

Marcelo Augusto Kettermann

**CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS  
À AÇÃO DO VENTO**

Orientador: Prof.º Dr.º Jano d'Araujo Coelho

Florianópolis  
Junho 2016



**MARCELO AUGUSTO KETTERMANN**

**CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS  
ALTOS SUBMETIDOS À AÇÃO DO VENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

**Orientador: Prof.º Dr.º Jano D'Araujo Coelho**

**Florianópolis, 30 de junho de 2015**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kettermann, Marcelo Augusto  
Conforto Humano em Edifícios Altos Submetidos à Ação do  
Vento / Marcelo Augusto Kettermann ; orientador, Jano  
D'Araujo Coelho - Florianópolis, SC, 2016.  
95 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.  
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Edifícios Altos. 3. Conforto Humano. 4. Frequência Natural de Edificações. 5. Efeitos Dinâmicos do vento. I. Coelho, Jano D'Araujo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**MARCELO AUGUSTO KETTERMANN**


**CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS  
SUBMETIDOS À AÇÃO DO VENTO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

**Florianópolis, 30 de junho de 2015**

Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Luiz Alberto Gomez  
Coordenador do curso

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Jano D'Araujo Coelho – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Daniel Domingues Loriggio**  
**Universidade Federal de Santa Catarina**

**Eng. Alberto de Oliveira Rodrigues**  
**Concreto + Projeto**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, sempre em primeiro lugar.

Aos meus pais, pelo exemplo de dedicação, amor, perseverança, honestidade e por tudo que fizeram em toda vida por mim.

À minha irmã Beatriz, minha grande amiga, a quem tenho muito orgulho em ser irmão.

À minha amada namorada Déborah, por todo seu amor, carinho, ajuda e companheirismo ao longo de todos estes anos.

Ao Prof. Jano pela paciência, dedicação, entusiasmo e conhecimento transmitido na condução deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por toda experiência e aprendizado que me ofereceu e pelos bons momentos onde nela vivi.

Aos amigos e parentes que sempre me apoiaram.



## RESUMO

Este trabalho aborda a problemática do desconforto sentido pelos usuários de edifícios altos, causadas por acelerações induzidas pelo caráter dinâmico do vento. Serão apresentados métodos para estimar a frequência natural das edificações, e critérios de avaliação do conforto em função da aceleração induzida. Com este objetivo, foram realizados dois estudos de caso para edifícios em concreto armado com mais de 100 metros de altura, para verificação deste critério. Os deslocamentos dos pavimentos habitáveis mais altos foram através do programa AltoQi Eberick V10. Foram comparados os resultados obtidos para mais de um método de obtenção da frequência natural, assim como para mais de um critério de avaliação do conforto. Por fim, no segundo estudo foi feita a comparação com resultados obtidos a partir da análise em túnel de vento.

**Palavras-chave:** vibrações; frequência natural ; conforto humano ; vento ; edifícios altos ; edifícios de concreto armado.





## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE (FONTE: CLOUGH & PENZIEN, 1995) .....  | 22 |
| FIGURA 2 - FORÇAS QUE ATUAM SOBRE UM SISTEMA COM UM GRAU DE LIBERDADE (FONTE: CLOUGH & PENZIEN, 1995).....   | 23 |
| FIGURA 3 - CURVA DE VALORES PARA FREQUÊNCIA NATURAL MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE POR ELLIS (1980) (FONTE: BACHMANN, 1997).  | 28 |
| FIGURA 4 - FÓRMULAS RECOMENDADAS PARA PERÍODO E LIMITE SUPERIOR PARA PERÍODO FUNDAMENTAL PARA EDIFÍCIOS DE PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO (FONTE: GOEL; CHOPRA; 1997) ..... | 29 |
| FIGURA 5 - MODELO DO ESTÁDIO DO MORUMBI E SUA VIZINHANÇA NO TÚNEL DE VENTO - ESCALA 1:200 (FONTE: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS) .....                             | 33 |
| FIGURA 6 - ANÁLISE A PARTIR DO PROGRAMA AUTODESK FLOW DESIGN (FONTE: EICHENSEER, J. ; 2014) .....  | 33 |
| FIGURA 7 - PERFIL DE VELOCIDADE MÉDIA (EM KM/H) PROPOSTO POR DAVENPORT (FONTE: GONÇALVES ET AL; 2004; P. 12) .....   | 35 |
| FIGURA 8 - VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO TEMPO AO LONGO DO TEMPO .....   | 36 |
| FIGURA 9 - PERFIL DA VELOCIDADE DO VENTO NO DOMÍNIO DO TEMPO (FONTE; BACHMANN ET AL; 1995) .....   | 36 |
| FIGURA 10 - VÓRTICES DE KARMAN (FONTE: BLESSMANN, 1998) .....  | 38 |
| FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO DE GOLPE..... (FONTE: GOLÇALVES ET AL; 2004)   | 38 |
| FIGURA 12 - ISOPLETAS DA VELOCIDADE BÁSICA $V_0$ (M/S) (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 6) .....   | 43 |
| FIGURA 13 - COEFICIENTE DE ARRASTO, $C_a$ , PARA EDIFICAÇÕES PARALELEPIPÉDICAS EM VENTO DE BAIXA TURBULÊNCIA (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 20).....                         | 46 |
| FIGURA 14 - COEFICIENTE DE ARRASTO, $C_a$ , PARA EDIFICAÇÕES PARALELEPIPÉDICAS EM VENTO DE ALTA TURBULÊNCIA (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 24).....                          | 47 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 15 - DIREÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS PARA VIBRAÇÃO MECÂNICA EM SERES HUMANOS (FONTE: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978).....  | 53 |
| FIGURA 16 - CURVAS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO PARA VIBRAÇÕES CAUSADAS PELO VENTO ISO 10137/2007 (FONTE: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007) .....   | 55 |
| FIGURA 17 - LIMITE DE ACELERAÇÃO LONGITUDINAL ( $A_z$ ) COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA NÍVEL REDUZIDO DE EFICIÊNCIA (FADIGA) (FONTE: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978).....    | 56 |
| FIGURA 18 - LIMITE DE ACELERAÇÃO TRANSVERSAL ( $A_x$ E $A_y$ ) COMO FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO PARA NÍVEL REDUZIDO DE EFICIÊNCIA (FADIGA) (FONTE: INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION, 1978)..... | 57 |
| FIGURA 19 – CURVA DE ACELERAÇÃO NA DIREÇÃO Z DA PERCEPÇÃO DO SER HUMANO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978).....   | 58 |
| FIGURA 20 - CURVA DE ACELERAÇÃO X E Y , DA PERCEPÇÃO DO SER HUMANO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978).....  | 59 |
| FIGURA 21 - PERCEPÇÃO HUMANA A VIBRAÇÕES DE EDIFÍCIOS DEVIDO AO VENTO (FONTE: BACHMANN; HIRSCH; 1995, P. 77) .....  | 61 |
| FIGURA 22 - IMAGEM 3D DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO 1 GERADA A PARTIR DO PROGRAMA DE CÁLCULO ESTRUTURAL EBERICK .....  | 63 |
| FIGURA 23 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO DINÂMICA $Q(z)$ COM A ALTURA H (FONTE: DO AUTOR).....   | 67 |
| FIGURA 24 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO DINÂMICA $Q(z)$ COM A ALTURA Z (FONTE: DO AUTOR).....   | 68 |
| FIGURA 25 - VARIAÇÃO DA FORÇA ESTÁTICA EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA ALTURA Z (FONTE: DO AUTOR).....   | 70 |
| FIGURA 26 - ESTRUTURA DEFORMADA DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO 1 PARA UM VENTO DE $T_r = 10$ ANOS.....  | 71 |
| FIGURA 27- IMAGEM 3D DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO 2 GERADA A PARTIR DO PROGRAMA DE CÁLCULO ESTRUTURAL EBERICK .....   | 75 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 28 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO DINÂMICA $Q(z)$ COM A ALTURA $H$ (FONTE: DO AUTOR).....   | 78 |
| FIGURA 29 - VARIAÇÃO DA FORÇA ESTÁTICA EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA ALTURA $Z$ (FONTE: DO AUTOR).....   | 79 |
| FIGURA 30 - VARIAÇÃO DA FORÇA ESTÁTICA EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA ALTURA $Z$ (FONTE: DO AUTOR).....   | 81 |
| FIGURA 31 - ESTRUTURA DEFORMADA DA ESTRUTURA DO EDIFÍCIO 2 PARA UM VENTO DE $T_r = 10$ ANOS. ....   | 82 |
| FIGURA 32 - MODELO DO EDIFÍCIO 2 E VIZINHANÇA PARA ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO NA ESCALA 1:300 .....  | 85 |
| FIGURA 33 - MODO DE VIBRAÇÃO 1 .....  | 87 |
| FIGURA 34 - MODO DE VIBRAÇÃO 2 .....  | 87 |
| FIGURA 35 - MODO DE VIBRAÇÃO 3 .....  | 88 |
| FIGURA 36 - ACELERAÇÕES DE PICO DO EDIFÍCIO 2 PARA DIFERENTES TEMPOS DE RETORNO.....  | 89 |
| FIGURA 37 - COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA, $\epsilon$ , PARA TERRENO DE CATEGORIA I ( $L=1800$ M; $H$ EM METROS) (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 37) .....  | 95 |
| FIGURA 38 - COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA, $\epsilon$ , PARA TERRENO DE CATEGORIA II ( $L=1800$ M; $H$ EM METROS) (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 38).....  | 95 |
| FIGURA 39 - COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA, $\epsilon$ , PARA TERRENO DE CATEGORIA III ( $L=1800$ M; $H$ EM METROS) (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 39)..... | 96 |
| FIGURA 40 - COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA, $\epsilon$ , PARA TERRENO DE CATEGORIA IV ( $L=1800$ M; $H$ EM METROS) (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 40).....  | 96 |
| FIGURA 41 - COEFICIENTE DE AMPLIFICAÇÃO DINÂMICA, $\epsilon$ , PARA TERRENO DE CATEGORIA V ( $L=1800$ M; $H$ EM METROS) (FONTE: NBR 6123, 1988, P. 41).....   | 97 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| TABELA 1 - VALORES MÍNIMOS DO FATOR ESTATÍSTICO <b>S3</b> .....                      | 45 |
| TABELA 2 - FATOR ESTATÍSTICO <b>S3</b> .....   | 45 |
| TABELA 3 - PARÂMETROS PARA A DETERMINAÇÃO DE EFEITOS DINÂMICOS.....                  | 50 |
| TABELA 4 - EXPOENTE P E PARÂMETRO B .....  | 50 |
| TABELA 5 - SENSIBILIDADE HUMANA A VIBRAÇÕES DE EDIFICAÇÕES INDUZIDAS PELO VENTO..... | 60 |
| TABELA 6 - QUADRO COMPARATIVO ENTRE AS ACELERAÇÕES PARA O EDIFÍCIO 1..               | 72 |
| TABELA 7 - QUADRO COMPARATIVO ENTRE AS ACELERAÇÕES PARA O EDIFÍCIO 2..               | 83 |
| TABELA 8 – CINCO PRIMEIROS MODOS DE VIBRAÇÃO DO EDIFÍCIO 2 .....                     | 86 |

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo I – Figuras 14 a 18 da NBR6123/1988.

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b><u>INTRODUÇÃO</u></b>  | <b>17</b> |
| 1.1      | OBJETIVO GERAL  | 17        |
| 1.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS   | 17        |
| 1.3      | JUSTIFICATIVA   | 18        |
| 1.4      | ESTRUTURA DO TRABALHO   | 18        |
| <b>2</b> | <b><u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u></b>   | <b>20</b> |
| 2.1      | VIBRAÇÃO  | 20        |
| 2.2      | CLASSIFICAÇÃO DAS VIBRAÇÕES   | 20        |
| 2.3      | EQUAÇÃO DIFERENCIAL DO MOVIMENTO  | 22        |
| 2.3.1    | SOLUÇÃO PARA A EQUAÇÃO DIFERENCIAL DO MOVIMENTO                             | 25        |
| 2.4      | ESTIMATIVAS DA FREQUÊNCIA NATURAL DE EDIFICAÇÕES                            | 26        |
| 2.5      | ANÁLISE MODAL   | 30        |
| 2.6      | ANÁLISE EM TÚNEL DE VENTO   | 31        |
| <b>3</b> | <b><u>VENTO</u></b>   | <b>34</b> |
| 3.1      | CARACTERIZAÇÃO DO VENTO   | 34        |
| 3.2      | EFEITOS DINÂMICOS DO VENTO EM EDIFICAÇÕES                                   | 37        |
| 3.2.1    | DESprendimento de Vórtices  | 37        |
| 3.2.2    | EFEITOS DE GOLPE  | 38        |
| 3.2.3    | GALOPE  | 39        |
| 3.2.4    | DRAPEJAMENTO  | 39        |
| 3.2.5    | ENERGIA CONTIDA NA TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA                                  | 39        |
| 3.3      | EFEITOS DINÂMICOS DEVIDO À TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA<br>CONFORME NBR6123/1988 | 40        |
| 3.3.1    | ANÁLISE DINÂMICA SIMPLIFICADA   | 40        |
| <b>4</b> | <b><u>CRITÉRIOS DE CONFORTO E ACELERAÇÃO</u></b>                            | <b>51</b> |
| 4.1      | NBR 6123/1988   | 52        |

|                |   |           |
|----------------|---|-----------|
| <b>4.2</b>     | <b>ISO 10137/2007</b>   | <b>54</b> |
| <b>4.3</b>     | <b>ISO 2631-1 E ISO 2631-2</b>  | <b>55</b> |
| <b>4.4</b>     | <b>CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO SEGUNDO BACHMANN E HIRSCH</b>                        | <b>60</b> |
| <b>4.5</b>     | <b>CRITÉRIO DE ACELERAÇÃO DE PICO SEGUNDO MELBOURNE</b>                       | <b>60</b> |
| <b>5</b>       | <b>ESTUDOS DE CASO</b>  | <b>62</b> |
| <b>5.1</b>     | <b>EDIFÍCIO 1</b>   | <b>62</b> |
| 5.1.1          | CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO   | 62        |
| 5.1.2          | CÁLCULO DE ACELERAÇÕES MÁXIMAS PARA VERIFICAÇÃO DE CONFORTO                   | 64        |
| <b>5.2</b>     | <b>EDIFÍCIO 2</b>   | <b>74</b> |
| 5.2.1          | CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO   | 74        |
| 5.2.2          | CÁLCULO DE ACELERAÇÕES MÁXIMAS PARA VERIFICAÇÃO DE CONFORTO                   | 74        |
| 5.2.3          | ANÁLISE DO CONFORTO A PARTIR DE RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DE TÚNEL DE VENTO | 85        |
| <b>6</b>       | <b>CONCLUSÃO</b>  | <b>90</b> |
| <b>7</b>       | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>   | <b>92</b> |
| <b>ANEXO 1</b> |   | <b>95</b> |



# **1 INTRODUÇÃO**

Com o avanço tecnológico de materiais e técnicas construtivas, construir estruturas mais altas se tornou mais fácil ao longo dos anos. Somado ao crescimento dos centros urbanos, ocasionando numa diminuição de espaços livres para novas construções, construir estruturas mais altas tem se tornado uma opção mais interessante para os construtores.

É procedimento usual para dimensionamento de estruturas considerar as ações dinâmicas do vento como ações de natureza estática por motivo de simplificação. Entretanto, estas simplificações não são capazes de verificar possíveis efeitos capazes de provocar desconforto aos usuários. Mesmo que estejam dimensionadas para atender ao estado limite último (ELU), estruturas de edifícios podem ser suscetíveis à vibrações que causam desconforto aos ocupantes, não atendendo desta forma ao estado limite de serviço (ELS).

Desta forma, este trabalho tem como objetivo tratar desta problemática. Para isto, foi feita uma pesquisa sobre os critérios de aceitabilidade, os métodos de verificação e dois estudos de caso para aplicação dos métodos de averiguação para este critério.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o conforto humano de dois edifícios altos em concreto armado submetidos a cargas do vento.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Apresentar métodos simplificados de obtenção da frequência natural de edificações ;

- Apresentar critérios encontrados na literatura e instruções normativas para determinação do conforto em edificações devido à vibrações induzidas pelo vento ;
- Adquirir conhecimento sobre parte dos efeitos dinâmicos do vento em edificações ;
- Realizar estudos de caso para verificação do conforto em edificações submetidos à ação dinâmica do vento ;
- Comparar os resultados para distintas frequências naturais obtidas ;
- Comparar os resultados para diferentes critérios de conforto adotados ;

### **1.3 Justificativa**

O interesse do tema deste trabalho surgiu da curiosidade do autor sobre o processo de projetar estruturas, em particular as mais altas. Uma das tantas verificações a serem feitas neste processo, é referente ao conforto humano. Somado ao visível crescimento do número de edificações deste porte construídas especialmente na última década em Santa Catarina e no Brasil, o tema do trabalho torna-se estimulante.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo esta introdução o primeiro.

O capítulo 2 aborda os conceitos básicos ligados ao trabalho, como classificação das vibrações, equação diferencial do movimento, métodos para estimativa da frequência natural de edificações e uma breve explicação da análise modal e análise em túnel de vento.

O capítulo 3 se refere ao vento, sua origem, seus efeitos dinâmicos em edificações e sobre como a norma NBR6123 aborda o tema dos efeitos dinâmicos causados pela turbulência atmosférica em edificações para avaliação do conforto humano.

O capítulo 4 apresenta critérios de avaliação do conforto humano e aceleração.

O capítulo 5 apresenta dois estudos de caso, sendo o primeiro analisado unicamente pelo método simplificado da norma NBR6133, e o segundo pelo método simplificado e por uma análise em túnel de vento.

O capítulo 6 apresenta as conclusões.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Tendo em mente agora o objetivo deste trabalho, neste capítulo, será abordado os conceitos básicos referentes ao tema.

### **2.1 Vibração**

Segundo Silva e Beck (2012) vibração ou oscilação é todo movimento que se repete em intervalos de tempos iguais. Deste modo, a vibração contém o estudo do movimento vibratório de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio, assim como as forças e momentos a ele associados.

Usualmente, um sistema vibratório contém um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia), um meio para armazenar energia potencial (molas ou elasticidade) e um meio dissipador de energia (amortecedor) (RAO, 2008).

A vibração de um sistema mecânico envolve a transferência alternada de sua energia potencial em energia cinética e vice-versa. Se o sistema for amortecido, perde-se energia a cada ciclo de vibração afim de se extinguir a oscilação.

### **2.2 Classificação das Vibrações**

De acordo com Silva e Beck (2012), as vibrações podem ser classificadas segundo os seguintes critérios: excitação externa, amortecimento, previsibilidade e linearidade, resultando assim na seguinte classificação:

- a) Vibrações livres (ou naturais) e vibrações forçadas: um sistema é dito em vibração livre, quando a oscilação é causada apenas por

uma perturbação inicial (velocidade inicial e/ou deslocamento inicial). Se o sistema estiver sujeito a uma força e/ou torque aplicados externamente, a vibração é considerada forçada. Estas vibrações permanecem durante a aplicação das excitações que, uma vez suprimidas, fazem com que o sistema entre em vibração livre;

- b) Vibrações não amortecida e vibrações amortecidas: uma vibração é não amortecida quando não há perda de energia por atrito ou outra resistência durante a oscilação. Entretanto, se o sistema perde energia durante a oscilação, a vibração é considerada amortecida;
  
- c) Vibrações determinísticas e vibrações aleatórias: quando o valor da excitação (força) que age sobre os sistema vibratório é conhecido, a vibração é denominada determinística. Porém, caso o sistema esteja submetido a uma excitação que em dado instante não possa ser prevista seu valor (ex. terremoto), a vibração é denominada aleatória.
  
- d) Vibrações lineares e vibrações não lineares: Quando existe proporcionalidade entre a excitação (causa) e a resposta (efeito), a vibração resultante é conhecida como vibração linear. Nele o princípio da superposição é válida. Mas, se não há proporcionalidade entre causa e efeito, a vibração é denominada vibração não linear. Neste caso, o princípio da superposição não se aplica.

### 2.3 Equação diferencial do movimento

O sistema mecânico mais simples pode ser representado como sendo uma relação massa-mola-amortecedor, o qual é caracterizado pelo fato que seu deslocamento é descrito por uma única variável ou coordenada (MEIROVITCH, 2001). Neste modelo mais simples de um sistema com um grau de liberdade, todas as propriedades são consideradas concentradas em um único elemento físico (CLOUGH e PENZIEN, 2003). A Figura 1 representa um sistema com um grau de liberdade:

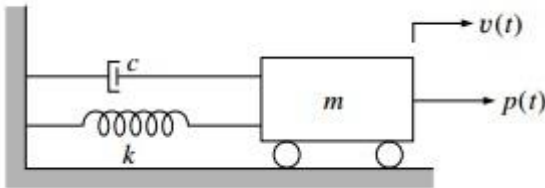
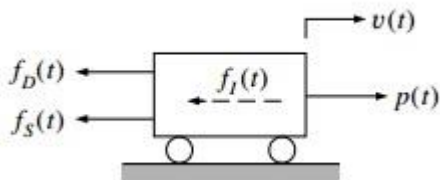


Figura 1 - Representação dos componentes básicos de um sistema com um grau de liberdade (fonte: CLOUGH & PENZIEN, 1995)

Neste esquema, toda a massa  $m$  do sistema é representada pelo bloco rígido, enquanto a resistência elástica do sistema é fornecida pela mola de rigidez  $k$ , o mecanismo de perda de energia pela constante de amortecimento  $c$  e a força externa aplicada ao sistema pela carga  $p(t)$  variando ao longo do tempo.

A equação do movimento do sistema da Figura 1, pode ser formulada a partir do equilíbrio de forças que agem sobre o bloco rígido utilizando o princípio de D'Alembert. Como mostrado na Figura 2, as forças que atuam no sentido do deslocamento são a carga externa, e três forças

resistentes que resultam do deslocamento, a força inercial  $f_I(t)$ , a força elástica  $f_S(t)$  e a força de amortecimento  $f_D(t)$ .



**Figura 2 - Forças que atuam sobre um sistema com um grau de liberdade (fonte: CLOUGH & PENZIEN, 1995)**

Desta forma, pelo equilíbrio de forças, a equação do movimento é assim expressa:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (1)$$

Onde:

$f_I(t)$  – Força inercial;

$f_D(t)$  – Força de amortecimento;

$f_S(t)$  – Força elástica;

$p(t)$  – Carga externa;

As forças inerciais, elásticas e de amortecimento são funções do deslocamento e de suas derivadas. O sentido positivo destas forças foi arbitrado para corresponder ao sentido negativo do deslocamento, opondo-se assim as cargas externas aplicadas ao sistema.

De acordo com o princípio de d'Alembert, a força inercial é o produto da massa  $m$  e aceleração:

$$f_I(t) = m \ddot{v}(t) \quad (2)$$

A força elástica, é dada como produto do deslocamento  $v(t)$  e rigidez da mola  $k$ :

$$f_S(t) = k v(t) \quad (3)$$

E por fim, assumindo um mecanismo de amortecimento viscoso, a força de amortecimento é o produto da constante de amortecimento  $c$  e velocidade  $\dot{v}(t)$ :

$$f_D(t) = c \dot{v}(t) \quad (4)$$

Combinando as equações (2), (3) e (4) na equação (1), temos a seguinte equação diferencial do movimento:

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \quad (5)$$

É interessante notar que, caso a carga externa que atua no sistema seja constante ao longo do tempo, a análise torna-se de natureza estática e pode ser anunciada pela equação (6):

$$kv(t) = p(t) \quad (6)$$



### 2.3.1 Solução para a equação diferencial do movimento

A solução da equação diferencial de segunda ordem (5) envolve duas partes: a solução homogênea e a solução particular. A equação número (5) é uma equação diferencial de segunda ordem, e portanto requer duas condições iniciais para definir a sua resposta. Estas condições geralmente são o deslocamento inicial e a velocidade inicial da massa,  $v(0)$  e  $v'(0)$ .

A solução homogênea satisfaz a equação sem a força aplicada e a solução particular é função da força aplicada. Juntas, a solução homogênea e a solução particular resultam na resposta do sistema  $v(t)$ .

Se um sistema de um grau de liberdade não possui nenhuma força externa aplicada, ele irá responder em vibração livre quando as condições iniciais forem não nulas.

Como a força externa é nula, a solução particular é igual a zero, e a solução homogênea representa a vibração livre da estrutura.

Desta forma, a solução da equação (5) é :

$$v(t) = e^{t\gamma}(x_0 \cos[t\lambda] + \frac{(v_0 + x_0\gamma)}{\lambda} \sin[t\lambda]) \quad (7)$$

Onde :

$$\lambda = \sqrt{-\gamma^2 + \omega^2} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{c}{2m} \quad (9)$$

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (10)$$

A frequência natural de vibração do sistema  $\omega$  tem como unidade radiano/segundo. Entretanto, muitas vezes é interessante que a frequência tenha por unidade ciclos por segundo ou hertz (Hz). Esta relação é dada pela equação abaixo:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (11)$$

Sendo o período o inverso da frequência, este é definido por:

$$T = \frac{1}{f} \quad (12)$$

## **2.4 Estimativas da frequência natural de edificações**

A frequência natural de uma estrutura, é a frequência na qual a estrutura tende a vibrar quando perturbada.

Pode-se encontrar na literatura e em normas nacionais de vários países diversas fórmulas simplificadas para a estimativa da frequência natural das edificações. Com o intuito de apresentar métodos simplificados para uma primeira determinação destas frequências, será apresentado a seguir alguns destes métodos.

Baseado na curva de um estudo realizado de Ellis (1980), Figura 3, onde foram medidos experimentalmente a frequência natural de 163 edificações, Bachmann (1997) exibe uma formulação simplificada para a obtenção da frequência natural, baseado somente na altura da edificação, apresentada pela equação (13).

$$f_n = \frac{46}{H} \quad (13)$$

Onde:

$f_n$  – Frequência natural;

H – Altura da edificação.

Com base em trinta e sete registros de frequências naturais medidos durante oito terremotos na Califórnia durante os anos de 1971 a 1994, Goel e Chopra (1997) propõem duas equações para a estimativa dos limites superior e inferior para o período natural de edifícios de pórticos em concreto armado com base na altura em metros, apresentadas pelas equações Z e Y a seguir. Elas foram obtidas a partir da regressão não linear, com nível de confiança  $\alpha_U = 0,023$  e  $\alpha_L = 0,016$ , com base nos dados coletados mostrados na Figura 4.

$$T_U = 0,067H^{0,9} \quad (14)$$

$$T_L = 0,0466H^{0,9} \quad (15)$$

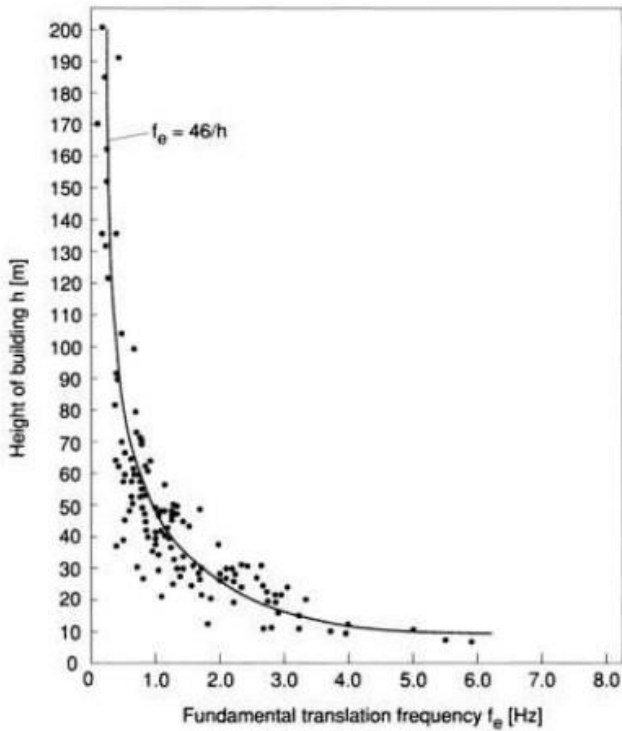


Figura 3 - Curva de valores para frequência natural medidos experimentalmente por Ellis (1980) (fonte: BACHMANN, 1997)

Onde:

$T_U$  - Limite superior para o período natural aproximado (s);

$T_L$  - Limite inferior para o período natural aproximado (s);

H – Altura em metros.

Os autores explicam que a equação (14) é adequada para estimar o período natural de forma conservadora, enquanto que a equação (15) para limitar o período calculado a partir da análise racional. Eles ainda destacam que o período  $T_U$  não deve ser maior que  $1,4T_L$ .

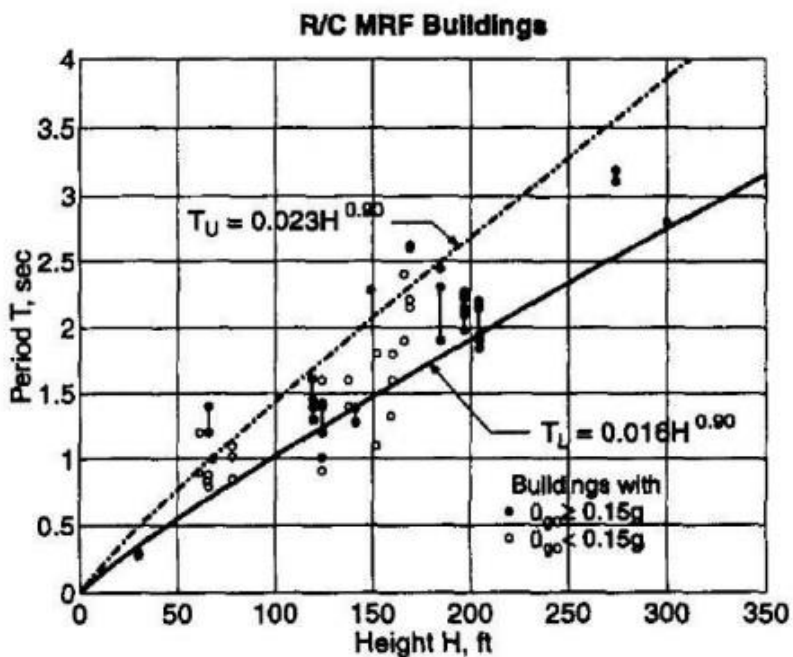


Figura 4 - Fórmulas recomendadas para período e limite superior para período fundamental para edifícios de pórticos de concreto armado (fonte: GOEL; CHOPRA; 1997)

A norma NBR6123/1988 também apresenta expressões aproximadas que permitem o cálculo da frequência fundamental  $f_1$  (Hz) para vários tipos de edificações usuais, como indicados na Tabela 3 mais adiante no texto. Como exemplo, para edifícios com estrutura aporticada de concreto sem cortinas têm-se a seguinte expressão:

$$T_1 = 0,05 + 0,015h \quad (16)$$

Onde:

$T_1$  – Período fundamental da edificação em segundos;

$h$  – Altura da edificação em metros.

## 2.5 Análise Modal

“Análise modal é o processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático representativo do comportamento dinâmico do sistema em estudo, a fim de se determinar os seus parâmetros modais (frequência naturais, modos de vibração e fatores de amortecimento modal)” (NÓBREGA, 2004). Estes parâmetros modais, são obtidos a partir do registro no tempo de sua excitação e resposta.

É comum utilizar o método dos elementos finitos para realizar este tipo de análise, já que este permite resultados satisfatórios. A análise deste tipo de problema passa pela determinação dos autovetores e autovalores, onde os autovetores são os modos de vibração e os autovalores o quadrado das frequências naturais.

Após feita a análise modal, é feita a análise da resposta, com o intuito de conhecer como a estrutura responde aos carregamentos dinâmicos nela atuantes.

## **2.6 Análise em Túnel de Vento**

A norma NBR6123 não se aplica a edificações que possuam formas, dimensões ou localização fora do comum. Nestes casos, recomenda-se estudos especiais para determinação das forças atuantes do vento e seus efeitos, como os feitos em túnel de vento.

Estes ensaios simulam o deslocamento do ar com intensidades variáveis para analisar o desempenho aerodinâmico de construções em escalas reduzidas. Especialmente em áreas urbanas, as características do vento podem ser influenciadas pelas edificações do entorno. Nestes casos utiliza-se os modelos vizinhança, onde os prédios vizinhos também são representados (LOTURCO ; 2010).

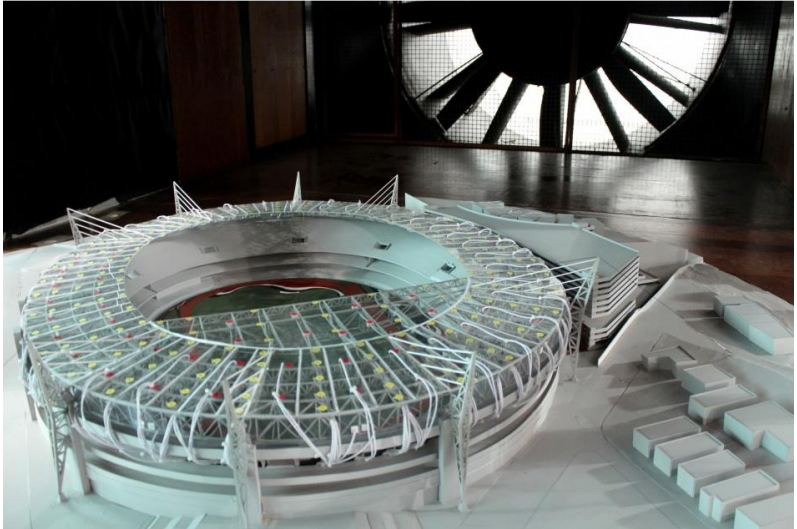
De acordo com Vanin (2011, apud BALENDRA, 1993), ensaios em túnel de vento são realizados para :

- a) determinar a pressão do vento nas faces externas das construções, para o estudo de revestimento de fachada ;
- b) avaliar os momentos de tombamento e forças de corte atuantes no edifício, para o estudo da estrutura ;
- c) analisar as mudanças que a edificação ocasiona no vento ao nível do solo, para estudo de conforto de pedestres e dispersão de poluentes ;
- d) para a obtenção de resultados que possibilitem uma análise numérica, com o objetivo de se conhecer os níveis de aceleração no edifício, para o estudo do conforto.

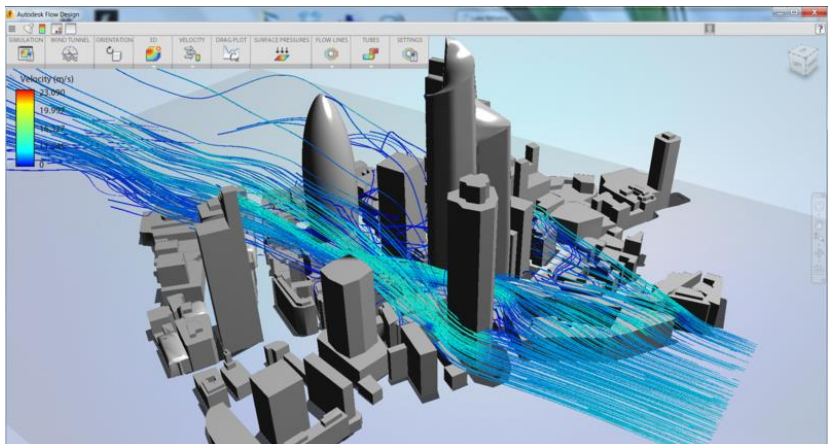
Com os resultados obtidos em túnel de vento, é possível projetar uma estrutura de forma mais econômica, segura e otimizada, já que se tem como resultado dos ensaios a carga real de vento (REISDORFER, 2007).

Atualmente há softwares computacionais que simulam virtualmente ensaios em túnel de vento. Entre eles, pode-se citar o AutoDesk Flow Design (Figura 6).





**Figura 5 - Modelo do estádio do Morumbi e sua vizinhança no túnel de vento - escala 1:200 (fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS)**



**Figura 6 - Análise a partir do programa Autodesk Flow Design (fonte: EICHENSEER, J. ; 2014)**

## **3 VENTO**

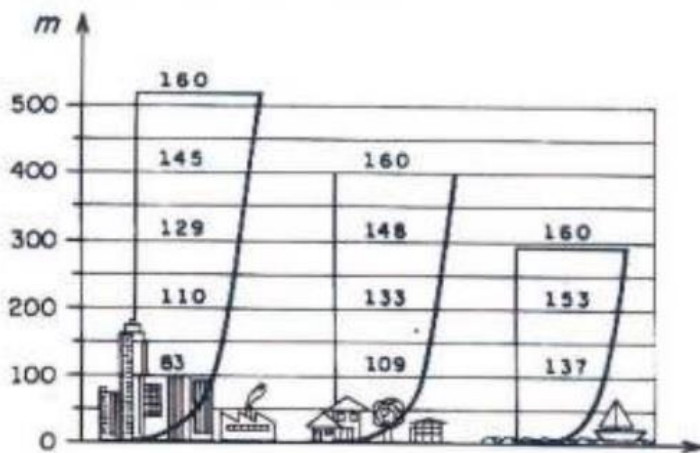
Neste capítulo, aborda-se conceitos básicos sobre o vento e como ele induz vibrações nas edificações. Por fim, apresenta-se o método para análise dinâmica simplificada.

### **3.1 Caracterização do vento**

O vento consiste no deslocamento de massas de ar, sendo que esse fenômeno é consequência do movimento de ar de um ponto no qual a pressão atmosférica é mais alta em direção a um ponto onde ela é mais baixa (FRANCISCO, 2016). Sendo os principais elementos que interferem na pressão atmosférica são a temperatura e a altitude.

Um aspecto importante do vento a ser considerado em projetos, é a variação de sua velocidade com a altura em relação ao solo. Esta variação ocorre devido a rugosidade do terreno. A Figura 7 demonstra perfis de velocidade média propostos para três tipos de terreno com rugosidades diferentes.

O vento é um fenômeno natural instável com o tempo, que apresenta flutuações aleatórias em torno de um valor médio de velocidades, conhecidas como rajadas ou turbulências, apresentando uma ocorrência sequencial de frequência e intensidade de curta duração. O acontecimento irregular das flutuações dificulta o seu estudo de forma determinística, fazendo com que o tratamento seja feito pela teoria da probabilidade e de médias estatísticas



**Figura 7 - Perfil de velocidade média (em km/h) proposto por Davenport (fonte: GONÇALVES et al; 2004; p. 12)**

O espectro de velocidades é dividido em duas regiões: a primeira com flutuações de períodos longos, superiores a uma hora, que resultam em alterações menores na velocidade média do vento. A segunda apresenta flutuações de velocidades de frequência elevada devido à turbulência, com períodos inferiores a uma hora, onde aparecem as rajadas do vento; as flutuações de maior importância situam-se no intervalo de 10 minutos e 1 segundo. A Figura 8 mostra através de um gráfico a variação da velocidade do vento ao longo do tempo. Pode-se observar as flutuações em torno da velocidade média. A Figura 9 apresenta a variação da velocidade do vento ao longo da altura  $z$  e do tempo.

O valor instantâneo é a soma do valor médio e das flutuações respectivas:

$$U_t(t) = U(\text{media}) + U(t) \quad (17)$$

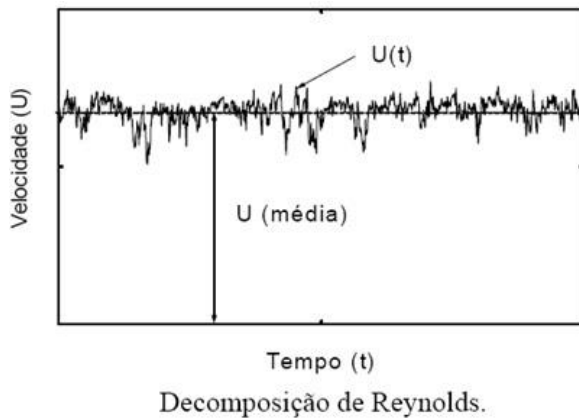


Figura 8 - Variação da velocidade do tempo ao longo do tempo

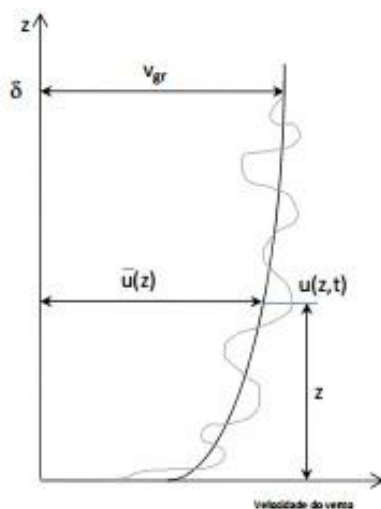


Figura 9 - Perfil da velocidade do vento no domínio do tempo (fonte; BACHMANN et al; 1995)

## **3.2 Efeitos dinâmicos do vento em edificações**

O vento provoca tanto solicitações estáticas, que tem origem nas pressões médias provocadas pelo vento, como dinâmicas, que podem ter origem inercial, elástica ou aerodinâmica (VANIN; 2011; p.20).

Em geral, as vibrações causadas pelo vento são originadas por uma ou mais das seguintes causas:

### **3.2.1 Desprendimento de vórtices**

Segundo Blesmann (1990), quando o número de Reynolds de um escoamento atinge um certo valor, ocorre o fenômeno de desprendimento alternado de vórtices, o qual apresenta frequência característica bem definida. São os chamados vórtices de Kármán, que provocam o aparecimento de forças periódicas, que aparecem alternadamente em ambos os lados do sólido (Figura 10).

Se a frequência de desprendimento de um par destes vórtices for igual a frequência natural da estrutura, movimentos transversais à direção do vento podem ser produzidos (NBR 6123, 1988).

Os efeitos sobre a estrutura ou elemento estrutural aumentam com a diminuição da turbulência do vento e do amortecimento estrutural (NBR 6123, 1988; p.59).

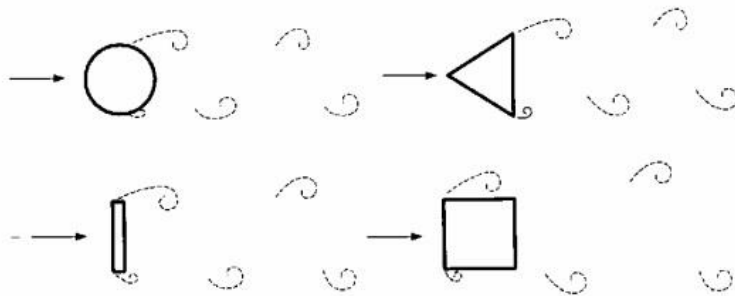


Figura 10 - Vórtices de Karman (fonte: BLESSMANN, 1998)

### 3.2.2 Efeitos de golpe

O efeito de golpe ocorre devido à turbulência existente na esteira de uma edificação situada a barlavento. Os vórtices desprendidos da edificação a barlavento irão solicitar a edificação de maneira sucessiva, podendo produzir oscilações cuja frequência será definida pela turbulência da esteira (GOLÇALVES et al; 2004; p. 99). A Figura 11 demonstra este efeito.

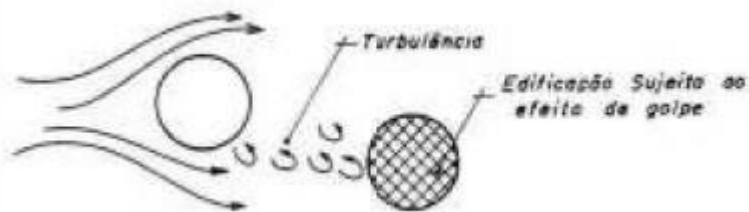


Figura 11 - Representação esquemática do Efeito de Golpe (fonte: GOLÇALVES et al; 2004)

(fonte:

### **3.2.3 Galope**

O efeito denominado galope, caracteriza-se por oscilações transversais à direção do vento e cuja amplitude aumenta com a velocidade do vento (GOLÇALVES et al; 2004; p.99). Estruturas esbeltas, leves e flexíveis, tais como pilares vazados e viadutos de grande altura são propensas a este fenômeno (NBR 6123, 1988).

### **3.2.4 Drapejamento**

Trata-se de efeito dinâmico que afeta estruturas com dois ou mais graus de liberdade que irão produzir um acoplamento de vibrações nestas direções (GOLÇALVES et al; 2004) . É um fenômeno típico de estruturas esbeltas com proporções semelhantes às de asa de avião, tal como um edifício muito alto e esbelto, de seção retangular não próxima do quadrado (NBR 6123, 1988; p. 59).

### **3.2.5 Energia contida na turbulência atmosférica**

Apesar das rajadas de vento constituírem um fenômeno aleatório, as características de admitância mecânica da estrutura podem fazer com que a energia cinética contida nas rajadas de vento origine uma oscilação considerável na edificação (NBR 6123, 1988). Este fenômeno é tratado no capítulo 9 da NBR 6123/1988, e é o que se verá a seguir.

### **3.3 Efeitos Dinâmicos devido à turbulência atmosférica conforme NBR6123/1988**

No vento natural, o módulo e a orientação da velocidade instantânea do ar apresentam flutuações em torno da velocidade média  $\bar{V}$ , designadas por rajadas (NBR 6123, 1988, p. 33). Se presumi que durante um intervalo de 10 minutos ou mais, a velocidade média mantém-se constante, ocasionado nas edificações efeitos puramente estáticos, intitulados como resposta média. Mas, em estruturas muito flexíveis, especialmente em edificações altas e esbeltas, as flutuações da velocidade podem induzir oscilações importantes na direção da velocidade média, designadas como resposta flutuante.

A influência da resposta flutuante é pequena em edificações com período fundamental  $T_1$  igual ou inferior a 1 segundo, já tendo seus efeitos considerados na determinação do intervalo de tempo adotado para o fator  $S_2$ . No entanto, edificações com período fundamental superior a 1 segundo, em particular aquelas fracamente amortecidas, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio (NBR 6123,1988).

Para a determinação da resposta dinâmica, a NBR6123/1988 apresenta dois métodos: o método simplificado e o método discreto. A seguir será exposto o método simplificado.

#### **3.3.1 Análise Dinâmica Simplificada**

Este modelo pode ser admitido quando a edificação tiver seção constante e distribuição ao menos aproximadamente uniforme de massa. Este método é aplicável a estruturas de altura inferior a 150 metros e apoiadas



exclusivamente na base, sendo considerada na resposta dinâmica destas unicamente a contribuição do modo fundamental (NBR 6123, 1988).

### 3.3.1.1 Velocidade de projeto $\overline{V}_p$

A velocidade de projeto  $\overline{V}_p$ , refere-se a velocidade média sobre 10 minutos a 10 metros de altura sobre o solo, em terreno de categoria II (NBR 6123, 1988). A velocidade de projeto é calculada a partir da seguinte expressão:

$$\overline{V}_p = 0,69V_0S_1S_3 \quad (18)$$

Sendo:

$\overline{V}_p$  – Velocidade de projeto (m/s);

0,69 – Fator de correção da velocidade em função do tempo de rajada de 3 segundos para 10 minutos;

$V_0$  – Velocidade básica do vento (m/s);

$S_1$  – Fator topográfico;

$S_3$  – Fator estatístico.

### 3.3.1.2 Velocidade básica do vento

O item 5.1 da NBR6123/1988 define a velocidade básica do vento  $V_0$ , como a velocidade de uma rajada de 3 segundos com um tempo de retorno de 50 anos, a 10 metros altura do terreno em campo aberto e plano. Admite-se que o vento básico possa soprar de qualquer direção. A

determinação da velocidade  $V_0$ , mostrada na Figura 5 a seguir, é feito a partir das isopletas da velocidade básica extraídas da NBR 6123/1988.

### 3.3.1.3 Fator topográfico

O item 5.2 da NBR6123/1988 define o valor do fator topográfico  $S_1$ , levando em consideração as variações da superfície do terreno. Para terrenos planos ou levemente acidentados, este fator tem valor 1,0. Já em vales profundos protegidos do vento, este fator tem valor 0,9. Para terrenos que não atendem esta classificação, o texto estabelece as expressões (19), (20) e (21) para obtenção destes valores. Entretanto, se a edificação estiver localizada em um ponto do topo do talude, em que a distância de sua localização até o início da declividade é quatro vezes menor do que a altura do talude, para determinar o valor do fator deve-se interporlar entre 1,0 e o valor obtido a partir das equações.

$$\theta \leq 3^\circ : S_1(z) = 1,0 \quad (19)$$

$$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ : S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \text{tg}(\theta - 3^\circ) \geq 1 \quad (20)$$

$$\theta \geq 45^\circ : S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1 \quad (21)$$

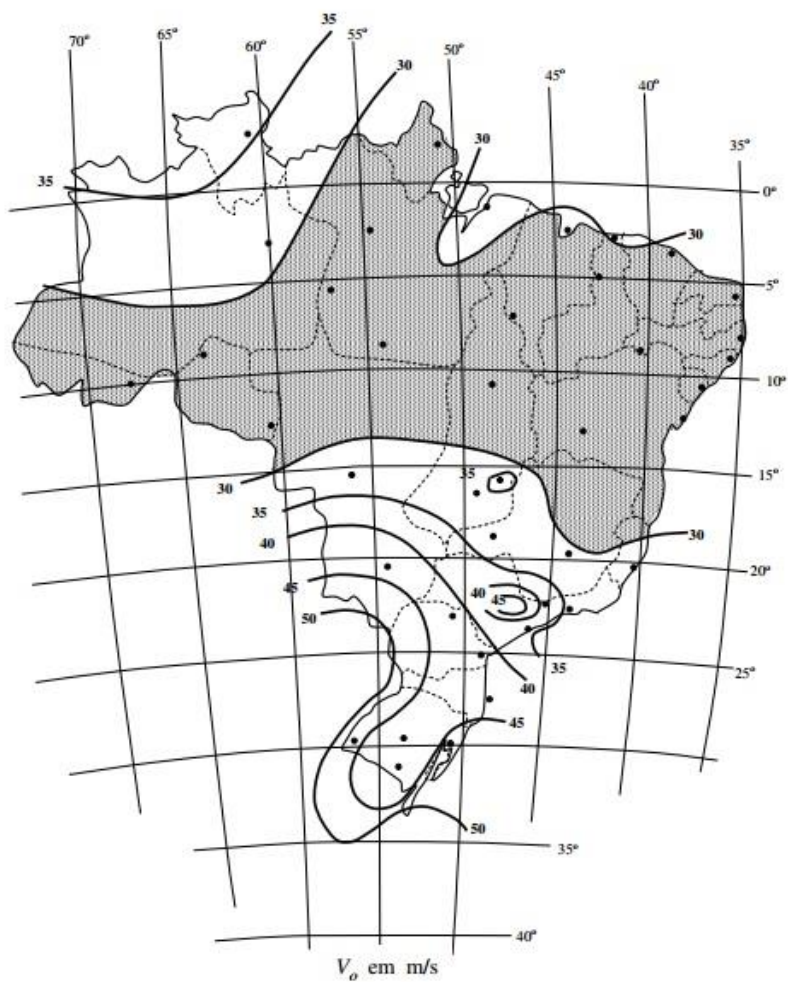


Figura 12 - Isopletas da velocidade básica  $V_0$  (m/s) (fonte: NBR 6123, 1988, p. 6)

Onde :

$z$  – Altura medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado (m) ;

$d$  – Diferença de nível entre a base e o topo do talude ou morro (m)

$\theta$  – Inclinação média do talude ou encosta do morro ( $^{\circ}$ ).

Para valores de inclinação do terreno entre  $3^{\circ}$  e  $6^{\circ}$  ou entre  $17^{\circ}$  e  $45^{\circ}$ , deve-se fazer uma interpolação linear para obtenção do valor do fator topográfico  $S_1$ .

### 3.3.1.4 Fator estatístico

O fator estatístico  $S_3$  é fundamentado em conceitos estatísticos, e leva em consideração o grau de segurança exigido e a vida útil da edificação. Na ausência de uma norma específica sobre segurança da edificação em questão, os valores mínimos do fator  $S_3$  são indicados na Tabela 1 (NBR6123,1988).

O fator estatístico  $S_3$  também pode ser obtido pela Tabela 2 , onde  $P_m$  é o nível de probabilidade de ser excedida a velocidade vento em um período de  $m$  anos, cuja expressão matemática é :

$$S_3 = 0,54 \left[ -\frac{\ln(1 - P_m)}{m} \right]^{-0,157} \quad (22)$$

**Tabela 1 - Valores mínimos do fator estatístico  $S_3$**

| Grupo | Descrição   | $S_3$ |
|-------|---|-------|
| 1     | Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quarteis 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, p. 10)

**Tabela 2 - Fator Estatístico  $S_3$**

| m   | Valores de $S_3$ para $P_m$ |      |      |      |      |      |
|-----|-----------------------------|------|------|------|------|------|
|     | 0,10                        | 0,20 | 0,50 | 0,63 | 0,75 | 0,90 |
| 2   | 0,88                        | 0,76 | 0,64 | 0,60 | 0,57 | 0,53 |
| 10  | 1,10                        | 0,98 | 0,82 | 0,78 | 0,74 | 0,68 |
| 25  | 1,27                        | 1,13 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,79 |
| 50  | 1,42                        | ,26  | 1,06 | 1,00 | 0,95 | 0,88 |
| 100 | 1,58                        | 1,41 | 1,18 | 1,11 | 1,06 | 0,98 |
| 200 | 1,77                        | 1,57 | 1,31 | 1,24 | 1,18 | 1,09 |

(fonte NBR 6123, 1988, p. 45)

### 3.3.1.5 Coeficiente de arrasto

O coeficiente de arrasto  $C_a$  é apresentado no item 6.3 da NBR6123/1988. Para edificações paralelepípedicas, os coeficientes de

arrasto  $C_a$  são definidos através da Figura 13 para ventos de baixa turbulência, ou pela Figura 14 para ventos de alta turbulência. Os coeficientes de arrasto são definidos em função das relações  $h/l_1$  e  $l_1/l_2$  (NBR 6123, 1988).

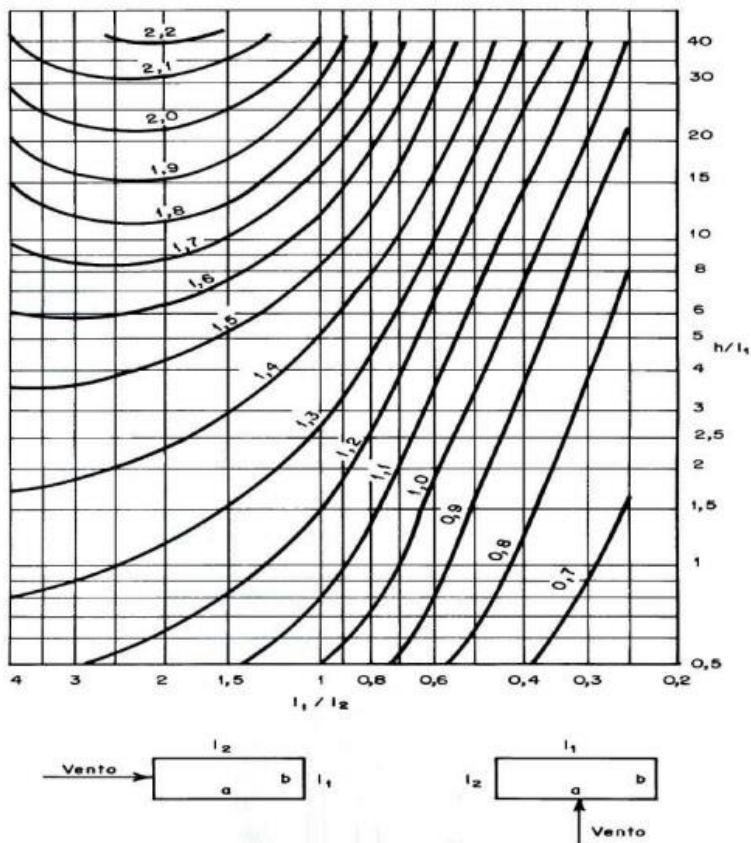


Figura 13 - coeficiente de arrasto,  $C_a$ , para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência (fonte: NBR 6123, 1988, p. 20)

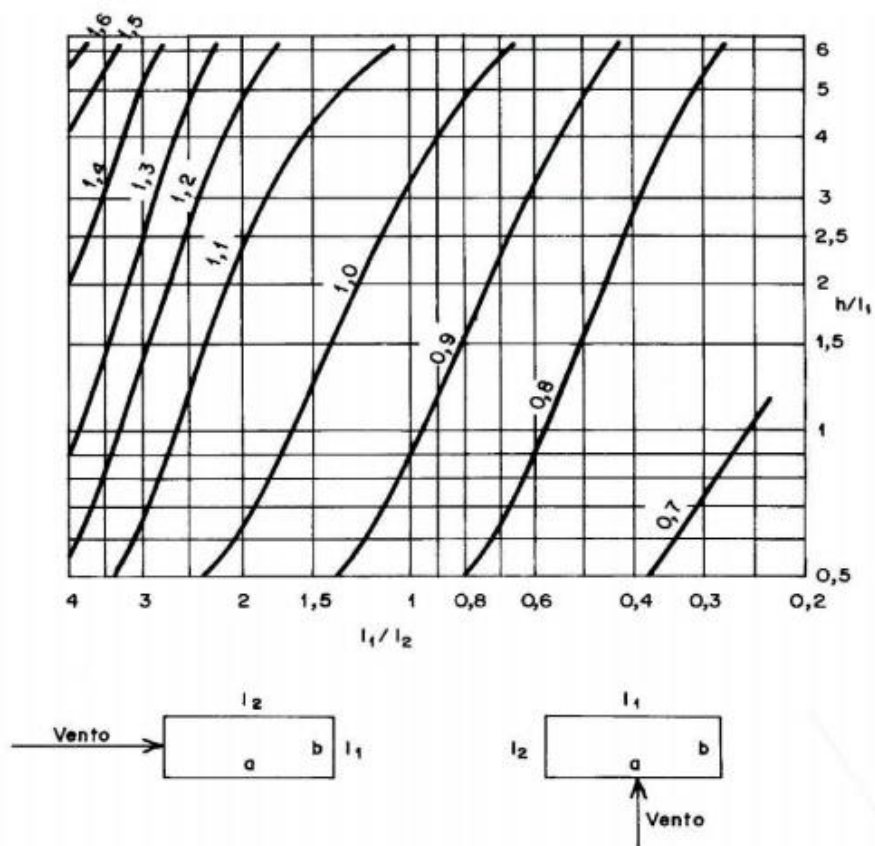


Figura 14 - Coeficiente de arrasto,  $C_d$ , para edificações paralelepédicas em vento de alta turbulência (fonte: NBR 6123, 1988, p. 24)

### 3.3.1.6 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ESTRUTURA

Admite-se que o primeiro modo de vibração pode ser representado com precisão pela equação (NBR 6123, 1988, p. 34):

$$x = \left(\frac{z}{h}\right)^\gamma \quad (23)$$

Onde:

x – Primeiro modo de vibração;

z – Cota acima do terreno;

h – Altura da edificação;

$\gamma$  – Parâmetro em função do tipo de edificação (Tabela 3).

### 3.3.1.7 CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA NA DIREÇÃO DO VENTO

Para o cálculo da resposta dinâmica, o modelo simplificado considera a pressão dinâmica como função da altura z, sendo calculada pela seguinte equação:

$$q(z) = \bar{q}_o b^2 \left[ \left(\frac{z}{z_r}\right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r}\right)^p \left(\frac{z}{h}\right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (24)$$

Em que o primeiro termo dentro dos colchetes corresponde a resposta média e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante, sendo:



$$\bar{q}_0 = 0,613\bar{V}_p^2 \quad (25)$$

Onde:

$q(z)$  – Pressão dinâmica em função da altura (N/m<sup>2</sup>);

$\bar{V}_p$  – Velocidade de projeto do vento (m/s);

$\bar{q}_0$  – Resposta média (N/m<sup>2</sup>);

$b$  – Coeficiente em função da categoria do terreno;

$z$  – Altura do elemento acima do terreno (m);

$z_r$  – Altura de referência 10 metros;

$h$  - Altura da edificação (m);

$p$  – Expoente da lei potencial em função da categoria do terreno;

$\gamma$  – Parâmetro de forma;

$\xi$  – Coeficiente de amplificação dinâmica ;

A razão de amortecimento crítico  $\zeta$  e o parâmetro  $\gamma$  são indicados na Tabela 4. O coeficiente de amplificação dinâmica  $\xi$ , dependente da razão de amortecimento crítico  $\zeta$ , das dimensões da edificação e da frequência  $f$  (através da relação adimensional  $\bar{V}_p / fL$ ), e é determinado através dos gráficos das figuras 14 a 18 da NBR6123/1988 apresentados no ANEXO 1. O coeficiente  $b$  e o expoente  $p$  dependem da categoria de rugosidade do terreno e são apontados na Tabela 4 abaixo.

**Tabela 3 - Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos**

| <b>Tipo de edificação</b>   | <b><math>\gamma</math></b> | <b><math>\zeta</math></b> | <b><math>T_1 = 1 / f_1</math></b> |
|---|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Edifícios com estrutura aperturada de concreto, sem cortinas                            | 1,2                        | 0,020                     | 0,05 +<br>0,015h (h em metros)    |
| Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais | 1,6                        | 0,015                     | 0,05 +<br>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, p. 35)

**Tabela 4 - Expoente p e parâmetro b**

| <b>Categoria de rugosidade</b> | <b>I</b> | <b>II</b> | <b>III</b> | <b>IV</b> | <b>V</b> |
|--------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|----------|
| 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, p. 36)

Por fim, a força estática equivalente  $F(z)$  que engloba as ações estáticas e dinâmicas por unidade de altura é calculada através da expressão (26) (NBR 6123, 1988):

$$F(z) = q(z)I_1C_a \quad (26)$$

## 4 CRITÉRIOS DE CONFORTO E ACELERAÇÃO

O projeto de estruturas demanda um sistema de engenharia que conduza de maneira eficiente e eficaz, uma previsibilidade sobre os carregamentos que uma estrutura pode estar sujeita durante sua vida útil. Desta forma, uma estrutura deve ser projetada para atender a algumas finalidades funcionais sem considerar o elemento humano, no entanto este elemento torna-se um componente crítico em construções de grande altura. Com o aumento da altura, frequentemente acompanha o aumento da flexibilidade e baixo amortecimento, as estruturas se tornam cada vez mais suscetíveis às ações do vento (KAREEM; 1999).

As vibrações podem afetar as pessoas de muitas formas, gerando desconforto, problemas de saúde, diminuição da capacidade de concentração e eficiência no trabalho e enjoo (CUNHA; 2001, p.1.). Entretanto, é altamente improvável que estas vibrações possam ocasionar danos físicos a ocupantes de edifícios (PARSONS; 1985).

Na prática não há um consenso entre as vibrações em edifícios e o nível de desconforto que elas causam as pessoas, confirmando que esta tarefa é complexa e tem caráter altamente subjetivo. Bachmann e Ammann (1987) apresentam parâmetros que influenciam na sensibilidade humana às vibrações, como:

- Posição da pessoa. Considerando o sistema de coordenadas apresentado na Figura 15, a ISO2631 indica que a faixa de frequência para sensibilidade dos seres humanos à vibração é de 4 a 8 Hz para vibrações longitudinais (eixo z), e de 1 a 2 Hz para vibrações transversais (eixos x e y). As vibrações ao longo do eixo z devem ser consideradas em projetos de escritórios ou locais de trabalhos. Em projetos de hotéis e residências, locais onde o conforto para descanso deve ser considerado, leva-se em conta as vibrações nos três eixos;

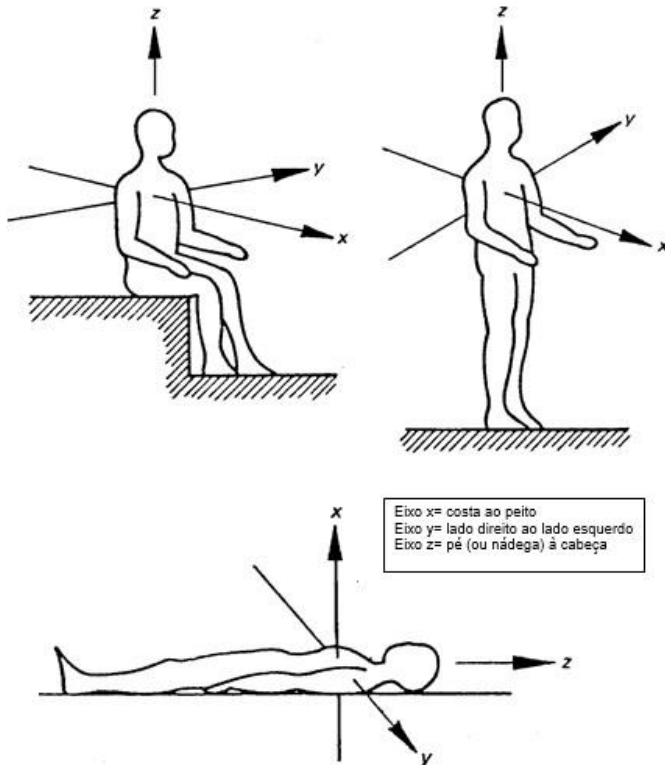
- Características da fonte de excitação como amplitude da aceleração, duração do efeito, frequência da vibração, amplitude da velocidade, amplitude do deslocamento e duração dos efeitos da vibração;
- Idade;
- Sexo;
- Nível de expectativa. Quanto maior a expectativa das vibrações e conhecimento sobre sua origem, menos surpreendente é a vibração.
- Atividade da pessoa afetada. O nível de percepção varia com a natureza da atividade que a pessoa está exercendo, como correndo, caminhando, descansando ou jantando.

Na prática, o projetista deseja saber em que nível de vibração os ocupantes serão incomodados e por isso irão se queixar (PARSONS; 1985). Uma abordagem prática de avaliação da sensibilidade humana as vibrações de edifícios, é assumir que os ocupantes não serão afetados pelas vibrações que eles não podem detectar ou sentir.

## 4.1 NBR 6123/1988

O item 9.5 da NBR6123/1988 aborda a amplitude máxima da aceleração induzida pelas forças flutuantes do vento. Estas forças flutuantes podem causar desconforto aos usuários. A determinação desta amplitude máxima da aceleração pode ser calculada pela expressão (27):

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j^2 \quad (27)$$



**Figura 15 - Direção do sistema de coordenadas para vibração mecânica em seres humanos (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978)**

Onde:

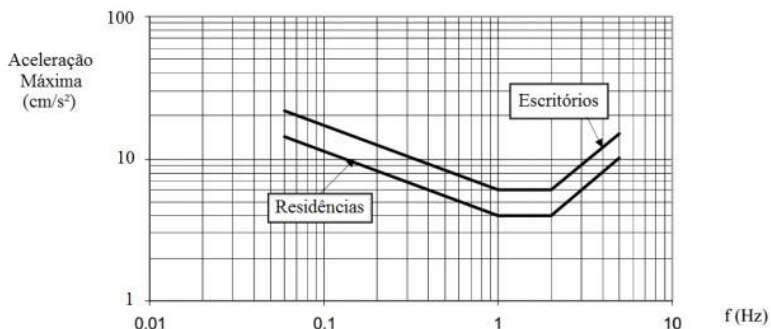
$f_j$  – Frequência do modo de vibração  $j$ ;

$u_j$  – Deslocamento no nível  $z$  devido a resposta flutuante no modo  $j$ .

Como indicação geral, a amplitude máxima não deve exceder  $0,1 \text{ m/s}^2$ . A verificação do conforto deve ser efetuada para velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade do projeto estrutural, a ser definido pelo projetista. Considera-se admissível que a amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos (NBR 6123, 1988, p.45).

## **4.2 ISO 10137/2007**

A norma ISO 10137/2007 trata do desempenho de edifícios e passarelas em função da frequência das vibrações (de 0,06 a 5,0 Hz). O anexo C apresenta os critérios de vibração para a ocupação humana. Ela afirma que quando o desempenho é avaliado, e a variável a se medir é a aceleração, esta depende da frequência do movimento. O anexo D, “Guidance for human response to wind-induced motions in buildings”, apresenta um gráfico com limites de conforto de vibrações causadas pelo vento para uso residencial e comercial. A análise das curvas é especificada para acelerações limites e primeira frequência natural, para um vento de recorrência de 1 ano. As curvas foram desenvolvidas de modo empírico a partir de dados de edificações existentes.



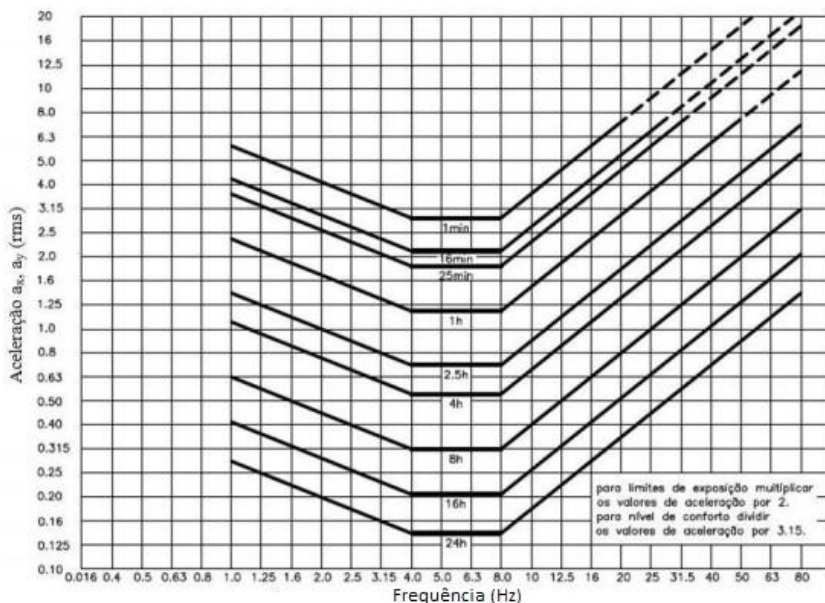
**Figura 16 - Curvas para avaliação do conforto para vibrações causadas pelo vento ISO 10137/2007 (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2007)**

### 4.3 ISO 2631-1 e ISO 2631-2

A norma ISO 2631/1 propõe um guia sobre os níveis aceitáveis de vibração que um corpo humano pode ser submetido. Ela apresenta curvas limites de exposição recomendados em função para os casos de aceleração longitudinal (com a pessoa em posição vertical) e transversal (com a pessoa na posição horizontal), indicando diferentes tempos de exposição. A norma ISO 2631 define um sistema de coordenadas para as vibrações mecânicas em seres humanos com origem próxima ao coração, conforme Figura 15.

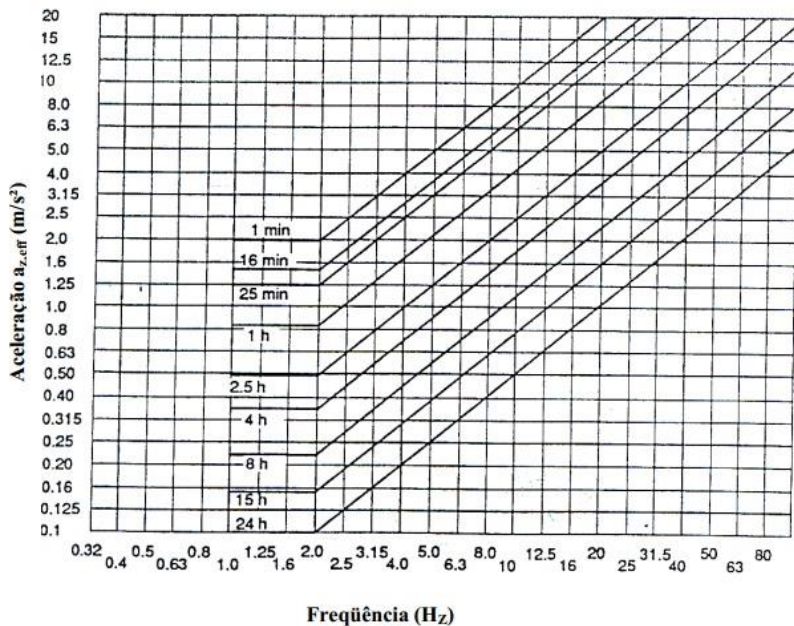
A norma ISO 2631/1 utiliza como base para avaliação três critérios humanos, sendo eles o nível de eficiência reduzido (fadiga), o limite de exposição e o nível de conforto reduzido. A Figura 17 apresenta o gráfico para limite de aceleração longitudinal  $a_z$  no critério de eficiência reduzida, enquanto a Figura 18 apresenta o limite de acelerações transversais para o mesmo critério. Para se obter a aceleração de pico para o limite de conforto reduzido deve-se dividir a aceleração por 3,15,

enquanto para o limite de exposição multiplicar a aceleração por 2, já que as acelerações obtidas pelos gráficos são em rms.



**Figura 17 - Limite de aceleração longitudinal ( $a_z$ ) como função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga) (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978)**





**Figura 18 - Limite de aceleração transversal ( $a_x$  e  $a_y$ ) como função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga) (fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION, 1978)**

Enquanto a ISSO 2631/1 considera o tempo de exposição e apresenta três níveis de tolerância as vibrações, a ISO2631/2 leva em conta apenas a fronteira de percepção humana as vibrações, por considerar esses limites satisfatórios ao desconforto humano quando excedidos. Dessa forma percebe-se que esta norma é menos exigente que a primeira. As acelerações obtidas estão em valor rms.

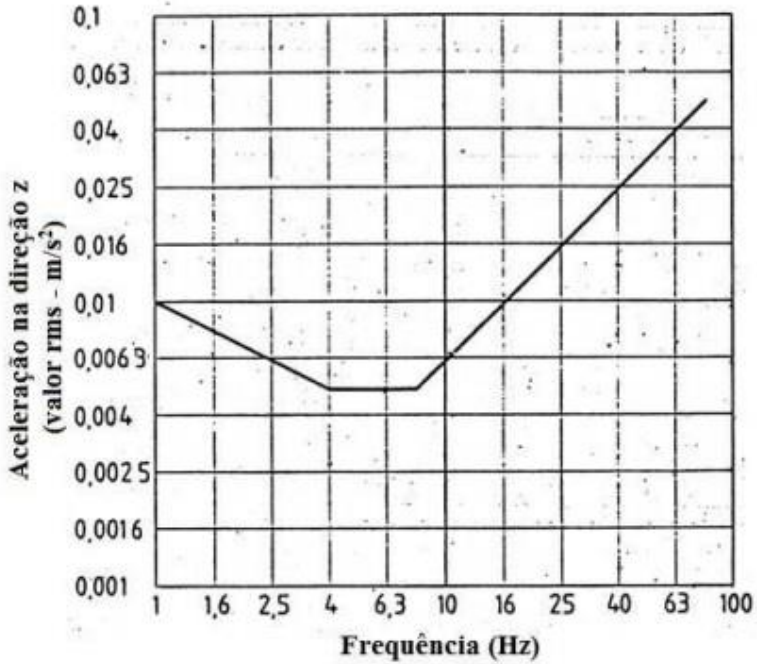


Figura 19 – Curva de aceleração na direção z da percepção do ser humano (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978)

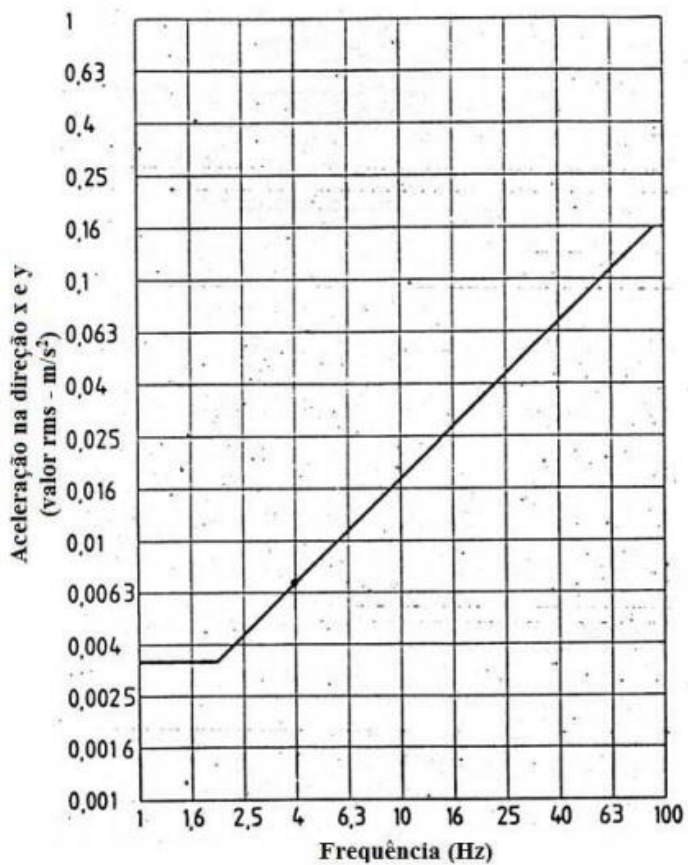


Figura 20 - Curva de aceleração x e y , da percepção do ser humano (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1978)

## 4.4 Critério de avaliação segundo Bachmann e Hirsch

Bachmann e Hirsch (1995) apresentam a Figura 21 para avaliação da percepção humana a vibrações de baixa frequência induzidas pelo vento em edifícios. Os termos são dados em valores limites de acelerações em função da frequência. A Tabela 5 apresenta os valores limites de aceleração.

**Tabela 5 - Sensibilidade humana a vibrações de edificações induzidas pelo vento**

| Percepção      | Aceleração Limite     |
|----------------|-----------------------|
| Imperceptível  | $a < 0,005g$          |
| Perceptível    | $0,005g < a < 0,015g$ |
| Incômodo       | $0,015g < a < 0,05g$  |
| Muito incômodo | $0,05g < a < 0,15g$   |
| Intolerável    | $a > 0,15g$           |

Fonte (BACHMANN ; HIRSCH ; 1995, p. 77)

## 4.5 Critério de aceleração de pico segundo Melbourne

O critério de Melbourne (1986) para avaliação do conforto, se baseia em uma curva limite para aceleração dependente da frequência natural da edificação, do período de retorno e do máximo período de tempo de incidência. Esta curva, é dada pela equação (28).

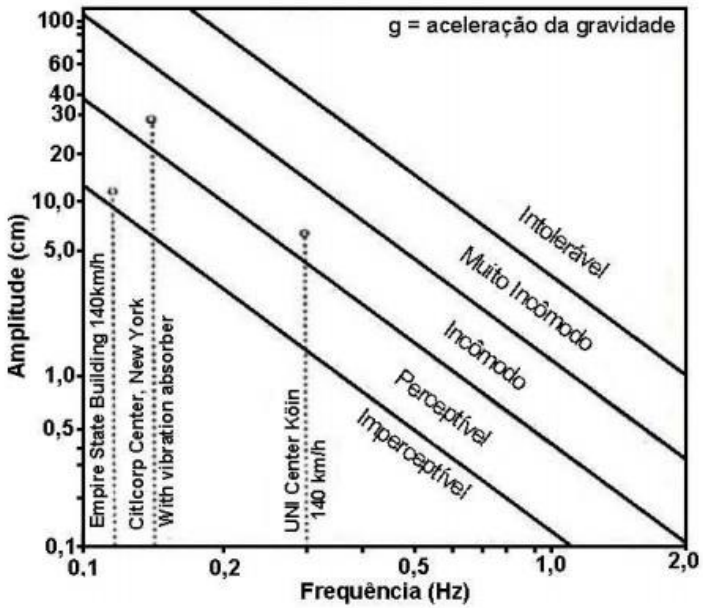


Figura 21 - Percepção humana a vibrações de edifícios devido ao vento (fonte: BACHMANN; HIRSCH; 1995, p. 77)

$$\hat{x} = \sqrt{2 \ln(n_0 T)} \times \left( 0,68 + \frac{\ln(R)}{5} \right) \times \exp[-3,65 - 0,41 \ln(n_0)] \quad (28)$$

Onde :

$\hat{x}$  – Aceleração de pico ( $m/s^2$ ) ;

$n_0$  – Frequência natural da edificação (Hz) ;

R – Tempo de retorno em anos ;

T – Máximo período de tempo de incidência.

## **5 ESTUDOS DE CASO**

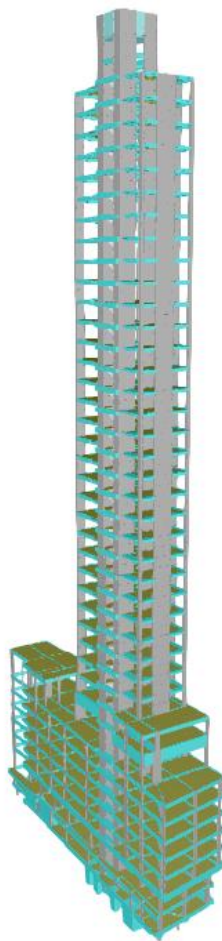
Com o intuito de aprofundar o estudo do conforto humano em edificações altas, busca-se neste capítulo fazer um estudo de caso para dois edifícios residenciais em concreto armado com mais de 100 metros de altura.

### **5.1 Edifício 1**

#### **5.1.1 Características do Edifício**

O edifício 1 possui 42 andares com 126,80 metros de altura, sendo composto por um pavimento subsolo, um pavimento térreo, 5 pavimentos garagem, 4 pavimentos de área de lazer, um pavimento tipo diferenciado, 27 pavimentos tipo, um pavimento cobertura, um pavimento casa de máquinas, um pavimento fundo da caixa da água e outro pavimento tampa da caixa da água.

A edificação possui seção retangular de 20,3 x 10,6 metros de lados, é localizada em terreno de categoria V, e é uma estrutura de concreto, em que as forças horizontais são resistidas exclusivamente por pórticos.



**Figura 22 - Imagem 3D da estrutura do edifício 1 gerada a partir do programa de cálculo estrutural Eberick**

## 5.1.2 Cálculo de acelerações máximas para verificação de conforto

Para a verificação do conforto, será calculado a aceleração do edifício através do método simplificado apresentado pela NBR6123/1988. Para isto, será determinada a ação do vento na direção da velocidade média.

No caso de edificações destinadas à ocupação humana, as oscilações induzidas pelas forças flutuantes podem provocar desconforto nos ocupantes. Como indicação geral, a aceleração máxima não deve exceder  $0,1 \text{ m/s}^2$ .

A verificação do conforto deve ser efetuada para velocidades do vento com maior probabilidade de ocorrência que a velocidade do projeto estrutural, a ser definido pelo projetista. Considera-se admissível que a amplitude máxima de aceleração seja excedida, em média, uma vez a cada dez anos.

### Velocidade de projeto

A velocidade de projeto corresponde à velocidade média sobre 10 minutos a 10 metros de altura sobre o solo, em terreno de categoria II, e é determinada a partir da expressão (18) apresentada anteriormente :

$$\overline{V}_P = 0,69V_0S_1S_3 \quad (18)$$

Sendo :



$V_0 = 42,0$  m/s. Velocidade básica do vento no local da edificação obtido a partir do mapa das isopletras;

$S_1 = 1,0$ . Fator topográfico, correspondente a terreno plano;

$S_3 = 0,78$ . Neste caso o fator estatístico será igual a 0,78 para transformar a velocidade básica do vento  $V_0$  para um tempo de recorrência de  $T_r = 10$  anos, conforme a Tabela 2.

Portanto:

$$V_p = 22,604 \text{ m/s}$$

### Cálculo da resposta dinâmica na direção do vento

A variação da pressão dinâmica com a altura é expressa pela equação (24).

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[ \left( \frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left( \frac{h}{z_r} \right)^p \left( \frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (24)$$

Onde o primeiro termo dos colchetes corresponde a média e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante, sendo :

$$\begin{aligned} \bar{q}_0 &= 0,613 \bar{V}_p^2 & (25) \\ \bar{q}_0 &= 313,218 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

Os coeficientes b e p são dependentes da categoria de rugosidade do terreno e são obtidos a partir da Tabela 4. Pode-se classificar a rugosidade

do terreno como categoria V (terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados). Sendo assim :

$$b = 0,50 ;$$
$$p = 0,31.$$

O coeficiente  $\gamma$  e  $\zeta$  são obtidos a partir da Tabela 3, e são função do tipo de edificação. Sabendo que o edifício em estudo é uma estrutura aporticada de concreto sem cortinas, têm-se que os valores de  $\gamma$  e  $\zeta$  são:

$$\gamma = 1,2.$$
$$\zeta = 0,02$$

O período  $T_1$  da edificação pode ser determinado a partir da expressão apresentada na Tabela 3, portanto:

$$T_1 = 0,05 + 0,015h$$

$$T_1 = 1,952$$

Como a frequência é o inverso do período,  $f_1$  é:

$$T_1 = 1 / f_1$$

$$f_1 = 0,5123$$

A determinação do coeficiente de amplificação dinâmica  $\xi$ , é função das dimensões da edificação, da razão de amortecimento crítico  $\zeta$ , da frequência  $f$  (através da relação adimensional  $\overline{V}_p / fL$ ), e para terrenos de categoria de rugosidade V, é determinado a partir da interpolação dos gráficos da figura 18 da NBR 6123/1988. Desta forma :

$$L = 1800;$$

$$\overline{V}_p / fL = 22,604 / (0,5123 \times 1800) = 0,02451 ;$$

$$l_1/h = 20,3 / 126,8 = 0,160095 ;$$

Assim, têm-se que :

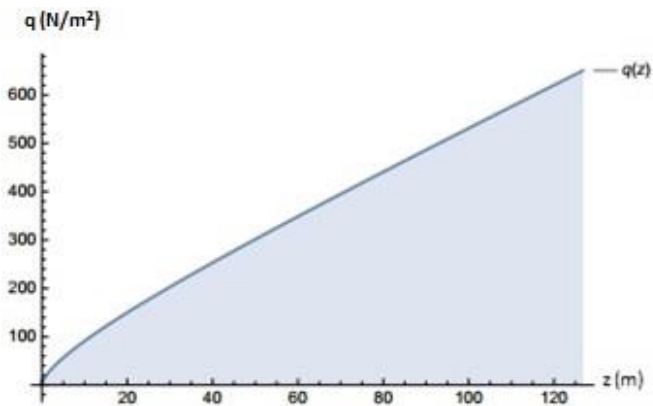
$$\xi = 1,17;$$

Enfim, calcula-se a pressão dinâmica  $q(z)$  através da equação (19) no topo do edifício:

$$z_r = 10 \text{ m (altura de referência)}$$

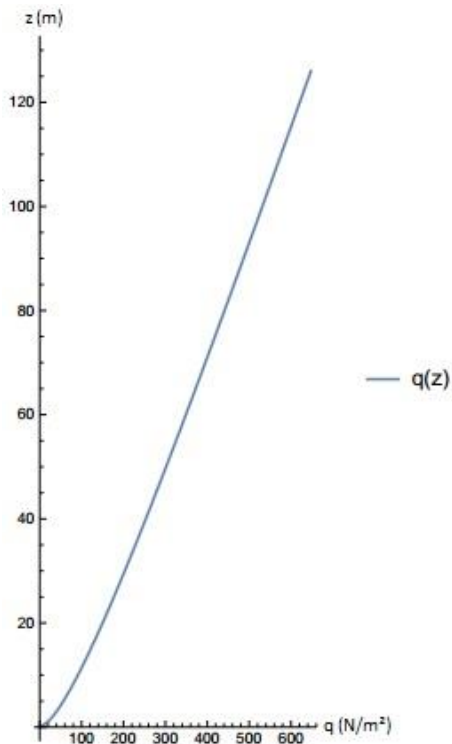
$$q(z) = 650,936 \text{ N/m}^2$$

A Figura 23 mostra o aumento da pressão dinâmica ao longo da altura :



**Figura 23 - Variação da pressão dinâmica  $q(z)$  com a altura  $h$  (fonte: do autor)**

Afim de se facilitar a visualização da variação da pressão dinâmica  $q(z)$  com a altura, a Figura 24 apresenta como eixo da ordenadas a altura  $z$  (m), e o eixo das abscissas a pressão dinâmica  $q(z)$ .



**Figura 24 - Variação da pressão dinâmica  $q(z)$  com a altura  $z$  (fonte: do autor)**

Força equivalente ao longo da altura do edifício

A força equivalente ao longo da altura pode ser calculada a partir da expressão (26) :

$$F(z) = q(z)I_1C_a \tag{26}$$

O coeficiente de arrasto  $C_a$  é obtido a partir da Figura 13, ou, para os raros casos de vento de alta turbulência através no gráfico da Figura 14, sendo

seu valor considerado invariável com a altura  $z$  e em função das relações  $h/l_1$  e  $l_1/l_2$ . Sabendo-se que neste caso o vento é de alta turbulência, usou-se a Figura 14. Considerou-se o vento incidindo perpendicularmente no maior lado da edificação. Assim:

$$h/l_1 = 126,8/20,3 = 6,246$$

$$l_1/l_2 = 20,3/10,6 = 1,915$$

Desta forma, encontra-se de maneira aproximada um coeficiente de arrasto  $C_a$  com valor de 1,24.

A Figura 25 apresenta a variação da força estática equivalente em função da altura.

### Deslocamento da edificação

Para o cálculo da aceleração, é necessário conhecer o deslocamento horizontal  $u_j$  no nível  $z$  devido a resposta flutuante no modo  $j$ . A Figura 26 apresenta a forma deformada estrutura para um vento com tempo de retorno de 10 anos.

O valor para o deslocamento horizontal foi obtido a partir de uma análise por pórtico espacial no programa AltoQi Eberick V10. Devido à complexidade que envolve a construção de modelos computacionais de estruturas, o modelo computacional do edifício estudado neste caso foi elaborado pelo professor orientador do trabalho.

Apesar do edifício possuir 126,80 metros de altura, considerou-se a altura para esta análise de 115,00 metros, correspondente ao 38º pavimento, já que este é o ponto mais alto habitável da edificação.

Desta forma, para uma altura de 115,00 metros o deslocamento correspondente é de  $u = 0,122$  metros

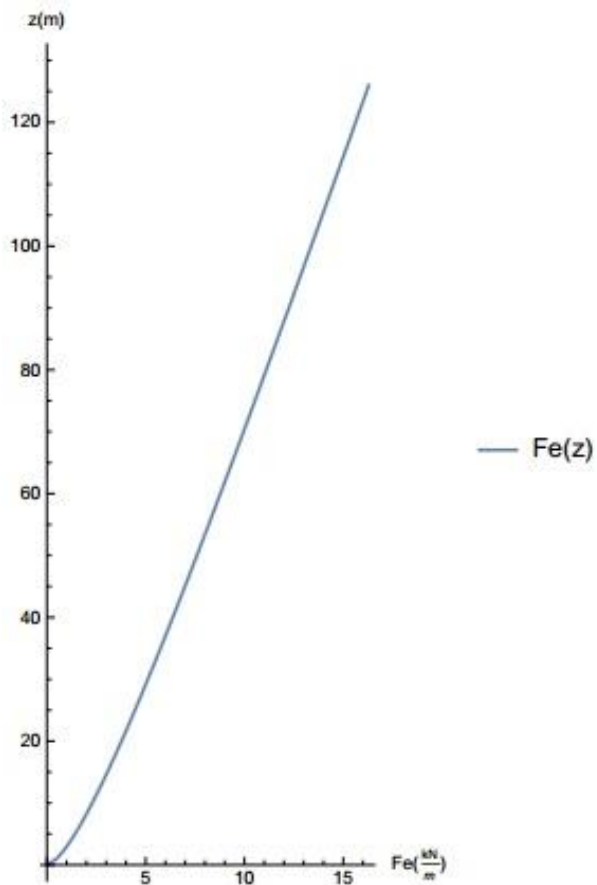
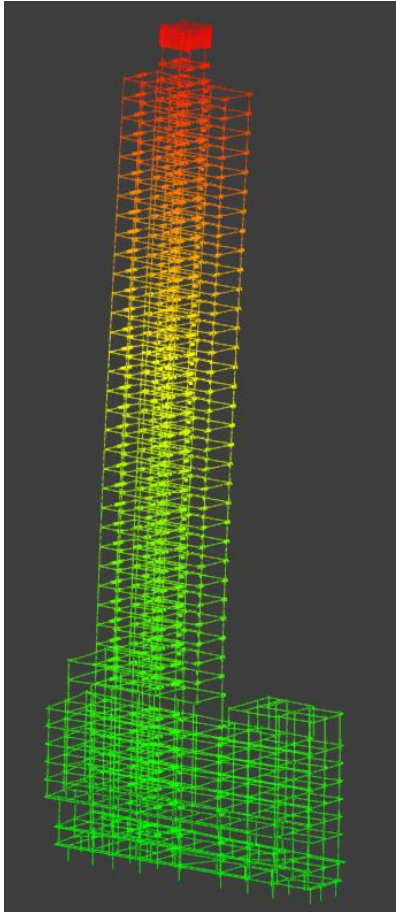


Figura 25 - Variação da força estática equivalente em função da altura  $z$  (fonte: do autor)



**Figura 26 - Estrutura deformada da estrutura do edifício 1 para um vento de  $T_r = 10$  anos**

### Cálculo da Aceleração

O cálculo da aceleração para avaliação do conforto é feito pela expressão (27).

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j^2 \quad (27)$$

A fim de comparação, foi calculado a aceleração do edifício, usando-se diferentes fórmulas simplificadas de determinação da frequência natural de edifícios, vistas anteriormente. Para facilitar a visualização dos resultados, criou-se a Tabela 6 para comparação dos resultados:

**Tabela 6 - Quadro comparativo entre as acelerações para o edifício 1**

|                  | Frequência<br>(Hz) | Deslocamento<br>$u_j$ (m) | Aceleração<br>( $m/s^2$ ) |
|------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| NBR<br>6123/1988 | 0,51               | 0,122                     | 0,154                     |
| BACHMANN         | 0,36               |                           | 0,077                     |

É possível observar que a aceleração calculada utilizando a frequência fundamental calculada através da fórmula da NBR6123/1988 é maior que aquela obtida utilizando a frequência obtida pela fórmula de Bachmann.

### Avaliação do conforto

Por fim, pode-se avaliar o conforto a partir das acelerações obtidas, com os valores máximos encontrados na literatura e em normas. Desta forma, compara-se na sequência os valores de aceleração obtidos a partir das frequências naturais encontradas, para cada um dos critérios de conforto apresentados no texto anteriormente.



1) Critério de conforto da NBR6123/1988

|                     | Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) | Critério de conforto |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|
|                     |                                | NBR6123/1988         |
| Frequência NBR      | 0,154                          | NÃO ATENDE           |
| Frequência BACHMANN | 0,077                          | ATENDE               |

Como visto anteriormente, a norma NBR6123/1988 indica que deve haver uma aceleração máxima de 0,10 m/s<sup>2</sup>. Desta forma, se considerado a frequência fundamental indica pela NBR6123, o edifício não atende ao critério de conforto. Entretanto, se utilizada a equação de Bachmann, o edifício atende a exigência da norma.

2) Critério de conforto segundo Bachmann e Hirsch

|                     | Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) | Critério de conforto |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|
|                     |                                | Bachmann & Hirsch    |
| Frequência NBR      | 0,154                          | Incômodo             |
| Frequência BACHMANN | 0,077                          | Perceptível          |

Neste critério de avaliação, quando calculada a aceleração com a frequência obtida a partir da norma NBR6123, a avaliação do conforto fica ligeiramente acima da separação entre a classificação incômodo e perceptível. Quando utilizada a frequência obtida a partir da equação de Bachmann, a avaliação é de perceptível, ou seja, usuários podem notá-las, mas as acelerações não causam desconforto.

Por fim, vale ressaltar que não foram utilizadas as recomendações das ISO2631, pois estas normas apresentam seus limites em aceleração rms,

ao passo que neste estudo foram investigadas as acelerações de pico. Da mesma forma, não foram comparados os limites de aceleração da norma ISO10137, já que esta apresenta seus valores para um vento com tempo de recorrência de 1 ano, enquanto que os valores de aceleração calculados neste trabalho foram para um vento com tempo de recorrência de 10 anos.

## **5.2 Edifício 2**

### **5.2.1 Características do Edifício**

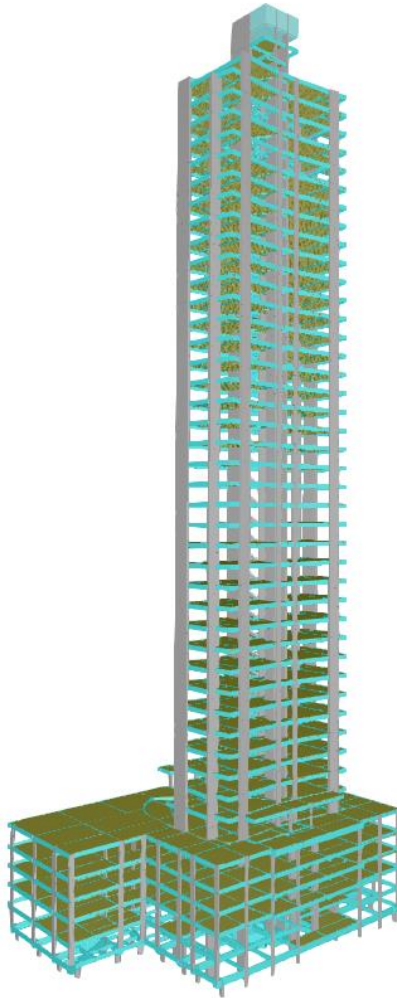
O edifício 2 tem 143,6 metros de altura, com seção retangular de 26,30 x 12,7 metros de lado, e é localizado em terreno de categoria V. Ele é uma estrutura de concreto armado, na qual as forças horizontais são resistidas exclusivamente por pórticos.

### **5.2.2 Cálculo de acelerações máximas para verificação de conforto**

Para a verificação do conforto deste edifício, será adotado o mesmo procedimento utilizado para verificação do edifício 1. A fim de não se repetir método, será apresentado os resultados de maneira mais direta.

#### Velocidade de projeto

A velocidade projeto é calculada pela equação (18):



**Figura 27- Imagem 3D da estrutura do edifício 2 gerada a partir do programa de cálculo estrutural Eberick**

$$\bar{V}_p = 0,69V_0S_1S_3 \quad (18)$$

Sendo :

$V_0 = 42,0$  m/s. Velocidade básica do vento no local da edificação obtido a partir do mapa das isopleias;

$S_1 = 1,0$ . Fator topográfico, correspondente a terreno plano;

$S_3 = 0,78$ . Neste caso o fator estatístico será igual a 0,78 para transformar a velocidade básica do vento  $V_0$  para um tempo de recorrência de  $T_r = 10$  anos, conforme a Tabela 2.

Portanto:

$$V_p = 22,604 \text{ m/s}$$

### Cálculo da resposta dinâmica na direção do vento

A variação da pressão dinâmica com a altura é expressa pela equação (24).

$$q(z) = \bar{q}_o b^2 \left[ \left( \frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left( \frac{h}{z_r} \right)^p \left( \frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right] \quad (24)$$

Onde o primeiro termo dos colchetes corresponde a média e o segundo representa a amplitude máxima da resposta flutuante, sendo :

$$\begin{aligned}\bar{q}_0 &= 0,613\bar{V}_p^2 & (25) \\ \bar{q}_0 &= 313,218 \text{ N/m}^2\end{aligned}$$

Pela Tabela 4, em função da categoria de rugosidade do terreno tem-se que:

$$\begin{aligned}b &= 0,50 ; \\ p &= 0,31.\end{aligned}$$

E pela Tabela 3, em função do tipo de estrutura:

$$\begin{aligned}\gamma &= 1,2. \\ \zeta &= 0,02\end{aligned}$$

A período  $T_1$  da edificação pode ser determinado a partir da expressão apresentada na Tabela 3, portanto:

$$T_1 = 0,05 + 0,015h$$

$$T_1 = 2,204$$

Como a frequência é o inverso do período,  $f_1$  é:

$$T_1 = 1/f_1$$

$$f_1 = 0,454$$

A determinação do coeficiente de amplificação dinâmica  $\xi$ , é função das dimensões da edificação, da razão de amortecimento crítico  $\zeta$ , da frequência  $f$  (através da relação adimensional  $\bar{V}_p / fL$ ), e para terrenos de categoria de rugosidade V, é determinado a partir da interpolação dos gráficos da figura 18 da NBR6123/1988. Desta forma :

$$L = 1800;$$

$$\overline{V}_p / fL = 22,604 / (0,454 \times 1800) = 0,0277 ;$$

$$l_1/h = 26,3 / 143,6 = 0,1831 ;$$

Assim, têm-se que :

$$\xi = 1,15;$$

Enfim, calcula-se a pressão dinâmica  $q(z)$  através da equação (24) no topo do edifício:

$$z_r = 10 \text{ m (altura de referência)}$$

$$q(z) = 687,554 \text{ N/m}^2$$

A Figura 28 mostra o aumento da pressão dinâmica ao longo da altura :

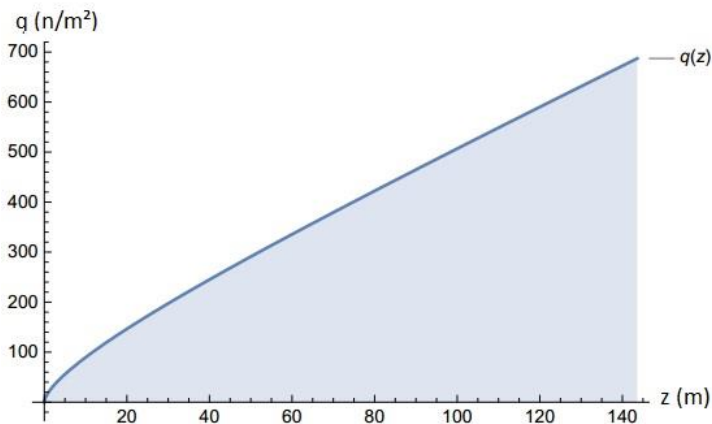
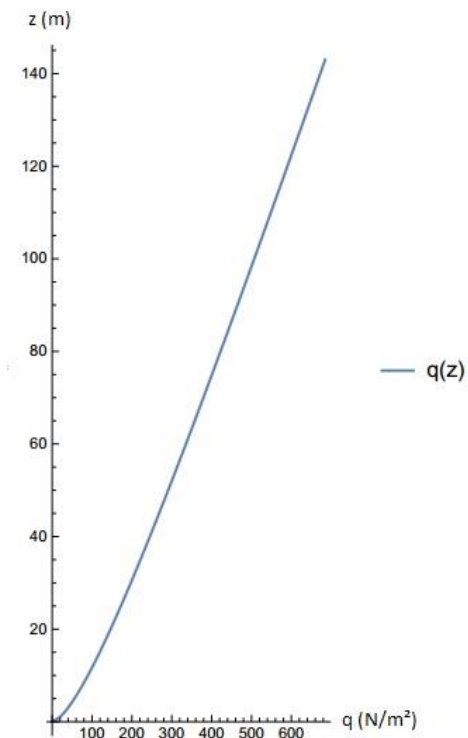


Figura 28 - Variação da pressão dinâmica  $q(z)$  com a altura  $h$  (fonte: do autor)

Afim de se facilitar a visualização da variação da pressão dinâmica  $q(z)$  com a altura, a Figura 29 apresenta como eixo da ordenadas a altura  $z$  (m), e o eixo das abscissas a pressão dinâmica  $q(z)$ .



**Figura 29 - Variação da força estática equivalente em função da altura  $z$  (fonte: do autor)**

### Força equivalente ao longo da altura do edifício

A força equivalente ao longo da altura pode ser calculada a partir da expressão (26) :

$$F(z) = q(z)I_1C_a \quad (26)$$

O coeficiente de arrasto  $C_a$  é obtido a partir da Figura 13, ou, para os raros casos de vento de alta turbulência através no gráfico da Figura 14, sendo seu valor considerado invariável com a altura  $z$  e em função das relações  $h/l_1$  e  $l_1/l_2$ . Sabendo-se que neste caso o vento é de alta turbulência, usou-se a Figura 14. Considerou-se o vento incidindo perpendicularmente no maior lado da edificação. Assim:

$$h/l_1 = 143,6/26,3 = 5,46$$

$$l_1/l_2 = 26,3/12,7 = 2,07$$

Desta forma, encontra-se de maneira aproximada um coeficiente de arrasto  $C_a$  com valor de 1,15.

A Figura 30 apresenta a variação da força estática equivalente em função da altura.

### Deslocamento da edificação

Para o cálculo da aceleração, é necessário conhecer o deslocamento horizontal  $u_j$  no nível  $z$  devido a resposta flutuante no modo  $j$ . A Figura 31 apresenta a estrutura deformada do edifício 2 para um vento de retorno de 10 anos.

O valor para o deslocamento horizontal foi obtido a partir de uma análise por pórtico espacial no programa AltoQi Eberick V10. Devido à complexidade que envolve a construção de modelos computacionais de estruturas, o modelo computacional do edifício estudado neste caso foi elaborado pelo professor orientador do trabalho.

Apesar do edifício possuir 143,6 metros de altura, considerou-se a altura para esta análise de 128,80 metros, correspondente ao 43º pavimento, já que este é o ponto mais alto habitável da edificação.



Desta forma, para uma altura de 128,80 metros o deslocamento correspondente é de 0,207 metros.

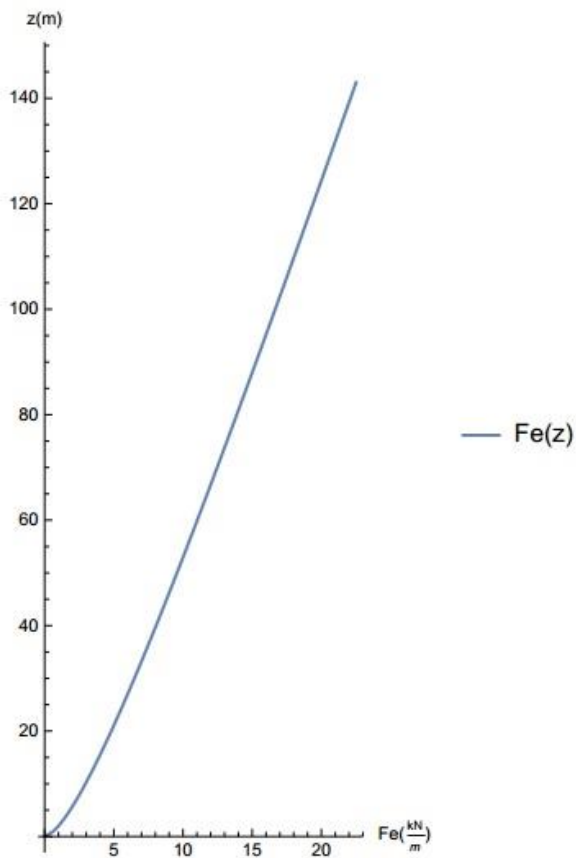


Figura 30 - Variação da força estática equivalente em função da altura  $z$  (fonte: do autor)

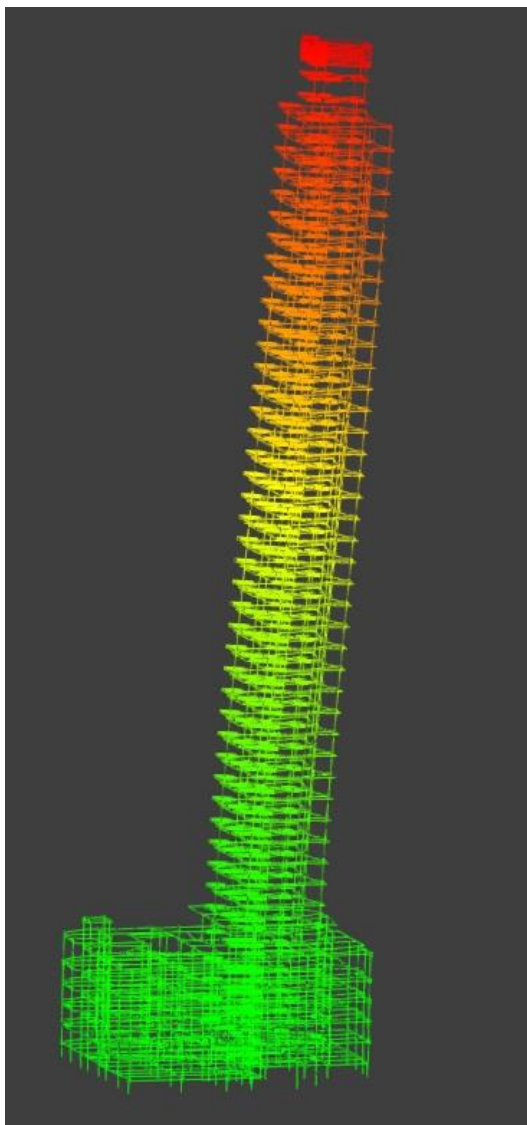


Figura 31 - Estrutura deformada da estrutura do edifício 2 para um vento de  $T_r = 10$  anos.

### Cálculo da Aceleração

O cálculo da aceleração para avaliação do conforto é feito pela expressão (27).

$$a_j = 4\pi^2 f_j^2 u_j^2 \quad (27)$$

A fim de comparação, foi calculado a aceleração do edifício a partir das fórmulas simplificadas de determinação da frequência natural de edifícios visto anteriormente no texto. Para facilitar a visualização dos resultados, criou-se a Tabela 7 para comparação dos resultados:

**Tabela 7 - Quadro comparativo entre as acelerações para o edifício 2**

|                  | Frequência<br>(Hz) | Deslocamento<br>$u_j$ (m) | Aceleração<br>( $m/s^2$ ) |
|------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| NBR<br>6123/1988 | 0,454              | 0,207                     | 0,349                     |
| BACHMANN         | 0,320              |                           | 0,174                     |

É possível observar que a aceleração calculada utilizando a frequência fundamental calculada através da fórmula da NBR6123/1988 é maior que aquela obtida utilizando a frequência obtida pela fórmula de BACHMANN.

### Avaliação do conforto

Por fim, pode-se avaliar o conforto a partir das acelerações obtidas, com os valores máximos encontrados na literatura e em normas. Desta forma, compara-se na sequência os valores de aceleração obtidos a partir das

frequências naturais encontradas, para cada um dos critérios de conforto apresentados no texto anteriormente.

1) Critério de conforto da NBR6123/1988

|                     | Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) | Critério de conforto |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|
|                     |                                | NBR6123/1988         |
| Frequência NBR      | 0,349                          | NÃO ATENDE           |
| Frequência BACHMANN | 0,174                          | NÃO ATENDE           |

Como visto anteriormente, a norma NBR6123/1988 indica que deve haver uma aceleração máxima de 0,10 m/s<sup>2</sup>. Assim, independente da formulação utilizada para obtenção da frequência da edificação, nenhuma delas atende ao critério estabelecido pela NBR6123.

2) Critério de conforto segundo Bachmann e Hirsch

|                     | Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) | Critério de conforto |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|
|                     |                                | Bachmann & Hirsch    |
| Frequência NBR      | 0,349                          | Incômodo             |
| Frequência BACHMANN | 0,174                          | Incômodo             |

Comparando com o critério de Bachmann e Hirsch, e utilizando as duas equações para obtenção da frequência da edificação, verifica-se que as acelerações causadas pelo vento neste edifício, encontram-se na faixa de incômodo, causando desta forma desconforto aos usuários.

Por fim, vale ressaltar que não foram utilizadas as recomendações das ISO 2631, pois estas normas apresentam seus limites em aceleração rms, ao passo que neste estudo foram investigadas as acelerações de pico. Da

mesma forma, não foi comparado com os limites de aceleração da norma ISO 10137, já que esta apresenta seus valores para um vento com tempo de recorrência de 1 ano, enquanto que os valores de aceleração calculados neste trabalho foram para um vento com tempo de recorrência de 10 anos.

### **5.2.3 Análise do conforto a partir de resultados obtidos a partir de túnel de vento**

Tendo em vista que este edifício possui dimensões fora do comum (altura), foi realizado um ensaio experimental em túnel de vento para obtenção de resultados mais confiáveis dos efeitos do vento na edificação. A seguir, será apresentado os resultados ligados ao conforto humano.



**Figura 32 - Modelo do edifício 2 e vizinhança para análise em túnel de vento na escala 1:300**

## Frequências Modais

A partir de uma análise modal feita no programa SAP2000, foram obtidas as frequências modais da edificação. A Tabela 8, apresentada as cinco primeiras frequências modais de vibração :

**Tabela 8 – Cinco primeiros modos de vibração do edifício 2**

| Modo | Período (s) | Frequência Angular (rad/s) | Frequência (Hz) |
|------|-------------|----------------------------|-----------------|
| 1    | 5,654997    | 1,1111                     | 0,17683         |
| 2    | 3,79063     | 1,6576                     | 0,26381         |
| 3    | 2,76462     | 2,2727                     | 0,36171         |
| 4    | 1,373469    | 4,5747                     | 0,72808         |
| 5    | 1,220101    | 5,1497                     | 0,8196          |

Verifica-se que a frequência do edifício para o primeiro modo de vibração, que é a mais baixa, é menor que a obtida pela fórmula indicada na NBR 6123, e menor também que a obtida a partir da fórmula indicada por Bachmann.

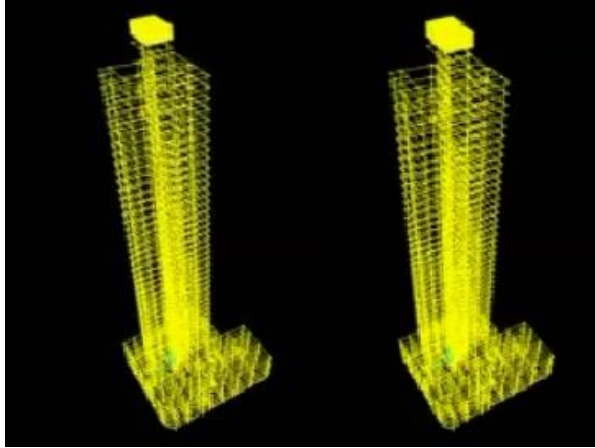


Figura 33 - Modo de vibração 1 (fonte: elaborado pelo autor)

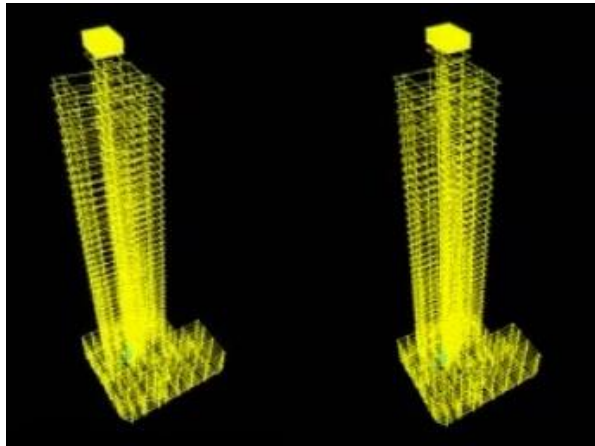


Figura 34 - Modo de vibração 2 (fonte: elaborado pelo autor)

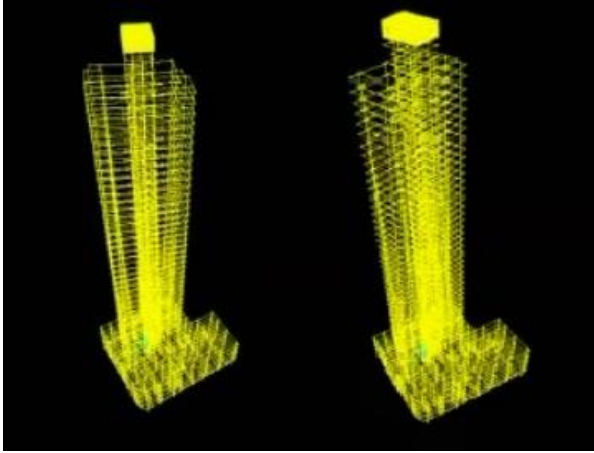


Figura 35 - Modo de vibração 3 (fonte: elaborado pelo autor)

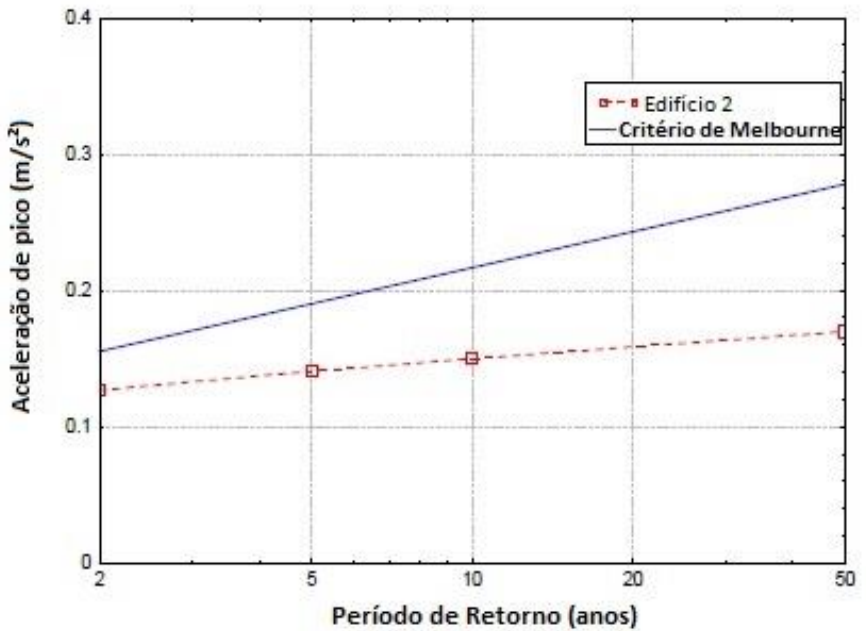
### Avaliação do conforto

Neste estudo, os resultados obtidos foram comparados com o critério de avaliação do pico de aceleração de Melbourne (1988), equação (28).

$$\hat{x} = \sqrt{2 \ln(n_0 T)} \times \left( 0,68 + \frac{\ln(R)}{5} \right) \times \exp[-3,65 - 0,41 \ln(n_0)] \quad (28)$$

Usou-se a frequência do primeiro de modo de vibração ( $f = 0,177$  Hz) e um período de tempo de incidência de 1 hora. Os resultados para pico de aceleração são mostrados na Figura 36 para diversos tempos de retorno.





**Figura 36 - Acelerações de pico do edifício 2 para diferentes tempos de retorno**

Para um tempo de retorno de 10 anos, a aceleração induzida pelo vento é de aproximadamente  $0,15 \text{ m/s}^2$ .

Comparando com o critério de Bachmann, observa-se que o nível de aceleração fica no limiar entre o “perceptível” e “incômodo”. Entretanto, se comparada com o valor da norma NBR6123/1988, a edificação não se enquadra aos critérios exigíveis por ela.

## **6 CONCLUSÃO**

Neste trabalho foram apresentadas formulações encontradas na literatura acerca da determinação da frequência natural de edificações. Pode-se constatar, que estes métodos aproximados não possuem um consenso, já que para todos os métodos citados no texto, nenhum obteve o mesmo resultado. No entanto, pode-se perceber que a equação indicada pela norma NBR6123/1988 tem como resultado uma frequência natural claramente mais alta que os os outros métodos.

Para os critérios de avaliação do conforto, constata-se que também não há uma concordância entre os mesmos. Este é um critério altamente subjetivo e dependente de diversos influenciadores da percepção, portanto de difícil determinação. Entretanto, pode-se observar que o critério adotado pela norma NBR6123/1988 é mais exigente que os outros, sendo desta forma mais rigoroso neste quesito.

Por fim, nos estudos de caso, pode-se perceber que se levado em conta somente o critério de aceleração da norma NBR6123/1988, nenhum dos dois edifícios atendem as exigências, sendo o edifício 2 por ser mais alto, é mais sensível as cargas do vento. Contudo, se levado em conta apenas o estudo realizado em túnel de vento, e o critério de avaliação utilizado, percebe-se que neste estudo o prédio atende as exigências.

É interessante notar a diferença de resultados obtidos a partir da análise em túnel de vento, e da análise pelo método simplificado na NBR613/1988. Sabe-se que os resultados em túnel de vento são mais confiáveis que o método simplificado na norma NBR6123, deduz-se então que esta última é mais conservadora em seus resultados.

Por fim, conclui-se que é de extrema importância avaliar o grau de conforto durante a fase de projeto, a qual os usuários serão submetidos

durante a utilização da estrutura, para não gerar incômodo após a construção da edificação aos construtores, projetistas e usuários.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6123** : forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.

BACHMANN, H. et. al. **Vibration problems in structures : practical guidelines**. Birkhauser, Verlag, Basel : 1995.

BACHMANN, H. ; AMMANN, W. **Vibrations in structures induced by man and machines**. Zurich, Switzerland : IABSE-AIPC-IVBH ; 1987

BALENDRA, T. **Vibration of buildings to wind and earthquake loads**. London : Springer-Verlag, 1993. 149p.

BLESSMANN, J. **Aerodinâmica das construções**. Porto Alegre : Sagra ; 1983

CHOPRA, A.K. **Dynamic of structures**. Englewood Cliffs ; Prentice Hall, 1995.

CLOUGH, R. W. ; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 3rd ed. Berkeley : Computer & Structures, Inc., 2003.

CUNHA, M. R. da. **Avaliação da exposição humana à vibração visando o conforto da comunidade**. Disponível em <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/vibracao-abit-cetesb.pdf>> Acesso em 17 de maio de 2016.

FRANCISCO, Wagner De Cerqueira E. **"Vento"; Brasil Escola**. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/vento.htm>>. Acesso em 19 de junho de 2016.

GONÇALVES, R. M. ; SALES, J. J. de ; MALITE, M. ; NETO, J. M. **Ação do vento em edificações : teoria e exemplos**. São Carlos : EESC/USP ; 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**ISO 10137** : bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Geneva, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**ISO 2631** : evaluation of human exposure to whole-body vibration : General requirements. Geneva, 1985

KAREEM, A., KIJEWski, T., TAMURA Y. **Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications**. Disponível em <[https://nathaz.nd.edu/journals/\(1999\)Mitigation\\_of\\_Motion\\_of\\_Tall\\_Buildings\\_with\\_Recent\\_Applications.pdf](https://nathaz.nd.edu/journals/(1999)Mitigation_of_Motion_of_Tall_Buildings_with_Recent_Applications.pdf)>. Acesso em 16 de maio de 2016

LOTURCO, B. **Engenharia do vento**. Disponível em <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/208/artigo319316-1.aspx>> . Acessado em 15 de junho de 2016.

MELBOURNE, W. H. ; PALMER, T. S. **Accelerations and comfort criteria for buildings undergoing complex motions**. Jour Wing Eng and Ind Aero . 41-44 (1992), 105-106. Elsevier ; 1992.

MIEROVITCH, L. **Fundamentals of vibrations**. Boston : McGraw-Hill, 2001.

NÓBREGA, P. G. B. **Análise dinâmica de estruturas de concreto : estudo experimental e número de contorno de estruturas pré-moldadas**. São Carlos, 2004. Ph. D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PARSONS, K. C. **CIBS technical conference 1985 ergonomics assessment of environments in buildings**. Disponível em <[www.staff.lboro.ac.uk/~huph/kens.htm](http://www.staff.lboro.ac.uk/~huph/kens.htm)> Acesso em 18 de maio de 2016.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. Tradução de Arlete Simille Marques. São Paulo : Pearson Prentice Hall,2008.

SILVA, R. M da; BECK, J. C. P. **Introdução à engenharia das vibrações**. Porto Alegre : EDIPUCRS, 2012.

VANIN, D. D. **Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento : comparação de técnicas experimentais em túnel de vento**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

# ANEXO 1

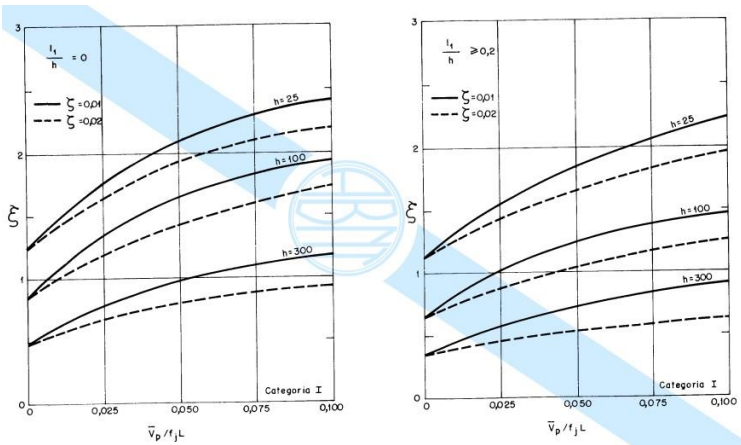


Figura 37 – Coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , para terreno de categoria I ( $L=1800$  m;  $h$  em metros) (fonte: NBR 6123, 1988, p. 37)

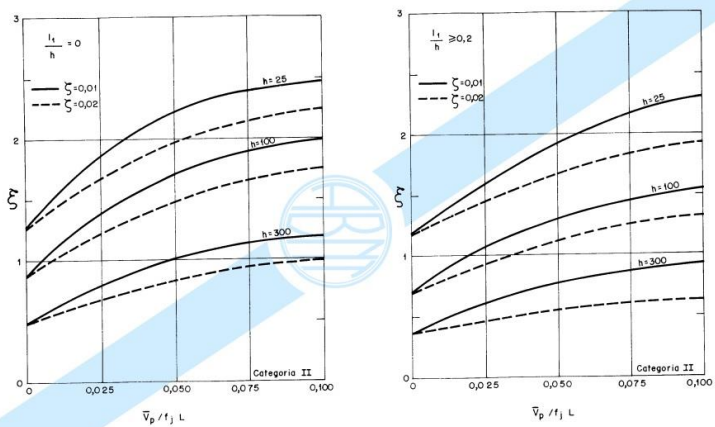


Figura 38 - Coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , para terreno de categoria II ( $L=1800$  m;  $h$  em metros) (fonte: NBR 6123, 1988, p. 38)

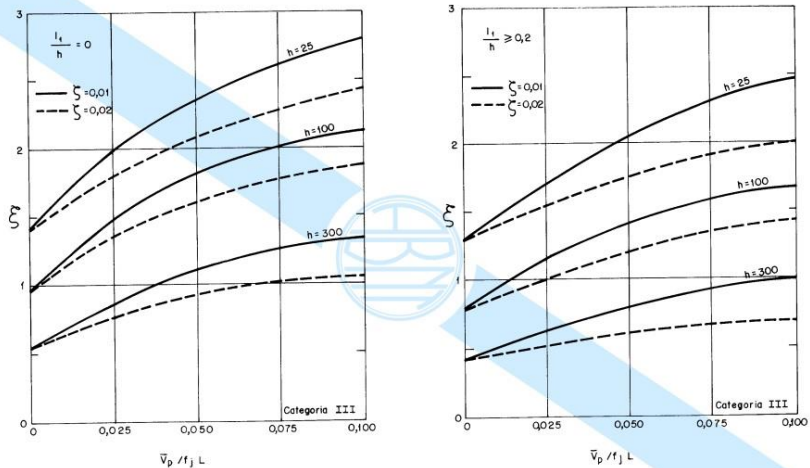


Figura 39 - Coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , para terreno de categoria III ( $L=1800$  m;  $h$  em metros) (fonte: NBR 6123, 1988, p. 39)

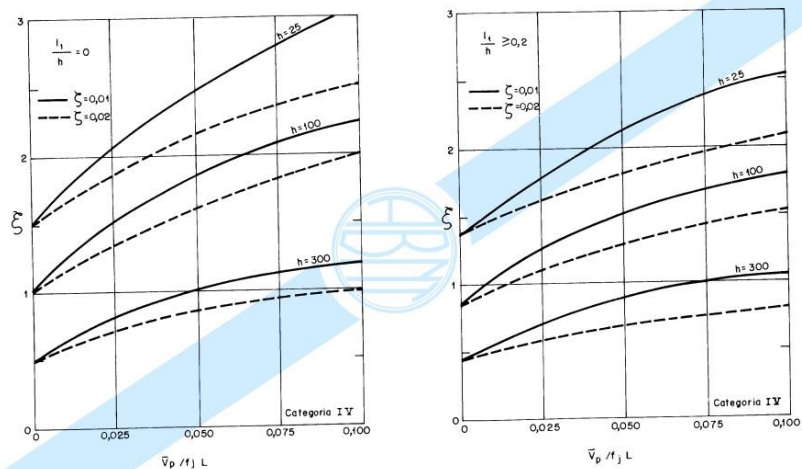
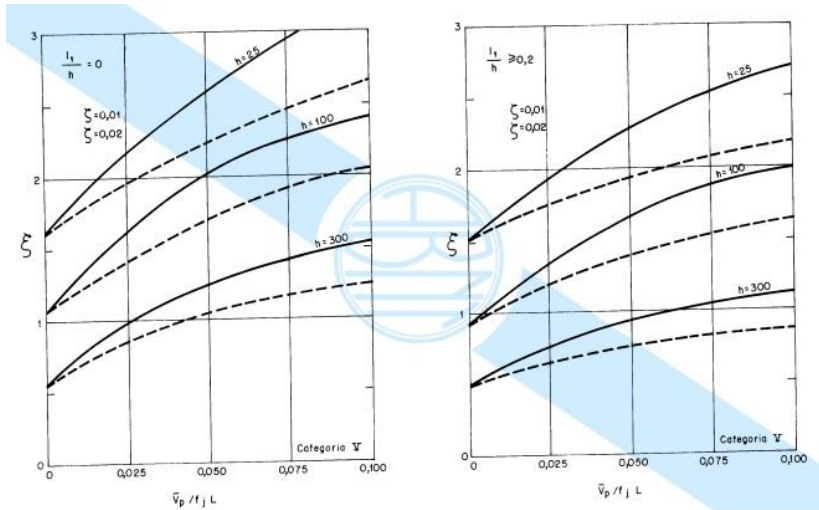


Figura 40 - Coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , para terreno de categoria IV ( $L=1800$  m;  $h$  em metros) (fonte: NBR 6123, 1988, p. 40)





**Figura 41 - Coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , para terreno de categoria V ( $L=1800$  m;  $h$  em metros) (fonte: NBR 6123, 1988, p. 41)**