

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE CARGA DINÂMICA DO VENTO SOBRE UMA ESTRUTURA ATRAVÉS DE  
DIFERENTES ESPECTROS

por

Eduardo Backes

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, Junho de 2016.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DE CARGA DINÂMICA DO VENTO SOBRE UMA ESTRUTURA ATRAVÉS DE  
DIFERENTES ESPECTROS

por

Eduardo Backes

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  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Profa. Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 20 de junho de 2016.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Cesar Antonio Backes e Marli Jackisch Backes, que sempre me apoiaram e fizeram de tudo para me dar a melhor educação possível.

Agradeço a todo o corpo docente da UFRGS pelo conhecimento transmitido ao longo desta jornada, em especial para a Professora Dra. Leticia Fleck Fadel Miguel, que me orientou neste trabalho com dedicação e paciência, além de ser uma excelente professora.

Aos amigos que fiz durante o período em que estive na universidade, amigos que traçaram esta caminhada comigo e que levarei para o resto da vida.

BACKES, E. **Análise de Carga Dinâmica do Vento sobre uma Estrutura através de Diferentes Espectros**. 2016. 16. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

Este trabalho consiste em fazer uma análise da carga dinâmica do vento em uma edificação através de diferentes espectros de potências e comparar os resultados. Para isto foi elaborada uma rotina numérica em MATLAB para avaliar os deslocamentos de uma edificação ao longo de um intervalo de tempo. A ação do vento foi obtida a partir de uma componente da velocidade média do vento mais uma componente flutuante da velocidade do vento. A componente flutuante do vento foi obtida através do espectro de Davenport, do espectro de Harris e do espectro de Kaimal e transformada para o domínio do tempo através do Método de Representação Espectral. As forças a serem aplicadas na edificação foram determinadas a partir das velocidades do vento conforme procedimento adotado na NBR 6123. Uma edificação foi modelada pelo método de elementos finitos no *software* MATLAB, a qual foi aplicada as forças do vento. Para determinar a resposta dinâmica em termos de deslocamentos da edificação foi usado o método de Newmark. Os resultados obtidos mostram que a resposta da estrutura não apresenta uma diferença significativa em função dos três diferentes espectros avaliados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Espectro de potência, análise dinâmica do vento, elementos finitos.

BACKES, E. **Analysis of Wind Dynamic Load on a Structure through Different Spectrums**. 2016. 16. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

This work consists in make an analysis of the wind dynamic load on a building through different power spectrums and compare the results. For this, a numerical routine was elaborated in MATLAB to evaluate the displacements of a building over a time interval. The wind action was obtained from an average wind velocity component plus a floating wind speed component. The floating wind speed component was achieved through Davenport spectrum, Harris spectrum and Kaimal spectrum, and transformed to the time domain through the Spectral Representation Method. The forces to be applied in the building were determined from the wind speeds procedure adopted in NBR 6123. A building was modeled by finite element method in MATLAB software, which the wind forces was applied on. To determine the dynamic response in terms of building displacements, the Newmark method was used. The obtained results showed that the building's response does not present a significant difference due the three different spectrums.

**KEYWORDS:** Power spectrum, dynamic wind analysis, finite elements.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
4.1	Simulação da ação do vento .....	1
4.2	Determinação das forças .....	4
4.3	Elementos finitos .....	4
4.4	Amortecimento proporcional de Rayleigh .....	5
4.3	Método de Newmark .....	6
5	METODOLOGIA .....	7
5.1	Entrada de dados .....	7
5.2	Validação .....	8
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
7.	CONCLUSÕES .....	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
	ANEXO I .....	16
	ANEXO II .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

Para projetos de edificações é utilizada uma carga estática do vento para a realização dos cálculos de resistência. Esta carga estática é geralmente superdimensionada além de um coeficiente de segurança a fim de garantir a integridade da estrutura. Em edificações muito esbeltas, com frequência fundamental menor que 1 Hz, se faz necessário uma análise dinâmica mais aprofundada da ação do vento, pois a edificação pode apresentar uma importante resposta à flutuação da velocidade média do vento, uma vez que essas oscilações podem ser catastróficas.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho propõe uma rotina de cálculo computacional feita no *software* MATLAB para avaliar os deslocamentos de uma edificação sujeita a uma excitação aleatória do vento. A ação do vento sob a estrutura é simulada a partir dos espectros de Davenport, Harris e Kaimal, onde o presente trabalho tem como objetivo comparar os diferentes resultados obtidos por esses diferentes espectros.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Davenport (1961), Harris (1968) e Kaimal (1972) propuseram três modelos para calcular a função densidade espectral de potência para a componente longitudinal da flutuação da velocidade do vento, esta que é utilizada para simular o campo estocástico de velocidades do vento.

Foi proposto por Shinozuka e Jan (1972) um método para a simulação digital de processos aleatórios utilizando a densidade espectral de potência, transformando a resposta para o domínio do tempo. Este método, conhecido como Método da Representação Espectral, faz uso de uma série de funções cosseno, frequências equilibradamente espaçadas e ângulos de fase aleatórios para geração do sinal.

Miguel *et al.* (2012) realizam um estudo que compara os três modelos propostos por Davenport (1961), Harris (1968) e Kaimal (1972) e utiliza o método de Shinozuka e Jan (1972) para gerar um sinal estocástico de velocidade do vento e aplicá-lo a um trecho de uma linha de transmissão de energia, composto por torres, isoladores e cabos. Os resultados mostraram que a escolha do espectro exerceu apenas uma pequena influência nas respostas dinâmicas dos componentes da linha de transmissão.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

### 4.1. SIMULAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO

Para representar a ação do vento neste trabalho, é assumido o vento EPS descrito por um modelo 2D estacionário e homogêneo, caracterizado por uma velocidade do vento média com orientação constante. O campo de velocidades do vento é definido por um perfil de velocidades médias transversal a edificação, obtidas através de uma velocidade de referência na altura padrão de 10m e pelo espectro de uma componente de velocidade horizontal e uma componente de velocidade vertical flutuantes, as quais são assumidas como um processo aleatório independente.

Segundo Miguel *et al.* (2012), para criar o campo de velocidades inicialmente são gerados dados da velocidade do vento x tempo não correlacionados. Em um sistema de coordenadas cartesianas (x,z), onde z é a altura acima do solo e x é a direção ao longo do vento, a velocidade do vento consiste em um vetor de velocidade média do vento  $\vec{V}(z)$  e um

vetor da componente flutuante da velocidade  $\Delta\vec{V}(x, z, t)$ , o qual é assumido como um processo aleatório estacionário. Desta forma, a velocidade do vento é dada por:

$$\vec{V}(x, z, t) = \vec{V}(z) + \Delta\vec{V}(x, z, t) \quad (4.1)$$

Para determinar o vetor de velocidade média do vento, o modelo foi aplicado em condições ideais (terreno plano e rugosidade homogênea ao longo de sua extensão). Então a equação que determina o vetor velocidade média do vento é:

$$\vec{V}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.2)$$

Onde  $k$  é a constante de von Karman igual a 0,4,  $z_0$  é o comprimento de rugosidade e  $u_*$  é a velocidade de atrito de vento. Esta última pode ser obtida na seguinte equação:

$$u_* = 0,4 \frac{\vec{V}(ref)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (4.3)$$

Onde  $\vec{V}(ref)$  é a velocidade média do vento na altura de referência ( $z_{ref} = 10 \text{ m}$ ) e pode ser obtida através da tabela de isopletas da norma (ver Anexo I).

Segundo Miguel *et al.* (2012), as componentes flutuantes  $\Delta\vec{V}(x, z, t)$  são um processo aleatório de média zero, simulado pela superposição de ondas harmônicas como descrito por Shinozuka e Jan (1972):

$$\Delta\vec{V}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_w(f_j)\Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \phi_j) \quad (4.4)$$

Este método é conhecido como Método de Representação Espectral. Para aplicar a equação (4.4), a faixa de frequência de interesse deve ser dividida em  $N$  intervalos, sendo que  $\Delta f = f_{j+1} - f_j$ .  $\phi_j$  é o ângulo de fase, uma variável aleatória com uma função distribuição de probabilidade uniforme variante entre 0 e  $2\pi$ .

Existem diversas expressões para definir a função de densidade espectral  $S_w(f)$  da componente flutuante da velocidade do vento. Neste estudo são adotadas três funções bem conhecidas, o modelo de Davenport, o modelo de Harris e o modelo de Kaimal.

O modelo de Davenport é representado pela seguinte equação:

$$\frac{f S_w(f)}{u_*^2} = \frac{4n^2}{(1+n^2)^{4/3}} \quad (4.5)$$

Onde  $n = fL/\bar{V}_{10}$ ,  $L=1200 \text{ m}$  e  $\bar{V}_{10}$  é a velocidade média a 10 metros de altura.

O modelo de Harris é representado pela equação:

$$\frac{f S_w(f)}{u_*^2} = \frac{4n}{(2+n^2)^{5/6}} \quad (4.6)$$

Onde  $n = fL/\bar{V}_{10}$  e  $L=1800 \text{ m}$ .

Enquanto o modelo de Kaimal é representado pela equação:

$$\frac{f S_w(f)}{u_*^2} = \frac{200n}{(1+50n)^{5/3}} \quad (4.7)$$

Onde  $n = fz/\bar{V}(z)$ .

A Figura 4.1 mostra uma comparação entre os três modelos adotados nesse estudo.

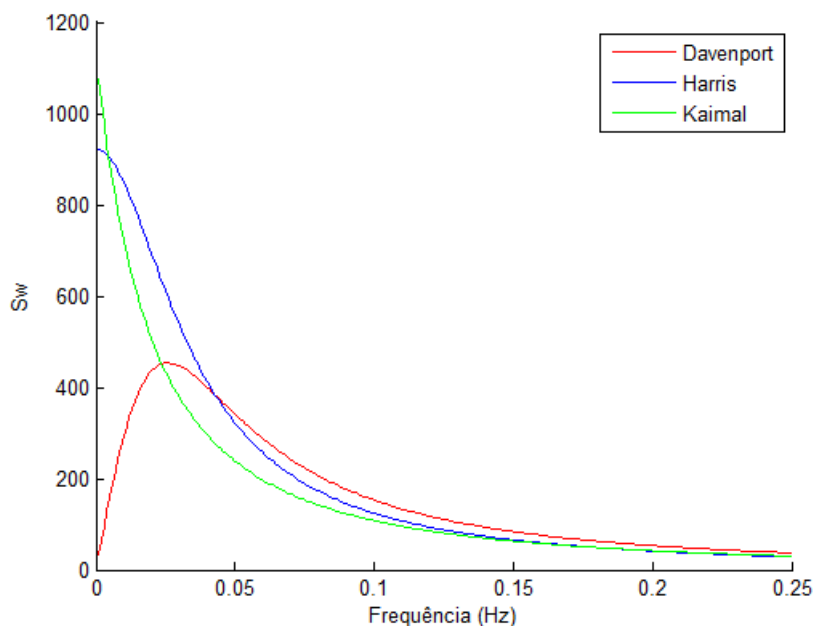


Figura 4.1 – Espectros de Davenport, Harris e Kaimal da componente flutuante da velocidade do vento.

As componentes flutuantes da velocidade do vento são geradas independentes em pontos pré-estabelecidos formando um plano de interpolação 2D contendo o volume de interesse conforme o esquema descrito na Figura 4.2.

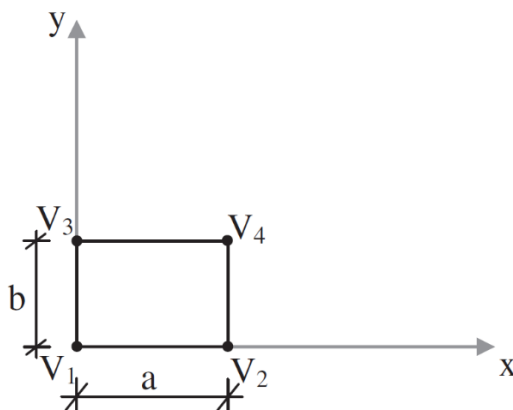


Figura 4.2 – Plano de interpolação 2D.

A estrutura é subdividida em uma malha composta por retângulos estabelecidos conforme os comprimentos de correlação. Comprimento de correlação pode ser definido, resumidamente, como a mínima distância para que não ocorra sobreposição dos efeitos entre dois pontos subsequentes.

Os valores das componentes flutuantes da velocidade do vento geradas nos vértices do plano 2D são usados para determinar as outras componentes flutuantes em qualquer ponto dentro do plano de interpolação através do procedimento de interpolação proposto por



Riera e Ambrosini (1992) e estendido, conforme Miguel *et al.* (2012), para o campo bidimensional, como segue:

$$V(x, y) = V_1 + \frac{V_2 - V_1}{a}x + \frac{V_3 - V_1}{b}y + \frac{V_4 - V_3 - V_2 + V_1}{ab}xy \quad (4.8)$$

Onde:

$a$  = comprimento de correlação transversal;

$b$  = comprimento de correlação vertical.

Os comprimentos de correlação determinam o tamanho do plano de interpolação. Para o presente trabalho foi adotado comprimentos de correlação transversal e vertical iguais a 30 m.

## 4.2. DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS

A partir da norma brasileira NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificação, foram definidas as forças sobre a edificação, aplicadas de maneira nodal, levando em consideração as áreas de influência dos perfis submetidos a esta solicitação. As forças são definidas pelas seguintes equações:

- Força na direção  $x$ :

$$F_x = C_x q K l_c \quad (4.9)$$

- Força na direção  $y$ :

$$F_y = C_y q K l_c \quad (4.10)$$

Onde  $C_x$  e  $C_y$  são os coeficientes de força referentes às direções  $x$  e  $y$ , encontrados na tabela apresentada no Anexo II.  $q$  é a pressão dinâmica.  $K$  é um fator de redução considerado igual a 1 no presente trabalho de maneira a considerar o pior caso de carga na estrutura e  $l_c$  é a área de aplicação da força referente sobre o nó.

Considerando o pior dos casos e pelo presente estudo se tratar de um plano bidimensional, foram considerados apenas os componentes de força na direção  $x$  com um coeficiente de força  $C_x$  igual a 2,05.

A pressão dinâmica  $q$  foi obtida através da velocidade do vento com a seguinte equação:

$$q = 0,613V^2 \quad (4.11)$$

## 4.3. ELEMENTOS FINITOS

Para a modelagem em elementos finitos da edificação foi usado o elemento do tipo viga para pórtico plano. Segundo Awruch e Di Rado (1997) as matrizes de rigidez e de massa locais são dadas por:

$$M_E = \rho A L \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 & 1/6 & 0 & 0 \\ 0 & 13/15 & 11L/210 & 0 & 9/70 & -13L/420 \\ 0 & 11L/210 & L^2/105 & 0 & 13L/420 & -L^2/140 \\ 1/6 & 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 9/70 & 13L/420 & 0 & 13/15 & 11L/210 \\ 0 & -13L/420 & -L^2/140 & 0 & 11L/210 & L^2/105 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$K_E = \begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -EA/L & 0 & 0 & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Onde:

$M_E$  = Matriz de massa local do elemento;

$K_E$  = Matriz de rigidez local do elemento;

$\rho$  = Massa específica do material em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ;

$A$  = Área da seção transversal do elemento em  $[\text{m}^2]$ ;

$L$  = Comprimento do elemento em  $[\text{m}]$ ;

$E$  = Módulo de elasticidade (módulo de Young) do material em  $[\text{Pa}]$ ;

$I$  = Momento de Inércia em  $[\text{m}^4]$

A partir das matrizes locais de rigidez e de massa definidas para cada elemento, deve-se fazer uma transformação de coordenadas para que as coordenadas de todos os elementos estejam referenciadas a um mesmo sistema de coordenadas globais. A transformação de coordenadas é feita através da multiplicação das matrizes locais pela matriz de rotação dada por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Onde:

$R$  = Matriz de rotação;

$\theta$  = Ângulo entre o sistema de coordenadas locais e o sistema global.

Para a obtenção das matrizes globais de cada elemento utilizam-se as seguintes equações:

$$M_G = [R^T] \cdot [M_E] \cdot [R] \quad (4.15)$$

$$K_G = [R^T] \cdot [K_E] \cdot [R] \quad (4.16)$$

Onde  $M_G$  é matriz de massa global e  $K_G$  é a matriz de rigidez global para cada elemento.

Uma vez obtidas as matrizes em coordenadas globais para cada elemento, faz-se uma sobreposição delas somando as contribuições de um mesmo nó e mesma direção para a obtenção das matrizes de rigidez e massa globais para todo o sistema.

#### 4.4. AMORTECIMENTO PROPORCIONAL DE RAYLEIGH

De acordo com Ripper (2007), sistemas de amortecimento proporcional tem sua matriz de amortecimento representada pela combinação das matrizes de massa e rigidez de acordo com a seguinte equação:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4.17)$$

onde  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes. O coeficiente de proporcionalidade  $\beta$  está ligado com o amortecimento interno e histerese do material e  $\alpha$  com as perdas por atrito associadas às componentes inercias.

De acordo com Miguel (2006), as frequências naturais podem ser obtidas através de uma análise modal, calculando-se a matriz dinâmica  $[D]$ :

$$[D] = [M_G]^{-1} \cdot [K_G] \quad (4.18)$$

Os autovalores da matriz  $[D]$  resultam nas frequências naturais da estrutura elevadas ao quadrado ( $w^2$ ) e os autovetores resultam nos modos de vibração da mesma estrutura.

Segundo Fleck (2014) existe um algoritmo simples para calcular os coeficientes de Rayleigh ( $\alpha$  e  $\beta$ ):

- 1) Calcular os autovalores e autovetores da matriz dinâmica  $[D]$ ;
- 2) Ordenar os elementos da diagonal dos autovalores em ordem crescente (representam os quadrados das frequências naturais da estrutura) e os respectivos autovetores, de forma a montar a matriz modal ( $n \times n$  – matriz dos modos de vibração);
- 3) Com as duas primeiras frequências naturais e a razão de amortecimento  $\zeta$ , obtém-se:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & w_{n1}^2 \\ 1 & w_{n2}^2 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$B = 2 \cdot \zeta \cdot \begin{bmatrix} w_{n1} \\ w_{n2} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

- 4) Multiplica-se  $A^{-1}$  (inversa da matriz  $A$ ) por  $B$ , obtendo-se um vetor que contém os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ ;
- 5) Finalmente, a matriz de amortecimento para o sistema global de coordenadas será:

$$C_G = [vet_{ord}^T]^{-1} \cdot (\alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K]) \cdot [vet_{ord}]^{-1} \quad (4.21)$$

onde  $[vet_{ord}]$  é a matriz de autovetores ordenados.

#### 4.5. MÉTODO DE NEWMARK

Os métodos de integração direta das equações de movimento consistem em procedimentos numéricos do tipo passo a passo que não requerem o cálculo prévio das características dinâmicas da estrutura, como autovalores e autovetores. Eles podem ser explícitos ou implícitos.

Os métodos de integração implícitos usam a equação de movimento  $M\ddot{\vec{x}} + C\dot{\vec{x}} + K\vec{x} = \vec{F}$  no instante  $t + \Delta t$  para calcular a resposta neste instante. A convergência e exatidão da solução dependerão da capacidade das funções adotadas para representarem a aceleração com precisão dentro de cada intervalo de tempo  $\Delta t$ , bem como o tamanho deste intervalo.

Segundo Miguel (2006), o método de Newmark é o mais eficaz dos métodos implícitos. As equações que representam a variação do deslocamento, velocidade e aceleração no instante  $t + \Delta t$  são:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0 M_G + a_5 C_G + K_G)^{-1} \{ \vec{F}(t_{i+1}) + M_G [a_0 \vec{x}(t_i) + a_1 \dot{\vec{x}}(t_i) + a_2 \ddot{\vec{x}}(t_i)] + C_G [a_5 \vec{x}(t_i) + a_6 \dot{\vec{x}}(t_i) + a_7 \ddot{\vec{x}}(t_i)] \} \quad (4.22)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5 [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6 \dot{\vec{x}}(t_i) - a_7 \ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.23)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0 [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1 \dot{\vec{x}}(t_i) - a_2 \ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.24)$$

Onde  $\vec{x}(t_i)$  é o deslocamento no instante de tempo  $t_i$ ,  $\vec{\dot{x}}(t_i)$  é a velocidade no instante de tempo  $t_i$ ,  $\vec{\ddot{x}}(t_i)$  é a aceleração no instante de tempo  $t_i$ ,  $\vec{x}(t_{i+1})$  é o deslocamento no instante de tempo  $t_i + \Delta t$ ,  $\vec{\dot{x}}(t_{i+1})$  é a velocidade no instante de tempo  $t_i + \Delta t$ ,  $\vec{\ddot{x}}(t_{i+1})$  é a aceleração no instante de tempo  $t_i + \Delta t$  e  $\vec{F}(t_{i+1})$  é a força externa aplicada no sistema no instante de tempo  $t_i + \Delta t$ . As constantes  $a_k$  são coeficientes do método de Newmark, determinadas pelas seguintes equações:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha \Delta t^2} \quad (4.25)$$

$$a_1 = \frac{1}{\alpha \Delta t} \quad (4.26)$$

$$a_2 = \left( \frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \quad (4.27)$$

$$a_5 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} \quad (4.28)$$

$$a_6 = \left( \frac{\delta}{\alpha} - 1 \right) \quad (4.29)$$

$$a_7 = \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \quad (4.30)$$

Utiliza-se  $\delta=0,5$  e  $\alpha=0,25$  para garantir a estabilidade do método. As condições iniciais de deslocamento e velocidade devem ser conhecidas para o primeiro intervalo de tempo. A aceleração no primeiro instante de tempo é dada pela equação:

$$\vec{\ddot{x}}(t_0) = [M_G]^{-1} [\vec{F}(t_0) - C_G \vec{\dot{x}}(t_0) - K_G \vec{x}(t_0)] \quad (4.31)$$

Sendo  $\vec{\ddot{x}}(t_0)$  a aceleração inicial,  $\vec{\dot{x}}(t_0)$  a velocidade inicial,  $\vec{x}(t_0)$  o deslocamento inicial e  $\vec{F}(t_0)$  a força externa aplicada no instante inicial.

## 5. METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho consiste em, a partir de um espectro de potência, simular as componentes flutuantes da velocidade do vento para os vértices dos planos de interpolação 2D e interpolá-las para os outros nós dentro do plano. Em seguida foi calculado o vetor de velocidade média do vento para cada nó e somada a componente flutuante para cada instante de tempo. A velocidade do vento com suas flutuações foi transformada em uma força a ser aplicada em cada nó para cada instante de tempo. Pelo método dos elementos finitos uma edificação foi modelada e nela foi aplicado o método de Newmark para se obter as respostas dinâmicas.

Isto foi feito para cada um dos três espectros de potência mencionados no trabalho.

### 5.1. ENTRADA DE DADOS

A estrutura escolhida para o trabalho consiste em uma edificação de 20 andares e 4 colunas conforme a Figura 5.1, com largura entre colunas de 10 metros e altura entre pisos de 3 metros, totalizando uma altura da edificação de  $H_t = 60 \text{ m}$  e uma largura da edificação de  $L_t = 30 \text{ m}$ . A edificação é formada por elementos finitos do tipo de viga. O perfil escolhido para edificação foi um perfil *I* comercial definido como  $W 14 \times 211 \left[ \text{in} \times \frac{\text{lb}}{\text{ft}} \right]$  ou  $W 360 \times 314 \left[ \text{mm} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$ , que possui uma área de seção transversal  $A = 0,03999 \text{ m}^2$  e um momento de inércia  $I = 1,1071756 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$ . O material escolhido para o estudo foi o aço MR-250 por

ser amplamente usado em construções. Para este material, a tensão de escoamento é de  $\sigma = 250 \text{ MPa}$ , o módulo de elasticidade é dado por  $E = 205 \text{ GPa}$ , e a densidade do material é  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ . Foi admitida uma razão de amortecimento  $\zeta = 0,5\%$  e um comprimento de rugosidade  $z_0 = 0,05 \text{ m}$ . A frequência natural do primeiro modo é  $0,9234 \text{ Hz}$ . A velocidade do vento de referência adotada foi de  $40 \text{ m/s}$ .

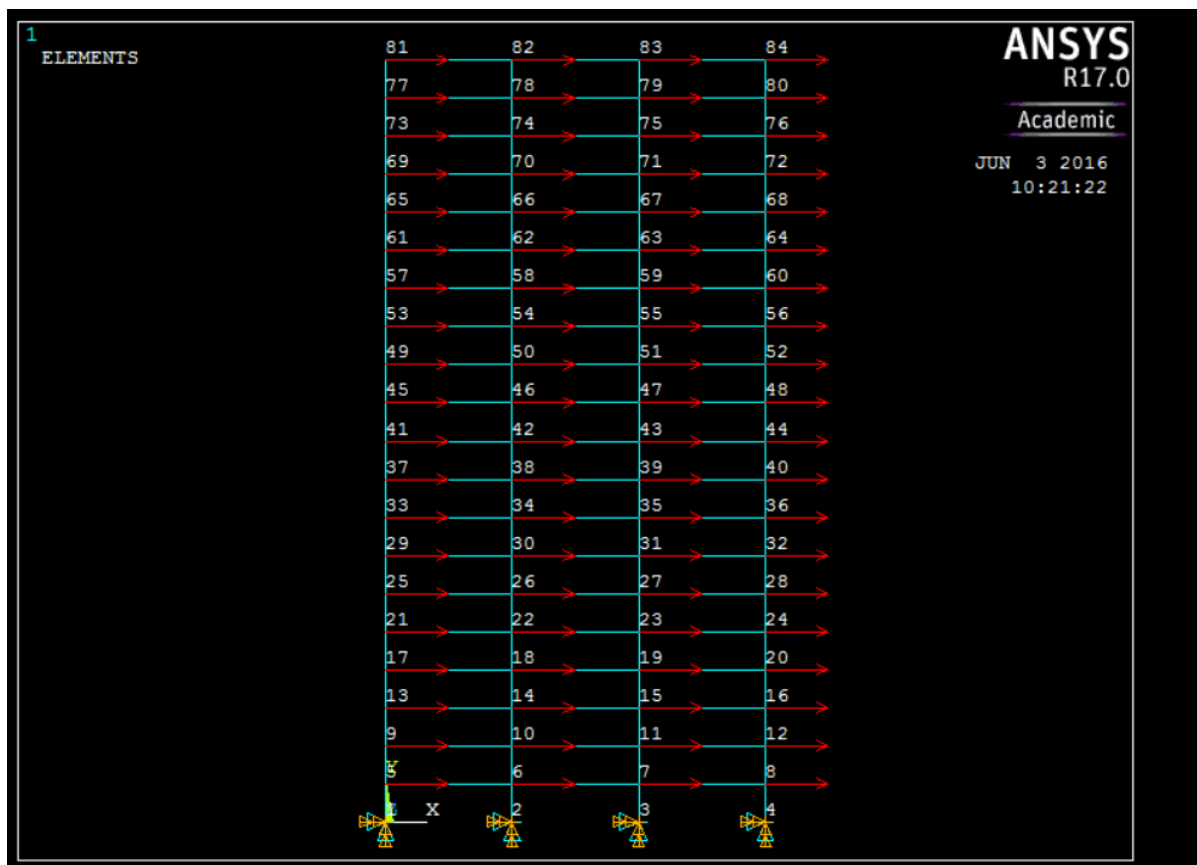


Figura 5.1 – Edificação com 20 andares e 4 colunas.

## 5.2. VALIDAÇÃO

Para validação da estrutura construída no *software* MATLAB, a mesma é modelada no *software* Ansys, gerando os resultados para os 10 primeiros modos de vibração.

Como mostra a Tabela 5.1, as frequências naturais obtidas pelo *software* Ansys são muito próximas às obtidas utilizando a rotina desenvolvida no *software* MATLAB, ficando assim comprovada a validade do programa numérico desenvolvido para a estrutura.

Tabela 5.1 – Comparação das frequências naturais obtidas na rotina elaborada em MATLAB e pelo *software* comercial ANSYS.

Software	Frequências Naturais (Hz)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MATLAB	0,9233	2,805	4,822	6,929	9,199	10,649	11,638	12,597	14,310	15,763
ANSYS	0,9233	2,805	4,822	6,927	9,195	10,649	11,631	12,595	14,297	15,757

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados gerados pelas rotinas numéricas criadas para este estudo.

As componentes flutuantes da velocidade do vento geradas conforme a Seção 4.1 são geradas para os três diferentes espectros. A seguir são apresentadas as componentes de flutuação da velocidade para o espectro de Davenport (Figura 6.1), para o espectro de Harris (Figura 6.2) e para o espectro de Kaimal (Figura 6.3).

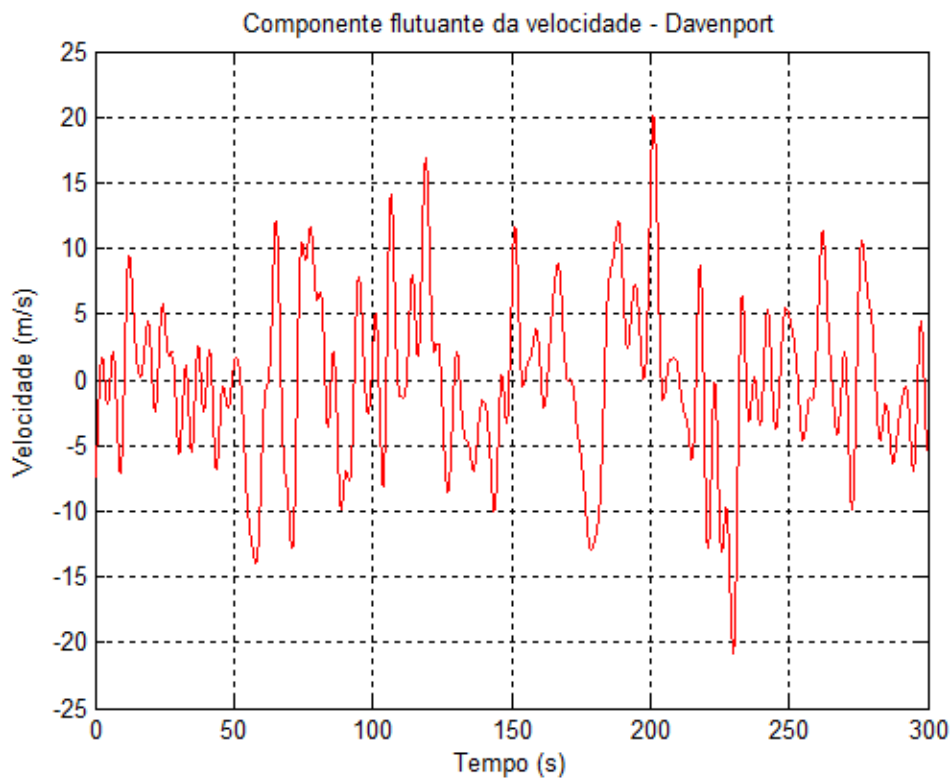


Figura 6.1 – Componente flutuante da velocidade obtida pelo espectro de Davenport.

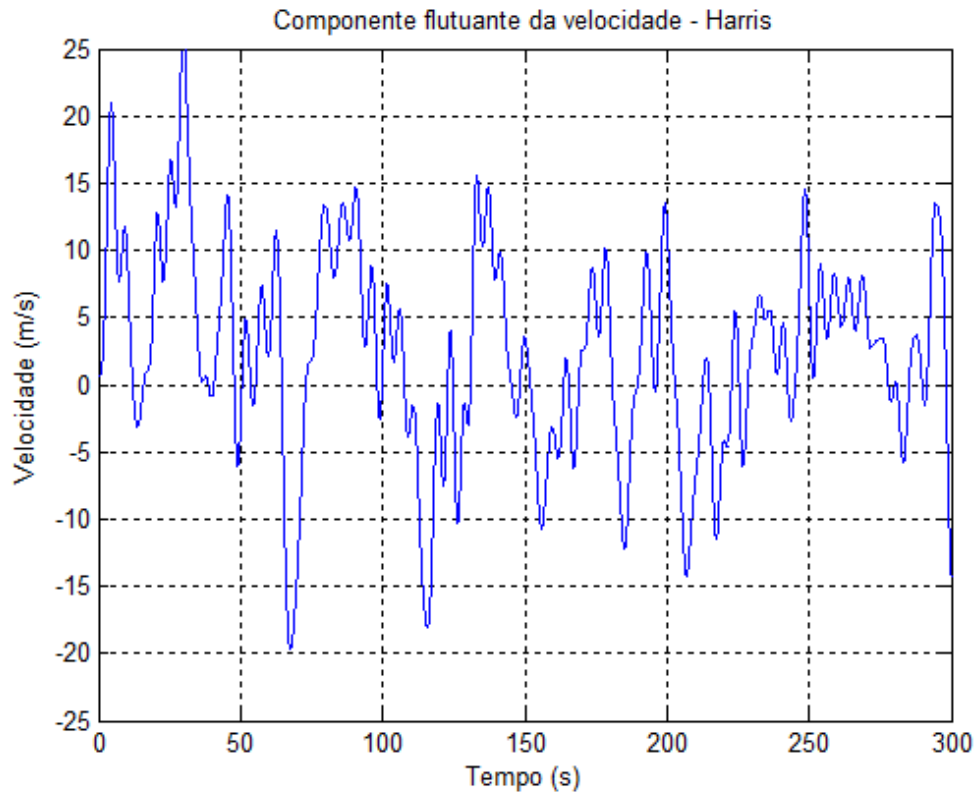


Figura 6.2 – Componente flutuante da velocidade obtida pelo espectro de Harris.

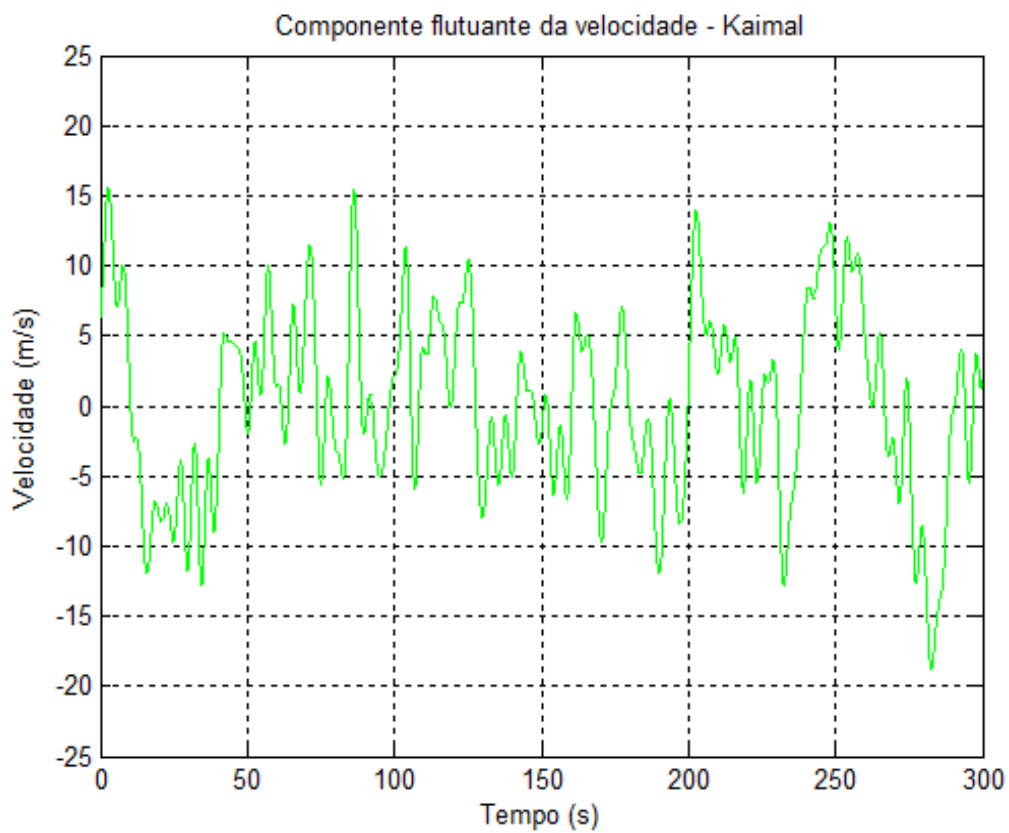


Figura 6.3 – Componente flutuante da velocidade obtida pelo espectro de Kaimal.

Para uma comparação entre os diferentes espectros as componentes da flutuação da velocidade para os três espectros são sobrepostas na Figura 6.4, assim como as forças geradas por cada espectro na Figura 6.5.

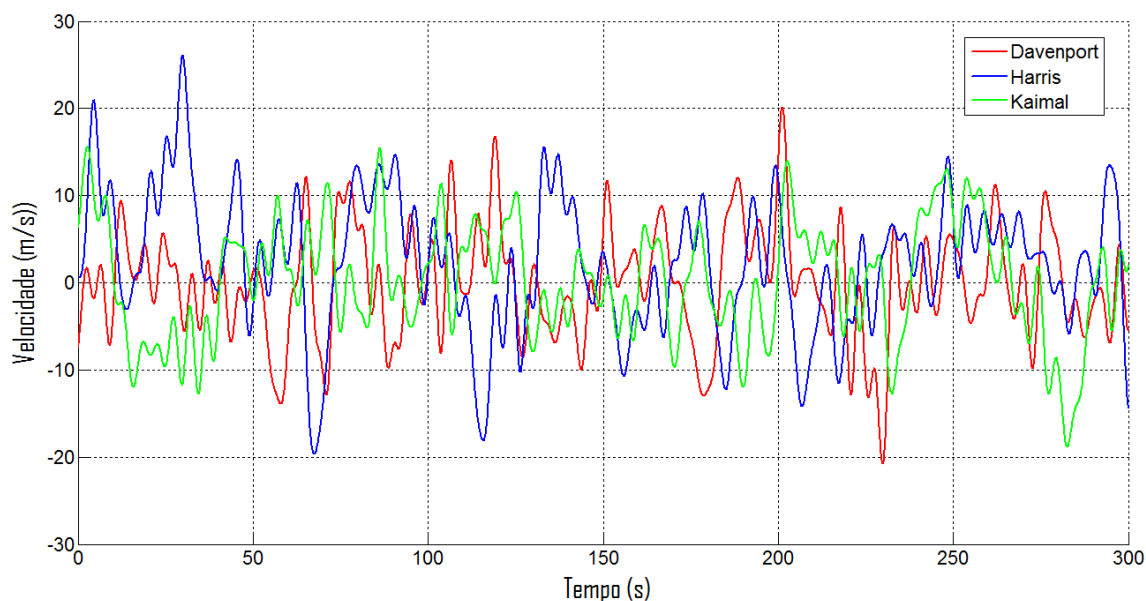


Figura 6.4 – Comparação entre as componentes flutuantes da velocidade gerada pelos três espectros.

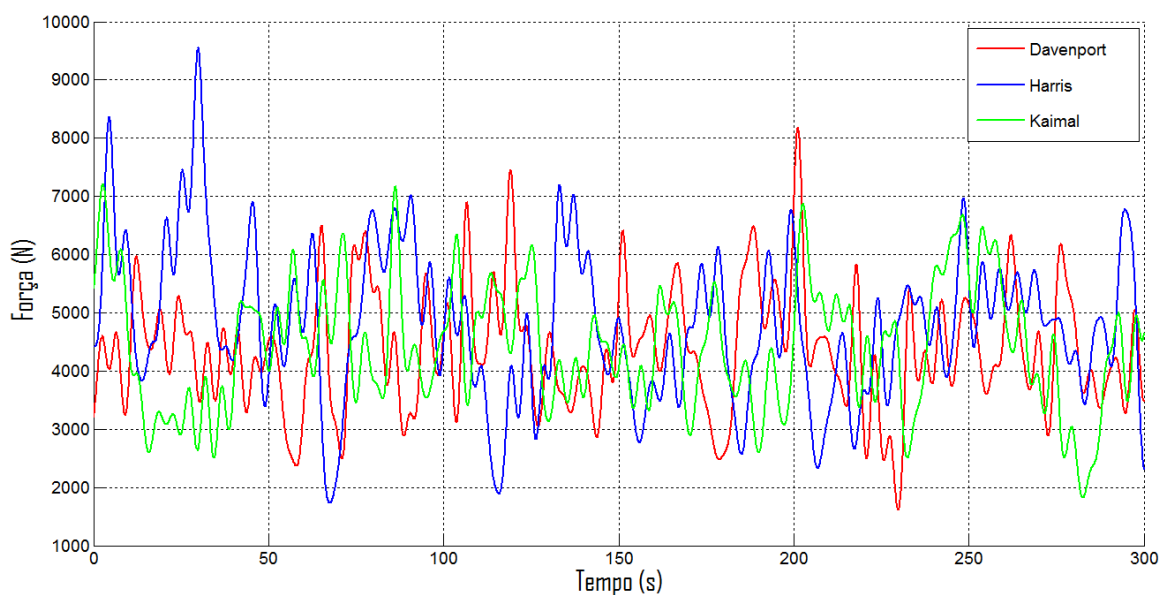


Figura 6.5 – Comparação entre as forças geradas no topo da edificação.

As Figuras 6.6(a), 6.7(a) e 6.8(a) apresentam os resultados obtidos na análise dinâmica da edificação, em termos de deslocamento, para os três diferentes espectros com relação ao nó 84, o qual está localizado no topo da estrutura, onde o deslocamento é mais severo. As Figuras 6.6(b), 6.7(b) e 6.8(b) mostram o deslocamento resultante, para os diferentes espectros, após as oscilações iniciais ocorrerem. Nota-se um deslocamento remanescente em torno de 11 mm para os três modelos.



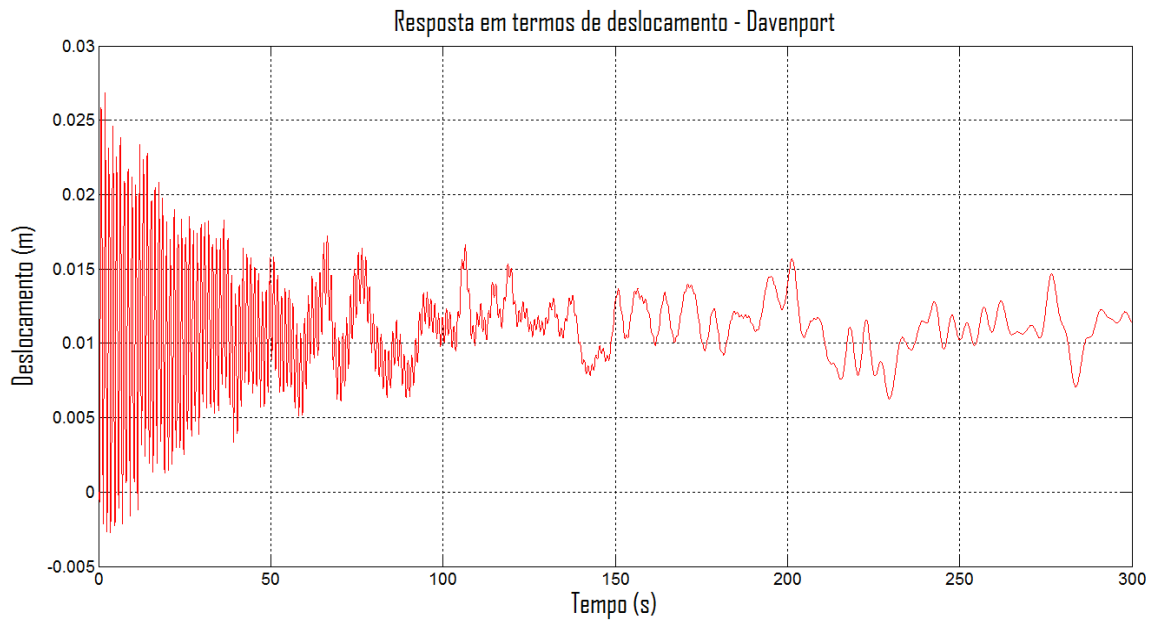


Figura 6.6(a) – Deslocamento horizontal do nó 84 devido à excitação do vento gerada pelo espectro de Davenport.

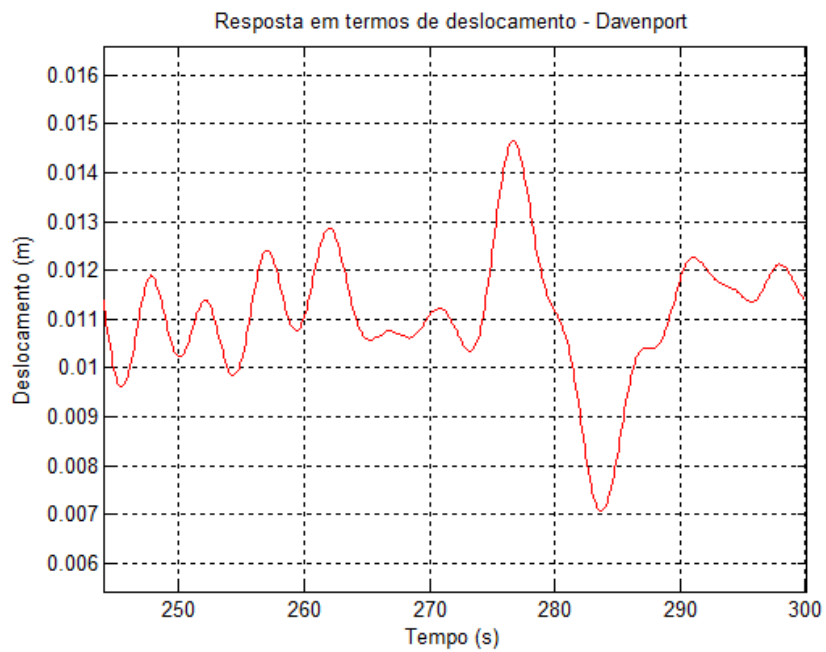


Figura 6.6(b) – Deslocamento horizontal do nó 84 após estabilização da oscilação para o modelo de Davenport.

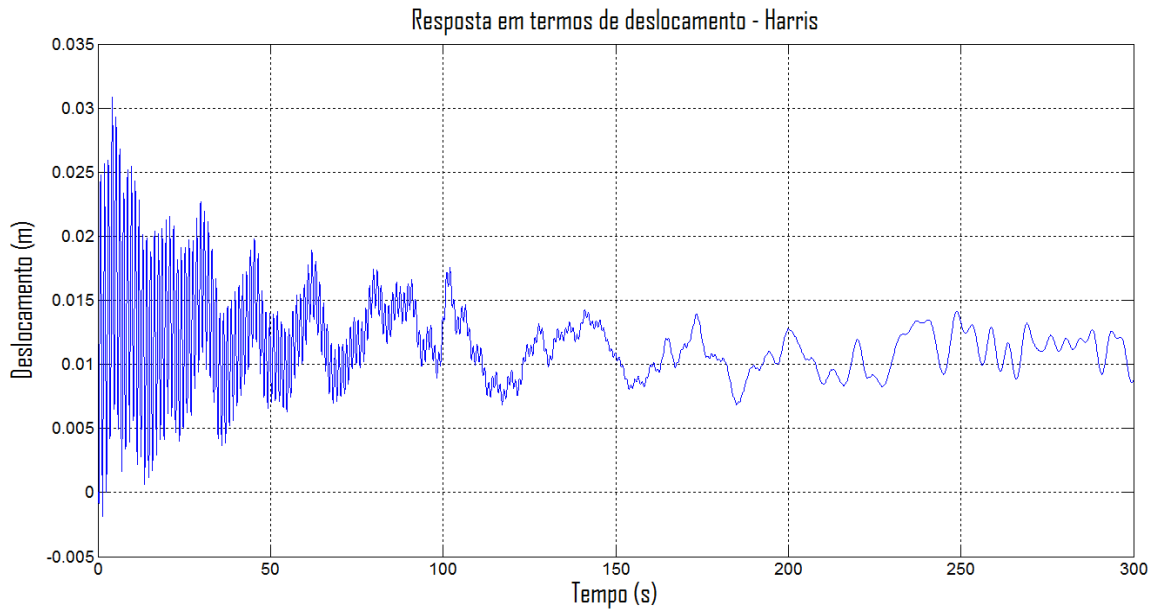


Figura 6.7(a) – Deslocamento horizontal do nó 84 devido à excitação do vento gerada pelo espectro de Harris.

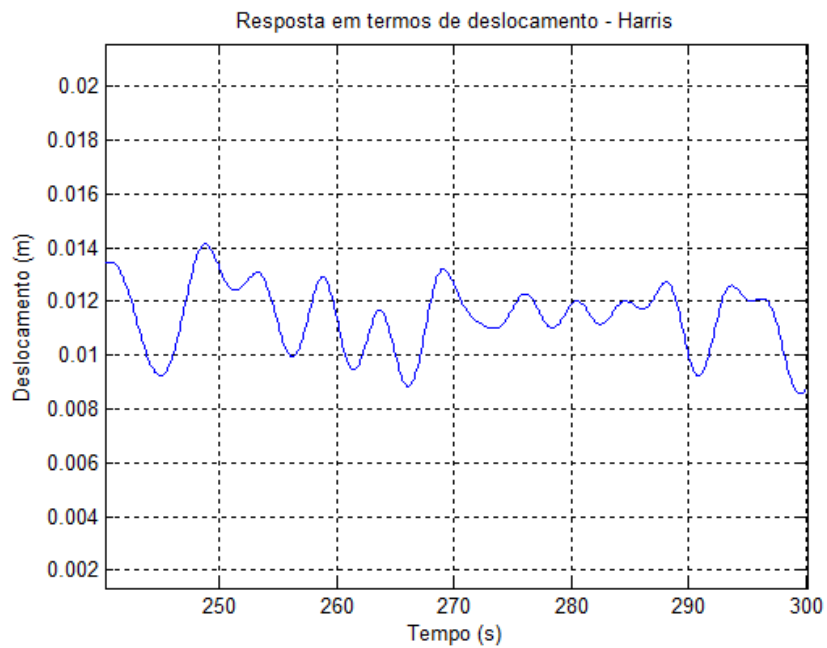


Figura 6.7(b) – Deslocamento horizontal do nó 84 após estabilização da oscilação para o modelo de Harris.

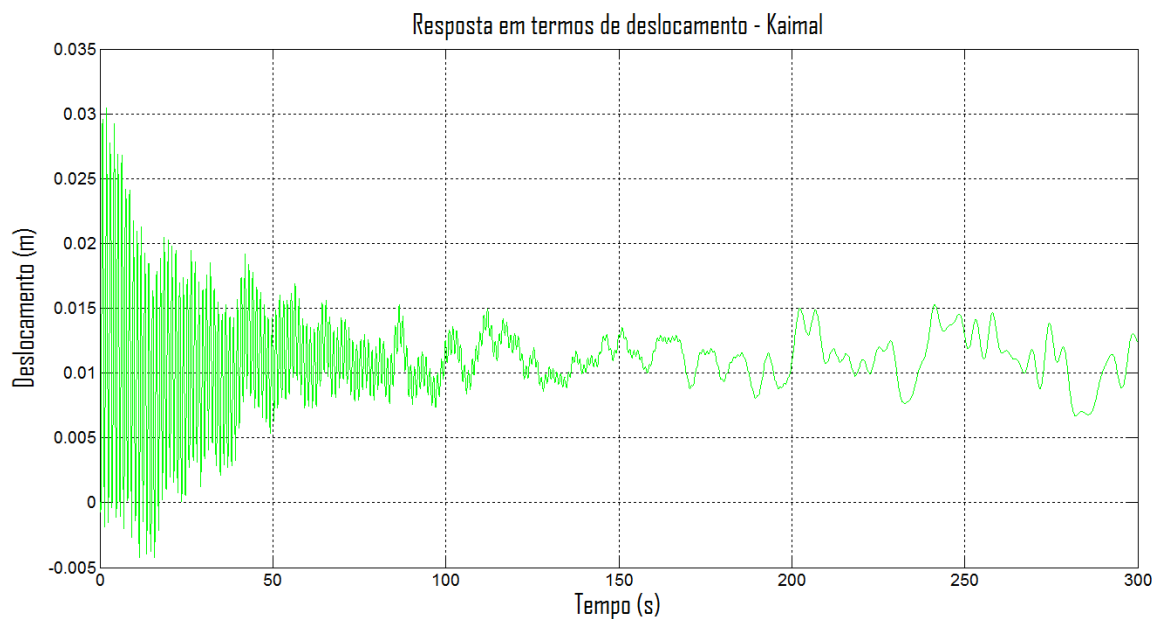


Figura 6.8(a) – Deslocamento horizontal do nó 84 devido à excitação do vento gerada pelo espectro de Kaimal.

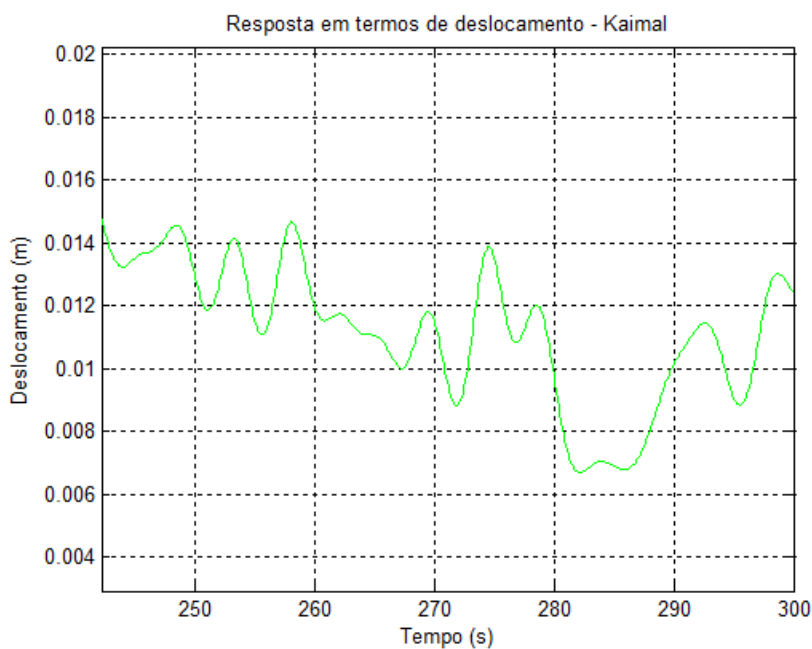


Figura 6.8(b) – Deslocamento horizontal do nó 84 após estabilização da oscilação para o modelo de Kaimal.

Para fins de comparação, uma análise estática foi feita no *software* Ansys, e o deslocamento estático resultante no nó 84 foi de 10,91 mm. Com isso, pode-se observar que o resultado da análise estática é coerente com o resultado obtido na análise dinâmica.

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo elaborar uma rotina numérica computacional para avaliar a influência de três diferentes espectros de vento na resposta dinâmica de um edifício.

A rotina foi desenvolvida no *software* Matlab e mostrou-se capaz de realizar análises dinâmicas com os três diferentes espectros propostos na literatura.

Em relação à utilização dos três diferentes espectros, notou-se que a resposta dinâmica em termos de deslocamento é semelhante entre eles. Sendo assim, não há uma diferença significativa entre os modelos adotados.

Comparando os resultados das análises dinâmicas obtidos com a rotina desenvolvida com o resultado de uma análise estática realizada no *software* comercial Ansys, percebe-se que os valores são semelhantes após a estabilização das oscilações no caso das análises dinâmicas.

Fica como sugestão para futuros trabalhos, a realização de várias rodadas da análise dinâmica, com cada espectro, com o objetivo de obter um deslocamento médio e um coeficiente de variação, possibilitando a análise do fator de pico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

Awruch, A. M.; Di Rado, H. A.; **“Introducción al método de los elementos finitos – análisis elástico lineal”**, Corrientes, República Argentina, 1997.

Blessman J. **“O vento da engenharia estrutural”**. Editora da Universidade; 1995

Davenport, A. G. **“The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds”**. Quart J Roy Meteorol Soc London 1961;87:194–211

Fleck, E. J. **“Geração do Campo Estocástico de Velocidades do Vento e Aplicação a uma Torre de Transmissão”**, Porto Alegre, 2014.

Miguel, L. F. F.; Fadel Miguel, L. F.; Riera, J. D.; Kaminski Jr, J.; Menezes, R.C.R.; **“Assesment of code recommendation through simulation of EPS wind loads along a segmento of a transmission line”**, Engineering Structures 2012.

Miguel, L. F. F., **“Introdução ao Estudo de Vibrações”**, Notas de aula de ENG03374, Porto Alegre, 1ª ed., 2006

Ripper, A. P. Neto, **“Vibrações Mecânicas”** E-papers Serviços Editoriais LTDA., 2007

Riera, J. D.; Ambrosini, R. D.; **“Analysis of structures subjected to random loading using the transfer matrix or numerical integration methods”**, Engineering Structures 1992;14.

Shinozuka, M.; Jan, C. M.; **“Digital simulation of random process and its applications”**. Journal of Sound and Vibration 1972;25:111-8

## ANEXO I

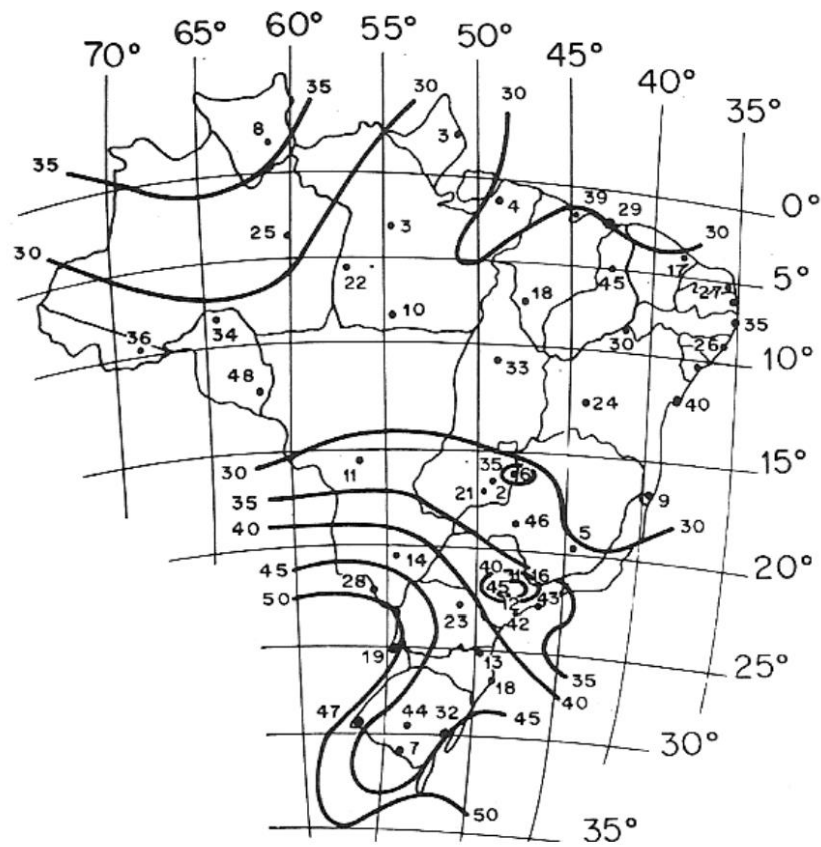


Figura A.I – Mapa de isopletas da velocidade do vento (NBR 6123).

## ANEXO II

$C_x$	$C_y$
+2,05	0
+1,95	+0,6
+0,5	+0,9
-	-
-	-

Figura A.II – Tabela de coeficientes de força para barras prismáticas de faces planas (NBR 6123).