

2. O Vento e seu Efeito nas Estruturas

Denomina-se vento o movimento horizontal do ar. O ar quente e leve tende a subir, enquanto o frio e denso tende a ocupar o seu lugar. Portanto, o vento ocorre em função da diferença de temperatura nos diversos pontos da Terra, que, segundo Taranath (1988), varia conforme a incidência de raios solares e as diferentes propriedades térmicas dos solos e oceanos.

O comportamento do vento é em geral turbulento, composto de diversos redemoinhos, de diferentes tamanhos e características rotacionais. Estas características fazem com que o vento apresente variações bruscas de velocidade, denominadas rajadas. A variação de velocidade gradual, que ocorre ao longo de grandes períodos em função dos diferentes ciclos de energia solar não afeta consideravelmente as estruturas. Os picos de velocidade, que ocorrem em períodos curtos, por causa das rajadas, são importantes para a análise estrutural. Uma característica que dificulta a análise das cargas de vento é a velocidade da sua aplicação na estrutura, pois, em geral, considera-se que as sobrecargas aumentam lentamente, o que permite uma análise estática ou quase estática da estrutura. Já as cargas de vento variam de forma suficientemente rápida, provocando deslocamentos maiores que se considerarmos uma variação gradual, em virtude dos efeitos inerciais.

Mendis et al. (2007) afirmam que estruturas sensíveis ao vento devem ser analisadas de três formas:

(1) Impacto no entorno: quando o vento passa por uma estrutura, sofre alteração no seu movimento, e surgem componentes em diversas direções. Essas componentes podem afetar objetos no entorno, podendo causar danos a outras estruturas existentes, ou desconforto aos pedestres que passam próximo ao edifício.

(2) Cargas de vento aplicadas às fachadas: muitas estruturas possuem formas geométricas complexas, tornando-se difícil a definição da distribuição de carga nas fachadas. Nesses casos, é aconselhável fazer o teste de túnel de vento,

de forma a definir com exatidão a distribuição das pressões. Esta definição é importante na análise de efeitos locais, eliminando possíveis danos nos elementos de fechamento, como painéis e vidros.

(3) Cargas de vento aplicadas à estrutura com um todo: são as cargas principais, que definem o deslocamento da estrutura. Através desta análise é definido o sistema estrutural responsável por impedir o deslocamento lateral do edifício.

Neste estudo é analisado o terceiro item, que define a estabilidade da estrutura e seu comportamento dinâmico.

2.1. Variação do vento conforme a altura

A velocidade do vento varia conforme a altura, em função da rugosidade do terreno. Essa variação pode ser associada a um efeito de uma superfície no escoamento de um fluido, em que a viscosidade do fluido provoca uma força cortante atuando no sentido contrário ao movimento (força de atrito), quando este entra em contato com a superfície rugosa. Portanto, a velocidade do vento próxima à superfície é quase zero, e aumenta gradativamente. Assim como nos demais fluidos, a partir de certa altura ela se torna praticamente constante.

O tamanho e formato desta curva são função da rugosidade do terreno, não somente pela característica do relevo, como pela sua ocupação. Centros de grandes cidades, por exemplo, geram uma variação maior do que zonas rurais, conforme ilustrado na Figura 2.1.

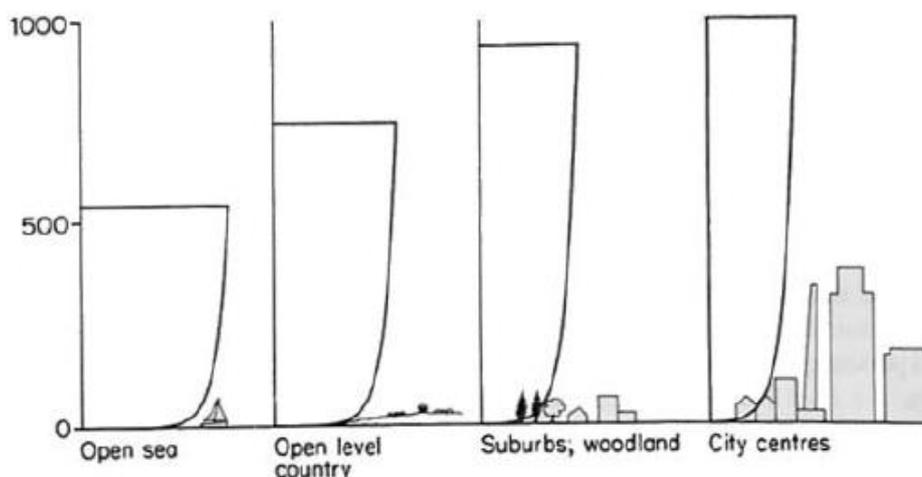


Figura 2.1 - Variação do vento conforme a altura (Mendis et al., 2007)

Estima-se que a altura da camada em que a topografia do terreno influencia a velocidade do vento é de aproximadamente 450m, e é denominada camada limite da atmosfera. Logo, a maioria das atividades humanas ocorre dentro dela.

Mendis et al. (2007) apresentam a seguinte expressão logarítmica para definir a variação da velocidade em função da altura:

$$\bar{V}_z = \frac{u^*}{0,4} \left[\log_e \left(\frac{z}{z_0} \right) + 5,75 \left(\frac{z}{z_g} \right) - 1,88 \left(\frac{z}{z_g} \right)^2 - 1,33 \left(\frac{z}{z_g} \right)^3 + 0,25 \left(\frac{z}{z_g} \right)^4 \right] \quad (2.1)$$

Onde:

\bar{V}_z é a velocidade do vento numa altura Z acima da superfície

u^* é a velocidade de atrito, sendo

$$u^* = \sqrt{\frac{\text{tensão de cisalhamento por atrito na superfície}}{\text{densidade atmosférica}}}$$

z_0 é o coeficiente de rugosidade do terreno

z_g é a altura da camada limite da atmosfera, sendo

$$z_g = \frac{u^*}{6 \times 10^{-4}}$$

Mendis et al. (2007) apresentam também em seu estudo a Tabela 2.1 com os coeficientes calculados para uma velocidade de 50m/s. Nesta tabela, percebe-se que todos os coeficientes usados para determinar a velocidade do vento variam conforme a rugosidade do terreno. Portanto, é necessário definir em que categoria o terreno se enquadra, para então determinar a pressão exercida pelo vento.

Tabela 2.1 Coeficientes para as diversas características do terreno (Mendis et al., 2007)

| Categoria do Terreno | Z_0 (m) | u^* (m/s) | Z_g (m) |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 0.002 | 1.204 | 2006 |
| 2 | 0.02 | 1.385 | 2308 |
| 3 | 0.2 | 1.626 | 2710 |
| 4 | 2 | 1.963 | 3272 |

Na norma brasileira NBR-6123 (1988), essa expressão é representada pelo fator S_2 , multiplicador da velocidade característica do vento, definido por:

$$S_2 = b F_{r,II} \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (2.2)$$

sendo z a altura acima da superfície do terreno, b e p parâmetros meteorológicos e $F_{r,II}$ o fator de rajada, retirados da Tabela 21 da norma, em função da classe de rugosidade do terreno e do período, apresentada aqui na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Coeficientes b , p e F_r (NBR 6123, 1988)

| Cat. | t(s) | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 45 | 60 | 120 | 300 | 600 | 3600 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| I | b | 1,10 | 1,11 | 1,12 | 1,13 | 1,14 | 1,15 | 1,16 | 1,17 | 1,19 | 1,21 | 1,23 | 1,25 |
| | p | 0,06 | 0,065 | 0,07 | 0,075 | 0,075 | 0,08 | 0,085 | 0,085 | 0,09 | 0,095 | 0,095 | 0,10 |
| II | b | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| | p | 0,085 | 0,09 | 0,10 | 0,105 | 0,11 | 0,115 | 0,12 | 0,125 | 0,135 | 0,145 | 0,15 | 0,16 |
| | F_r | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,87 | 0,84 | 0,82 | 0,77 | 0,72 | 0,69 | 0,65 |
| III | b | 0,94 | 0,94 | 0,93 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,89 | 0,87 | 0,86 | 0,85 |
| | p | 0,10 | 0,105 | 0,115 | 0,125 | 0,13 | 0,14 | 0,145 | 0,15 | 0,16 | 0,175 | 0,185 | 0,20 |
| IV | b | 0,86 | 0,85 | 0,4 | 0,84 | 0,83 | 0,83 | 0,80 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,71 | 0,68 |
| | p | 0,12 | 0,125 | 0,135 | 0,145 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,175 | 0,195 | 0,215 | 0,23 | 0,25 |
| V | b | 0,74 | 0,73 | 0,71 | 0,70 | 0,69 | 0,67 | 0,64 | 0,62 | 0,58 | 0,53 | 0,50 | 0,44 |
| | p | 0,15 | 0,16 | 0,175 | 0,185 | 0,19 | 0,205 | 0,22 | 0,23 | 0,255 | 0,285 | 0,31 | 0,35 |

2.2.

Movimento turbulento dos ventos

O ar se movimenta em geral de forma turbulenta. Isso ocorre porque a viscosidade do ar é muito baixa (aproximadamente 1/16 da viscosidade da água), fazendo com que qualquer movimento a uma velocidade acima de 1,3m/s seja, segundo Taranath (1988), turbulento. Neste tipo de movimento, as partículas se deslocam de forma desordenada, em todas as direções, diferente do movimento laminar, em que as partículas se deslocam de forma paralela à superfície.

Outro fator a ser considerado são os diversos obstáculos presentes na superfície do terreno, que introduzem componentes em diversas direções aleatoriamente, provocando turbulências. Essas rajadas possuem uma distribuição aleatória, com uma grande gama de amplitudes e frequências, variando em função do fluxo e dos obstáculos presentes na superfície.

Cargas de vento não são simplesmente harmônicas, e sim, um processo transiente. Desta forma, o ar se comporta de forma instável e aleatória, e deve ser estudado estatisticamente.

Edifícios altos são dinamicamente sensíveis à ação do vento. Portanto, no dimensionamento deste tipo de estrutura, é importante fazer uma análise do efeito das rajadas, e não considerar somente a velocidade principal.

Segundo Blessmann (1998), as rajadas possuem diferentes dimensões, definidas como comprimento de onda (λ), sendo essa uma medida linear, definida

como em que \bar{V} é a velocidade média do vento e f a frequência de incidência das rajadas.

Rajadas grandes, com $L/\lambda \ll 1$ (L é a dimensão característica da estrutura), envolvem a estrutura exercendo pressões nesta como um todo. Rajadas menores, com $L/\lambda \gg 1$, exercem pressões localizadas, sendo importantes somente para o dimensionamento dos elementos de fachada.

2.3. Análise estática para cargas de vento

Para a análise estática dos ventos, não se deve adotar as pressões de pico, uma vez que estas ocorrem raramente, e não podem ser aproximadas por uma carga estática. No entanto, também não se deve adotar somente a velocidade média, pois se estará depreciando a intensidade do carregamento. Para isso, são adotados coeficientes multiplicados à pressão principal. Estes coeficientes simulam tanto o efeito de rajada quanto o efeito da superfície.

Este modelo se mostra confiável quando se trata de pequenas estruturas. No entanto, não pode ser adotado para grandes estruturas, ou estruturas que apresentem uma resposta dinâmica significativa.

Na análise estática, a velocidade de projeto \bar{V}_z é usada para calcular as pressões atuantes na estrutura, através da equação:

$$\bar{q}_z = 0,613(\bar{V}_z)^2 \times 10^{-3} \quad (2.3)$$

onde:

$$\bar{V}_z = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (2.4)$$

sendo V_0 a velocidade básica do vento, S_1 o coeficiente que leva em conta o coeficiente do terreno, S_2 o coeficiente que considera a altura acima do nível do terreno e S_3 o coeficiente que considera o tipo de utilização da estrutura, seguindo a norma brasileira NBR6123 (1988).

O período de utilização da estrutura também influencia o valor da carga aplicada à estrutura. Segundo Blessmann (1998), a análise probabilística refere-se ao período de utilização da estrutura, partindo do princípio da recorrência. Por exemplo, se um edifício é projetado para uma vida útil de 50 anos, deve-se buscar

a maior velocidade do vento ocorrida no local da edificação nos últimos 50 anos, assumindo que não ocorrerão velocidades maiores nos próximos 50 anos. Quanto maior a vida útil de uma estrutura, maior será a velocidade característica.

2.4. Resposta dinâmica da estrutura

Quando o vento atinge um objeto, parte de sua energia se transfere a este corpo (Taranath, 1988). A quantidade de energia transferida é chamada de fator de resposta de rajada. Quanto mais esbelta for a estrutura, maior será a sua resposta dinâmica ao vento.

Ao sofrer a ação de uma rajada, o objeto se desloca primeiro no sentido da ação do vento, e, em seguida, no sentido oposto. Esse movimento se repete, diminuindo sua amplitude, até que atinja novamente o estado de repouso, caracterizando assim um comportamento dinâmico. O tempo que a estrutura leva para voltar à sua posição inicial é denominado período de oscilação. Denomina-se frequência de resposta o inverso do período.

Os edifícios não são igualmente sensíveis às rajadas, uma vez que cada estrutura possui a sua própria frequência natural. Quanto mais flexível, menor é a frequência natural da estrutura, portanto, mais sensível às cargas dinâmicas. Estruturas com frequência natural menor que 1 Hz são consideradas flexíveis, segundo a NBR 6123 (1988), e devem ser submetidas a uma análise dinâmica sob cargas de vento.

Quando a frequência da rajada se aproxima da frequência natural da estrutura, ocorre o efeito de ressonância, onde aparecem os maiores deslocamentos. Se o tempo de duração da rajada for muito maior que o período de oscilação da estrutura, o vento pode ser considerado uma carga estática.

Segundo Mendis et al (2007), movimentos induzidos pelo vento agem majoritariamente nos três primeiros modos de vibração, longitudinal e transversal à ação do vento, e torsional, em torno do eixo vertical, conforme ilustra a Figura 2.2.

A resposta longitudinal da estrutura à ação do vento é a componente principal. Este deslocamento pode ser definido com bastante precisão pela soma da componente da velocidade principal (tida como estática) ao efeito das rajadas, conforme apresentado anteriormente.

No caso de estruturas assimétricas, seja na rigidez ou no carregamento, podemos encontrar modos de vibração complexos, apresentando flexo-torção para frequências mais baixas.

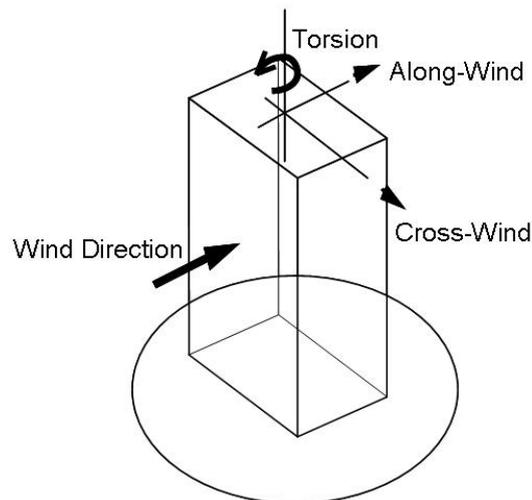


Figura 2.2 - Modos de vibração da estrutura (Mendis et al., 2007)

2.5. Análise dinâmica para cargas de vento

A carga resultante do vento consiste na soma da velocidade média do vento com o efeito de rajada. Estas duas parcelas são analisadas separadamente, e o efeito total é resultado da sobreposição dos efeitos, ou seja:

$$V(z, t) = \bar{V}(z) + v(z, t) \quad (2.5)$$

A segunda parcela da equação representa a carga flutuante aplicada à estrutura. Esta carga resulta do efeito de diversas rajadas, com tamanhos e intensidades diferentes.

2.5.1. Velocidade média do vento

A velocidade básica do vento é definida como “velocidade de uma rajada de 3s, excedida em média uma vez em 50 anos, a 10 m acima do terreno, em campo aberto e plano”, NBR 6123 (1988, p.5). Esta velocidade é definida conforme a localização da edificação, através do mapa de isopletas, dado em *m/s* e apresentado na Figura 2.3.

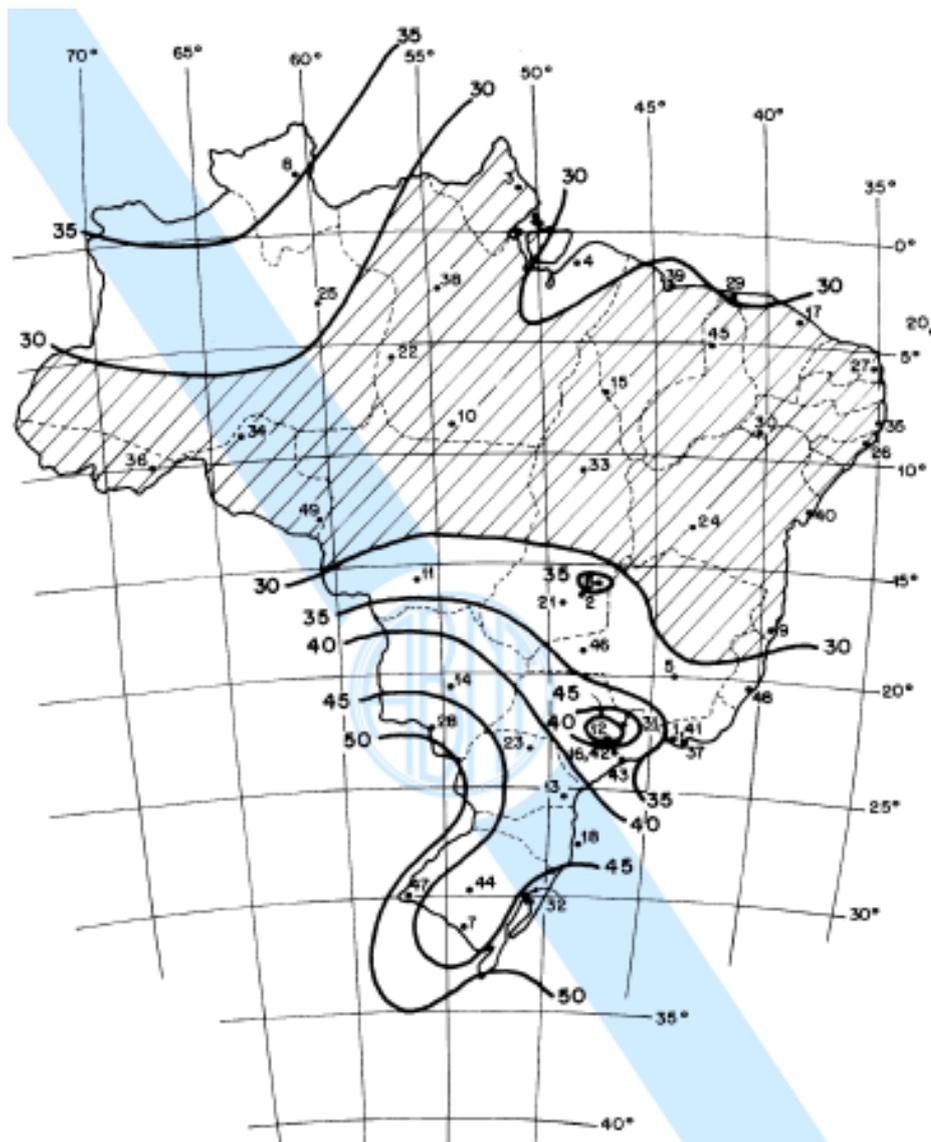


Figura 2.3 - Mapa de isopletas da velocidade básica do vento V_0 (NBR 6123, 1988)

A partir da velocidade básica, define-se a velocidade de projeto (\bar{V}_p):

$$\bar{V}_p = 0,69V_0S_1S_3 \quad (2.6)$$

sendo S_1 e S_3 os coeficientes definidos anteriormente, que dependem do tipo de terreno e da utilização da estrutura, respectivamente.

A velocidade em função da altura é, portanto:

$$\bar{V}_z = b\bar{V}_p \left(\frac{z}{10} \right)^p \quad (2.7)$$

Os parâmetros b e p são definidos para um período de 600s, conforme a Tabela 21 da NBR 6123 (1988).

2.5.2. Parcela flutuante da velocidade do vento

As rajadas de vento se comportam de forma aleatória, com diferentes dimensões e frequências. Portanto, não há como alcançar resultados com precisão através de um estudo determinístico. A melhor maneira de estudá-las é através de ferramentas estatísticas.

Para definir a parcela flutuante do vento, é necessário conhecer os conceitos apresentados a seguir.

2.5.2.1. Função periódica

Define-se função periódica como aquela cujo valor se repete após um determinado período fundamental T_1 , ou seja, $x(t) = x(t \pm T_1)$, como ilustra a Figura 2.4.

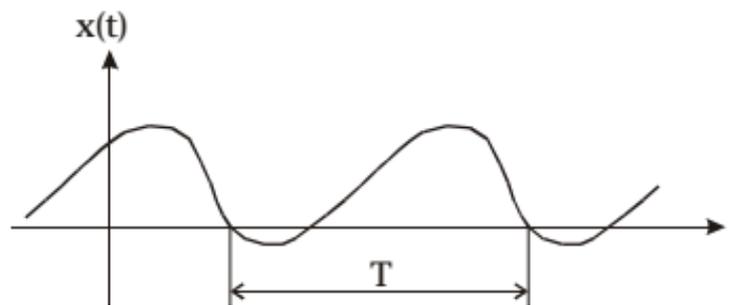


Figura 2.4 - Função periódica (Blessmann, 1998).

Em geral, uma função periódica pode ser representada pela série de Fourier da forma:

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \omega_1 t \quad (2.8)$$

onde:

$$a_0 = \frac{1}{T_1} \int_t^{t+T_1} v(t) dt \quad (2.9)$$

$$a_n = \frac{2}{T_1} \int_t^{t+T_1} v(t) \cos \omega_1 t dt \quad (2.10)$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_t^{t+T_1} v(t) \text{sen} \omega_1 t dt \quad (2.11)$$

Segundo Morais (2014), para uma função com média zero, tem-se o processo representado pela integral de Fourier:

$$v(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \text{sen} \omega t d\omega \quad (2.12)$$

As componentes da transformada de Fourier são:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \cos \omega t dt \quad (2.13)$$

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \text{sen} \omega t dt \quad (2.14)$$

Essas equações também podem ser descritas na forma complexa. Considerando $X(\omega) = A(\omega) - B(\omega)$, o par de transformadas de Fourier é definido por:

$$x(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.15)$$

$$v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.16)$$

A parcela variável da velocidade do vento é um efeito periódico, de média zero. Pode, portanto, ser descrita pela série de Fourier apresentada na equação 2.8.

O nível de turbulência do vento pode ser medido pelo seu desvio padrão, que define a variação dos valores de uma série em torno de sua média. Este valor é obtido da seguinte equação:

$$\sigma_v = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [v(t) - \bar{v}] dt \right\}^{1/2} \quad (2.17)$$

2.5.2.2. Espectro de potência do vento

Blessmann (1998) define o espectro de potência de um fenômeno aleatório como a distribuição de energia contida nesse fenômeno para as diversas frequências. Segundo Holmes (2007), o espectro de potência define a contribuição da parcela referente a cada frequência para a variância da série, na forma:

$$\sigma_v^2 = \int_0^{\infty} S^v(f) df \quad (2.18)$$

Para a análise estrutural, os espectros mais utilizados são os definidos por Davenport, von Kármán, Harris, Kaimal e Simiu (ver Figura 2.5), conforme apresentado em Beça (2010). Esses espectros são definidos através de medidas de velocidades do vento em diversas alturas e diferentes tipos de terrenos. Neste estudo considera-se o espectro de Davenport, uma vez que este é o mais encontrado na literatura, e o espectro de Kaimal, que, segundo Morais (2014), fornece os melhores resultados para baixas frequências.

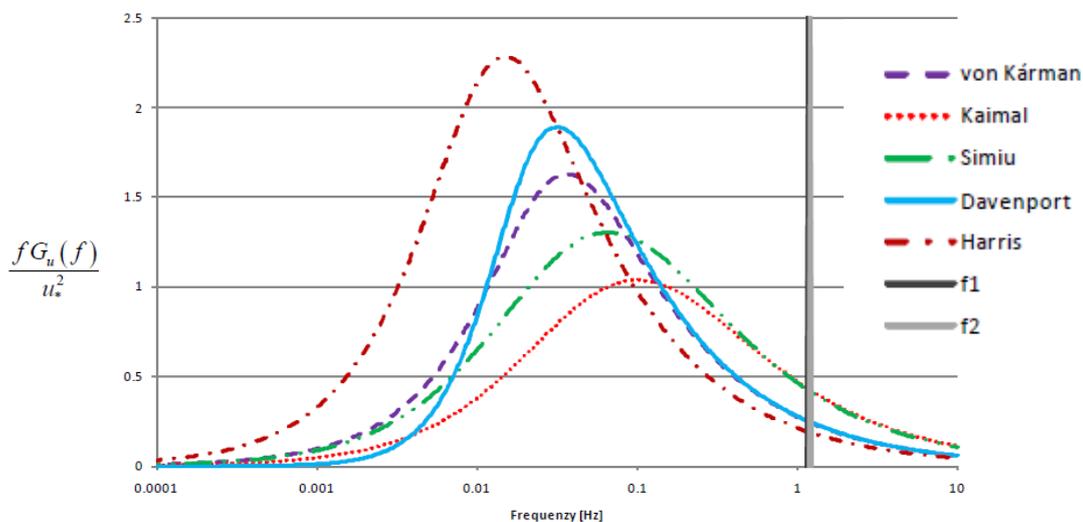


Figura 2.5 - Comparação de diversos espectros de potência (Beça, 2010)

2.5.2.2.1. Espectro de potência de Davenport

O espectro de Davenport é descrito pela expressão 2.19 (Morais, 2014):

$$\frac{f S^v(f)}{u_*^2} = 4 \frac{X_1^2}{(1 + X_1^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (2.19)$$

sendo:

X_1 a frequência adimensional, definida por $X_1 = \frac{1200f}{V_0}$;

f a frequência em Hz;

$S^v(f)$ a densidade espectral da componente longitudinal da turbulência na frequência f ;

u^* é a velocidade de fricção.

A velocidade de fricção u^* é definida pela expressão $u_* = \frac{kV_0}{\ln\left(\frac{z_0}{z_0}\right)}$, onde:

k representa a constante de Kármán, com o valor de 0,4;

z_0 é o comprimento de rugosidade, definido na NBR 6123 [3];

V_0 é a velocidade média do vento a 10m acima do nível do terreno, em m/s.

Segundo Lanza (2003), o espectro de potência de Davenport não representa bem os valores obtidos em baixas frequências e não considera a influência da cota z . No entanto, a expressão é de fácil integração e é usada largamente na engenharia, sendo indicada inclusive nas normas norte-americana (ANSI A58.1) e canadense (NBCC). Chavez (2006) afirma ainda que o espectro de Davenport pode ser conservadoramente assumido válido para frequências acima de 0,2Hz.

2.5.2.2.2. Espectro de potência de Kaimal

Morais (2014) afirma que o espectro de potência de Kaimal é mais adequado para o estudo de edifícios altos, uma vez que este considera o efeito da altura “ z ” quando a multiplica pela frequência a fim de definir a frequência adimensional “ x ”. Tem-se, portanto, a seguinte expressão para o espectro de potência de Kaimal:

$$\frac{f S^v(f, z)}{u_*^2} = \frac{200X_1}{(1 + 50X_1)^{\left(\frac{5}{3}\right)}} \quad (2.20)$$

onde: $X_1(f, z) = \frac{fz}{V_z}$ e $u_* = \frac{kV_z}{\ln(z/z_0)}$.

2.5.3. Método dos ventos sintéticos

O método dos ventos sintéticos, proposto por Franco (1993), consiste na soma de harmônicos de diversas frequências, com fases aleatoriamente escolhidas, de forma a definir a parcela flutuante da velocidade do vento.

Segundo Franco, apud Lanza (2003), são definidos 11 harmônicos, sendo um deles referente à frequência ressonante da estrutura. Os demais harmônicos são definidos por múltiplos e submúltiplos de razão dois, em relação à frequência de referência. A amplitude de cada um desses harmônicos é obtida através do espectro de potência. A cada um desses harmônicos é aplicado um ângulo de fase aleatório, que somados resultam na parcela flutuante do vento em função do tempo.

2.5.3.1. Sistematização do método dos ventos sintéticos para definição das cargas de vento aplicadas ao edifício

Para a definição das cargas de vento aplicadas na análise dinâmica do edifício, segue-se a metodologia apresentada em Lanza (2003).

Conforme visto anteriormente, a componente variável da carga do vento p' pode ser representada por uma série de Fourier da forma:

$$p' = \sum_{k=1}^n C_k \cos\left(\frac{2\pi}{T_r r_k} t - \theta_k\right) \quad (2.21)$$

onde:

$$C_k = \sqrt{2 \int S(f) df}$$

$$r_k = 2^{k-r}$$

sendo r é o número do harmônico relacionado ao primeiro modo de vibração da estrutura, e T_r , o período referente a esse modo de vibração.

A amplitude de cada um dos harmônicos é escrita na forma:

$$p'_k = c_k p' \quad (2.22)$$

Sendo c_k (2.23)

$$c_k = \frac{C_k}{\sum_{k=1}^m C_k}$$

Lazanha (2003) afirma ainda que, quando são usados somente 11 harmônicos, é necessário corrigir o valor de c_k para a componente referente à ressonância. Portanto, são propostas as seguintes alterações para c_{r-1} , c_r e c_{r+1} :

$$c'_r = \frac{c_r}{2} \quad (2.24)$$

$$c'_{r-1} = c_{r-1} + \frac{c_r}{4} \quad (2.25)$$

$$c'_{r+1} = c_{r+1} + \frac{c_r}{4} \quad (2.26)$$

Para as demais frequências, teremos que c_k permanece igual a igual a c_k .

Em um novo estudo, Franco e Medeiros (2011) identificaram que uma estrutura submetida a cargas de ventos, definidas através do método dos ventos sintéticos, tem sua resposta dinâmica reduzida com o aumento do número de harmônicos, n . Portanto, foi desenvolvido um novo critério para o cálculo de c_k , representado pela equação 2.27.

$$c_k = \frac{C_k}{\sqrt{6,125 \sum_1^n C_k^2}} \quad (2.27)$$

Os autores afirmam também, que utilizando apenas os 11 primeiro harmônicos, a modificação no cálculo de c_k não apresenta grandes diferenças. Portanto, neste estudo foi adotado o cálculo de c_k do estudo original.

O valor de p' é a diferença entre a pressão estática e a pressão de pico, logo:

$$p'(z) = q_{p(z)} - \bar{p}(z) \quad (2.28)$$

A pressão estática \bar{p} é definida por:

$$\bar{p}(z) = 0,613 v_{600}(z)^2 \quad (2.29)$$

A pressão de pico q_p é:

$$q_p(z) = 0,613 v_3(z)^2 \quad (2.30)$$

A velocidade média, definida para um período de 600s na cota “z”, V_{600} , e a velocidade de pico, pra um período de 3s na mesma cota, V_3 , são definidos conforme a lei de potência proposta pela NBR 6123 (1988), em que:

$$v_{600} = 0,69b_{600}V_o \left(\frac{z}{10}\right)^{p_{600}} \quad (2.31)$$

$$v_3 = b_3V_o \left(\frac{z}{10}\right)^{p_3} \quad (2.32)$$

Os valores de p e b , apresentados anteriormente, são obtidos da Tabela 2.2 para um período de 3 e 600 segundos, respectivamente.

Tem-se então a pressão flutuante definida pela seguinte expressão:

$$p_d(t, z) = \sum_{k=1}^n p'(z)c'_k \cos(2\pi f_k t - \theta_k) \quad (2.33)$$

sendo f_k a frequência variando em torno da frequência natural da estrutura e θ_k um ângulo de fase aleatório referente a essa frequência.

Tem-se assim a carga de vento total atuando na estrutura:

$$q(t, z) = C_a \left(\bar{p}(z) + \sum_{k=1}^n p'(z)c_k \cos(2\pi f_k t - \theta_k) \right) \quad (2.34)$$

em que C_a é o coeficiente de arrasto definido conforme NBR6123 (1988).

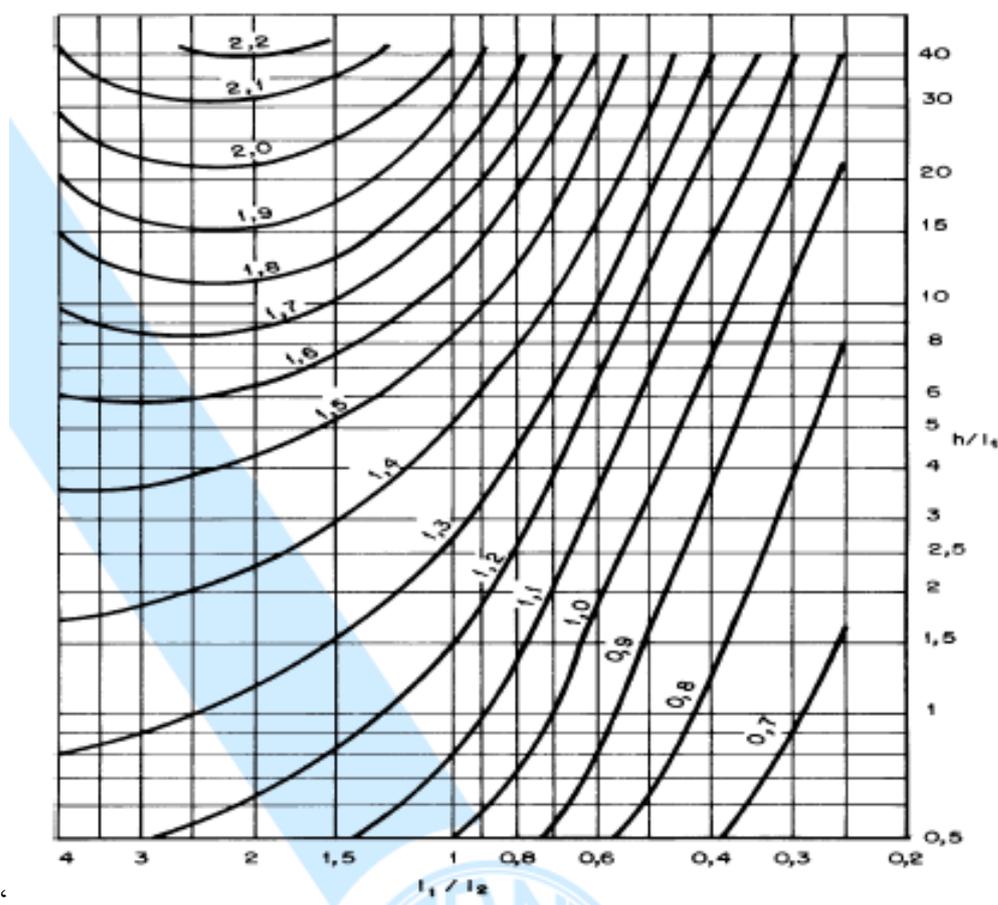


Figura 2.6 - Coeficiente de arrasto (NBR 6123, 1988)

2.6.

Definição das cargas atuantes na estrutura em estudo

Nesse estudo analisa-se um edifício hipotético com 172,8m de altura, e dimensões 45x32m em planta. O edifício tem utilização comercial, localizado na cidade do Rio de Janeiro, em um terreno de categoria II, definida pelos critérios da NBR 6123 (1988).

Seguindo os critérios desta norma, estabeleceram-se a algumas constantes necessárias para a definição das cargas de vento, apresentadas na Tabela 2.3.

Os carregamentos são determinados em cinco alturas diferentes, (36,00m; 72,00m; 108,00m; 144,00m e 172,80m) de forma a seguir a variação da carga de vento conforme a altura (z) do edifício.

Tabela 2.3 - Constantes para definição do carregamento de vento

| | |
|----------------|-------|
| v_0 (m/s) | 35,00 |
| Ca | 1,4 |
| b600 | 1,00 |
| p600 | 0,15 |
| Fr,ii600 | 0,69 |
| b3 | 1,00 |
| p3 | 0,085 |
| S1 | 1,00 |
| S2,600_cat. II | 0,69 |
| S2,3_cat. II | 1,00 |
| S3 | 1,00 |
| V10(m/s) | 24,15 |
| u^* | 1,95 |

Como apresentado mais adiante, a frequência natural referente ao primeiro modo de vibração da estrutura varia para as diversas configurações estruturais adotadas neste estudo. No entanto adota-se como referência 0,18Hz, de forma a exemplificar o carregamento adotado no modelo de cálculo. Os harmônicos são calculados para 11 frequências, variando de 0,0028 Hz a 5,76 Hz, sendo múltiplos e submúltiplos de razão dois da frequência natural.

As Figuras de 2.7 a 2.11 apresentam os resultados obtidos usando o espectro de potência de Davenport para as diversas alturas “z”. As Figuras de 2.12 a 2.16 apresentam os resultados obtidos usando o espectro de potência de Kaimal para as diversas alturas “z”.

2.6.1.

Carregamento de vento para o espectro de potência de Davenport

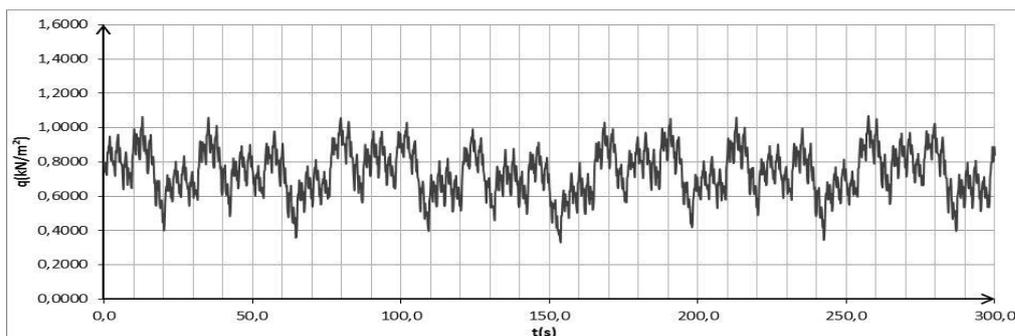


Figura 2.7 - Carga de vento segundo o espectro de Davenport para $z=36,0\text{m}$

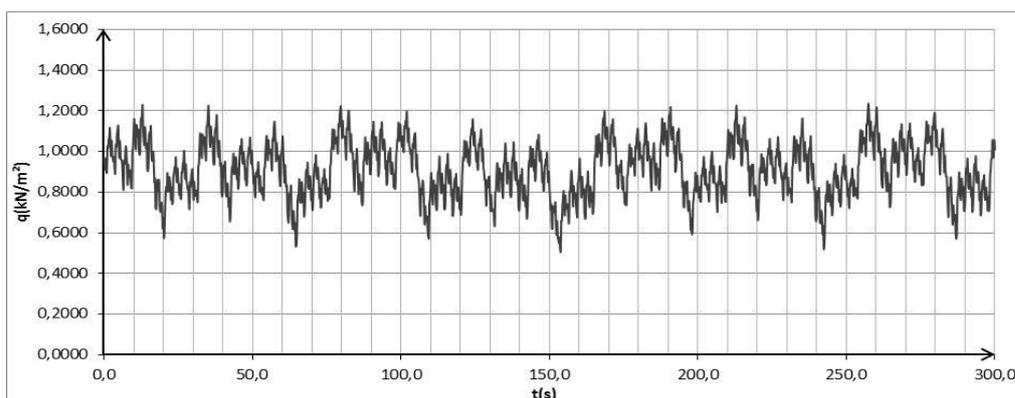


Figura 2.8 - Carga de vento segundo o espectro de Davenport para $z=72,0\text{m}$

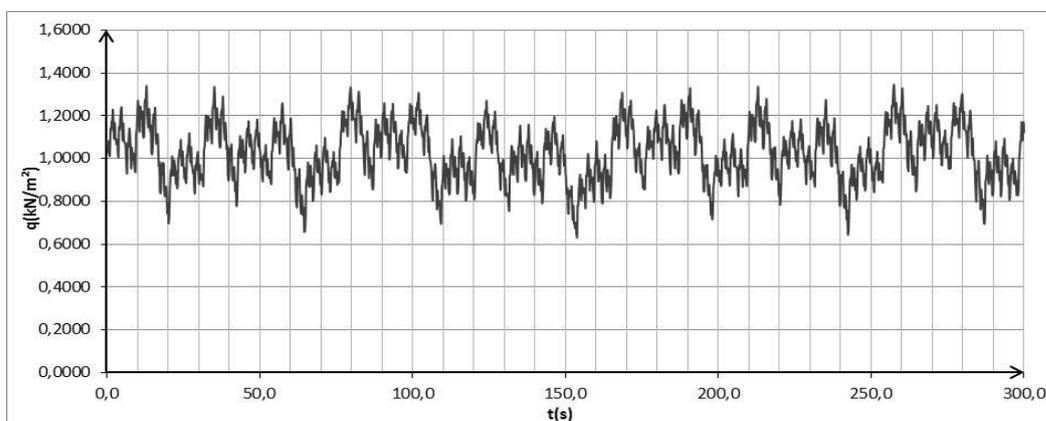


Figura 2.9 - Carga de vento segundo o espectro de Davenport para $z=108,0\text{m}$

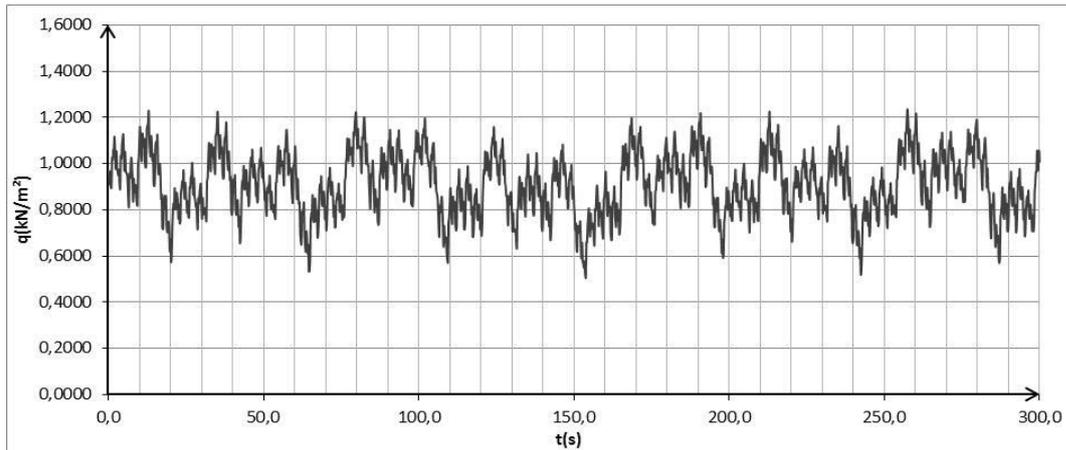


Figura 2.10 - Carga de vento segundo o espectro de Davenport para $z=144,0\text{m}$

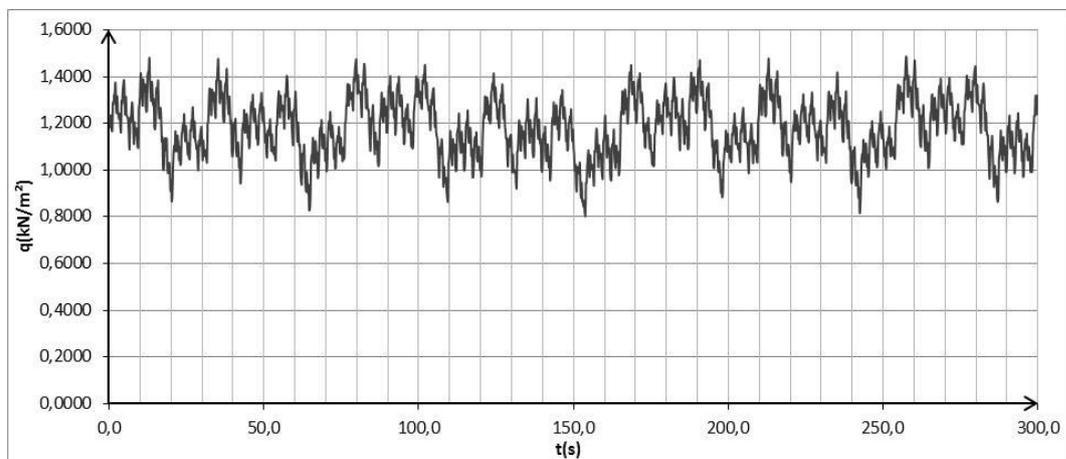


Figura 2.11 - Carga de vento segundo o espectro de Davenport para $z=172,8\text{m}$

2.6.2. Carregamento de vento para o espectro de potência de Kaimal

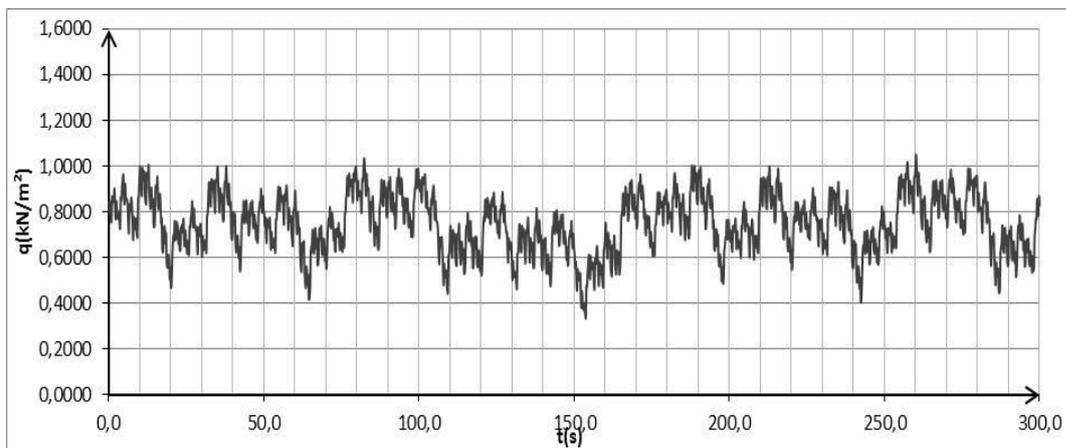
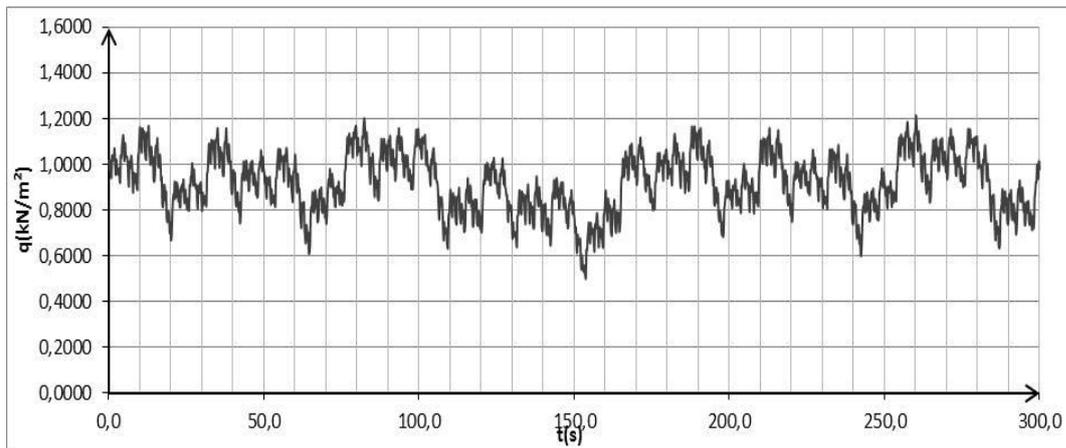
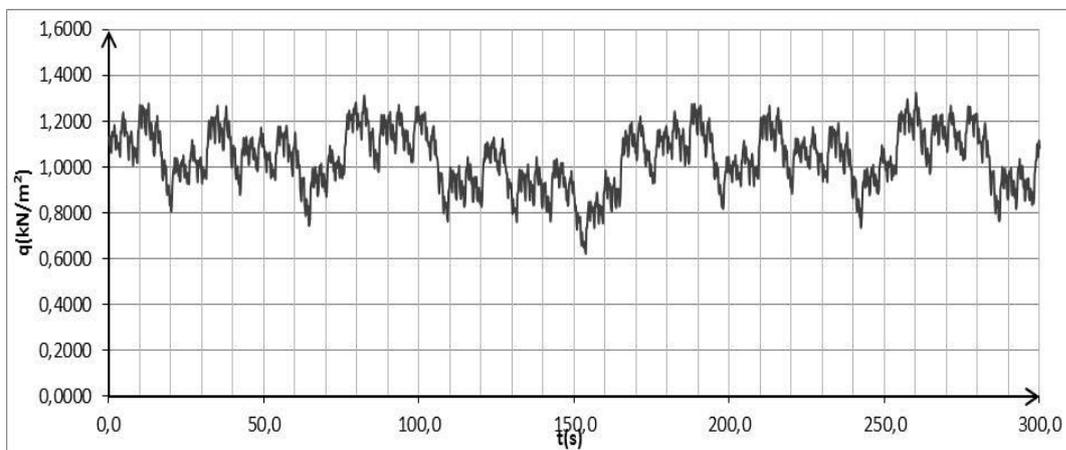
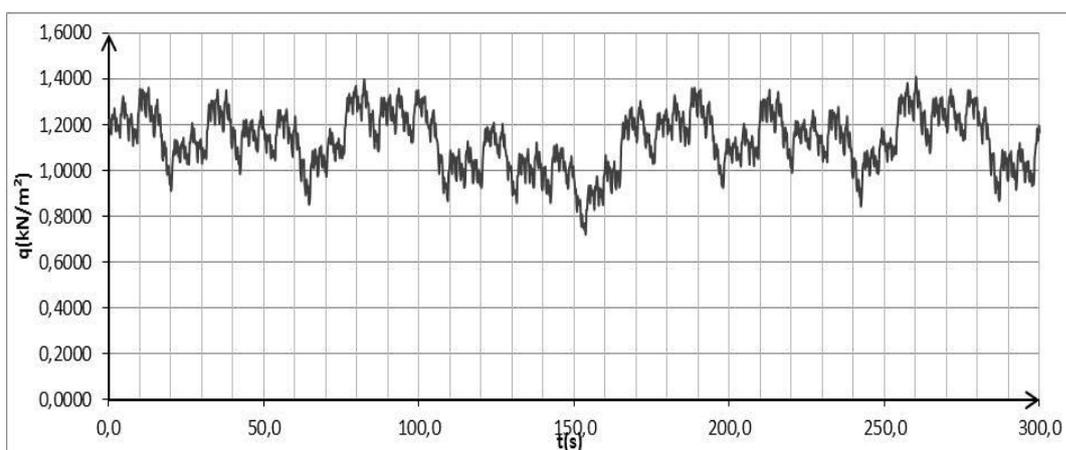


Figura 2.12 - Carga de vento segundo o espectro de Kaimal para $z=36,0\text{m}$

Figura 2.13 - Carga de vento segundo o espectro de Kaimal para $z=72,00\text{m}$ Figura 2.14 - Carga de vento segundo o espectro de Davenport para $z=108,00\text{m}$ Figura 2.15 - Carga de vento segundo o espectro de Kaimal para $z=144,00\text{m}$

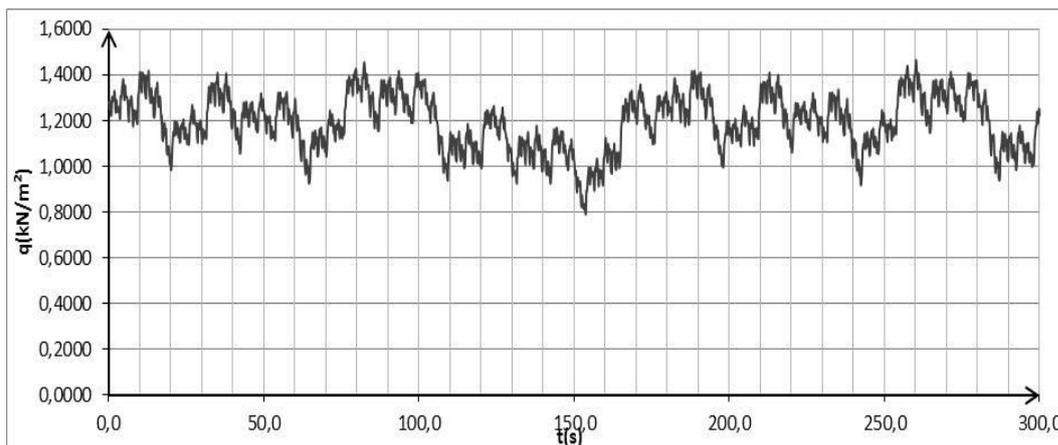


Figura 2.16 - Carga de vento segundo o espectro de Kaimal para $z=172,80\text{m}$

2.7.

Demais efeitos provocados pelo vento

2.7.1.

Efeito de vórtices

Diversas estruturas, quando submetidas a cargas de vento, apresentam deslocamentos na direção transversal a este fluxo. Isso ocorre em função do desprendimento de vórtices, sendo mais significativo nos casos em que a estrutura possui pouca capacidade de amortecimento.

Segundo Mendis et al. (2007), ao atravessar um edifício, o fluxo do vento se separa da estrutura, ao invés de contornar a sua fachada. O espaço que surge entre a fachada e o fluxo do vento provoca uma pressão negativa, que resulta em redemoinhos, conforme ilustra a Figura 2.17. Esses redemoinhos não surgem simultaneamente nas duas fachadas opostas, e com isso a estrutura fica submetida a uma pressão no sentido transversal ao do fluxo de vento. Esta pressão faz com que a estrutura se desloque, provocando o surgimento de vórtices na face oposta. Desta forma, a pressão transversal exercida na estrutura se torna periódica, cada vez atuando em um lado.

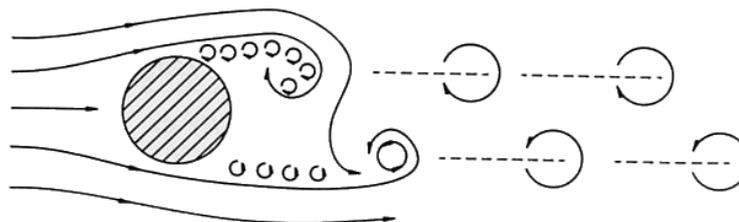


Figura 2.17 - Efeito de desprendimento de vórtices (Mendis et al., 2007)

Se a frequência natural da estrutura coincidir com a frequência de desprendimento dos vórtices, pode ocorrer ressonância, levando a grandes deslocamentos, e, em alguns casos, até mesmo o colapso da estrutura. A NBR 6123 (1988) apresenta a seguinte expressão para definição da velocidade crítica V_{cr} :

$$V_{cr} = \frac{fL}{S_r} \quad (2.35)$$

onde f é a frequência natural da estrutura, L é a dimensão característica e S_r é o número de Strouhal, definido como $S_r=0,15$ para estruturas retangulares.

A norma afirma ainda que, como a velocidade do vento varia ao longo da altura, o mesmo ocorrerá com a frequência de desprendimento de vórtices. Isso diminui sensivelmente os efeitos sobre a estrutura, uma vez que não há sincronismo na força excitadora.

2.7.2. Efeito de martelamento

Segundo Blessmann (1998), o martelamento ocorre quando uma estrutura está situada a sota-vento de outra, na região conhecida como esteira. O edifício será “martelado”, sendo atingido pelos turbilhões gerados pela passagem do vento nas edificações a barlavento. Esses turbilhões tem uma frequência predominante, atingindo a estrutura compassadamente. Se a frequência desses turbilhões coincidir com a frequência natural da estrutura, os efeitos provocados podem atingir grandes valores.

Além da frequência, outros dois fatores que influenciam o martelamento são a intensidade da turbulência do vento e a rugosidade do terreno em que as edificações estão localizadas. Quando a turbulência do vento é pequena os vórtices se desprendem cadenciadamente, gerando assim um espectro de energia estreito, com um maior efeito de martelamento sofrido pelo edifício em questão. Para fortes turbulências, os desprendimentos de vórtices ocorrerão em frequências variadas, atingindo a estrutura sem um cadenciamento, alterando pouco a sua resposta.

Em relação ao terreno, quanto mais rugoso, menor será o efeito de martelamento sentido, uma vez que a rugosidade provoca diversos desprendimentos de vórtices, atingindo a estrutura em tempos e direções variadas.

Portanto, estruturas em superfícies planas tendem a sofrer mais o efeito do martelamento do que estruturas situadas em centros de grandes cidades, por exemplo.

2.7.3. Efeito de golpe

O efeito de golpe ocorre em estruturas leves e flexíveis, com pouco amortecimento. Ferreira (2008) afirma que este fenômeno está associado à instabilidade dinâmica de um corpo elástico, sujeito a grandes pressões nas faces laterais.

2.7.4. Efeito de galope

Este fenômeno é causado pela mudança de ação do vento devido ao movimento da estrutura e resulta em um amortecimento aerodinâmico negativo. Este efeito ocorre subitamente quando o vento atinge certa velocidade crítica, denominada velocidade de disparo. Esta velocidade varia de forma linear com o amortecimento da estrutura.

As principais características do efeito de galope são: intensidade violenta, aumento da amplitude de vibração com a velocidade do vento, e movimento oscilatório com direção perpendicular à velocidade do vento.

2.8. Conforto dos usuários

Cargas de vento são importantes especialmente em relação ao conforto do usuário. Seus deslocamentos podem não ser percebidos por quem vê de fora, mas podem criar um grande desconforto e uma sensação de insegurança para quem está ocupando os andares mais altos de um edifício. Esta percepção se deve à parcela flutuante da carga de vento. Deslocamentos estáticos são imperceptíveis para o usuário, mas a vibração provocada pela parcela dinâmica provoca desconforto. Todos os edifícios possuem algum nível de vibração, o desafio é manter as vibrações a um nível imperceptível para o ser humano.

Blessmann (1998) afirma que, no caso do conforto dos usuários, o tempo de recorrência considerado é menor do que para o estudo de estados limites últimos. Enquanto na definição da carga estática do vento o tempo de recorrência é de 50 anos, para a análise da percepção humana estudos indicam a utilização de um ano como um tempo de recorrência aceitável. A NBR 6123(1988) conservadoramente indica o uso de 10 anos para o período de recorrência.

A definição de valores limites para o conforto dos usuários é uma questão complexa, uma vez que a percepção da vibração varia para cada indivíduo. Diversos estudos foram feitos de forma a definir limites aceitáveis para as vibrações de edifícios.

Blessmann (1998) apresenta o estudo de Chang, que parte da equação de movimento de uma partícula para definir a aceleração máxima da estrutura. A Figura 2.18 apresenta os níveis de percepção humana em relação à frequência e à amplitude do movimento, definidos por Chang.

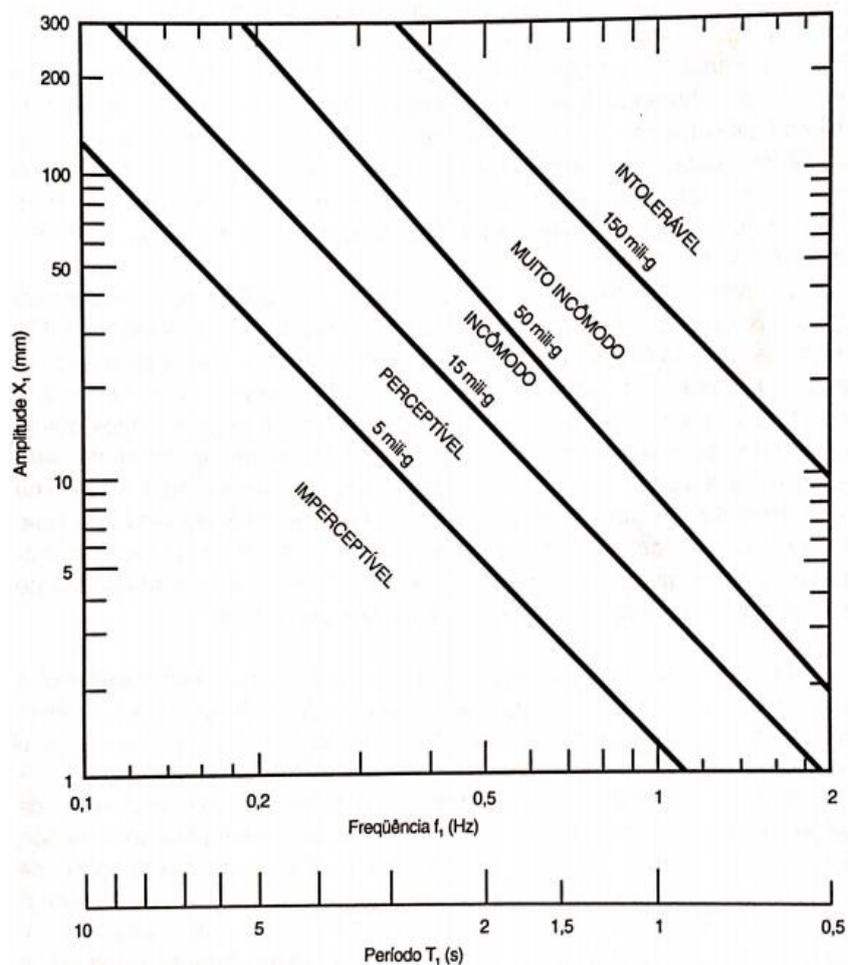


Figura 2.18 - Graus de conforto, Segundo Chang (Blessmann, 1998)

Kareem et al. (1999) afirmam que, nos Estados Unidos, o padrão utilizado é de 10 a 15 mili-g para edifícios residências e 20 a 25 mili-g para edifícios comerciais. Este critério é definido em função da aceleração de pico.

Mendis et al. (2007) apresentam em seu trabalho a Tabela 2.4, com valores de aceleração sensíveis aos seres humanos, para frequências entre 0,1 e 1 Hz, valores geralmente encontrados em edifícios altos.

Tabela 2.4 - Percepção humana às vibrações (Medis et al., 2007)

| NÍVEL | ACELERAÇÃO (m/s ²) | EFEITO |
|-------|-----------------------------------|---|
| 1 | <0,05 | - Humanos não percebem o movimento |
| 2 | 0,05 – 0,1 | - Pessoas sensíveis percebem a vibração - Objetos pendurados pode se mover sutilmente |
| 3 | 0,1 – 0,25 | - A maioria das pessoas perceberá o movimento - Pode afetar o trabalho de escritório |
| 4 | 0,25 – 0,4 | - Trabalho de escritório se torna difícil, quase impossível |
| 5 | 0,4 – 0,5 | - Pessoas percebem fortemente o movimento - Difícil andar naturalmente - Pessoas em pé podem se desequilibrar |
| 6 | 0,5 – 0,6 | - A maioria das pessoas não conseguem suportar a vibração e não conseguem andar naturalmente |
| 7 | 0,6 – 0,7 | As pessoas não conseguem andar, nem tolerar a vibração |
| 8 | >0,85 | - Objetos começam a cair e pessoas podem se machucar |