

6

Ação do vento segundo a NBR 6123/88

A turbulência atmosférica e a gerada por edificações ou outros obstáculos situados na proximidade de uma edificação causam alterações na velocidade média do vento, originando efeitos dinâmicos que se superpõem aos efeitos estáticos causados pela velocidade média.

Esquemáticamente, Blessmann (1989) classifica os efeitos causados pela ação do vento como efeitos estáticos, devidos à ação estática do vento, considerando sua velocidade média; e efeitos dinâmicos, causados ou pela energia cinética contida na turbulência atmosférica; ou pela turbulência gerada em edificações ou obstáculos situados a

barlavento da edificação em estudo; ou pelo desprendimento cadenciado de vórtices; ou ainda por instabilidade aerodinâmica por galope ou drapejamento.

Carril Júnior (2000) quando estuda os efeitos dinâmicos em torres treliçadas para telecomunicações afirma que os possíveis esforços que podem estar atuando nesse tipo de estrutura são os esforços pseudo estáticos correspondentes à parte média do vento e os esforços dinâmicos decorrentes da parte flutuante do vento. O cálculo do efeito dinâmico do vento sobre estruturas esbeltas, conforme Carril Júnior (2000), é composto de três estágios básicos: a descrição do vento, a descrição das propriedades físicas e aerodinâmicas da estrutura e a combinação desses fatores na determinação da resposta da estrutura.

Galindez (1979) relata que a resposta ressonante provocada pela turbulência atmosférica foi estudada primeiro em relação a estruturas aeronáuticas por Liepmann e que para a aplicação dos conceitos desenvolvidos por ele às estruturas civis foi necessário desenvolver modelos representativos do vento turbulento nas proximidades do terreno. Um modelo foi proposto por Davenport em 1961 para avaliar a resposta de edifícios altos na direção da velocidade média.

Particularmente, a consideração dos efeitos dinâmicos e de vibração excessiva das estruturas expostas à ação do vento está descrita no item 9 da NBR 6123/88 – Forças devidas ao vento em edificações. O objetivo da NBR 6123/88 é fixar as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo.

As recomendações existentes na NBR 6123/88 para a análise dinâmica levam em conta a variação no módulo e na orientação da velocidade média do vento. A velocidade média produz efeitos meramente estáticos na estrutura, enquanto que as flutuações ou rajadas produzem oscilações importantes, “especialmente em edificações altas e esbeltas”. Esse modelo de análise dinâmica de estruturas altas é destacada por Simiu; Scalan (1996) e Belvins (1977) que o associa à necessidade da análise de vibrações induzidas por carregamento flutuante, APUD LAZANHA (2003). Blessmann (2005) esclarece que o processo que a norma brasileira apresenta para ação estática equivalente do vento, embora baseada no método de vibração aleatória

proposto por Davenport difere dele na determinação dos parâmetros que definem essa ação. Por exemplo, a velocidade média do vento, que é referida a um intervalo de tempo de uma hora e não de dez minutos como na norma brasileira e o fator de escala para a determinação da frequência reduzida, que Davenport adota 1200 m e a norma brasileira 1800 m.

A NBR 6123/88 incorpora esses conceitos e destaca que edificações com período fundamental superior a 1s, frequências até 1 Hz, podem apresentar importante resposta flutuante na direção do vento médio.

A NBR 6123/88 apresenta três modelos de cálculo para a ação do vento nas estruturas, assim denominados: 1) Forças estáticas devidas ao vento ou Modelo Estático, 2) Modelo dinâmico simplificado e 3) Modelo dinâmico discreto. Esses três procedimentos de cálculo são apresentados a seguir sem a intenção de aprofundar discussões sobre esses eles, tendo em vista não ser esse o objetivo deste trabalho.

6.1 FORÇAS ESTÁTICAS DEVIDAS AO VENTO

Segundo a NBR 6123/88 as forças estáticas devidas ao vento são determinadas como se segue.

A velocidade básica do vento, V_0 , está relacionada ao local onde a estrutura será construída. Por definição é a velocidade de uma rajada de 3 segundos, excedida em média uma vez em 50 anos, acima de 10 m do terreno, em campo aberto e plano. A norma traz as isopletras da velocidade básica no Brasil, Figura 6.1.

Como regra geral, admite-se que o vento básico possa soprar de qualquer direção horizontal.

Uma vez calculada, a velocidade básica é multiplicada pelos fatores S_1 , S_2 e S_3 para ser obtida a velocidade característica do vento V_k , para a parte da edificação em consideração, logo:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3, \quad (6.1)$$

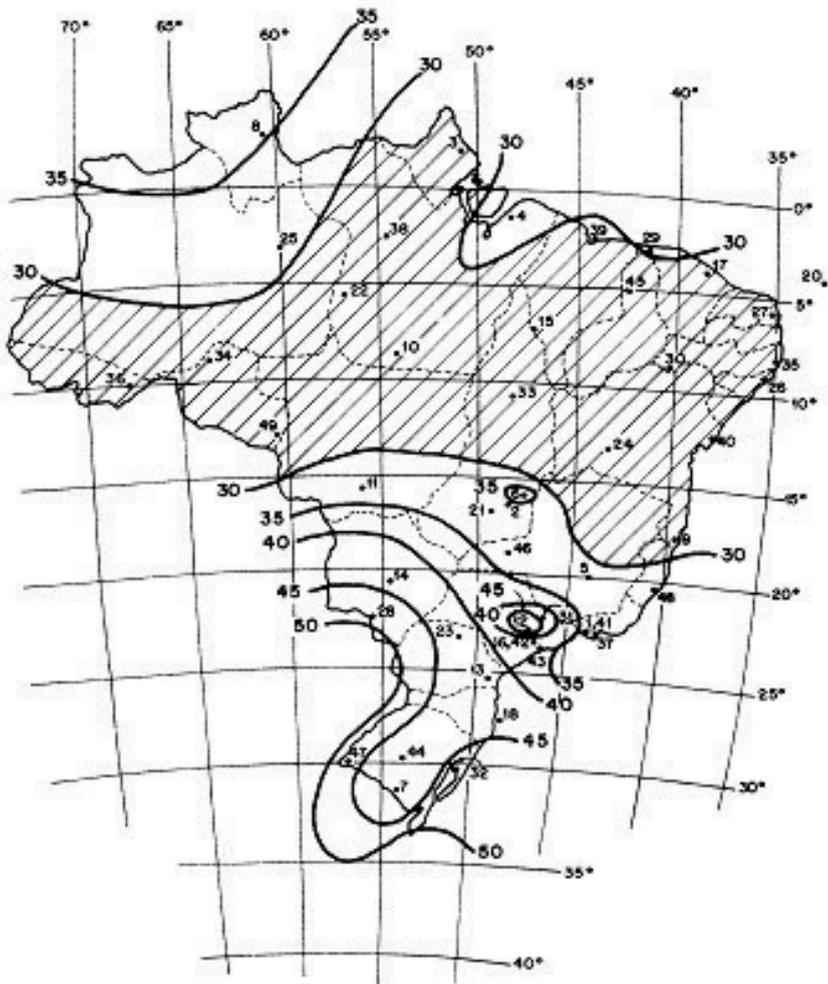


Figura 6.1 – Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s) (NBR 6123/88).

O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno e o aumento da velocidade do vento na presença de morros e taludes, mas não considera a diminuição da turbulência com o aumento da velocidade do vento. A turbulência é importante para a determinação da resposta dinâmica de

estruturas esbeltas, ressalva Brasil (2004). Para terrenos planos ou fracamente acidentados o fator S_1 vale 1,0, variando conforme a inclinação, quando se tratar de taludes e morros, e 0,9 no caso de vales profundos protegidos.

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. Para efeitos da NBR 6123/88, a rugosidade do terreno é dividida em 5 categorias. No tocante às dimensões, as edificações foram divididas em 3 classes. Para levar em conta a altura sobre o terreno no cálculo do fator S_2 , a norma brasileira estabelece a expressão (6.2).

$$S_2(z) = bF_r(z/10)^p, \quad (6.2)$$

O fator de rajada F_r é sempre correspondente à categoria II. Os fatores b e p são parâmetros meteorológicos tabelados. Para empregar a expressão (6.2) é preciso usar a Tabela 21 do Anexo A da NBR 6123/88, que traz os parâmetros meteorológicos e o fator de rajada F_r , que está reproduzida na Tabela 6.1, abaixo. O tempo que define o fator de rajada é função da classe da edificação. Ele será de 3 s, 5 s ou 10 s, conforme a edificação seja de Classe A, B ou C, respectivamente.

Tabela 6.1 – Parâmetros b , p , F_r (NBR 6123/88).

| 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 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 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 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 |
| III | 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 |
| | b | 0,94 | 0,94 | 0,93 | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,91 | 0,90 | 0,90 | 0,89 | 0,86 | 0,85 |
| IV | p | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,19 | 0,20 |
| | b | 0,86 | 0,85 | 0,84 | 0,83 | 0,83 | 0,82 | 0,80 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,71 | 0,68 |
| V | p | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,18 | 0,20 | 0,22 | 0,23 | 0,25 |
| | 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 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,21 | 0,22 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,31 | 0,35 |

Os valores correspondentes de S_2 , para as diversas categorias de rugosidade do terreno e classes de dimensões definidas anteriormente, foram organizados de forma sintética pela norma e constam na Tabela 6.2.

O fator S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Representa a probabilidade de 63% de que a velocidade básica do vento seja igualada ou excedida no seu período de recorrência. A NBR 6123/88 indica como valores mínimos de S_3 os da Tabela 6.3.

A velocidade característica do vento permite, então, determinar a pressão dinâmica pela expressão

$$q = 0,613V_k^2, \quad (6.3)$$

com q em N/m^2 e V_k em m/s .

Tabela 6.2 – Fatores S_z (NBR 6123/88).

| z | Categoria | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|---|---|---|
| | I | | | II | | | III | | | IV | | | V | | | | | |
| | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | | | |
| (m) | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| ≤ 5 | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 0,94 | 0,92 | 0,89 | 0,88 | 0,86 | 0,82 | 0,79 | 0,76 | 0,73 | 0,74 | 0,72 | 0,67 | | | |
| 10 | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,94 | 0,92 | 0,88 | 0,86 | 0,83 | 0,80 | 0,74 | 0,72 | 0,67 | | | |
| 15 | 1,13 | 1,12 | 1,09 | 1,04 | 1,02 | 0,99 | 0,90 | 0,96 | 0,93 | 0,90 | 0,88 | 0,84 | 0,79 | 0,76 | 0,72 | | | |
| 20 | 1,15 | 1,14 | 1,12 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 0,99 | 0,96 | 0,93 | 0,91 | 0,88 | 0,82 | 0,80 | 0,76 | | | |
| 30 | 1,17 | 1,17 | 1,15 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,05 | 1,03 | 1,00 | 0,98 | 0,96 | 0,93 | 0,87 | 0,85 | 0,82 | | | |
| 40 | 1,20 | 1,19 | 1,17 | 1,13 | 1,11 | 1,09 | 1,08 | 1,06 | 1,04 | 1,01 | 0,99 | 0,96 | 0,91 | 0,89 | 0,86 | | | |
| 50 | 1,21 | 1,21 | 1,19 | 1,15 | 1,13 | 1,12 | 1,10 | 1,09 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 0,99 | 0,94 | 0,93 | 0,89 | | | |

| z | Categoria | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | I | | | II | | | III | | | IV | | | V | | |
| | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | |
| 60 | 1,22 | 1,22 | 1,21 | 1,16 | 1,15 | 1,14 | 1,12 | 1,11 | 1,09 | 1,07 | 1,04 | 1,02 | 0,97 | 0,95 | 0,92 |
| 80 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,10 | 1,08 | 1,06 | 1,01 | 1,00 | 0,97 |
| 100 | 1,26 | 1,26 | 1,25 | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,18 | 1,17 | 1,15 | 1,13 | 1,11 | 1,09 | 1,05 | 1,03 | 1,01 |
| 120 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,12 | 1,07 | 1,06 | 1,04 |
| 140 | 1,29 | 1,29 | 1,28 | 1,25 | 1,24 | 1,24 | 1,22 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,14 | 1,10 | 1,09 | 1,07 |
| 160 | 1,30 | 1,30 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,24 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,16 | 1,12 | 1,11 | 1,10 |
| 180 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,28 | 1,27 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,18 | 1,14 | 1,10 | 1,12 |
| 200 | 1,32 | 1,32 | 1,32 | 1,29 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,26 | 1,25 | 1,23 | 1,22 | 1,20 | 1,16 | 1,16 | 1,14 |

| z | Categoria | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | I | | | II | | | III | | | IV | | | V | | |
| | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | | Classe | | |
| 250 | 1,34 | 1,34 | 1,34 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 1,30 | 1,29 | 1,28 | 1,27 | 1,25 | 1,23 | 1,20 | 1,20 | 1,18 |
| 300 | - | - | - | 1,34 | 1,33 | 1,33 | 1,32 | 1,32 | 1,31 | 1,29 | 1,27 | 1,26 | 1,23 | 1,23 | 1,22 |
| 350 | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,34 | 1,33 | 1,32 | 1,30 | 1,29 | 1,26 | 1,26 | 1,26 |
| 400 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,32 | 1,32 | 1,29 | 1,29 | 1,29 |
| 420 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,35 | 1,35 | 1,33 | 1,30 | 1,30 | 1,3 |
| 450 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,32 | 1,32 | 1,32 |
| 500 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1,34 | 1,34 | 1,34 |

Tabela 6.3 – Fatores S_3 (NBR 6123/88).

| 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, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc) | 1,10 |
| 2 | Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto teor 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 |

A componente da força global na direção do vento, força de arrasto é F_a é obtida por

$$F_a = C_a q A_e, \quad (6.4)$$

onde C_a é o coeficiente de arrasto, e A_e é a área frontal efetiva: área da projeção ortogonal da edificação, estrutura ou elemento estrutural sobre um plano perpendicular à direção do vento.

O coeficiente de arrasto é uma função do número de Reynolds, das dimensões e formas do corpo, sendo esse dado por $R_e = 70000 V_k L_1$, onde V_k em m/s já foi dada em (6.1) e L_1 em m é a dimensão de referência. Os coeficientes de arrasto possuem valores prescritos em tabelas ou ábacos da NBR 6123/88 para diversas situações de cálculo.

6.2 RESPOSTA DINÂMICA PELO MODELO CONTÍNUO SIMPLIFICADO

Se a edificação tiver seção transversal constante e distribuição de massa mais ou menos uniforme, aplica-se um método simplificado de cálculo, desde que a estrutura não ultrapasse 150 m de altura. Admite-se que, para a resposta dinâmica pelo método simplificado, baste a retenção única do modo fundamental de vibração, o que pode conduzir a aceitáveis erros de 10%, segundo a NBR 6123/88.

Para esse caso a expressão (6.5) engloba tanto a resposta média quanto a amplitude máxima da resposta flutuante do vento.

$$q(z) = \bar{q}_0 b^2 \left[\left(\frac{z}{z_r} \right)^{2p} + \left(\frac{h}{z_r} \right)^p \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma \frac{1+2\gamma}{1+\gamma+p} \xi \right], \quad (6.5)$$

Assim, a pressão $q(z)$ é uma função contínua da altura sobre o terreno. ξ é o coeficiente de amplificação dinâmica, função das dimensões da edificação, da razão de amortecimento crítico e da frequência, z_r é a altura de referência e \bar{q}_0 é a pressão na altura de referência. Esses parâmetros serão detalhados na descrição do modelo discreto.

O primeiro modo pode ser representado pela expressão (6.6).

$$x = \left(\frac{z}{h} \right)^\gamma, \quad (6.6)$$

A NBR 6123/88 fornece tanto o período do primeiro modo de vibração quanto expoente γ da Eq. (6.6), que podem ser vistos na Tabela 6.4. Os coeficientes p e b estão na Tabela 6.5. Ambas foram extraídas do texto da Norma. Observe-se que nas expressões apresentadas na Tabela 6.4 a altura da edificação é único fator preponderante

para o cálculo da frequência. Uma vez determinada a pressão de vento, os esforços internos na estrutura são obtidos pelos procedimentos usuais de cálculo.

Tabela 6.4 – Parâmetros para a determinação dos efeitos dinâmicos (NBR 6123/88).

| Tipo da edificação | γ | ζ | T_1 |
|---|----------|---------|---------------------------------|
| Edifícios com estrutura aperticadas de concreto, sem cortinas | 1,2 | 0,020 | 0,05h + 0,015h (h em metros) |
| Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para 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 | |

Tabela 6.5 – Expoente p e parâmetro b (NBR 6123/88).

| Categoria de Rugosidade | I | II | III | IV | V |
|--------------------------------|----------|-----------|------------|-----------|----------|
| p | 0,095 | 0,15 | 0,185 | 0,23 | 0,31 |
| b | 1,23 | 1 | 0,86 | 0,71 | 0,5 |

6.3 MODELO DISCRETO

Se uma edificação possui propriedades variáveis com a altura, como comumente encontrado em postes de telecomunicações, ela deve ser representada por um modelo discreto, conforme Figura 6.2.

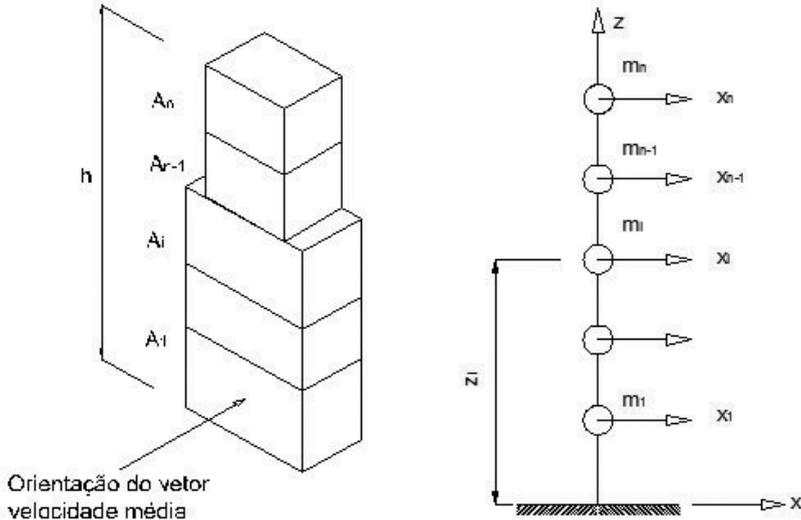


Figura 6.2 – Esquema para o modelo dinâmico discreto (NBR 6123/88).

Pela NBR 6123/88 a resposta dinâmica total é considerada como a superposição das respostas média e flutuante, obtidas da seguinte forma.

A velocidade de projeto deve ser calculada usando a expressão

$$\bar{V}_p = 0,69V_0S_1S_3, \quad (6.7)$$

correspondente à velocidade média sobre 10 minutos a 10 metros de altura sobre o solo, em terreno de categoria II. Quando se deseja determinar as contribuições modais na resposta dinâmica do modelo discretizado, tem-se que, para o i -ésimo grau de liberdade, a carga total X_i na direção do vento será a soma da componente média \bar{X}_i e da componente flutuante \hat{X}_i , logo:

$$X_i = \bar{X}_i + \hat{X}_i \quad (6.8)$$

onde a força média \bar{X}_i é:

$$\bar{X}_i = \bar{q}_0 b^2 C_j A_j \left(\frac{z_j}{z_r} \right)^{2p} \quad (6.9)$$

e a componente flutuante \hat{X}_i é dada por:

$$\hat{X}_i = F_H \psi_i x_i, \quad (6.10)$$

onde

$$\psi_i = \frac{m_i}{m_0}, \quad F_H = \bar{q}_0 b^2 A_0 \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i x_i^2} \xi \quad (6.11)$$

e

$$\beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_0} \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p, \quad \bar{q}_0 = 0,613 \bar{V}_p^2 \quad (6.12)$$

sendo b e p indicados na tabela 20 da NBR 6123/88; z_r o nível de referência e, recordando, \bar{V}_p a velocidade de projeto. \bar{q}_0 (em N/m^2) é a pressão dinâmica, z_i , x_i , m_i , m_0 , A_i , A_0 , ξ e C_{ai} são, respectivamente, a altura, o modo de vibração correspondente a coordenada i ; a massa concentrada no i -ésimo grau de liberdade; a massa de referência; a área equivalente para o i -ésimo grau de liberdade; a área de referência; o coeficiente de amplificação dinâmica; e o coeficiente de arrasto correspondente à coordenada i .

Os coeficientes de amplificação dinâmica foram calculados por Galindez (1979) admitindo a forma modal da equação (6.6), foram transformados em ábacos e incluídos na NBR 6123/88 para as cinco categorias de terreno. Para usá-los é preciso determinar a largura da edificação por

$$L_1 = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{h} . \quad (6.13)$$

onde h é a altura da edificação.

O processo de cálculo finaliza de forma semelhante ao realizado na estática, através da superposição dos efeitos das variáveis intervenientes.

Quando mais de um modo for retido na solução, a NBR 6123/88 estabelece que o efeito combinado pode ser calculado pelo critério da raiz quadrada da soma dos quadrados. Indicando por \hat{Q}_i uma variável estática qualquer (força, momento fletor, tensão etc) ou geométrica (deformação, deslocamento, giro), correspondente ao modo j , a superposição dos efeitos é calculada por:

$$\hat{Q} = \left[\sum_{j=1}^n \hat{Q}_j^2 \right]^{1/2}. \quad (6.14)$$

É interessante observar que não existe referência nas expressões adotadas pela NBR 6123/88 que indiquem relação com a rigidez da estrutura na determinação da frequência natural de vibração, ponto de partida de todo o processo de cálculo da resposta dinâmica e diretamente relacionado à determinação dos coeficientes de amplificação dinâmica.

Além de induzir vibrações longitudinais, as flutuações aleatórias da velocidade instantânea em relação à velocidade média do vento são responsáveis por vibrações da estrutura na direção perpendicular à direção do fluxo médio. A NBR 6123/88 prescreve que as solicitações resultantes na direção perpendicular à direção do vento podem ser calculadas computando-se um terço das forças efetivas na direção do vento.

Além das vibrações transversais devidas às flutuações em relação ao vento médio, para o presente estudo há interesse apenas nas relacionadas ao desprendimento cadenciado de vórtices, que devem ser superpostas às primeiras caso ocorram. Como afirma Blessmann (2005) a força perpendicular à direção do vento induzida pelo desprendimento de vórtices deve ser superposta à força lateral devida à turbulência atmosférica. Carril Júnior (2000), em sua Tese de Doutorado, enfatiza que, embora as oscilações na direção do vento devidas ao desprendimento de vórtices raramente ocorram na prática, as oscilações transversais à direção do vento podem ocorrer em estruturas de seções circulares e com outras formas de cantos vivos.

Movimentos transversais à direção do vento podem ser produzidos se uma das frequências naturais da estrutura for igual à frequência de desprendimento de um par desses vórtices, dentro da faixa de velocidade esperada para o vento.

Morais (2007) afirma que, apesar de constituir um problema clássico da Mecânica dos Fluidos, o escoamento ao redor de corpos

rombudos, ou seja, que não possuem boa forma aerodinâmica apresenta elevada complexidade. O fenômeno do desprendimento de vórtices é um dos temas mais controversos no meio técnico e científico (Santos, 2005). No entanto, a solução do escoamento dos fluidos em torno de corpos rombudos é útil para a engenharia devido à sua aplicação a muitas estruturas reais. O escoamento com número de Reynolds superior a aproximadamente 30, conforme Carril Júnior (2000), induz o aparecimento de vórtices imediatamente após o corpo rombudo, formando a esteira de vórtices de von Karmann. O corpo fica então sujeito a forças dinâmicas que fazem com que esse vibre com frequências ligadas às frequências com que se desprendem os vórtices. Santos (2005) esclarece que a esteira de von Karman depende da relação entre a velocidade do fluxo, o diâmetro do cilindro e da viscosidade cinemática. Essa relação recebe o nome de número de Reynolds e, à medida que o número de Reynolds aumenta, ocorre uma mudança na esteira de vórtices.

O mecanismo de geração de vórtices está relacionado à diferença de pressão no escoamento ao longo da superfície e da consequente formação da zona de recirculação à jusante do corpo. O desprendimento dos vórtices acontece de forma oscilatória, fazendo com que o cilindro fique sujeito à ação de forças dinâmicas transversais ao escoamento, também chamadas forças de sustentação.

As forças de sustentação atuam de maneira que o cilindro vibre com frequências ligadas às frequências de desprendimento dos vórtices. Essas, por sua vez, são expressas através do número de Strouhal (Philippi & Haverroth, 2005). O mecanismo de desprendimento de vórtices pode ser visto na Figura 6.3.

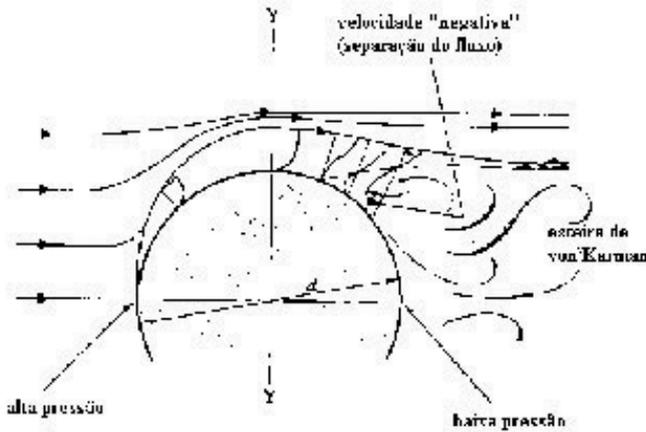


Figura 6.3 – Desprendimento de vórtices – Santos (2005).

É importante destacar que o fenômeno do desprendimento de vórtices constitui-se em um tópico particular de investigação em diversas áreas, na engenharia civil, naval, automotiva e de petróleo.

A própria NBR 6123/88 destaca a particular nocividade que esse fenômeno pode representar para estruturas como chaminés e torres cilíndricas.

Movimentos transversais importantes podem ser produzidos por esse fenômeno se a frequência natural da estrutura coincidir com a frequência de desprendimento de um par de vórtices, dada pela equação

$$f_s = \frac{St \bar{V}}{L}, \quad (6.15)$$

sendo f_s a frequência de desprendimento de um par de vórtices, em Hz; St o número de Strouhal; \bar{V} a velocidade do vento, sobre 10 min, em m/s, para o local onde está situada a edificação e L a dimensão característica ou diâmetro da edificação.

Como afirma Blessmann (2005) se \bar{V} for variável ao longo do comprimento da edificação, a frequência de desprendimento de vórti-

ces tende a ser governada pela frequência f_s relativa ao ponto em que a amplitude de deslocamento é máxima.

A velocidade crítica do vento é o parâmetro empregado para a determinação da ocorrência do desprendimento de vórtices. É definida como a velocidade para qual a frequência de desprendimento de um par de vórtices coincide com uma das frequências naturais da estrutura. Portanto, efeitos dinâmicos transversais à direção do vento médio são possíveis se a velocidade crítica for igual ou inferior à máxima velocidade média \bar{V} , prevista para o local da edificação.

Para estruturas com seção circular o número de Reynolds é

$$Re = 70000\bar{V}d, \quad (6.16)$$

e para o cálculo da velocidade crítica L , nesse caso, passa a ser o diâmetro da seção e número de Strouhal será 0,20 para $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ e 0,28 para $Re > 10^6$, cabendo interpolação linear.

A amplitude da resposta é calculada para a velocidade crítica do vento para a qual a frequência f_s coincide com a frequência da estrutura associada ao primeiro modo de vibração. Essa velocidade é obtida pela expressão:

$$V_{cr} = \frac{f_1 L}{St}, \quad (6.17)$$

onde

f_1 é a frequência fundamental da estrutura, L é a dimensão característica, e St é o número de Strouhal.

A pressão dinâmica de cálculo é dada por

$$q_{cr} = 0,613(\bar{V}_{cr})^2, \quad (6.18)$$

e a amplitude de vibração induzida pelo desprendimento de vórtices, perpendicular à direção do vento, dada por

$$Y_0 = \frac{q_{cr} l_1}{8\pi^2 f_1^2 \zeta} \frac{1+2\gamma}{1+\gamma} \frac{C_1 C_R}{M_0}, \quad (6.19)$$

onde g é o expoente da forma modal presente na Tabela 6.4, C_1 denota o coeficiente de forma da seção transversal e M_0 representa a massa equivalente.

No caso de modelos discretos, a massa equivalente é dada por

$$M_0 = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \left(\frac{z_i}{h}\right)^{2\gamma}}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{z_i}{h}\right)^{2\gamma}}, \quad (6.20)$$

e o coeficiente de correlação longitudinal é obtido pela expressão

$$C_R = 1 - \left(1 - \frac{L_R/L}{h/L}\right)^{1+\gamma}, \quad (6.21)$$

O comprimento de correlação está relacionado com a amplitude das vibrações transversais através da expressão empírica

$$\frac{L_R}{L} = 12 - 10e^{-4Y_0/L}.$$

Com a introdução de C_R e L_R/L na Eq. (6.19), cria-se um problema linear cuja solução é obtida iterativamente.

Na aplicação dos modelos para o cálculo da ação do vento às estruturas reais, desenvolvidos no capítulo seguinte, o desprendimento de vórtices foi avaliado para frequências 5% acima e abaixo das frequências naturais das estruturas.

Nos termos em que foi descrita neste capítulo, a resposta dinâmica às flutuações do vento deve obedecer às regras do cálculo vetorial.