

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS À CARGA  
DINÂMICA DO VENTO

por

Thiago Barbosa de Castro Friedrich

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2021

Barbosa de Castro Friedrich, Thiago  
ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS  
SUBMETIDOS À CARGA DINÂMICA DO VENTO / Thiago Barbosa  
de Castro Friedrich. -- 2021.  
22 f.  
Orientadora: Letícia Fleck Fadel Miguel.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Edifícios Altos. 2. Conforto Humano. 3. Carga  
Dinâmica do Vento. I. Fleck Fadel Miguel, Letícia,  
orient. II. Título.

Thiago Barbosa de Castro Friedrich

ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS À CARGA  
DINÂMICA DO VENTO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Leticia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>ª</sup>. Leticia Fleck Fadel Miguel

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, Novembro de 2021

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha mãe, Denise, e ao meu pai, Etienne, por prover o melhor e estimular ao máximo minha educação. O apoio deles ao longo de toda minha formação e, mais recentemente, para a realização desse trabalho é de valor imensurável. Não há ninguém que contribuiu e que segue contribuindo da forma que eles fazem. Pai e mãe, muito obrigado!

Agradeço ao meu irmão Arthur por diariamente me motivar a buscar meus objetivos. Seus conselhos e atitudes servem de inspiração diária na minha caminhada acadêmica e profissional. O impacto das nossas conversas vai muito além do que preciso para superar meus desafios. Nossas longas caminhadas (presenciais ou a distância) moldam quem eu sou. Obrigado!

Não posso deixar de agradecer o suporte dos meus avós, tias e tios. Esse trabalho e todos os anos de graduação foram muito mais leves graças a vocês. Um agradecimento especial a minha Tia Lúcia, por rir comigo (de apreensão ou felicidade) na maioria dos desafios ao longo da graduação, e a minha Tia Lica, por todas as conversas, cafezinhos, conselhos e pela recepção no na Praia do Cassino durante a realização desse trabalho.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo da graduação e que, em inúmeras vezes, me ajudaram a entender os conceitos visto nos livros e nas aulas. Agradeço especialmente ao meu amigo Rafael Giacomazzi por todo auxílio na realização desse trabalho e principalmente por me aguentar ao longo de nossas velejadas.

Obrigado Professora Leticia por tudo compartilhou em sala de aula e por todas as orientações para realização desse trabalho. Obrigado por estar sempre a disposição e por todas as respostas nas dezenas de e-mails trocados.

## ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO EM EDIFÍCIOS ALTOS SUBMETIDOS À CARGA DINÂMICA DO VENTO

**Friedrich, Thiago Barbosa de Castro**

thiago.friedrich@gmail.com

**Resumo.** Construções de edifícios altos e esbeltos são cada vez mais presentes nos centros urbanos devido a competitividade por espaço. Essa tendência vem acompanhada de estruturas cada vez menos rígidas fomentadas principalmente pelos esforços de redução de custo de materiais. Nessas condições, garantir o conforto do usuário torna-se tão necessário quanto a segurança estrutural, principalmente quando esforços dinâmicos como o do vento estão envolvidos. O presente trabalho, por meio da modelagem de um edifício de 90 metros no formato Shear-Building, analisou quatro critérios de conforto humano associado à aceleração causada pelo vento sinótico no último andar da edificação. Para o cálculo da resposta dinâmica da estrutura foram aplicadas as metodologias sugeridas pela norma brasileira NBR 6123/1988, pela norma americana ASCE 7 – 10 e por um método numérico não determinístico. Os resultados indicam que a norma americana é a menos conservadora do ponto de vista da análise de conforto, seguido da norma brasileira e do método numérico.

**Palavras-chave:** edifícios-altos, conforto-humano, resposta-dinâmica, vento-sinótico

### **Human Comfort Analysis in Tall Buildings Due to Dynamic Wind Loads**

**Abstract.** Tall and slender building constructions are increasingly present in urban centers due to space competitiveness. This tendency come together with less rigid structures fostered mainly by efforts to reduce the cost of materials. Under these conditions, ensuring user comfort become as necessary as structural safety, especially when dynamic loads such as the wind are involved. The present work through the modeling of a 90-meter Shear-Building, analyzed four human comfort criteria associated with the acceleration caused by synoptic wind on the top floor of the building. To calculate the dynamic response of the structure, the methodologies suggested by the Brazilian standard NBR6123/1988, the American standard ASCE7 – 10 and a non-deterministic numerical method were applied. The results indicates that the American standard is the least conservative from the point of view of comfort analysis, followed by the Brazilian standard and the numerical method.

**Keywords:** tall-buildings, human-comfort, dynamic-response, synoptic-wind

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
1.3 OBJETIVO.....	2
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>2</b>
2.1 VENTO NA ENGENHARIA ESTRUTURAL .....	2
2.2 MODELAGEM DO EDIFÍCIO.....	2
2.3 METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA DO EDIFÍCIO .....	3
2.3.1 <i>MODELO CONTÍNUO SIMPLIFICADO DA NBR 6123/1988</i> .....	3
2.3.2 <i>MÉTODO DE CAMPOS DE PRESSÃO NÃO DETERMINÍSTICOS</i> .....	4
2.3.3 <i>MÉTODO DA ASCE 7 -10</i> .....	5
2.4 CRITÉRIOS PARA A AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO.....	8
2.4.1 <i>CRITÉRIOS PARA UM PERÍODO DE RECORRÊNCIA DE 10 ANOS</i> .....	8
2.4.2 <i>CRITÉRIO PARA PERÍODO DE RECORRÊNCIA DE 1 ANO</i> .....	8
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>9</b>
3.1 PARÂMETROS E CONSIDERAÇÕES NOS MÉTODOS DE CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA .....	9
3.2 CORREÇÃO DA VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO PARA OUTROS PERÍODOS RECORRÊNCIAS	11
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>14</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>15</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>17</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de estruturas e construções altas foram e continuam sendo motivados por uma série de fatores históricos, econômicos e sociais. Começando nas ambições arquitetônicas, inspiradas por construções como a Torre Eiffel (300 m) em 1889, e chegando até a necessidades atuais de acomodação da população nos centros urbanos, a construção de edifícios e estruturas altas desperta admiradores e críticos (ALI; AL-KODMANY, 2012). Independente das opiniões, a tendência no aumento de construções de edifícios altos já é uma realidade. Nos últimos 20 anos, por exemplo, foram construídos 84% dos edifícios com 200 metros ou mais dentre os presentes na atualidade (CTBUH, 2021).

A construção de edificações altas é acompanhada de grandes desafios estruturais. Áreas de construção cada vez menores e restrições de orçamento estimulam edifícios cada vez mais esbeltos e com baixas rigidezes. Essas duas características tornam os desafios estruturais ainda maiores visto que aumentam os efeitos dinâmicos oriundo de excitações naturais como ventos e abalos sísmicos. Garantir a segurança de construções como essas é fundamental, mas um olhar mais atento ao seu real propósito também se faz necessário.

Segundo Paiva Teixeira (2015), a ação do vento traz preocupações quanto as vibrações geradas e “de nada adianta construir um edifício que vai causar desconforto aos ocupantes, mesmo que seja seguro estruturalmente”. Nesse contexto, o projeto de edifícios de alturas elevadas deve não só atender critérios de segurança estrutural, mas também critérios de conforto humano.

### 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma brasileira responsável por indicar o critério de conforto humano para vibrações oriundas do vento é a NBR 6123/1988 (Forças devidas ao vento em edificações). A mesma, como seu próprio nome já diz, é principalmente responsável por normatizar o cálculo das cargas do vento. Existem diversas referências que balizam os critérios de conforto humano para vibrações, entre elas o Boletim 209 do CEB/1991 (apud PAIVA TEIXEIRA, 2015). De maneira geral, todas utilizam múltiplos da aceleração dos pavimentos provocada pelo vento para definir o quão confortável estaria a estrutura.

Ferrareto et al (2015) apresenta uma visão geral dos diversos critérios utilizados para a mensuração do conforto humano em edificações. Garantida a segurança estrutural da edificação, esses critérios devem ser levados em conta no projeto da edificação. Ferrareto et al (2015) compara critérios que usam valores limites para picos de aceleração nos andares mais altos com critérios que estabelecem faixas de percepção humana em função da intensidade da aceleração observada. Observa-se que não há um consenso entre normas, mas sim situações específicas em que cada normativa melhor se aplica.

Em sua dissertação de mestrado, Paiva Teixeira (2015) analisa o conforto humano em quatro edificações de características distintas e com altura variando de 33 a 70 metros. A partir de dois métodos distintos para calcular a frequência natural das edificações, um numérico e outro analítico, Paiva Teixeira (2015) compara resultados gerados com os critérios da NBR 6123/1998 e o Boletim 209 do CEB/1991. Apenas um dos edifícios de 47 metros atendeu aos critérios da norma brasileira e o edifício de 70 metros apresentou o resultado de “Incômodo” para o critério do Boletim 209 do CEB/1991, considerando o cálculo numérico das frequências naturais.

A performance de um edifício referente ao conforto dos ocupantes é amplamente mensurada e aceita a partir da existência de reclamações formais (LAMB et al., 2013). No entanto, LAMB S. et al (2015) observa que esse método não representa fielmente a realidade, visto que os ocupantes de edificações altas raramente oficializam suas reclamações. LAMB S. et al (2015) analisa por meio de pesquisas as reações dos ocupantes de um edifício alto localizado em uma das cidades mais ventosas da Nova Zelândia. Concluiu-se que aproximadamente 40% dos ocupantes sentem o efeito de movimentação do edifício causado pelo vento ao menos uma vez por mês. Isso faz com que parte dos ocupantes reajam com o que os autores chamam de comportamentos compensatórios, que incluem, por exemplo, pausas no trabalho, deslocamento para andares mais baixos e eventuais saídas da edificação.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é realizar uma análise de conforto humano em um edifício alto sob vibrações oriundas da carga dinâmica do vento. Busca-se entender o impacto do vento em uma edificação de 30 andares localizada na cidade de Porto Alegre, RS, a partir de uma comparação entre metodologias de cálculo de acelerações de pico. Critérios distintos para aferição do conforto serão aplicados e analisados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 VENTO NA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Os ventos podem ser agrupados em dois grandes grupos: primeiro, ventos de superfície, localizados e de alta velocidade; e segundo, ventos de circulação atmosférica como os ventos alísios e monções (BLESSMANN, 1995). O primeiro grupo é o de interesse da engenharia estrutural.

Ventos de superfície são aqueles contidos na camada limite atmosférica e que sofrem influência direta das propriedades da superfície terrestre. O vento sinótico está contido nesse grupo e é comumente utilizado para a modelagem do vento em códigos e normas (VALLIS et al., 2019).

Segundo Blessmann (1995), ventos de superfície são formados, dentre outras tormentas, por ciclones extratropicais conhecidos como “sistemas de pressão plenamente desenvolvidos” (EPS, na sigla em inglês). Ainda segundo ele, as tormentas EPS sopram ventos com velocidades médias constantes por até algumas dezenas de horas. No presente trabalho, o vento EPS é modelado para geração dos campos de pressão no edifício estudado.

### 2.2 MODELAGEM DO EDIFÍCIO

O edifício estudado é uma construção com 24 metros de largura e 30 andares, totalizando 90 metros de altura, localizado na cidade de Porto Alegre (RS). Sua estrutura é do tipo *shear building* em que, por definição, a seção horizontal de cada andar não apresenta rotação (PAZ; HOOM KIM, 2019).

Essa simplificação, permite modelar o edifício como um sistema massa-mola-amortecedor em série de  $n$  graus de liberdade, no qual cada grau de liberdade representa um andar do edifício. Cada pavimento apresenta uma massa, uma rigidez e um amortecimento. Esses valores permitem,

respectivamente, a construção das matrizes de massa ( $M$ ), rigidez ( $K$ ) e amortecimento ( $C$ ). Essas três matrizes, por sua vez, dão origem à matriz dinâmica ( $D$ ) da estrutura, dada pela Equação 1.

$$[D] = [M]^{-1}[K] \quad (1)$$

Por meio da análise modal, obtém-se da matriz dinâmica as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura a partir dos autovalores e autovetores respectivamente.

## 2.3 METODOLOGIAS DE CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA DO EDIFÍCIO

### 2.3.1 MODELO CONTÍNUO SIMPLIFICADO DA NBR 6123/1988

O capítulo 9 da NBR 6123/1988 apresenta as diretrizes para a obtenção dos efeitos dinâmicos do vento em estruturas. A norma propõe dois modelos para realização dos cálculos: o *modelo contínuo simplificado* e o *modelo discreto* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Nesse trabalho será utilizado o primeiro.

Para um edifício localizado em uma região com poucos obstáculos isolados, a norma define uma velocidade de projeto ( $\bar{V}_p$ ) de acordo com a Equação 2.

$$\bar{V}_p = 0,69 V_0 S_1 S_3 \quad (2)$$

Na equação acima  $V_0$  representa a velocidade básica do vento, retirada do gráfico de isopletas da norma, e os termos  $S_1$  e  $S_3$  representam, respectivamente, o fator topográfico e um fator estatístico, ambos disponíveis no Capítulo 5 da norma.

A pressão dinâmica gerada pelo vento na estrutura é determinada pela Equação 3 que indica a carga de pressão imposta em função da altura da edificação. O primeiro termo dentro do colchetes representa a parcela estática e o segundo termo a parcela flutuante.

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[ \left( \frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left( \frac{h}{z_r} \right)^p \left( \frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1 + 2\gamma}{1 + \gamma + p} \xi \right] \quad (3)$$

A pressão dinâmica  $q(z)$  é uma função contínua da altura  $z$ . O coeficiente  $b$  e o expoente  $p$  são parâmetros meteorológicos definidos a partir da rugosidade do terreno fornecidos pela norma e disponíveis na tabela do Anexo I. A forma modal  $\gamma$  é determinada a partir do tipo de edificação e suas características, também fornecido pela norma e disponibilizados no Anexo II. Já coeficiente de amplificação dinâmica  $\xi$ , é determinado a partir das características da edificação com o auxílio do gráfico disponibilizado no Anexo III. A altura de referência  $z_r$  é padronizada em 10m e a Equação 4 define o coeficiente  $\bar{q}_0$ .

$$\bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (4)$$

A norma estabelece como a força dinâmica equivalente deve ser calculada. A Equação 5 abaixo indica a força aplicada por unidade de altura e, considerando todos os termos da Equação 3, engloba as ações estáticas e dinâmicas do vento.

$$\overline{F_{din}} = q(z) I_1 C_a \quad (5)$$

A largura da edificação é representada por  $I_1$  e  $C_a$  é o coeficiente de arrasto definido no Capítulo 6 da NBR 6123/1988. Sendo  $F_{din}$  o equivalente a uma força estática, pode-se aplicar a equação que relaciona rigidez e deslocamento ( $\bar{u}$ ) mostrada na Equação 6.

$$\bar{u} = [K]^{-1} \overline{F_{din}} \quad (6)$$

### 2.3.2 MÉTODO DE CAMPOS DE PRESSÃO NÃO DETERMINÍSTICOS

O método descrito nessa seção visa explorar a dinâmica aleatória das frequências do vento, ponderando a intensidade da potência associada a cada uma delas. Apresenta-se aqui o método semelhante ao utilizado por Tonon Ávila (2019) e Viezzer Giacomazzi (2020).

De forma semelhante ao que foi desenvolvido na Seção 2.3.2, o cálculo da carga dinâmica que aqui desenvolvida também envolve uma parcela estática e uma parcela flutuante. No entanto, a parcela estática será calculada de acordo com a metodologia de carga *estática* do vento segundo a NBR 6123/1988 e a parcela flutuante utilizando uma rotina computacional para o desenvolvimento de velocidades estocásticas.

A metodologia para carga estática do vento define, de modo muito semelhante à velocidade de projeto ( $\bar{V}_p$ ), uma velocidade característica ( $\bar{V}_k$ ) dada pela Equação 7.

$$\bar{V}_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (7)$$

Os termos semelhantes à Equação 2 são calculados da mesma forma. O termo  $S_2$  é um fator que engloba os critérios de rugosidade do terreno, dimensões da edificação e altura sobre o terreno. A Equação 8 exibe a fórmula para calcular  $S_2$  em função da altura  $z$  da edificação:

$$S_2 = b F_r \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (8)$$

no qual  $F_r$  (fator de rajada),  $b$  e  $p$  são parâmetro meteorológicos semelhantes aos utilizados na Equação 3, mas definidos pela NBR 6123/1988 com uma sutil diferença. Esses parâmetros são selecionados a partir da classe da edificação e da categoria do terreno através da tabela disponibilizada no Anexo IV.

Para determinação da parcela flutuante do vento é preciso explorar algumas características do comportamento do vento sinótico ao longo do tempo. O espectro de potência desenvolvido por Davenport (1961) traz a variação da intensidade das rajadas do vento para determinada faixa de frequência, aqui representado pela Equação 9:

$$\frac{f S_w(f)}{u_*^2} = \frac{4n^2}{(1 + n^2)^{4/3}} \quad (9)$$

na qual  $f$  representa a banda de frequência utilizada e  $S_w$  a densidade espectral. O termo  $u_*$  é a velocidade de fricção do vento (MIGUEL et al., 2012) exposto na Equação 10 e a frequência adimensional ( $n$ ) pela Equação 11.

$$u_* = 0,4 \frac{V_0}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (10)$$

$$n = \frac{fL}{V_0} \quad (11)$$

Na Equação 10, o termo  $z_0$  é o comprimento de rugosidade definido na NBR 6123/1988 em função do terreno. Já Equação 11,  $L$  é um comprimento no valor de 1200  $m$  convencionado no modelo de Davenport (1961).

Para aplicar a densidade espectral de Davenport, utiliza-se o método de representação espectral desenvolvido por Shinozuka e Jan (1972) que gera um vetor de velocidade estocástico por meio de uma soma de cossenos com ângulos de fase somados de forma aleatória. A Equação 12 a seguir demonstra o cálculo a ser realizado.

$$\Delta\bar{V}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_w(f_j)\Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) \quad (12)$$

Na Equação 12,  $N$  é o número de intervalos no qual a banda de frequência será dividida em módulos de  $\Delta f$ . O ângulo de fase ( $\varphi$ ) é determinado a partir de uma função de distribuição de probabilidade aleatória variando entre 0 e  $2\pi$ .

O campo de velocidades flutuantes que atua na sobre o edifício é então gerado por meio de uma correlação entre os sinais de velocidade e sua influência sobre cotas vizinhas (MIGUEL et al., 2012). A Equação 13 mostra essa correlação:

$$V(z, t) = V1(t) + \frac{V2(t) - V1(t)}{a} z \quad (13)$$

em que  $a$  é o comprimento de correlação resultante de uma regressão linear apresentada por Miguel et al. (2012).

Para se obter a resposta dinâmica total da estrutura deve-se então realizar o somatório da parcela estática da velocidade do vento (Equação 7) com a parcela flutuante (Equação 13). O campo de velocidade encontrado é então aplicado à Equação 4 para o cálculo da pressão dinâmica e posterior cálculo da força (Equação 5).

### 2.3.3 MÉTODO DA ASCE 7-10

Como veremos na seção seguinte, a principal resposta dinâmica que determina o conforto humano dos ocupantes em uma edificação são os picos de aceleração aos quais eles estão sujeitos. Comparado aos métodos anteriores, a norma ASCE 7-10 (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE 2010) propõe um cálculo direto dos picos de aceleração. Dessa forma, nesse

método não será visto cálculo de forças e deslocamentos, visto que, a partir das características estruturais da edificação e de sua forma de excitação, a resposta de interesse é obtida.

De modo muito semelhante à NBR 6123/1988, o método proposto pela ASCE 7-10 inicia-se com a caracterização do modo de exposição do terreno da edificação em função da rugosidade da superfície. A partir dessa definição um conjunto de constantes de exposição do terreno é determinado através da tabela disponibilizada no Anexo V.

Em posse dessas constantes, da velocidade básica do vento e das dimensões do edifício, a norma propõe o cálculo de uma série de parâmetros usado estrutura rígidas e estruturas flexíveis. A altura equivalente da estrutura ( $\bar{z}$ ), a intensidade de turbulência ( $\bar{I}$ ), o comprimento integral de escala de turbulência ( $L_{\bar{z}}$ ), a velocidade média do vento a cada hora ( $\bar{V}_{\bar{z}}$ ), a velocidade de rajada de 3 segundos e ( $\hat{V}_{\bar{z}}$ ), são definidas pelas Equações 14 a 18:

$$\bar{z} = 0,6h \quad (14)$$

$$\bar{I} = c \left( \frac{10}{\bar{z}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (15)$$

$$L_{\bar{z}} = l_{(m)} \left( \frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\epsilon}} \quad (16)$$

$$\bar{V}_{\bar{z}} = \bar{b} \left( \frac{\bar{z}}{10} \right)^{\bar{\alpha}} V \quad (17)$$

$$\hat{V}_{\bar{z}} = \hat{b} \left( \frac{\bar{z}}{10} \right)^{\hat{\alpha}} V \quad (18)$$

nas quais  $h$  é a altura do edifício,  $V$  é a velocidade básica do vento, e  $c$ ,  $l_{(m)}$ ,  $\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\hat{b}$ ,  $\hat{\alpha}$ , constantes de exposição do terreno do Anexo V.

Definido os parâmetros comuns a estruturas rígidas e flexíveis, a norma ASCE 7 – 10 define então parâmetros exclusivos de estruturas flexíveis ou dinamicamente sensíveis. Define-se, então, a frequência reduzida ( $N_1$ ) da estrutura na Equação 19:

$$N_1 = \frac{n_1 L_{\bar{z}}}{\bar{V}_{\bar{z}}} \quad (19)$$

na qual  $n_1$  é a frequência natural da estrutura, em Hertz, definida pela norma por  $n_1 = 100/h$ , com  $h$ , nesse caso, medido em pés. A Equação 20 define um constante ( $R_n$ ) utilizada no cálculo do fator de resposta ressonante ( $R^2$ ) que é definido na Equação 27. As equações de 21 a 26 são outras constantes utilizada no cálculo de  $R^2$ .

$$R_n = \frac{7,41N_1}{(1 + 10,3N_1)^{\frac{5}{3}}} \quad (20)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 n_1 B}{\bar{V}_{\bar{z}}} \quad (21)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2\eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) \quad (22)$$

$$\eta_h = \frac{4,6 n_1 h}{\bar{V}_z} \quad (23)$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2\eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) \quad (24)$$

$$\eta_L = \frac{4,6 n_1 L}{\bar{V}_z} \quad (25)$$

$$R_L = \frac{1}{\eta_L} - \frac{1}{2\eta_L^2} (1 - e^{-2\eta_L}) \quad (26)$$

$$R^2 = \frac{1}{\beta} R_n R_h R_b (0,53 + 0,47 R_L) \quad (27)$$

Na Equação 21,  $B$  representa a profundidade do edifício e, na Equação 27,  $\beta$  é a razão de amortecimento com valor recomendado de 0.01.

A ASCE 7 – 10 calcula os valores de aceleração inicialmente em valor eficaz (RMS, da sigla em inglês) e os transforma em valores de pico com um fator  $g_x$ . A aceleração em valor eficaz ( $\sigma_{\ddot{x}}$ ) é definida pela Equação 28:

$$\sigma_{\ddot{x}}(z) = \frac{0.85 \phi(z) \rho B h C_{fx} \bar{V}_z}{m_1} I_z K R \quad (28)$$

na qual  $\phi(z) = (z/h)^\xi$  é o formato do modo fundamental para  $\xi = 1$ ;  $C_{fx}$  é um coeficiente de força, com valor de 1,3;  $m_1$  é a massa modal dada por  $m_1 = \int_0^h \mu(z) \phi^2(z)$ , em que  $\mu(z)$  é a massa por unidade de altura; e  $K = (1,65)^{\hat{\alpha}} / (\hat{\alpha} + \xi + 1)$ . Define-se, então, o fator  $g_x$  através da Equação 29:

$$g_x = \sqrt{2 \ln(n_1 T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(n_1 T)}} \quad (29)$$

em que  $T$  é o período em que a menor aceleração é computada e normalmente assumida com o valor de 3600 segundos.

Por fim, o método calcula a aceleração de pico ( $\ddot{X}_{max}$ ) multiplicando-se a Equação 28 e 29, como mostra a Equação 30.

$$\ddot{X}_{max} = \sigma_{\ddot{x}}(z) g_x \quad (30)$$

## 2.4 CRITÉRIOS PARA A AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

### 2.4.1 CRITÉRIOS PARA UM PERÍODO DE RECORRÊNCIA DE 10 ANOS

A NBR 6123/1988 determina que os picos de aceleração nos pavimentos não ultrapassem  $0,1 \text{ m/s}^2$  em períodos de recorrentes de 10 anos. A norma estabelece um formato de cálculo que atende a metodologia previamente descrita na Seção 2.3.1. O cálculo dos deslocamentos ( $\bar{u}$ ) obtido na Equação 6 é exigido para a aplicação da Equação 31 que demonstra como o cálculo de aceleração deve ser realizado para uma carga estática equivalente a uma carga dinâmica.

$$\bar{a}_j = 4\pi^2 \bar{u}_j f_j \quad (31)$$

O termo  $j$  associado ao pico de aceleração ( $\bar{a}_j$ ), ao deslocamento da resposta flutuante ( $\bar{u}_j$ ) e à frequência ( $f_j$ ) diz respeito ao modo vibração atrelado à frequência natural utilizada no cálculo do coeficiente de amplificação dinâmica ( $\xi$ ) utilizado na Equação 3. Importante ressaltar que a Equação 31 se aplica apenas para as respostas flutuante da carga do vento, ou seja, o segundo termo dentro dos colchetes na Equação 3.

O Conselho de Construções Altas e Habitat Urbano (CTBUH, da sigla em inglês) estabelece uma faixa de  $0,10 \text{ m/s}^2$  a  $0,15 \text{ m/s}^2$  de aceleração nos pavimentos para o conforto humano (apud FERRARETO et al., 2015). Esse critério também ocorre para a recorrência de 10 anos.

Já o Boletim 209 do CEB/1991 não estabelece um valor único ou uma faixa única. Esse critério utiliza faixas de aceleração em função da percepção humana. As faixas são dadas por múltiplos da aceleração da gravidade ( $g$ ) e se aplicam a recorrência de 10 anos. As faixas são às expostas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Faixas limites de aceleração para intensidade da percepção humana

Percepção	Aceleração Limites
Imperceptível	$a < 0,005g$
Perceptível	$0,005g < a < 0,015g$
Incômodo	$0,015g < a < 0,05g$
Muito Incômodo	$0,05g < a < 0,15g$
Intolerável	$0,15g > a$

**Fonte:** (apud PAIVA TEIXEIRA, 2015)

### 2.4.2 CRITÉRIO PARA PERÍODO DE RECORRÊNCIA DE 1 ANO

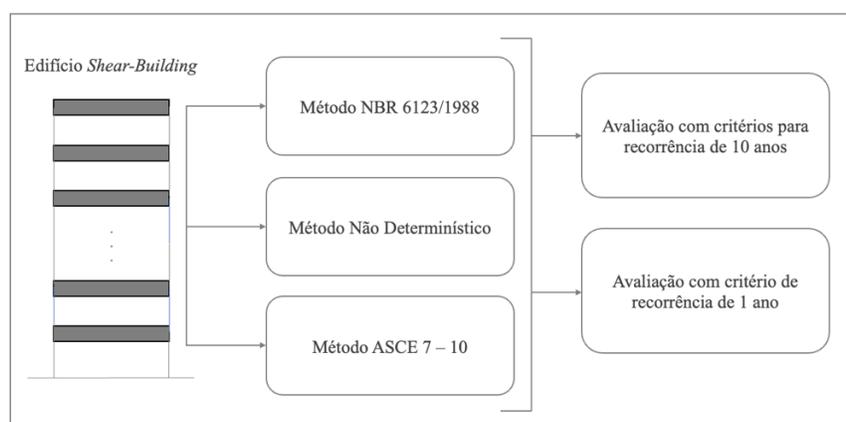
O critério proposto por Sarkisian (2016) apresenta uma faixa limite de pico de acelerações nos pavimentos mais baixas que os demais critérios. Essa faixa é de  $0,05 \text{ m/s}^2$  até  $0,10 \text{ m/s}^2$ . O que

justifica essa faixa mais baixa é a susceptibilidade das acelerações excederem essa faixa com uma maior recorrência, nesse caso de um ano. Na Seção 3 deste trabalho que trata sobre a metodologia aplicada, explica-se como a recorrência de cada critério deve ser aplicado aos cálculos de resposta dinâmica da estrutura.

### 3. METODOLOGIA

Para analisar o conforto humano no edifício modelado, o presente trabalho utiliza os critérios estabelecidos na seção 2.4. Inicialmente, definiu-se as propriedades da construção e então os métodos de cálculo da resposta dinâmica definidos na seção 2.3 foram aplicados. A Figura 1 a seguir mostra no formato de esquema uma síntese do procedimento adotado.

**Figura 1:** Esquema síntese da metodologia empregada



Para edificação no modelada no formato *shear-building* foi considerado que cada um dos 30 andares possui uma massa concentrada  $36.000\text{ kg}$ , uma rigidez entre andares de  $650.000.000\text{ N/m}$  e acompanhado de amortecimento de  $6.200.000\text{ Ns/m}$ . Essas três propriedades permitem a aplicação da Equação 1 viabilizando a análise modal. Esses valores são os mesmos utilizados por Tonon Ávila (2019) e Viezzer Giacomazzi (2020) em seus trabalhos.

#### 3.1 PARÂMETROS E CONSIDERAÇÕES NOS MÉTODOS DE CÁLCULO DA RESPOSTA DINÂMICA

O primeiro método aplicado à edificação é do Modelo Contínuo Simplificado proposto pela NBR 6123/1988. Para a aplicação das Equações 2 a 6 e posterior cálculo do pico de aceleração via Equação 31, um resumo dos parâmetros utilizados é exposto na Tabela 2. Foi considerado que o edifício é da Classe C e está localizado em uma região com poucos obstáculos isolados como outras edificações mais baixas, caracterizando a rugosidade do terreno como um de Categoria II como indicado na norma.

**Tabela 2:** Valores aplicados aos parâmetros do Método de Modelo Contínuo Simplificado

Parâmetro	Valor [unidade]
$V_{0-1}^*$	27,38 [m/s]
$V_{0-10}^{**}$	37.7 [m/s]
$S_1$	1
$S_3$	1
$b$	1
$p$	1
$\gamma$	1
$\xi$	1
$C_a$	1,5

\*/\*\* Valores corrigidos da velocidade básica do vento para uma recorrência de 1 e 10 anos respectivamente.

A seção 2.3.2 ilustra como o Método de Campos de Pressão Não Determinístico calcula a resposta dinâmica total do edifício. No entanto, interessa ao escopo desse trabalho os picos de aceleração gerados pela parcela flutuante da carga dinâmica imposta pelo vento, de maneira semelhante ao proposto no método da norma brasileira.

Posto isso, a Tabela 3 exibe o valor dos parâmetros utilizados para o cálculo das Equações 9 a 13 que determinam a parcela flutuante do vento. Foi calculado a pressão dinâmica flutuante através da Equação 4 e a força dinâmica flutuante através da Equação 5. Desenvolveu-se uma rotina no *software* MATLAB para aplicação do método numérico de Newmark (1959) para obtenção da resposta dinâmica de aceleração partindo da equação de movimento (Equação 32). Foram utilizadas condições iniciais nula de velocidade e deslocamento dos pavimentos; uma faixa de frequência de 0 a 5 Hz para aplicação da Equação 9 e uma rajada de duração total de 100 s.

$$M\ddot{\vec{x}} + C\dot{\vec{x}} + K\vec{x} = \vec{F} \quad (32)$$

**Tabela 3:** Valores aplicados aos parâmetros do Método de Campo de Pressões Não Determinístico

Parâmetro	Valor [unidade]
$z_0$	0,07 [m]
$\Delta f$	0,01 [Hz]
$a$	113 [m]

O método da ASCE 7 – 10 difere dos demais por fornecer o pico de aceleração sem haver necessidade do cálculo de outras respostas dinâmicas. Dessa forma o cuidado de isolar a parcela flutuante como nos métodos anteriores, não se faz necessário.

O valor dos parâmetros utilizados nas Equações de 14 a 30 dependem das características já definidas da estrutura e da localização da edificação. Tanto o nível de exposição do edifício,

quanto a rugosidade superficial do terreno da edificação foram classificadas como B (áreas urbanas e suburbanas, com algumas árvores ou terrenos com obstruções pouco espaçadas). Com isso, o restante das constantes foi retirado do ANEXO V.

Vale ressaltar que a velocidade básica do vento ( $V$ ) utilizada no método ASCE 7 - 10 são os mesmos que o expostos na Tabela 2. Aqui também foi aplicada a correção de recorrência temporal que será exibida a seguir.

### 3.2 CORREÇÃO DA VELOCIDADE BÁSICA DO VENTO PARA OUTROS PERÍODOS RECORRÊNCIAS

A NBR 6123/1988 define a velocidade básica do vento como “a velocidade de uma rajada de 3 s, excedida em média uma vez em 50 anos” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). A informação retirada no gráfico de isopletras traz a velocidade básica do vento nessa característica. As isopletras fornecidas pela ASCE 7 – 10 também traz a velocidade do vento nesse molde.

Como descrito na seção 2.4, os critérios de conforto atuam com períodos de recorrência menor que 50 anos. Para garantir que os valores da velocidade básica do vento estejam na frequência correta de avaliação do conforto, aplicou-se a Equação 33 desenvolvida por Peterka et al. (1998):

$$V_T/V_{50} = [0,36 + 0,1\ln(12T)] \quad (33)$$

em que  $V_T$  é a velocidade na nova recorrência escolhida,  $T$  o espaçamento em *anos*, e  $V_{50}$  a velocidade básica do vento para a recorrência de 50 anos.

Esse ajuste permitiu então a aplicação dos critérios de conforto aos valores de pico de aceleração obtidos que serão apresentados a seguir. Define-se então  $V_{0-10}$  como a velocidade básica do vento ajustada para que a mesma seja extrapolada no máximo uma vez a cada 10 anos; e  $V_{0-1}$  como a velocidade básica do vento ajustada para que a mesma seja extrapolada no máximo uma vez a cada 1 ano.

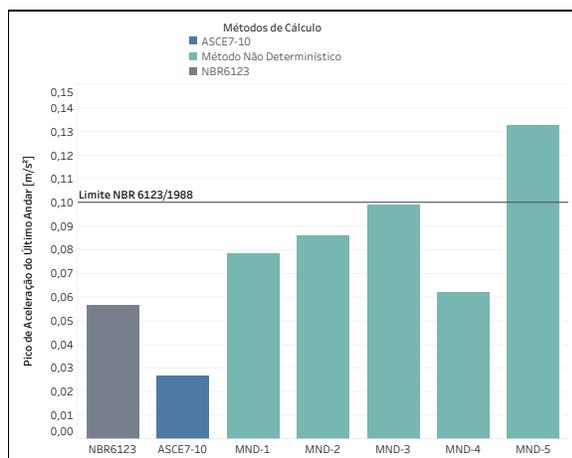
## 4. RESULTADOS

A fim de simplificar a visualização, os resultados apresentados nessa seção dizem respeito aos valores obtidos no 30º andar da edificação estudada. Os picos de aceleração geralmente observados nos últimos andares de edificações são os de maior valor. Por isso, do ponto de vista da análise de conforto humano, esse pavimento se torna a referência na análise.

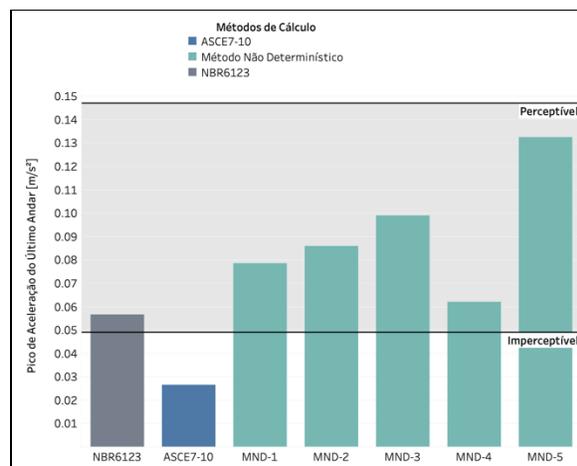
A Figura 3 exibe os valores de pico de aceleração do 30º andar calculado com os três métodos descritos na seção 3 de metodologia. Esses resultados são comparados com os critérios que utilizam a recorrência de 10 anos para superação da velocidade básica do vento, na respectiva ordem: (a) critério da NBR 6123/1988; (b) critério do Boletim 209 do CEB/1991 e (c) critério da CTUBH.

Importante destacar que, dada a aleatoriedade do método de campos de pressão não determinísticos imposta pelo método de representação espectral de Shinozuka e Jan (1972), cinco resultados desse método foram apresentadas. Abreviadas pela sigla MND (Método Não Determinístico) seguida por um número de identificação do resultado.

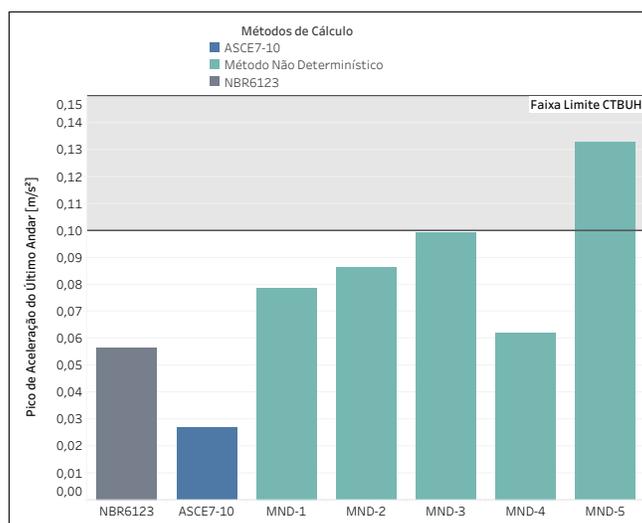
**Figura 3:** Picos de aceleração por método de cálculo aplicado aos critérios de conforto com recorrência de 10 anos. (a) Limite NBR/6123 (b) Boletim 209 do CEB/1991 (c) CTUBH



(a)



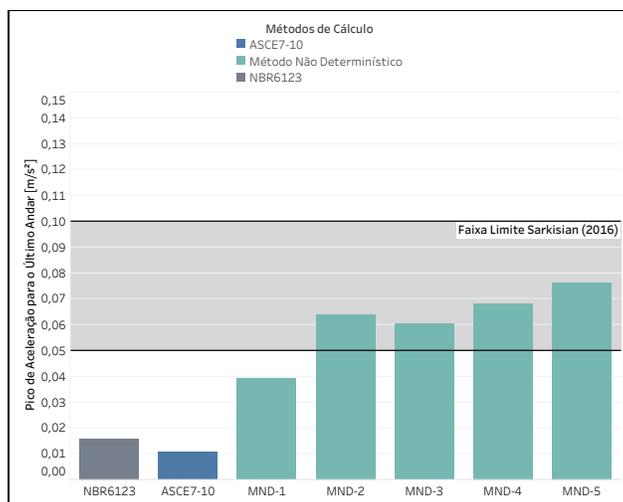
(b)



(c)

As mesmas considerações se aplicam aos resultados apresentados na Figura 4. Porém nesse caso estão sendo apresentados os valores de picos de aceleração ajustados à recorrência de 1 ano da superação da velocidade básica do vento, comparado ao método proposto por Sarkisian (2016).

**Figura 4:** Picos de aceleração por método de cálculo aplicado ao critério de conforto com recorrência de 1 ano de Sarkisian (2016).



Observando os resultados expostos na Figura 3.a, pode-se perceber que as três metodologias de cálculo aplicada ao edifício geraram respostas dentro do limite proposto pela NBR612/1988 com exceção do 5º resultado gerado pelo método não determinístico.

Quando avaliados pelos níveis de percepção proposto pelo Boletim 209 do CEB/1991, tanto o método de cálculo da norma brasileira quanto os cinco resultados do método não determinístico, apresentaram-se como *Perceptíveis*. Apenas o método proposto pela ASCE7 – 10 ficou caracterizada como imperceptível.

Já para o critério proposto pela CTBUH (Figura 3.c), o resultado foi semelhante ao da Figura 3.a. Apenas o 5º resultado do método não determinístico entrou na faixa limite proposto pelo Conselho. O que nesse caso, especificamente, não caracteriza uma extrapolação do critério.

Na Figura 4, para o critério proposto por Sarkisian (2016), observa-se que os métodos de cálculo da NBR 6123/1981 e da ASCE7-10 geraram resultados bem abaixo da faixa de acelerações recomendada. Dos cinco resultados gerados pelo método não determinístico, quatro deles ficaram dentro da faixa e apenas o 1º ficou abaixo. Observa-se também uma redução geral nos valores de pico de aceleração em todos os métodos dado o ajuste de extrapolação da velocidade básica do vento para uma faixa 1 anos de recorrência.

A Tabela 4 a seguir traz um resumo dos valores obtidos nos métodos de cálculo dos picos de aceleração no intuito de facilitar as conclusões do trabalho discutidas na próxima seção.

**Tabela 4:** Resumo dos valores de pico de aceleração observados no 30º andar da edificação

Método de Cálculo	Pico de Aceleração no Último andar para $V_{0-10}$ [ $m/s^2$ ]	Pico de Aceleração no Último andar para $V_{0-1}$ [ $m/s^2$ ]
NBR 6123/1981	0,0566	0,0157
ASCE 7 - 10	0,0267	0,0107
MND -1	0,0786	0,0393
MND -2	0,0861	0,0638
MND -3	0,0991	0,0602
MND -4	0,0621	0,0682
MND -5	0,1325	0,0764
Média MND	0,0916	0,0615

## 5. CONCLUSÕES

O edifício modelado no presente trabalho apresentou resultados de picos de aceleração para o 30º andar bem distintos em função dos métodos de cálculo aplicado. Independentemente dos ajustes na recorrência de extrapolação da velocidade básica do vento, observa-se que o método da ASCE 7 – 10 é o menos conservador do ponto de vista do conforto humano. O valor de aceleração observados na Tabela 4 para  $V_{0-10}$ , por exemplo, é 53% menor do que o observado para o cálculo via Modelo Contínuo Simplificado proposto pela NBR 6123/1988.

Do outro lado, encontra-se o método não determinístico de campos de pressões. Esse método apresentou os maiores valores de pico de aceleração para os cinco resultados obtidos comparado ao outros dois métodos. Com uma média  $0,0916 m/s^2$  para  $V_{0-10}$  e  $0,0615 m/s^2$  para  $V_{0-1}$ , pode-se classificá-lo como o mais conservador entre os métodos.

Ainda no método não determinístico, observa-se que a aleatoriedade do método provoca grande variabilidade nos resultados possíveis. O resultado número 5 (MND -5) de  $0,1325 m/s^2$  foi fundamental para ilustrar que a edificação apresenta potencial de superar o limite proposto pela NBR6123/1981, quando os demais resultados do método estariam de acordo com a norma.

Dentre os critérios de conforto humano utilizados para  $V_{0-10}$ , fica claro que a NBR 6123/1981 é mais rígida que a faixa proposta por CTBUH pois permite um teto de  $0,1 m/s^2$ . O método proposto pelo Boletim 209 do CEB/1991 propõe um critério qualitativo quanto ao conforto humano. O fato de a edificação sofrer uma aceleração *Perceptível* é inconclusivo quanto ao conforto dos usuários. Sugere-se nesse caso que a aplicação do critério proposto por essa norma seja acompanhada de uma metodologia semelhante a desenvolvida por LAMB S. et al (2015), em que mudanças comportamentais dos usuários sejam consideradas.

O critério utilizado por Sarkisian (2016) sugere que a edificação modelada está dentro de limites aceitáveis para o conforto humano. Entretanto, observada a mudança nos valores de pico de aceleração causada pelo ajuste da velocidade básica do vento, sugere-se que novas critérios para  $V_{0-1}$  sejam aplicados. Dessa forma, uma comparação entre critérios pode ser realizada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M. M.; AL-KODMANY, K. **Tall buildings and Urban habitat of the 21st century: A global perspective**. Buildings, Basel, v. 2, n. 4, p. 384–423, 2012.

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

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE, Reston. ASCE STANDART 7-10: **Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**. Edição 2010.

BLESSMANN, J., “**O vento na engenharia estrutural**”, 1ª ed. Editora da Universidade UFRGS, 1995, Porto Alegre, RS.

CTBUH. **The Global Impact of 9/11 on Tall Buildings**. 2021. Disponível em: <<https://www.skyscrapercenter.com/9-11-global-impact>>. Acesso em: 20 set. 2021.

FERRARETO, A. J.; Mazzilli, E. N. C.; França, L. S. C., “**Wind-induced motion on tall buildings: a comfort criteria overview**”. J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 142, Elsevier. Abril, 2015.

LAMB S.; Kwok K. C. S.; Walton D., “**Occupant comfort in wind-excited tall buildings: motion sickness, compensatory behaviors and complains**”. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 119, Elsevier. Maio, 2013.

MIGUEL, L. F. F.; Fadel Miguel, L.F.; Riera, J.D.; Kaminski, J.J.; Menezes, R.C.R., “**Assessment of code recommendations through simulation of EPS wind loads along a segment of a transmission line**”. Engineering Structures 43, Elsevier. Junho, 2012.

NEWMARK, N. M., “**A method of computation for structural dynamics**”, Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959.

PAIVA TEIXEIRA, F. **Modelagem do comportamento estrutural estático e dinâmico e avaliação do conforto humano de edifícios de concreto armado**. 2015. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

PAZ, M.; HOOM KIM, Y. **Structural dynamics: Theory and Computation**. Sixth Edition. Switzerland: Springer, 2018.

PETERKA, J. A.; Shahid S., “**Design Gust Wind Speeds in the United States**”. J. Struct. Engrg., 124(2), 1998.

SARKISIAN, M.P., 2016. **Designing Tall Buildings Structure as Architecture**. Routledge, New York.

TONON ÁVILA, A. L. “**Desenvolvimento de uma Rotina Computacional para Determinação da Resposta Dinâmica de um Edifício Alto Submetido ao Vento Sinótico**”. 2019. 16 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

VALLIS, B. M.; Loredou-Souza, A. M.; Ferreira, V.; Nascimento, E. L., “**Classification and identification of synoptic and non-synoptic extreme wind events from surface observations in South America**”. J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 193, Elsevier. Agosto, 2019.

VIEZZER GIACOMAZZI, R. “**Controle de Vibrações de um Edifícios Alto Submetido a Vento através do uso de Amortecedor de Massa Sintonizado**”. 2020. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

## ANEXOS

## I – Parâmetros meteorológicos (NBR 6123 – Força devido ao vento em edificações)

Tabela 20 - Expoente p e parâmetro b

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

## II – Forma Modal e Coeficiente de Pressão Dinâmica (NBR 6123 – Força devido ao vento em edificações)

Tabela 19 - Parâmetros para a determinação de efeitos dinâmicos

Tipo de edificação	$\gamma$	$\zeta$	$T_1 = 1 / f_1$
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	

### III – Coeficiente de Amplificação dinâmica (NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações)

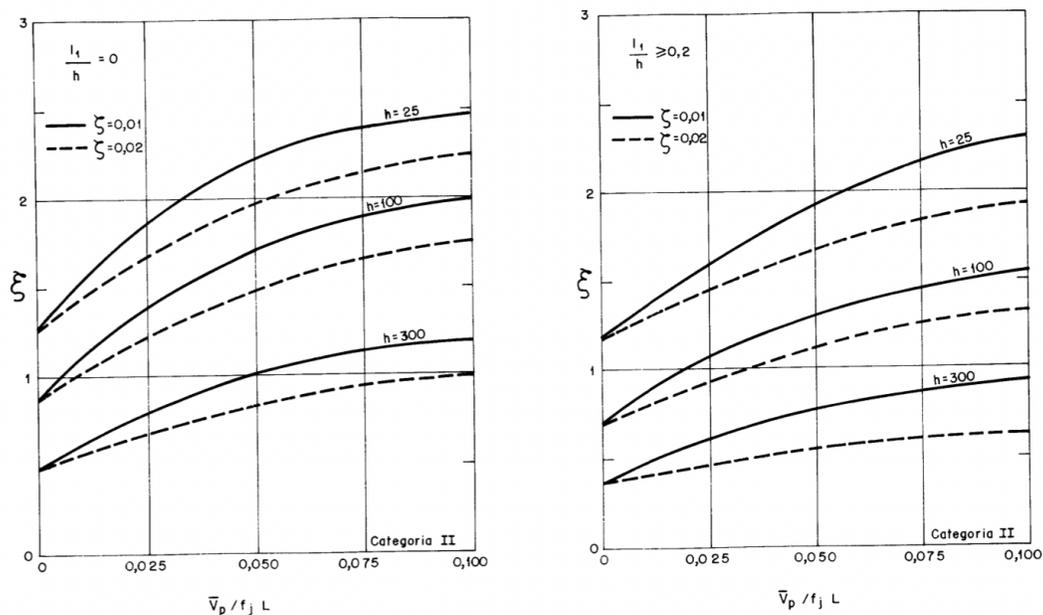


Figura 15 - Coeficiente de amplificação dinâmica,  $\xi$ , para terreno de categoria II ( $L = 1800$  m;  $h$  em metros)

### IV – Parâmetros meteorológicos para cargas estáticas (NBR 6123 – Força devido ao vento em edificações)

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos

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

V – Constantes de Exposição do Terreno ( ASCE 7 – 10 – Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures)

*In metric*

Exposure	$\alpha$	$z_g$ (m)	$\hat{\alpha}$	$\hat{b}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{b}$	c	$\ell$ (m)	$\bar{\epsilon}$	$z_{min}$ (m)*
<b>B</b>	7.0	365.76	1/7	0.84	1/4.0	0.45	0.30	97.54	1/3.0	9.14
<b>C</b>	9.5	274.32	1/9.5	1.00	1/6.5	0.65	0.20	152.4	1/5.0	4.57
<b>D</b>	11.5	213.36	1/11.5	1.07	1/9.0	0.80	0.15	198.12	1/8.0	2.13

\* $z_{min}$  = minimum height used to ensure that the equivalent height  $\bar{Z}$  is greater of  $0.6h$  or  $z_{min}$ .  
For buildings with  $h \leq z_{min}$ ,  $\bar{Z}$  shall be taken as  $z_{min}$ .