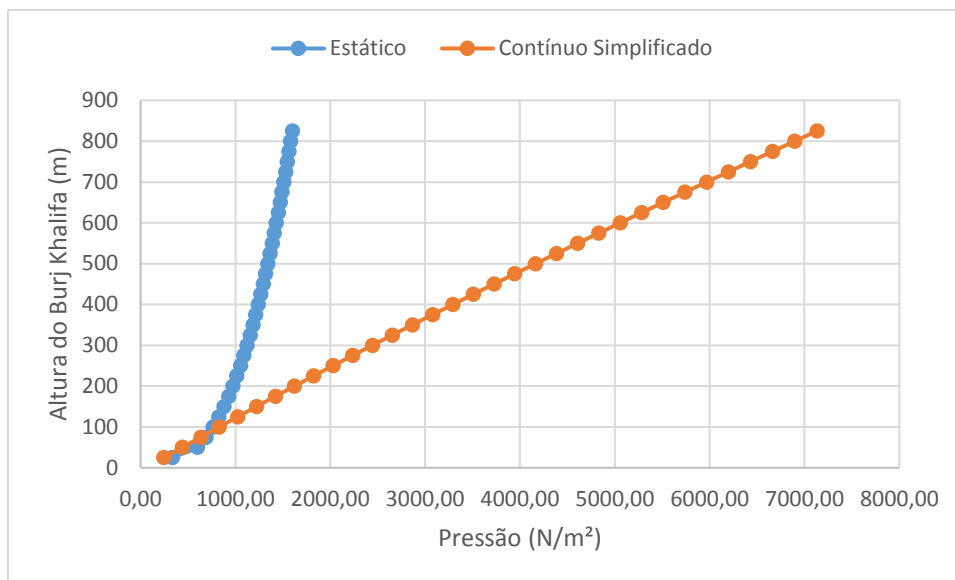


Figura 30 - Pressões no Burj Khalifa pela NBR 6123:1988

7. CONCLUSÕES

Após feitas as análises, pode-se notar que é necessário antes de qualquer estudo de estruturas complexas se fazer um estudo progressivo. Esse permite uma análise quantitativa e qualitativa de uma forma simples até chegar-se a uma forma de magnitude complexa para a estrutura.

Para o cilindro estudado para a carga de vento, pode-se observar a diferença exorbitante entre as pressões calculadas pela norma brasileira e pelo modelo numérico. Essa diferença pode estar relacionada as velocidades impostas no modelo numérico que eram superiores as velocidades normativas. Assim como as simplificações da NBR 6123:1988 para o estudo das ações dinâmicas nas estruturas, como a utilização de estruturas com até 150 metros de altura.

Ainda sobre a simulação do vento no software ANSYS CFX, é possível notar a importância das simulações em ambientes virtuais para melhor visualização da ação do vento. Por meio das figuras mostradas nessa monografia, pôde-se observar o perfil de velocidade atuante na estrutura cilíndrica, além das variações de pressões em relação à altura da mesma.

Porém é valido ressaltar que dependendo da complexidade do problema, como elevadas alturas e formas geométricas diferenciadas (caso Burj Khalifa), a modelagem numérica torna-se quase impraticável, devido aos requisitos de software e tempo de processamento da estrutura. Além de ser necessário um bom conhecimento do programa para obtenção de resultados confiáveis a partir de condições de contorno e geometrias de qualidade.

Para o Burj Khalifa apesar da norma brasileira se limitar a edificações de altura menores, foram calculadas as pressões atuantes na estrutura e se verificou que as pressões maiores estão no topo da estrutura. Porém não é possível determinar se os valores estão corretos devido a estrutura ser única, sem parâmetros para comparação. Porém, é possível notar que esses estudos, ainda que preliminares, já fornecem resultados sobre limitação da norma brasileira de vento para edifícios altos. Fato já previsto na mesma quando estabelecido a altura máxima das edificações possíveis de sua aplicabilidade.

Por fim, a norma possui coeficientes de arrasto somente para edificações de formato contínuo, não sendo aplicável para o Burj Khalifa. Estes fatos justificam a necessidade do estudo e revisão da norma NBR 6123:1988, que já está em andamento, para englobar edificações de formatos e/ou características diferentes.

8. RECOMENDAÇÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Faz-se necessário futuramente um estudo detalhado para a calibração do modelo do Burj Khalifa para dimensões que possam ser utilizáveis no ANSYS CFX, determinando suas dimensões de forma mais real, porém em escala. Isso permitirá um estudo detalhado com uma malha consideravelmente otimizada e sem comprometer o processador da simulação.

Também é importante ser realizado um refinamento nas malhas construtivas do modelo no ANSYS CFX, afim de se diminuir os erros de aproximação para elementos com diferentes tamanhos.

Pode ser feito um estudo do Burj com um escoamento turbulento e com a velocidade característica da região onde ele se localiza, de forma a apresentar um resultado mais condizente com a realidade.

Assim, com as alterações feitas na modelagem do edifício, fazer o estudo do desprendimento dos vórtices, permitindo uma análise das condições de projeto de variação de seções com a altura e seu formato em Y invertido.

Com o estudo das pressões no software antes, também é possível analisar os coeficientes de arrasto para diferentes edificações, podendo ser um complemento para a análise da norma brasileira de vento.

Por fim, é necessária uma revisão da norma NBR 6123:1988, pois apesar de ser referência em relação a outras normas de vento, a sua desatualização deixa estudos mais complexos sem parâmetros de cálculo.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAZAQ, A. Validating the Structural Behavior and Response of Burj Khalifa: Synopsis of the Full Scale Structural Health Monitoring Programs. *International Journal of High-Rise Buildings (IJHRB)*. 37-51, 2011.

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

ALMEIDA, D.; VIDOTO, T. Análise comparativa dos métodos estático e dinâmicos da ação do vento em edifícios esbeltos de concreto armado segundo a NBR 6123/1988. 2013. 119p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba.

BAKER W, KORISTA S, NOVAK L. Engineering the World's Tallest – Burj Dubai. *Proceedings of the CTBUH 2008 - 8th World Congress, Dubai, 2008*.

BLESSMANN, J. Ação do Vento em Edifícios. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1989.

_____. Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

_____. O vento na Engenharia Estrutural. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1995.

BRONZATTO, A. F. L. Esforços de vento em estruturas esbeltas para telecomunicações: comparação entre as análises estática e dinâmica propostas pela NBR 6123/1988. 2012. 81p. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre. 2012.

CHÁVEZ, E. S. Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do vento. 2006. 135p. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte. 2006.

CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. Dynamics of structures. 3. ed. Califórnia: 2003.

FERREIRA, J. L. (2012). Um estudo de ações dinâmicas em plataformas *offshore* utilizando dinâmica dos fluidos computacional. Monografia de Projeto Final 2, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 187 p.

MENDIS, P., NGO T., HARITOS N., HIRA A. Wind Loading on Tall Buildings. 2007. Publicação: EJSE Special Issue: Loading on Structures (2007).

MERCE, R. N. Análise dinâmica de torres metálicas autoportantes sob ação do vento. Dissertação de Mestrado, Publicação Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

OLIVEIRA, B. D. C. Efeito do Vento como Ação Dinâmica em Edifícios Altos. 2014. 169p. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto/Portugal. 2014.

MORAIS, J. M. da S. C.; LABAKI, L. C. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa, Minha Vida”. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 223-244, jan./mar. 2017.

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.

SILVA, J. P. M. M. Ação dinâmica do vento em edificações de múltiplos andares de acordo com a NBR 6123 (1988). 2009. 75p. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana. 2009.

TADA E., Tada Engenharia. Fonte: <https://www.tadaengenharia.com/single-post/2017/02/10/Detalhes-do-projeto-estrutural-do-edificio-mais-alto-do-mundo-O-Burj-Khalifa>

TREIN, C. A. Modelagem dinâmica equivalente de edifícios altos submetidos à ação do vento. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2005.

VANIN, D. D. Resposta Dinâmica de Edifícios Altos Frente à Ação do Vento: Comparação de Técnicas Experimentais em Túnel de Vento. 2011. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ANEXO A – CÁLCULO DO FATOR S_2

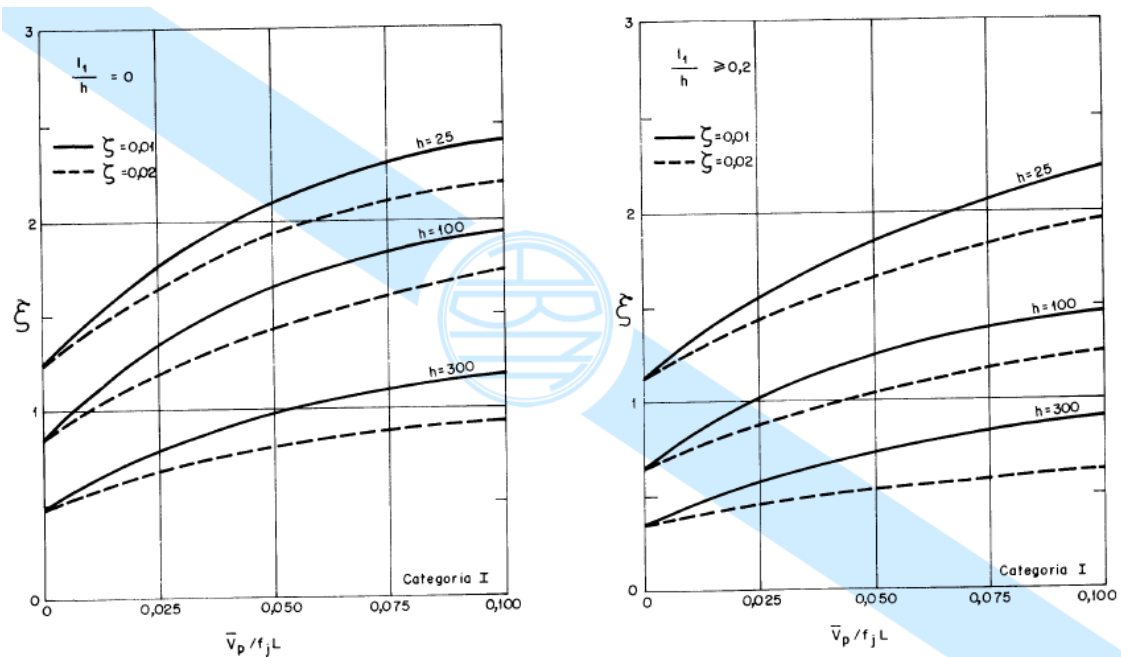


Figura 14 - Coeficiente de amplificação dinâmica, ξ para terreno de categoria I ($L = 1800$ m; h em metros)

Figura 31 - Coeficiente de amplificação dinâmica (Fonte: NBR 6123:1988)

ANEXO B – MODELAGEM DO BURJ KHALIFA NO ANSYS

Aqui são apresentadas imagens que demonstram a modelagem do Burj Khalifa no ANSYS.

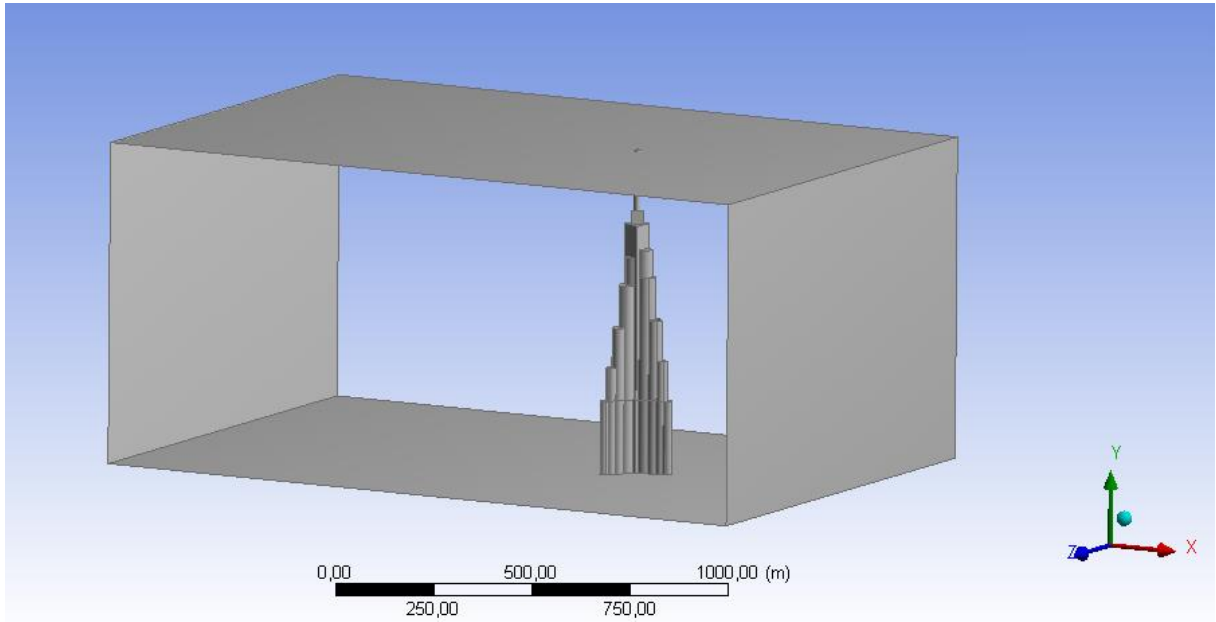


Figura 32 - Modelo do Burj Khalifa no ANSYS

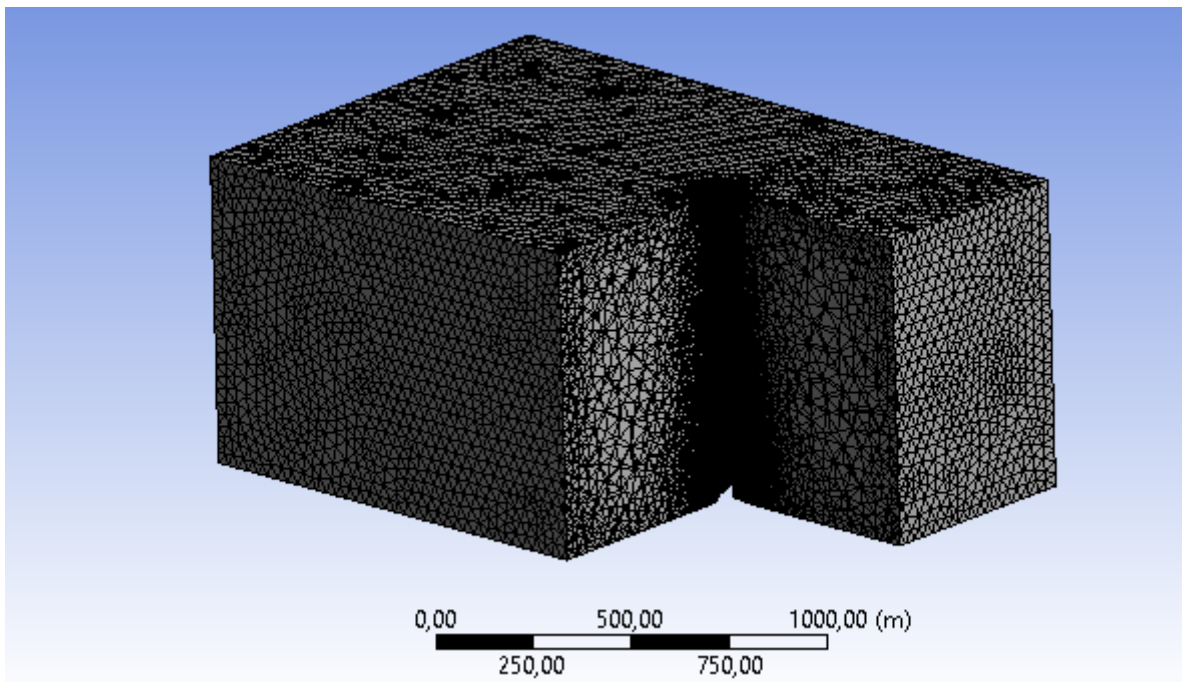


Figura 33 - Malha do Burj Khalifa

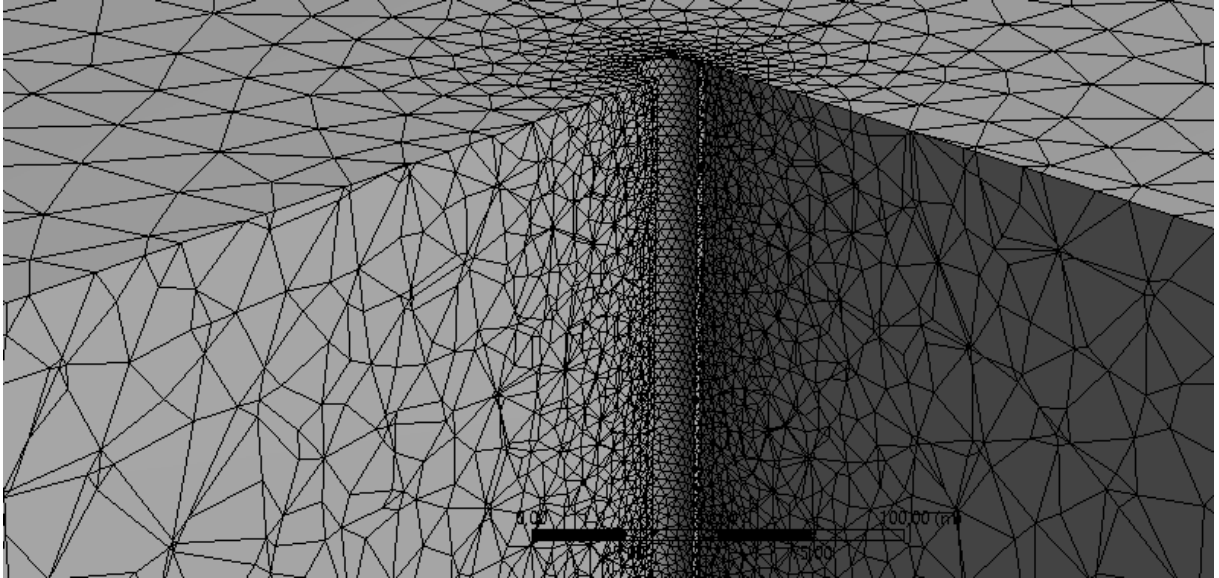


Figura 34 - Detalhe da malha do Burj Khalifa