

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

VAGNER HENRIQUE DOS SANTOS

**COMPARAÇÃO DO MÉTODO DISCRETO DA NBR 6123 E DO
MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO PARA EDIFICAÇÕES EM
CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2018

VAGNER HENRIQUE DOS SANTOS

**COMPARAÇÃO DO MÉTODO DISCRETO DA NBR 6123 E DO
MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO PARA EDIFICAÇÕES EM
CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

Dissertação apresentada como requisito de obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Área de Concentração: Construção Civil – Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. João Elias Abdalla Filho.

CURITIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237c Santos, Vagner Henrique dos
2018 Comparação do método discreto da NBR 6123 e do método do vento sintético para edificações em concreto armado de múltiplos pavimentos / Vagner Henrique dos Santos.-- 2018.
126 f.: il.; 30 cm.

Disponível também via World Wide Web
Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2018
Bibliografia: p. 107-110

1. Concreto armado. 2. Pavimentos de concreto. 3. Monte Carlo, Método de. 4. Ventos - Velocidade - Medição. 5. Engenharia de estruturas. 6. Construção civil. 7. Engenharia civil - Dissertações. I. Abdala Filho, João Elias, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº130

A Dissertação de Mestrado intitulada COMPARAÇÃO DO MÉTODO DISCRETO DA NBR 6123 E DO MÉTODO VENTO SINTÉTICO PARA EDIFICAÇÕES EM CONCRETO ARMADO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) Vagner Henrique Dos Santos, no dia 29 de novembro de 2017, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof(a). Dr(a). João Elias Abdalla Filho - Presidente - UTFPR

Prof(a). Dr(a). Ricardo José Bertin – PUC-PR

Prof(a). Dr(a). Rogério Francisco Kuster Puppi - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

CURITIBA, 29 DE NOVEMBRO DE 2017.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

Aos meus pais Aderbal e Vandercy.

AGRADECIMENTOS

À Nossa Senhora do Monte Claro.

Ao professor João Elias Abdalla Filho, que me orientou neste trabalho.

Ao amigo Gerson Gasparin Barão, que me incentivou a fazer o mestrado.

Ao amigo Emerson Leite, que sempre me apoiou nos momentos de dificuldades.

À Cindy Carvalho Feijó, por resgatar a esperança de que os sonhos são possíveis.

Aos meus pais Aderbal Henrique dos Santos e Vandercy Adelaide Polo dos Santos, pela paciência nos momentos em que fiquei mais ocupado.

Ao meu irmão Vitor Henrique dos Santos, pela confiança em mim depositada.

RESUMO

SANTOS, Vagner H. **Comparação do Método Discreto NBR 6123 (ABNT-1988) e do Método do Vento Sintético (FRANCO-1993), para edificações em concreto armado de múltiplos pavimentos**. 2018. 126p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O cenário econômico e as relações interpessoais fazem com que o ser humano passe a se concentrar em grandes cidades, sendo necessário um planejamento urbano, a fim de concentrar a população em específicas regiões de forma a facilitar o seu atendimento, como, por exemplo, comércio, saneamento, segurança e transporte público, garantindo uma logística ideal à população. As regiões próximas a esses pontos de atendimento sofrem uma valorização imobiliária, tornando-se cada vez mais comum a verticalização das construções, de maneira a se maximizar o potencial construtivo das áreas centrais e minimizar o custo dos espaços urbanos. Por conseguinte, os engenheiros pesquisadores enfrentam o desafio para um desenvolvimento de técnicas de cálculo e modelagens computacionais a fim de minimizar e aproximar ainda mais o cálculo das estruturas às solicitações reais, reduzindo o consumo de materiais. Um dos fatores a ser considerado para dimensionamento de uma estrutura, são as forças dos ventos incidentes em sua superfície, contribuindo para um elevado consumo de materiais, de maneira que as peças estruturais possam resistir a solicitações de esforços impostas. Assim sendo, o objetivo desta dissertação é comparar o Modelo do Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) e o Método do Vento Sintético (Franco, 1993) para edificações de múltiplos pavimentos em concreto armado. Foram estudadas duas edificações para os dois métodos, sendo o modelo I uma torre constituída por 34 pavimentos, com altura total de 103 metros. No caso do Modelo II, a edificação é constituída por 28 pavimentos, com altura total de 65 metros e a assimetria dos pórticos da edificação faz com que as deformações sejam diferentes, mesmo com os coeficientes de arrasto semelhantes para as duas direções.

Palavras-chave: Edifícios de Múltiplos Pavimentos, Modelo de Vento Sintético, Método discreto da NBR 6123.

ABSTRAC

SANTOS, Vagner H. **Comparison between the Discrete Method NBR 6123 (ABNT-1988) and the Synthetic Wind Method (FRANCO-1993), for multi-storey reinforced concrete buildings.** 2017. 123p. Dissertation (Master degree) - Post-Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017.

The economic scenario and the interpersonal relations make the human being focus on large cities and urban planning is necessary in order to concentrate the population in specific regions so as to facilitate their attendance, such as commerce, sanitation, security and public transportation, guaranteeing an ideal logistics for the population. The regions close to these points of service undergo a real estate valuation, becoming more and more common the verticalization of the buildings, in such a way to maximize the constructive potential of the central areas and to minimize the cost of the urban spaces. Therefore, research engineers face the challenge of developing computing techniques and computational modeling to minimize and further approximate the computation of structures to actual requests, reducing material consumption. One of the factors to be considered for designing a structure is the force of the winds upcoming on its surface, contributing to a high consumption of materials, so that the structural parts can withstand the demands of imposed forces. Thus, the objective of this dissertation is to compare the Model of the Discrete Method NBR 6123 (ABNT, 1988) and the Synthetic Wind Method (Franco, 1993) for multiple pavements in reinforced concrete. Two buildings were studied for the two methods, the model I being a tower consisting of 34 floors, with a total height of 103 meters. In the case of Model II, the building consists of 28 floors, with a total height of 65 meters and the asymmetry of the building's porticos causes the deformations to be different, even with similar drag coefficients for the two directions.

Keywords: Multiple Pavement Buildings, Synthetic Wind Model, Discrete Method of NBR 6123.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração Tacoma Narrows (1940) – Fonte: BILAH (1991).	27
Figura 2 – Ilustração World Trade Center – New York (1970) – Fonte: DIAS (2010).	28
Figura 3 – Ilustração do Edifício Sears Towers – Chicago (1974).....	29
Fonte: PEREIRA (2011).	29
Figura 4 – Ilustração Torres Gêmeas Petronas – Kuala Lumpur (1998). Fonte: NELSON KON.....	30
Figura 5 – Edifício E-tower – São Paulo (2002). Fonte: NELSON KON.....	30
Figura 6 - Coeficiente de arrasto, C_a para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência. Fonte NBR 6123/88.....	33
Figura 7 - Coeficiente de arrasto, C_a para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência. Fonte NBR 6123/88.	34
Figura 8 - Isopletas da velocidade básica do vento (m/s). Fonte NBR 6123/88.....	35
Figura 9 - Fator Topográfico S_1 , Taludes. Fonte NBR 6123/88.....	36
Figura 10 - Fator Topográfico S_1 , Morros. Fonte NBR 6123/88.	36
Figura 11 – Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988).....	41
Figura 12 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria I ($L=1800$ m), NBR 6123.	43
Figura 13 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria II ($L=1800$ m), NBR 6123.	44
Figura 14 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria III ($L=1800$ m), NBR 6123.	44
Figura 15 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria IV ($L=1800$ m), NBR 6123.	45
Figura 16 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria V ($L=1800$ m), NBR 6123.	45
Figura 17 – Rajadas equivalentes. Fonte: Franco (1993).	51
Figura 18. Esquema vertical do modelo 1.	57
Figura 19. Perspectiva espacial do modelo 1.....	58
Figura 20. Forma da estrutura pavimento tipo, modelo 1.....	59
Figura 21. Modo de vibração 1 – Frequência fundamental de 0,225Hz.	61

Figura 22. Modo de vibração 2 – Frequência fundamental de 0,229Hz.	61
Figura 23. Modo de vibração 3 – Frequência fundamental de 0,278Hz.	62
Figura 24. Modo de vibração 4 – Frequência fundamental de 0,700Hz.	62
Figura 25. Modo de vibração 5 – Frequência fundamental de 0,861Hz.	62
Figura 26. Modo de vibração 6 – Frequência fundamental de 0,999Hz.	63
Figura 27. Modo de vibração 7 – Frequência fundamental de 1,171Hz.	63
Figura 28. Modo de vibração 8 – Frequência fundamental de 1,487Hz.	64
Figura 29. Modo de vibração 9 – Frequência fundamental de 1,514Hz.	64
Figura 30. Modo de vibração 10 – Frequência fundamental de 1,708Hz.	64
Figura 31. Ângulo de Incidência do Vento.	65
Figura 32. Pórtico com a indicação do ponto com maior deslocamento no modelo I.	65
Figura 33. Deslocamento do vento incidência 90° e 270°, deslocamento em y.	71
Figura 34. Deslocamento do vento incidência 0° e 180°, deslocamento em x.	71
Figura 35. Aceleração do vento incidência 90° e 270°, deslocamento em y.	72
Figura 36. Aceleração do vento incidência 0° e 180°, deslocamento em y.	72
Figura 37. Esquema vertical do modelo 2.	75
Figura 38. Perspectiva espacial do modelo 2.	76
Figura 39. Forma da estrutura pavimento tipo, modelo 2.	77
Figura 40. Modo de vibração 1 – Frequência fundamental de 0,224Hz.	79
Figura 41. Modo de vibração 2 – Frequência fundamental de 0,267Hz.	79
Figura 42. Modo de vibração 3 – Frequência fundamental de 0,290Hz.	79
Figura 43. Modo de vibração 4 – Frequência fundamental de 0,716Hz.	80
Figura 44. Modo de vibração 5 – Frequência fundamental de 0,9216Hz.	80
Figura 45. Modo de vibração 6 – Frequência fundamental de 0,947Hz.	80
Figura 46. Modo de vibração 7 – Frequência fundamental de 1,178Hz.	81
Figura 47. Modo de vibração 8 – Frequência fundamental de 1,592Hz.	81
Figura 48. Modo de vibração 9 – Frequência fundamental de 1,652Hz.	81
Figura 49. Modo de vibração 10 – Frequência fundamental de 1,763Hz.	82
Figura 50. Ângulo de Incidência do Vento.	82
Figura 51. Pórtico com a indicação do ponto com maior deslocamento no modelo II.	83
Figura 52. Deslocamento do vento incidência 90° e 270°, deslocamento em y.	89
Figura 53. Deslocamento do vento incidência 0° e 180°, deslocamento em x.	89

Figura 54. Aceleração do vento incidência 90° e 270° , deslocamento em y.	90
Figura 55. Aceleração do vento incidência 0° e 180° , deslocamento em x.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Fator topográfico em função da inclinação do talude.	37
Tabela 3.2. - Parâmetros meteorológicos para diferentes categorias e classes de terreno.	38
Tabela 4.1. Modos de vibração da estrutura modelo I.	56
Tabela 4.1. Modos de vibração da estrutura modelo I.	60
Tabela 4.2. Carregamento do vento – modelo I – direção 0° e 180° –	67
Tabela 4.3. Carregamento do vento - modelo I – direção 90° e 270° –	68
Tabela 4.4. Deslocamento no ponto mais alto para o modelo I da estrutura	70
Tabela 4.7. Modos de vibração da estrutura modelo II.	74
Tabela 4.7. Modos de vibração da estrutura modelo II.	78
Tabela 4.8. Carregamento do vento – modelo II – direção 0° e 180° –	85
Tabela 4.9. Carregamento do vento – modelo II – direção 90° e 270° –	86
Tabela 4.10. Deslocamento do ponto mais alto para o modelo II da estrutura	88

LISTA DE SIMBOLOS

C_a	Coeficiente de arrasto de vento
q	Pressão dinâmica do vento
A_e	Área frontal efetiva
V_k	Velocidade característica de vento
P	Massa específica
V_0	Velocidade básica
S_1	Fator estatístico de relevo
Z	Altura do edifício a partir da superfície do terreno
S_2	Fator estatístico em função da altura da edificação
B	Parâmetro meteorológico referente à categoria de rugosidade do terreno e à classe da edificação
P	Expoente da lei potencial de variação
F_r	Fator de rajada
S_3	Fator estatístico probabilístico em função do tempo de incidência
X_i	Deslocamento correspondente à coordenada i
A_i	Área de influência correspondente à coordenada i
M_i	Massa discreta correspondente à coordenada i
Z_i	Altura do elemento i sobre o nível do terreno
N	Número de graus de liberdade

Γ	Expoente da forma modal
\hat{X}_i	Resposta flutuante
\bar{X}_i	Resposta média da estrutura
A_i	Área de influência para cada coordenada
Z_i	Altura de cada coordenada em relação ao terreno
Z_r	Altura de referência sendo 10 metros
B	Coefficiente em função da categoria de rugosidade do terreno
P	Coefficiente em função da categoria de rugosidade do terreno
\bar{V}_p	Velocidade média para pressão dinâmica
Ψ_i	Relação entre massa da coordenada
m_i	Massa de referência
m_{0i}	Massa total da edificação
F_H	Coefficiente de força
β_i	Coefficiente da relação entre a área de incidência do vento e a área de referência e a altura da coordenada
Ξ	Coefficiente de amplificação dinâmica
q_{600}	Pressão média do vento em um intervalo de tempo de 600 segundos
V_{600}	Velocidade média do vento em um intervalo de tempo de 600 segundos
q_3	Pressão máxima da rajada para um intervalo de tempo de 3 segundos

V_3	Velocidade da rajada para um intervalo de 3 segundos
F	Frequência das rajadas
$\bar{V}_{(10)}$	Velocidade média em um intervalo de tempo de 10 minutos
Σ	Velocidade de cisalhamento do vento
S(f)	Espectro de potência do vento
X_1	Variável dependente da relação entre a frequência da rajada e a velocidade média do vento para um intervalo de 10 minutos
K	Número de harmônicos
R	Número de harmônicos escolhidos que tenham uma frequência ressonante com a frequência da estrutura
T_r	Período relacionado ao harmônico ressoante
r_k	Razão entre o período de harmônico k e o período ressonante
θ_k	Ângulo fase do harmônico k
Coh	Função correlação de velocidades
\hat{f}	Frequência que relaciona a frequência da rajada
C_z	Fator de decaimento exponencial
C_y	Fator de decaimento exponencial
Δz	Comprimento da rajada
E	Módulo de elasticidade do concreto

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma brasileira
CAD	Computer Aided Design

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2.1 OBJETIVO GERAL	19
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3 JUSTIFICATIVA	20
1.4 METODOLOGIA	20
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
3.1 INÍCIO DOS ESTUDOS DE VENTO	27
3.2 MÉTODO DISCRETO	31
3.2.1 COEFICIENTE DE ARRASTO C_a	31
3.2.2 PRESSÃO DINÂMICA	34
3.2.3 FATOR ESTATÍSTICO S_1	35
3.2.4 FATOR ESTATÍSTICO S_2	37
3.2.5 FATOR ESTATÍSTICO S_3	39
3.3 MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO	46
3.3.1 ETAPAS PARA O MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO	46
3.3.2 VELOCIDADE BÁSICA DE PROJETO	46
3.3.3 ESPECTRO DE POTÊNCIA	47
3.3.4 DECOMPOSIÇÃO DO ESPECTRO DE POTÊNCIA	47
3.3.5 CORRELAÇÃO ESPACIAL DE VELOCIDADES	49
3.3.6 CENTRO DE RAJADA	50
3.3.7 PARCELA MÉDIA E PARCELA FLUTUANTE	52
3.3.8 HARMÔNICOS DE FORÇAS NOS NÓS	53
3.3.9 MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA	54
4 ESTUDO DE CASO	55
4.1 MODELO I	55
4.1.1 CARGAS VERTICAIS ADOTADAS	59
4.1.2 MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA	60

4.1.3 ANÁLISE ESTÁTICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO MÉTODO DISCRETO NBR6123 (ABNT, 1988) PARA O MODELO I	66
4.1.4 ANÁLISE DINÂMICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO GERADO PELO MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO	69
4.1.5 DESLOCAMENTO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO I DA ESTRUTURA	71
4.1.6 ACELERAÇÃO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO I DA ESTRUTURA	72
4.2 MODELO II	73
4.2.1 CARGAS VERTICAIS ADOTADAS	77
4.2.2 MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA	78
4.2.3 ANÁLISE ESTÁTICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO MÉTODO DISCRETO NBR 6123 (ABNT, 1988) PARA O MODELO II	83
4.2.4 ANÁLISE DINÂMICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO GERADO PELO MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO	87
4.2.5 DESLOCAMENTO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO II DA ESTRUTURA	89
4.2.1 ACELERAÇÃO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO II DA ESTRUTURA	90
5 RESULTADOS	91
5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA O MODELO I	91
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA O MODELO II	98
6 CONCLUSÕES.....	104
7 REFERÊNCIAS	106
8 APÊNDICES.....	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o advindo da revolução industrial o ser humano passa a concentrar-se em aglomerados urbanos, tornando-se necessário um planejamento urbano, a fim de concentrar a população em determinadas regiões, com o intuito de melhorar o atendimento populacional, exemplo; comércio, saneamento, segurança e transporte público e etc.

Dessa maneira a valorização imobiliária faz com que as edificações sofram uma verticalização, maximizando o potencial construtivo dessas áreas centrais e minimizando o custo dos espaços urbanos.

Esta situação exige que engenheiros pesquisadores enfrentem o desafio de um desenvolvimento de técnicas de cálculo e modelagens computacionais, reduzindo o consumo de materiais.

Um dos fatores a ser considerado para dimensionamento de uma estrutura, são as forças dos ventos incidentes em sua superfície, contribuindo para um elevado consumo de materiais, de maneira que as peças estruturais possam resistir a solicitações de esforços impostas.

Para TREIN (2005), devido à aglomeração e à valorização das áreas urbanas, as estruturas recentemente desenvolvidas passaram a ter mais pavimentos, fazendo com que os esforços provenientes das ações de vento se tornem mais significativos. Para atender a demanda nos projetos estruturais, existem procedimentos normativos, um deles a Norma Brasileira NBR 6123 - Forças devido ao vento em edificações (ABNT, 1988). No entanto, o autor julga que os resultados impostos através do Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), para as estruturas, são superestimados e não sustentáveis, aumentando o consumo da matriz energética natural.

Segundo TREIN (2005), a exatidão do cálculo está atrelada aos esforços provenientes da ação do vento utilizado para o dimensionamento da edificação. Técnica de pesquisa, como o emprego da utilização de ensaio em túnel de vento apresenta redução dos esforços provenientes da ação de vento, e quando comparada com Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), item 9.2.2.2, observa-se

que esta apresenta acréscimo no consumo de materiais, superestimando os valores reais.

Na busca de conhecer outros critérios para consideração dos carregamentos de ação do vento, que de forma prática e mais eficiente viesse mensurá-los da maneira mais correta e mais próxima da realidade, julga-se necessário apresentar alternativas normativas e procedimentos de cálculo para uma modelagem computacional com a utilização de outra técnica estudada, sugerida para este trabalho o Método do Vento Sintético (FRANCO,1993) e comparadas com o Método Discreto NBR 6123 (ABNT,1988), normativa vigente no Brasil, a fim de obter parâmetros quantitativos e qualitativos.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é comparar os resultados de dois estudos de casos para dois edifícios, em concreto armado, submetidos à ação de vento, executando duas abordagens numéricas, fazendo dessa forma uma análise comparativa entre os resultados dos esforços para dois métodos e avaliando a eficiência do Método do Vento Sintético em comparação com o Método Discreto NBR 6123.

A primeira análise é por meio do Método Discreto NBR 6123 – Forças devido ao vento em edificações, e a segunda análise dinâmica, através do Método do Vento Sintético.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar os esforços de flexão e normal (compressão), provenientes da ação do vento, para o método da NBR 6118 e o Método do Vento Sintético.
- Calcular os deslocamentos gerados pelo Método do Vento Sintético e Método Discreto NBR 6123.
- Realizar uma comparação de esforços (momentos fletores, normais e cortantes), deslocamento e aceleração entre ambos os métodos propostos.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os procedimentos normativos a saber: método de cargas estaticamente equivalentes e os métodos dinâmicos como método simplificado e Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), embora possuam caráter dinâmico, consideram a transformação de ações dinâmicas em ações estáticas, determinando a frequência fundamental e o período de vibração dos edifícios.

Com o objetivo de economizar tempo e custo, evitando os ensaios de túnel de vento, busca-se através de outro procedimento de cálculo reconhecido, Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), avaliar uma mesma edificação com os resultados obtidos da aplicação dos métodos.

Com o auxílio de uma ferramenta computacional da empresa TQS – Versão 17 – Informática LTDA, busca-se obter parâmetros de deslocamento global e local entre pavimentos, e dos esforços provenientes da ação do vento, comparando-se os dois métodos escolhidos: Método Discreto NBR 6123 e procedimento de cálculo do Método do Vento Sintético, em duas estruturas reticuladas em concreto armado de múltiplos pavimentos.

O motivo da escolha do Método do Vento Sintético é devido a ser um método nacional, proposto por um profissional com experiência no desenvolvimento de estruturas de concreto, sendo um tema estudado no âmbito acadêmico. Por ser um método numérico possibilita uma alternativa que representa melhor o comportamento dinâmico.

1.4 METODOLOGIA

Este trabalho irá fazer a simulação do comportamento de duas torres de concreto armado, sujeitas a carregamentos gerados por dois métodos: o Método do Vento Sintético e o Método Discreto NBR 6123. Assim, serão comparados quatro resultados. As torres serão discretizadas em elementos de barras, formando um pórtico espacial constituído por vigas e pilares, levando-se em consideração a rigidez das lajes.

Para modelagem computacional e obtenção dos resultados será utilizado o sistema computacional de Engenharia Estrutural TQS (CAD/TQS, V17, 2013),

utilizando para dimensionamento das peças as recomendações da Norma de Projetos de estruturas de concreto NBR 6118 (ABNT,2013).

A geração dos carregamentos para o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) é feita através de uma rotina no software TQS (CAD/TQS, V17, 2013).

Uma análise modal é necessária ao modelo, já que características dinâmicas como frequência fundamental e períodos de vibração são utilizadas na formulação do Método do Vento Sintético. O método se utiliza de um espectro de vento, como o de Davenport (DAVENPORT, 1967), por exemplo, e de ângulos de fase aleatórios para simulação da parcela flutuante do vento.

As simulações são realizadas para o Método do Vento Sintético e uma série de carregamento é escolhida como característica entre 20 séries, que é o número mínimo para o Método do Vento Sintético. A série escolhida como característica é aquela cuja grandeza avaliada na resposta tem o valor com possibilidade de 95% de não ser excedido.

Determinada a série característica, essa é utilizada para determinação dos esforços e deslocamentos na estrutura. A estrutura é simulada, também, para carregamentos dinâmicos provenientes do Método Discreto NBR 6123 e as respostas são, então, comparadas.

Com o intuito de validar os resultados apresentados pelo sistema computacional de engenharia estrutural (TQS/CAD, V17, 2013), utilizou-se obtenção das forças provenientes da ação do vento por meio do software PTC MathCad Prime, versão 3.0.

E com o resultado das forças calculado pelo software Mathcad obteve-se os mesmos esforços solicitados pelo (TQS/CAD, V17, 2013).

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 8 capítulos e 1 apêndice.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica em que constam trabalhos semelhantes a esta dissertação, usando comparações entre métodos estáticos e dinâmicos para estruturas em concreto armado.

No capítulo 3 é elaborada uma fundamentação teórica, em que se descrevem os primeiros estudos de vento e a abordagem dos métodos, Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) e Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993).

A apresentação dos modelos estruturais adotados é contemplada no capítulo 4, onde são mostradas as cargas verticais adotadas, os modos de vibração da estrutura, a análise estática e dinâmica e as análises pertinentes ao nó com maior deslocamento.

No capítulo 5 apresenta-se os resultados para as duas edificações com os diferentes métodos.

No capítulo 6 apresenta-se as conclusões.

O capítulo 7 apresenta as considerações finais do estudo.

O capítulo 8 apresenta um apêndice com o cálculo dos esforços provenientes do vento para os dois métodos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência no comportamento do Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), quando comparado com o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), faz-se necessário mostrar que o questionamento é pertinente, visto que parte dos trabalhos citados abaixo fazem análises semelhantes às propostas para esse trabalho, porém cada estudo com um enfoque específico.

FANG et al. (2000) instalaram anemômetros para medição de velocidade e aceleração do vento em um edifício da China, na cidade de Hong Kong, com 370m de altura e 70 pavimentos, para avaliar o vento durante a passagem do tufão Sally, incidente ocorrido em 8 de setembro de 1996, e as leituras das velocidades do vento tiveram diferenças das recomendadas pela norma de vento para a cidade de Hong Kong, fazendo com que os autores efetuassem mais medições, no topo e na meia altura, de maneira a convergirem os resultados com os modelos normativos existentes. Com os resultados obtidos e calibrados, e a partir das respostas da estrutura simulada, concluíram que a turbulência diminui à medida que o vento no topo do edifício aumenta.

CARRIL JR. (2000) buscou determinar forças de vento em torres metálicas através de investigação numérica e experimental, avaliando respostas ressonantes, não ressonantes e fator de resposta das rajadas de vento. A simulação do modelo é de uma torre metálica treliçada de 100 metros de altura, submetida a carregamentos de vento para diferentes métodos, dentre eles o Método de Davenport, Método Discreto NBR 6123, Método do Vento Sintético. A partir das quatro simulações, concluiu que pelo Método de Davenport, a resposta ressonante é de menos significância que a resposta não ressonante. Com o Método Discreto NBR 6123, há diferentes valores obtidos quando comparado com o Método Davenport; esta diferença se dá devido à desigualdade na variável da velocidade média do vento utilizada no cálculo. Ao aplicar o Método do Vento Sintético, observou-se discrepância nos resultados obtidos quando comparados com o método de Davenport e Método Discreto NBR 6123, chegando a diferenças de 17% maiores dos valores da resposta final. A conclusão foi de que as diferenças se dão devido à determinação da amplificação dinâmica e a velocidade média em um intervalo de 10s, para o Método do Vento Sintético.

A proposta de LAZANHA (2003) é um modelo numérico para análise de estruturas sob a ação de uma excitação aleatória de vento, fazendo análise alternada de rótulas plásticas em seu modelo, visando resultados mais econômicos nas simulações e utilizando análise de Monte Carlo.

Para cada carregamento uma integração direta de Newmark, onde as respostas de uma análise estática são maiores devido aos ventos desfavoráveis à estrutura.

CARPEGIANI (2004) avaliou a resposta torcional devido aos efeitos estáticos da ação do vento em modelos reduzidos com diversas configurações arquitetônicas. Através de uma análise dos efeitos de vizinhança, os resultados obtidos foram comparados com o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), NBCC (1990) e Norma DIN. 10551 (1977) chegando à conclusão de que os momentos de torção devido a ensaios de túnel de vento foram maiores que os resultados obtidos pela NBR 6123, quando se leva em consideração os efeitos de vizinhança. Do contrário, desconsiderando esses efeitos, os resultados da Norma Brasileira são superiores.

CHEN e KAREEN (2005) fizeram uma análise de carregamento estático equivalente, obtendo uma distribuição de carga equivalente em função da resposta flutuante do vento. O estudo se desenvolveu com um carregamento dinâmico de vento em sistemas estruturais com centro de massa e rigidez não coincidentes, concluindo que esses sistemas estruturais apresentam frequências naturais semelhantes, o que conduz a uma superposição dos modos de vibração ao serem submetidos a carregamento de vento segundo o desenvolvimento desses métodos, sugerem incorporá-los nas normas de vento em demais países.

CHÁVES (2006) faz uma análise estrutural de um edifício alto submetido a pressões flutuantes induzidas por um carregamento aleatório da ação de vento, utilizando-se da ferramenta computacional ANSYS, baseada no método dos elementos finitos, para avaliar o comportamento estrutural da edificação. Os resultados obtidos são comparados com os resultados das recomendações da Norma Brasileira NBR 6123-1988, baseando-se nos índices de conforto dos usuários quanto à percepção das acelerações.

MANFRIN E BERTOLINO (2006) utilizaram-se do Método dos Elementos Finitos para simulações numéricas, considerando a interação fluido-estrutura para cobertura de barracões industriais do tipo duas águas. Chegaram à conclusão que

os valores obtidos das simulações com o auxílio do software ANSYS 9.0 foram coerentes com os valores obtidos pela Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988).

RIBEIRO (2007) analisou o Método Discreto NBR 6123 e dinâmico através do método dos elementos finitos, para torres metálicas, variando sua altura e efetuando as análises, buscando determinar as 10 primeiras frequências naturais e os modos de vibração. A análise dinâmica foi feita considerando Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), em que comparou deslocamentos modais e as reações de apoio obtidas com o auxílio do programa FMVTEQ (Análise Estatística de Torres Estaiadas Quadradas). Dessa forma, concluiu que os deslocamentos nodais e as reações de apoio não tinham diferenças, porém as frequências naturais do programa FMVTEQ foram maiores que a análise modal do SAP 2000.

KIM. (2007) fizeram uma análise da resposta dinâmica em um conjunto residencial denominado “TPD1”, situado na Coreia do Sul, sendo uma torre de 66 pavimentos, duas com 59 pavimentos e duas com 49 pavimentos. Os autores concluíram que nesta edificação o acréscimo de aceleração torcional, em comparação com a aceleração proveniente da norma vigente, foi de 82% e, para a aceleração na direção do fluxo e na direção transversal, o acréscimo foi de 55% e 36%, respectivamente.

LI. (2010) investigaram a velocidade do vento por ocasião da passagem do tufão Damrey em Hong Kong, em 2005, medida com anemômetros e acelerômetros. As frequências naturais e os modos de vibração foram comparados com o modelo discretizado em elementos finitos, em que se observou uma diferença de 30% na frequência natural e uma diferença de 9,6% a mais na aceleração no topo do edifício quando comparada com a AS1170 (Australian Standard for Wind Loads). A diferença da pressão de sucção perpendicularmente à direção do vento foi de 36% a mais em comparação ao modelo simplificado da norma. O autor concluiu que esta diferença se dá devido a interferências aerodinâmicas das edificações do entorno.

CUNHA (2012) procura fazer uma contribuição com um estudo dos efeitos de vento em edifícios altos na cidade de Goiânia – GO, analisando dois edifícios, sendo o primeiro de 47 pavimentos e o segundo de 20 pavimentos, sob a ação dos esforços de vento. Para isso, utiliza uma análise com Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), com o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), comparando valores de frequências naturais e deslocamento dos edifícios, e com base nesses modelos utilizou para o Método Discreto NBR 6123 o espectro de potência de

Davenport. Concluiu que os deslocamentos finais da estrutura, quando avaliados pelo modelo da Norma Brasileira, são maiores em fase final, porém, em fase transiente são superados pela análise do Método do Vento Sintético.

SILVA (2012), através de seu estudo de comportamento dinâmico de edifícios mistos submetidos à ação não determinística do vento, analisa um edifício de 20 pavimentos sob ação estática e ação dinâmica, por meio do método dos elementos finitos, com auxílio do programa ANSYS. Apresentando o resultado de uma análise não linear geométrica e comparando com os valores limites propostos por norma, demonstra que o comportamento dinâmico é o que melhor representa o comportamento complexo das ações de vento, e que os deslocamentos tanto sob uma análise estática quanto dinâmica não ultrapassam os valores preconizados pela norma de Projetos e Execução de Estruturas de Aço NBR 8800/86.

MORAIS (2014) investigou o comportamento dinâmico de edifícios mistos, ou seja, aço-concreto submetidos à ação não determinística do vento. O método utilizado foi o Método do Vento Sintético. O trabalho apontou que a transferência de energia para o sistema ocorre de maneira preponderante para as frequências inferiores a 1Hz, entre as quais estavam as frequências fundamentais da estrutura.

LEITE (2015) empregou o Método do Vento Sintético, fazendo uma análise comparativa entre as respostas dinâmicas obtidas pelo Método do Vento Sintético e as respostas obtidas com carregamentos estáticos gerados a partir do modelo simplificado da NBR6123/88, para uma torre de transmissão de energia elétrica. Com os carregamentos dinâmicos e estáticos aplicados na estrutura, os resultados comparados demonstram que os carregamentos gerados a partir da NBR 6123/88 é mais conservadora, com valores que excedem em até 132% dos valores obtidos a partir do Método do Vento Sintético.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INÍCIO DOS ESTUDOS DE VENTO

Segundo LOTURCO (2010), os primeiros indícios e relatos de estudos de vento em edificações na história da humanidade são atribuídos aos australianos Willian Charles Kernot e James Mann (1891 a 1894), que desenvolveram uma série de pesquisas com experimentos em modelos reduzidos em formatos de cubos, pirâmides, cones e cilindros. Juntamente com Kernot e Mann, ensaios em túneis aerodinâmicos foram desenvolvidos pelo dinamarquês Irminger Nokkentved e pelo francês Alexandre Gustave Eiffel.

Porém, o tema passa a ter maior relevância em 1940 com o colapso da Ponte Tacoma Narrows, conforme mostrado na Figura 1, servindo de estímulo ao desenvolvimento do campo da pesquisa na Engenharia Civil.



Figura 1 – Ilustração Tacoma Narrows (1940) – Fonte: BILAH (1991).

Na vanguarda do desenvolvimento de métodos analíticos, surgem na década de 60 os ensaios de túneis de vento em decorrência de projetos como o World Trade Center (1971), apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Ilustração World Trade Center – New York (1970) – Fonte: DIAS (2010).

Como citado no Capítulo 1, edifícios altos ganharam destaque em estudos e, por esse motivo, foram construídos incorporando tecnologias avançadas e técnicas modernas de construção e projeto.

Os primeiros edifícios do século XIX foram concebidos em alvenaria estrutural, tornando-se um bloco monolítico e extremamente rígido. No entanto, à medida que a necessidade de maior potencial construtivo crescia, os mesmos se tornaram cada vez mais altos, necessitando de paredes mais espessas nos andares inferiores, prejudicando assim áreas úteis.

Assim, tornou-se necessária a utilização de outros materiais alternativos, como aço, concreto armado e concreto de alto desempenho, fazendo com que a alvenaria se tornasse um elemento de vedação para essas concepções estruturais.

No entanto, com as edificações mais leves e flexíveis o efeito da ação do vento passa a ser mais significativo, fazendo-se necessário o aprimoramento de estudos com o intuito de tornar mais precisas as considerações necessárias para um projeto. No final do século XX, desenvolve-se normativas que consideram as características das edificações, dentre eles: fator de amortecimento, distribuição de massas e previsão de ações dinâmicas, por exemplo.

- NBR 6123/88 – Forças devido ao vento em edificações (ABNT, 1988).

- NBCC/1990 - NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. National Research Council of Canada.
- AS1170 – STANDART AUSTRALIAN. Minimum design loads of structure.

Ao mesmo tempo que se desenvolvem novos procedimentos normativos, aprimoram-se os ensaios de túnel de vento para algumas edificações, cuja altura é atípica das estruturas convencionais.

LOTURCO (2010) refere-se aos ensaios desenvolvidos com auxílio de túnel de vento, dentre eles: Edifício Sears Tower (Figura 3), localizado na cidade de Chicago; Torres Gêmeas Petronas (Figura 4), situadas na cidade de Kuala Lumpur; Edifício E-Tower (Figura 5), situado na cidade de São Paulo.



Figura 3 – Ilustração do Edifício Sears Towers – Chicago (1974).

Fonte: PEREIRA (2011).



Figura 4 – Ilustração Torres Gêmeas Petronas – Kuala Lumpur (1998). Fonte: NELSON KON.



Figura 5 – Edifício E-tower – São Paulo (2002). Fonte: NELSON KON.

No entanto, Loturco (2010) trata das imprecisões nos ensaios de túnel de vento, imprecisões estas devido ao efeito de vento nos modelos reduzidos, tendo em vista o fato das edificações do entorno gerarem incerteza nos resultados.

Para elaboração de um projeto em concreto no Brasil, deve-se atender os requisitos mínimos das prescrições da NBR 6118 - Projetos de estruturas de

concreto – Procedimento (ABNT, 1988), que, por sua vez, faz referência a outras normas, dentre as quais temos NBR 6123-88 que aborda estudos estatísticos em território nacional (ISOPLETAS), velocidade básica de vento, fatores topográficos, rugosidade e coeficientes de baixa e alta turbulência e outros fatores que influenciam a velocidade do vento, como: local da edificação, tipo do terreno, geometria e altura da edificação e tipo de ocupação.

3.2 MÉTODO DISCRETO

Este item aborda o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), e o item 3.3 descreve o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993).

Com o objetivo de se calcular a força de arrasto aplicada sobre a face de uma edificação, leva-se em consideração a formulação matemática abordada na NBR 6123, com a seguinte expressão:

$$F_a = C_a \cdot q \cdot A_e \quad (3.1)$$

A expressão para a força de arrasto é função do coeficiente de arrasto C_a , pressão dinâmica do vento q e área frontal efetiva A_e .

Para o cálculo do coeficiente de arrasto, a norma leva em consideração parâmetros que serão abordados em 3.2.1, que se referem às dimensões da edificação e sua altura, também levando em consideração as condições de contorno.

A pressão dinâmica do vento, por sua vez, é uma relação direta com a velocidade característica do vento V_k , que é função da velocidade básica, fatores estatísticos e topográficos.

3.2.1 COEFICIENTE DE ARRASTO C_a

Para definição do coeficiente de arrasto C_a , a norma considera que existem dois tipos de incidência de vento em uma edificação: vento de alta turbulência e vento de baixa turbulência.

Segundo o item 6.5.3 – NBR 6123, a edificação é considerada de alta turbulência sob a condição de que a altura da mesma não exceda duas vezes a

altura média das edificações nas vizinhanças, estendendo-se estas na direção e sentido do vento incidente, e uma distância mínima de:

- 500 metros para uma edificação de 40 metros de altura;
- 1000 metros para uma edificação com até 55 metros de altura;
- 2000 metros para uma edificação com até 70 metros de altura;
- 3000 metros para uma edificação com até 80 metros de altura;

Ao contrário, para as edificações que não atendam a essas condições mínimas, o vento é considerado de baixa turbulência.

Para determinação dos coeficientes de arrasto, desenvolveram-se gráficos que são função das dimensões da edificação em planta I_1 e I_2 (conforme Figura 6 e Figura 7), e função da altura H da edificação pela sua face de incidência de vento $\frac{H}{I_1}$, conforme Figuras 6 e 7.

Observa-se por comparação que, para uma mesma edificação, os maiores índices de coeficiente de arrasto são para uma edificação de baixa turbulência.

Por exemplo $h=40$, $I_1=20$ e $I_2=10$, para o caso de vento de baixa turbulência $\frac{I_1}{I_2} = 2$ e $\frac{H}{I_1} = 2$, logo, ao plotar os valores na Figura 6 o coeficiente de arrasto será $C_a = 1,37$.

Para o mesmo edifício, porém, com vento de alta turbulência $\frac{I_1}{I_2} = 2$ e $\frac{H}{I_1} = 2$, o coeficiente de arrasto será $C_a = 1,08$, como consequência o carregamento do vento proveniente do vento de baixa turbulência é de maior intensidade que o carregamento de alta turbulência.

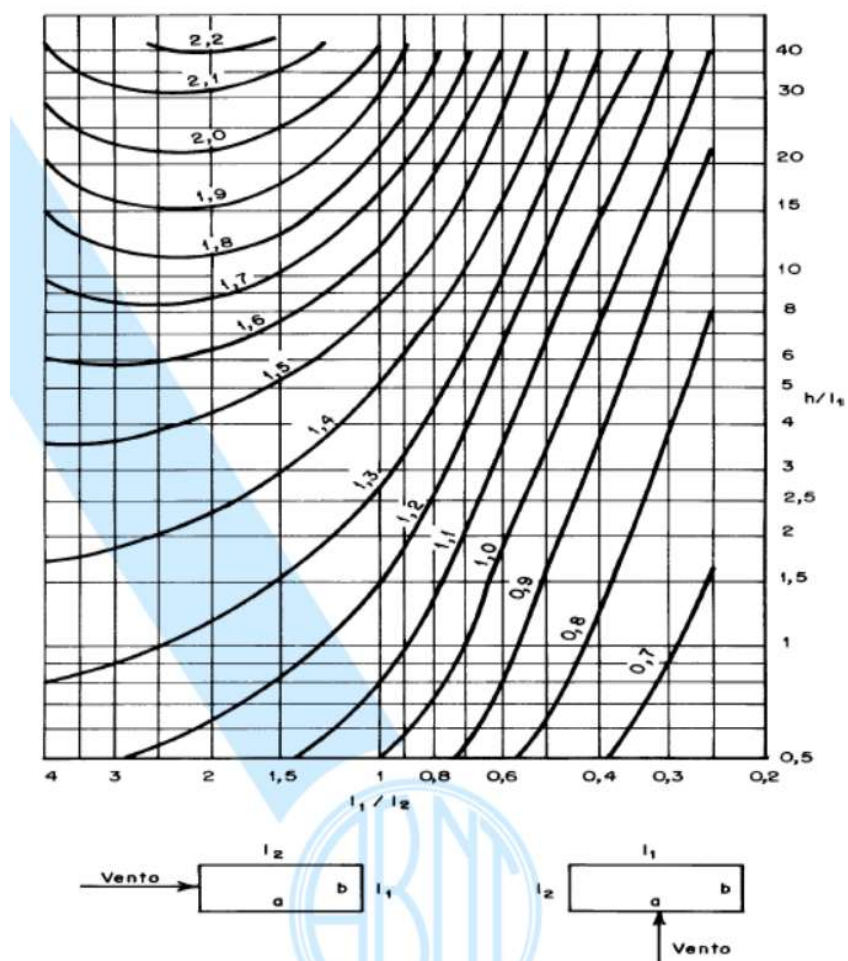


Figura 6 - Coeficiente de arrasto, C_a para edificações paralelepípedicas em vento de baixa turbulência. Fonte NBR 6123/88.

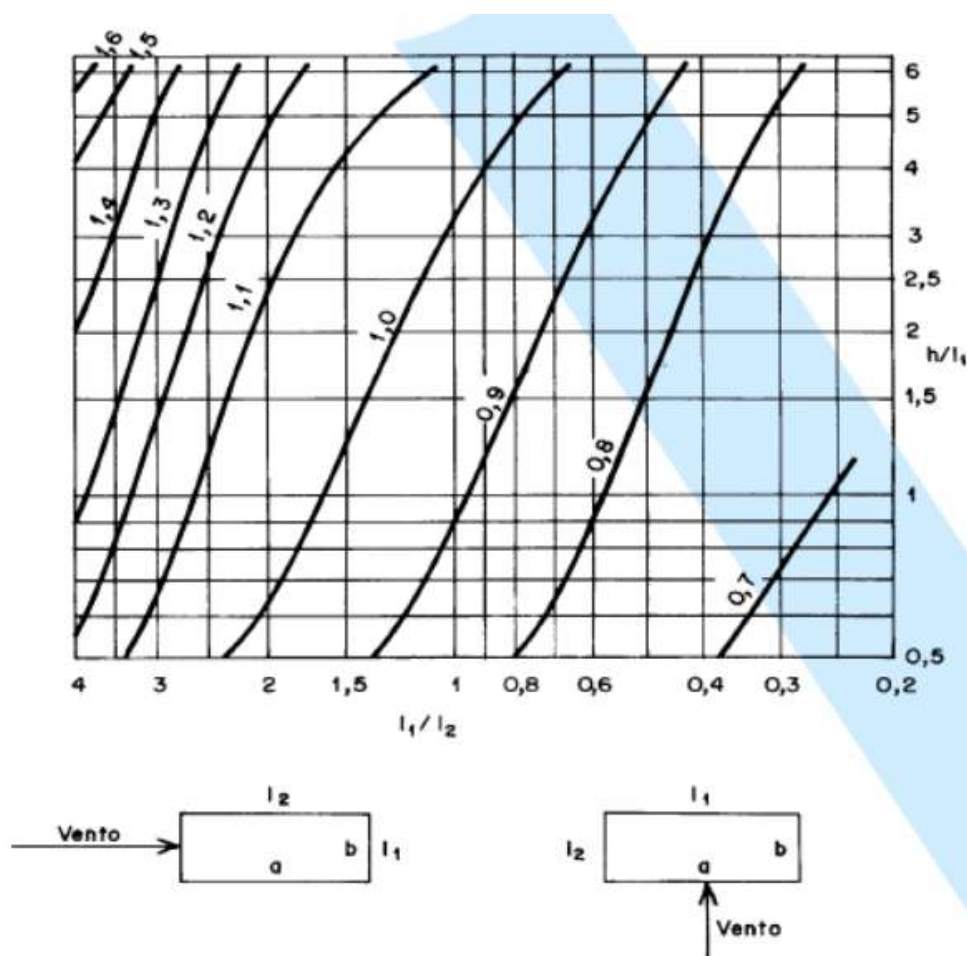


Figura 7 - Coeficiente de arrasto, C_a para edificações paralelepípedicas em vento de alta turbulência. Fonte NBR 6123/88.

3.2.2 PRESSÃO DINÂMICA

A pressão dinâmica do vento “ q ” é expressa pela formulação que leva em consideração a velocidade característica do vento “ V_k ” e a massa específica do ar “ ρ ”.

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V_k)^2 \quad (3.2)$$

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (3.3)$$

A velocidade característica do vento é função da velocidade básica “ V_0 ” e dos coeficientes S_1 , S_2 e S_3 . Sendo que S_1 considera as variações do terreno, S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno e a variação da velocidade com a altura acima do terreno, e o fator S_3 considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação.

Segundo o item 5.1 da NBR 6123 (ABNT, 1988), a velocidade de uma rajada de 3s é excedida em média uma vez em 50 anos, a 10m acima do terreno, em campo aberto e plano. A figura 8 apresenta o gráfico das isopletas da velocidade básica no Brasil.

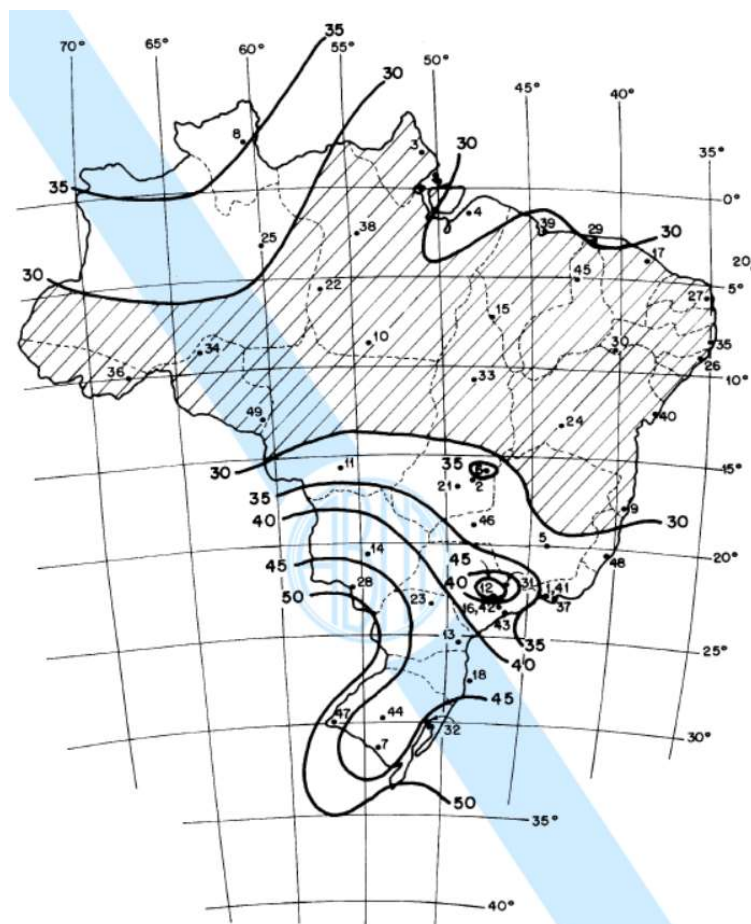


Figura 8 - Isopletas da velocidade básica do vento (m/s). Fonte NBR 6123/88.

3.2.3 FATOR ESTATÍSTICO S_1

O fator S_1 para o cálculo da velocidade característica leva em consideração as variações do relevo no entorno da edificação.

Para terrenos planos ou fracamente acidentados, seu valor é igual a 1,0.

Quando a edificação se localizar no topo de taludes ou morros, o valor de S_1 será uma função da altura z , medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado, de acordo com as Figuras 9 e 10.

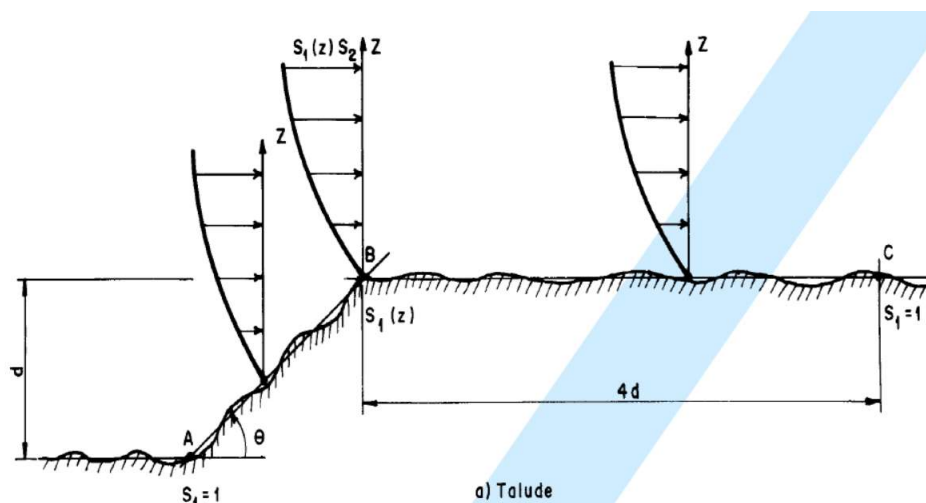


Figura 9 - Fator Topográfico S_1 , Taludes. Fonte NBR 6123/88.

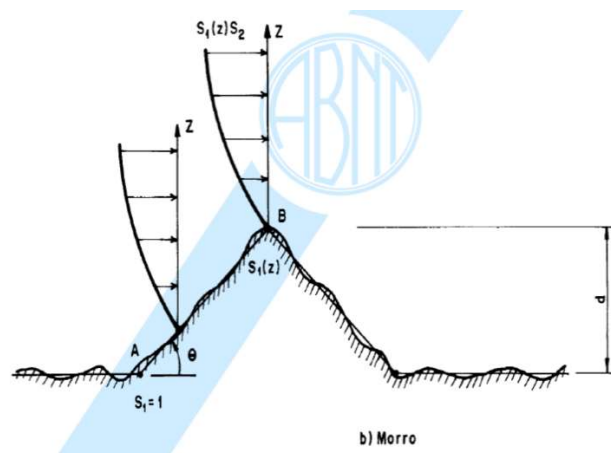


Figura 10 - Fator Topográfico S_1 , Morros. Fonte NBR 6123/88.

Para o caso de ângulos de inclinação menores que 3° , o valor de S_1 será 1, do contrário, o fator estatístico deve ser calculado conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Fator topográfico em função da inclinação do talude.

Inclinação do talude/ morro (θ)	Fator topográfico (S_1)
$\theta \leq 3^\circ$	$S_1(z) = 1,0$
$6^\circ \leq \theta \leq 17^\circ$	$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) \tan(\theta - 3^\circ) \geq 1$
$\theta \geq 45^\circ$	$S_1(z) = 1,0 + \left(2,5 - \frac{z}{d}\right) 0,31 \geq 1$

Fonte: NBR 6123/88

3.2.4 FATOR ESTATÍSTICO S_2

Segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988) item 5.3, 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 as dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração.

Este fator é função da altura da edificação, sendo dividida em 3 classes, A, B e C, sendo elas caracterizadas da seguinte maneira:

Classe A: edificações com altura (ou dimensão horizontal) máxima de 20 metros e duração da rajada de vento em 3s.

Classe B: edificações com altura (ou dimensão horizontal) entre 20 e 50 metros e duração da rajada de vento em 5s.

Classe C: edificações com altura (ou dimensão horizontal) acima de 50 metros e duração da rajada de vento em 10s.

Para esse mesmo fator S_2 , existem outras 5 subcategorias que levam em conta a rugosidade do terreno, a saber:

Categoria I: superfícies lisas de grandes dimensões.

Categoria II: terrenos abertos com poucos obstáculos.

Categoria III: terrenos planos ou ondulados com obstáculos.

Categoria IV: terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados.

Categoria V: terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e poucos espaçados.

Para determinação do fator S_2 é utilizada a equação 3.4, uma vez definidas as classes da edificação e a categoria do terreno.

$$S_2 = b F_r \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (3.4)$$

onde:

z = altura, em metros, medida a partir da superfície do terreno no ponto considerado;

b = parâmetro meteorológico referente à categoria de rugosidade do terreno e à classe da edificação;

p = expoente da lei potencial de variação;

F_r = fator de rajada.

Com o fator de rajada F_r , é possível transformar a velocidade de rajada medida em 3 segundos de observação na velocidade média horária. Para isso, a NBR 6123 (ABNT,1988) fornece os fatores que, multiplicados pela velocidade de rajada, permitem obter esta transformação. O fator de rajada corresponde à classe da edificação, sendo para todos os casos $F_r = 1,0$, $F_r = 0,98$, $F_r = 0,95$ para as classes A, B e C encontrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. - Parâmetros meteorológicos para diferentes categorias e classes de terreno.

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

Fonte: NBR 6123/88.

3.2.5 FATOR ESTATÍSTICO S_3

Segundo o item 5.4 da NBR 6123, o fator estatístico S_3 é baseado em conceitos estatísticos. e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação. Segundo a definição da norma, a velocidade básica do vento apresenta um período de recorrência médio de 50 anos. A probabilidade de que a velocidade V_0 seja igualada ou excedida nesse período é de 63%.

Na falta de uma norma específica sobre segurança nas edificações, os valores mínimos do fator S_3 são os indicados abaixo.

$S_3 = 1,10$: para edificações onde comprometimentos estruturais das edificações devido a fatores destrutivos naturais possam afetar a prestação de serviços emergenciais (ex: hospitais, quartéis, bombeiros e forças de segurança).

$S_3 = 1,00$: Edificações residenciais, hoteleiras, industriais e comerciais com alto fator ocupacional.

$S_3 = 0,95$: Edificações industriais com baixo fator ocupacional.

$S_3 = 0,88$: Vedações em telhas, vidros e painéis.

$S_3 = 0,83$; Edificações temporárias.

Os valores de S_3 acima correspondem à Tabela 3 da Norma Brasileira NBR 6123 (ABNT, 1988) e considera dois métodos de cálculo, denominados modelo contínuo simplificado e Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988).

O modelo contínuo simplificado pode ser adotado para edificações com seção constante, distribuição uniforme de massa, altura máxima de 150m e apoiadas exclusivamente na base, sendo considerada na resposta dinâmica delas unicamente a contribuição do modo fundamental.

Nas edificações onde é considerado o Método Discreto NBR 6123, somente o primeiro modo de vibração da estrutura é utilizado nos cálculos, em decorrência da solução conduzir a erros inferiores a 10%, em que admite que pode ser representado com precisão pela equação 3.5

$$x = \left(\frac{z}{h}\right)^{\gamma} \quad (3.5)$$

Onde: z é a altura de cada coordenada generalizada em relação ao terreno, h é altura total da edificação e γ é o expoente da forma modal, tabelado na NBR 6123, em função do tipo de estrutura e do seu material.

Tabela 3.3. Parâmetros para determinação dos efeitos dinâmicos. Fonte NBR 6123/88.

Tipo de edificação	γ	ζ	$T_1 = 1 / f_1$
Edifícios com estrutura apertada de concreto, sem cortinas	1,2	0,020	$0,05h + 0,015h$ (h em metros)
Edifícios com estrutura de concreto, com cortinas para a absorção de forças horizontais	1,6	0,015	$0,05h + 0,012h$
Torres e chaminés de concreto, seção variável	2,7	0,015	0,02h
Torres, mastros e chaminés de concreto, seção uniforme	1,7	0,010	0,015h
Edifícios com estrutura de aço soldada	1,2	0,010	$0,29 \sqrt{h} - 0,4$
Torres e chaminés de aço, seção uniforme	1,7	0,008	
Estruturas de madeira	--	0,030	

O Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) deverá ser adotado para edificações com propriedades variáveis com a altura, a edificação deve ser representada por meio de um modelo discretizado, de acordo com a Figura 11, no qual:

X_i – Deslocamento correspondente à coordenada i .

A_i – Área de influência correspondente à coordenada i .

M_i – Massa discreta correspondente à coordenada i .

Z_i – Altura do elemento i sobre o nível do terreno.

n – Número de graus de liberdade.

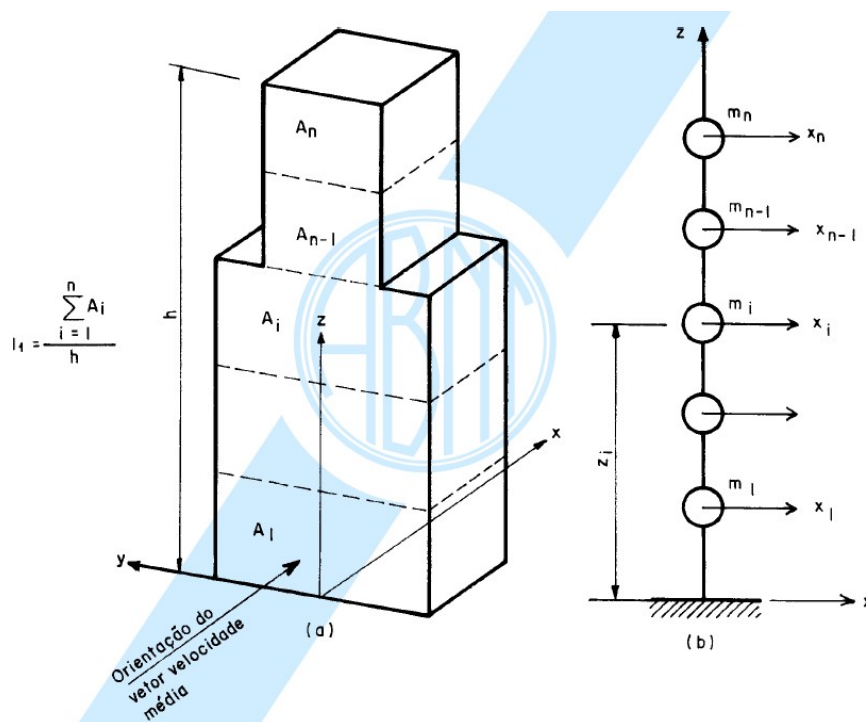


Figura 11 – Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988)

Para a análise do Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) adota-se a velocidade média do vento com um valor constante para a altura de 10m em relação ao terreno e um intervalo de tempo de 10 minutos (600 segundos). Também se admite que, devido à turbulência atmosférica, tem-se a formação de rajadas de vento que são flutuantes do módulo da velocidade do vento em torno de sua velocidade média.

De acordo com a NBR6123 o efeito estatístico gerado pela velocidade média do vento é definido como resposta média para o caso de estruturas com período fundamental maior que 1 segundo. As velocidades podem causar oscilações com amplitudes consideráveis na direção da velocidade média, cujo efeito é denominado resposta flutuante. Dessa forma, a resposta final da estrutura X_i (deslocamentos, esforços solicitantes, etc), pode ser determinada pela superposição da resposta média e da resposta flutuante, conforme a equação 3.6.

$$X_i = \overline{X}_i + \widehat{X}_i \quad (3.6)$$

Onde:

\widehat{X}_i é a resposta flutuante) da estrutura e \overline{X}_i é a resposta média da estrutura.

Para a definição da resposta média.

$$\bar{X}_i = q_0 b^2 C_{ai} A_i \left(\frac{Z_i}{Z_r} \right)^{2p} \quad (3.7)$$

Onde:

A_i é a área de influência para cada coordenada, Z_i é a altura de cada coordenada em relação ao terreno, Z_r é a altura de referência, sendo 10 metros. As variáveis b e p são valores em função da categoria de rugosidade do terreno, apresentados na tabela 3.4. C_{ai} é o coeficiente de arrasto, e q_0 é o valor da pressão dinâmica do vento, determinado pela equação 3.8.

$$q_0 = 0.613 \bar{V}_p^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (3.8)$$

Tabela 3.4. Expoente p e parâmetro b. Fonte 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	1,00	0,86	0,71	0,50

A velocidade média para o cálculo da pressão dinâmica é calculada da seguinte forma.

$$\bar{V}_p = 0.69 V_o S_1 S_3 \text{ (m/s)} \quad (3.9)$$

A parcela flutuante da velocidade do vento, segundo a NBR 6123 (ABNT, 1988), é determinada pelas seguintes equações.

$$\widehat{X}_i = F_H \Psi_i X_i \quad (3.10)$$

$$\Psi_i = \frac{m_i}{m_0} \quad (3.11)$$

$$F_H = q_0 b^2 A_0 \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i x_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i x_i^2} \xi \quad (3.12)$$

$$\beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_0} \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p \quad (3.13)$$

$$x_i = \left(\frac{z_i}{h} \right)^y \quad (3.14)$$

onde, ψ_i é a relação entre massa da coordenada i " m_i " e massa de referência " m_{0i} ", F_H é o coeficiente de força, β_i é um coeficiente que depende do coeficiente de arrasto, da relação entre a área de incidência do vento e a área de referência do pavimento e a altura da coordenada em questão e ξ é o coeficiente de amplificação dinâmica. Para definição do coeficiente de amplificação dinâmica apresentam-se as Figuras 12 a 16 e com esses gráficos podem ser determinados os valores através de interpolação ou extrapolação.

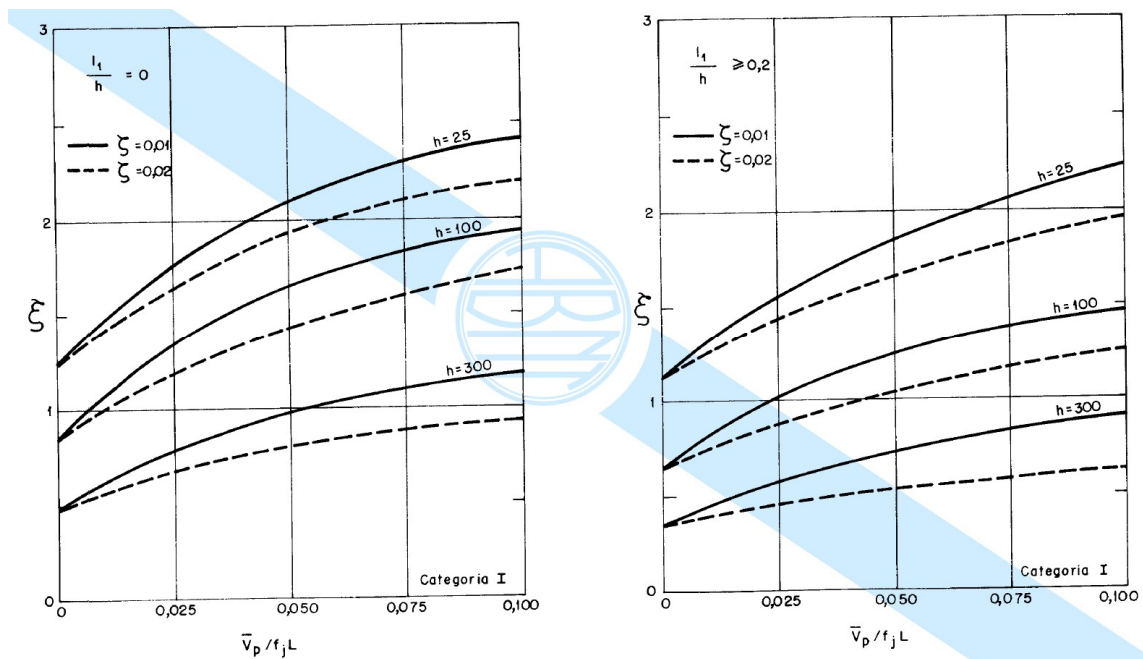


Figura 12 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria I ($L=1800$ m), NBR 6123.

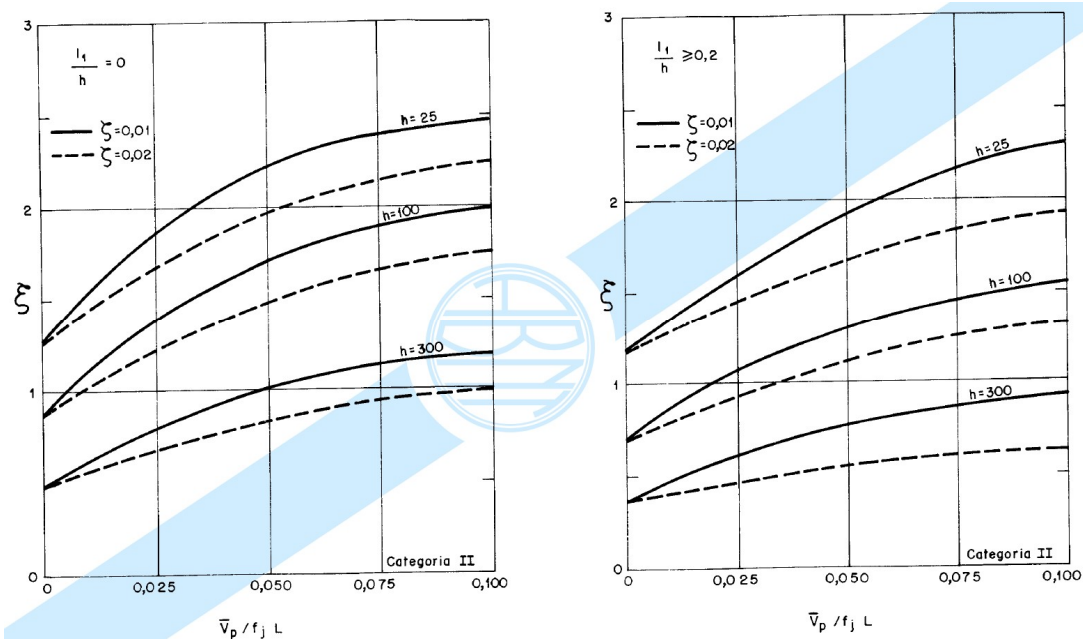


Figura 13 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria II (L=1800 m), NBR 6123.

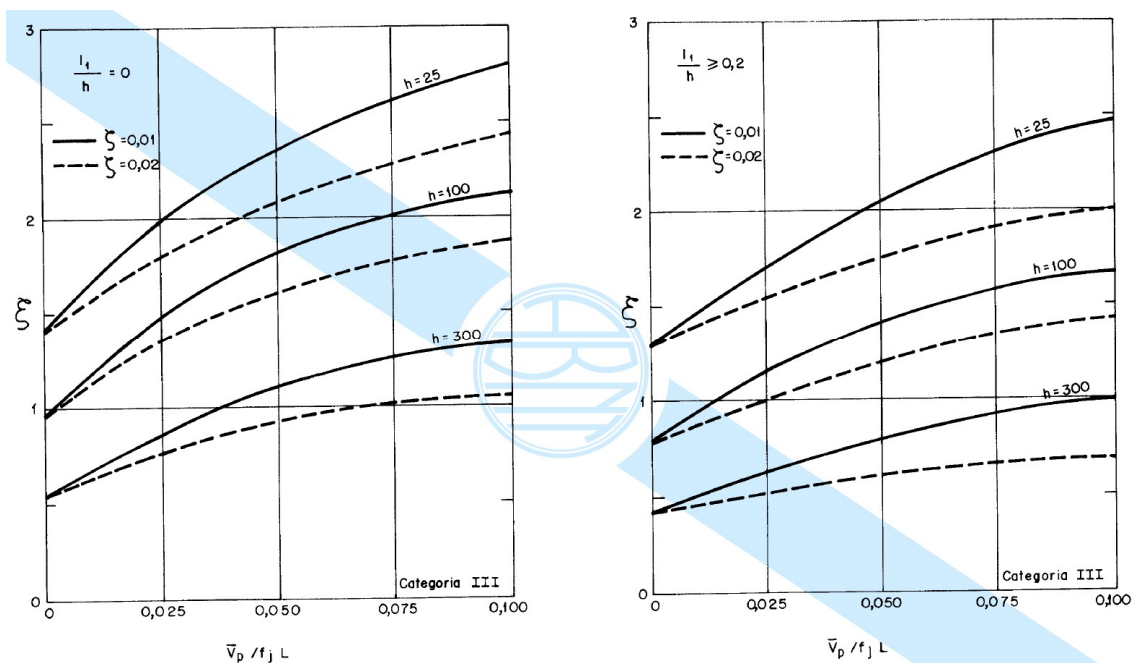


Figura 14 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria III (L=1800 m), NBR 6123.

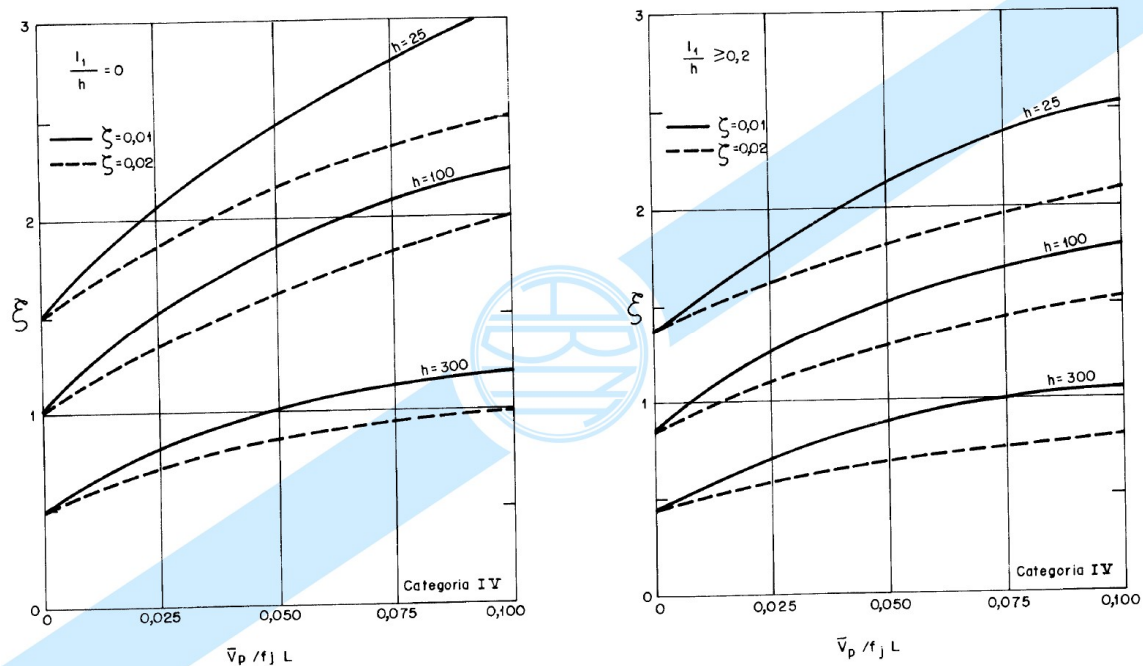


Figura 15 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria IV (L=1800 m), NBR 6123.

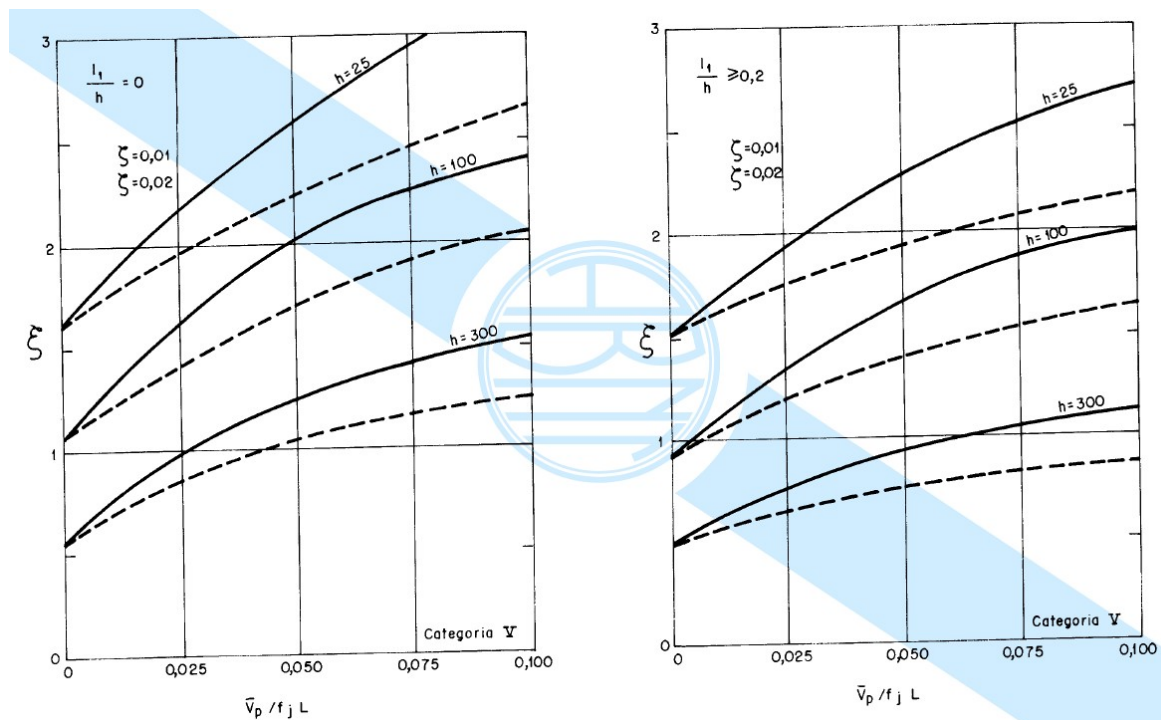


Figura 16 – Coeficiente de amplificação dinâmica para terreno de categoria V (L=1800 m), NBR 6123.

3.3 MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

3.3.1 ETAPAS PARA O MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

Esta seção trata do Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), que utiliza uma simulação numérica conhecida como técnica de Monte Carlo para obtenção do carregamento de vento, considerando-o como um processo aleatório de vento. Admite-se que a estrutura responda ao carregamento aleatório de vento, carregamento este composto de duas parcelas, a parcela média e parcela flutuante. A definição da parcela média é a mesma descrita pela NBR 6123 (ABNT, 1988).

As etapas para a aplicação do Método do Vento Sintético são listadas para o entendimento das seções, a seguir:

- Adota uma velocidade básica de projeto.
- Encontra o espectro de potência.
- Decompõe o espectro de potência.
- Faz uma correlação espacial de velocidades.
- Busca o centro de rajada.
- Calcula a parcela média e parcela flutuante.
- Redivide os harmônicos de força nos nós.

3.3.2 VELOCIDADE BÁSICA DE PROJETO

A velocidade média de projeto, utilizada no cálculo da pressão dinâmica, é admitida na NBR 6123 (ABNT, 1988) com duração de 10 minutos, a 10 metros de altura, podendo ser calculada segundo a equação (3.15), utilizada na seção 3.2.2.

$$\bar{V}_p = 0,69 V_o S_1 S_3 (\text{m/s}) \quad (3.15)$$

O valor de S_2 corresponde a 0,69 e foi calculado com base na Tabela 3.2, contida na NBR 6123/88. Os parâmetros para o cálculo de S_2 , portanto, valem: $b = 1,0$; $Fr = 0,69$; $p = 0,15$; $z = 10\text{m}$.

3.3.3 ESPECTRO DE POTÊNCIA

O espectro de potência é um conjunto de parcelas que define o carregamento de vento ao longo do período de análise, ou seja, ao longo de 600s.

Para obtenção do espectro de potência $S(f)$, FRANCO (1993) propôs uma formulação utilizando o Espectro de Davenport, representado pela equação:

$$S(f) = \frac{2 X_1^2}{3 (1 + X_1^2)^{4/3}} \cdot \frac{\sigma^2}{f} \quad (3.16)$$

$$X_1 = \frac{1200 f}{\bar{V}_{(10)}} \quad (3.17)$$

Onde:

$S(f)$ = espectro de potência do vento.

f = frequência das rajadas.

$\bar{V}_{(10)}$ = velocidade média em um intervalo de tempo de 10 minutos.

σ = a velocidade de cisalhamento do vento, sendo que cisalhamento do vento é causado por uma mudança abrupta na velocidade ou direção do vento em um curto intervalo de tempo.

X_1 é relação entre a frequência da rajada e a velocidade média do vento para um intervalo de 10 minutos.

3.3.4 DECOMPOSIÇÃO DO ESPECTRO DE POTÊNCIA

A decomposição do espectro de potência é utilizada para obter a componente flutuante do vento no Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993).

Segundo CUNHA (2012), o carregamento de vento deve ser decomposto em m harmônicos, mínimo de 12, onde o espectro de potência deve abranger pelo menos o primeiro modo de vibração da estrutura.

A parcela $p'(t)$ é a parcela flutuante da componente do vento, para o Método do Vento Sintético, segundo o espectro de Davenport. Sugere que as frequências devam estar contidas em um intervalo de frequência de 0,0017Hz e 2,5 Hz, ou seja, em um intervalo de tempo de 0,4s e 600s de modo que se inclua pelo menos o

primeiro modo de vibração da estrutura, que segundo FRANCO (1993) será ressonante com um dos harmônicos.

CARRIL JR (2000) propõe que a parcela flutuante seja calculada através da seguinte expressão.

$$p'(t) \cong \sum_{k=1}^m C_k \cos\left(\frac{2\pi}{T_r r_k} t - \theta_k\right) \quad (3.18)$$

Os valores de C_k são determinados pela integração do espectro de potência nos intervalos de frequência dos harmônicos m .

$$C_k = \sqrt{2 \int_{f_{p_k}}^{f_{a_k}} S_p(f) df} \quad (3.19)$$

$$r_k = 2^{k-R} \quad (3.20)$$

Onde:

k = número de harmônicos.

S_p = espectro de potência do vento.

R = Frequência correspondente do harmônico escolhido que tenha uma frequência ressonante com a frequência da estrutura.

T_r = período relacionado ao harmônico ressonante.

r_k = é a razão entre o período de harmônico k e o período do harmônico ressonante.

θ_k = é o angulo fase do harmônico k .

Para CUNHA (2012), os valores de C_k são determinados por integração do espectro de potência para os intervalos de frequência dos harmônicos.

Segundo FRANCO (1993), termos f_{a_k} e f_{p_k} , que são os intervalos das frequências, são obtidos através das relações entre frequências naturais da estrutura, período do harmônico e número do harmônico, expresso da seguinte maneira:

$$f_{a_k} = \frac{r}{2^{(k-0,5-R)}} \quad (3.21)$$

$$f_{p_k} = \frac{r}{2^{(k+0,5-R)}} \quad (3.22)$$

Onde:

k é o número de harmônicos, r é frequência fundamental da estrutura e R é o número do harmônico escolhido que tem a frequência ressonante mais próxima da frequência da estrutura.

Para o cálculo do período de cada harmônico temos:

$$T_k = \frac{1}{f_k} \quad (3.23)$$

$$f_k = \frac{r}{2^{(k-R)}} \quad (3.24)$$

onde:

f_k é a frequência da estrutura para o harmônico k e T_k é o período fundamental da estrutura para o harmônico “ k ”.

3.3.5 CORRELAÇÃO ESPACIAL DE VELOCIDADES

Segundo LAZANHA (2003), a correlação espacial de velocidades pode ser descrita em função da distância entre o deslocamento de um ponto da estrutura d e a frequência da rajada f .

Após definidos os harmônicos de forças flutuantes, são elaboradas as séries temporais, que são compostas pelo somatório de forças flutuantes e ângulos de fase em uma faixa de “0” (zero) a 2π .

Por fim, de maneira a sistematizar o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) deve-se conceituar o tamanho da rajada, que nada mais é, segundo CUNHA (2012), que uma rajada perfeitamente correlacionada.

$$coh(d, f) = e^{-\hat{f}} \quad (3.25)$$

$$\hat{f} = \frac{f \sqrt{C_z^2(z_1 - z_2)^2 + C_y^2(y_1 - y_2)^2}}{\bar{V}_{10}} \quad (3.26)$$

Onde:

coh = função correlação de velocidades.

\hat{f} = frequência que relaciona a frequência da rajada.

z_1, z_2, y_1, y_2 = são as coordenadas dos pontos considerados nas faces da estrutura atingida pelo vento (perpendicular ao fluxo).

C_z e C_y = fatores de decaimento exponencial determinados experimentalmente.

No objeto deste estudo, as estruturas serão de pórtico espacial tridimensional, onde a dimensão vertical é extremamente substancial em relação às dimensões em planta, sendo assim será utilizada somente a correlação vertical das velocidades.

$$coh(\Delta_z, f_k) = \exp\left(\frac{-7\Delta_z f_k}{\bar{V}_{(10)}}\right) \quad (3.27)$$

Onde:

Δz = comprimento da rajada.

f_k = frequência da rajada.

3.3.6 CENTRO DE RAJADA

Para as estruturas abordadas neste trabalho, recomenda que para a definição do centro da rajada o processo deva ser aleatório e iterativo, de forma que este ponto seja o local de maiores deformações da estrutura, a fim de obter a máxima resposta.

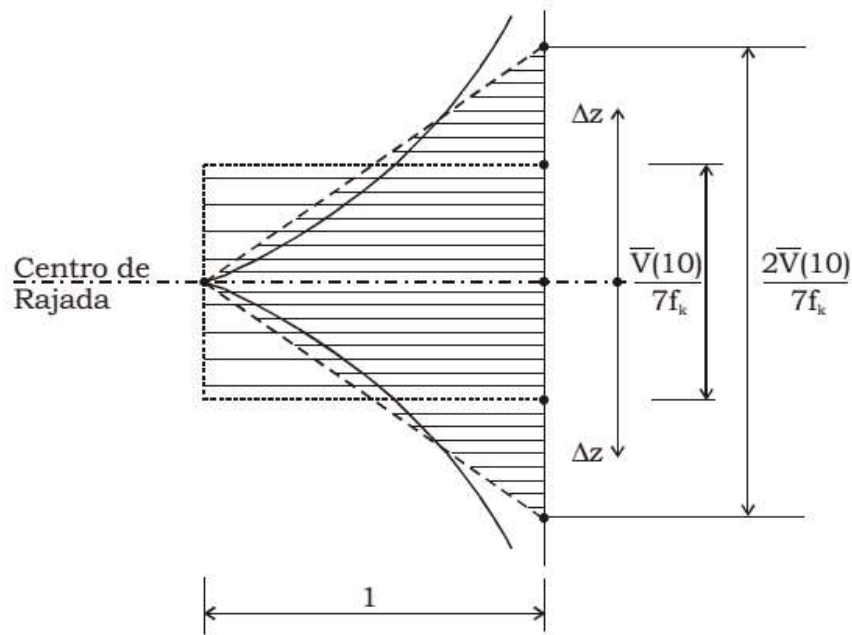


Figura 17 – Rajadas equivalentes. Fonte: Franco (1993).

$$\Delta z_k = \frac{\bar{v}_p}{7 f_k} \quad (3.28)$$

Onde:

Δz_k é o comprimento da rajada e f_k é a frequência da rajada, ambos para a rajada k em estudo.

Desse modo, após definido o comprimento da rajada " Δz_k " e as séries temporais de carregamento, a estrutura deve ser excitada, gerando, segundo FRANCO (1993), 20 séries de carregamento, sendo 11 funções harmônicas para cada carregamento, totalizando 220 funções harmônicas.

Uma aproximação da equivalência de efeitos é obtida igualando-se as resultantes das pressões p' , em que o coeficiente de correlação é:

$$Coh(p')(\Delta z, f_k) = \left[\exp\left(-\frac{7\Delta z f_k}{v_p}\right) \right]^2 = \exp\left(-\frac{14\Delta z f_k}{v_p}\right) \quad (3.29)$$

Assim, a altura da rajada equivalente pode ser determinada como:

$$\Delta z_k = 2 \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{14\Delta z f_k}{v_p}\right) d(\Delta z) = \frac{v_p}{7f_k} \quad (3.30)$$

Para cada frequência do vento adota-se uma correlação espacial representada por dois triângulos, com decaimento de 1 a 0, atuando na altura total dada por:

$$2\Delta z_k = \frac{2v_p}{7f_k} \quad (3.31)$$

Para determinação do centro de rajada, utiliza-se a expressão:

$$Gc = z_1 - \Delta z_k \quad (3.32)$$

O centro de rajada encontrado pela expressão 3.29 é de utilização facultativa, uma vez que poderá ser adotado um centro de rajada cuja resposta seja mais significativa para a torre. No entanto, são necessárias análises em determinados pontos da estrutura, abaixo do centro de rajada calculado.

3.3.7 PARCELA MÉDIA E PARCELA FLUTUANTE

Em seus estudos, FRANCO (1993) pressupôs que a relação entre pressão média, cujo intervalo de tempo é de 600s, e pressão máxima do vento, cujo intervalo de tempo corresponde a uma rajada de 3s, independe da altura da edificação, sendo que 48% do vento incidente sobre a superfície corresponde à superposição da parcela referente a uma resposta média, e 52% do vento a de uma parcela flutuante. Esta superposição de parcela média e parcela flutuante também são descritas no capítulo 4 da NBR 6123 (ABNT, 1988).

Dessa forma, segundo o Método do Vento Sintético, a razão entre pressão média e a pressão máxima é

$$\frac{q_{600}}{q_3} = \left(\frac{V_{600}}{V_3}\right)^2 = 0,69^2 = 0,48 \quad (3.33)$$

Onde:

q_{600} é a pressão média do vento em um intervalo de tempo de 600 segundos, V_{600} é a velocidade média do vento em um intervalo de tempo de 600 segundos, q_3 é a pressão máxima da rajada para um intervalo de tempo de 3 segundos e V_3 é a velocidade da rajada para um intervalo de 3 segundos, valores esses válidos para a categoria 2 da NBR 6123.

No entanto, CARRIL JR (2000) propõe que a relação não é constante e depende da altura de cada estrutura a ser estudada, visto que a velocidade de vento em uma edificação aumenta à medida que aumenta a altura.

CARRIL JR. (2000), propõe a seguinte relação:

$$V_{600}(z) = 0,69bV_0 \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (3.34)$$

$$V_3(z) = bV_0 \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad (3.35)$$

Assim, observa-se que b e p variam conforme a classe da edificação, Z é a altura da edificação e V_0 é a velocidade básica do vento utilizada a partir das isopletras, de acordo com a NBR 6123 (ABNT, 1988).

3.3.8 HARMÔNICOS DE FORÇAS NOS NÓS

Os harmônicos de forças nos nós consistem em ser a parcela de carga flutuante multiplicada pela área de abrangência do nó, para obter-se o esforço em cada nó do reticulado.

Para o cálculo dos harmônicos de força Q tem-se uma relação entre pressão flutuante q_f e funções harmônicas P , apresentadas na equação.

$$Q = q_f P \quad (3.36)$$

onde: " P " e " q_f " são dados conforme a equação (3.37) e (3.38).

$$P = \cos\left(\frac{2\pi}{T_R 2^{k-R}} t - \theta_k\right) \quad (3.37)$$

$$q_f = 0,613 (V_{pico})^2 - 0,613 (V_{média})^2 \quad (3.38)$$

Onde:

$$V_{pico} = 0,94 V_0 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,185} \quad (3.39)$$

$$V_{média} = 0,5934 V_0 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,185} \quad (3.40)$$

Para as forças flutuantes F_{flut} tem-se a seguinte expressão:

$$F_{flut} = C_a Q A \quad (3.41)$$

onde:

A = área de incidência de vento em cada pavimento.

3.3.9 MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA

Segundo BOLINA (2014), a análise dinâmica pode ser caracterizada através de três propriedades fundamentais, sendo essas, os modos naturais de vibração, os fatores de amortecimento e as frequências naturais da estrutura. A análise modal é o processo constituído de técnicas teóricas e experimentais que possibilitam a construção de um modelo matemático que representa o comportamento dinâmico de um sistema estrutural, determinando parâmetros modais. Assim, obtemos as frequências fundamentais da estrutura que indicam a oscilação dos elementos expressos em hertz, ou seja, os modos de vibração de como a estrutura vibra para cada frequência fundamental.

A análise modal auxilia na observação de como a estrutura está se deslocando, dessa forma podemos combater essas deformações enrijecendo os elementos estruturais, principalmente os pilares.

4 ESTUDO DE CASO

Quando se trata de edifícios altos, observa-se a busca por construções mais altas e com fachadas menos tradicionais, comentadas no Capítulo 1. No Brasil destacam-se no Capítulo 3 alguns dos edifícios mais altos da América Latina.

Os modelos I e II abordados neste estudo têm como objetivo fazer uma contribuição para mais dois estudos de caso, de forma a contribuir com resultados para a comparação entre o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) e o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993).

4.1 MODELO I

O modelo I é constituído por 3 subsolos, térreo, mezanino, transição, 24 pavimentos tipo, duplex inferior, duplex superior, cobertura, casa de máquinas e caixa de água, contemplando 34 pavimentos, com altura total de 103 metros.

O modelo possui características de ser uma estrutura de concreto armado, com lajes nervuradas, visto o fato da extensão dos blocos a estrutura não contempla juntas de dilatação, a assimetria dos pórticos da edificação faz com que as deformações e os coeficientes de arrasto sejam diferentes para as duas direções.

Para este trabalho não houve variações do f_{ck} ao longo da altura da edificação, sendo considerado $f_{ck} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ e toda a estrutura com um módulo de elasticidade do concreto $E = 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$. Esses valores foram considerados apenas para a simplificação, já que o objetivo deste trabalho é a comparação dos resultados de duas formulações matemáticas para avaliar o vento nesta estrutura.

É válido destacar que as simplificações no modelo estrutural para o estudo não refletem as reais condições a que esta edificação está sujeitada.

A massa da estrutura é de 12.274 toneladas.

Os modos de vibração da estrutura são:

Tabela 4.1. Modos de vibração da estrutura modelo I.

Modos de Vibração	Período (s)	Frequência (Hz)	Frequência (rad/s)
1	4,454	0,225	1,411
2	4,362	0,229	1,44
3	3,6	0,278	1,745
4	1,429	0,7	4,396
5	1,162	0,861	5,408
6	1,001	0,999	6,276
7	0,854	1,171	7,357
8	0,672	1,487	9,343
9	0,649	1,541	9,682
10	0,586	1,708	10,731

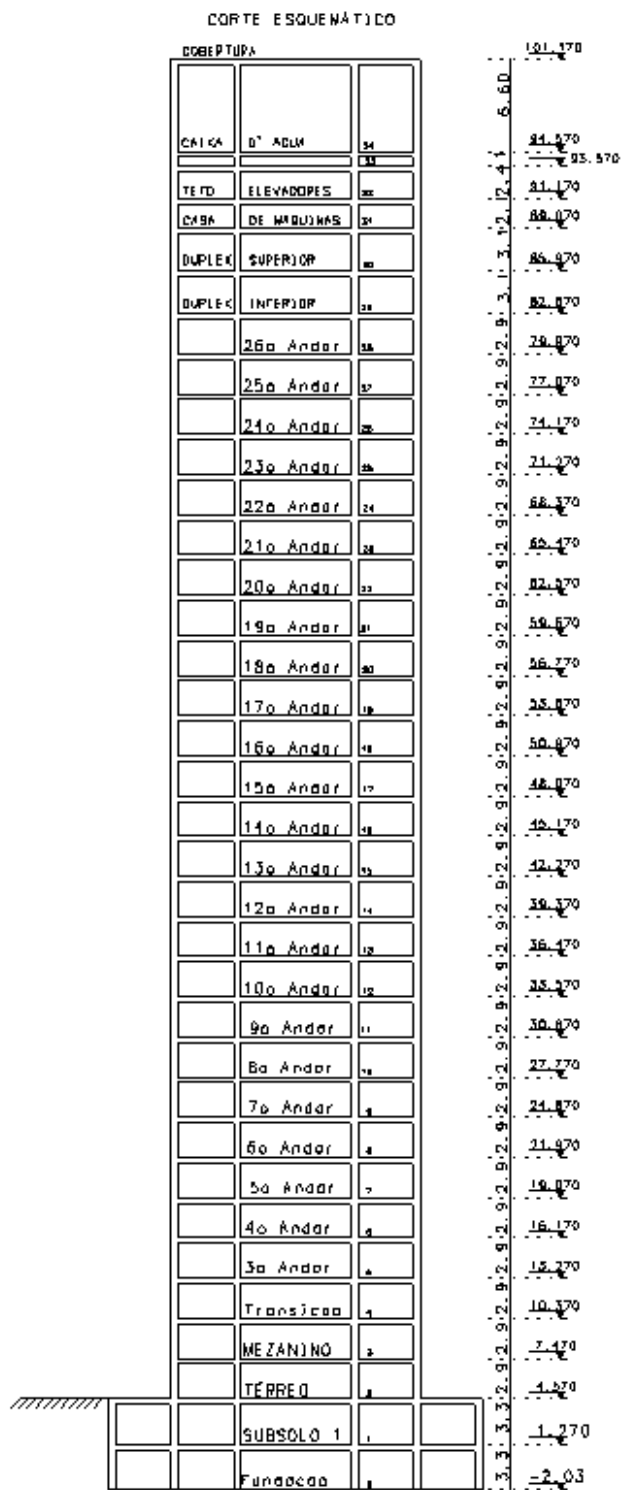


Figura 18. Esquema vertical do modelo 1.

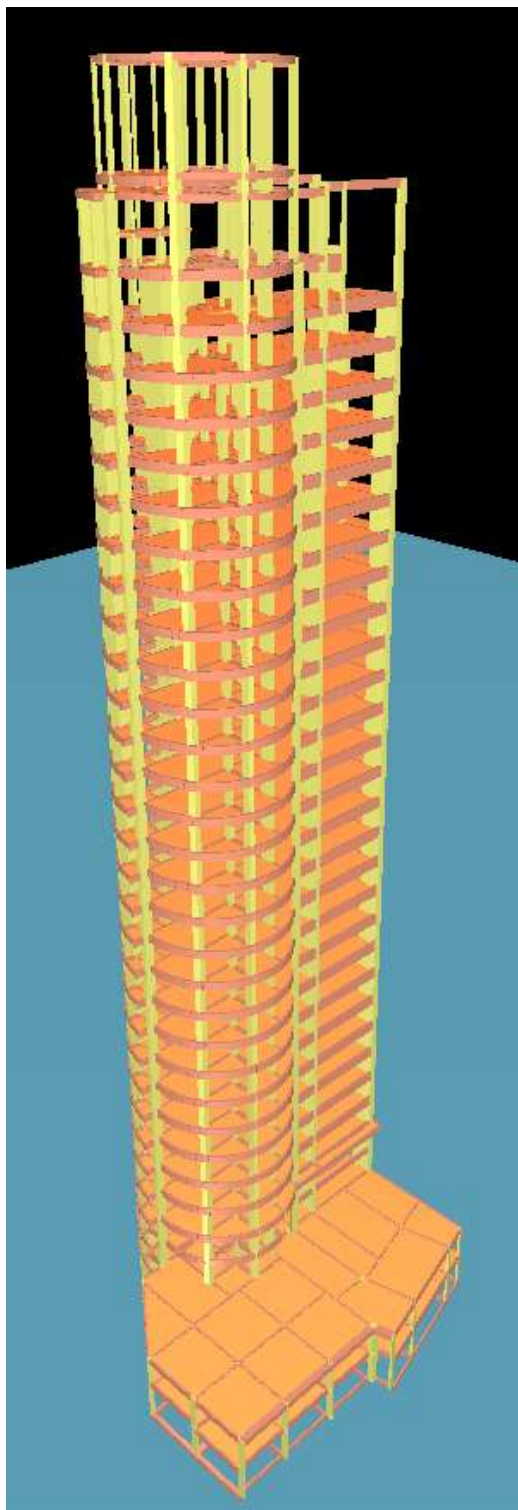


Figura 19. Perspectiva espacial do modelo 1.

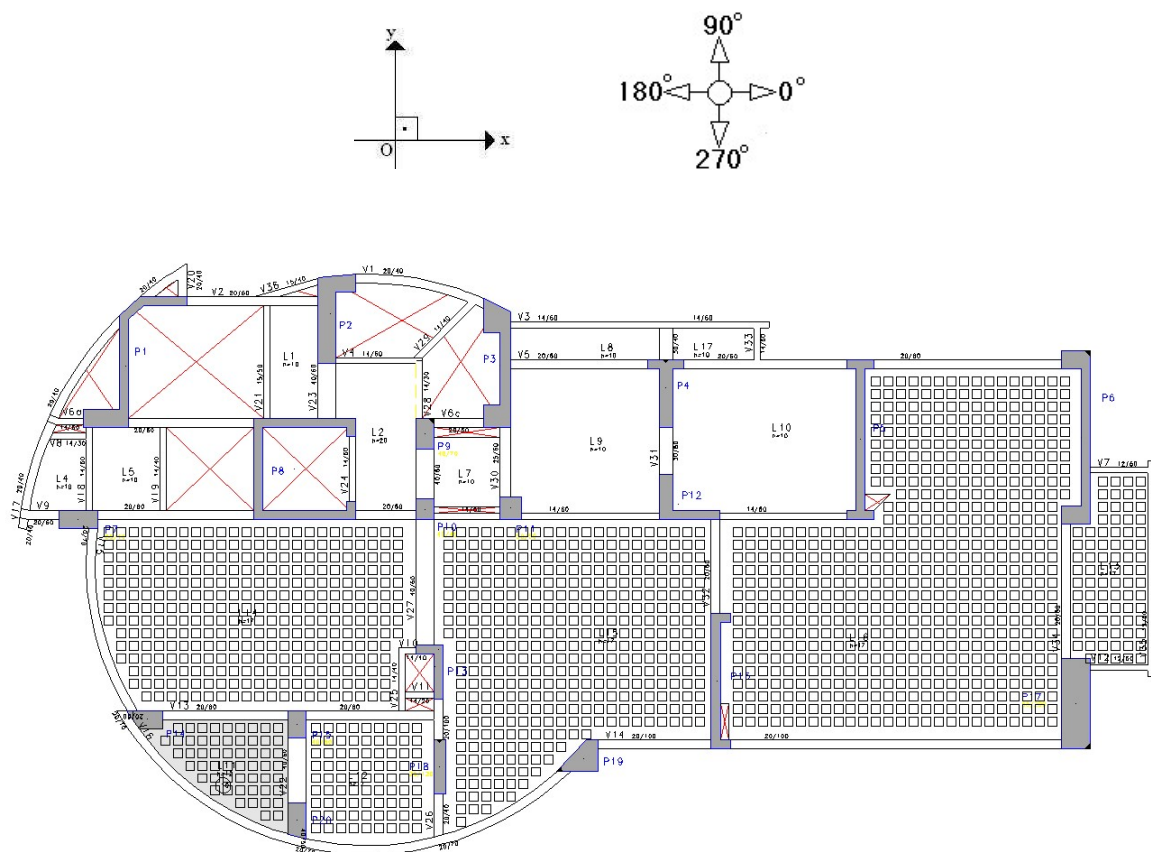


Figura 20. Forma da estrutura pavimento tipo, modelo 1.

4.1.1 CARGAS VERTICAIS ADOTADAS

PERMANENTES

- Peso próprio da estrutura: $\gamma_c = 2,5 \text{ tf/m}^3$.
- Revestimento (piso + forro): 150 kgf/m^2 .
- Alvenaria de blocos espessura 20cm: 320 kgf/m^2 .
- Camada de impermeabilização: 200 kgf/m^2 .
- EPS: $\gamma = 0,03 \text{ tf/m}^3$.
- Cobertura e respectiva estrutura metálica: 100 kgf/m^2 .

ACIDENTAIS

- Considerada predominante na estrutura a carga acidental de 150 kgf/m^2 , visando atender à NBR 6120 – ABNT, 1980, “Cargas para o Cálculo de Estruturas”.
- Nas demais cargas, foram contempladas as específicas para cada uso.

4.1.2 MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA

Com o objetivo de descobrir as frequências naturais da estrutura, bem como os seus modos de vibração, utilizou-se o programa TQS V17.

A estrutura possui 10 modos de vibração indicados nas Figuras 21 a 30, sequenciados em planta do pavimento tipo e perspectiva.

No modelo I podemos observar as deformações causadas pela distorção do alinhamento vertical e a torção do corpo do edifício, causados devido a criação de um núcleo rígido na região circular do pavimento tipo, de quem observa em planta.

Tabela 4.1. Modos de vibração da estrutura modelo I.

Modos de Vibração	Período (s)	Frequência (Hz)	Frequência (rad/s)
1	4,454	0,225	1,411
2	4,362	0,229	1,44
3	3,6	0,278	1,745
4	1,429	0,7	4,396
5	1,162	0,861	5,408
6	1,001	0,999	6,276
7	0,854	1,171	7,357
8	0,672	1,487	9,343
9	0,649	1,541	9,682
10	0,586	1,708	10,731

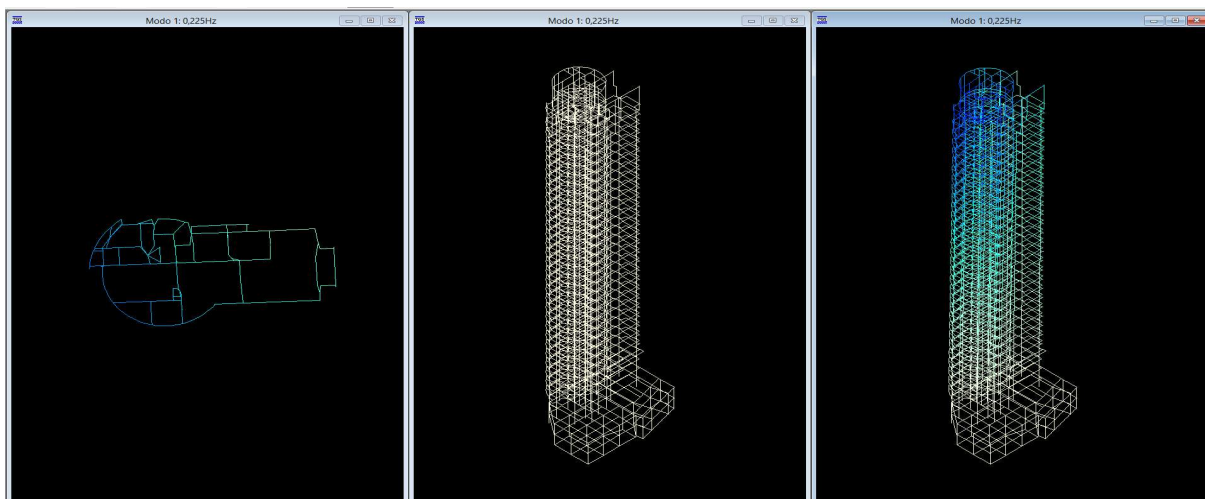


Figura 21. Modo de vibração 1 – Frequência fundamental de 0,225Hz.

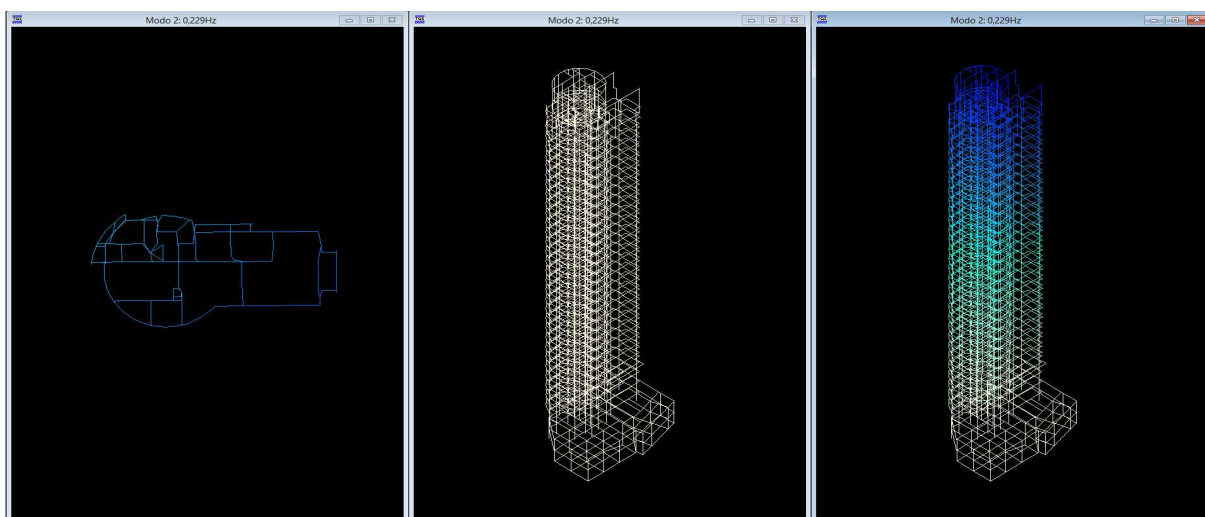


Figura 22. Modo de vibração 2 – Frequência fundamental de 0,229Hz.

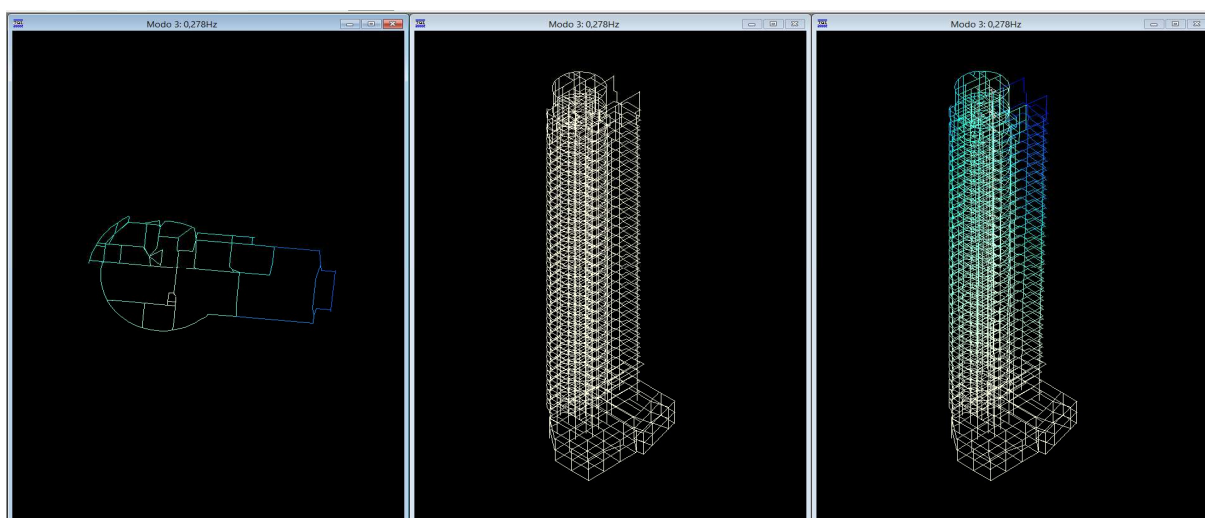


Figura 23. Modo de vibração 3 – Frequência fundamental de 0,278Hz.

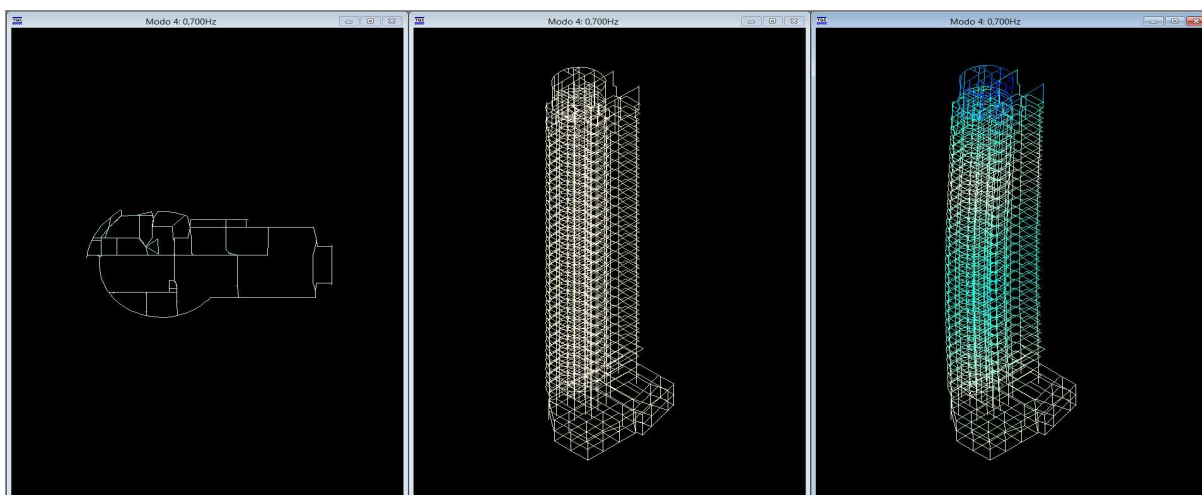


Figura 24. Modo de vibração 4 – Frequência fundamental de 0,700Hz.

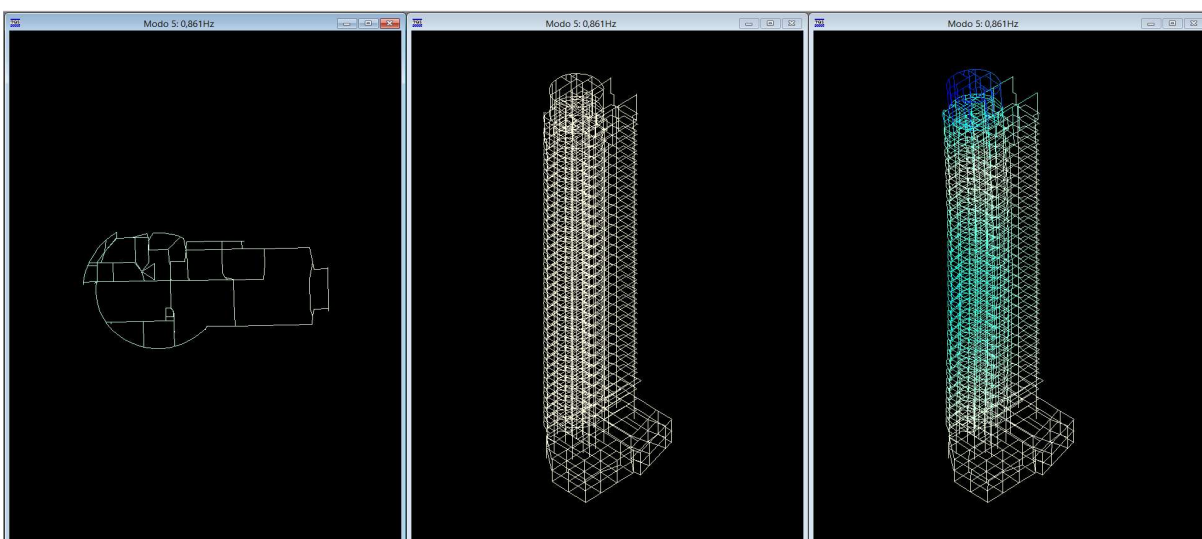


Figura 25. Modo de vibração 5 – Frequência fundamental de 0,861Hz.

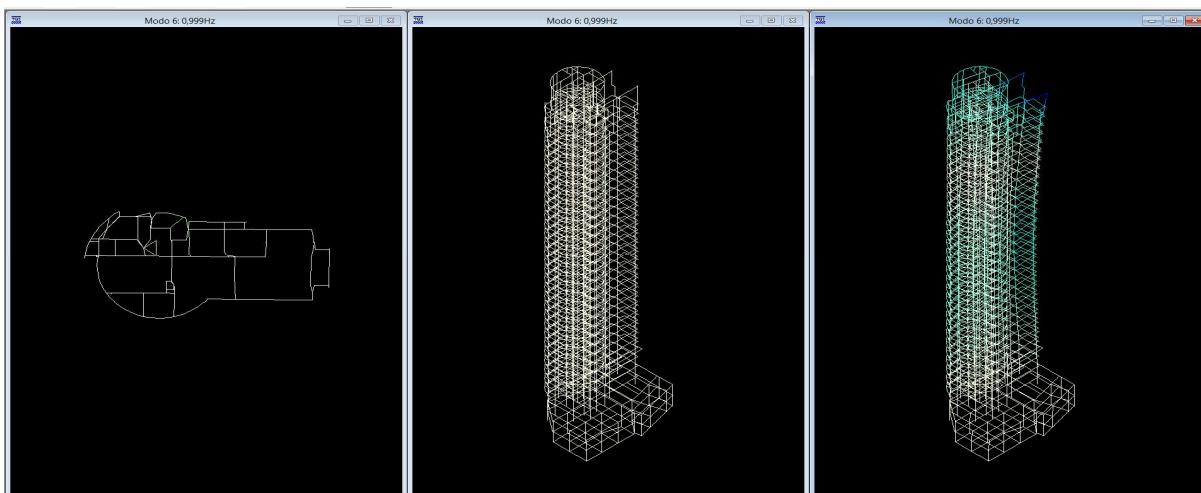


Figura 26. Modo de vibração 6 – Frequência fundamental de 0,999Hz.

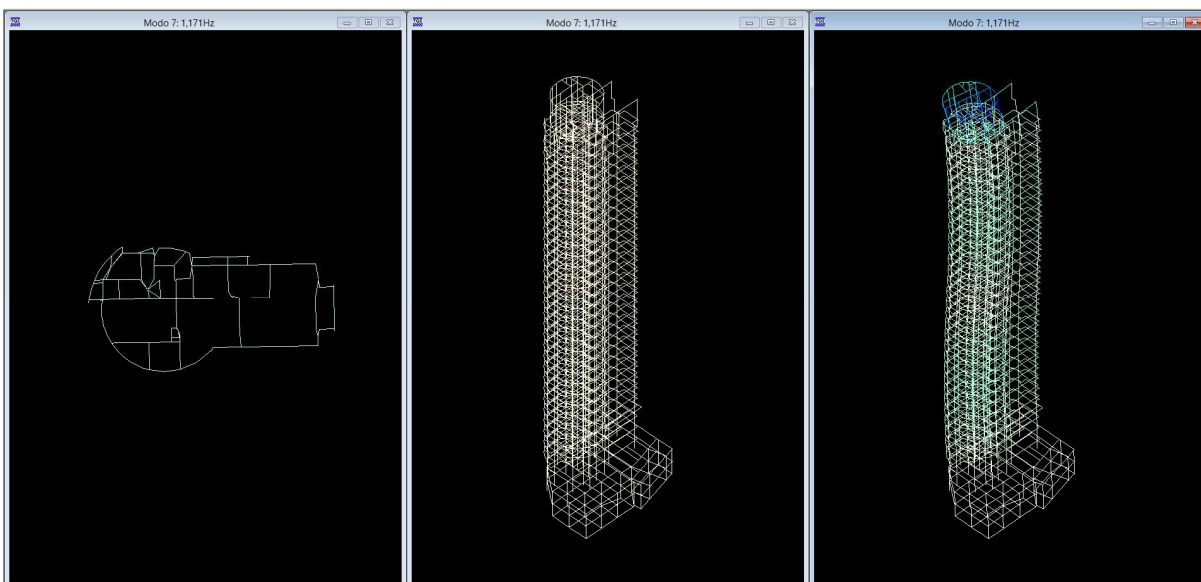


Figura 27. Modo de vibração 7 – Frequência fundamental de 1,171Hz.

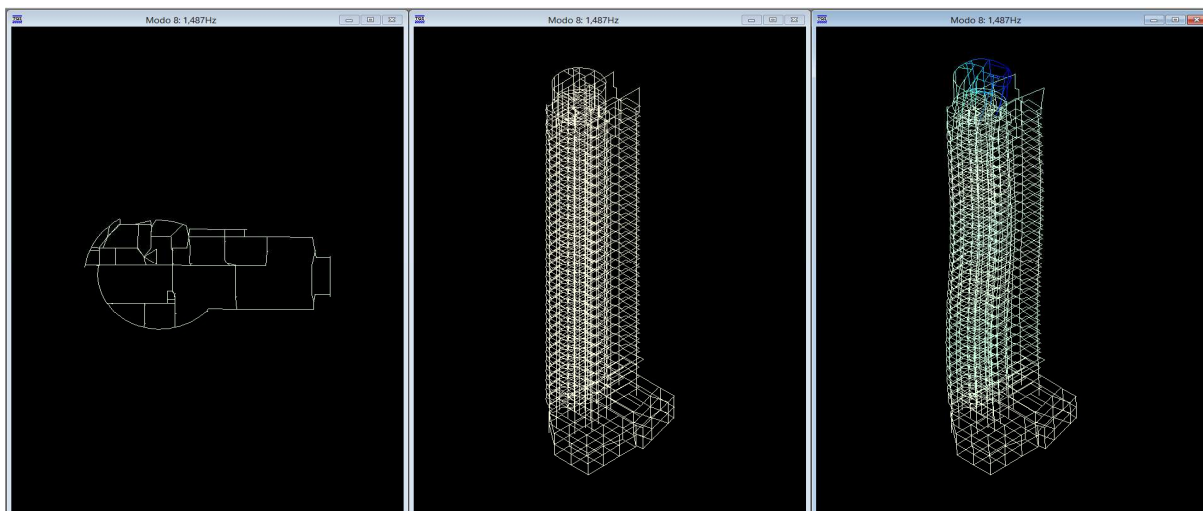


Figura 28. Modo de vibração 8 – Frequência fundamental de 1,487Hz.

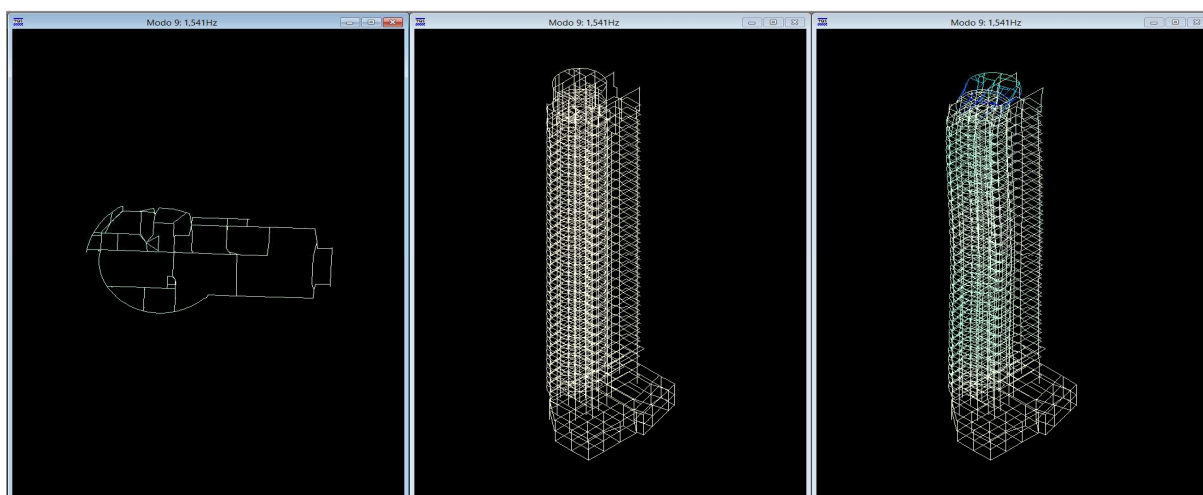


Figura 29. Modo de vibração 9 – Frequência fundamental de 1,514Hz.

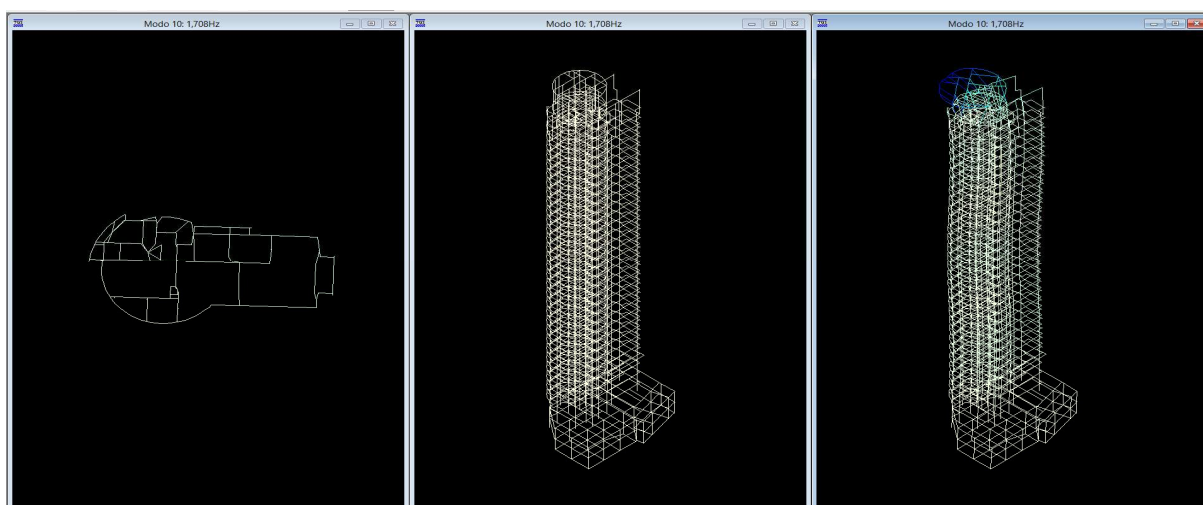


Figura 30. Modo de vibração 10 – Frequência fundamental de 1,708Hz.

O centro de carga da estrutura para o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) foi definida através da tentativa e erro, com o carregamento de vento incidente perpendicular às faces do edifício.

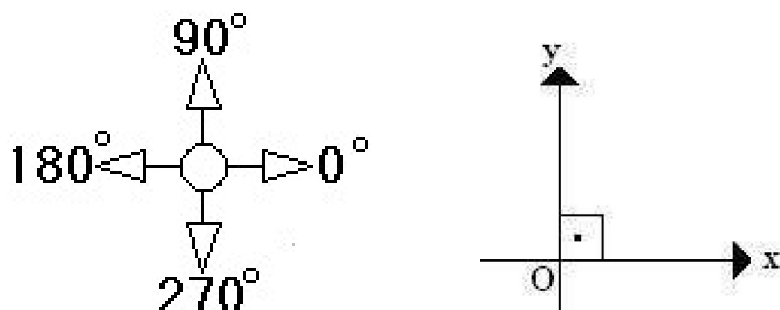


Figura 31. Ângulo de Incidência do Vento.

Sabe-se que o ponto de maior deslocamento é o nó mais alto definido pela estrutura. Com a utilização da ferramenta computacional define-se o centro de carga em cada pavimento e verifica-se a deformação no nó especificado.

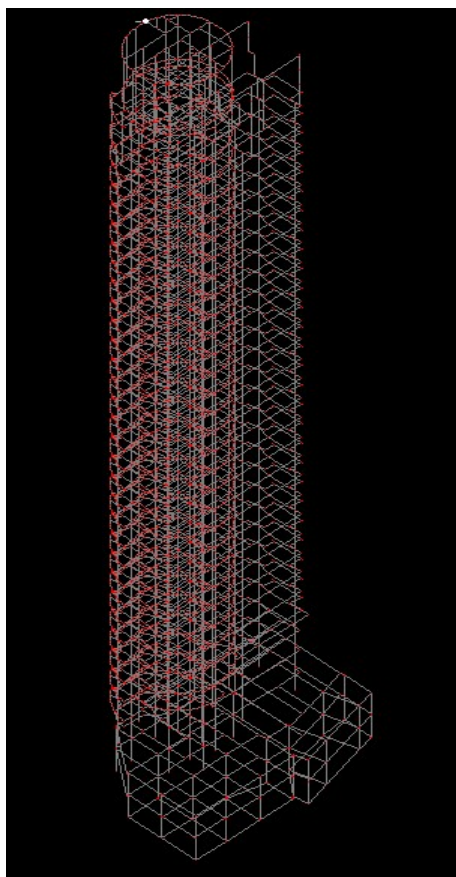


Figura 32. Pórtico com a indicação do ponto com maior deslocamento no modelo I.

4.1.3 ANÁLISE ESTÁTICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO MÉTODO DISCRETO NBR6123 (ABNT, 1988) PARA O MODELO I

A carga de carregamento de vento gerado com o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) incidiu a 0° , 90° , 180° e 270° .

Dessa forma, serão analisados os deslocamentos, acelerações, esforços normais e momentos fletores.

O caso de vento a 0° e 180° é a situação na qual o vento incide no sentido do eixo X do sistema de eixos definido na Figura 31 e o caso de vento 90° e 270° atuando no sentido do eixo Y do referido sistema de eixos da Figura 31.

Utilizando-se as equações descritas no Capítulo 3 deste trabalho, com o auxílio da ferramenta computacional Mathcad, foram determinadas as duas parcelas de carregamento do vento. A parcela média e a parcela flutuante, que somadas produzem um carregamento a ser aplicado na estrutura de forma estática de acordo com o Método Discreto NBR 6123, conforme ilustrado na Tabela 4.3, para o caso de vento atuando a 90° e 270° e a área de incidência total para o ângulo de 0° e 180° é 1.430m^2 e para 90° e 270° é 2.588m^2 .

Esse carregamento foi então aplicado de forma estática à estrutura, atribuindo cada parcela ao seu respectivo pavimento. Cada parcela foi dividida pela quantidade de nós do pavimento para que pudesse atuar de forma uniforme na estrutura.

Tabela 4.2. Carregamento do vento – modelo I – direção 0° e 180° – Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988).

MODELO I - 0° E 180°

i	Zi (m)	Ai (m ²)	X_i (tf)	\bar{X}_i média (tf)	\widehat{X}_i flut (tf)
1	1,57	83,49	4,37	3,84	0,53
2	7,47	83,49	4,06	3,76	0,29
3	10,37	38,86	4,10	3,75	0,35
4	13,27	38,86	4,61	4,47	0,15
5	16,17	38,86	4,93	4,43	0,50
6	19,07	38,86	5,04	4,39	0,65
7	21,97	38,86	5,07	4,34	0,73
8	24,87	38,86	4,99	4,29	0,70
9	27,77	38,86	4,90	4,25	0,66
10	30,67	38,86	4,93	4,20	0,73
11	33,57	38,86	4,84	4,15	0,70
12	36,47	38,86	4,71	4,10	0,62
13	39,37	38,86	4,62	4,04	0,58
14	42,27	38,86	4,53	3,99	0,54
15	45,17	38,86	4,44	3,93	0,51
16	48,07	38,86	4,34	3,87	0,47
17	50,97	38,86	4,25	3,81	0,44
18	53,87	38,86	4,15	3,75	0,40
19	56,77	38,86	4,05	3,69	0,37
20	59,67	38,86	3,96	3,62	0,34
21	62,57	38,86	3,85	3,55	0,31
22	65,47	38,86	3,75	3,47	0,28
23	68,37	38,86	3,64	3,39	0,25
24	71,27	38,86	3,53	3,31	0,22
25	74,17	38,86	3,42	3,22	0,20
26	77,07	38,86	3,30	3,13	0,17
27	79,97	38,86	3,17	3,02	0,15
28	82,87	38,86	3,04	2,91	0,13
29	85,97	38,86	2,90	2,79	0,11
30	89,07	38,86	2,75	2,66	0,09
31	91,17	38,86	2,58	2,50	0,07
32	93,57	38,86	2,87	2,33	0,54
33	94,57	32,40	2,50	2,11	0,39
34	101,17	32,40	3,12	2,84	0,28
35	103,00	32,40	2,72	2,56	0,16

Tabela 4.3. Carregamento do vento - modelo I – direção 90° e 270° – Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988).

MODELO I - 90° E 270°

l	Zi (m)	Ai (m ²)	Xi (tf)	$\overline{X_i}$ média (tf)	$\widehat{X_i}$ flut (tf)
1	1,57	99,00	6,18	4,93	1,25
2	7,47	99,00	5,54	4,84	0,70
3	10,37	75,00	12,00	11,18	0,82
4	13,27	75,00	11,44	11,09	0,35
5	16,17	75,00	12,18	11,01	1,17
6	19,07	75,00	12,63	11,09	1,54
7	21,97	75,00	12,50	10,78	1,72
8	24,87	75,00	12,30	10,66	1,64
9	27,77	75,00	12,09	10,54	1,55
10	30,67	75,00	11,88	10,42	1,46
11	33,57	75,00	11,72	10,35	1,37
12	36,47	75,00	11,45	10,17	1,28
13	39,37	75,00	11,23	10,04	1,19
14	42,27	75,00	11,02	9,91	1,11
15	45,17	75,00	10,79	9,77	1,03
16	48,07	75,00	10,57	9,62	0,95
17	50,97	75,00	10,34	9,47	0,87
18	53,87	75,00	10,11	9,32	0,80
19	56,77	75,00	9,88	9,15	0,73
20	59,67	75,00	9,64	8,98	0,66
21	62,57	75,00	9,40	8,81	0,59
22	65,47	75,00	9,15	8,62	0,53
23	68,37	75,00	8,89	8,43	0,47
24	71,27	75,00	8,63	8,22	0,41
25	74,17	75,00	8,35	8,00	0,35
26	77,07	75,00	8,07	7,76	0,30
27	79,97	75,00	7,76	7,51	0,25
28	82,87	75,00	7,44	7,24	0,21
29	85,97	75,00	7,10	6,94	0,17
30	89,07	75,00	6,73	6,60	0,13
31	91,17	75,00	6,31	6,22	0,09
32	93,57	75,00	6,44	5,77	0,67
33	94,57	75,00	5,57	5,24	0,33
34	101,17	32,40	4,46	4,39	0,07
35	103	32,40	4,11	4,06	0,05

Observa-se que na Tabela 4.3 e na Figura 27, onde o vento que atua na estrutura a um ângulo de 90° e 270°, ocorre o máximo deslocamento e aceleração no ponto mais alto da estrutura. Esta condição é considerada como situação de

projeto para a estrutura e, portanto, os esforços do modelo estrutural são utilizados para análise dos deslocamentos e acelerações da estrutura.

Os elementos estruturais escolhidos para a análise foram os pilares P1, P6, P8, P17 e P19 por serem pilares externos e para não repetir os pilares simétricos do pavimento tipo, das Tabelas 5.3 a 5.7, onde são apresentados os esforços normais e momentos fletores.

4.1.4 ANÁLISE DINÂMICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO GERADO PELO MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

Com o objetivo de representar o vento com outras ponderações com características dinâmicas, utilizou-se o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) como modelo matemático para geração deste carregamento. Admite-se que o método é composto por uma parcela média e uma parcela flutuante.

A parcela média, como especificado no Capítulo 3 para o método do vento sintético, possui 11 funções harmônicas, e a faixa de frequência escolhida para decomposição do espectro de Davenport foi de 0,225 Hz até 1,708 Hz.

Em cada ângulo de incidência são geradas 20 séries temporais de carregamento e em cada série composta por 11 harmônicos com um ângulo de fase gerado aleatoriamente.

A parcela flutuante é função da superposição de várias funções harmônicas, sendo necessário carregar a estrutura para cada instante de tempo, em que para todos os modos de vibração o tempo total de análise foi de 600 segundos e a divisão dos períodos foi de 60 segundos.

Para o carregamento da parcela flutuante, faz-se necessário definir para cada pavimento o centro de rajada e obter o máximo deslocamento da estrutura. Assim, através da Tabela 4.4 verifica-se que o centro de rajada se encontra no 25º pavimento para a cota 77,07 para o modelo I.

Desta maneira, os elementos de pilares escolhidos, citados no item 4.1.3, são apresentados através de esforços normais e momentos fletores nas Tabelas 5.3 a 5.7.

Tabela 4.4. Deslocamento no ponto mais alto para o modelo I da estrutura

Definição do Centro de Rajada			
Pavimento	Cota	Deslocamento no eixo X	Deslocamento no eixo Y
COBERTURA CX ÁGUA	101,7	5,05	5,13
CAIXA DE ÁGUA	94,57	11,20	14,23
BARRILETE	93,57	8,67	15,30
TETO DOS ELEVADORES	91,17	10,97	14,00
CASA DE MÁQUINAS	89,07	10,97	20,13
DUPLEX SUPERIOR	85,97	10,53	19,40
DUPLEX INFERIOR	82,87	9,77	20,17
26º PAVIMENTO	79,97	10,00	19,30
25º PAVIMENTO	77,07	11,30	23,27
24º PAVIMENTO	74,17	8,27	14,77
23º PAVIMENTO	71,27	8,50	19,50
22º PAVIMENTO	68,37	7,50	17,60
21º PAVIMENTO	65,47	7,33	13,30
20º PAVIMENTO	62,57	7,60	12,50
19º PAVIMENTO	59,67	7,00	10,53
18º PAVIMENTO	56,77	6,83	8,83
17º PAVIMENTO	53,87	7,17	8,53
16º PAVIMENTO	50,97	6,41	8,10
15º PAVIMENTO	48,07	4,95	7,27
14º PAVIMENTO	45,17	4,58	7,93
13º PAVIMENTO	42,27	4,61	5,41
12º PAVIMENTO	39,37	5,11	4,82
11º PAVIMENTO	36,47	3,08	4,18
10º PAVIMENTO	33,57	3,14	3,34
9º PAVIMENTO	30,67	2,67	2,50
8º PAVIMENTO	27,77	1,69	1,65
7º PAVIMENTO	24,87	0,96	0,81
6º PAVIMENTO	21,97	0,24	0,52
5º PAVIMENTO	19,07	0,17	0,41
4º PAVIMENTO	16,17	0,17	0,30
3º PAVIMENTO	13,27	0,11	0,29
TRANSIÇÃO	10,37	0,09	0,24
MEZANINO	7,47	0,07	0,11
TÉRREO	4,57	0,03	0,09
SUBSOLO I	1,27		
SUBSOLO II	-2,03		

Após definido o centro da rajada, todas as análises de deformação, velocidade e aceleração serão efetuadas para o 25º pavimento na cota 77,07m.

4.1.5 DESLOCAMENTO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO I DA ESTRUTURA

Os gráficos abaixo apresentados representam o deslocamento para o ponto mais alto da estrutura.

O maior deslocamento para o modelo adotado com o cálculo do Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) ocorre ao longo do eixo y no topo da edificação e é de 11,63cm e está compilado na Tabela 5.1.

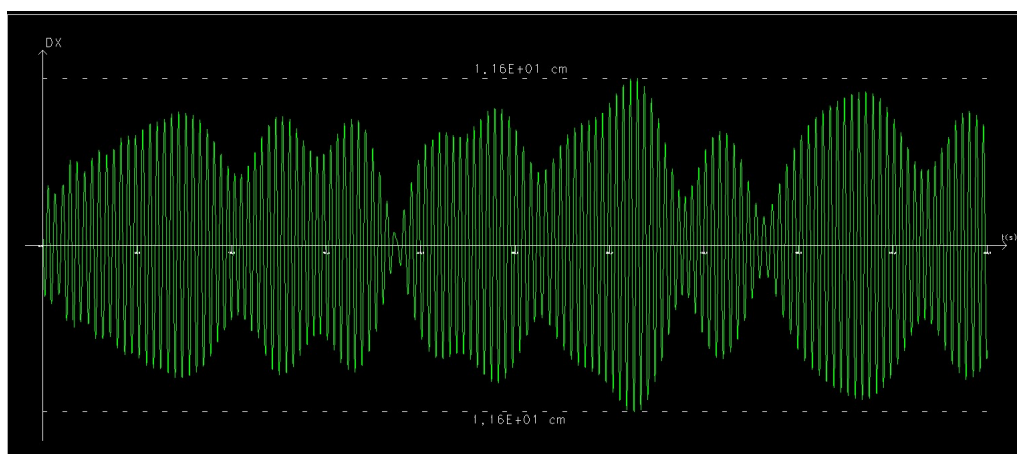


Figura 33. Deslocamento do vento incidência 90° e 270°, deslocamento em y.

Neste Gráfico observa-se o maior deslocamento para o eixo x do modelo I, que é de 5,65cm, computado na Tabela 5.1.

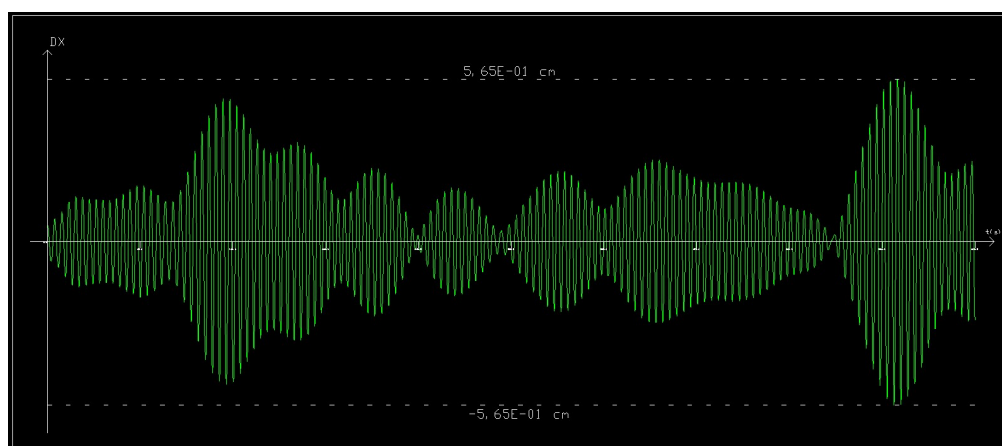


Figura 34. Deslocamento do vento incidência 0° e 180°, deslocamento em x.

4.1.6 ACELERAÇÃO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO I DA ESTRUTURA

Os gráficos abaixo apresentados, representam a aceleração para o ponto mais alto da estrutura.

Com auxílio da Figura 35 e a análise gráfica, pode-se observar que a aceleração do ponto mais alto ao longo do tempo é de $0,46\text{m/s}^2$, item esse compilado na Tabela 5.1

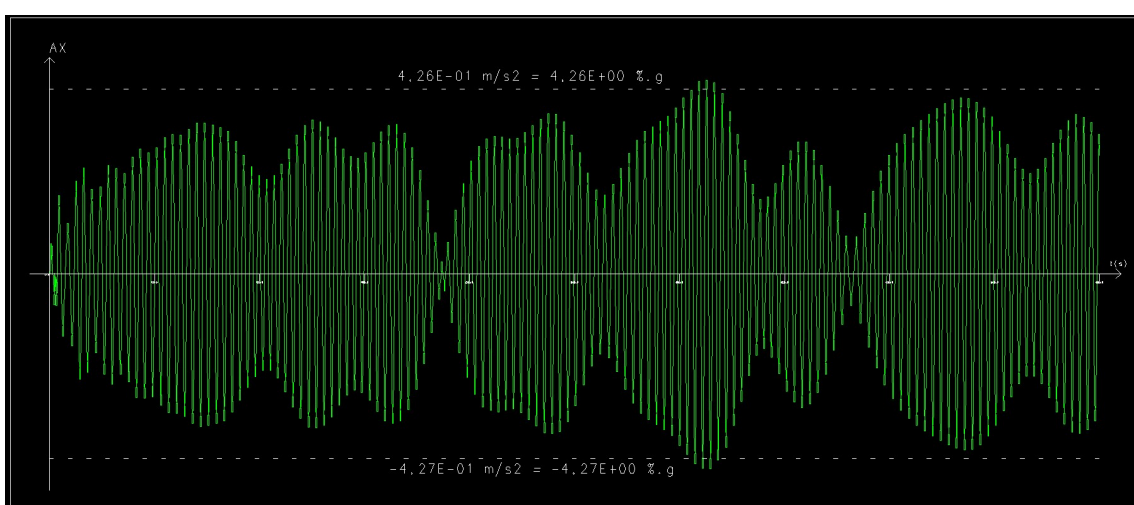


Figura 35. Aceleração do vento incidência 90° e 270° , deslocamento em y.

Para a Figura 36 observa-se que a aceleração do ponto mais alto ao longo do tempo é de $0,30\text{m/s}^2$, item esse compilado na Tabela 5.1

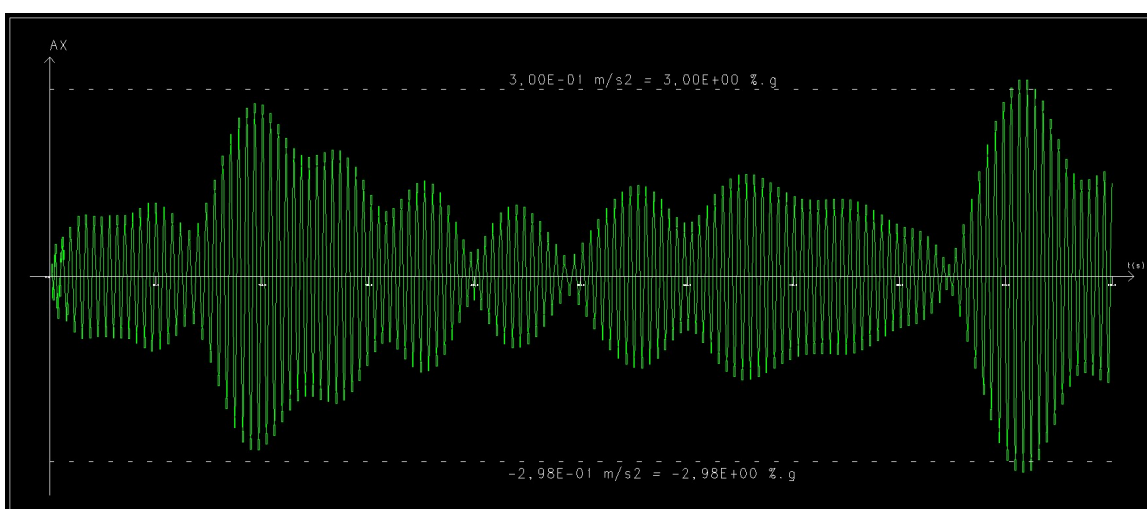


Figura 36. Aceleração do vento incidência 0° e 180° , deslocamento em y.

4.2 MODELO II

O modelo II é constituído por 3 subsolos, térreo, transição, 15 pavimentos tipo, duplex inferior, duplex superior, cobertura, casa de máquinas e caixa de água, contemplando 28 pavimentos, com altura total de 65 metros.

O modelo em questão possui a característica de ser uma estrutura em concreto armado, com lajes nervuradas. Pela extensão dos blocos, a estrutura não contempla juntas de dilatação e a assimetria dos pórticos da edificação faz com que as deformações sejam diferentes, embora os coeficientes de arrasto sejam iguais para as duas direções.

Para este trabalho não houve variações do f_{ck} ao longo da altura da edificação, sendo considerado $f_{ck} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ e toda a estrutura com um módulo de elasticidade do concreto $E = 3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$, sendo que esses valores foram considerados apenas para a simplificação, já que o objetivo deste trabalho é a comparação dos resultados de duas formulações matemáticas para avaliar o vento nesta estrutura.

Novamente é válido destacar, como citado no item 4.1, que as simplificações no modelo estrutural para o estudo não refletem as reais condições a que esta edificação está sujeita.

A massa da estrutura é de 12.795 toneladas.

Os modos de vibração da estrutura são:

Tabela 4.7. Modos de vibração da estrutura modelo II.

Modos de Vibração	Período (s)	Frequência (Hz)	Frequência (rad/s)
1	4,464	0,224	1,407
2	3,743	0,267	1,679
3	3,449	0,29	1,822
4	1,397	0,716	4,498
5	1,086	0,921	5,786
6	1,056	0,947	5,95
7	0,849	1,178	7,404
8	0,628	1,592	10,003
9	0,605	1,652	10,383
10	0,567	1,763	11,078

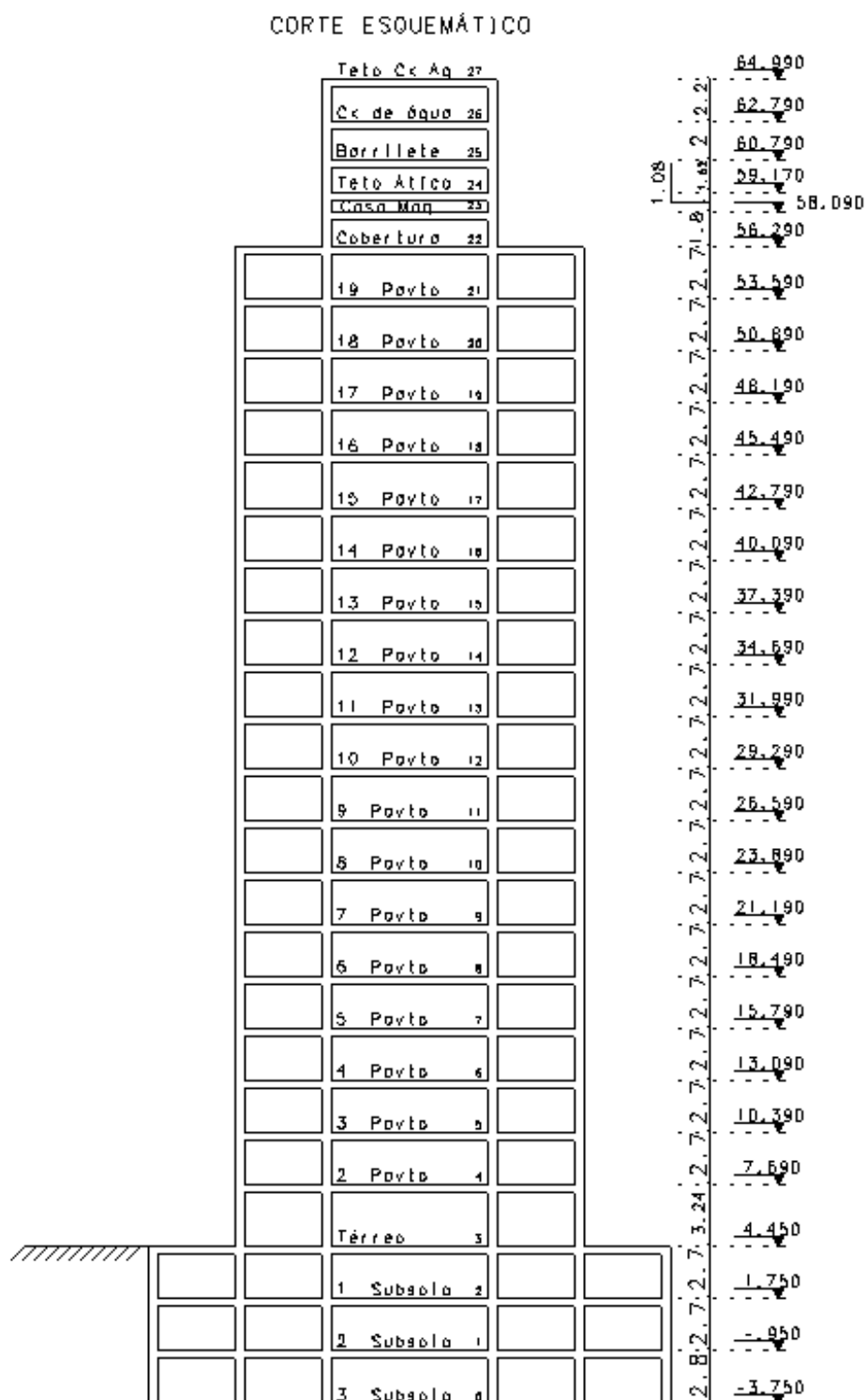


Figura 37. Esquema vertical do modelo 2.

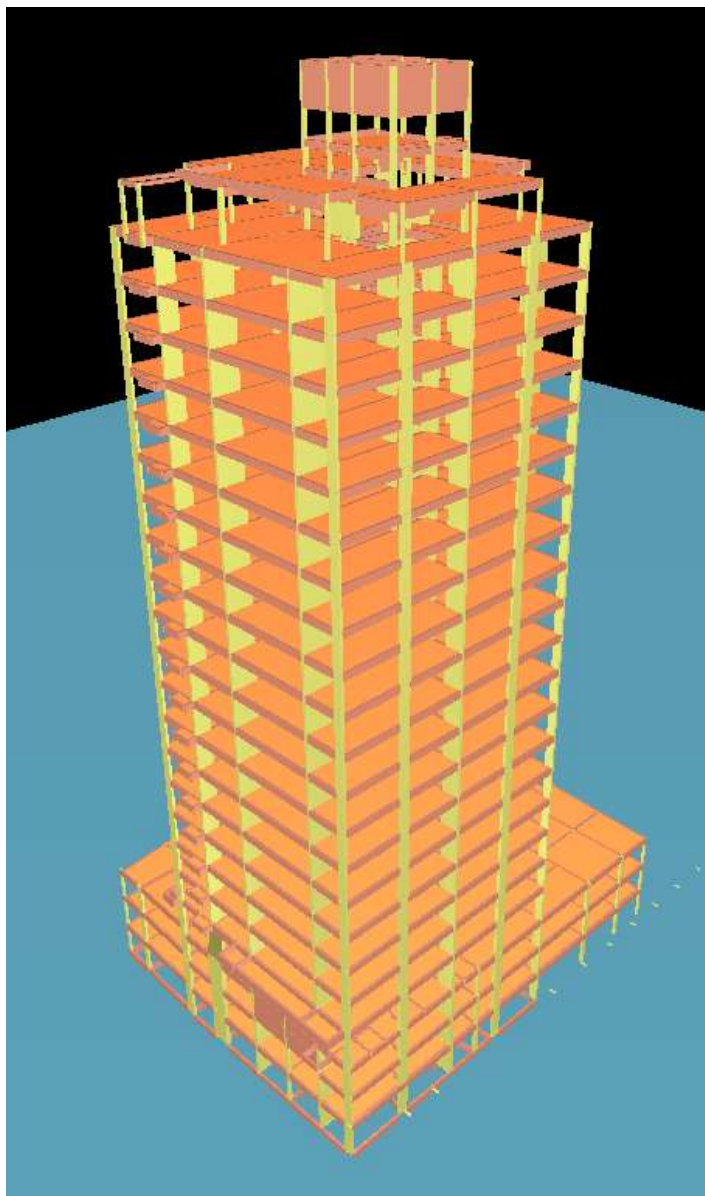


Figura 38. Perspectiva espacial do modelo 2.

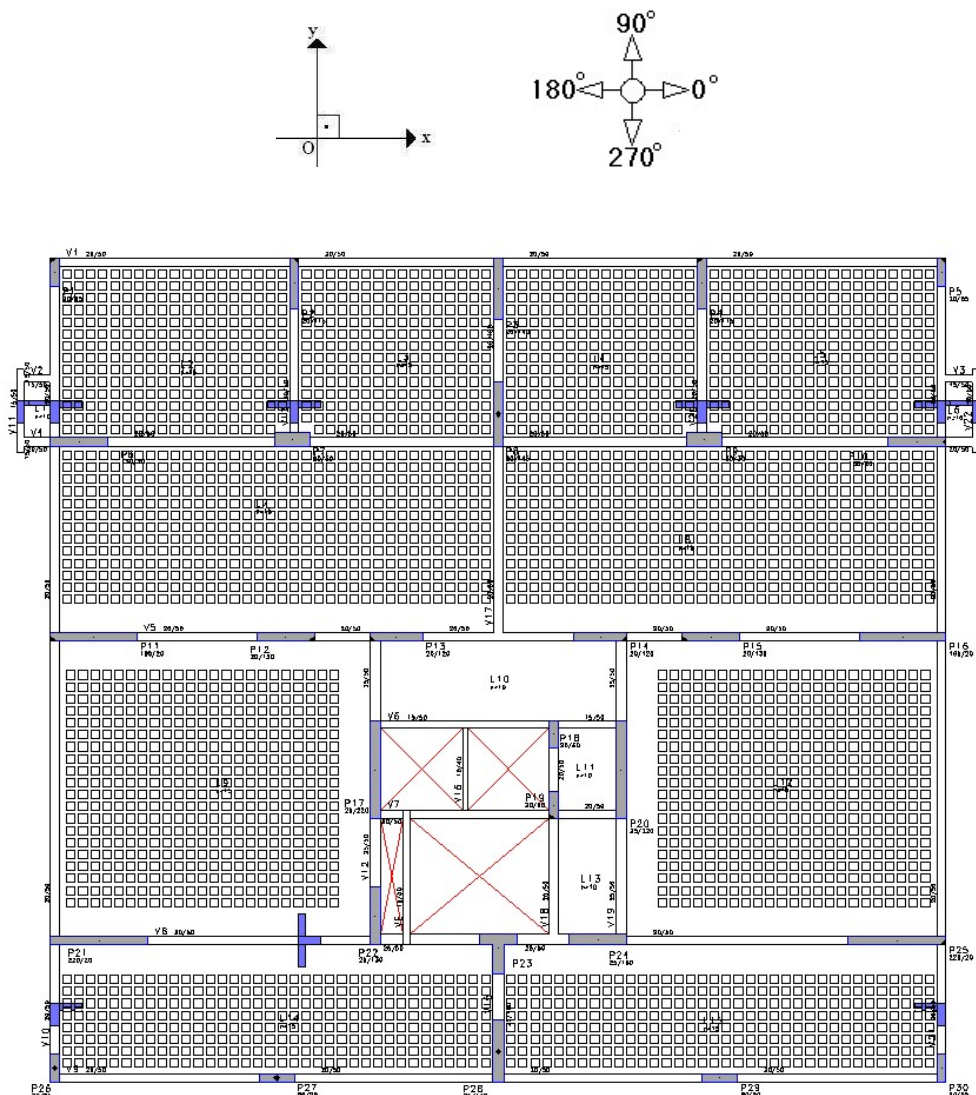


Figura 39. Forma da estrutura pavimento tipo, modelo 2.

4.2.1 CARGAS VERTICAIS ADOTADAS

PERMANENTES

- Peso próprio da estrutura: $\gamma_c = 2,5 \text{ tf/m}^3$.
- Revestimento (piso + forro): 150 kgf/m^2 .
- Alvenaria de blocos espessura 20cm: 320 kgf/m^2 .
- Camada de impermeabilização: 200 kgf/m^2 .
- EPS: $\gamma = 0,03 \text{ tf/m}^3$.
- Cobertura e respectiva estrutura metálica: 100 kgf/m^2 .

ACIDENTAIS

- Considerada predominante na estrutura, a carga acidental de 150 kgf/m², visando atender à NBR 6120 – ABNT, 1980 “Cargas para o Cálculo de Estruturas”.
- Nas demais cargas, foram contempladas as específicas para cada uso.

4.2.2 MODOS DE VIBRAÇÃO DA ESTRUTURA

A estrutura possui 10 modos de vibração indicados nas figuras 40 a 48, sequenciados em planta no pavimento tipo e perspectiva.

Para o modelo II, com o pavimento tipo muito próximo de uma simetria, observa-se as torções em relação ao núcleo central do edifício.

Tabela 4.7. Modos de vibração da estrutura modelo II.

Modos de Vibração	Período (s)	Frequência (Hz)	Frequência (rad/s)
1	4,464	0,224	1,407
2	3,743	0,267	1,679
3	3,449	0,29	1,822
4	1,397	0,716	4,498
5	1,086	0,921	5,786
6	1,056	0,947	5,95
7	0,849	1,178	7,404
8	0,628	1,592	10,003
9	0,605	1,652	10,383
10	0,567	1,763	11,078

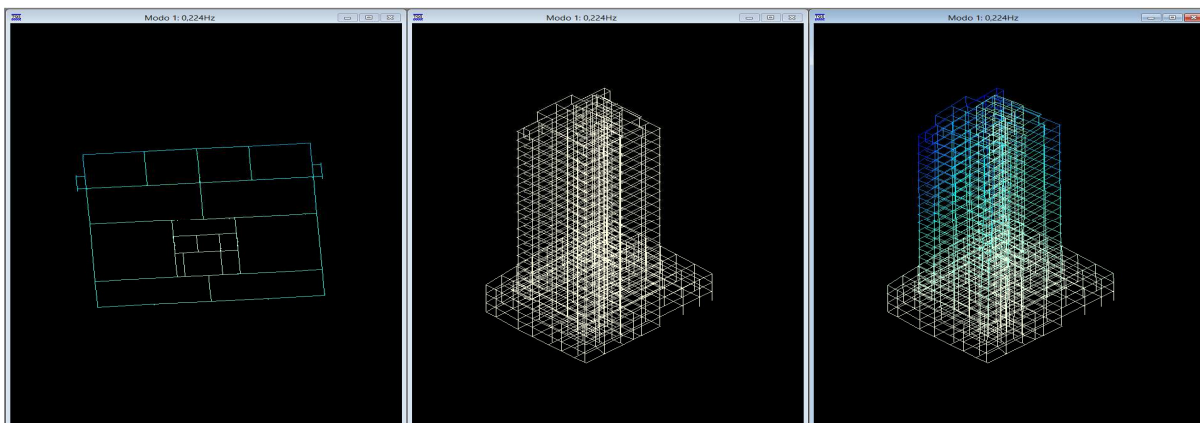


Figura 40. Modo de vibração 1 – Frequência fundamental de 0,224Hz.

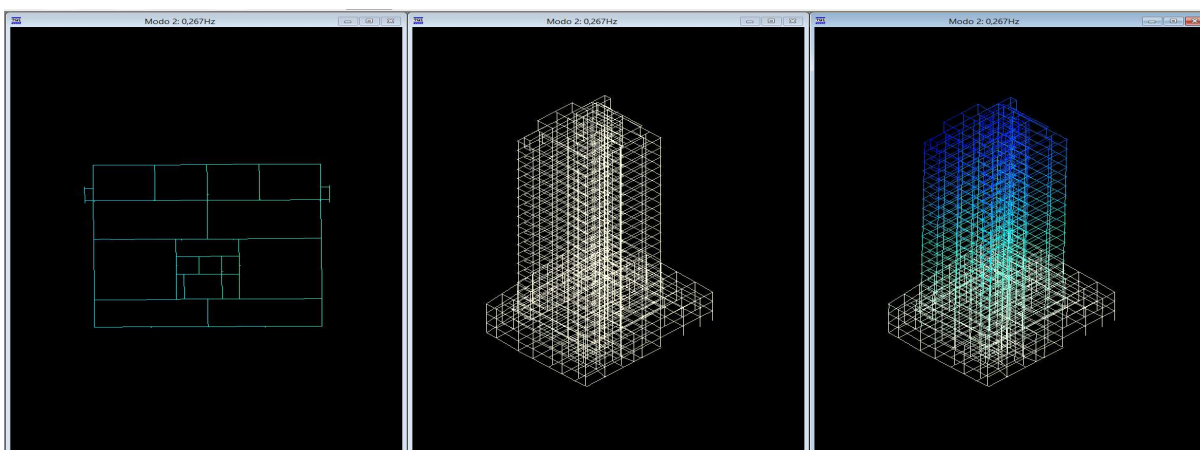


Figura 41. Modo de vibração 2 – Frequência fundamental de 0,267Hz.

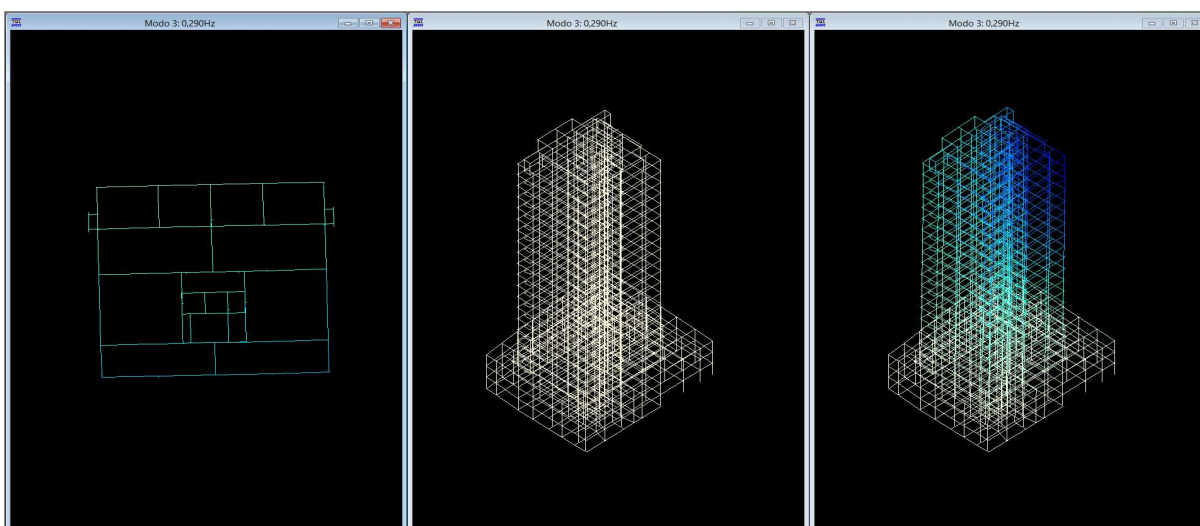


Figura 42. Modo de vibração 3 – Frequência fundamental de 0,290Hz.

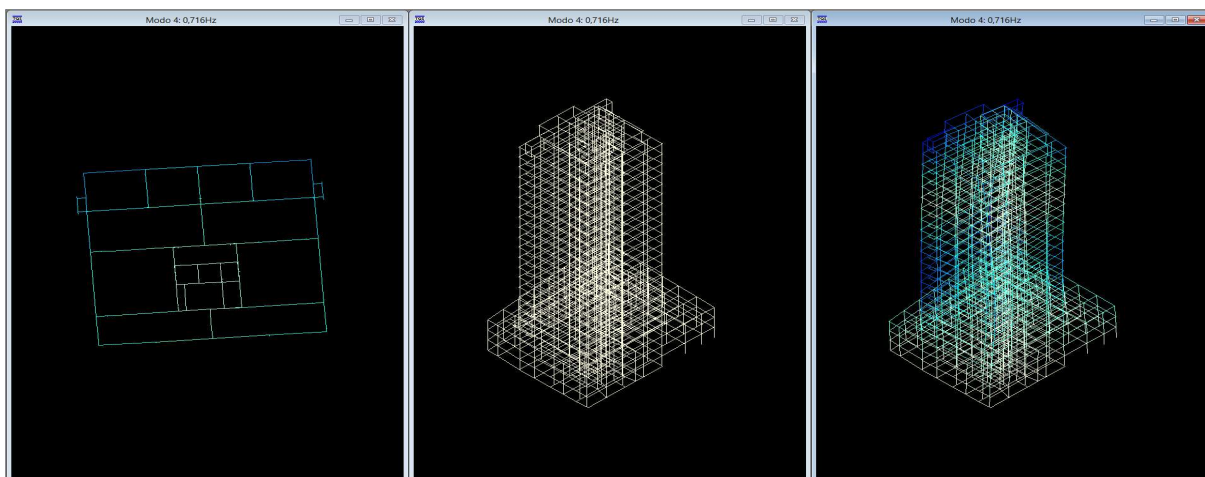


Figura 43. Modo de vibração 4 – Frequência fundamental de 0,716Hz.

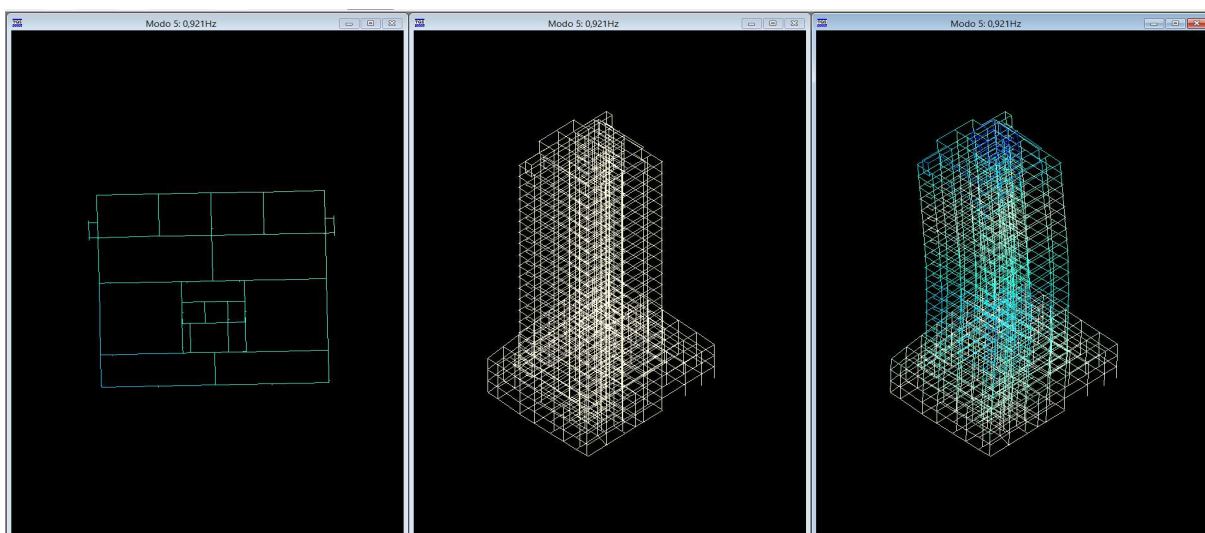


Figura 44. Modo de vibração 5 – Frequência fundamental de 0,9216Hz.

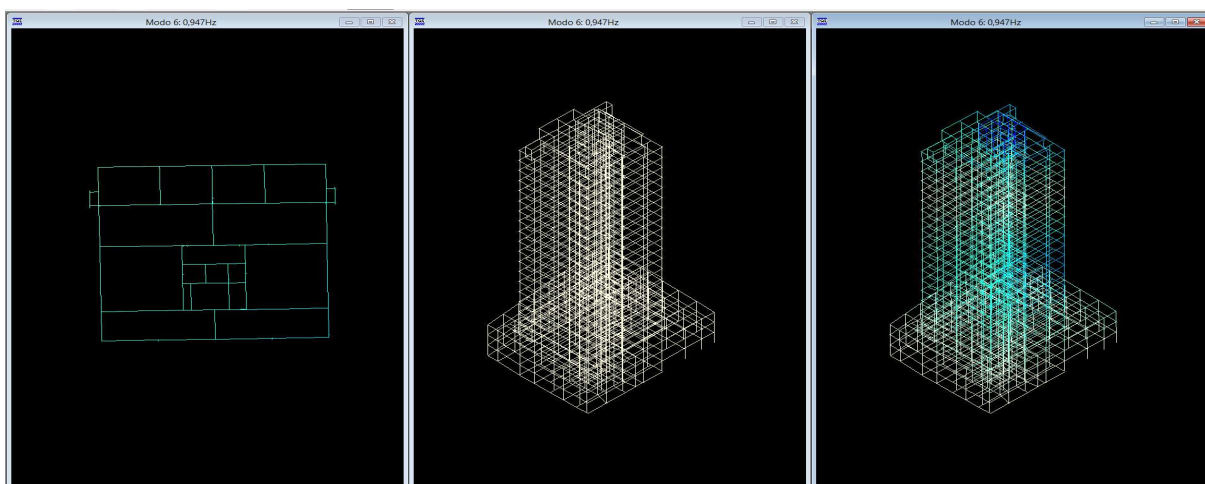


Figura 45. Modo de vibração 6 – Frequência fundamental de 0,947Hz.

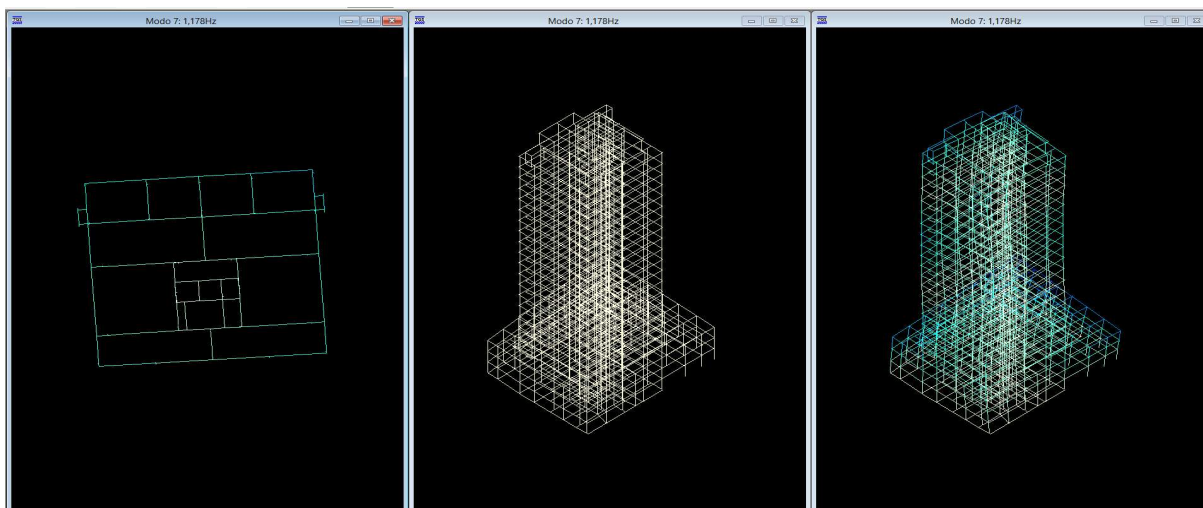


Figura 46. Modo de vibração 7 – Frequência fundamental de 1,178Hz.

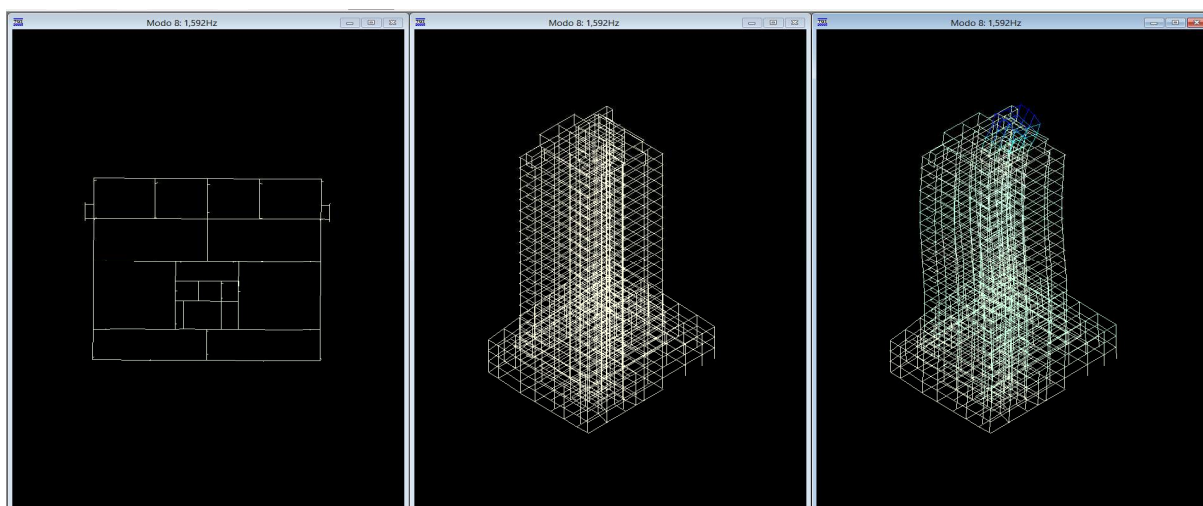


Figura 47. Modo de vibração 8 – Frequência fundamental de 1,592Hz.

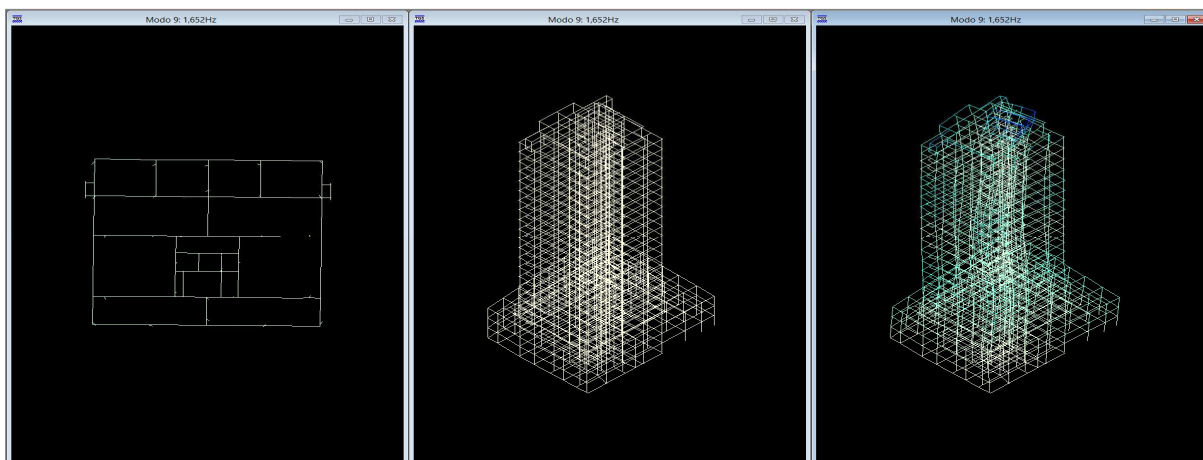


Figura 48. Modo de vibração 9 – Frequência fundamental de 1,652Hz.

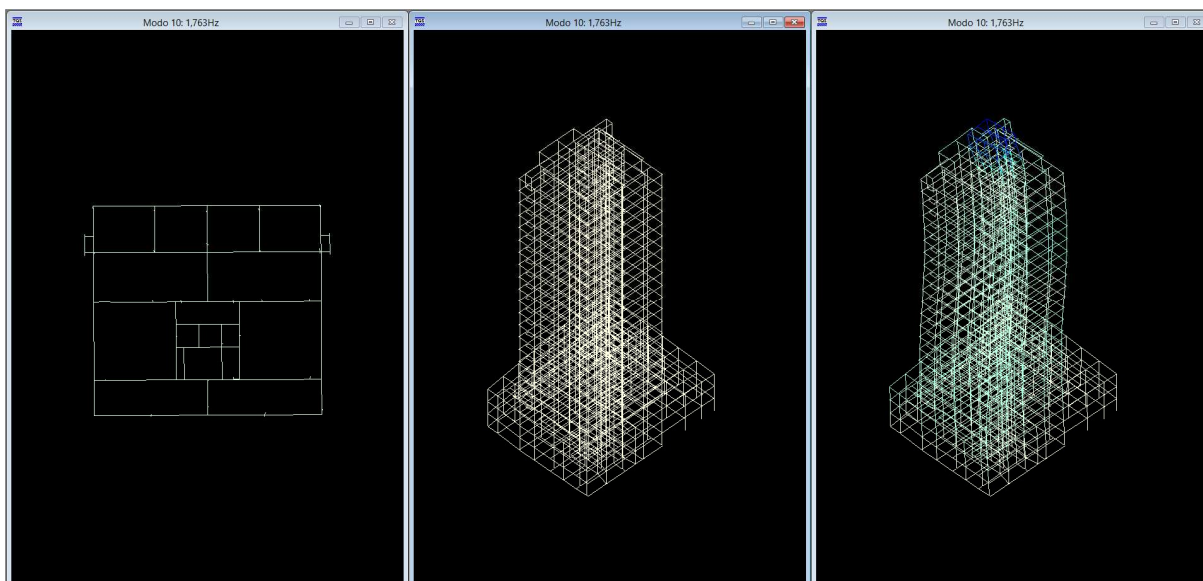


Figura 49. Modo de vibração 10 – Frequência fundamental de 1,763Hz.

O centro de carga da estrutura para o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) foi definido através da tentativa e erro, com o carregamento de vento incidente perpendicular às faces do edifício.

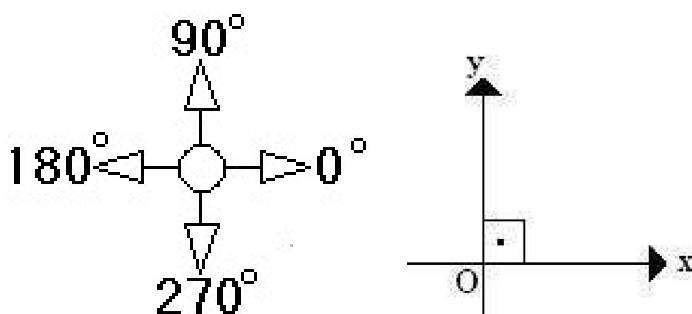


Figura 50. Ângulo de Incidência do Vento.

Sabe-se que o ponto de maior deslocamento, para o modelo II, encontra-se no topo do edifício. Com a utilização da ferramenta computacional define-se o centro de carga em cada pavimento e verifica-se a deformação no nó especificado.

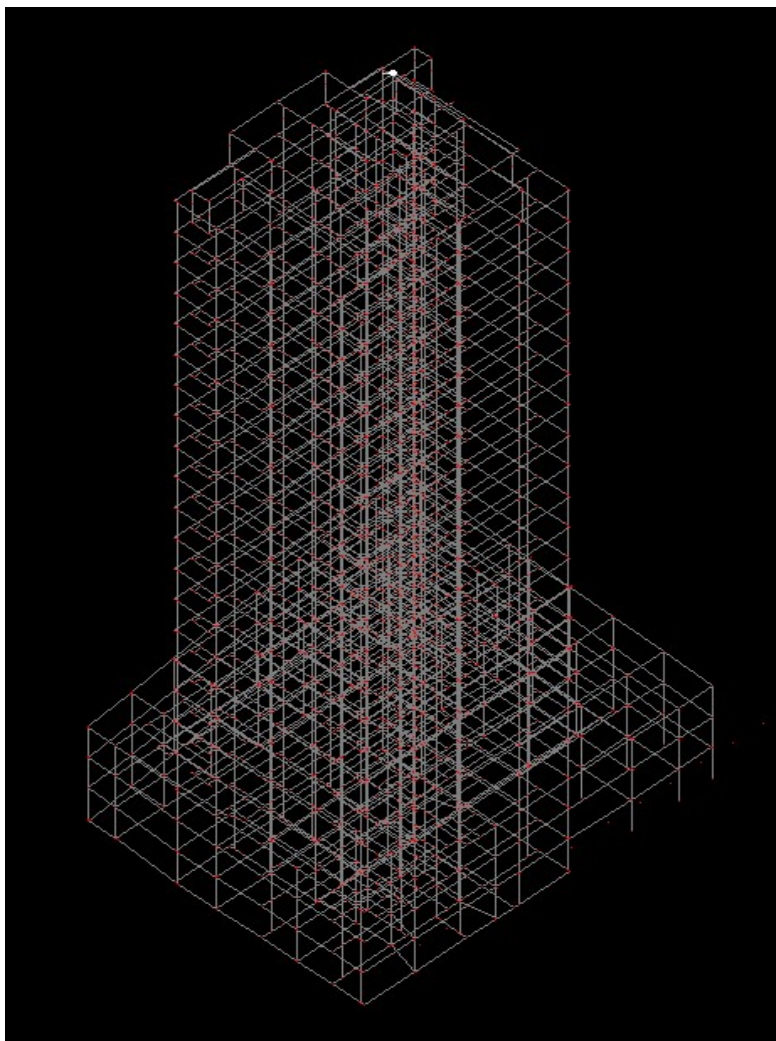


Figura 51. Pórtico com a indicação do ponto com maior deslocamento no modelo II.

4.2.3 ANÁLISE ESTÁTICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO MÉTODO DISCRETO NBR 6123 (ABNT, 1988) PARA O MODELO II

A carga do carregamento de vento gerado com a NBR 6123 (ABNT, 1988) para o Método Discreto incidiu a 0° , 90° , 180° e 270° .

Assim, serão analisados os deslocamentos, acelerações, esforços normais e momentos fletores.

O caso de vento a 0° e 180° é a situação na qual o vento incide no sentido do eixo X do sistema de eixos definido na Figura 45 e o caso de vento 90° e 270° atuando no sentido do eixo Y do referido sistema de eixos da Figura 45.

Utilizando as equações descritas no Capítulo 3 deste trabalho, com o auxílio da ferramenta computacional Mathcad, foram determinadas as duas parcelas de carregamento do vento. A parcela média e a parcela flutuante, que somadas

produzem um carregamento a ser aplicado na estrutura de forma estática de acordo com o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), conforme ilustrado na Tabela 4.9, para o caso de vento atuando a 90° e 270° e a área de incidência total para o ângulo de 0° e 180° é 1.271m^2 e para 90° e 270° é 1.462m^2 .

Esse carregamento foi então aplicado de forma estática à estrutura, atribuindo cada parcela ao seu respectivo pavimento, onde foi dividido pela quantidade de nós do pavimento para que pudesse atuar de forma uniforme na estrutura.

Tabela 4.8. Carregamento do vento – modelo II – direção 0° e 180° – Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988).

MODELO II - 0° E 180°					
i	Zi (m)	Ai (m ²)	X_i (tf)	\overline{X}_i média (tf)	\widehat{X}_i flut (tf)
1	1	86,94	1,82	1,46	0,36
2	2,75	86,94	1,76	1,45	0,31
3	5	86,94	1,54	1,43	0,10
4	7,69	50	1,94	1,42	0,52
5	10,39	50	1,60	1,41	0,18
6	13,09	50	6,78	5,84	0,94
7	15,79	50	6,61	5,75	0,86
8	18,49	50	6,46	5,66	0,80
9	21,19	50	6,30	5,57	0,73
10	23,89	50	6,14	5,47	0,66
11	26,59	50	5,98	5,38	0,60
12	29,29	50	5,81	5,27	0,54
13	31,99	50	5,65	5,16	0,49
14	34,69	50	5,48	5,05	0,43
15	37,39	50	5,30	4,93	0,38
16	40,09	50	5,13	4,80	0,33
17	42,79	50	4,94	4,66	0,28
18	45,49	50	4,75	4,51	0,24
19	48,19	50	4,55	4,35	0,20
20	50,89	50	4,34	4,18	0,16
21	53,59	50	4,11	3,99	0,12
22	56,29	50	3,86	3,77	0,09
23	58,09	12	3,58	3,52	0,06
24	59,17	12	3,26	3,21	0,05
25	60,79	12	4,96	4,91	0,05
26	62,79	12	4,12	4,10	0,02
27	64,99	12	3,06	3,03	0,03

Tabela 4.9. Carregamento do vento – modelo II – direção 90° e 270° – Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988).

MODELO II - 90° E 270°					
i	Zi (m)	Ai (m ²)	X_i (tf)	\overline{X}_i média (tf)	\widehat{X}_i flut (tf)
1	1	97	1,61	1,20	0,41
2	2,75	97	1,53	1,19	0,34
3	5	97	1,29	1,18	0,11
4	7,69	59	1,74	1,17	0,58
5	10,39	59	1,36	1,16	0,20
6	13,09	59	7,84	6,78	1,05
7	15,79	59	7,65	6,69	0,96
8	18,49	59	7,47	6,58	0,88
9	21,19	59	7,29	6,48	0,81
10	23,89	59	7,10	6,36	0,74
11	26,59	59	6,92	6,25	0,67
12	29,29	59	6,73	6,13	0,60
13	31,99	59	6,54	6,00	0,54
14	34,69	59	6,35	5,87	0,48
15	37,39	59	6,15	5,73	0,42
16	40,09	59	5,94	5,58	0,37
17	42,79	59	5,73	5,42	0,31
18	45,49	59	5,51	5,25	0,26
19	48,19	59	5,28	5,06	0,22
20	50,89	59	5,03	4,86	0,18
21	53,59	59	4,77	4,63	0,14
22	56,29	59	4,48	4,38	0,10
23	58,09	10	4,16	4,09	0,07
24	59,17	10	3,78	3,73	0,05
25	60,79	10	5,45	5,40	0,06
26	62,79	10	4,53	4,51	0,02
27	64,99	10	3,37	3,33	0,04

Observa-se que na Tabela e na Figura 45, onde o vento que atua na estrutura a um ângulo de 90° e 270°, ocorre o máximo deslocamento e aceleração no ponto mais alto da estrutura. Esta condição é considerada como situação de projeto para a estrutura e, portanto, os esforços do modelo estrutural são utilizados para análise dos deslocamentos e acelerações da estrutura.

Os elementos estruturais escolhidos para a análise são os pilares P1, P2, P12, P17 e P23 do pavimento tipo, da Tabela 5.8 a 5.12, onde são apresentados os esforços normais e momentos fletores.

4.2.4 ANÁLISE DINÂMICA DO EDIFÍCIO – CARREGAMENTO GERADO PELO MÉTODO DO VENTO SINTÉTICO

Com o objetivo de representar o vento com outras ponderações de características dinâmicas, utilizou-se o Método do Vento Sintético (FRANCO,1993) como modelo matemático para geração deste carregamento, admite-se que esse método é composto por uma parcela média e uma parcela flutuante.

A parcela média, como especificado no Capítulo 3 para o método do vento sintético, possui 11 funções harmônicas e a faixa de frequência escolhida para decomposição do espectro de Davenport foi de 0,224 Hz até 1,763 Hz.

Em cada ângulo de incidência são geradas 20 séries temporais de carregamento e em cada série composta por 12 harmônicos, com um ângulo de fase gerado aleatoriamente.

A parcela flutuante é função da superposição de várias funções harmônicas, sendo necessário carregar a estrutura para cada instante de tempo, em que para todos os modos de vibração o tempo total de análise foi de 600 segundos e a divisão dos períodos foi de 60 segundos.

Para o carregamento da parcela flutuante faz-se necessário definir para cada pavimento o centro de rajada e obter o máximo deslocamento da estrutura, dessa forma, através da Tabela 4.10 verifica-se que o centro de rajada se encontra para o modelo II, no 18º pavimento para a cota 50,89.

Desta maneira, os elementos de pilares escolhidos, citados no item 4.2.3 são apresentados através de esforços normais e momentos fletores nas Tabelas 5.8 a 5.12.

Tabela 4.10. Deslocamento do ponto mais alto para o modelo II da estrutura

Definição do Centro de Rajada			
Pavimento	Cota	Deslocamento no eixo X	Deslocamento no eixo Y
Teto Caixa Água	64,99	1,31	2,73
Caixa d` Água	62,79	1,42	3,94
Barrilete	60,79	1,478	5,32
Teto do Ático	59,17	1,57	5,98
Casa de Máquinas	58,09	1,84	6,57
Cobertura	56,29	1,913	7,19
19º Pavimento	53,59	1,9	7,8
18º Pavimento	50,89	1,95	7,85
17º Pavimento	48,19	1,92	7,43
16º Pavimento	45,49	1,73	7,46
15º Pavimento	42,79	1,65	7,24
14º Pavimento	40,09	1,74	6,21
13º Pavimento	37,39	1,65	6,11
12º Pavimento	34,69	1,45	5,31
11º Pavimento	31,99	1,49	4,72
10º Pavimento	29,29	1,27	3,92
9º Pavimento	26,59	1,33	3,41
8º Pavimento	23,89	1,24	2,96
7º Pavimento	21,19	1,091	2,6
6º Pavimento	18,49	0,236	2,061
5º Pavimento	15,79	0,19	1,5
4º Pavimento	13,09	0,173	1,145
3º Pavimento	100,4	0,15	0,65
2º Pavimento	7,69	0,1	0,228
Térreo	4,45	0,08	0,015
1º Subsolo	1,75		
2º Subsolo	-0,95		
3º Subsolo	-3,75		

Após definido o centro da rajada, todas as análises de deformação, velocidade e aceleração serão efetuadas para o 18º pavimento na cota 50,89m.

4.2.5 DESLOCAMENTO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO II DA ESTRUTURA

O deslocamento ao longo do eixo y no topo da edificação é de 1,03cm e está indicado na Tabela 5.7

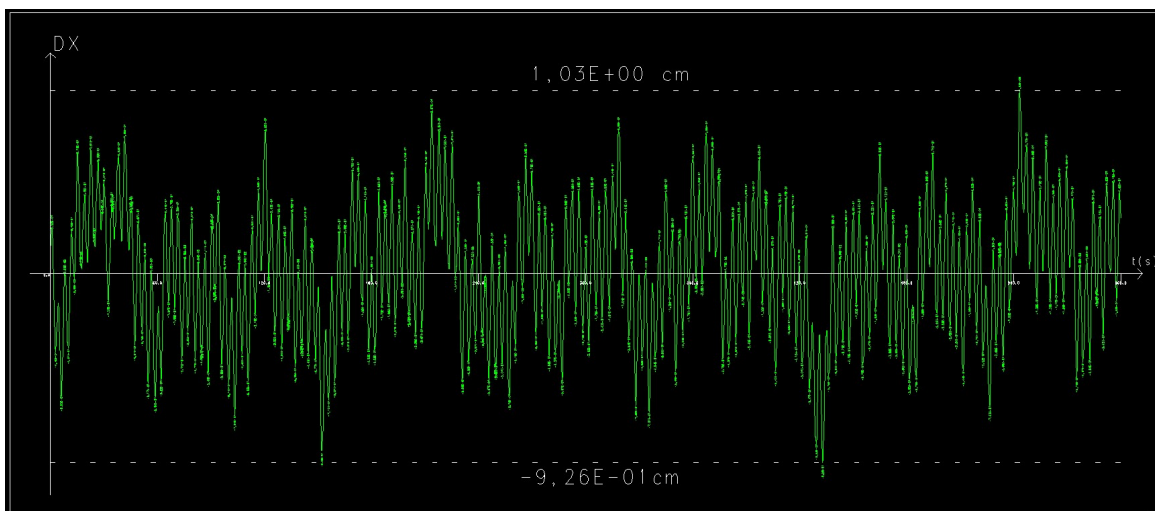


Figura 52. Deslocamento do vento incidência 90° e 270°, deslocamento em y.

O maior deslocamento para o modelo adotado com o cálculo do Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) ocorre ao longo do eixo x no topo da edificação e é de 4,22cm e está compilado na Tabela 5.7.

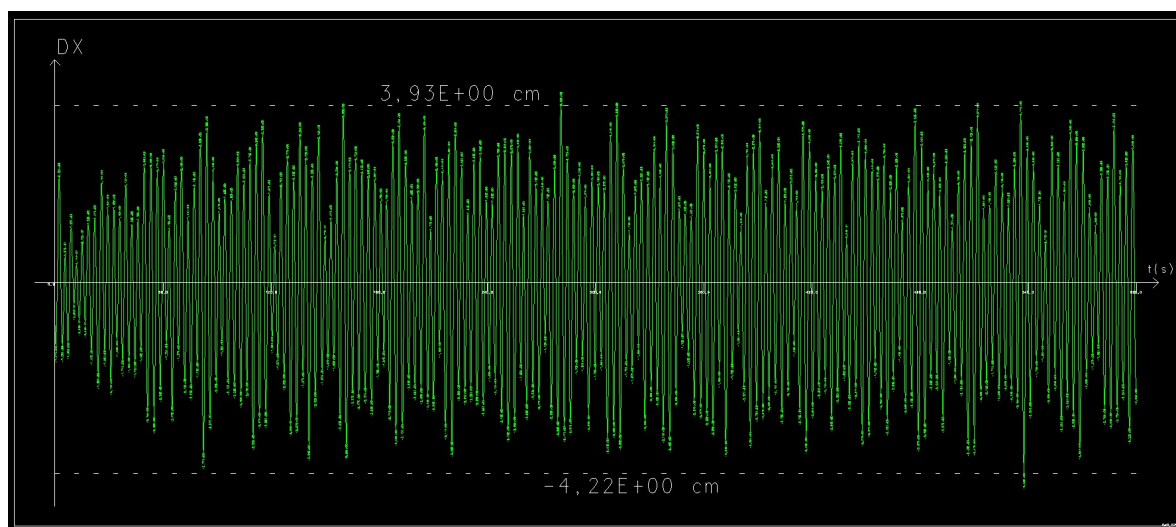


Figura 53. Deslocamento do vento incidência 0° e 180°, deslocamento em x.

4.2.1 ACELERAÇÃO NO PONTO MAIS ALTO PARA O MODELO II DA ESTRUTURA

A aceleração no ponto mais alto ao longo do eixo y é de 0,114cm, computado na Tabela 5.7.

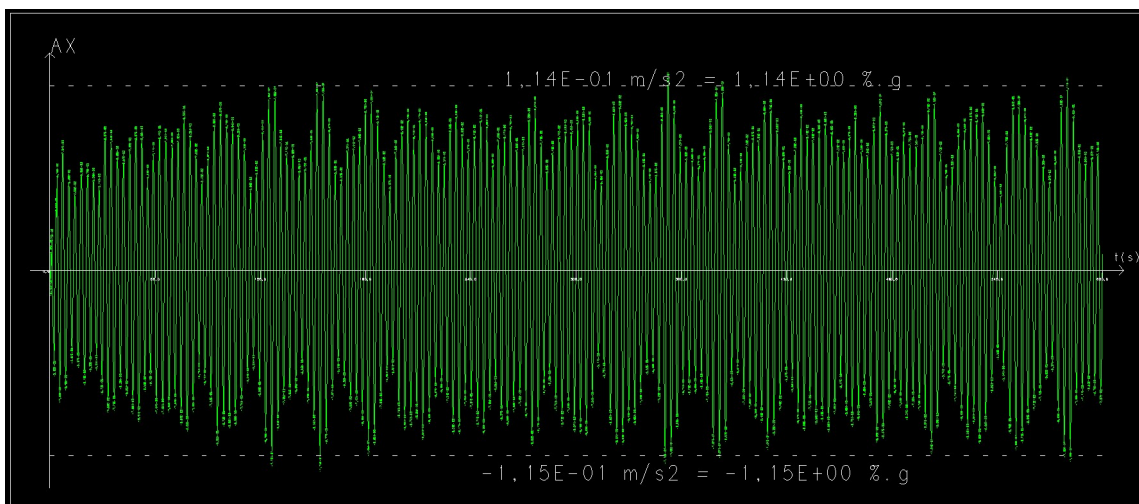


Figura 54. Aceleração do vento incidência 90° e 270°, deslocamento em y.

E a aceleração para o ponto mais alto no eixo x é de 0,029cm considerado na Tabela 5.7

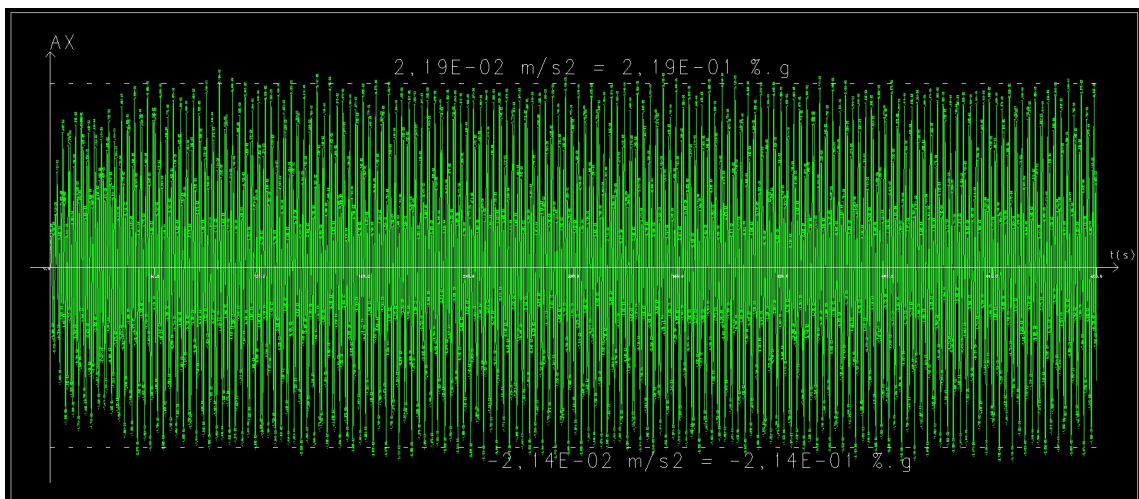


Figura 55. Aceleração do vento incidência 0° e 180°, deslocamento em x.

5 RESULTADOS

Na análise dos resultados observa-se as diferenças do Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) e do Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), diferenças essas em deslocamento, aceleração, momentos fletores e esforços normais.

A convenção em deslocamento e aceleração seguem o plano cartesiano X e Y representados nas figuras 20 e 39 do Capítulo 4 e para os momentos fletores os esforços ocorrem em torno dos eixos X e Y.

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA O MODELO I

Observando a Figura 20 do Capítulo 4 e seguindo suas convenções no plano cartesiano serão feitas as análises de aceleração, esforços e deslocamentos para os pilares escolhidos P1, P6, P8, P17 e P19.

O motivo da escolha desses pilares foi devido ao fato de 4 deles serem pilares de contorno; no caso do pilar P1 existe uma rigidez nas duas direções e o pilar P6 e P17 estarem mais afastados do núcleo de rigidez da estrutura.

A escolha do pilar P8 foi por ser o pilar que mais contribuirá para o impedimento do deslocamento da edificação e fazer parte do núcleo rígido da estrutura. Por último, o pilar P19 foi escolhido pelo fato de estar em uma região com transição de forma na composição geométrica de quem olha em planta a edificação, Figura 2 do Capítulo 4. Para a escolha dos elementos pode-se utilizar como base a análise de deslocamentos apresentados nas Figuras 21 a 30 do Capítulo 4.

Com a situação do vento indicado nas duas direções, verificou-se os esforços solicitantes desses 5 pilares distintos (P1, P6, P5, P17 e P19) pertencentes ao pavimento tipo, para o procedimento do Método do Vento Sintético e Método Discreto NBR 6123 prescrito na norma. As Tabelas 5.2 a 5.6 ilustram valores de máximos momentos fletores e esforços normais dos pilares, onde para a comparação são estabelecidos valores em porcentagem. Para os valores positivos configuram-se situações em que os esforços são maiores para o Método do Vento Sintético.

Para o modelo I, verificou-se que a pior situação de deslocamento e aceleração para a estrutura é a direção 90° e 270° (ver Figura 31), sendo a variação

da componente dos deslocamentos na direção do eixo y no topo do edifício, de acordo com a Tabela 5.1. Comparando com os deslocamentos causados pelo vento da NBR6123 (ABNT,1988), o deslocamento obtido é de aproximadamente 2 vezes maior que o deslocamento obtido pelo Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993).

Dessa maneira observa-se nas Tabelas 5.3 a 5.6 pequenas variações tanto no acréscimo quanto no decréscimo das cargas verticais, variações estas de no máximo 8% para mais e para menos. Ao comparar os momentos fletores dos dois métodos, observa-se que esses esforços na direção X são predominantemente maiores para o Método do Vento Sintético, chegando a 72% a mais que a diferença dos valores obtidos com a norma, enquanto que na direção Y os valores chegam a ter resultados maiores e ou menores para o mesmo pilar, com valores de 50% a menos ou a mais que o prescrito em norma.

Assim, para esse modelo estudado pode-se afirmar a necessidade de se efetuar uma análise do Método do Vento Sintético e uma análise do Método Discreto NBR 6123, para se apresentar valores que atendam todas as solicitações impostas para a estrutura.

Tabela 5.1. Deslocamento e aceleração no ponto mais alto na estrutura do modelo I

MODELO I	MÉTODO DISCRETO	VENTO SINTÉTICO
DESLOCAMENTO Y (cm)	7,68	11,63
DESLOCAMENTO X (cm)	2,62	5,65
ACELERAÇÃO Y (m/s^2)	0,32	0,46
ACELERAÇÃO X (m/s^2)	0,066	0,3

Tabela 5.2. Esforços para o pilar P1 do modelo I.

LANÇE	PILAR P1						PILAR P1		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
35	26,0	0,6	0,0	25,0	0,7	0,2	4,0	-9,2	-91,3
34	27,0	0,4	0,6	28,0	0,5	0,7	-3,6	-11,1	-14,9
33	29,0	2,6	0,9	28,9	4,0	0,7	0,3	-36,4	38,2
32	47,0	4,8	1,5	45,0	6,1	1,4	4,4	-20,8	2,1
31	86,0	10,7	1,0	83,0	12,7	1,3	3,6	-15,7	-22,2
30	93,0	52,9	6,1	94,7	61,3	7,7	-1,8	-13,7	-21,7
29	117,0	30,3	2,2	118,0	35,6	2,0	-0,8	-14,9	10,7
28	139,0	26,8	1,4	141,0	29,3	2,0	-1,4	-8,5	-31,5
27	160,0	34,7	1,0	163,0	37,5	1,6	-1,8	-7,5	-36,0
26	182,0	41,4	1,3	185,0	44,5	2,3	-1,6	-7,0	-40,9
25	203,0	45,7	1,7	207,0	48,2	2,7	-1,9	-5,2	-37,4
24	225,0	48,3	2,0	229,0	49,5	3,0	-1,7	-2,4	-34,9
23	246,0	49,8	2,4	251,0	49,7	3,3	-2,0	0,2	-29,0
22	268,0	20,9	2,7	273,0	49,2	3,6	-1,8	-57,5	-26,5
21	290,0	51,4	3,0	295,0	48,0	3,9	-1,7	7,1	-24,7
20	311,0	51,3	3,2	317,0	46,2	4,2	-1,9	11,0	-23,0
19	333,0	50,6	3,5	339,0	43,8	5,5	-1,8	15,5	-36,6
18	354,0	49,3	3,8	361,0	40,6	4,8	-1,9	21,4	-21,5
17	376,0	47,6	4,1	383,0	36,9	5,1	-1,8	29,0	-20,1
16	398,0	45,1	4,4	405,0	32,8	5,4	-1,7	37,5	-18,5
15	420,0	42,4	4,7	427,0	40,0	5,6	-1,6	6,0	-16,7
14	441,0	38,9	5,0	448,0	35,2	5,8	-1,6	11,1	-13,8
13	462,0	34,6	5,4	470,0	32,5	6,0	-1,7	6,5	-10,0
12	484,0	30,1	5,7	491,0	42,4	6,2	-1,4	-29,0	-8,1
11	505,0	26,2	6,0	513,0	52,9	6,4	-1,6	-50,5	-5,5
10	527,0	31,1	6,6	535,0	60,6	6,9	-1,5	-48,7	-3,6
9	548,0	40,7	6,9	556,0	70,2	7,0	-1,4	-42,0	-0,9
8	569,0	54,3	7,2	577,0	83,4	7,2	-1,4	-34,9	-0,1
7	590,0	72,9	7,5	598,0	100,8	7,4	-1,3	-27,7	1,2
6	610,0	102,9	7,5	619,0	128,9	7,2	-1,5	-20,2	3,9
5	630,0	139,5	7,1	638,0	162,0	6,7	-1,3	-13,9	6,0
4	651,0	186,1	8,8	660,0	204,4	8,2	-1,4	-9,0	7,3
3	671,0	253,3	9,1	679,0	263,0	8,5	-1,2	-3,7	7,1
2	696,0	337,4	10,3	705,0	336,1	9,3	-1,3	0,4	10,8
1	715,0	485,1	13,3	724,0	471,2	11,7	-1,2	2,9	13,7

Tabela 5.3. Esforços para o pilar P6 do modelo I.

LANÇE	PILAR P6						PILAR P6		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
35									
34									
33									
32	6,0	1,1	3,4	5,0	1,1	4,7	20,0	0,0	-27,7
31	42,0	2,9	7,2	42,0	3,4	14,0	0,4	-14,7	-48,6
30	49,0	13,4	18,6	50,0	14,8	31,6	-2,0	-9,5	-41,1
29	79,0	4,6	14,9	80,0	5,1	23,8	-1,3	-9,8	-37,4
28	104,0	6,9	2,8	109,0	7,7	6,8	-4,6	-10,4	-58,8
27	131,0	5,8	14,6	137,0	6,5	12,3	-4,4	-10,8	18,7
26	158,0	6,2	24,3	166,0	6,9	22,6	-4,8	-10,0	7,5
25	185,0	6,3	29,8	195,0	7,0	28,6	-5,1	-10,0	4,2
24	212,0	6,4	33,8	223,0	7,1	32,4	-4,9	-9,9	4,3
23	239,0	6,5	37,1	253,0	7,2	35,2	-5,5	-9,7	5,4
22	267,0	6,6	39,8	282,0	7,3	37,1	-5,3	-9,6	7,3
21	296,0	6,7	41,9	312,0	7,4	38,2	-5,1	-9,5	9,7
20	323,0	6,9	43,4	342,0	7,4	38,5	-5,6	-6,8	12,7
19	351,0	6,9	44,1	372,0	7,5	38,0	-5,6	-8,0	16,1
18	381,0	6,9	44,3	403,0	7,5	36,9	-5,5	-8,0	20,1
17	410,0	6,9	43,8	433,0	7,5	35,0	-5,3	-8,0	25,1
16	439,0	7,0	42,8	464,0	7,5	32,4	-5,4	-6,7	32,1
15	469,0	7,0	41,0	496,0	7,5	29,4	-5,4	-6,7	39,3
14	499,0	7,0	38,6	527,0	7,4	26,1	-5,3	-5,4	47,7
13	529,0	7,0	35,2	559,0	7,3	22,0	-5,4	-4,1	60,0
12	559,0	7,0	30,7	590,0	7,2	20,5	-5,3	-2,8	49,8
11	590,0	6,9	26,3	621,0	7,2	29,0	-5,0	-4,2	-9,3
10	620,0	7,0	21,8	653,0	7,1	38,3	-5,1	-1,4	-43,1
9	651,0	6,9	25,4	685,0	7,1	49,0	-5,0	-2,8	-48,2
8	682,0	6,8	39,0	716,0	7,1	62,4	-4,7	-4,2	-37,5
7	713,0	6,7	56,6	747,0	7,1	79,2	-4,6	-5,6	-28,5
6	743,0	7,1	79,3	778,0	7,4	100,5	-4,5	-4,1	-21,1
5	773,0	5,4	103,8	808,0	5,3	123,1	-4,3	1,9	-15,7
4	807,0	9,9	122,8	842,0	9,9	138,5	-4,2	0,0	-11,3
3	852,0	11,5	104,8	887,0	11,4	115,9	-3,9	0,9	-9,6
2	881,0	12,4	137,9	916,0	11,9	141,9	-3,8	4,2	-2,8
1	910,0	13,9	177,0	944,0	13,0	175,2	-3,6	6,9	1,0

Tabela 5.4. Esforços para o pilar P8 do modelo I.

LANÇE	PILAR P8						PILAR P8		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
35									
34	30,0	0,5	1,5	31,0	1,0	1,7	-3,2	-50,0	-11,8
33	46,0	0,5	2,0	48,2	1,3	1,8	-4,6	-72,2	-56,5
32	53,0	0,6	2,0	55,0	1,5	2,1	-3,6	33,3	-42,9
31	173,0	30,5	44,0	174,0	35,2	49,4	-0,6	-13,4	-10,9
30	200,0	25,9	17,4	199,0	30,1	13,4	0,5	-14,0	29,5
29	223,0	7,4	12,4	221,0	8,9	23,0	0,9	-16,9	-46,1
28	252,0	4,0	22,0	248,0	4,9	24,3	1,6	-18,0	8,13
27	281,0	7,1	25,2	274,0	11,6	27,6	2,6	-38,8	-8,7
26	308,0	10,0	27,6	300,0	14,7	29,5	2,7	-32,0	-6,4
25	335,0	12,1	29,8	330,0	16,8	31,1	1,5	-28,0	-4,2
24	361,0	13,8	31,8	348,0	18,4	32,5	3,7	-25,0	-2,2
23	386,0	15,8	33,3	370,0	19,6	33,4	4,3	-19,4	-0,3
22	410,0	17,3	34,5	391,0	20,7	33,9	4,9	-16,4	1,8
21	432,0	18,5	35,6	411,0	21,7	33,8	5,1	-14,7	5,3
20	453,0	19,5	36,2	429,0	22,6	33,5	5,6	-13,7	8,1
19	473,0	20,5	36,4	446,0	23,5	32,4	6,1	-12,8	12,3
18	491,0	21,5	36,2	463,0	24,3	30,1	6,0	-11,5	20,3
17	509,0	22,4	35,7	478,0	25,1	29,0	6,5	-10,8	23,1
16	532,0	23,4	34,8	492,0	25,7	27,4	8,1	-8,9	27,0
15	538,0	24,3	33,5	504,0	25,9	26,3	6,7	-6,2	27,4
14	552,0	25,3	31,9	516,0	25,6	24,8	7,0	-1,2	28,6
13	563,0	26,4	29,1	525,0	25,5	29,5	7,2	3,5	-1,4
12	573,0	27,6	27,7	533,0	25,2	36,4	7,5	9,5	-23,9
11	581,0	27,9	26,8	540,0	24,3	45,5	7,6	14,8	-41,1
10	585,0	28,4	31,3	545,0	23,9	50,3	7,3	18,8	-37,8
9	586,0	30,5	39,7	549,0	25,5	58,5	6,7	19,6	-32,1
8	588,0	30,6	49,8	550,0	27,4	68,2	6,9	11,7	-27,0
7	590,0	24,9	62,8	551,0	31,5	80,4	7,1	-21,0	-21,9
6	592,0	35,0	76,9	552,0	41,3	92,9	7,2	-15,3	-17,2
5	594,0	36,8	105,6	553,0	41,9	119,8	7,4	-12,2	-11,9
4	596,0	44,1	141,2	554,0	46,4	152,3	7,6	-5,0	-7,3
3	598,0	71,6	155,9	556,0	71,4	162,7	7,6	0,3	-4,2
2	606,0	128,6	188,3	565,0	122,1	190,3	7,3	5,3	-1,1
1	617,0	203,8	262,5	582,0	188,0	258,2	6,0	8,4	1,7

Tabela 5.5. Esforços para o pilar P17 do modelo I.

LANÇE	PILAR P17						PILAR P17		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
35									
34									
33									
32									
31									
30	45	7,36	10,21	45	7,46	9,35	0,0	-1,3	9,2
29	72	16,82	14,16	75	16,58	12,67	-4,0	1,4	11,8
28	102	10,75	3,25	105	10,08	4,89	-2,9	6,6	-33,5
27	131	10,71	4,03	135	10,56	4,63	-3,0	1,4	-13,0
26	160	10,65	4,13	166	10,5	5,34	-3,6	1,4	-22,7
25	189	10,72	5,34	196	10,59	6,14	-3,6	1,2	-13,0
24	218	10,83	6,69	226	10,64	6,59	-3,5	1,8	1,5
23	247	10,87	7,61	256	10,73	6,78	-3,5	1,3	12,2
22	276	10,88	8,31	286	10,76	7,37	-3,5	1,1	12,8
21	304	10,88	8,77	316	10,76	8,07	-3,8	1,1	8,7
20	331	10,86	9,07	344	10,73	8,63	-3,8	1,2	5,1
19	359	10,83	9,22	373	10,71	9,06	-3,8	1,1	1,8
18	387	10,8	9,18	402	10,66	9,36	-3,7	1,3	-1,9
17	414	10,75	8,99	431	10,61	9,51	-3,9	1,3	-5,5
16	441	10,68	8,62	459	10,55	9,54	-3,9	1,2	-9,6
15	468	10,58	8,07	487	10,48	9,41	-3,9	1,0	-14,2
14	495	10,4	7,27	514	10,4	9,11	-3,7	0,0	-20,2
13	521	10,3	6,23	541	10,32	8,6	-3,7	-0,2	-27,6
12	548	10,15	6,6	568	10,29	7,8	-3,5	-1,4	-15,4
11	574	9,99	8,54	595	10,18	6,68	-3,5	-1,9	27,8
10	600	10,1	10,49	622	10,36	14,77	-3,5	-2,5	68,4
9	626	9,96	12,64	649	10,23	707	-3,5	-2,6	-98,2
8	652	9,86	15,08	675	10,06	9,53	-3,4	-2,0	58,2
7	678	10,05	17,83	702	9,82	12,66	-3,4	2,3	40,8
6	704	10,12	22,11	728	9,35	17,26	-3,3	8,2	28,1
5	731	9,88	26,63	755	9,7	24,4	-3,2	1,9	9,1
4	757	7,45	42,58	781	7,8	39,31	-3,1	-4,5	8,3
3	761	13,9	35,43	784	13,9	33,47	-2,9	0,0	5,9
2	795	20,2	36,34	818	20,5	35,53	-2,8	-1,5	2,3
1	830	15,95	43,94	853	16,9	44,35	-2,7	-5,6	-0,9

Tabela 5.6. Esforços para o pilar P19 do modelo I.

LANÇE	PILAR P19						PILAR P19		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
35									
34									
33									
32	36	13,67	12,51	35	13,15	11,6	2,9	4,0	7,8
31	39	5,73	4,38	38	5,66	6,93	2,6	1,2	-36,8
30	50	1,06	6,84	48	1,31	8,36	4,2	-19,1	-18,2
29	62	2,34	0,86	59	2,71	1,5	5,1	-13,7	-42,7
28	75	1,64	2,06	71	1,94	2,92	5,6	-15,5	-29,5
27	86	1,81	1,6	82	2,14	2,49	4,9	-15,4	-35,7
26	98	1,84	1,68	93	2,12	2,56	5,4	-13,2	-34,4
25	110	1,85	1,81	104	2,18	2,7	5,8	-15,1	-33,0
24	122	1,89	1,97	115	2,23	2,87	6,1	-15,2	-31,4
23	133	1,95	2,15	125	2,28	3,03	6,4	-14,5	-29,0
22	145	2,02	2,32	136	2,2	3,18	6,6	-8,2	-27,0
21	156	2,09	2,49	146	2,29	3,36	6,8	-8,7	-25,9
20	166	2,16	2,65	155	2,37	3,48	7,1	-8,9	-23,9
19	177	2,24	2,82	165	2,46	3,63	7,3	-8,9	-22,3
18	187	2,31	2,98	174	2,6	3,77	7,5	-11,2	-21,0
17	197	2,38	3,15	183	2,67	3,91	7,7	-10,9	-19,4
16	207	2,46	3,33	192	2,74	4,09	7,8	-10,2	-18,6
15	216	2,54	3,55	200	2,83	4,26	8,0	-10,2	-16,7
14	225	2,62	3,77	209	2,89	4,38	7,7	-9,3	-13,9
13	234	2,69	3,98	217	2,98	4,5	7,8	-9,7	-11,6
12	242	2,79	4,21	224	3,05	4,6	8,0	-8,5	-8,5
11	250	2,9	4,4	232	3,12	4,82	7,8	-7,1	-8,7
10	258	3,28	4,97	238	3,5	5,11	8,4	-6,3	-2,7
9	265	3,22	5,02	245	3,39	5,08	8,2	-5,0	-1,2
8	271	3,33	5,12	251	3,46	5,54	8,0	-3,8	-7,6
7	279	3,46	5,26	258	3,52	4,96	8,1	-1,7	6,0
6	284	3,34	6,18	264	3,41	4,86	7,6	-2,1	27,2
5	290	4,62	4,55	270	4,69	4,6	7,4	-1,5	-1,1
4	298	0,95	5,07	277	0,9	5,31	7,6	5,6	-4,5
3	302	7,9	6,89	282	7,5	6,88	7,1	5,3	0,1
2	331	21,1	29,4	310	19,9	28,5	6,8	6,0	3,2
1	353	13	5,11	333	11,8	5,14	6,0	10,2	-0,6

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA O MODELO II

Como já observado no modelo I e considerando as mesmas correlações de planos cartesianos para resultados de deslocamento, acelerações, esforços normais e fletores.

No caso do modelo II, os pilares escolhidos foram P1, P2, P12, P17 e P23, sendo que os pilares P1 e P2 são pilares periféricos e simétricos aos pilares P4 e P5; os pilares P12 e P17 são pilares centrais e simétricos aos pilares P15 e P20 e o pilar P23, por possuir rigidez nas duas direções e ser um pilar central sem nenhuma simetria a nenhum pilar.

Observando as Tabelas 5.7 a 5.12 pode-se reafirmar a necessidade de efetuar a análise pelo Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993) e o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988), pois para esse modelo os valores também foram superados em algumas hipóteses.

O maior deslocamento e aceleração ocorreu na direção Y para o Método do Vento Sintético, porém, para o deslocamento na direção X foi maior o caso do Método Discreto NBR 6123.

A variação da componente dos deslocamentos na direção Y no topo do edifício, de acordo com a Tabela 5.7, é comparada com os deslocamentos causados pelo vento da NBR6123 e é de aproximadamente 2,5 vezes do deslocamento obtido pelo Método do Vento Sintético.

Assim, observa-se nas Tabelas 5.8 a 5.12 pequenas variações tanto no acréscimo quanto no decréscimo das cargas verticais, variações estas em média de 10%. Ao comparar os momentos fletores dos dois métodos, observa-se que esses esforços na direção X e Y são predominantemente maiores para o Método do Vento Sintético, chegando a 175% de diferença dos valores obtidos com a norma.

Tabela 5.7. Deslocamento e aceleração no mais alto da estrutura do modelo II

MODELO II	MÉTODO DISCRETO	VENTO SINTÉTICO
DESLOCAMENTO Y (cm)	1,72	4,22
DESLOCAMENTO X (cm)	1,47	1,03
ACELERAÇÃO Y (m/s ²)	0,097	0,114
ACELERAÇÃO X (m/s ²)	0,034	0,029

Tabela 5.8. Esforços para o pilar P1 do modelo II.

LANÇE	PILAR P1						PILAR P1		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
27									
26									
25									
24									
23	11,0	0,8	0,7	10,0	0,5	1,4	10,0	63,3	-47,4
22	15,0	0,9	0,6	11,0	0,5	1,5	36,4	83,7	-58,7
21	19,0	0,8	0,4	12,0	0,5	0,8	58,3	63,3	-54,4
20	23,0	0,7	0,6	17,0	0,5	0,7	35,3	42,9	-9,1
19	25,0	0,8	0,7	24,0	0,5	0,5	4,2	66,7	36,5
18	33,0	0,8	0,8	30,0	0,5	0,4	10,0	70,2	115,4
17	40,0	0,8	1,0	36,0	0,5	0,3	11,1	73,9	265,4
16	47,0	0,9	1,1	43,0	0,5	0,5	9,3	100,0	107,5
15	55,0	1,1	1,2	48,0	0,4	0,6	14,6	155,8	87,5
14	62,0	1,2	1,4	57,0	0,4	0,8	8,8	185,7	77,9
13	70,0	1,1	1,4	63,0	0,4	0,9	11,1	175,0	61,8
12	78,0	0,8	1,5	70,0	0,4	1,0	11,4	105,1	54,0
11	86,0	0,9	1,6	78,0	0,4	1,1	10,3	143,2	40,4
10	95,0	0,8	1,8	85,0	0,4	1,3	11,8	122,2	40,0
9	103,0	1,2	2,0	93,0	0,4	1,5	10,8	200,0	34,5
8	111,0	1,1	2,0	100,0	0,4	1,5	11,0	205,6	30,3
7	119,0	0,8	2,0	108,0	0,4	1,6	10,2	122,2	23,5
6	128,0	0,9	2,9	116,0	0,3	2,3	10,3	164,7	26,1
5	137,0	0,8	1,7	124,0	0,3	1,5	10,5	220,0	14,9
4	153,0	1,2	0,9	141,0	0,2	0,8	8,5	566,7	8,4
3	173,0	2,1	2,0	160,0	1,0	1,8	8,1	121,1	14,3
2	191,0	1,9	2,0	177,0	1,7	1,6	7,9	14,5	25,8
1	209,0	2,5	4,0	193,0	1,2	2,3	8,3	108,3	73,9

Tabela 5.9. Esforços para o pilar P2 do modelo II.

LANÇE	PILAR P2						PILAR P2		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
27									
26									
25									
24									
23	16,0	0,7	0,3	16,0	0,4	0,3	0,0	85,0	-3,3
22	17,0	0,3	1,0	17,0	0,3	1,3	0,0	-3,2	-20,9
21	32,0	0,2	1,2	32,0	0,2	1,1	0,0	9,1	0,9
20	46,0	0,2	1,2	46,0	0,2	1,1	0,0	0,0	10,5
19	61,0	0,3	1,3	60,0	0,3	1,2	1,7	3,8	6,8
18	75,0	0,3	1,3	75,0	0,3	1,2	0,0	3,7	7,5
17	90,0	0,3	1,4	89,0	0,3	1,2	1,1	3,6	8,9
16	104,0	0,3	1,4	104,0	0,3	1,3	0,0	3,4	9,3
15	119,0	0,3	1,5	118,0	0,3	1,3	0,8	3,3	10,5
14	133,0	0,3	1,5	133,0	0,2	1,4	0,0	60,0	12,4
13	148,0	0,3	1,6	147,0	0,3	1,4	0,7	6,5	13,6
12	163,0	0,3	1,6	162,0	0,3	1,4	0,6	6,3	15,7
11	178,0	0,3	1,6	177,0	0,3	1,4	0,6	6,3	19,0
10	193,0	0,4	1,7	191,0	0,3	1,3	1,0	9,1	25,8
9	208,0	0,4	1,5	206,0	0,4	1,2	1,0	7,5	23,4
8	223,0	0,4	1,6	221,0	0,4	1,3	0,9	10,8	23,7
7	238,0	0,4	1,8	236,0	0,4	1,4	0,8	7,7	34,1
6	253,0	0,4	2,8	250,0	0,3	2,2	1,2	11,8	26,7
5	268,0	0,6	3,8	266,0	0,6	4,1	0,8	6,8	-6,9
4	294,0	0,9	9,4	291,0	1,0	10,0	1,0	-3,1	-5,7
3	330,0	2,8	22,9	326,0	2,7	22,4	1,2	0,4	2,2
2	355,0	1,6	3,2	351,0	1,6	2,5	1,1	2,6	27,4
1	380,0	1,0	11,6	375,0	0,9	10,9	1,3	10,5	6,4

Tabela 5.10. Esforços para o pilar P12 do modelo II.

LANÇE	PILAR P12						PILAR P12		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
27									
26									
25									
24	21,0	9,5	1,0	20,0	10,0	1,0	5,0	5,0	0,0
23	22,0	9,4	1,3	22,0	2,9	1,3	0,0	229,1	2,3
22	41,0	2,7	0,8	41,0	2,6	0,8	0,0	6,2	-2,6
21	56,0	3,4	0,2	56,0	2,8	0,1	0,0	20,4	36,4
20	72,0	4,1	0,1	72,0	3,7	0,1	0,0	9,7	-45,0
19	87,0	5,2	0,1	87,0	4,9	0,1	0,0	5,3	0,0
18	103,0	5,9	0,1	102,0	5,7	0,1	1,0	4,6	0,0
17	118,0	6,6	0,1	117,0	6,2	0,1	0,9	5,8	0,0
16	133,0	7,3	0,1	131,0	6,8	0,1	1,5	6,9	0,0
15	148,0	8,1	0,1	146,0	7,5	0,1	1,4	8,7	0,0
14	163,0	8,8	0,1	160,0	8,1	0,1	1,9	9,2	0,0
13	176,0	9,7	0,1	174,0	8,7	0,1	1,1	11,4	0,0
12	191,0	10,4	0,1	188,0	9,1	0,1	1,6	14,1	5,9
11	204,0	11,1	0,7	201,0	9,7	0,9	1,5	13,9	-21,3
10	217,0	11,7	0,9	215,0	10,1	0,8	0,9	15,1	11,3
9	229,0	12,7	0,1	237,0	10,9	0,1	-3,4	16,9	14,4
8	241,0	12,4	0,1	239,0	10,9	0,1	0,8	13,6	14,4
7	252,0	13,5	0,1	251,0	11,6	0,1	0,4	16,4	1,9
6	262,0	15,9	0,1	262,0	13,3	0,1	0,0	19,2	0,0
5	271,0	13,5	0,2	272,0	11,2	0,2	-0,4	20,5	17,6
4	281,0	30,2	0,3	282,0	25,0	0,2	-0,4	20,8	55,0
3	315,0	33,4	1,1	312,0	27,1	1,0	1,0	23,2	14,7
2	351,0	22,5	0,7	346,0	20,1	0,6	1,4	11,9	4,8
1	359,0	19,3	0,4	355,0	17,2	0,4	1,1	12,2	7,5

Tabela 5.11. Esforços para o pilar P17 do modelo II.

LANÇE	PILAR P17						PILAR P17		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
27									
26	19,0	0,7	0,8	24,0	0,5	0,9	-20,8	14,0	-11,1
25	27,0	0,7	0,9	26,0	0,6	0,5	-3,8	10,0	-18,0
24	31,0	0,6	0,7	30,0	0,6	0,4	3,3	10,0	-17,5
23	76,0	6,7	3,4	78,0	3,5	3,8	-2,6	91,4	-10,1
22	96,0	6,3	2,0	98,0	8,2	2,2	-2,0	-22,7	-12,2
21	117,0	14,5	2,0	118,0	13,7	1,9	-0,8	5,8	7,4
20	137,0	9,8	2,0	138,0	945,0	2,0	-0,7	-99,0	1,5
19	159,0	10,9	2,1	159,0	10,4	2,0	0,0	4,8	3,0
18	180,0	11,7	2,1	180,0	11,0	2,0	0,0	6,4	2,5
17	202,0	12,5	2,1	201,0	11,7	2,1	0,5	6,8	2,4
16	224,0	13,3	2,1	223,0	12,4	2,1	0,4	7,3	2,9
15	247,0	14,0	2,2	245,0	12,9	2,1	0,8	8,5	3,3
14	270,0	14,8	2,1	267,0	13,5	2,1	1,1	9,6	-0,5
13	293,0	15,5	2,2	291,0	13,9	2,2	0,7	11,5	3,7
12	317,0	15,9	2,3	314,0	14,1	2,2	1,0	12,8	4,1
11	341,0	16,1	2,3	337,0	14,0	2,2	1,2	15,0	2,3
10	365,0	16,0	2,3	360,0	13,7	2,2	1,4	16,8	4,6
9	390,0	15,8	2,4	384,0	13,3	2,2	1,6	18,8	5,8
8	414,0	16,5	2,3	409,0	13,8	2,2	1,2	19,6	5,0
7	439,0	19,1	2,4	433,0	14,9	2,3	1,4	28,1	4,3
6	464,0	21,3	2,4	458,0	16,3	2,2	1,3	30,7	9,1
5	490,0	21,8	3,1	483,0	17,8	2,9	1,4	22,5	6,2
4	518,0	35,1	1,4	510,0	29,5	1,4	1,6	19,0	2,2
3	540,0	42,4	1,0	531,0	37,7	0,9	1,7	12,5	3,2
2	566,0	46,5	0,4	557,0	42,7	0,4	1,6	8,9	-5,1
1	591,0	70,1	0,9	582,0	66,9	0,9	1,5	4,8	2,2

Tabela 5.12. Esforços para o pilar P23 do modelo II.

LANÇE	PILAR P23						PILAR P23		
	VENTO SINTÉTICO			MÉTODO DISCRETO			DIFERENÇA EM %		
	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N (tf)	MX (tf.m)	MY (tf.m)	N	MX	MY
27									
26									
25									
24									
23									
22	30,0	1,9	5,6	31,0	1,6	6,9	-3,2	20,0	-18,2
21	37,0	0,4	1,1	38,0	0,6	1,9	-2,6	-28,3	-40,5
20	45,0	1,7	1,2	46,0	1,2	1,7	-2,2	38,3	-32,4
19	53,0	2,0	0,8	55,0	1,5	0,9	-3,6	30,7	-11,1
18	65,0	2,4	2,1	66,0	1,9	1,6	-1,5	26,3	31,3
17	48,0	2,8	2,8	80,0	2,3	2,3	-40,0	21,7	22,6
16	91,0	3,2	3,6	93,0	2,7	3,0	-2,2	19,6	19,3
15	104,0	3,7	4,3	106,0	3,1	3,7	-1,9	19,4	16,2
14	116,0	4,1	5,2	119,0	3,5	4,5	-2,5	18,3	15,6
13	128,0	4,6	6,0	131,0	3,8	5,2	-2,3	21,1	15,4
12	140,0	4,0	6,8	143,0	4,2	5,8	-2,1	-4,0	17,2
11	152,0	5,5	7,7	156,0	4,5	6,4	-2,6	22,2	20,3
10	163,0	5,8	8,5	167,0	4,8	7,0	-2,4	20,8	21,4
9	175,0	6,7	10,2	176,0	5,4	8,2	-0,6	24,1	24,4
8	187,0	6,8	10,9	190,0	5,6	8,7	-1,6	21,4	25,3
7	199,0	7,1	12,0	202,0	5,8	9,5	-1,5	22,4	26,3
6	213,0	7,7	13,0	215,0	6,2	10,6	-0,9	24,2	22,6
5	227,0	7,2	13,9	229,0	5,7	11,7	-0,9	26,3	18,8
4	244,0	6,8	13,8	245,0	5,6	12,1	-0,4	21,4	14,0
3	262,0	5,5	12,8	263,0	4,8	11,8	-0,4	14,6	8,5
2	281,0	5,6	11,3	279,0	5,0	10,7	0,7	12,4	5,6
1	298,0	5,3	9,2	294,0	4,6	8,8	1,4	13,4	4,5

6 CONCLUSÕES

O estudo teve como proposta analisar o comportamento da estrutura de dois edifícios submetidos a carregamentos provenientes da ação do vento.

Os carregamentos gerados devido ao vento foram o Método Discreto NBR 6123 (ABNT, 1988) e o Método do Vento Sintético (FRANCO, 1993), procedimentos esses que sugerem a divisão de uma parcela de carga média e outra flutuante.

O modelo I, ao ser submetido ao carregamento com os esforços gerados devido ao Método Discreto NBR 6123, apresentou deformações e acelerações menores quando comparado com o modelo o Método do Vento Sintético.

Quanto aos esforços solicitantes da estrutura, o acréscimo de carga vertical na edificação não se apresentou substancial, porém, os momentos fletores tiveram em sua maioria uma redução nos valores ao serem submetidos ao Método do Vento Sintético, mostrando para este caso que a norma NBR 6123 foi conservadora.

O modelo II, ao ser submetido ao carregamento gerado com o Método Discreto NBR 6123, apresentou deformações e acelerações menores na direção X e maiores na direção Y, quando comparado ao o Método do Vento Sintético.

Dessa maneira, conclui-se que ambas as estruturas são bastante flexíveis por apresentarem frequências naturais baixas, entre 0,2Hz e 1 Hz, e em ambas as estruturas os deslocamentos foram maiores na direção Y, quando as estruturas foram excitadas pelo carregamento obtido com o Método do Vento Sintético. Logo, para a análise de deformações do topo da estrutura a norma vigente NBR 6123 apresenta resultados desfavoráveis quando comparadas com o Método do Vento Sintético.

Os esforços solicitantes normais, gerados pelo carregamento da NBR 6123 e pelo Método do Vento Sintético, apresentaram bastante semelhança e com decréscimo de carga vertical de 10% para o Método do Vento Sintético quando comparado com a NBR 6123, mostrando que a norma brasileira é mais conservadora.

Quanto aos momentos fletores, as duas edificações apresentaram resultados distintos quando comparando os métodos. Assim para esses dois modelos estudados temos uma indicação que o modelo I, por ser mais alto e esbelto que o modelo II, possui maiores solicitações de momentos fletores quando analisados com o Método do Vento Sintético proposto por Franco (1993), porém não

é uma regra geral quanto a deslocamentos. Sendo assim, tornam-se necessárias ambas as análises, de forma a cobrir-se todas as hipóteses existentes.

Para aprimoramento e como continuidade do estudo, propõe-se pontos a serem abordados.

- Avaliar a influência da vizinhança na ação das pressões sobre a estrutura.
- Analisar a influência da massa proveniente das alvenarias para as frequências fundamentais, deformações e acelerações na estrutura.
- Avaliar a geração de carregamento devido ao Método do Vento Sintético com um maior número de funções harmônicas e séries temporais.
- Efetuar a comparação com resultados provenientes de carregamentos gerados por normas internacionais de vento.
- Analisar as mesmas estruturas com mais ângulos de incidência de vento.
- Investigar mais torres com diferentes frequências fundamentais para confirmar uma relação de esbeltez e deslocamento maiores para o Método do Vento Sintético.
- Considerar o Método do Vento Sintético para o dimensionamento da torre e a avaliação das deformações.

7 REFERÊNCIAS

ABNT: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

BILAH, K. Yusuf, and Robert H. Scanlan. **Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbook.** Am. J. Phys 59.2 (1991): 118-124.

BOLINA, C. C; PALECHOR, E. U. L; VÁSQUEZ, M. P. R; NICACIO, W. G; GUTIERRES, M. P. D; LOPEZ, A. A. O.; **Vibrações: As Frequências Naturais Estimada e Experimental de uma Estrutura.** CNMAI – Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, 9 (2014), 2014.

CAD/TQS, Versão 17.1: **Sistema Computacional de Engenharia Estrutural para análise e dimensionamento de estruturas em concreto armado.** Tqs Informática, 2013. Download do manual em: <http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/2-geral/37-aprendendo-com-os-manuais-do-tqs>

CARPEGGANI, E. A. **Determinação dos efeitos estatísticos de torção em edifícios altos devido à ação do vento,** 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CARRIL JR., C. F. **Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações.** 2000. 143. F. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CHÀVEZ, E. S. **Análise Estrutural de Edifício Alto Submetido às Pressões de Flutuantes Induzidas pela Ação do Vento.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.

CHEN, X. KAREEM, A. **Equivalent static Wind loads of buildings: New Model**, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, nº. 10, 2005.

CUNHA J., B. F. R. D. **Contribuição ao Estudo dos Efeitos do Vento em Edifícios Altos: Estudo de Casona Cidade de Goiânia**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2012.

DAVENPORT, A. G.; ISYUMOV, N. The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading. In: **Proceedings of the Internacional Research Seminar: Wind Effects on Building and Structures**. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1. p. 201-230. 1967.

DE SOUZA, Filipe Moraes et al. **Metodologia de calibração de sistemas de pressão em túneis de vento**. 2010

DIAS, Ricardo Henrique. **Importância e interferências da concepção dos subsistemas verticais em edifícios altos na arquitetura**. São Paulo, Brasil. 2010.

FANG, J. Q.; LI, Q. S.; LIU D. K.; JEARY. A. P.; Wong, C. K.; **Wind effects on a very tall building and wavelet analysis**, Proceeding sof the Institution of Civil Engineers, p. 151-159, 2000.

FRANCO, M. Direct along wind dynamic analysis of tall structures. **Boletim técnico**, São Paulo, EPUSP, BT/PEF/9303, 1993.

LAZANHA, E. C.; **Análise Dinâmica Elasto-plástica de Estruturas Metálicas sob Excitação Aleatória de Vento**. – Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. 2003.

LEITE, E. B.; **Análise comparativa entre respostas de torre de transmissão sujeita a carregamentos obtidos através do método do vento sintético e da norma NBR 6123/88**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Curitiba. 2015.

LOTURCO, Bruno; **Engenharia de Vento**. Revista Técnica. n.156. Março de 2010.

MANFRIN, S. T.; BERTOLINO, R. **Estudo numérico da determinação das pressões devido à ação do vento em edifícios industriais**. XXXII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, p. 2059-2068, 2006.

MORAIS, V. C.; **Análise dinâmica não determinística de edifícios mistos (aço-concreto), Submetidos à ação de cargas de vento**. Universidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

NATIONAL BUILDING CODE OF CANADA. **National Research Council of Canada**, Associate Committee on the National Building Code, Ottawa, NBCC nº. 23178. 1990.

PEREIRA, Rui. Edifícios altos – **Problemas associados e análise estrutural de um caso prático**. 2011.

RIBEIRO, E. C.; **Análise de torres metálicas estaiadas submetidas à ação do vento**. 2007. 201 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2007.

SILVA FILHO, G. D.; **Estudo do Comportamento Dinâmico de Edifícios Mistos (Aço-Concreto), Submetidos à Ação Não Determinística do Vento**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.

SMITH, Marra A.; CARACOGLIA, Luca. **A Monte Carlo based method for the dynamic “fragility analysis” of tall buildings under turbulent wind loading**. Elsevier – Engineering Structures, 33 (2011), p. 410-420, out. 2010.

SOLARI, G. **Wind-excited response of structure with uncertain parameters**. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 12, nº 2, Great Britain, p. 75-87, 1997.

SPENCE, S. M. J.; GIOFFRÈ, M. **Efficient algorithms for there reliability optimization of tall buildings**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, p. 691-699, 2011.

STANDART, Australian. **Minimum design Loads on structure**. AS1170, p. 2 – 1989.

TREIN, C. A. **Modelagem Dinâmica Equivalente de Edifícios Altos Submetidos à Ação de Vento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre – RS, 2005.

VERZENHASSI, Camila Cardozo. **Otimização de risco estrutural baseada em confiabilidade**. 2008. 154 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

ZHANG, Lin-lin; LI, Jie; PENG, Yongbo. **Dynamic response and reliability analysis of tall buildings subject to wind loading**. Elsevier – Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96 (2008), p. 25-40, 2008.

8 APÊNDICES.

Memória de cálculo - carregamento para o Método do vento sintético

- 1 -
28/10/2015

1) Dados do vento

$$v0 := 42 \quad S1 := 1 \quad S3 := 1.0$$

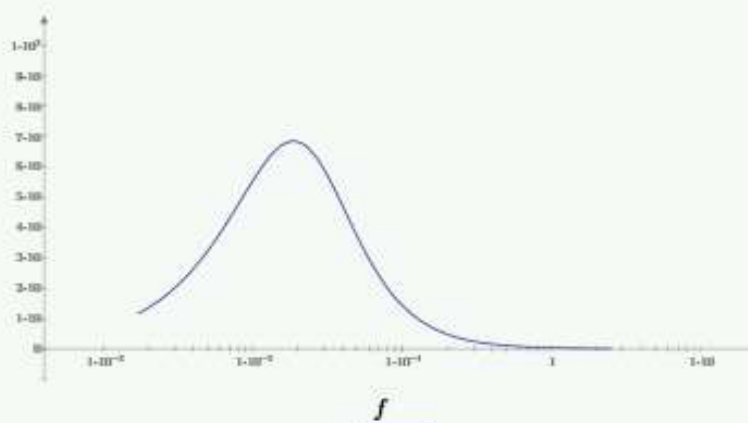
1.1) Velocidade de projeto (velocidade média sobre 10 min a 10 m de altura sobre o solo, em terreno de categoria II, é obtida pelo produto)

$$u0 := 0.69 \cdot S1 \cdot S3 \cdot v0 \quad u0 = 28.98$$

2) Espectro da velocidade do vento

$$f := 0.0017, 0.0018 \dots 2.5$$

$$x(f) := \frac{(1200 \cdot f)}{u0} \quad Sr(f) := 4 \cdot \frac{x(f)^2}{(1 + x(f)^2)^{\frac{4}{3}}} \cdot f$$



Espectro de potência de Davenport

3) Dados da torre - coeficientes aerodinâmicos

$$r := 0.225 \quad \text{Frequência fundamental}$$

$$j := 1, 2 \dots 35 \quad \text{Quantidade de divisões (nós) das torres}$$

Memória de cálculo - carregamento para o Método do vento sintético

- 2 -
28/10/2015

35	32,4	101,17	1,15			
34	32,4	94,57	1,15			
33	32,4	93,57	1,15			
32	38,86	91,17	1,15			
31	38,86	89,07	1,15			
30	38,86	85,97	1,15			

$$A_j = \begin{bmatrix} 32.4 \\ 32.4 \\ 32.4 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ 38.86 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad z_j = \begin{bmatrix} \vdots \\ 65.47 \\ 62.57 \\ 59.67 \\ 56.77 \\ 53.87 \\ 50.97 \\ 48.07 \\ 45.17 \\ 42.27 \\ 39.37 \\ 36.47 \\ 33.57 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad Ca_j = \begin{bmatrix} 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ 1.15 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

4) Decomposição das pressões flutuantes

$$k := 1, 2 \dots 12 \quad c := 20$$

$$R := 3$$

$$f_k := \frac{r}{2^{k-n}} \quad T_k := \frac{1}{f_k} \quad fa_k := \frac{r}{2^{(k-0.5-n)}} \quad fp_k := \frac{r}{2^{(k+0.5-n)}}$$

Valores de fak e fpk

$$f a_k = \begin{bmatrix} 1.273 \\ 0.636 \\ 0.318 \\ 0.159 \\ 0.08 \\ 0.04 \\ 0.02 \\ 0.01 \\ 0.005 \\ 0.002 \\ 0.001 \\ 6.215 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} \quad f p_k = \begin{bmatrix} 0.636 \\ 0.318 \\ 0.159 \\ 0.08 \\ 0.04 \\ 0.02 \\ 0.01 \\ 0.005 \\ 0.002 \\ 0.001 \\ 6.215 \cdot 10^{-4} \\ 3.107 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$C_k = \sqrt{2 \cdot \int_{f p_k}^{f a_k} \text{Sr}(f) df} \quad c_k = \frac{C_k}{\sum_k C_k} \quad \sum_k C_k = 9.656$$

Valores Ck e ck

$$C_k = \begin{bmatrix} 0.708 \\ 0.89 \\ 1.114 \\ 1.369 \\ 1.577 \\ 1.532 \\ 1.136 \\ 0.667 \\ 0.35 \\ 0.178 \\ 0.089 \\ 0.045 \end{bmatrix} \quad c_k = \begin{bmatrix} 0.073 \\ 0.092 \\ 0.115 \\ 0.142 \\ 0.163 \\ 0.159 \\ 0.118 \\ 0.069 \\ 0.036 \\ 0.018 \\ 0.009 \\ 0.005 \end{bmatrix} \quad \sum_k c_k = 1$$

4.1) Angulos de fase gerados aleatoriamente de 0 a 2π

$$\theta_k := \text{rnd}(2 \cdot \pi)$$

$$\theta_k = \begin{bmatrix} 0.056 \\ 3.341 \\ 3.781 \\ 1.045 \\ 2.832 \\ 0.358 \\ 4.922 \end{bmatrix}$$

[3.266]
[5.504]
[6.006]
[3.389]
[2.903]

4.2) Vinte séries de números aleatórios

Inputs														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	3.61	1.26	4.55	1.34	0.20	4.84	4.95	2.33	3.36	2.77	2.71	4.47	3.96	3.78
	3.94	4.28	4.36	3.05	5.39	5.47	4.49	1.46	0.34	2.22	1.52	4.87	3.72	1.09
0.31	2.31	4.11	2.76	2.53	4.56	0.51	1.46	1.63	2.69	4.11	3.90	3.18	2.09	
Outputs	$\theta := \text{excel} \cdot \cos \theta$													

$t := 0, 0.1 \dots 600$ tempo

$$P(t, k) := \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{T_R} \cdot 2^{k-R} \cdot t - \theta_k\right) \quad \text{Harmônicos}$$

$$r_{x_k} := \frac{T_k}{T_R} \quad cc_k := c_k \quad cc_R := \frac{c_R}{2} \quad cc_{R-1} := c_{R-1} + \frac{c_R}{4} \quad cc_{R+1} := c_{R+1} + \frac{c_R}{4}$$

$k =$	$r_{x_k} =$	$cc_k =$	$c_k =$	$f_k =$	$T_k =$
[1]	[0.25]	[0.073]	[0.073]	[0.9]	[1.111]
[2]	[0.5]	[0.121]	[0.092]	[0.45]	[2.222]
[3]	[1]	[0.058]	[0.115]	[0.225]	[4.444]
[4]	[2]	[0.171]	[0.142]	[0.113]	[8.889]
[5]	[4]	[0.163]	[0.163]	[0.056]	[17.778]
[6]	[8]	[0.159]	[0.159]	[0.028]	[35.556]
[7]	[16]	[0.118]	[0.118]	[0.014]	[71.111]
[8]	[32]	[0.069]	[0.069]	[0.007]	[142.222]
[9]	[64]	[0.036]	[0.036]	[0.004]	[284.444]
[10]	[128]	[0.018]	[0.018]	[0.002]	[568.889]
[11]	[256]	[0.009]	[0.009]	[$8.789 \cdot 10^{-4}$]	[$1.138 \cdot 10^3$]
[12]	[512]	[0.005]	[0.005]	[$4.395 \cdot 10^{-4}$]	[$2.276 \cdot 10^3$]

Memória de cálculo - carregamento para o Método do vento sintético

- 5 -
28/10/2015

1.0000	fak	fpk	Ck	ck	rxk	cck	fk	Tk		
2.0000	13.1200	6.5600	0.3360	0.0310	0.2500	0.0310	9.2800	0.1080		
3.0000	6.5600	0.5331	0.4230	0.5331	0.5000	0.0520	4.6400	0.2160		
4.0000	3.2800	1.6400	0.5330	0.0500	1.0000	0.0250	2.3200	0.4310		
5.0000	1.6400	0.8200	0.6710	0.0630	2.0000	0.0750	1.1600	0.8620		
6.0000	0.8200	0.4100	0.8450	0.0790	4.0000	0.0790	0.5800	1.7240		

$$P_p(t, k) = P(t, k) \cdot c_k \quad \text{Harmônicos corrigidos conforme o espectro de vento}$$

$$\sum_k c_k = 1$$

5) Correlação espacial

$$\Delta z_0_k = \frac{u_0}{7 \cdot f_k}$$

Tamanho da rajada equivalente

$$\Delta z_0_k = \begin{bmatrix} 4.6 \\ 9.2 \\ 18.4 \\ 36.8 \\ 73.6 \\ 147.2 \\ 294.4 \\ 588.8 \\ 1.178 \cdot 10^3 \\ 2.355 \cdot 10^3 \\ 4.71 \cdot 10^3 \\ 9.421 \cdot 10^3 \end{bmatrix} \quad \Delta z_0_k = \begin{bmatrix} -0.217 \\ -0.109 \\ -0.054 \\ -0.027 \\ -0.014 \\ -0.007 \\ -0.003 \\ -0.002 \\ -8.492 \cdot 10^{-4} \\ -4.246 \cdot 10^{-4} \\ -2.123 \cdot 10^{-4} \\ -1.061 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} \quad \Delta z_0_k = \begin{bmatrix} 0.217 \\ 0.109 \\ 0.054 \\ 0.027 \\ 0.014 \\ 0.007 \\ 0.003 \\ 0.002 \\ 8.492 \cdot 10^{-4} \\ 4.246 \cdot 10^{-4} \\ 2.123 \cdot 10^{-4} \\ 1.061 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

$$L_k = 2 \cdot \Delta z_0_k$$

$$z_1 = 101.17 \quad L_3 = 36.8 \quad \frac{L_1}{2} = 18.4 \quad \Delta z_3 = 18.4$$

$$G_c = z_1 - \frac{L_n}{2}$$

$$G_c = 82.77$$

$$G_c = 74.17$$

Adotado (posição do centro de rajada)

5.1) Coeficiente de redução das pressões flutuantes

$$Cr(j,k) = \begin{cases} \text{if } Gc \leq z_j \leq Gc + \Delta z0_k \\ \left\| \frac{1}{\Delta z0_k} \cdot (Gc - z_j) + 1 \right\| \\ \text{else if } Gc - \Delta z0_k \leq z_j \leq Gc \\ \left\| \frac{-1}{\Delta z0_k} \cdot (Gc - z_j) + 1 \right\| \\ \text{else} \\ 0 \end{cases}$$

6) Harmônicos de força nos nós da torre

categoria III, 600s: $Vm_j = 0.5934 \cdot v0 \cdot \left(\frac{z_j}{10}\right)^{0.185}$ Velocidade média

categoria III, 3600s: $Vm_{3600} = 0.5525 \cdot v0 \cdot \left(\frac{z_j}{10}\right)^{0.20}$ Velocidade média - verificar possibilidades de usar essa

categoria III, 3s: $V_j = 0.94 \cdot v0 \cdot \left(\frac{z_j}{10}\right)^{0.1}$ Velocidade de pico

$q_j = 0.613 \cdot (V_j)^2$ em $\frac{N}{m^2}$ Pressão de pico

$qest_j = 0.613 \cdot (Vm_j)^2$ $Fest_j = Ca_j \cdot A_j \cdot qest_j$ Carregamento estático

$qf_j = q_j - qest_j$ Pressão flutuante

Harmônicos $k=1$ a m (m é o número de harmônicos)

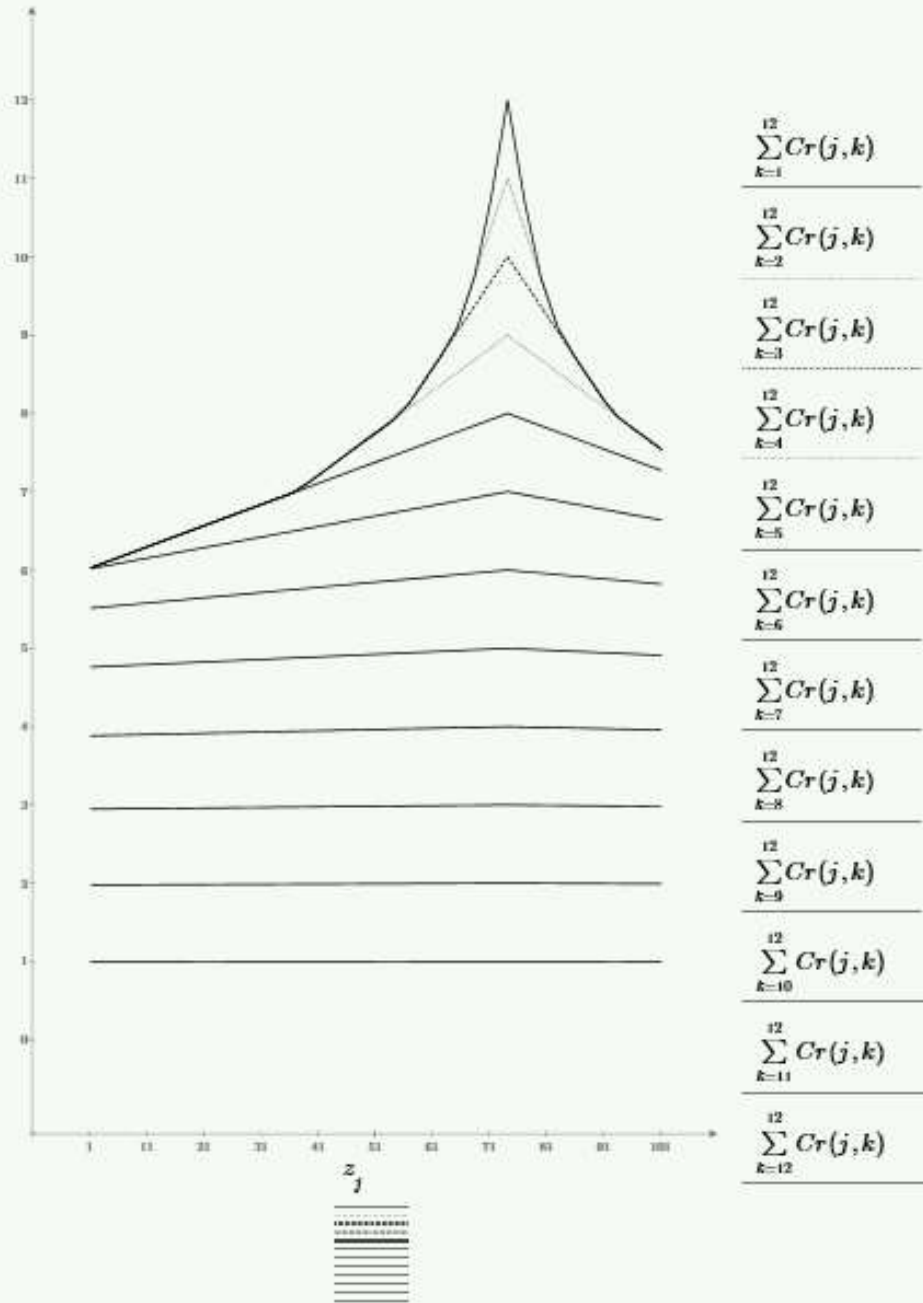
$$Q(t, j, k) := qf_j \cdot Cr(j, k) \cdot Pp(t, k)$$

$$Ff(t, j, k) := Ca_j \cdot A_j \cdot Q(t, j, k)$$

Harmônicos flutuantes

$$Pdin(t, j) := \sum_k Ff(t, j, k)$$

Série temporal dos harmônicos para cada coordenada da torre



Correlação espacial das rajadas

$$\sum_{k=12}^{12} Cr(j,k) = \begin{bmatrix} 0.997 \\ \vdots \\ \end{bmatrix}$$

7) Gravação das séries temporais para serem utilizados pelo TQS - Saídas em N

$l = 1, 2, \dots, 6000$

$$\begin{array}{ll}
 P1_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 1\right) & Ftotal1 := P1 + Fest_1 \\
 P2_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 2\right) & Ftotal2 := P2 + Fest_2 \\
 P3_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 3\right) & Ftotal3 := P3 + Fest_3 \\
 P4_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 4\right) & Ftotal4 := P4 + Fest_4 \\
 P5_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 5\right) & Ftotal5 := P5 + Fest_5 \\
 P6_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 6\right) & Ftotal6 := P6 + Fest_6 \\
 P7_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 7\right) & Ftotal7 := P7 + Fest_7 \\
 P8_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 8\right) & Ftotal8 := P8 + Fest_8 \\
 P9_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 9\right) & Ftotal9 := P9 + Fest_9 \\
 P10_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 10\right) & Ftotal10 := P10 + Fest_{10} \\
 P11_l := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 11\right) & Ftotal11 := P11 + Fest_{11}
 \end{array}$$

$$P12_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 12\right) \quad Ftotal12 := P12 + Fest_{12}$$

$$P13_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 13\right) \quad Ftotal13 := P13 + Fest_{13}$$

$$P14_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 14\right) \quad Ftotal14 := P14 + Fest_{14}$$

$$P15_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 15\right) \quad Ftotal15 := P15 + Fest_{15}$$

$$P16_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 16\right) \quad Ftotal16 := P16 + Fest_{16}$$

$$P17_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 17\right) \quad Ftotal17 := P17 + Fest_{17}$$

$$P18_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 18\right) \quad Ftotal18 := P18 + Fest_{18}$$

$$P19_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 19\right) \quad Ftotal19 := P19 + Fest_{19}$$

$$P20_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 20\right) \quad Ftotal20 := P20 + Fest_{20}$$

$$P20_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 20\right) \quad Ftotal20 := P20 + Fest_{20}$$

$$P21_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 21\right) \quad Ftotal21 := P21 + Fest_{21}$$

$$P22_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 22\right) \quad Ftotal22 := P22 + Fest_{22}$$

$$P23_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 23\right) \quad Ftotal23 := P23 + Fest_{23}$$

$$P24_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 24\right) \quad Ftotal24 := P24 + Fest_{24}$$

$$P25_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 25\right) \quad Ftotal25 := P25 + Fest_{25}$$

$$P26_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 26\right) \quad Ftotal26 := P26 + Fest_{26}$$

$$P27_t := Pdin\left(\frac{(l-1)}{10}, 27\right) \quad Ftotal27 := P27 + Fest$$

$$P_{28} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 28 \right) \quad F_{total28} := P_{28} + F_{est_{28}}$$

$$P_{29} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 29 \right) \quad F_{total29} := P_{29} + F_{est_{29}}$$

$$P_{30} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 30 \right) \quad F_{total30} := P_{30} + F_{est_{30}}$$

$$P_{31} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 31 \right) \quad F_{total31} := P_{31} + F_{est_{31}}$$

$$P_{32} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 32 \right) \quad F_{total32} := P_{32} + F_{est_{32}}$$

$$P_{33} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 33 \right) \quad F_{total33} := P_{33} + F_{est_{33}}$$

$$P_{34} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 34 \right) \quad F_{total34} := P_{34} + F_{est_{34}}$$

$$P_{35} := P_{din} \left(\frac{(l-1)}{10}, 35 \right) \quad F_{total35} := P_{35} + F_{est_{35}}$$

PRNPRECISION := 6 Escolha da precisão a ser alcançada

$$Ft1 := WRITEPRN ("ft1.txt", Ftotal1) \quad F_{est_1} = 3.34 \cdot 10^4$$

$$Ft2 := WRITEPRN ("ft2.txt", Ftotal2) \quad F_{est_2} = 3.258 \cdot 10^4$$

$$Ft3 := WRITEPRN ("ft3.txt", Ftotal3) \quad F_{est_3} = 3.245 \cdot 10^4$$

$$Ft4 := WRITEPRN ("ft4.txt", Ftotal4) \quad F_{est_4} = 3.855 \cdot 10^4$$

$$Ft5 := WRITEPRN ("ft5.txt", Ftotal5) \quad F_{est_5} = 3.822 \cdot 10^4$$

$$Ft6 := WRITEPRN ("ft6.txt", Ftotal6) \quad F_{est_6} = 3.772 \cdot 10^4$$

$$Ft7 := WRITEPRN ("ft7.txt", Ftotal7) \quad F_{est_7} = 3.721 \cdot 10^4$$

$$Ft8 := WRITEPRN ("ft8.txt", Ftotal8) \quad F_{est_8} = 3.672 \cdot 10^4$$

$$Ft9 := WRITEPRN ("ft9.txt", Ftotal9) \quad F_{est_9} = 3.622 \cdot 10^4$$

$Ft10 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft10.txt"}, Fttotal10)$	$Fest_{10} = 3.571 \cdot 10^4$
$Ft11 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft11.txt"}, Fttotal11)$	$Fest_{11} = 3.519 \cdot 10^4$
$Ft12 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft12.txt"}, Fttotal12)$	$Fest_{12} = 3.465 \cdot 10^4$
$Ft13 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft13.txt"}, Fttotal13)$	$Fest_{13} = 3.41 \cdot 10^4$
$Ft14 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft14.txt"}, Fttotal14)$	$Fest_{14} = 3.354 \cdot 10^4$
$Ft15 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft15.txt"}, Fttotal15)$	$Fest_{15} = 3.295 \cdot 10^4$
$Ft16 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft16.txt"}, Fttotal16)$	$Fest_{16} = 3.235 \cdot 10^4$
$Ft17 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft17.txt"}, Fttotal17)$	$Fest_{17} = 3.173 \cdot 10^4$
$Ft18 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft18.txt"}, Fttotal18)$	$Fest_{18} = 3.109 \cdot 10^4$
$Ft19 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft19.txt"}, Fttotal19)$	$Fest_{19} = 3.042 \cdot 10^4$
$Ft20 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft20.txt"}, Fttotal20)$	$Fest_{20} = 2.973 \cdot 10^4$
$Ft21 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft21.txt"}, Fttotal21)$	$Fest_{21} = 2.901 \cdot 10^4$
$Ft22 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft22.txt"}, Fttotal22)$	$Fest_{22} = 2.825 \cdot 10^4$
$Ft23 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft23.txt"}, Fttotal23)$	$Fest_{23} = 2.746 \cdot 10^4$
$Ft24 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft24.txt"}, Fttotal24)$	$Fest_{24} = 2.664 \cdot 10^4$
$Ft25 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft25.txt"}, Fttotal25)$	$Fest_{25} = 2.576 \cdot 10^4$
$Ft26 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft26.txt"}, Fttotal26)$	$Fest_{26} = 2.483 \cdot 10^4$
$Ft27 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft27.txt"}, Fttotal27)$	$Fest_{27} = 2.384 \cdot 10^4$
$Ft28 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft28.txt"}, Fttotal28)$	$Fest_{28} = 2.277 \cdot 10^4$
$Ft29 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft29.txt"}, Fttotal29)$	$Fest_{29} = 2.161 \cdot 10^4$
$Ft30 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft30.txt"}, Fttotal30)$	$Fest_{30} = 2.033 \cdot 10^4$
$Ft31 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft31.txt"}, Fttotal31)$	$Fest_{31} = 1.889 \cdot 10^4$
$Ft32 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft32.txt"}, Fttotal32)$	$Fest_{32} = 1.725 \cdot 10^4$
$Ft33 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft33.txt"}, Fttotal33)$	$Fest_{33} = 1.528 \cdot 10^4$

Memória de cálculo - carregamento para o Método do vento sintético

- 13 -
28/10/2015

$$Fl34 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft34.txt"}, Fltotal34) \quad Fest_{34} = 1.843 \cdot 10^4$$

$$Fl35 := \text{WRITEPRN}(\text{"ft35.txt"}, Fltotal35) \quad Fest_{35} = 1.704 \cdot 10^4$$

Memória de cálculo - carregamento para o modelo discreto

- 2 -
12/11/2015

$$Xm = \begin{bmatrix} 3.841 \cdot 10^4 \\ 3.764 \cdot 10^4 \\ 3.752 \cdot 10^4 \\ 4.465 \cdot 10^4 \\ 4.434 \cdot 10^4 \\ 4.387 \cdot 10^4 \\ 4.339 \cdot 10^4 \\ 4.293 \cdot 10^4 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$A_0 := \sum_i A_i = 1.43 \cdot 10^3 \quad m_0 := \sum_i m_i \quad x_i := \left(\frac{z_i}{h} \right)^7$$

$$\Psi_i := \frac{m_i}{m_0}$$

$$\beta_i := C \alpha_i \cdot \frac{A_i}{A_0} \cdot \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p$$

$$FH := q_0 \cdot b^2 \cdot A_0 \cdot \left(\frac{\left(\sum_i \beta_i x_i \right)}{\left(\sum_i \Psi_i (x_i)^2 \right)} \right) \cdot \xi$$

$$Xf_i := FH \cdot \Psi_i \cdot x_i$$

$$Xf_i = \begin{bmatrix} 527.51 \\ 294.645 \\ 346.576 \\ 148.864 \\ 497.174 \\ 650.463 \\ 728.345 \\ 696.041 \\ 656.097 \\ 617.044 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$Xt_i := Xm_i + Xf_i$$

Memória de cálculo - carregamento para o modelo discreto

- 3 -

12/11/2015

$$Xt = \begin{bmatrix} 3.893 \cdot 10^4 \\ 3.793 \cdot 10^4 \\ 3.786 \cdot 10^4 \\ 4.48 \cdot 10^4 \\ 4.484 \cdot 10^4 \\ 4.452 \cdot 10^4 \\ 4.412 \cdot 10^4 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

<i>excel</i> *A1:A35*		$\approx Xt$			
44519,89	30				
44117,09	29				
43623,58	28				
43110,57	27				
42585,83	26				
42048,5	25				