

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

DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DA  
RESPOSTA DINÂMICA DE UM EDIFÍCIO ALTO SUBMETIDO AO VENTO SINÓTICO

por

Ana Luiza Tonon Ávila

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 Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, Julho de 2019.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

DESENVOLVIMENTO DE UMA ROTINA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DA  
RESPOSTA DINÂMICA DE UM EDIFÍCIO ALTO SUBMETIDO AO VENTO SINÓTICO

por

Ana Luiza Tonon Ávila

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

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, 08, Julho, 2019.

## AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha mãe Lygia Tonon Ávila, ao meu padrasto Márcio Adriano G. de Araújo e meus irmãos Alessandro Tonon C. Ávila e Tânia Tonon Ávila pelo apoio e suporte ao longo desses anos de graduação e por sempre estarem ao meu lado.

À professora Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel, orientadora deste trabalho, pela disponibilidade, atenção e comprometimento durante toda a orientação. Por ser um grande exemplo de professora e de representação feminina dentro do curso de engenharia mecânica.

Aos meus colegas e amizades feitas durante a graduação pela parceria e momentos de descontração, muito importantes para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos feitos durante meu estágio da Pirelli que em tão pouco tempo viraram amigos que com certeza serão de longa data. Por me apoiarem e me aconselharem sempre.

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

## RESUMO

A principal solicitação externa que se desenvolve sob uma edificação é a componente de carga exercida pela ação do vento. Para estruturas com frequência natural menor que 1Hz, consideradas flexíveis, deve-se submeter a uma análise dinâmica sob carregamento causado pelo vento. Este presente trabalho consiste na elaboração de uma rotina computacional para obtenção da resposta dinâmica de um edifício alto submetido a vento sinótico (EPS - *extended pressure system*), provocado por tormentas extratropicais. Inicialmente será desenvolvida uma rotina em MATLAB para a geração do campo estocástico de velocidades do vento. Posteriormente, com o campo de velocidades, são calculadas as forças nos andares da estrutura e então é elaborada sub-rotina computacional para a determinação da resposta dinâmica da estrutura, através do método de integração numérica implícita de Newmark. Por fim, os resultados da análise dinâmica serão comparados com os resultados obtidos utilizando a NBR 6123, a qual recomenda uma análise estática equivalente.

A norma brasileira é bem fundamentada e o estudo traz uma pequena diferença entre a média encontrada por análise dinâmica e o cálculo estático. Entretanto, para efeitos de máximo deslocamento, a partir da mesma análise, em comparativo com a resposta estática, o resultado encontrado tem valores oscilatórios de amplitude duas vezes maior que o resultado estático, algo a ser considerado para edificações com baixa frequência de ressonância.

**PALAVRAS-CHAVE:** Vento EPS, análise dinâmica, MATLAB, NBR6123.

Tonon Ávila, A. L. **Development of a Computational Routine to Determinate the Dynamic Response of a Tall Building Subjected to Synoptic Wind Load.** 2019. 16 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## **ABSTRACT**

The main external element applied in a building is the load from the wind action. Structures with natural frequency smaller than 1Hz are considered flexible, these ones should be submitted to a dynamic analysis caused by wind load. This present paper consists on the elaboration of a computational routine to obtain the dynamic response of a tall building subjected to synoptic wind (EPS - *extended pressure system*), caused by extratropical storm. Initially a MATLAB routine will be developed for the generation of the stochastic field of wind velocity. After, with the wind velocity flow, the load on each floor of the structure is calculated and then it will be elaborated a computational sub-routine to determine the dynamic response of the structure, through the Newmark's implicit method of numerical integration. Then, the results of the dynamic analysis will be compared with the results obtained by NBR 6123 code prescript, which recommends an equivalent static analysis.

The Brazilian code is well grounded and the study show a small difference between the mean value proposed by dynamic analysis and the static response. Despite, when we take the maximum displacement and compare with the static results, the dynamic results has an oscillation amplitude two times greater than the static value calculated, something that must be considered for buildings with low resonance frequency.

**KEYWORDS:** EPS wind, dynamic response, MATLAB.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
4.1. Ventos Tipo EPS .....	2
4.2. Espectro de Potência de Davenport .....	3
4.3. Método de Shinozuka – Jan.....	3
4.4. Comprimento de Correlação.....	3
4.5. Método Newmark .....	4
4.6. Norma NBR 6123 – Forças Devidas Ao Vento Em Edificações .....	5
4.6.1. Perfil Vertical de Velocidade Média .....	5
4.6.2. Determinação da Força Devido à Ação Do Vento .....	5
5. METODOLOGIA .....	6
5.1. Definição da Estrutura.....	6
5.2. Elaboração do Código .....	7
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	8
6.1. Espectro de Potência .....	8
6.2. Campo de Velocidade Total .....	9
6.3. Força Dinâmica Total .....	10
6.4. Deslocamento .....	11
6.5. Velocidade e Aceleração.....	13
7. CONCLUSÕES .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
Anexo I .....	16
Anexo II .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O vento vem sendo estudado há milhares de anos, principalmente para o âmbito de fonte de energia a partir da movimentação da força por ele exercida, como por exemplo em moinhos e caravelas para navegações. Entretanto, no estudo da engenharia estrutural a consideração da contribuição do vento é utilizada para estimar os efeitos que este pode causar em uma estrutura, procurando então projetá-la para que não ocorram grandes deslocamentos e/ou esforços indesejados na estrutura.

Atualmente o crescente aumento populacional em grandes cidades nos leva a necessidade de construções de edifícios com altura elevada - para melhor aproveitamento de espaço -, por consequência assim mais esbeltos. Isto, aliado à incontestável evolução da tecnologia nos últimos trinta anos, o desenvolvimento de novos materiais permitiu que a construção utilize cada vez menos quantidade de material. "... as paredes de edifícios altos não têm, em geral, função resistente, mas apenas de vedação." [Blessmann, 1971].

Para padronização de construções no Brasil foi elaborada a norma brasileira NBR 6123/1988 trazendo para o cenário nacional exigências mínimas de projeto e garantindo segurança, devido a carregamentos gerados pela ação do vento. A mesma propõe uma análise estática da ação dos ventos em edificações de baixas a elevadas alturas. Porém a necessidade de realizar uma análise dinâmica deveria ser considerada sabendo que o vento não tem uma velocidade média plenamente constante, mas sim com flutuações no campo de velocidades.

Segundo Blessmann, 1995, para a engenharia estrutural é de interesse conhecer a velocidade média do vento e as flutuações em torno desta média. As flutuações instantâneas em torno da média são designadas por rajadas. Estas flutuações têm sua origem na agitação do escoamento médio causada pela rugosidade natural e artificial da superfície terrestre.

## 2. OBJETIVOS

Tem-se como objetivo neste trabalho elaborar uma rotina numérico-computacional no *software* MATLAB para análise dinâmica dos efeitos do vento sinótico (EPS – *extended pressure system*) em um edifício alto. Inicialmente será desenvolvida a parte da rotina para geração do campo estocástico de velocidades do vento. Posteriormente, calculadas as forças nos andares da estrutura e então é elaborada uma nova rotina computacional para a determinação da resposta dinâmica da estrutura, através do método de integração numérica de Newmark. Com os resultados obtidos, realizar então um estudo comparativo com a regulamentação brasileira, que hoje, utiliza a norma NBR 6123/1988. A norma propõe um cálculo simplificado considerando efeitos de carregamento estático.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Joaquim Blessmann é um dos pioneiros sobre estudos dinâmicos do vento em edificações. Suas contribuições partem de definições essenciais para o entendimento do problema, desde tipos de ventos, comportamento, ventos EPS (*extended pressure system*), aerodinâmica em edificações que foram bem explicados e exemplificados por Blessmann, 1995, até espectros de potência e de respostas elucidados por Blessmann, 1998.

A. G. Davenport, 1961, propôs um modelo para cálculo da densidade espectral para baixas frequências a partir da velocidade de referência do vento e um range de frequências. Pode-se a partir deste encontrar a frequência crítica do espectro, ou seja, a frequência que possui a maior energia de excitação.

Shinozuka e Jan, 1972, propuseram o Método de Representação Espectral que tem como base o princípio de superposição de ondas harmônicas. É o método utilizado para encontrar a flutuação de velocidades a partir de um processo randômico usando a densidade

espectral de potência. A aleatoriedade é dada pelo ângulo de fase com variabilidade entre 0 e  $2\pi$ .

A Norma NBR 6123/1988, que do ponto de vista de engenharia, dita parâmetros para construções de edificações no Brasil devido à força do vento, define velocidade básica do vento de todo país pelo gráfico de isopletas, fatores relacionados a categoria e rugosidade do terreno, perfil de velocidade média, coeficientes de arrasto, de atrito e de pressão, pressão dinâmica do vento e cálculo de forças.

Miguel *et al.*, 2012, apresenta a importância de uma análise dinâmica em torres de transmissão através de um estudo comparativo com a análise recomendada pela norma internacional IEC 60826. Demonstra também cálculos para os diferentes espectros de potências utilizados na engenharia estrutural.

Newmark, N. M., 1959, apresentou o método de Newmark. A concepção de um algoritmo altamente eficaz para resolução do método de integração direta implícita para equações de movimento com a finalidade da utilização na engenharia estrutural em análises dinâmicas.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. VENTOS TIPO EPS

Os ventos sinóticos provenientes de tormentas do tipo EPS (*extended pressure systems*), também conhecidas como sistemas de pressão plenamente desenvolvidos, que são usualmente encontradas em tempestades de ciclones extratropicais, são movimentos circulatorios do ar em torno de centros de baixa pressão em estado maduro e têm como característica o perfil verticalmente estável, conforme mostra a Figura 4.1. Possui constância da velocidade média do vento por até algumas dezenas de horas que atingem uma larga escala de terreno, podendo variar de algumas centenas a poucos milhares de quilômetros de diâmetro.

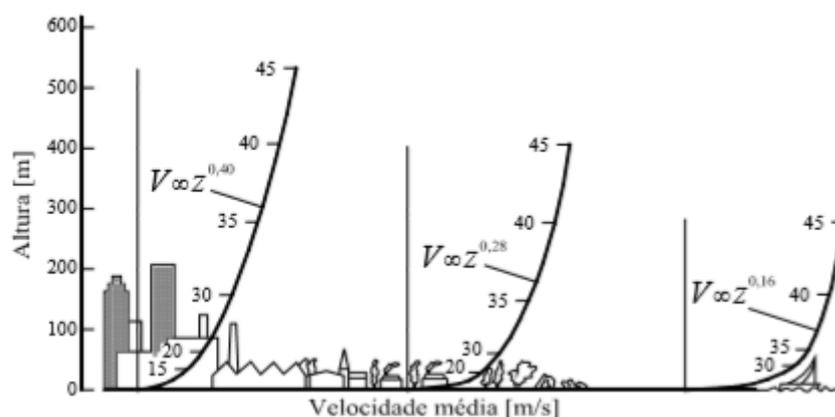


Figura 4.1. Perfil de velocidade média do vento juntamente com demonstração de variedade conforme a rugosidade do terreno. Fonte: LOREDO-SOUZA, 2006.

Tormentas maduras de grandes dimensões, tropicais ou extratropicais, apresentam estabilidade aproximadamente neutra, com nenhuma tendência marcada para intercâmbios térmicos. A influência dominante no perfil de velocidades nestas tormentas não é a estabilidade, mas sim a rugosidade superficial [Davenport, 1960].

## 4.2. ESPECTRO DE POTÊNCIA DE DAVENPORT

Além da solicitação estática do vento, que depende da sua velocidade média, aparecem solicitações dinâmicas, que dependem da energia cinética contida nas flutuações e de como esta energia se distribui pelas diversas frequências [Blessmann, 1995].

O espectro de potências é um método probabilístico que tem como principal função verificar um fenômeno de natureza aleatória e define a densidade de potência por unidade de banda em função da frequência. É uma função real positiva de uma frequência variável associada com um processo estocástico, ou uma função determinística do tempo, que indica a distribuição, nas diversas frequências, da energia contida nesse fenômeno.

Para análise estrutural de carregamento gerado por meio de forças atuantes pela ação do vento, os espectros de potência mais usuais são: O modelo de Davenport, modelo de Harris e o modelo de Kaimal, entre outros. Neste presente trabalho será utilizado o Espectro de Davenport empregando a seguinte expressão:

$$\frac{fS_w(f)}{u_*^2} = \frac{4n^2}{(1+n^2)^{4/3}} \quad (4.1)$$

Na qual  $S_w$  é a densidade espectral,  $n$  é a frequência adimensional definida pela equação  $n = fL/\bar{V}_{10}$ . Para um  $L = 1200m$  por convenção pelo modelo de Davenport e  $f$  é a faixa de frequência de interesse dada em Hz. Por definição  $\bar{V}_{10}$  é a máxima velocidade média a 10 metros sobre o nível do terreno retirada do gráfico de isopletas que neste trabalho será dado pela norma NBR 6123/1988. E o termo  $u_*$  é a velocidade de fricção do vento.

## 4.3. MÉTODO DE SHINOZUKA – JAN

Conhecido como método de Representação Espectral, o método de Shinozuka e Jan (1972) tem como principal característica a simulação de um processo aleatório calculado por uma série de cossenos para produzir as funções de amostra de um campo estocástico gaussiano. A função tem como base para geração da amostra a densidade espectral  $S_w$ .

$$\Delta\vec{V}(t) = \sum_{j=1}^N \sqrt{2S_w(f_j)\Delta f_j} \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) \quad (4.2)$$

Onde a aplicação do método se dá pela divisão da banda de frequência em  $N$  intervalos, de um modo que a  $\Delta f_j = f_{j+1} - f_j$ . Sendo  $\varphi_j$  o ângulo de fase, estabelecido como uma variável aleatória com função de distribuição de probabilidade uniforme alternando de zero a  $2\pi$ . E  $t$  o tempo de duração da rajada de vento, em segundos, utilizado na simulação.

## 4.4. COMPRIMENTO DE CORRELAÇÃO

Para desenvolver o campo de velocidades ao longo do edifício é necessário levar em conta a influência das flutuações da vizinhança em cada ponto da altura através do comprimento de correlação [Miguel et al., 2012].

O comprimento de correlação,  $a$ , determina a interdependência da componente flutuante do vento. Assim, geram-se componentes flutuantes independentes em pontos afastados de 1 comprimento de correlação e para se determinar as componentes flutuantes em pontos intermediários, ou seja, com distâncias menores do que  $a$ , faz uma interpolação através da Equação (4.3).

$$V(z, t) = V_1(t) + \frac{V_2(t) - V_1(t)}{a} z \quad (4.3)$$

na qual  $V_1(t)$  e  $V_2(t)$  são as componentes flutuantes da velocidade geradas de forma independente em pontos afastados de 1 comprimento de correlação ( $\alpha$ ) e  $z$  é a distância (altura) do ponto 1 ao ponto de interesse (menor do que  $\alpha$ ).

#### 4.5. MÉTODO NEWMARK

Os métodos de integração direta das equações de movimento consistem em procedimentos numéricos do tipo passo a passo [Miguel, 2006] e podem ser classificados em implícitos e explícitos.

Estão fundamentados em duas ideias básicas: Estabelecimento do equilíbrio da equação de movimento - dada pela Equação (4.4) - procurando satisfazê-la em um número finito de instantes, separados por incrementos de tempo contidos no intervalo total, e em admitir uma função para representar a variação da aceleração do dentro do intervalo de tempo  $\Delta t$ . A convergência e a exatidão da solução dependerão da capacidade das funções adotadas para representar a aceleração com precisão dentro do intervalo de tempo  $\Delta t$ , bem como o tamanho deste intervalo [Groehs, 2001].

$$[M]\ddot{\vec{x}} + [C]\dot{\vec{x}} + [K]\vec{x} = \vec{F} \quad (4.4)$$

O método Newmark, criado por Nathan M. Newmark em 1959 para uso em engenharia estrutural, é, segundo Groehs, 2001, o método implícito mais eficaz. O algoritmo utiliza a equação de movimento no instante  $t + \Delta t$  para calcular a resposta neste mesmo instante. As equações que determinam a resposta em termos de deslocamento, velocidade e aceleração no tempo  $t + \Delta t$  são dadas, respectivamente, conforme as expressões:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0[M] + a_5[C] + [K])^{-1} * \{ \vec{F}(t_{i+1}) + [M][a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] + [C][a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)] \} \quad (4.5)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.6)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.7)$$

nas quais  $\vec{x}(t_{i+1})$ ,  $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$  e  $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$  representam, nesta ordem, os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração no instante de tempo  $t + \Delta t$ ,  $\vec{x}(t_i)$ ,  $\dot{\vec{x}}(t_i)$  e  $\ddot{\vec{x}}(t_i)$  denotam os vetores deslocamento, velocidade e aceleração no instante de tempo  $t$ . Definem-se as constantes de Newmark conforme o conjunto de equações apresentado a seguir:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha \Delta t^2} & a_1 &= \frac{1}{\alpha \Delta t} & a_2 &= \frac{1}{2\alpha} - 1 & a_3 &= (1 - \delta)\Delta t \\ a_4 &= \delta \Delta t & a_5 &= \frac{\delta}{\alpha \Delta t} & a_6 &= \frac{\delta}{\alpha} - 1 & a_7 &= \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

nas quais os parâmetros  $\alpha$  e  $\delta$  possuem os valores de  $\alpha = 0,25$  e  $\delta = 0,50$  para o algoritmo de Newmark ser incondicionalmente estável na solução de problemas lineares. O vetor da aceleração,  $\ddot{\vec{x}}$ , no tempo inicial  $t_0$  é encontrado pela seguinte equação:

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = [M]^{-1}[\vec{F}(t_0) - [C]\dot{\vec{x}}(t_0) - [K]\vec{x}(t_0)] \quad (4.9)$$

#### 4.6. NORMA NBR 6123 – FORÇAS DEVIDAS AO VENTO EM EDIFICAÇÕES

As normas brasileiras regulamentadoras são um conjunto de diversas normas e regras técnicas, formalizando diretrizes ou características relacionadas a procedimentos, documentos ou processos aplicados em vários âmbitos visando sempre um grau ótimo de ordenação. Asseguram padrões desejáveis como qualidade, segurança, confiabilidade e eficiência.

A NBR 6123/1988 - Forças devidas ao vento em edificações - tem como objetivo fixar as condições exigíveis na consideração das forças devidas à ação do vento, para efeito de cálculo em edificações com geometria e localidade comuns.

##### 4.6.1. PERFIL VERTICAL DE VELOCIDADE MÉDIA

De acordo com a NBR 6123/1988 para determinar a força estática ao longo do edifício, utiliza-se para o perfil de velocidade do vento o cálculo de velocidade característica do mesmo dado pela expressão:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (4.10)$$

na qual  $V_0$  é a velocidade básica do vento para uma determinada localidade dado pelo gráfico de isopletas - velocidade de uma rajada de 3s, excedida na média uma vez em 50 anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano.  $S_1$  é o fator topográfico,  $S_2$  o fator que considera a influência da rugosidade do terreno e das dimensões da edificação em estudo e  $S_3$  o fator estatístico.

O fator topográfico  $S_1$  leva em consideração efeitos da rugosidade do terreno, como elevações do relevo e tem dependência da inclinação onde se encontra a edificação. Para fins deste estudo, considera-se um terreno plano ou fracamente acidentado, ou seja,  $S_1 = 1,0$ .

O fator  $S_2$  pode ser calculado pela expressão recomendada em norma, conforme Equação (4.11), que leva em conta a altura acima do nível geral do terreno no cálculo da velocidade:

$$S_2 = b F_r \left( \frac{z}{10} \right)^p \quad (4.11)$$

na qual  $b$  e  $p$  são parâmetros meteorológicos tabelados pela norma considerando a categorização de efeitos de rugosidade e a classe de edificação.  $F_r$  corresponde ao fator de rajada para a categoria tipo II e  $z$  a altura acima do nível do terreno. Esta expressão é aplicável até a altura gradiente ( $z_g$ ), que para a categoria II é de 300m.

O fator estatístico  $S_3$  elaborado a partir de conceitos estatísticos, considera o grau de segurança requerido e vida útil da edificação. Neste presente trabalho será utilizado o valor mínimo tabelado de  $S_3 = 1,0$ , conforme pode ser observado na tabela no Anexo I.

##### 4.6.2. DETERMINAÇÃO DA FORÇA DEVIDO À AÇÃO DO VENTO

A determinação da força estática devida à ação do vento deriva-se da pressão dinâmica produzida pelo vento no edifício. Esta pode ser calculada, segundo a NBR 6123/1988, pela seguinte expressão:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (4.12)$$

na qual  $q$  é a pressão dinâmica dada em  $N/m^2$  e  $V_k$  a velocidade característica do vento dada em  $m/s$ . Esta equação se dá para condições normais de pressão atmosférica (1atm e temperatura de 15°C).

Finalmente, a expressão da componente da força estática agindo perpendicularmente ao eixo longitudinal do edifício é dada por:

$$F_a = C_a q A_e \quad (4.13)$$

na qual  $F_a$  é a força de arrasto,  $C_a$  é o coeficiente de arrasto e  $A_e$  é a área frontal efetiva da construção, normal à direção do vento. O coeficiente de arrasto  $C_a$  é designado por um gráfico fornecido pela norma conforme Anexo II, este depende das dimensões da edificação.

## 5. METODOLOGIA

A criação da rotina para obtenção da resposta da análise dinâmica de edificações esbeltas foi segmentada em partes e definidas como: (i) caracterização do edifício (suas propriedades e geometria); (ii) cálculo do espectro de potência de Davenport; (iii) determinação do campo de velocidades flutuantes do vento, já calculando as correlações, e determinação do perfil de velocidade média; (iv) cálculo do carregamento devido à ação do vento de acordo com a NBR 6123/1988; (v) concepção de uma rotina para determinação das respostas dinâmicas pelo método de Newmark; e (vi) avaliação das respostas obtidas. A confecção de todas as rotinas computacionais especificadas acima foi realizada no *software* MATLAB.

### 5.1. DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA

O edifício adotado para análise possui a altura total de 90m acima do terreno. Instalado na cidade de Porto Alegre, local no qual se tem uma velocidade básica do vento de 45m/s – apresentada pelo gráfico de isopletas da NBR 6123/1988. A construção dispõe de 30 andares, cada andar com 3m de pé-direito, e de uma largura de 24m. As lajes têm a massa de 360000kg cada e os pilares detêm de uma constante de rigidez equivalente de 650MN/m e constante de amortecimento de 6,2MN.s/m por andar.

A categorização da rugosidade do terreno corresponde ao tipo II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. E a edificação se enquadra na classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50m.

Após definição das características da estrutura e do terreno, parâmetros relacionados a estas propriedades foram extraídos da NBR 6123/1988 e estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Parâmetros de entrada da edificação em estudo de acordo com a NBR 6123.

Parâmetro de entrada	Simbologia	Valor	Unidade de medida
Velocidade básica do vento na cidade de Porto Alegre	$V_0$	45	m/s
Altura de referência	$z_{ref}$	10	m
Comprimento de rugosidade	$z_0$	0,07	m
Fator topográfico	$S_1$	1,00	-
Fator estatístico	$S_3$	1,00	-
Parâmetro meteorológico usado na determinação de S2	$b$	1,00	-
Parâmetro meteorológico usado na determinação de S2	$p$	0,10	-
Fator de rajada	$F_r$	0,95	-
Coeficiente de arrasto	$C_a$	1,50	-

Em termos da faixa de frequência de interesse, neste trabalho usou-se uma frequência mínima  $f_{min} = 0 \text{ Hz}$ , um incremento de frequência de  $df = 0,01 \text{ Hz}$  e uma frequência máxima  $f_{max} = 5 \text{ Hz}$ . Para o intervalo de tempo, foi fixado um incremento de tempo  $dt = 0,02 \text{ s}$ , iniciando no tempo mínimo  $t_{min} = 0 \text{ s}$  e tempo máximo  $t_{max} = 100 \text{ s}$ .

## 5.2. ELABORAÇÃO DO CÓDIGO

A concepção da rotina computacional se inicia pela entrada de dados pré-definidos, como:

Escolha do prédio, assim como definição das massas que se encontram em cada laje e constantes de rigidez e de amortecimento de todos pilares que sustentam as mesmas.

Após a definição das propriedades do prédio passa-se para a montagem das matrizes de massa, rigidez e amortecimento globais do sistema. Com as matrizes de massa e rigidez pode-se calcular a matriz dinâmica e resolver o problema de autovalores e autovetores, determinando as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Na Tabela 5.2 apresentam-se as 5 primeiras frequências naturais do edifício.

Tabela 5.2. Cinco primeiras frequências naturais do edifício.

Modo	Frequência Natural (Hz)
1º	0,3483
2º	1,0438
3º	1,7367
4º	2,4249
5º	3,1067

Tendo-se então a frequência natural do primeiro modo calculada, salienta-se que para frequências menores que 1Hz, ou seja, com um período superior a 1s, a resposta flutuante na direção do vento médio pode apresentar grande importância.

A partir destes dados é feita então a entrada dos dados como a banda de frequência e sua variação, tempo inicial e final, incrementação temporal e a variação de altura de acordo com os andares do prédio. Também são inseridos os dados retirados da norma, como a velocidade e altura de referência e comprimento de rugosidade e é feito o cálculo da velocidade de fricção do vento  $u_*$  conforme a seguinte expressão:

$$u_* = 0,4 \frac{\bar{V}_{10}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (5.1)$$

Tendo a frequência do primeiro modo, nesse caso a ser analisado menor que 1Hz, e os dados elucidados anteriormente, passa-se então à busca do espectro de potência desenvolvido por Davenport conforme a Equação (4.1). Após o cálculo, faz-se a plotagem do gráfico da densidade espectral em função da frequência empregado para análise, assim é possível constatar qual a faixa de frequência crítica do espectro.

Depois de encontrar os valores provenientes da equação (4.1) para o espectro de potências, utilizam-se os resultados para execução do método de Shinozuka e Jan (1972) denominado de Método de Representação Espectral, conforme mostra a Equação (4.2). Encontra-se a partir deste a componente flutuante da velocidade (variação aleatória da velocidade ao longo do tempo) do vento, devido a um número predeterminado de frequência de rajadas.

É necessário então correlacionar as variações randômicas da componente flutuante do vento, através do comprimento de correlação. A variação é ao longo do eixo  $z$ , e a Equação (4.3) fornece as velocidades correlacionadas. O comprimento de correlação  $a$  foi definido para este trabalho como 45 metros, este valor foi dado pela curva experimental apresentada por Blessmann, 1995, onde têm-se a relação da altura com o comprimento de correlação.

Após realizada a correlação das componentes flutuantes da velocidade é então realizada a soma da componente flutuante juntamente com a velocidade média – encontrada pela Equação (4.10) – para cada altura ao longo do edifício, obtendo assim a componente total do campo estocástico de velocidades do vento. Conforme mostra a Equação (5.2).

$$\vec{V}_{total}(z, t) = \vec{V}(z) + \Delta\vec{V}(z, t) \quad (5.2)$$

Onde  $\vec{V}_{total}(z, t)$  é a componente de velocidade total,  $\vec{V}(z)$  é a componente da velocidade dada pelo perfil de velocidade vertical e  $\Delta\vec{V}(z, t)$  é a componente flutuante da velocidade, todas em função da altura  $z$ .

Para análise estática, a componente de velocidade média de perfil vertical do vento é usada para estimar as forças aplicadas em cada segmento. O cálculo de forças é o mesmo estabelecido pela norma NBR-6123/1988: Inicialmente calcula-se o perfil de pressão dinâmica devido ao vento EPS ao longo do edifício utilizando a Equação (4.12) e então substitui-se na Equação (4.13), obtendo-se assim a força estática aplicada sobre a estrutura.

A resposta para análise estática da estrutura gerada pela ação do vetor de força estática se dá pela equação:

$$\vec{y} = \vec{F}/[K] \quad (5.3)$$

Para análise dinâmica é necessário então, a partir do resultado da componente total do campo de velocidades, encontrar a força dinâmica sendo aplicada sobre a estrutura. Utiliza-se a mesma expressão, Equação (4.13), porém com a pressão dinâmica gerada pelo campo de velocidades total.

Com os deslocamentos e velocidades iniciais iguais a zero e tendo os vetores de força e as matrizes de rigidez, de massa e de amortecimento, calcula-se a partir da equação de movimento o vetor de aceleração inicial através da Equação (4.9).

A resposta dinâmica do edifício é encontrada pelo método implícito de integração da equação diferencial de movimento proposto por Newmark. Para uma situação incondicionalmente estável, é inserido o vetor da força dinâmica na sub-rotina criada para resolução de Newmark com as Equações (4.5), (4.6) e (4.7). Obtém-se assim as respostas dinâmicas finais em termos dos vetores de deslocamento  $\vec{x}$ , velocidade  $\dot{\vec{x}}$  e aceleração  $\ddot{\vec{x}}$ .

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a elaboração e verificação da rotina numérico-computacional para resolução do estudo, neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos.

### 6.1. ESPECTRO DE POTÊNCIA

Através da Equação (4.1) e com parâmetros de entradas definidos anteriormente, obtém-se o seguinte gráfico de densidade espectral pelo método de Davenport, conforme mostra a Figura 6.1.

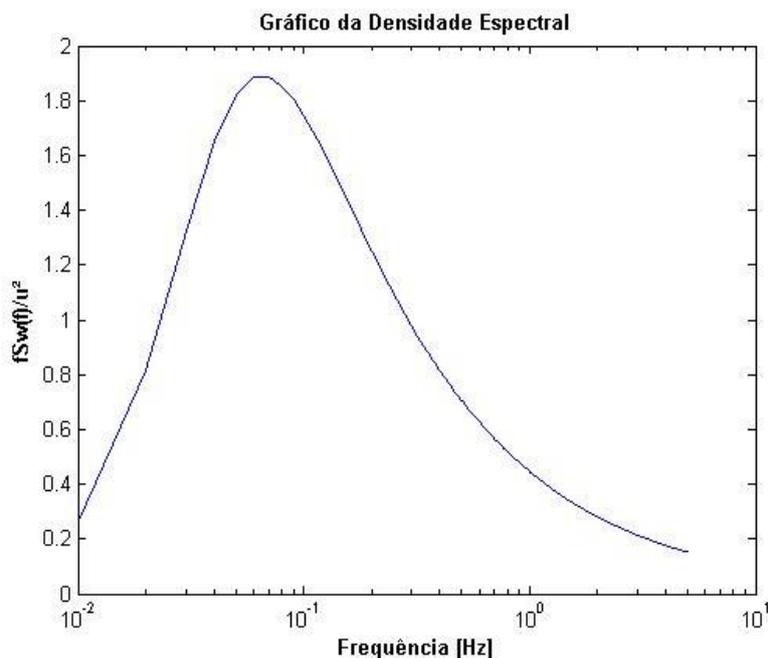


Figura 6.1. Gráfico do espectro de potência de Davenport obtido.

É possível constatar a faixa de frequência crítica do modelo (situada nas proximidades da frequência fundamental da estrutura) que é onde se encontra o pico da densidade espectral obtido.

## 6.2. CAMPO DE VELOCIDADE TOTAL

O campo estocástico de velocidade total gerado pela ação do vento se dá pelo contexto da adição da velocidade média, calculada conforme Norma NBR 6123/1988, com flutuações encontradas através do método para simulação de processo aleatório de Shinozuka e Jan (1972), utilizando o espectro de densidade de Davenport.

A Figura 6.2 mostra o campo de velocidades dos últimos 3 andares do prédio. É possível notar que os andares apresentam velocidade média próximas dos 45m/s – que é a velocidade básica do vento em Porto Alegre – e sua componente flutuante.

A oscilação da componente longitudinal do vento encontrada no gráfico desenvolve-se pelo efeito de turbulência que gera alternância da intensidade da rajada. É importante ressaltar, apesar de não estar representada no gráfico, que a velocidade média do vento do primeiro andar (térreo) é igual a zero contendo somente a atuação da componente flutuante para fins de aplicação na correlação de comprimento.

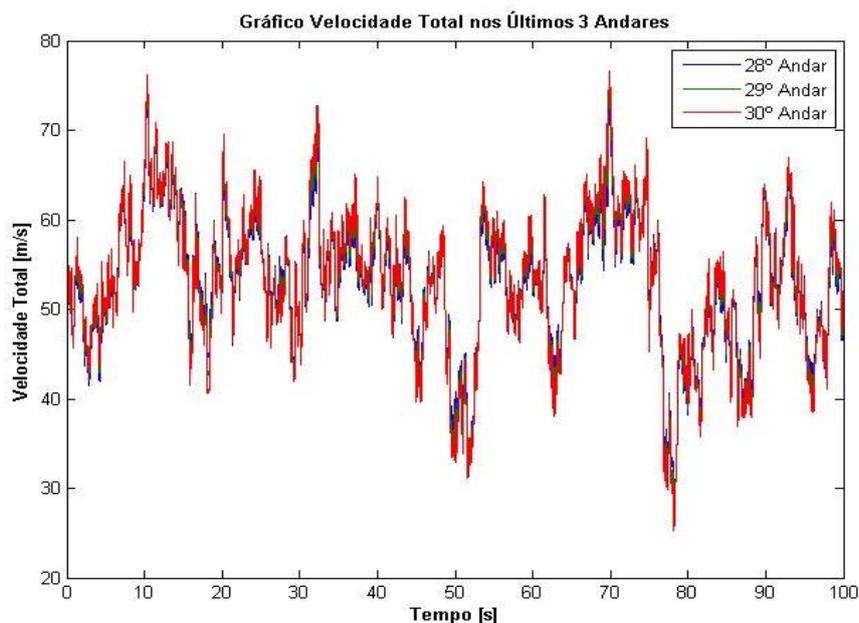


Figura 6.2. Campo de velocidades nos últimos 3 andares gerado pelo vento EPS (média mais flutuações).

Os valores das velocidades variam de aproximadamente 14 m/s - velocidade mínima encontrada próximo ao térreo durante o período de 100 segundos -, até aproximadamente 77 m/s - velocidade máxima encontrada no último andar para o mesmo período de tempo.

### 6.3. FORÇA DINÂMICA TOTAL

Proveniente da Equação (4.13) utilizando as velocidades totais aplicadas em cada andar, o campo de forças dinâmicas atuando ao longo dos 3 últimos andares da estrutura é apresentado no gráfico da Figura 6.3.

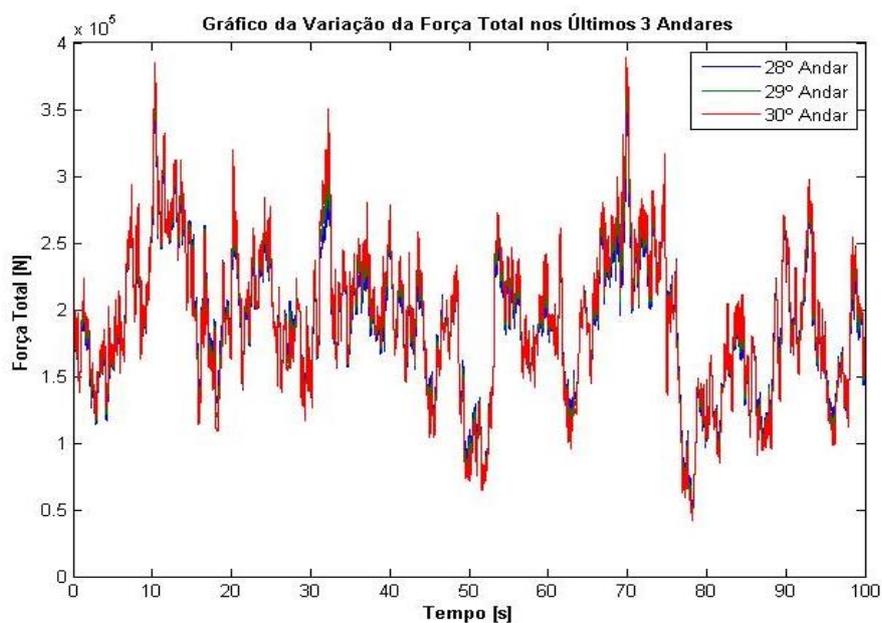


Figura 6.3. Gráfico da força total nos últimos 3 andares gerado pelo vento EPS.

Pode-se constatar que há grandes variações devido à alternância do campo de velocidades totais, o qual é utilizado para o cálculo das forças. A variabilidade da força tem o valor mínimo de aproximadamente de 12100N na proximidade do andar térreo até uma força máxima aproximada de 388640N localizada no último andar.

#### 6.4. DESLOCAMENTO

A resposta dinâmica para o deslocamento foi achada a partir da sub-rotina do método de Newmark. Tem-se na Figura 6.4 a resposta dinâmica do 30º andar (altura de 90 m). O valor médio do deslocamento dinâmico no 30º andar é de 0,1252m, já o valor estático encontrado foi de 0,1225m. O deslocamento máximo para análise dinâmica foi de 0,2864m.

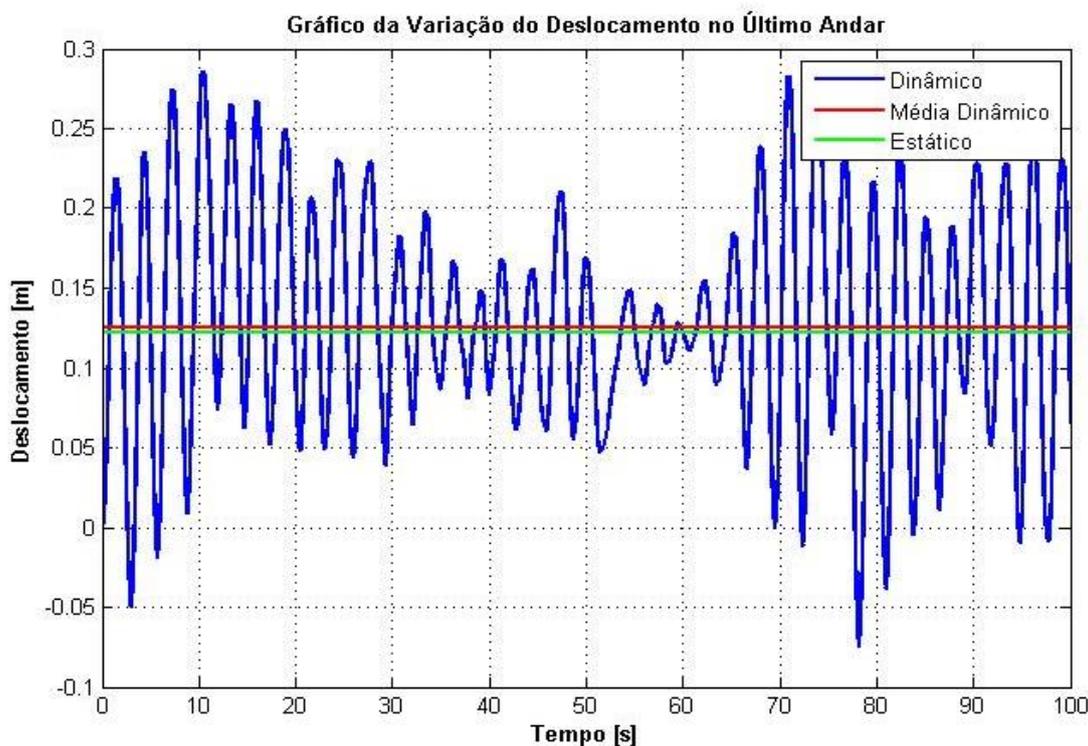


Figura 6.4. Gráfico da resposta do deslocamento dinâmico gerado no último andar pela ação do vento EPS.

Conforme mostra a legenda do gráfico acima: (i) A flutuação da resposta está representada em azul; (ii) O valor médio da flutuação encontra-se grafado na cor vermelha; (iii) A linha com coloração verde é a resposta estática para o mesmo andar, encontrado para análise estática do sistema proposta pela NBR 6123/1988.

O percentual médio da diferença entre a resposta estática e a média da resposta dinâmica encontrado foi de 2,2%. É possível destacar também a razão entre o deslocamento máximo e o deslocamento estático que é de aproximadamente 2,3 nos andares mais altos, conforme mostra a Tabela 6.1.

Salienta-se que, conforme explicado anteriormente, a componente flutuante da velocidade do vento depende de um ângulo de fase aleatório, então pequenas variações na resposta dinâmica podem ser encontradas a cada rodada da rotina computacional desenvolvida.

Tabela 6.1. Representação dos deslocamentos do estudo proposto, da diferença percentual da média do deslocamento dinâmico e do estático e da razão entre o deslocamento máximo dinâmico e o estático.

Andar	Deslocamento Estático (m)	Média do Deslocamento Dinâmico (m)	Deslocamento Máximo Absoluto da Análise Dinâmica (m)	Diferença da Média e Deslocamento Estático	Razão Deslocamento Máximo e Deslocamento Estático
0	0	0	0	-	-
1	0,0073	0,0075	0,0161	2,740%	2,2055
2	0,0145	0,0148	0,0319	2,069%	2,2000
3	0,0215	0,022	0,0475	2,326%	2,2093
4	0,0283	0,0289	0,0626	2,120%	2,2120
5	0,0349	0,0357	0,0773	2,292%	2,2149
6	0,0414	0,0423	0,0917	2,174%	2,2150
7	0,0476	0,0486	0,1056	2,101%	2,2185
8	0,0536	0,0547	0,1192	2,052%	2,2239
9	0,0593	0,0606	0,1327	2,192%	2,2378
10	0,0649	0,0663	0,1458	2,157%	2,2465
11	0,0702	0,0717	0,1584	2,137%	2,2564
12	0,0753	0,0769	0,1706	2,125%	2,2656
13	0,0801	0,0819	0,1822	2,247%	2,2747
14	0,0847	0,0866	0,1932	2,243%	2,2810
15	0,0891	0,091	0,2036	2,132%	2,2851
15	0,0891	0,091	0,2036	2,132%	2,2851
16	0,0932	0,0952	0,2134	2,146%	2,2897
17	0,097	0,0991	0,2226	2,165%	2,2948
18	0,1006	0,1028	0,2311	2,187%	2,2972
19	0,1039	0,1062	0,239	2,214%	2,3003
20	0,107	0,1093	0,2462	2,150%	2,3009
21	0,1098	0,1122	0,2528	2,186%	2,3024
22	0,1123	0,1147	0,2587	2,137%	2,3037
23	0,1146	0,117	0,264	2,094%	2,3037
24	0,1165	0,1191	0,2686	2,232%	2,3056
25	0,1182	0,1208	0,2733	2,200%	2,3122
26	0,1197	0,1223	0,2776	2,172%	2,3191
27	0,1208	0,1234	0,2811	2,152%	2,3270
28	0,1217	0,1243	0,2837	2,136%	2,3311
29	0,1222	0,1249	0,2855	2,209%	2,3363
30	0,1225	0,1252	0,2864	2,204%	2,3380

## 6.5. VELOCIDADE E ACELERAÇÃO

A resposta dinâmica em termos de velocidade e aceleração para o 30° andar do edifício é apresentada nas Figuras 6.5 e 6.6, respectivamente.

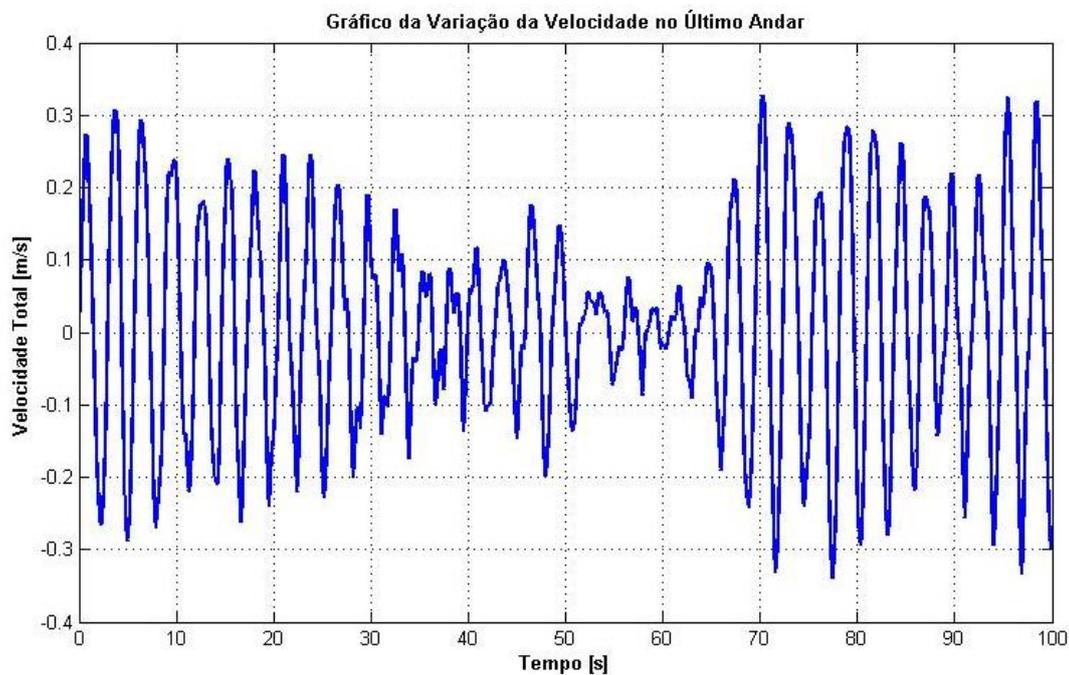


Figura 6.5. Gráfico da resposta dinâmica em termos de velocidade para o último andar do edifício.

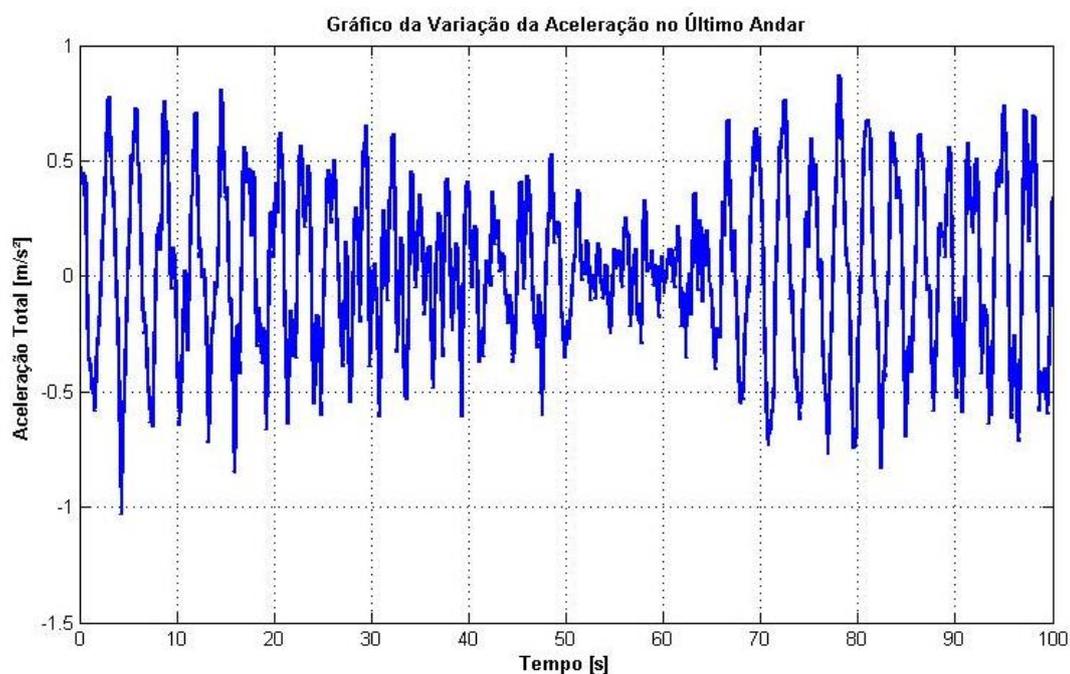


Figura 6.6. Gráfico da resposta dinâmica em termos de aceleração para o último andar do edifício.

## 7. CONCLUSÕES

O estudo proposto para elaboração de uma rotina computacional para determinação das respostas dinâmicas de uma edificação devidas à ação do vento tipo EPS teve êxito. Isto aplicado para uma edificação de 90m de altura na cidade de Porto Alegre, com propriedades de terreno e características da construção apresentadas pela NBR 6123/1988. Os programas computacionais desenvolvidos foram capazes tanto de gerar o campo estocástico correlacionado de velocidades do vento (médio mais flutuações) quanto de aplicá-lo a uma estrutura e determinar a resposta dinâmica da mesma.

A média da resposta dinâmica vista em todos os andares obteve um percentual de diferença muito baixo quando comparado com a resposta estática para o deslocamento, chegando em alguns andares próximo de 2,2% maior, lembrando que este valor pode variar um pouco em função da aleatoriedade do ângulo fase.

No entanto, as diferenças encontradas entre deslocamento dinâmico máximo e o deslocamento estático chegam a ser 2,3 vezes maior que o valor calculado para cargas estáticas concentradas em todos os andares. Isso confirma que em edificações altas com baixa frequência natural (menor que 1Hz) é necessária então uma análise dinâmica para melhor averiguar os efeitos das flutuações originadas pelo vento tipo EPS. Isso se agrava ainda mais no caso de estruturas com amortecimento próprio baixo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

BLESSMANN, J., "**Acidentes causados pelo vento**", 4ª ed., Editora da Universidade UFRGS, 2001, Porto Alegre, RS.

BLESSMANN, J., "**Introdução ao estudo das ações dinâmicas do vento**", 2ª ed., Editora da Universidade UFRGS, 2005, Porto Alegre, RS.

CHÁVEZ E. S., "**Análise Estrutural de Edifício Alto Submetido às Pressões Flutuantes Induzidas pela Ação do Vento**", Dissertação de Mestrado UFMG, 2006.

DAVENPORT, A.G., "**Wind loading on structures**", Ottawa, Nacional Research Council, 1960.

DAVENPORT, A.G., "**The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds**", Quart J Roy Meteorol Soc London, 1961.

GROEHS, A. G. "**Mecânica Vibratória**", Editora Unisinos, 2ª ed., 2001.

LOREDO-SOUZA, A. M. ; CARPEGGIANI, Elvis Antônio ; NÚÑEZ, Gustavo Javier Zani ; RIPPEL, Leandro Inácio ; PALUCH, Mário José . "**Estudo comparativo sobre a ação e efeitos do vento em edifícios altos de concreto armado**". In: VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2006, São Paulo, SP. VI Simpósio EPUSP Estruturas de Concreto, 2006.

MIGUEL, L. F. F.; "**Introdução ao estudo de vibrações**", Notas de Aula, UFRGS, 2006.

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

RAO S. S., **“Mechanical Vibrations”**, 4<sup>a</sup> ed., Pearson Prentice Hall, 2004.

SHINOZUKA, M.; JAN C. M.; **“Digital simulation of random process and its applications”**. J Sound Vib, 1972.

## ANEXOS

I - Fator  $S_3$  (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

Tabela 3 - Valores mínimos do fator estatístico  $S_3$

Grupo	Descrição	$S_3$
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, 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 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

II - Coeficiente de arrasto  $C_a$  (NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações).

