

7

Investigação em estruturas reais

No início deste trabalho foi mencionado que muitas estruturas do mundo da engenharia civil podem ser sensíveis aos efeitos da não-linearidade geométrica. Mencionou-se que eram de especial importância para a investigação desses efeitos as estruturas usadas no sistema de transmissão do sinal de telefonia móvel celular.

A razão desse particular interesse deveu-se ao fato de que o Brasil, a partir de 1998, havia promovido uma reestruturação do seu sistema de telecomunicações para estimular o crescimento e a universalização dos serviços de telefonia. Com isso, favoreceu a implantação, em todo o território brasileiro, de milhares de estações para a transmissão do sinal de telefonia móvel celular. Para tanto, os opera-

dores privados, valeram-se de estruturas compostas, em muitos casos, apenas de postes em balanço de elevada esbelteza e, por conseguinte, sensíveis às ações dinâmicas do vento.

Como a implantação do sistema de telefonia móvel deu-se em um ritmo acelerado, não houve tempo hábil para que os profissionais envolvidos nos projetos dessas estruturas adaptassem seus modelos de cálculo e, portanto, mantiveram em uso aqueles com os quais estavam mais familiarizados. Nesse sentido, os projetos desenvolvidos para construção dos postes de telecomunicações estavam baseados no processo de cálculo previsto no item 4 da NBR 6123/88, denominado, neste trabalho, de modelo estático, e descrito na seção 6.1.

O presente capítulo visa avaliar dois aspectos relativos aos postes de telecomunicações, que são:

- a diferença produzida entre o modelo estático de cálculo para a ação do vento, usado no dimensionamento das estruturas, e os demais modelos presentes na NBR 6123/88; e
- a influência que a rigidez geométrica exerce no cálculo da frequência e na, conseqüente, resposta dinâmica devida à turbulência atmosférica.

Para isso foram selecionados cinco postes de telecomunicações. Os dados relativos à geometria das estruturas e os parâmetros para o cálculo da ação do vento foram gentilmente cedidos pela RM Engenharia, sediada na cidade de São Paulo-SP. Informações não autorizadas foram intencionalmente omitidas.

O aço foi considerado submetido a tensões dentro da região elástica de deformação. Quando necessário, o módulo de elasticidade do concreto foi calculado usando-se a expressão da NBR 6118/04 - Projeto de Estruturas de Concreto Armado, seguindo a expressão $E_{ci} = 5600\sqrt{f_{ck}}$, onde f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto em MPa. O módulo de elasticidade secante do concreto, recomendado para as análises elásticas de projeto, é definido pela NBR 6118/04 como $E_{cs} = 0,85E_{ci}$. O módulo de elasticidade e o peso específico do aço, adotados nas análises das estruturas reais, de 205 GPa e 77 kN/m³, foram os recomendados pela NBR 8800/96 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios. A densidade corresponde ao peso específico do aço é, portanto, 7850 kg/m³. Mes-

mo já tendo sido mencionadas anteriormente, as características dos materiais também foram indicadas em cada análise.

Na determinação dos esforços devidos ao vento foram desenvolvidos cinco processos de cálculo. Inicialmente foi utilizado o método para a determinação exclusiva da ação do vento como força estática (modelo estático), previsto no item 4 da NBR 6123/88 – Forças devidas ao vento em edificações.

No segundo e no terceiro processos foram usados o método contínuo simplificado (modelo dinâmico simplificado), estipulado no item 9.3.1 da NBR 6123/88, sendo a frequência obtida sob condições lineares e não-lineares. Nos outros dois modelos, a resposta dinâmica da estrutura foi obtida utilizando-se o modelo dinâmico discreto (análise dinâmica discreta), conforme preconizado no item 9.3.2 da NBR 6123/88, também utilizando-se modelos lineares e não-lineares. Os modelos simplificado e discreto estão previstos no capítulo 9 - Cálculo da resposta dinâmica na direção do vento médio, da NBR 6123/88. Todos os modelos para o cálculo da ação do vento, mencionados anteriormente, foram apresentados no capítulo 6 do presente trabalho.

Os processos de cálculos dinâmicos lineares foram desenvolvidos buscando-se o máximo de apoio nas prescrições da NBR 6123/88. Já os métodos não-lineares foram desenvolvidos levando em conta a influência do esforço normal no cálculo das frequências e nas formas modais naturais de vibração das estruturas.

A discretização da massa e as formas modais das estruturas foram obtidas pelos modelos elaborados em Elementos Finitos, no programa SAP2000.

Os comentários acerca do emprego do Método dos Elementos Finitos foram feitos no capítulo 3. No entanto, o emprego do método proposto nesta Tese para o cálculo da frequência fundamental requer que sejam feitos comentários adicionais neste momento. Como as estruturas possuem geometria e propriedades variando com a altura, o emprego do método deve ser feito por trechos, sendo suas integrais resolvidas nos limites estabelecidos para cada intervalo.

Para o emprego correto do método, as propriedades generalizadas como as massas e as rigidezes também devem ser calculadas para

cada parte da estrutura. Cuidado especial deve ser tomado ao serem calculadas as rigidezes geométricas, pois cada parcela deve levar em conta a força normal distribuída no respectivo intervalo e os esforços que atuam nos segmentos superiores.

De um modo geral, o emprego do método proposto nesta pesquisa foi dividido nas seguintes etapas: definição dos dados e geometria, cálculo da massa generalizada, determinação da rigidez generalizada e cálculo da frequência. Chama-se a atenção para o fato de que nenhum fator de majoração dos esforços ou minoração das resistências dos materiais foi adotado.

7.1 ESTRUTURA 1 – POSTE METÁLICO DE 48 M

7.1.1 Dados e geometria

Trata-se de um poste metálico destinado ao suporte do sistema irradiante do sinal de telefonia móvel celular. A estrutura possui 48 metros de altura e seção transversal circular vazada de diâmetro externo (ϕ_{ext}) e espessura (e) variáveis.

A Tabela 7.1 e a Figura 7.1 apresentam as propriedades da estrutura e a discretização do modelo. Na Figura 7.2 podem ser vistas fotografias da estrutura.

O índice de esbeltez da estrutura é $\lambda = 310$. Cabe mencionar que o comitê de revisão da NBR 8800/96 - Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios, na proposta de revisão de abril de 2006, sugere que a esbeltez das barras comprimidas não deve ser superior a 200.

A Tabela 7.2 apresenta os parâmetros estruturais e dos dispositivos existentes para o cálculo da ação do vento.

Tabela 7.1 – Estrutura 1: dados da estrutura e discretização do modelo.

cota (m)	fext (cm)	e. (cm)									
48,00	40,64	0,48	30,00	80,00	0,80	20,00	90,00	0,80	10,00	97,56	0,80
46,00	40,64	0,48	29,00	80,00	0,80	19,00	90,00	0,80	9,00	105,11	0,80
44,00	40,64	0,48	28,00	80,00	0,80	18,00	90,00	0,80	8,00	112,67	0,80
42,00	65,00	0,80	27,00	80,00	0,80	17,00	90,00	0,80	7,00	120,22	0,80
40,00	65,00	0,80	26,00	80,00	0,80	16,00	90,00	0,80	6,00	127,78	0,80
38,00	65,00	0,80	25,00	80,00	0,80	15,00	90,00	0,80	5,00	135,33	0,80
36,00	70,00	0,80	24,00	90,00	0,80	14,00	90,00	0,80	4,00	142,89	0,80
34,00	70,00	0,80	23,00	90,00	0,80	13,00	90,00	0,80	3,00	150,44	0,80
32,00	70,00	0,80	22,00	90,00	0,80	12,00	90,00	0,80	2,00	158,00	0,80
31,00	80,00	0,80	21,00	90,00	0,80	11,00	90,00	0,80	1,00	165,56	0,80
									0,00	173,11	0,80

Tabela 7.2 – Estrutura 1: características dos dispositivos.

Dispositivo	Área frontal	Ca	Cota	Peso específico, Peso distribuído ou Peso
Poste	Variável	0,6	de 0 a 48 m	7850 kN/m ³
Escada	0,05 m ² /m	2,0	de 0 a 48 m	0,15 kN/m
Cabos	0,15 m ² /m	1,2	de 0 a 48 m	0,25 kN/m
Antenas e suportes	1,1 m ²	1,0	48 m	3,36 kN

(Ca = Coeficiente de arrasto)



Figura 7.1 – Estrutura 1: Fotografias.

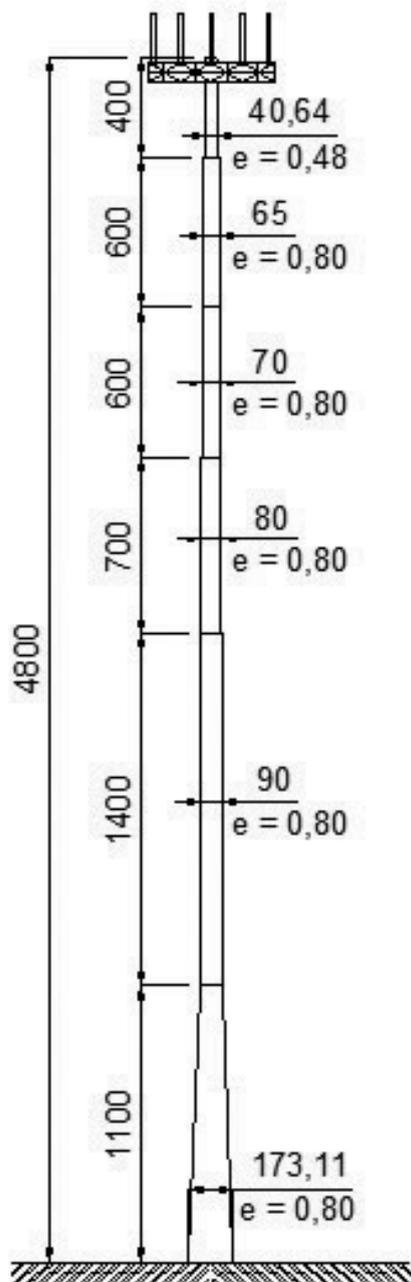


Figura 7.2 – Estrutura 1: Geometria - Medidas em centímetro.

7.1.2 Modelagem por Elementos Finitos

A estrutura foi modelada utilizando-se elementos de barra com seções transversais constantes e variáveis, conforme o caso. No modelo foram atribuídas as forças descritas na Tabela 7.2, com as correspondentes massas.

A Figura 7.3 apresenta o modelo tridimensional disponibilizado pelo programa e a discretização da estrutura construída com 40 elementos de barra.

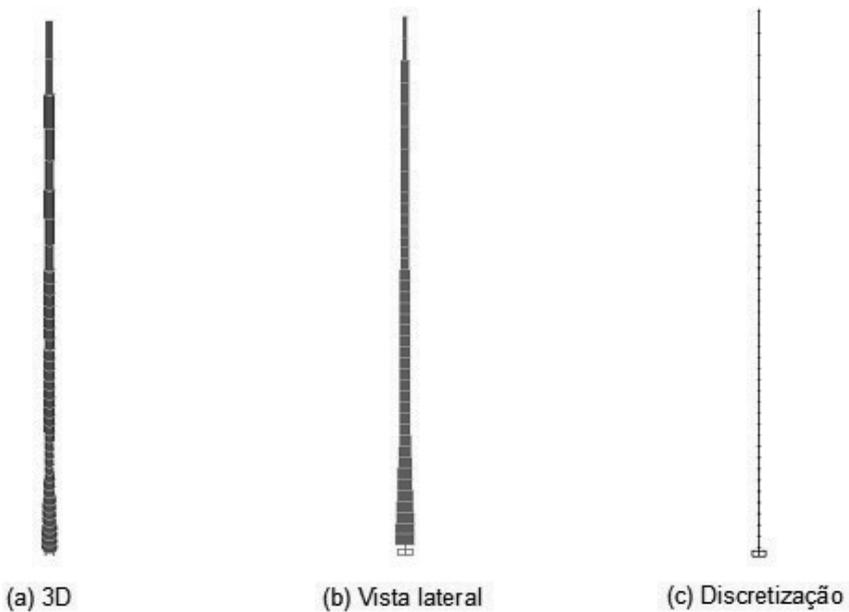
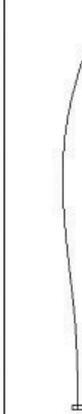
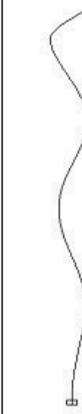


Figura 7.3 – Estrutura 1: modelo por Elementos Finitos.

Os modos de vibração e as frequências obtidas pelo Método dos Elementos Finitos são as constantes na Figura 7.4.

Modos naturais de vibração						
	1° Modo	2° Modo	3° Modo	4° Modo	5° Modo	
	Linear	0,492870 Hz	2,338750 Hz	5,696157 Hz	10,078778 Hz	15,827610 Hz
	NLG	0,483026 Hz	2,329690 Hz	5,687144 Hz	10,068930 Hz	15,817035 Hz

(NLG = Não-Linearidade Geométrica)

Figura 7.4 – Estrutura 1: modos naturais de vibração.

7.1.3 Aplicação do método proposto

7.1.3.1 Definição dos parâmetros

Os dados utilizados na aplicação do método proposto foram os seguintes:

- módulo de elasticidade: $E = 205 \text{ GPa}$,
- densidade do aço: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$,
- massa concentrada no topo: $m_0 = 342,40 \text{ kg}$;
- massa distribuída por unidade de altura: $m_e = 40 \text{ kg/m}$.

As ordenadas correspondentes às alturas na estrutura e as propriedades geométricas das seções transversais, dos respectivos trechos, são dadas por:

Na base, quando $x = 0$, tem-se: $D_1 = 173,11 \text{ cm}$, $e_1 = 0,80 \text{ cm}$,

$$d_1 = D_1 - 2e_1, A_1 = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - d_1^2), I_1 = \frac{\pi}{64}(D_1^4 - d_1^4).$$

No segmento subsequente, de propriedades variáveis,

$$\text{tem-se: } D(x) = \frac{D_2 - D_1}{L_1}x + D_1, d(x) = D(x) - 2e_1,$$

$$A(x) = \frac{\pi}{4}(D(x)^2 - d_1(x)^2), I(x) = \frac{\pi}{64}(D(x)^4 - d_1(x)^4).$$

Na ordenada $L_1 = 1 \text{ m}$, define-se: $D_2 = 90,00 \text{ cm}$,

$$e_2 = 0,80 \text{ cm}, d_2 = D_2 - 2e_2, A_2 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2),$$

$$I_2 = \frac{\pi}{64}(D_2^4 - d_2^4).$$

Em $L_2 = 25,00 \text{ m}$, tem-se: $D_3 = 80,00 \text{ cm}$, $e_3 = 0,80 \text{ cm}$,

$$d_3 = D_3 - 2e_3, A_3 = \frac{\pi}{4}(D_3^2 - d_3^2), I_3 = \frac{\pi}{64}(D_3^4 - d_3^4).$$

Em $L_3 = 32,00 \text{ m}$, tem-se: $D_4 = 70,00 \text{ cm}$, $e_4 = 0,80 \text{ cm}$,

$$d_4 = D_4 - 2e_4, A_4 = \frac{\pi}{4}(D_4^2 - d_4^2), I_4 = \frac{\pi}{64}(D_4^4 - d_4^4).$$

Em $L_4 = 38,00 \text{ m}$, tem-se: $D_5 = 65,00 \text{ cm}$, $e_5 = 0,80 \text{ cm}$,

$$d_5 = D_5 - 2e_5, A_5 = \frac{\pi}{4}(D_5^2 - d_5^2), I_5 = \frac{\pi}{64}(D_5^4 - d_5^4).$$

Para $L_5 = 44,00 \text{ m}$ e $L_6 = 48,00 \text{ m}$, tem-se: $D_6 = 40,64 \text{ cm}$,

$$e_6 = 0,48 \text{ cm}, d_6 = D_6 - 2e_6, A_6 = \frac{\pi}{4}(D_6^2 - d_6^2),$$

$$I_6 = \frac{\pi}{64}(D_6^4 - d_6^4).$$

7.1.3.2 Cálculo da massa generalizada

Os subíndices em números romanos, introduzidos a partir deste ponto, visam evitar redundância de notação nas expressões. A massa generalizada foi obtida por meio das integrais dispostas a seguir.

Para o primeiro segmento:

$$m_1 = \int_0^{L_1} m_1(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_1(x) = A(x)\rho + m_e.$$

Para o segundo segmento:

$$m_2 = \int_{L_1}^{L_2} m_{II} \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{II} = A_2\rho + m_e.$$

Analogamente ao segundo trecho, para os demais, pode-se escrever na forma geral

$$m_i = \int_{L_{i-1}}^{L_i} m_i \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_i = A_i\rho + m_e.$$

A massa distribuída generalizada foi obtida por

$$m_R = \sum_{i=1}^6 m_i$$

E a massa generalizada total por:

$$M = m_0 + m_R$$

7.1.3.3 Cálculo da rigidez generalizada

Rigidez geométrica generalizada

Para calcular a rigidez geométrica generalizada foi preciso determinar os esforços normais relativos aos trechos definidos na geometria. Do topo para a base da estrutura os esforços normais são:

$$F_0 = m_0 g ,$$

$$F_6 = \int_{L_5}^L m_{VI} g dx ,$$

$$F_5 = \int_{L_4}^{L_5} m_V g dx ,$$

e assim sucessivamente, ou seja:

$$F_i = \int_{L_{i-1}}^{L_i} m_i g dx$$

sendo que o esforço normal relativo ao primeiro segmento, que é linearmente variável, foi obtido pela seguinte expressão

$$F_1 = \int_0^{L_1} m_1(x) g dx ,.$$

A força normal generalizada F é então:

$$F = \sum_{i=0}^6 F_i .$$

E as rigidezes geométricas foram calculadas pelas seguintes expressões:

$$K_{g6} = \int_{L_5}^L \left[F_0 + m_{VI} (L_6 - x) g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right] ,$$

$$K_{g5} = \int_{L_4}^{L_5} \left[F_0 + F_6 + m_V (L_5 - x) g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right] ,$$

$$K_{g4} = \int_{L_3}^{L_4} \left[F_0 + F_6 + F_5 + m_{IV} (L_4 - x) g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right] ,$$

$$\mathbf{K}_{g3} = \int_{L_2}^{L_3} \left[F_0 + F_6 + F_5 + F_4 + m_{III}(L_3 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right],$$

$$\mathbf{K}_{g2} = \int_{L_1}^{L_2} \left[F_0 + F_6 + F_5 + F_4 + F_3 + m_{II}(L_2 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right].$$

$$\mathbf{K}_{g1} = \int_0^{L_1} \left[F_0 + F_6 + F_5 + F_4 + F_3 + F_2 + m_1(x)(L_1 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right].$$

A rigidez geométrica generalizada \mathbf{K}_g da estrutura é, portanto:

$$\mathbf{K}_g = \sum_{i=1}^6 \mathbf{K}_{gi}$$

Rigidez elástica generalizada

As parcelas da rigidez elástica são:

$$\mathbf{K}_{01} = \int_0^{L_1} EI(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx,$$

$$\mathbf{K}_{02} = \int_{L_1}^{L_2} EI_2 \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx,$$

que, de forma análoga ao segundo trecho, para os demais, pode ser escrita como

$$\mathbf{K}_{0i} = \int_{L_{i-1}}^{L_i} EI_i \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

E a rigidez elástica generalizada K_0 será dada pela soma de suas parcelas, logo:

$$K_0 = \sum_{i=1}^6 K_{0i}$$

7.1.4 Cálculo da frequência

As frequências do primeiro modo de vibração da estrutura pelo método proposto são as seguintes: modelo linear = 0,569799 Hz, modelo não-linear = 0,562350 Hz.

7.1.5 Ação do vento

7.1.5.1 Forças estáticas devidas ao vento

Os parâmetros empregados na determinação das forças estáticas devidas a ação do vento foram:

- fator topográfico $S_1 = 1,0$;
- fator de rugosidade do terreno S_2 correspondente à categoria III, classe B, com os parâmetros $p = 0,105$, $b = 0,940$ e $F_r = 0,980$;
- fator estatístico $S_3 = 1,1$;
- velocidade básica do vento $V_0 = 45$ m/s.

7.1.5.2 Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88

Os parâmetros usados na determinação da resposta dinâmica pelo modelo contínuo simplificado da NBR 6123/88 foram os seguintes: largura da edificação 0,875 m; altura da edificação 48 m; categoria do terreno III; velocidade básica do vento e fatores estatísticos como descrito no item anterior.

A NBR 6123/88 sugere o expoente de 1,7 para a forma modal e uma razão de amortecimento crítico de 0,008. Para o cálculo da frequência recorrer-se-á, subsidiariamente, à recomendação contida na Tabela 6.4 (Tabela 19 da NBR 6123/88), item *Edifícios com estrutura de aço soldada*. O inverso da expressão $0,29\sqrt{h} - 0,4$, portanto, fornece $f_1 = 0,621435$ Hz, um resultado distante 9% do calculado pelo método proposto neste trabalho e 22,27% do cálculo efetuado pelo MEF. Com isso, relação adimensional $V_p/(f_1L)$ torna-se igual a 0,031. Adotando a taxa de amortecimento crítico ζ igual a 0,008 chega-se a um coeficiente de amplificação dinâmica ξ de 2,406; obtido por interpolação linear.

Uma segunda avaliação, usando o modelo simplificado da NBR 6123/88, foi feita sob condições não-lineares. Esse modelo foi chamado de Modelo Simplificado Não-Linear por estar apoiado na frequência e na forma do primeiro modo de vibração do modelo não-linear. A frequência da estrutura sob não-linearidade geométrica é 0,48318 Hz. Com isso, a relação adimensional $V_p/(f_1L)$ é 0,039, o que conduz a um fator de amplificação dinâmica ξ de 2,519, considerando a taxa de amortecimento crítico já adotada.

7.1.5.3 Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88

A resposta dinâmica pelo modelo dinâmico discreto linear foi calculada com base na frequência de 0,429870 Hz, $V_p/(f_1L) = 0,038$, $\xi = 2,590$; e demais parâmetros para a ação do vento como citados anteriormente. É válido observar que a frequência do primeiro modo de vibração, obtida pelo método proposto, conforme descrito no item 7.4.3, foi de 0,569799 Hz e, pelo Método dos Elementos Finitos, foi de 0,483026 Hz, apresentando uma diferença de 16,42%, decorrente do ligeiro afastamento das formas de vibração resultantes de cada método.

O cálculo da resposta dinâmica com a inclusão da não-linearidade geométrica foi feito levando-se em conta as contribuições até o 5º modo de vibração. Para o primeiro modo a relação adimensional $V_p/(f_1L)$ e o coeficiente de amplificação dinâmica são os mesmo do Mode-

lo Simplificado Não-linear, presentes no item anterior. Para os modos de 2 a 5, a frequência, a relação adimensional e o coeficiente de amplificação dinâmica são, respectivamente: 2,32969 Hz, 0,008 e 1,895; 5,687144 Hz, 0,003 e 1,613; 10,06893 Hz, 0,002 e 1,588; 15,817035 Hz, 0,001 e 1,463.

7.1.6 Análise dos resultados

Inicia-se a análise dos resultados avaliando a formulação desenvolvida no método proposto por meio da intensidade do esforço normal. O modelo elaborado no programa de Elementos Finitos serve como referência. Os esforços normais na estrutura por ambos os métodos estão na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Estrutura 1: esforço normal.

L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença	
			Absoluta	(%)
48,00	3,355520	3,355520	0,0000	0,000000
44,00	6,786842	6,786842	0,0000	-0,000001
38,00	16,585633	16,585633	0,0000	-0,000001
32,00	26,964392	26,964392	0,0000	-0,000001
25,00	40,426203	40,426204	0,0000	-0,000002
11,00	70,056344	70,056345	0,0000	-0,000002
0,00	102,174047	102,174049	0,0000	-0,000002

A diferença entre a frequência de vibração do modo fundamental, calculada sob não-linearidade geométrica, pelo método proposto, de 0,562350 Hz e a obtida pelo Método dos Elementos Finitos, de 0,483026 Hz, é de 16%.

Pela expressão adotada na NBR 6123/88, a frequência calculada para o primeiro modo de vibração foi de 0,621435 Hz, 35,13% acima da frequência calculada pela solução proposta nesta Tese.

Verificou-se um ligeiro afastamento na forma modal dada pela função trigonométrica, assumida como função de forma do método proposto, e a obtida pelo modelo não-linear pelo MEF, como será discutido ao final desta seção.

A frequência calculada pela expressão (4.19) foi de 0,403193 Hz, o que representa uma diferença de 28,30 % em relação ao valor exato do método.

Os resultados críticos da ação do vento na estrutura são encontrados na comparação entre a análise estática e a análise pelo modelo dinâmico simplificado linear, onde o momento fletor da análise simplificada linear alcança o valor de 1,49 vezes o valor do momento fletor da análise estática.

Embora o coeficiente de amplificação dinâmica usado no modelo simplificado não-linear seja 4,6% superior ao do modelo simplificado linear, o seu resultado, na comparação como modelo estático, situou-se abaixo do modelo simplificado linear, com uma relação entre os momentos de 1,46, o que revela a influência que a forma modal assumida no modelo simplificado linear exerce nos resultados da resposta dinâmica da estrutura.

Computando-se as contribuições até o 5° modo de vibração do modelo dinâmico discreto não-linear, a relação entre o momento fletor máximo na estrutura e o resultado obtido pela análise estática é de 1,33 vezes (33,34%), apresentando uma diferença de 399,73 kNm.

Avaliando-se os resultados obtidos nas análises discretas não-lineares verifica-se uma pequena influência da contribuição dos modos de vibração acima do fundamental, resultando em uma diferença de 0,44%, quando computadas exclusivamente as contribuições do 1° modo com a superposição das contribuições do 1° ao 5° modo, pelo critério da raiz quadrada da soma dos quadrados. As flutuações resultantes do primeiro modo de vibração são as que aportam maior contribuição para a resposta dinâmica da estrutura, 64% da resposta total, mesmo quando computadas as contribuições até o 5° modo, conforme disposto na Tabela 7.4.

Já as resposta dinâmicas obtida pelos modelos dinâmicos discretos, linear e não-linear, levando-se em conta apenas o 1° modo, guardam entre si uma reduzida diferença de 0,52%. A diferença entre a frequência fundamental do modelo linear e a do modelo não-linear, de 2%, elevou o coeficiente de amplificação dinâmica em 0,37%. Com isso, o momento na estrutura foi acrescido de 8,09 kNm.

Tabela 7.4 – Estrutura 1: momentos fletores da análise discreta não-linear.

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46	2,77	8,24	3,63	2,14	1,02	0,56
44	6,89	19,59	8,30	4,58	1,96	0,91
42	12,41	35,11	13,94	6,87	2,41	0,72
40	19,69	55,64	20,20	8,50	2,15	0,05
38	28,78	80,76	26,50	9,17	1,27	0,75
36	39,66	110,14	32,31	8,71	0,01	1,36
34	52,35	143,46	37,15	7,10	1,39	1,50
32	66,84	180,29	40,67	4,52	2,56	1,12
31	74,80	199,91	41,82	2,98	2,97	0,77
30	83,33	220,34	42,50	1,30	3,23	0,34
29	92,43	241,52	42,70	0,47	3,34	0,14

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
28	102,10	263,39	42,40	2,26	3,27	0,62
27	112,33	285,92	41,59	4,02	3,04	1,06
26	123,10	309,04	40,28	5,72	2,66	1,44
25	134,42	332,72	38,47	7,29	2,15	1,73
24	146,28	356,92	36,14	8,68	1,52	1,89
23	158,70	381,63	33,29	9,85	0,81	1,92
22	171,68	406,79	29,93	10,76	0,05	1,81
21	185,22	432,37	26,09	11,37	0,72	1,58
20	199,30	458,32	21,79	11,67	1,46	1,23
19	213,91	484,60	17,06	11,64	2,13	0,80
18	229,05	511,16	11,94	11,27	2,70	0,31
17	244,69	537,98	6,45	10,55	3,15	0,20
16	260,84	565,01	0,63	9,50	3,44	0,69
15	277,49	592,23	5,48	8,12	3,55	1,12
14	294,61	619,60	11,86	6,43	3,49	1,47
13	312,19	647,11	18,46	4,45	3,23	1,71

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
12	330,24	674,71	25,25	2,22	2,79	1,82
11	348,72	702,40	32,21	0,24	2,17	1,78
10	367,63	730,16	39,30	2,90	1,39	1,60
9	386,98	757,97	46,50	5,74	0,45	1,27
8	406,78	785,83	53,80	8,73	0,63	0,80
7	427,02	813,72	61,18	11,86	1,82	0,19
6	447,70	841,63	68,62	15,09	3,13	0,52
5	468,83	869,57	76,11	18,40	4,51	1,34
4	490,38	897,52	83,63	21,78	5,96	2,23
3	512,35	925,49	91,18	25,19	7,45	3,17
2	534,63	953,45	98,74	28,63	8,96	4,15
1	557,18	981,42	106,30	32,09	10,49	5,14
0	579,96	1009,39	113,87	35,54	12,03	6,14

A Tabela 7.5 apresenta o valor dos momentos fletores na estrutura devidos à ação do vento das análises descritas anteriormente, comparando-as ao modelo estático.

Tabela 7.5 – Estrutura 1: momentos fletores na estrutura.

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46	5,19	10,86	10,90	11,66	11,91	11,97	11,98	14,20	14,55	14,55
44	12,93	26,13	26,21	27,90	28,38	28,47	28,49	34,92	35,78	35,78
42	23,33	46,89	47,04	49,70	50,32	50,39	50,40	61,96	63,45	63,45
40	37,12	74,35	74,59	78,13	78,73	78,77	78,77	96,46	98,71	98,71
38	54,40	108,11	108,45	112,67	113,16	113,17	113,17	138,03	141,14	141,14
36	75,13	147,83	148,29	152,91	153,24	153,24	153,25	186,09	190,09	190,09

z (m)	Análise		ADL (kNm)	Análise Dinâmica Não-Linear Combinação das contribuições modais					ADSL (kNm)	ADSNL (kNm)
	Estática (kNm)	Modo 1 (kNm)		1 e 2 (kNm)	1 a 3 (kNm)	1 a 4 (kNm)	1 a 5 (kNm)			
34	99,45	193,83	193,24	198,54	198,71	198,72	198,73	240,29	245,15	
32	127,32	244,61	243,88	249,13	249,18	249,20	249,20	300,05	305,70	
31	142,69	271,90	271,09	276,21	276,23	276,26	276,26	331,95	337,95	
30	159,21	300,55	299,66	304,59	304,60	304,62	304,62	365,40	371,69	
29	176,88	330,50	329,53	334,23	334,23	334,25	334,25	400,32	406,85	
28	195,70	361,70	360,65	365,08	365,09	365,11	365,11	436,63	443,33	
27	215,66	394,09	392,95	397,08	397,11	397,13	397,13	474,24	481,03	

z	(m)	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
		Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
					Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)			
26	236,75	426,38	427,60	430,21	430,26	430,27	430,27	430,27	513,07	519,87	
25	258,96	460,89	462,20	464,40	464,48	464,49	464,49	464,49	553,03	559,76	
24	282,30	496,45	497,84	499,66	499,76	499,77	499,77	499,77	594,05	600,62	
23	306,82	533,06	534,54	535,99	536,11	536,11	536,11	536,12	636,13	642,43	
22	332,52	570,68	572,25	573,34	573,48	573,48	573,48	573,49	679,20	685,11	
21	359,40	609,24	610,90	611,68	611,83	611,83	611,83	611,84	723,17	728,59	
20	387,44	648,70	650,45	650,97	651,11	651,12	651,12	651,12	767,97	772,78	

z (m)	Análise		ADL (kNm)	Análise Dinâmica Não-Linear Combinação das contribuições modais					ADSL (kNm)	ADSNL (kNm)
	Estática (kNm)	Modo 1 (kNm)		1 e 2 (kNm)	1 a 3 (kNm)	1 a 4 (kNm)	1 a 5 (kNm)			
19	416,63	690,85	689,01	691,15	691,29	691,29	691,29	691,29	813,54	817,61
18	446,95	732,05	730,12	732,19	732,31	732,32	732,32	732,32	859,79	863,01
17	478,40	773,99	771,97	774,03	774,14	774,14	774,14	774,14	906,68	908,92
16	510,97	816,65	814,54	816,65	816,73	816,74	816,74	816,74	954,14	955,26
15	544,63	859,97	857,76	859,99	860,05	860,06	860,06	860,06	1002,10	1002,00
14	579,37	903,91	901,61	904,02	904,05	904,06	904,06	904,06	1050,52	1049,06
13	615,18	948,43	946,05	948,69	948,71	948,72	948,72	948,72	1099,33	1096,40

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
12	652,04	991,03	993,51	993,98	993,98	993,99	993,99	993,99	1148,50	1143,98
11	689,93	1036,53	1039,10	1039,83	1039,83	1039,83	1039,83	1039,84	1197,96	1191,76
10	728,85	1082,52	1085,17	1086,22	1086,23	1086,23	1086,23	1086,23	1247,68	1239,70
9	768,81	1128,99	1131,73	1133,15	1133,17	1133,17	1133,17	1133,17	1297,64	1287,77
8	809,87	1175,94	1178,77	1180,60	1180,64	1180,64	1180,64	1180,65	1347,79	1335,95
7	852,03	1223,36	1226,28	1228,56	1228,65	1228,65	1228,65	1228,65	1398,12	1384,23
6	895,34	1271,24	1274,25	1277,03	1277,16	1277,17	1277,17	1277,17	1448,58	1432,58
5	939,79	1319,58	1322,68	1325,98	1326,17	1326,18	1326,18	1326,18	1499,16	1480,99

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
4	985,41	1368,03	1371,54	1375,40	1375,66	1375,68	1375,68	1375,68	1549,75	1529,41
3	1032,18	1416,57	1420,81	1425,27	1425,60	1425,63	1425,63	1425,64	1600,36	1577,83
2	1079,84	1465,13	1470,40	1475,46	1475,89	1475,93	1475,93	1475,94	1650,97	1626,25
1	1128,36	1513,68	1520,25	1525,96	1526,47	1526,53	1526,53	1526,54	1701,58	1674,67
0	1177,67	1562,24	1570,33	1576,69	1577,31	1577,38	1577,38	1577,40	1752,19	1723,09
Relação	1,00	1,33	1,33	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,49	1,46
D kNm	0,00	384,57	392,66	399,02	399,64	399,71	399,71	399,73	574,52	545,43
D %	0,00%	32,66%	33,34%	33,88%	33,94%	33,94%	33,94%	33,94%	48,78%	46,31%

(ADDL – Análise Dinâmica Discreta Linear, ADSL – Análise Dinâmica Simplificada Linear, ADSNL – Análise Dinâmica Simplificada Não-Linear).

O gráfico da Figura 7.5 apresenta os resultados obtidos para a resposta da ação do vento sobre a estrutura. De baixo para cima, nesta ordem, estão: a análise estática, as análises dinâmicas discretas linear e não-linear do 1° modo e modos superiores até o 5° e as análises dinâmicas simplificadas.

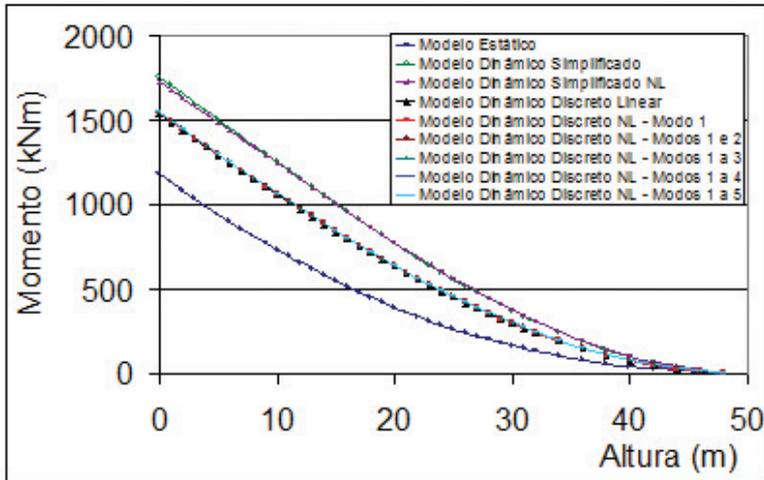


Figura 7.5 – Ação do vento na estrutura 1.

As formas modais da NBR 6123/88, a do Método dos Elementos Finitos e do método proposto constam na Figura 7.6(a).

A substituição do expoente (γ) da forma modal sugerida pela NBR 6123/88, expressão (6.6), por 1,965, propicia uma melhor aproximação à forma modal do modelo não-linear desta estrutura, pois a curva definida com esse novo expoente oferece pontos mais próximos aos da forma modal não-linear, como pode ser observado na Figura 7.6(b).

O expoente sugerido anteriormente supera em 16% o valor do recomendado pela NBR 6123/88.

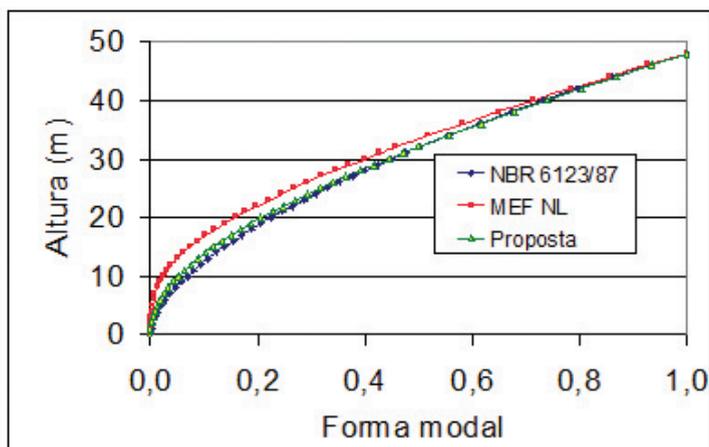
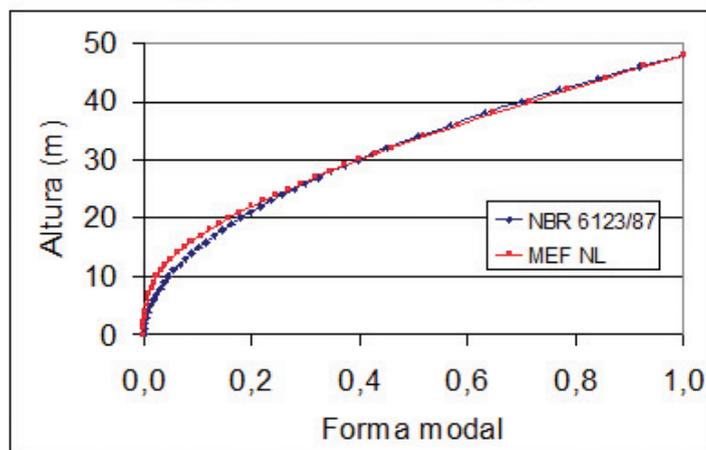
(a) expoente da forma modal: $\gamma = 1,7$ (b) expoente da forma modal: $\gamma = 1,965$

Figura 7.6 – Estrutura 1 – Comparativo das formas modais: (a) usada na análise, (b) sugerida.

7.2 ESTRUTURA 2 – POSTE METÁLICO DE 60,80 M

7.2.1 Dados e geometria

Foi analisado um poste metálico destinado também ao suporte de sistemas irradiantes de sinal de telefonia móvel celular. A estrutura possui 60,80 metros de altura e seção transversal circular vazada com diâmetro externo (ϕ_{ext}) e espessura (e) variável conforme indicação na Tabela 7.6. Na Figura 7.7 podem ser vistas fotografias da estrutura.

A Tabela 7.7 e a Figura 7.8 apresentam os parâmetros estruturais e dos dispositivos existentes, para o cálculo da ação do vento. A esbeltez da estrutura é 280.

Tabela 7.6 – Estrutura 2: dados e discretização da superestrutura do modelo.

cota (m)	fext (cm)	e. (cm)									
60,80	94,00	0,64	45,60	108,77	0,64	30,40	123,54	0,84	15,20	138,30	0,84
59,28	95,48	0,64	44,08	110,24	0,64	28,88	125,01	0,84	13,68	139,78	0,84
57,76	96,95	0,64	42,56	111,72	0,64	27,36	126,49	0,84	12,16	141,26	0,84
56,24	98,43	0,64	41,04	113,20	0,64	25,84	127,97	0,84	10,64	142,73	0,84
54,72	99,91	0,64	39,52	114,67	0,64	24,32	129,44	0,84	9,12	144,21	0,84
53,20	101,38	0,64	38,00	116,15	0,64	22,80	130,92	0,84	7,60	145,69	0,84
51,68	102,86	0,64	36,48	117,63	0,64	21,28	132,40	0,84	6,08	147,16	0,87
50,16	104,34	0,64	34,96	119,10	0,64	19,76	133,87	0,84	4,56	148,64	0,87
48,64	105,81	0,64	33,44	120,58	0,64	18,24	135,35	0,84	3,04	150,12	0,87
47,12	107,29	0,64	31,92	122,06	0,84	16,72	136,83	0,84	1,52	151,59	0,87
									0,00	153,07	0,87

Tabela 7.7 – Estrutura 2: características dos dispositivos.

Dispositivo	Área	Ca	Cota	Peso específico, peso distribuído ou peso
Poste	Variável	0,6	de 0 a 60,8 m	7850 kN/m ³
Escada	0,05 m ² /m	2,0	de 0 a 60,8 m	0,15 kN/m
Cabos	0,15 m ² /m	1,2	de 0 a 60,8 m	0,25 kN/m
Antenas e plataforma	2,8 m ²	1,0	60,8 m	1,88 kN

(Ca = Coeficiente de arrasto)



Figura 7.7 – Estrutura 2: Fotografias.

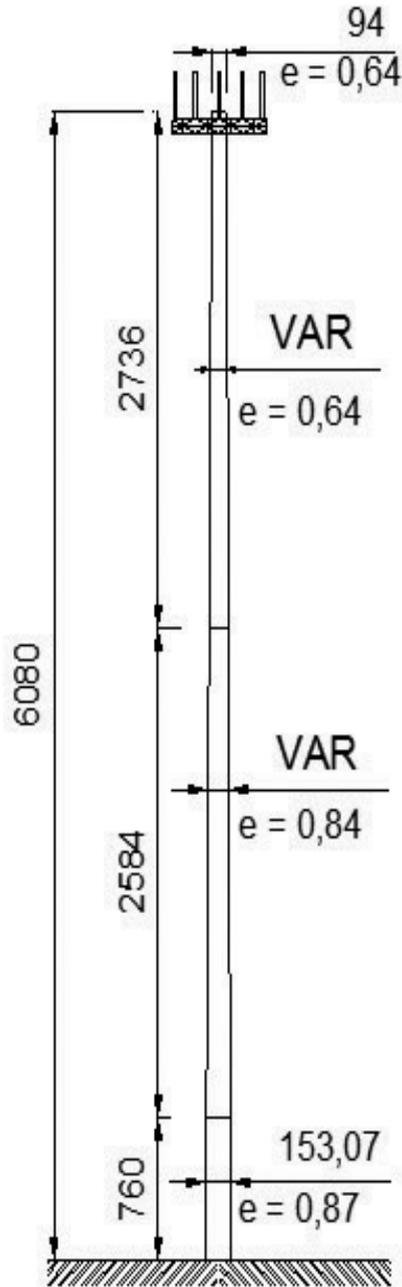


Figura 7.8 – Estrutura 2: Geometria - Poste Metálico – 60,8 m - Medidas em centímetros.

7.2.2 Modelagem por Elementos Finitos

A modelagem por Elementos Finitos da estrutura acompanhou os critérios já utilizados nas estruturas precedentes. A Figura 7.9 apresenta o modelo tridimensional, a vista lateral e a discretização da estrutura construídos pelo programa SAP2000.

Os modos de vibração e as frequências obtidas pelo Método dos Elementos Finitos são mostradas na Figura 7.10.

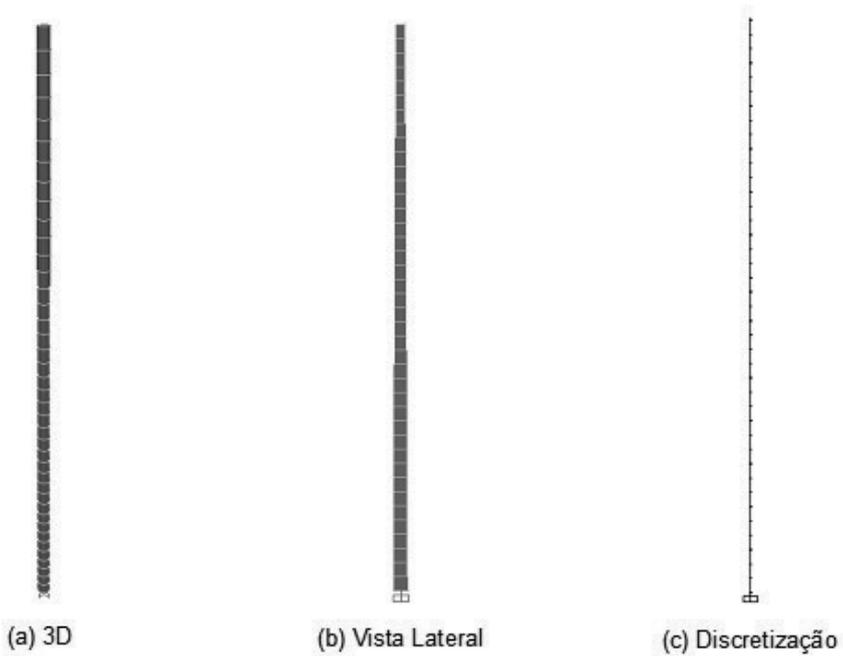
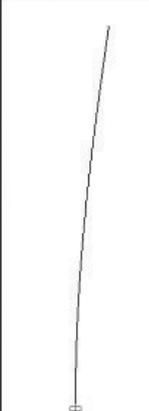
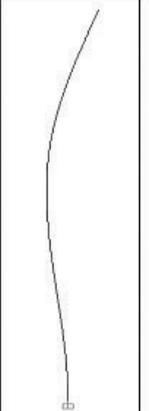
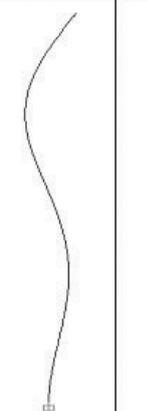
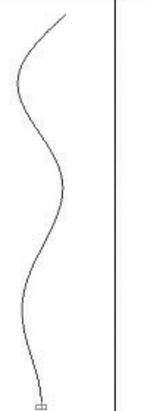
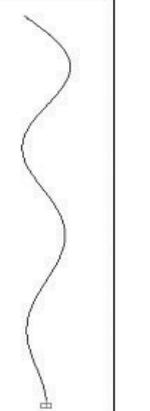


Figura 7.9 – Estrutura 2: Modelo por Elementos Finitos.

Modos naturais de vibração					
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	4º Modo	5º Modo
Linear	0,410648 Hz	1,925679 Hz	5,068824 Hz	9,690264 Hz	15,874428 Hz
NLG	0,402199 Hz	1,917513 Hz	5,060654 Hz	9,681720 Hz	15,865699 Hz

(NLG = Não-Linearidade Geométrica)

Figura 7.10 – Estrutura 2: modos naturais de vibração.

7.2.3 Aplicação do método proposto

7.2.3.1 Definição dos dados parâmetros

Os dados para aplicação do método foram os seguintes:

- módulo de elasticidade: $E = 205 \text{ GPa}$;
- densidade do aço: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- massa concentrada no topo: $m_0 = 451,20 \text{ kg}$;
- massa distribuída por unidade de altura: $m_e = 40 \text{ kg/m}$.

O diâmetro externo das seções varia linearmente com a altura com seguinte expressão:

$$D(x) = \frac{D_2 - D_1}{L_1} x + D_1$$

onde D_2 é o diâmetro do topo e D_1 é o diâmetro da base da estrutura.

As alturas e as propriedades geométricas das seções nos trechos definidos na geometria são dadas por:

$$L_1 = 7,60\text{m}, D_1 = 153,07\text{cm}, e_1 = 0,87\text{cm}, d_1(x) = D(x) - 2e_1,$$

$$A_1(x) = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_1(x)^2), I_1(x) = \frac{\pi}{64} (D(x)^4 - d_1(x)^4);$$

$$L_2 = 33,44\text{m}, e_2 = 0,84\text{cm}, d_2(x) = D(x) - 2e_2,$$

$$A_2(x) = \frac{\pi}{4} (D(x)^2 - d_2(x)^2), I_2(x) = \frac{\pi}{64} (D(x)^4 - d_2(x)^4);$$

$$L_3 = 60,80\text{m}, D_2 = 94\text{cm}, e_3 = 0,64\text{cm}, d_3(x) = D(x) - 2e_3,$$

$$A_3(x) = \frac{\pi}{4} (D(x)^2 - d_3(x)^2), I_3(x) = \frac{\pi}{64} (D(x)^4 - d_3(x)^4).$$

7.2.3.2 Cálculo da massa generalizada

A massa generalizada foi obtida por meio das seguintes integrais:

$$m_1 = \int_0^{L_1} m_{\text{I}}(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{\text{I}}(x) = A_1(x) \rho + m_e;$$

$$m_2 = \int_{L_1}^{L_2} m_{\text{II}}(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{\text{II}}(x) = A_2(x) \rho + m_e;$$

$$m_3 = \int_{L_2}^L m_{\text{III}}(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{\text{III}}(x) = A_3(x) \rho + m_e.$$

A massa distribuída generalizada foi calculada por

$$m_R = \sum_{i=1}^3 m_i$$

E a massa generalizada total pela expressão:

$$M = m_0 + m_R$$

7.2.3.3 Cálculo da rigidez generalizada

Rigidez geométrica generalizada

Os esforços normais relativos aos trechos definidos na geometria, são

$$F_0 = m_0 g ,$$

$$F_3 = \int_{L_2}^{L_3} m_{III}(x) g dx ,$$

$$F_2 = \int_{L_1}^{L_2} m_{II}(x) g dx , \text{ e}$$

$$F_1 = \int_0^{L_1} m_I(x) g dx ,$$

A força normal generalizada F foi obtida pela soma dessa parcelas:

$$F = \sum_{i=0}^3 F_i .$$

As rigidezes geométricas foram calculadas pelas seguintes integrais:

$$K_{g3} = \int_{L_2}^{L_3} \left[F_0 + m_{III}(x)(L_3 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

$$K_{g2} = \int_{L_1}^{L_2} \left[F_0 + F_3 + m_{II}(x)(L_2 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

$$K_{g1} = \int_{L_2}^{L_3} \left[F_0 + F_3 + F_2 + m_1(x)(L_1 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

A rigidez geométrica generalizada é:

$$K_g = \sum_{i=1}^3 K_{gi}$$

Rigidez elástica generalizada

As parcelas da rigidez elástica para os intervalos já definidos são:

$$K_{01} = \int_0^{L_1} EI_1(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx,$$

$$K_{02} = \int_{L_1}^{L_2} EI_2(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx \text{ e}$$

$$K_{03} = \int_{L_2}^L EI_3(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx.$$

E a rigidez à flexão generalizada K_0 é, portanto:

$$K_0 = \sum_{i=1}^3 K_{0i}$$

7.2.3.4 Cálculo da frequência

As frequências do primeiro modo de vibração da estrutura pelo método proposto são: modelo linear = 0,411504 Hz, modelo não-linear = 0,403130 Hz.

7.2.4 Ação do vento

7.2.4.1 Forças estáticas devidas ao vento

Os parâmetros empregados na determinação das forças estáticas devidas a ação do vento foram: fator topográfico $S_1 = 1,2$; fator de rugosidade do terreno S_2 correspondente à categoria III, classe C, com os parâmetros $p = 0,115$, $b = 0,930$ e $F_r = 0,950$; fator estatístico $S_3 = 1,1$; velocidade básica do vento $V_0 = 40$ m/s.

7.2.4.2 Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88

Os parâmetros usados na determinação da resposta dinâmica pelo modelo contínuo simplificado da NBR 6123/88 foram os seguintes: largura da edificação 1,235 m; altura da edificação para o cálculo da frequência 60,80 m; categoria do terreno, velocidade básica do vento e fatores estatísticos como descrito no item anterior. A frequência fundamental foi obtida fazendo $T_1 = 0,29\sqrt{h} - 0,4$ (Tabela 6.4), logo $f_1 = 0,537272$ Hz. A forma modal foi obtida pela expressão (6.6) com γ igual a 1,7. A relação adimensional $V_p/(f_1 L)$, para esse caso, é 0,038. Adotando a taxa de amortecimento crítico ζ igual a 0,008 chega-se a um coeficiente de amplificação dinâmica ξ igual a 2,471.

Para desenvolvimento do modelo simplificado não-linear, tomou-se a frequência e o modo de vibração da estrutura sob não-linearidade geométrica. A frequência do modelo não-linear é 0,402115 Hz. Com isso, a relação adimensional $V_p/(f_1 L)$ é de 0,050, o que conduz a um fator de amplificação dinâmica $\xi = 2,603$, considerando a taxa de amortecimento crítico já adotada.

7.2.4.3 Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88

A resposta dinâmica pelo modelo dinâmico discreto linear foi calculada com base nos parâmetros e relações apresentadas no item anterior.

Os parâmetros usados no cálculo da resposta dinâmica pelo modelo discreto, com a inclusão da não-linearidade geométrica, foram descritos na análise simplificada não-linear, apresentada também no item anterior. Para os modos de 2 a 5 os fatores de amplificação dinâmica, dadas as frequências mostradas na Figura 7.10, são, respectivamente: 1,963; 1,647; 1,599; 1,463.

7.2.5 Análise dos resultados

Os esforços normais na estrutura pelo método proposto e pelo MEF estão na Tabela 7.13.

Tabela 7.8 – Estrutura 2: esforço normal.

L	Proposto	MEF	Diferença	
			Absoluta	(%)
(m)	(kN)	(kN)		
60,80	4,421760	4,421760	0,0000	0,0000000
33,44	60,275586	60,275587	0,0000	-0,0000017
7,60	139,796072	139,796074	0,0000	-0,0000018
0,00	166,504082	166,504085	0,0000	-0,0000018

A frequência do primeiro modo de vibração obtida pelo método proposto, como descrito no item 7.4.3, foi de 0,403130 Hz e pelo Método dos Elementos Finitos foi de 0,402115 Hz, apresentando uma diferença de 0,23%.

Encontra-se o valor de 0,307058 Hz no cálculo dessa frequência quando feita pela expressão (4.19), o que representa uma diferença de 23,83% em relação ao cálculo exato; de 23,66% em relação ao MEF e de 42,85% em relação à expressão adotada da NBR 6123/88 (0,537272 Hz).

Os resultados críticos para a ação do vento na estrutura voltam a ser encontrados na comparação entre o modelo estático e os modelos dinâmicos simplificados. Com o modelo dinâmico simplificado não-linear, a relação entre o momento fletor máximo na estrutura é de 2,22 vezes, que representa uma diferença 3827,93 kNm (122,41%).

Nas análises discretas não-lineares verifica-se uma pequena influência da contribuição dos modos de vibração acima do fundamental. Quando computadas as contribuições do vento médio e as flutuações do 1° ao 5° modo, pelo critério da raiz quadrada da soma dos quadrados, surge uma diferença de 1,56% em relação à análise que inclui apenas a combinação do vento médio com o primeiro modo. As flutuações resultantes do primeiro modo de vibração são as que aportam maior contribuição na resposta da estrutura, retendo 67% do esforço total, quando se adiciona exclusivamente o primeiro modo de vibração.

A diferença entre a análise discreta não-linear e análise das forças estáticas, prevista no item 4 da NBR 6123/88 (modelo estático), é de 60,90%, conforme mostrado na Tabela 7.9 .

Analisando os resultados obtidos da resposta dinâmica dos modelos discretos, linear e não-linear, observa-se uma diferença na frequência do primeiro modo de 2,10% e do fator de amplificação dinâmica de 0,38%. Com isso, o momento na estrutura foi acrescido de 75,60 kNm, uma diferença de 1,55%.

A Tabela 7.9 apresenta o valor dos momentos fletores do vento médio e das flutuações correspondentes aos modos de vibração de 1 a 5, da análise dinâmica discreta não-linear.

Tabela 7.9 – Estrutura 2: momentos fletores da análise discreta não-linear.

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
60,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
59,28	5,98	12,58	3,39	0,69	0,65	0,22
57,76	13,91	31,01	8,10	1,56	1,36	0,41
56,24	23,82	55,14	13,79	2,46	1,90	0,45
54,72	35,70	84,78	20,15	3,26	2,06	0,28
53,20	49,55	119,74	26,85	3,82	1,68	0,17
51,68	65,38	159,84	33,58	4,03	0,66	0,90
50,16	83,19	204,89	40,04	3,80	1,05	1,86
48,64	102,98	254,68	45,92	3,05	3,42	2,99
47,12	124,74	309,03	50,96	1,75	6,38	4,16
45,60	148,49	367,73	54,89	0,13	9,78	5,29
44,08	174,21	430,58	57,48	2,59	13,46	6,26
42,56	201,90	497,37	58,51	5,59	17,23	6,99
41,04	231,56	567,89	57,81	9,07	20,87	7,43

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
39,52	263,18	641,95	55,21	12,96	24,19	7,56
38,00	296,76	719,34	50,59	17,18	27,04	7,43
36,48	332,28	799,85	43,85	21,61	29,27	7,07
34,96	369,75	883,29	34,92	26,15	30,80	6,59
33,44	409,14	969,45	23,76	30,69	31,61	6,08
31,92	450,44	1058,27	10,27	35,10	31,68	5,63
30,40	493,65	1149,93	5,92	39,25	30,98	5,39
28,88	538,75	1244,32	24,84	42,98	29,64	5,43
27,36	585,71	1341,20	46,42	46,20	27,83	5,81
25,84	634,52	1440,35	70,56	48,81	25,75	6,56
24,32	685,16	1541,56	97,15	50,72	23,62	7,65
22,80	737,61	1644,61	126,03	51,88	21,68	9,03
21,28	791,83	1749,31	157,06	52,25	20,13	10,62
19,76	847,81	1855,47	190,07	51,82	19,17	12,31
18,24	905,51	1962,90	224,88	50,58	18,96	13,98

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
16,72	964,89	2071,42	261,30	48,57	19,61	15,53
15,20	1025,91	2180,88	299,13	45,83	21,20	16,83
13,68	1088,54	2291,11	338,20	42,40	23,76	17,81
12,16	1152,73	2401,99	378,30	38,37	27,27	18,41
10,64	1218,42	2513,37	419,25	33,82	31,68	18,60
9,12	1285,55	2625,15	460,89	28,83	36,88	18,39
7,60	1354,05	2737,22	503,05	23,49	42,75	17,81
6,08	1423,85	2849,50	545,58	17,89	49,15	16,91
4,56	1494,86	2961,92	588,37	12,10	55,94	15,77
3,04	1566,79	3074,42	631,31	6,20	62,98	14,47
1,52	1639,53	3186,95	674,33	0,24	70,15	13,08
0,00	1712,90	3299,49	717,36	5,74	77,36	11,67

A Tabela 7.10 resume os valores dos momentos fletores na estrutura devidos à ação do vento, obtidos nas análises descritas anteriormente, comparando-as ao modelo estático.

Tabela 7.10 – Estrutura 2: momentos fletores na estrutura.

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
60,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
59,28	10,29	18,11	18,34	18,79	18,81	18,83	18,83	18,83	36,69	38,24
57,76	23,97	43,86	44,43	45,47	45,51	45,53	45,54	45,54	84,97	88,58
56,24	41,06	77,08	78,10	79,79	79,85	79,88	79,88	79,88	144,44	150,61
54,72	61,59	117,60	119,18	121,53	121,59	121,61	121,61	121,61	214,68	223,90
53,20	85,56	165,25	167,48	170,44	170,50	170,51	170,51	170,51	295,27	308,01
51,68	113,00	219,85	222,82	226,30	226,35	226,35	226,35	226,35	385,79	402,53

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
			Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5	(kNm)	(kNm)	
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
50,16	143,93	281,21	285,02	288,88	288,91	288,92	288,93	485,83	507,01	
48,64	178,36	349,13	353,88	357,97	357,98	358,01	358,02	594,98	621,02	
47,12	216,30	423,44	429,19	433,35	433,35	433,42	433,44	712,83	744,13	
45,60	257,78	503,91	510,76	514,82	514,82	514,95	514,98	838,96	875,88	
44,08	302,79	590,37	598,39	602,19	602,20	602,40	602,45	972,97	1015,87	
42,56	351,36	682,59	691,86	695,27	695,30	695,60	695,65	1114,46	1163,64	
41,04	403,49	780,39	790,96	793,89	793,96	794,34	794,39	1263,04	1318,77	
39,52	459,19	883,55	895,50	897,86	897,99	898,44	898,49	1418,30	1480,84	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
38,00	518,46	991,86	1005,25	1007,02	1007,23	1007,73	1007,77	1579,86	1649,43	
36,48	581,32	1105,13	1120,02	1121,21	1121,50	1122,04	1122,07	1747,35	1824,12	
34,96	647,76	1223,14	1239,58	1240,27	1240,66	1241,19	1241,21	1920,37	2004,50	
33,44	717,78	1345,70	1363,75	1364,04	1364,52	1365,03	1365,05	2098,57	2190,19	
31,92	791,39	1472,71	1492,41	1492,46	1493,04	1493,51	1493,52	2281,58	2380,79	
30,40	868,59	1604,36	1625,76	1625,78	1626,44	1626,86	1626,87	2469,04	2575,92	
28,88	949,36	1740,50	1763,66	1763,91	1764,65	1765,00	1765,01	2660,62	2775,21	
27,36	1033,71	1880,91	1905,87	1906,67	1907,46	1907,75	1907,76	2855,97	2978,31	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
			Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5	(kNm)		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
25,84	1121,61	2025,34	2052,14	2053,86	2054,68	2054,91	2054,93	3054,77	3184,86	
24,32	1213,07	2173,56	2202,24	2205,29	2206,11	2206,29	2206,31	3256,71	3394,53	
22,80	1308,06	2325,34	2355,94	2360,74	2361,55	2361,70	2361,72	3461,47	3607,00	
21,28	1406,56	2480,47	2513,02	2520,02	2520,80	2520,91	2520,94	3668,76	3821,95	
19,76	1508,56	2638,73	2673,25	2682,92	2683,63	2683,73	2683,77	3878,30	4039,09	
18,24	1614,01	2799,91	2836,43	2849,20	2849,85	2849,94	2849,99	4089,82	4258,14	
16,72	1722,91	2963,81	3002,34	3018,67	3019,23	3019,33	3019,38	4303,07	4478,83	
15,20	1835,19	3130,22	3170,79	3191,10	3191,57	3191,68	3191,74	4517,80	4700,92	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
			Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5	(kNm)		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
13,68	1950,83	3298,96	3341,57	3366,27	3366,66	3366,78	3366,84	4733,78	4924,17	
12,16	2069,77	3469,84	3514,52	3543,97	3544,27	3544,42	3544,49	4950,80	5148,37	
10,64	2191,95	3642,69	3689,44	3723,98	3724,20	3724,40	3724,46	5168,68	5373,34	
9,12	2317,31	3817,34	3866,16	3906,09	3906,25	3906,50	3906,56	5387,22	5598,89	
7,60	2445,74	3993,62	4044,52	4090,11	4090,21	4090,53	4090,59	5606,27	5824,88	
6,08	2577,17	4170,30	4224,35	4275,82	4275,88	4276,29	4276,34	5825,38	6050,91	
4,56	2711,46	4347,29	4405,50	4463,05	4463,07	4463,59	4463,63	6044,52	6276,98	
3,04	2848,04	4524,36	4587,64	4651,42	4651,43	4652,05	4652,09	6263,67	6503,04	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
1,52	2986,73	4701,47	4770,60	4840,75	4840,75	4840,75	4841,50	4841,53	6482,81	6729,10
0,00	3127,24	4878,59	4954,19	5030,82	5030,82	5030,82	5031,70	5031,72	6701,96	6955,17
Relação	1,00	1,56	1,58	1,61	1,61	1,61	1,61	1,61	2,14	2,22
D kNm	0,00	1751,35	1826,95	1903,58	1903,58	1903,59	1904,47	1904,49	3574,72	3827,93
D %	0,00%	56,00%	58,42%	60,87%	60,87%	60,87%	60,90%	60,90%	114,31%	122,41%

(ADDL – Análise Dinâmica Discreta Linear, ADSL – Análise Dinâmica Simplificada Linear, ADSNL – Análise Dinâmica Simplificada Não-Linear).

No gráfico da Figura 7.11 podem ser encontrados os resultados obtidos para a ação do vento sobre a estrutura. O traçado mais inferior corresponde ao valor do momento fletor para a análise estática, usada originalmente para dimensionar a estrutura. Os traçados superiores subsequentes correspondem aos resultados das análises dinâmicas discretas. Logo acima se encontram as curvas das análises dinâmicas simplificadas.

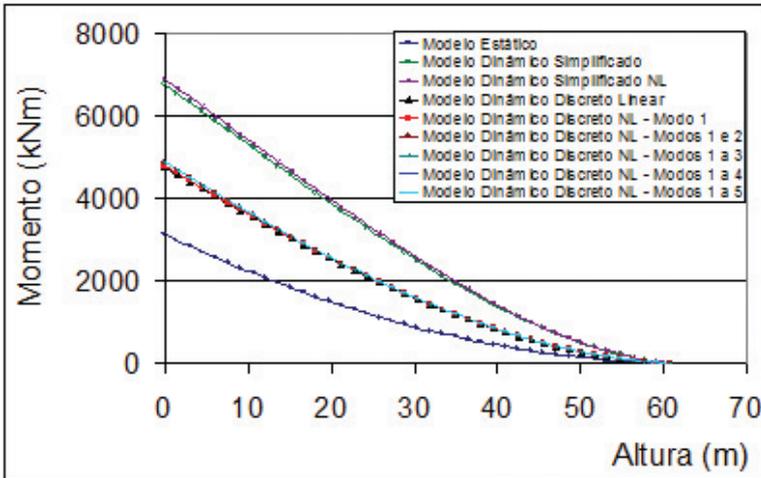


Figura 7.11 – Ação do vento na estrutura 2.

As formas modais da NBR 6123/88, a do Método dos Elementos Finitos e do método proposto constam na Figura 7.12(a).

Uma melhor aproximação à forma modal não-linear é conseguida substituindo-se o expoente da expressão (6.6) por 1,775; pois a curva definida com esse novo expoente oferece pontos mais próximos à forma modal não-linear, como pode ser observado na Figura 7.12(b).

O expoente sugerido anteriormente supera em 4,4% o valor do recomendado pela NBR 6123/88.

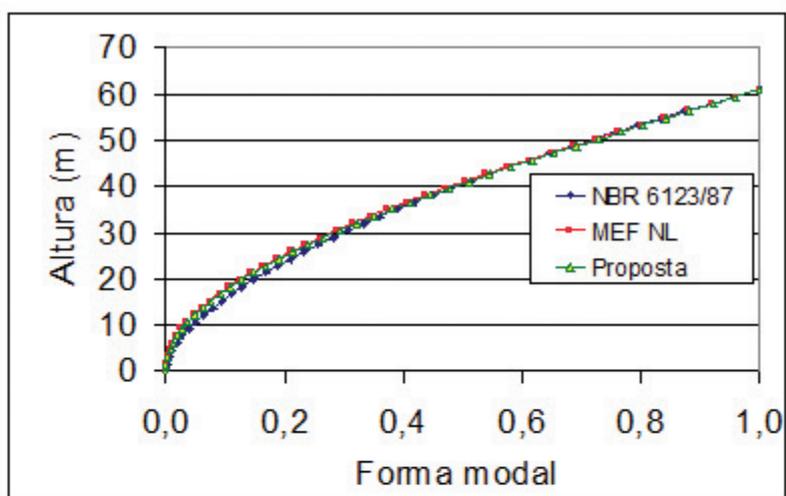
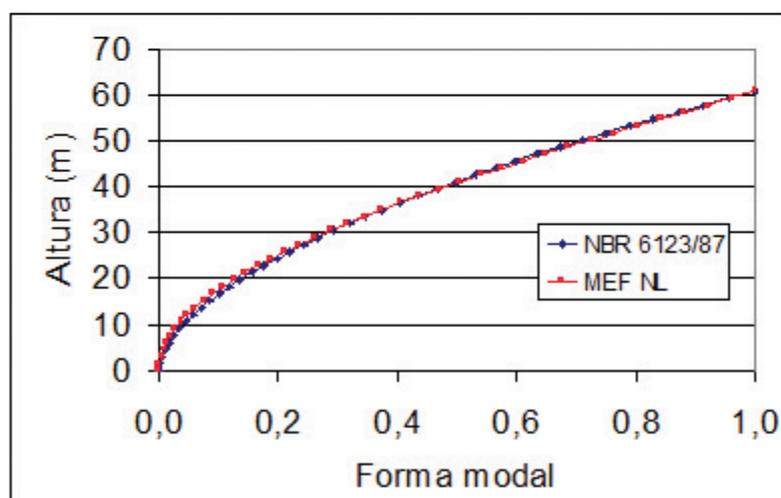
(a) expoente da forma modal: $\gamma = 1,7$ (b) expoente da forma modal: $\gamma = 1,775$

Figura 7.12 – Estrutura 2 – comparativo das formas modais: (a) usada na análise, (b) sugerida.

7.3 ESTRUTURA 3 – POSTE DE CONCRETO ARMADO DE 40 M

7.3.1 Dados e geometria

Semelhantemente às precedentes, esta é uma estrutura destinada ao suporte de sistemas irradiantes de sinal de telefonia móvel celular. É um poste de concreto armado de 40 m de altura e com seção transversal circular vazada de diâmetro externo de 60 cm. As propriedades da seção mudam ao longo do comprimento devido à mudança da espessura e da variação da área de aço na seção transversal ao longo do eixo longitudinal da estrutura. o índice de esbeltez da estrutura é $\lambda = 462$. A seção 15.8.1 da NBR – 6118/04 limita o índice de esbeltez a 200 de pilares isolados de concreto armado. Exceto para postes com força normal menor que $0,10f_{cd}A_c$, o índice de esbeltez pode ser maior. A estrutura atende a essa condição.

O concreto usado na fabricação da estrutura teve como resistência característica à compressão igual a 45 MPa e densidade de 2600 kg/m³. O cobrimento especificado para as armaduras foi de 25 mm e o aço empregado na construção do poste foi o CA-50. O módulo de elasticidade secante do concreto, de 3193 MPa, foi calculado conforme a NBR 61818/03.

A estrutura possui um conjunto de antenas e acessórios, como plataforma, escada, cabos e esteiramento, com as características da Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Características da estrutura 3 e dispositivos.

Dispositivo	Área	Ca	Cota	Peso específico, peso distribuído ou peso
Poste	0,6 m ² /m	0,6	de 0 a 40 m	25,48 kN/m ³
Escada	0,05 m ² /m	2,0	de 0 a 40 m	0,15 kN/m
Cabos	0,15 m ² /m	1,2	de 0 a 40 m	0,25 kN/m
Plataforma e suportes	1 m ²	2,0	40 m	4,90 kN
Antenas	3 m ²	1,0	40 m	1,88 kN

(Ca indica o coeficiente de arrasto)

Como se trata de uma estrutura de concreto armado é preciso levar em conta a presença do aço no momento de inércia da seção transversal, o que deve ser feito por meio da homogeneização da seção de concreto.

Seja uma seção circular vaza de diâmetro externo D . Uma barra de aço qualquer b_i ocupa uma posição i na seção definida por Rb_i e θ_i , conforme representado na Figura 7.13.

Rb_i determina a posição do centro de cada barra em relação ao centro da seção. Como todas as barras possuem o mesmo raio, por simplicidade de notação, se fará $Rb_i = Rb$, logo:

$$Rb = \frac{D}{2} - cob - \frac{d_{bi}}{2},$$

onde cob é o cobrimento das armaduras e d_{bi} é o diâmetro da barra i .

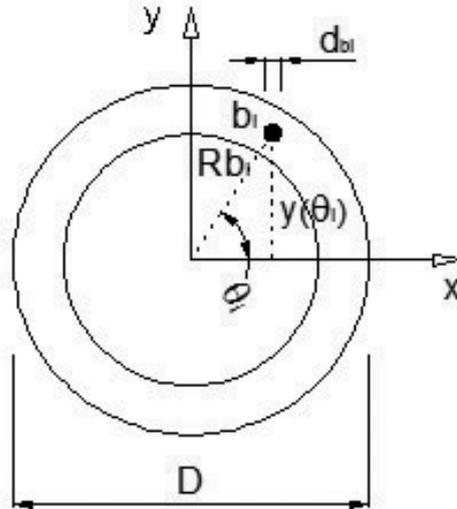


Figura 7.13 – Estrutura 3: parâmetros para homogeneização da seção.

Sendo θ a variável independente, a distância entre o centro de cada barra em relação ao eixo central de inércia da seção é $y(\theta) = \text{sen}(\theta)Rb$. O espaçamento entre os centros de cada barra da seção foi obtido por $\text{esp} = \frac{2\pi Rb}{nb}$, e a defasagem angular entre elas

por $\Delta\theta = \frac{\text{esp}}{Rb}$. Fazendo-se θ variar de 0 a 2π em intervalos definidos

por $\Delta\theta$, a inércia total das barras de aço em relação à seção da estrutura pôde ser obtida pelo teorema dos eixos paralelos com a expressão

$$I_s = \sum_0^{2\pi} \left(\frac{\pi d_b^4}{64} + y(\theta)^2 \frac{\pi d_b^2}{4} \right)$$

O momento de inércia homogeneizado das barras de aço será, pois:

$$I_{\text{shom}} = \sum_{\theta}^{2\pi} I(\theta) \left(\frac{E_s}{E_{\text{csec}}} - 1 \right).$$

A parcela da inércia de concreto é $I_{\text{conc}} = I - I_s$, com I sendo a inércia da seção circular. A inércia total da seção homogeneizada será obtida por $I_{\text{tot}} = I_{\text{conc}} + I_{\text{shom}}$.

Para encontrar um fator F que multiplique a inércia nominal da seção em termos da inércia homogeneizada da seção total de aço faz-se

$$F = 1 + \frac{I_{\text{shom}}}{I_{\text{tot}}}, \quad (7.1)$$

Os fatores de homogeneização, as propriedades estruturais e geometria da estrutura estão na Tabela 7.12. A estrutura está representada pela Figura 7.14.

Tabela 7.12 – Estrutura 3: propriedades da estrutura e fatores de homogeneização das seções.

Nó	Altura	f externo	Espessura	nb	f b	Fator de inércia
	(m)	(cm)	(cm)		(mm)	
41	40	60	10	20	13	1,0963
40	39	60	10	20	13	
39	38	60	10	20	13	
38	37	60	10	20	13	
37	36	60	10	20	13	
36	35	60	10	20	13	
35	34	60	10	20	13	
34	33	60	10	20	13	
33	32	60	10	20	13	
32	31	60	13	20	13	1,0869
31	30	60	12	15	16	1,0995

Nó	Altura	f externo	Espessura	nb	f b	Fator de inércia
	(m)	(cm)	(cm)		(mm)	
30	29	60	11	15	16	1,1029
29	28	60	11	15	16	
28	27	60	11	15	16	
27	26	60	11	15	16	
26	25	60	11	16	16	1,1091
25	24	60	11	17	16	1,1153
24	23	60	11	18	16	1,1214
23	22	60	11	19	16	1,1274
22	21	60	11	20	16	1,1334
21	20	60	14	20	16	1,123
20	19	60	15	15	20	1,1374
19	18	60	16	15	20	1,1354
18	17	60	13	16	20	1,1512
17	16	60	13	16	20	
16	15	60	13	17	20	1,1594

Nó	Altura	f externo	Espessura	nb	f b	Fator de inércia
	(m)	(cm)	(cm)		(mm)	
15	14	60	13	18	20	1,1675
14	13	60	13	19	20	1,1755
13	12	60	13	19	20	
12	11	60	13	20	20	1,1833
11	10	60	13	22	20	1,1987
10	9	60	16	22	20	1,1889
9	8	60	16	15	25	1,1961
8	7	60	17	15	25	1,194
7	6	60	14	16	25	1,2132
6	5	60	14	16	25	
5	4	60	14	17	25	1,2241
4	3	60	14	17	25	
3	2	60	14	17	25	
2	1	60	18	17	25	1,2136
1	0	60	18	17	25	

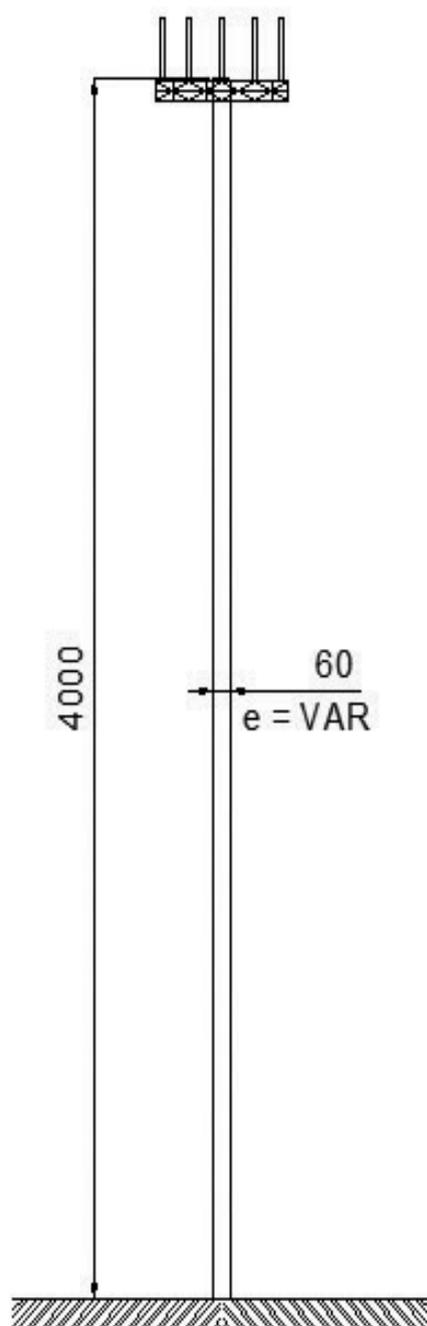


Figura 7.14 – Estrutura 3: geometria - medidas em centímetros.

7.3.2 Modelagem por Elementos Finitos

A modelagem por Elementos Finitos da estrutura acompanhou os critérios utilizados na modelagem das estruturas precedentes. As seções tiveram seus momentos de inércias majorados pelos respectivos fatores de homogeneização.

A Figura 7.15 apresenta o modelo com a discretização da estrutura. Os modos de vibração e as frequências obtidas pelo Método dos Elementos Finitos são as constantes na Figura 7.16.

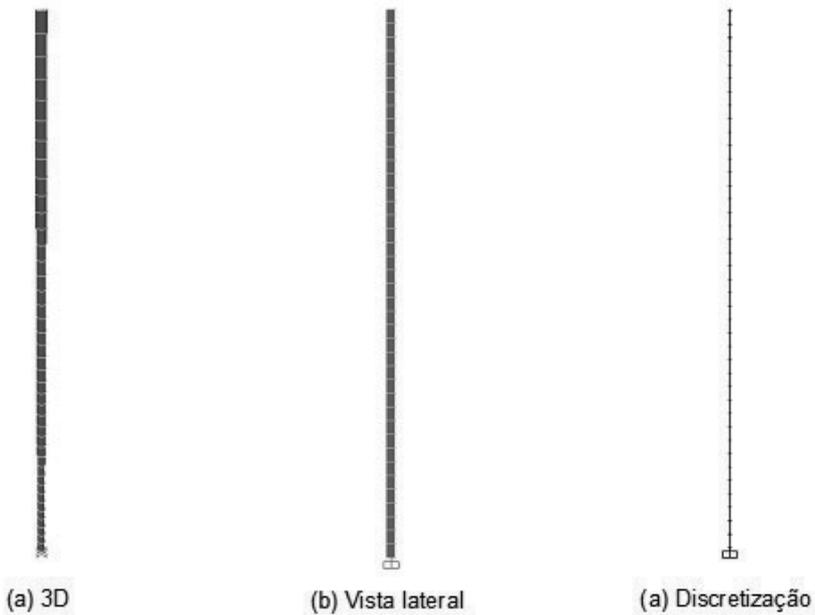
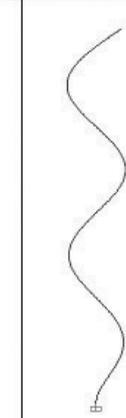


Figura 7.15 – Estrutura 3: modelo por Elementos Finitos.

Modos naturais de vibração						
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	4º Modo	5º Modo	
	Linear	0,225131 Hz	1,313132 Hz	3,627452 Hz	7,075814 Hz	11,709805 Hz
	NLG	0,201794 Hz	1,293249 Hz	3,607222 Hz	7,054504 Hz	11,688076 Hz

(NLG diz respeito à Não-Linearidade Geométrica)

Figura 7.16 – Estrutura 3: modos naturais de vibração.

7.3.3 Aplicação do método proposto

7.3.3.1 Definição dos parâmetros

Os dados utilizados na aplicação do método proposto nesta Tese foram:

- módulo de elasticidade do concreto: $E = 31931$ MPa,
- densidade do concreto: $\rho = 2600$ kg/m³,
- massa concentrada no topo: $m_0 = 692$ kg;
- massa distribuída por unidade de altura: $m_e = 40$ kg/m.

As ordenadas de interesse ao longo da altura, a área e a inércia das seções são dadas por:

$$L = L_i, \quad A_i = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_i^2) \quad \text{e} \quad I_i = \frac{\pi}{64}(D^4 - d_i^4) f_i, \quad \text{com}$$

$$i = 1, 2, \dots, 40.$$

Nas expressões anteriores, D é o diâmetro externo da estrutura, constante, nesse caso, f é o fator de homogeneização da seção e i , se refere a uma dada posição ou seção na altura.

7.3.3.2 Cálculo da massa generalizada

A massa generalizada total é obtida pelas expressões que se apresentam a seguir. A introdução dos subíndices gregos objetivam evitar a redundância de notação.

$$M = m_0 + \sum_{i=1}^{40} m_i, \text{ com}$$

$$m_i = \int_{i-1}^i m_t \phi(x)^2 \text{ sendo a massa generalizada, e}$$

$$m_t = A_i \rho + m_e \text{ a massa distribuída do intervalo } i, i;$$

$$\text{com } i, t = 1, 2, \dots, 40.$$

7.3.3.3 Cálculo da rigidez generalizada

A parcela da rigidez generalizada relativa à rigidez geométrica foi obtida por:

$$K_g = \sum_{i=1}^{40} K_{gi}, \text{ com}$$

$$K_{gi} = \int_{i-1}^i \left[F_0 + \sum_{i=1}^{40} F_i + m_t (L_i - x)g \right] \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 dx,$$

$$F_i = \int_{i-1}^i m_t g dx$$

e

$$F_0 = m_0 g$$

A rigidez elástica generalizada, por sua vez, foi encontrada por:

$$K_0 = \sum_{i=1}^{40} K_{0i}, \text{ com}$$

$$K_{0i} = \int_{i-1}^i EI_i \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 dx, \text{ com } i = 1, 2, \dots, 40.$$

Com isso, a rigidez generalizada da estrutura pôde ser calculada fazendo $K = K_0 - K_g$, considerando o esforço normal de compressão positivo.

7.3.4 Cálculo da frequência

A frequência natural da estrutura relativa ao primeiro modo de vibração, considerando a rigidez geométrica, é de 0,214575 Hz, enquanto que para o modelo linear é de 0,237367 Hz.

7.3.5 Ação do vento

7.3.5.1 Forças estáticas devidas ao vento

Os parâmetros empregados na determinação das forças estáticas devidas a ação do vento foram: fator topográfico $S_1 = 1,0$; fator de rugosidade do terreno S_2 correspondente à categoria IV, classe B, com os parâmetros $p = 0,125$, $b = 0,85$ e $F_r = 0,98$; fator estatístico $S_3 = 1,1$; velocidade básica do vento $V_0 = 35$ m/s.

7.3.5.2 Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88

Os parâmetros usados na determinação da resposta dinâmica pelo modelo contínuo simplificado da NBR 6123/88 foram os seguintes: largura da edificação 0,6 m; altura da edificação 40 m; categoria do terreno, velocidade básica do vento e fatores estatísticos como descrito no item anterior.

A frequência fundamental foi obtida fazendo $T_1 = 0,015h$ (Tabela 6.4), logo $f_1 = 1,666667$ Hz. A forma modal foi obtida pela expressão (6.6) com g igual a 1,7. A relação adimensional $V_p/(f_1 L)$ é igual a 0,009, o que leva, com uma taxa crítica de amortecimento ζ igual a 0,01, a um coeficiente de amplificação dinâmica ξ de 1,611.

O modelo simplificado não-linear foi calculado com o coeficiente de amplificação dinâmica, obtido com a frequência do modelo discreto não-linear, que será descrito adiante.

7.3.5.3 Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88

A resposta dinâmica pelo modelo dinâmico discreto linear foi calculada com base na frequência 0,225131 Hz. A relação adimensional $V_p/(f_1 L)$, nesse caso, é 0,066, e o fator de amplificação dinâmica ξ é igual a 2,313, para o amortecimento crítico de 0,01. A frequência fundamental da estrutura com a inclusão da não-linearidade geométrica é 0,201796 Hz, o que leva a um coeficiente de amplificação dinâmica ξ de 2,516. Para os modos de 2 a 5 os fatores de amplificação dinâmica, dadas as frequências apresentadas na Figura 7.16, são, respectivamente: 1,686; 1,400; 1,354; 1,236.

7.3.6 Análise dos resultados

Os esforços normais em relação às alturas definidas na discretização da estrutura 3, obtidos pela solução matemática do método proposto, e pelo Método dos Elementos Finitos, estão na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 – Estrutura 3: esforço normal.

L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença		L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença	
			Abs	%				Abs	%
40	6,7816	6,7816	0,0000	0,000000000	19	104,5230	104,5230	0,0000	0,0000000003
39	11,1760	11,1760	0,0000	0,000000003	18	110,3183	110,3183	0,0000	0,0000000003
38	15,5704	15,5704	0,0000	0,000000004	17	116,3456	116,3456	0,0000	0,0000000003
37	19,9648	19,9648	0,0000	0,000000005	16	121,6285	121,6285	0,0000	0,0000000003
36	24,3592	24,3592	0,0000	0,000000005	15	126,9115	126,9115	0,0000	0,0000000003
35	28,7535	28,7535	0,0000	0,000000006	14	132,1944	132,1944	0,0000	0,0000000004
34	33,1479	33,1479	0,0000	0,000000006	13	137,4773	137,4773	0,0000	0,0000000003

L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença		L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença	
			Abs	%				Abs	%
33	37,5423	37,5423	0,0000	0,000000006	12	142,7602	142,7602	0,0000	0,000000003
32	41,9367	41,9367	0,0000	0,000000006	11	148,0431	148,0431	0,0000	0,000000002
31	46,3311	46,3311	0,0000	0,000000006	10	153,3261	153,3261	0,0000	0,000000002
30	51,6140	51,6140	0,0000	0,000000007	9	158,6090	158,6090	0,0000	0,000000002
29	56,6168	56,6168	0,0000	0,000000008	8	164,6363	164,6363	0,0000	0,000000003
28	61,3233	61,3233	0,0000	0,000000001	7	170,6637	170,6637	0,0000	0,000000001
27	66,0299	66,0299	0,0000	0,000000006	6	176,9072	176,9072	0,0000	0,000000002
26	70,7365	70,7365	0,0000	0,000000002	5	182,4543	182,4543	0,0000	0,000000003

L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença		L (m)	Proposto (kN)	MEF (kN)	Diferença	
			Abs	%				Abs	%
25	75,4431	75,4431	0,0000	0,000000005	4	188,0013	188,0013	0,0000	0,000000002
24	80,1496	80,1496	0,0000	0,000000002	3	193,5484	193,5484	0,0000	0,000000002
23	84,8562	84,8562	0,0000	0,000000003	2	199,0955	199,0955	0,0000	0,000000001
22	89,5628	89,5628	0,0000	0,000000003	1	204,6426	204,6426	0,0000	0,000000001
21	94,2694	94,2694	0,0000	0,000000003	0	211,0862	211,0862	0,0000	0,000000001
20	98,9760	98,9760	0,0000	0,000000003					

(Abs. = Absoluta)

A frequência do primeiro modo de vibração obtida pelo método proposto, como descrito no item 7.4.3 foi de 0,215715 Hz e, pelo Método dos Elementos Finitos, foi de 0,201794 Hz, uma diferença de 6,9%. Pela NBR 6123/88 essa frequência ficou em 1,666667 Hz. No cálculo simplificado do método proposto, utilizando a Eq. (4.21), com as propriedades geométricas da estrutura de forma ponderada, encontra-se o valor de 0,189377 Hz, o que representa uma diferença de 13,91% em relação ao cálculo exato do método; de 6,15% em relação ao MEF e de 88,64% em à NBR 6123/88.

Acompanhando os resultados já encontrados, os valores críticos da ação do vento encontram-se na comparação entre o modelo estático e o modelo dinâmico discreto simplificado não-linear. A diferença do momento fletor máximo na estrutura, entre essas duas análises, atinge um valor de 61,19%.

Nas análises discretas não-lineares segue-se com uma pequena influência da contribuição dos modos de vibração acima do fundamental. Quando computadas as contribuições do vento médio e as flutuações do 1º ao 5º modo surge uma diferença de 0,006% em relação à combinação que leva em conta o vento médio e apenas a flutuação do primeiro modo, sendo, portanto, desprezível. Nesse caso, as flutuações resultantes do primeiro modo de vibração são as que aportam maior contribuição na resposta da estrutura, com 68% do valor total.

A diferença entre a análise discreta não-linear e análise das forças estáticas é de 29,07%. Os resultados das diferentes análises para a determinação da ação do vento podem ser encontradas na Tabela 7.14.

Analisando os resultados dos modelos discretos, linear e não-linear, observa-se, para o modelo não-linear, uma diminuição, na frequência do primeiro modo de vibração, de 10,34% e uma elevação do fator de amplificação dinâmica de 10,57%.

A Tabela 7.15 resume o valor dos momentos na estrutura devidos à ação do vento das análises descritas anteriormente, comparando-as ao modelo estático.

Tabela 7.14 – Estrutura 3: momentos da análise discreta não-linear.

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	2,19	1,93	0,00	0,32	0,09	0,16
38	4,62	4,76	0,01	0,75	0,20	0,36
37	7,29	8,47	0,02	1,27	0,33	0,55
36	10,20	13,02	0,02	1,83	0,45	0,71
35	13,35	18,38	0,03	2,40	0,56	0,81
34	16,73	24,52	0,04	2,95	0,64	0,83
33	20,34	31,40	0,05	3,44	0,68	0,76
32	24,18	38,99	0,06	3,86	0,69	0,61
31	28,24	47,25	0,07	4,18	0,65	0,39
30	32,52	56,22	0,08	4,37	0,57	0,13
29	37,02	65,90	0,09	4,42	0,44	0,15
28	41,73	76,23	0,10	4,32	0,29	0,41

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
27	46,65	87,14	0,10	4,08	0,12	0,62
26	51,78	98,60	0,11	3,70	0,06	0,75
25	57,11	110,57	0,11	3,20	0,24	0,80
24	62,64	123,04	0,12	2,59	0,40	0,75
23	68,37	135,95	0,12	1,90	0,53	0,61
22	74,29	149,29	0,12	1,14	0,62	0,40
21	80,39	163,01	0,12	0,33	0,68	0,14
20	86,68	177,09	0,12	0,48	0,68	0,15
19	93,15	191,54	0,12	1,28	0,64	0,42
18	99,80	206,34	0,11	2,03	0,55	0,65
17	106,62	221,49	0,11	2,69	0,42	0,80
16	113,60	236,94	0,10	3,24	0,25	0,85
15	120,75	252,64	0,09	3,66	0,07	0,81
14	128,05	268,55	0,07	3,95	0,12	0,67

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
13	135,51	284,66	0,06	4,07	0,30	0,45
12	143,11	300,94	0,05	4,04	0,45	0,19
11	150,86	317,36	0,03	3,83	0,58	0,10
10	158,75	333,91	0,01	3,46	0,66	0,38
9	166,76	350,56	0,00	2,94	0,69	0,61
8	174,90	367,30	0,02	2,26	0,66	0,77
7	183,16	384,12	0,04	1,43	0,58	0,82
6	191,53	401,00	0,06	0,48	0,44	0,76
5	200,00	417,92	0,08	0,57	0,25	0,59
4	208,56	434,87	0,10	1,69	0,02	0,33
3	217,22	451,84	0,12	2,87	0,23	0,01
2	225,92	468,82	0,15	4,07	0,50	0,39
1	234,65	485,80	0,17	5,29	0,78	0,80
0	243,41	502,78	0,19	6,51	1,06	1,22

Tabela 7.15 – Estrutura 3: momento fletor na estrutura,

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear						ADSL	ADSNL
	Estática			Combinação das contribuições modais							
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5			
(m)	(kNm)		(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
40	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	4,73		3,86	4,06	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	8,10	10,43
38	9,98		8,75	9,26	9,32	9,32	9,32	9,32	9,33	17,07	21,99
37	15,77		14,66	15,56	15,65	15,66	15,66	15,68	15,68	26,88	34,63
36	22,08		21,55	22,93	23,06	23,07	23,09	23,09	23,09	37,48	48,31
35	28,91		29,38	31,34	31,49	31,50	31,52	31,52	31,52	48,83	62,98

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	Modo 1		Combinação das contribuições modais						
			1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5				
34	36,26	40,74	38,13	40,74	40,92	40,92	40,94	60,90	78,60	
33	44,12	51,10	47,76	51,10	51,29	51,30	51,31	73,65	95,11	
32	52,49	62,40	58,25	62,40	62,59	62,59	62,60	87,04	112,47	
31	61,37	74,58	69,55	74,58	74,76	74,76	74,77	101,04	130,65	
30	70,75	87,68	81,69	87,68	87,85	87,85	87,85	115,60	149,59	
29	80,63	101,70	94,69	101,70	101,85	101,85	101,85	130,71	169,25	
28	91,00	116,57	108,45	116,57	116,69	116,69	116,69	146,32	189,60	
27	101,86	132,22	122,95	132,22	132,32	132,32	132,32	162,40	210,58	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	ADL		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
26	113,21	138,14	148,62	148,62	148,69	148,69	148,69	148,70	178,93	232,17
25	125,03	153,98	165,74	165,74	165,79	165,79	165,79	165,79	195,87	254,32
24	137,33	170,45	183,54	183,54	183,56	183,56	183,56	183,57	213,19	276,99
23	150,11	187,52	201,97	201,97	201,98	201,98	201,99	201,99	230,87	300,15
22	163,35	205,15	221,01	221,01	221,02	221,02	221,02	221,02	248,88	323,76
21	177,05	223,31	240,62	240,62	240,62	240,62	240,63	240,63	267,19	347,79
20	191,20	241,97	260,77	260,77	260,77	260,77	260,78	260,78	285,78	372,20
19	205,80	261,12	281,46	281,46	281,46	281,46	281,46	281,46	304,62	396,95

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática			Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
18	220,85		280,77	302,67	302,67	302,68	302,68	302,68	323,69	422,03
17	236,34		300,90	324,40	324,40	324,41	324,41	324,41	342,98	447,39
16	252,26		321,45	346,58	346,58	346,60	346,60	346,60	362,45	473,01
15	268,60		342,39	369,17	369,17	369,19	369,19	369,19	382,09	498,85
14	285,37		363,67	392,13	392,13	392,16	392,16	392,16	401,88	524,91
13	302,54		385,28	415,43	415,43	415,46	415,46	415,46	421,81	551,14
12	320,12		407,19	439,05	439,05	439,07	439,07	439,07	441,85	577,52
11	338,09		429,36	462,95	462,95	462,97	462,97	462,97	461,99	604,04

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática			Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
10	356,45		451,78	487,10	487,10	487,12	487,12	487,12	482,21	630,67
9	375,19		474,42	511,49	511,49	511,50	511,50	511,50	502,50	657,40
8	394,30		497,27	536,09	536,09	536,09	536,09	536,09	522,86	684,20
7	413,77		520,29	560,88	560,88	560,88	560,88	560,88	543,26	711,06
6	433,58		543,48	585,83	585,83	585,83	585,83	585,84	563,70	737,97
5	453,73		566,82	610,94	610,94	610,94	610,94	610,94	584,16	764,92
4	474,19		590,21	636,16	636,16	636,16	636,16	636,16	604,64	791,87
3	494,95		613,66	661,48	661,48	661,49	661,49	661,49	625,12	818,83

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática			Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
2	515,88		637,11	686,86	686,86	686,88	686,88	686,88	645,60	845,79
1	536,97		660,57	712,29	712,29	712,31	712,31	712,32	666,08	872,75
0	558,18		684,03	737,73	737,73	737,78	737,78	737,78	686,56	899,71
Relação	1,00		1,23	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,23	1,61
D kNm	0,00		125,85	179,55	179,55	179,60	179,60	179,60	128,38	341,53
D %	0,00%		22,55%	32,17%	32,17%	32,18%	32,18%	32,18%	23,00%	61,19%

(ADDL – Análise Dinâmica Discreta Linear, ADSL – Análise Dinâmica Simplificada Linear, ADSNL – Análise Dinâmica Simplificada Não-Linear).

No gráfico da Figura 7.17 podem ser encontrados os resultados obtidos para a ação do vento sobre a estrutura. Nele se encontram, de baixo para cima, e nessa ordem, a análise estática, as análises dinâmicas discretas intercaladas pela análise dinâmica simplificada linear e, por último, a análise dinâmica simplificada não-linear.

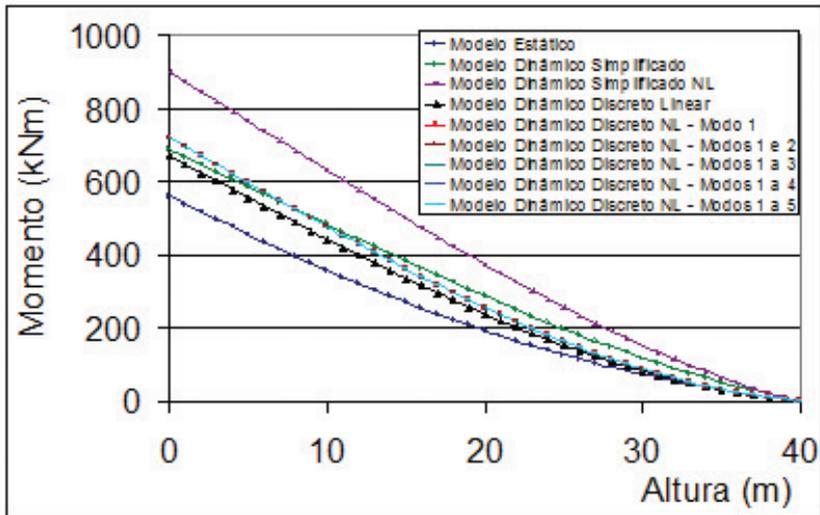


Figura 7.17 – Ação do vento na estrutura 3.

As formas modais da NBR 6123/88, a do Método dos Elementos Finitos e do método proposto constam na Figura 7.18 (a).

Uma melhor aproximação à forma modal não-linear é conseguida substituindo-se o expoente da expressão (6.6) por 1,60; tendo em vista que a curva definida com esse novo expoente oferece uma menor diferença entre seus pontos e os pontos da curva da forma modal não-linear, como pode ser observado na Figura 7.18(b).

O expoente sugerido anteriormente situa-se 6% abaixo do valor recomendado pela NBR 6123/88.

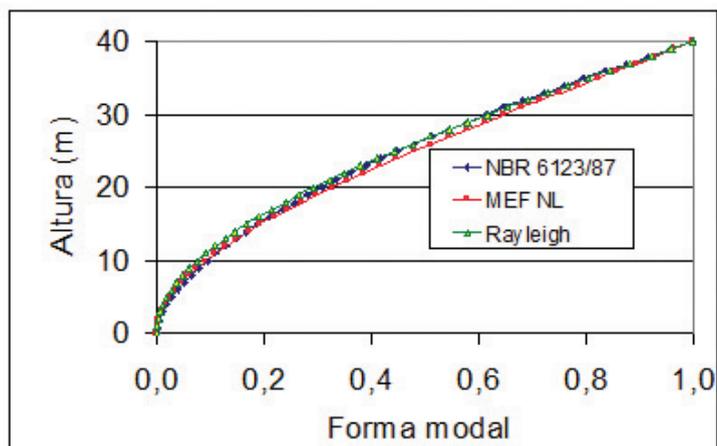
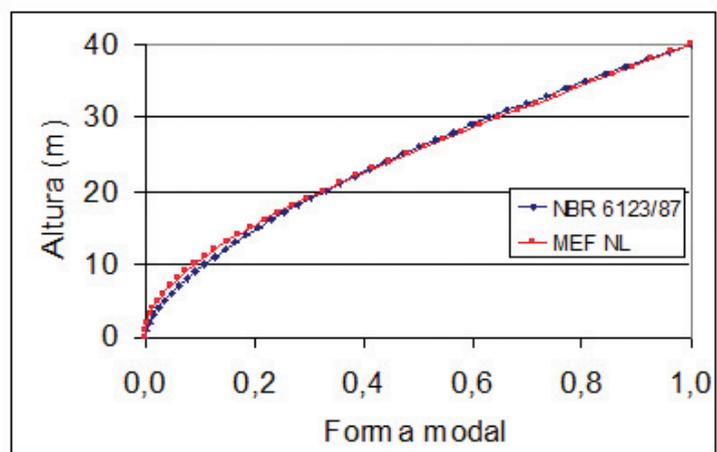
(a) expoente da forma modal: $\gamma = 1,7$ (b) expoente da forma moda: $\gamma = 1,60$

Figura 7.18 – Estrutura 3 – comparativo das formas modais: (a) usada na análise, (b) sugerida.

7.4 ESTRUTURA 4 – POSTE DE CONCRETO ARMADO DE 46 M

7.4.1 Dados e geometria

Esta é mais uma estrutura destinada ao serviço de telecomunicações. Trata-se de um poste de concreto armado com 46 metros de comprimento, incluindo a fundação e com 40 m de altura fora do solo. O poste possui seção circular vazada, com trechos retos e trechos que variam com a altura. A sua esbeltez, incluindo a fundação, é de 334, sem a fundação passa a 375. O módulo de elasticidade do concreto foi calculado com f_{ck} de 45 MPa, para o poste, e de 20 MPa para a fundação, conforme os dados recebidos e como é usual na construção dessas estruturas. Verificou-se que a condição do limite de esbeltez requerida pelo item 15.8.1 da NBR 6118/04 foi atendida.

Para poder avaliar as diferenças produzidas entre uma análise puramente linear, tanto do ponto de vista material quanto geométrico, e outra análise completamente não-linear, também em ambos os aspectos, foi adicionada à análise não-linear geométrica a não-linearidade material do concreto.

Esse tipo de estrutura é predominantemente submetida à flexão, cujo coeficiente Gama Z (γ_z), obtido pela análise dinâmica discreta linear, para esse caso, é 1,05. O coeficiente Gama Z está previsto no item 15.5.3 da NBR 6118/04 – Projeto de estruturas de concreto e fornece uma medida da importância dos esforços de segunda ordem globais, sendo calculado pela seguinte expressão:

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}}, \quad (7.2)$$

onde:

$M_{1,tot,d}$ é o momento de tombamento em relação à base da estrutura,

$\Delta M_{tot,d}$ é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura pelos deslocamentos de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos na análise de 1ª ordem.

O item 15.7.3 da NBR 6118/03, permite usar $0,5E_{ci}I_c$ nas análises aproximadas para a consideração da não-linearidade física do concreto, para estruturas com Gama Z inferior a 1,3.

Brasil, Silva e Wahrhaftig (2007); e Silva & Brasil (2006), ao estudarem a estrutura da seção anterior, verificaram, por meio do conceito do produto de rigidez efetiva, que a relação entre a inércia efetivamente solicitada e a inércia total da seção de concreto armado é de 0,4, quando o momento fletor atuante se iguala ao momento último resistente da seção.

A rotação calculada para o correspondente deslocamento horizontal, no cálculo do coeficiente Gama Z, foi de 0,045 rd, o que permite enquadrar a cinemática da estrutura na hipótese de rotações muito pequenas, conforme as definições de Souza Lima e Venâncio Filho (1982).

Ressalta-se que a inércia da seção deve ser majorada em função da seção de aço existente, como visto no item anterior, que deixa de ser aplicada por falta de informação a respeito.

Na estrutura há um conjunto de antenas e uma plataforma fixada no topo que totalizam a massa de 1097,76 kg. Há ainda escada e guarda-corpo que conferem à estrutura uma massa adicional distribuída de 40 kg/m. As áreas de exposição ao vento computadas foram de 9,34 m²; 1,40 m²; 0,40 m²/m e 0,05 m²/m; respectivamente para as antenas; plataforma; escada, guarda-corpo, cabos e esteiramento. Os coeficientes de arrasto utilizados foram: 0,6 para o poste; escada, cabos e esteiramento 1,2; plataforma 2 e antenas 1.

O solo lateral foi representado por molas distribuídas de rigidez igual a 2668,93 kN/m³ (300 tf/m³). A massa específica adotada para o concreto armado da fundação foi de 2500 kg/m³, enquanto que o da superestrutura foi considerado de 2600 kg/m³, por ser concreto centrifugado.

Os dados da geometria da superestrutura constam na Tabela 7.16. A fundação é do tipo tubulão com as seguintes características: diâmetro da base 140 cm, diâmetro do fuste 80 cm, comprimento do fuste 580 cm e altura da base 20 cm, conforme disposto na Tabela 7.17.

Tabela 7.16 – Estrutura 4: dados e discretização da superestrutura do modelo.

cota (m)	fext (cm)	e (cm)									
40	70,00	13	30	70,00	13	20	70,00	13	10	74,00	15
39	70,00	13	29	70,00	13	19	70,00	13	9	75,50	15
38	70,00	13	28	70,00	13	18	70,00	13	8	77,00	15
37	70,00	13	27	70,00	13	17	70,00	13	7	78,50	15
36	70,00	13	26	70,00	13	16	70,00	13	6	80,00	15
35	70,00	13	25	70,00	13	15	70,00	13	5	80,00	15
34	70,00	13	24	70,00	13	14	70,00	13	4	80,00	15
33	70,00	13	23	70,00	13	13	70,00	13	3	80,00	15
32	70,00	13	22	70,00	13	12	70,00	13	2	80,00	15
31	70,00	13	21	70,00	13	11	72,50	15	1	80,00	15
									0	80,00	15

(fext = diâmetro externo, e = espessura da parede da seção transversal)

Tabela 7.17 – Estrutura 4: dados e discretização da fundação.

Diâmetro da base	140 cm
Diâmetro do fuste	80 cm
Altura do fuste	580 cm
Altura da base	20 cm

Fotografias da estrutura podem ser vistas na Figura 7.20, assim como, a geometria na Figura 7.19.



Figura 7.19 – Estrutura 4: Fotografias.

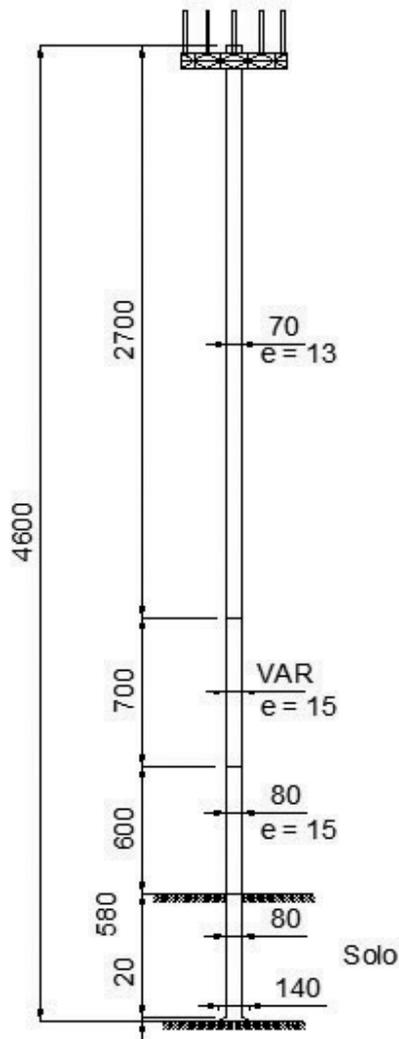


Figura 7.20 – Estrutura 4: geometria - medidas em centímetros.

7.4.2 Modelagem por Elementos Finitos

A estrutura foi modelada utilizando-se elementos de barra, com seções transversais constantes e variáveis. Foram feitos dois modelos. O primeiro, com 46 m de altura e 51 elementos, engloba, tanto as fundações quanto a superestrutura. Nesse modelo, a estrutura foi

engastada na base, tendo o solo sido representado por molas laterais distribuídas. O segundo modelo também emprega elementos de barra de seção constante e variável, porém, a estrutura foi modelada engastando-a exclusivamente na base e com 40 m de altura a partir da superfície do terreno.

Em ambos os modelos foram consideradas a massa concentrada no topo e a massa distribuída devido à escada, cabos e esteiramento. Essas massas produzem os esforços normais externos atuantes na estrutura, que também foram introduzidos no modelo. Tanto a massa própria quanto o peso próprio da estrutura, foram calculadas automaticamente pelo programa SAP2000.

A Figura 7.21 e a Figura 7.23 trazem os modelos com a discretização da estrutura. Os modos de vibração e as frequências obtidas pelo Método dos Elementos Finitos estão mostradas na Figura 7.22 e Figura 7.24.

- Modelo com 46 m de altura.

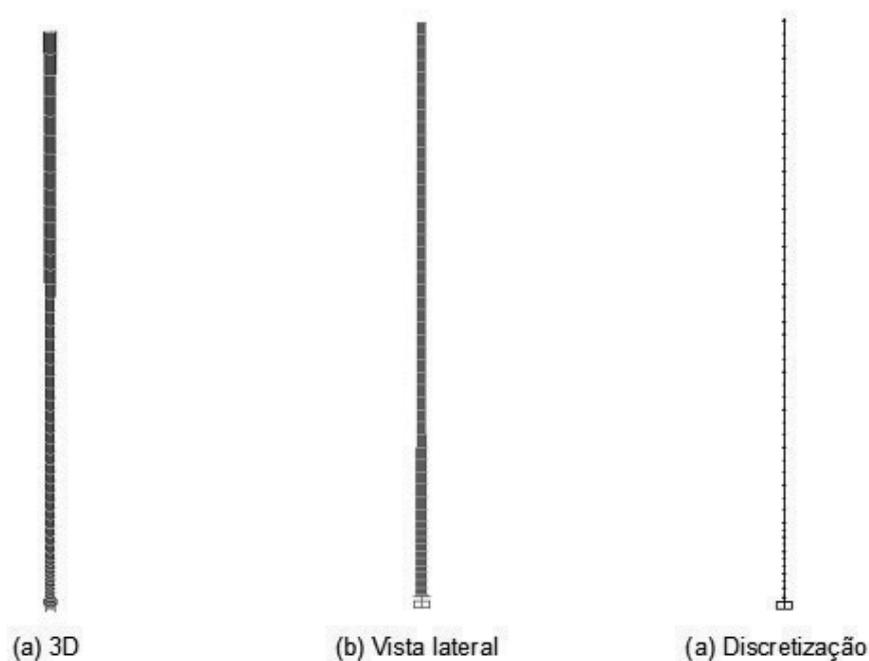
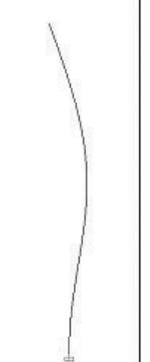
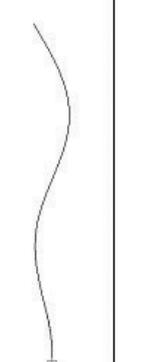
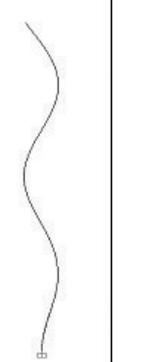
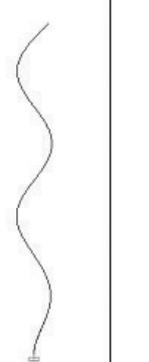


Figura 7.21 – Estrutura 4: Modelo de 46 m por Elementos Finitos.

Modos naturais de vibração					
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	4º Modo	5º Modo
Linear	0,216915 Hz	1,195843 Hz	3,388757 Hz	6,248509 Hz	10,123495 Hz
NLM e NLG	0,141285 Hz	0,913850 Hz	2,548107 Hz	5,002010 Hz	8,097203 Hz

(NLG diz respeito à não-linearidade geométrica e NLM à não-linearidade material)

Figura 7.22 – Estrutura 4: modelo de 46 m - modos naturais de vibração.

- Modelo com 40 m de altura.

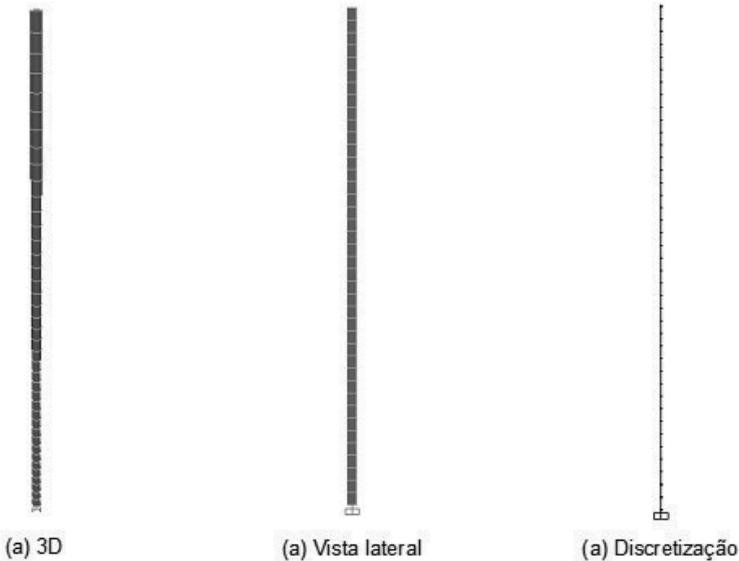
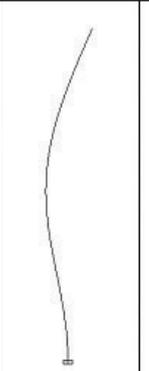
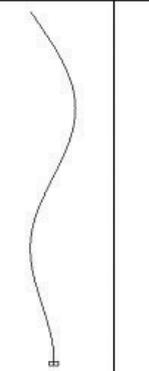
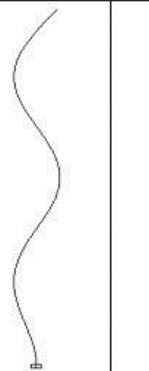
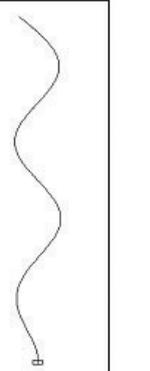


Figura 7.23 – Estrutura 4: modelo com 40 m por Elementos Finitos.

Modos naturais de vibração					
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	4º Modo	5º Modo
Linear	0,267586 Hz	1,541213 Hz	4,176093 Hz	8,168506 Hz	13,499837 Hz
NLM e NLG	0,205239 Hz	1,182116 Hz	3,203083 Hz	6,265288 Hz	10,354454 Hz

(NLG diz respeito à não-linearidade geométrica e NLM à não-linearidade material)

Figura 7.24 – Estrutura 4: modelo de 40 m - modos naturais de vibração.

7.4.3 Aplicação do método proposto

7.4.3.1 Definição dos parâmetros

Para esta estrutura devem ser observados: na fundação trechos de comprimento 0,2 m e 5,80 m, diâmetros de 140 cm, 80 cm e um trecho de diâmetro variável, módulo de elasticidade E_1 de 12522 MPa e densidade ρ_1 de 2500 kg/m³. Para a superestrutura trechos de comprimento de 6 m, 7 m e 27 m, seção circular vazada com espessuras de 15 cm e 13 cm; diâmetros externos de 80 cm, 70 cm e um trecho variável, módulo de elasticidade E de 18783 MPa e densidade do concreto ρ de 2600 kg/m³. Os módulos de elasticidade do concreto, incluindo-se a não-linearidade material, passam a ser 14901 MPa e 22352 MPa, respectivamente para a fundação e para a superestrutura.

Conforme descrito no item 7.4.1, a estrutura ainda suporta uma massa concentrada na extremidade superior, uma massa distribuída ao longo do seu comprimento e sua fundação está sujeita ação lateral do solo.

Ficam definidas as seguintes ordenas referentes às alturas na estrutura: $L_1 = 0,2\text{m}$, $L_2 = 6,0\text{m}$, $L_3 = 12,0\text{m}$, $L_4 = 19,0\text{m}$,

$L_5 = 46,0\text{m}$. Na base da fundação tem-se: $D_1 = 140\text{cm}$, $A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2$,

$I_1 = \frac{\pi}{64} D_1^4$. No fuste $D_2 = 80\text{cm}$, $A_2 = \frac{\pi}{4} D_2^2$, $I_2 = \frac{\pi}{64} D_2^4$. O diâmetro

do trecho variável entre a base e o fuste será obtido por interpola-

ção linear fazendo-se $D_1(x) = \frac{D_2 - D_1}{L_1} x + D_1$. Assim, a área e a inércia

da seção serão dadas por $A_1(x) = \frac{\pi}{4} D_1(x)^2$ e $I_1(x) = \frac{\pi}{64} D_1(x)^4$.

Chamando de D_3 e e_3 o diâmetro externo e a espessura da seção inicial da superestrutura, tem-se: $D_3 = 80\text{cm}$ e $e_3 = 13\text{cm}$. Logo, o

diâmetro interno, a área e a inércia dessa seção são: $d_3 = D_3 - 2e_3$,

$A_3 = \frac{\pi}{4} (D_3^2 - d_3^2)$ e $I_3 = \frac{\pi}{64} (D_3^4 - d_3^4)$. Analogamente, D_5 , e_5 ,

d_5 , A_5 e I_5 são o diâmetro externo, a espessura, a área e a inércia

referente ao último segmento. Entre esses dois trechos há um de

seção variável, de espessura igual à do segmento anterior ($e_4 = e_3$),

cujos diâmetro pode ser obtido por interpolação linear de maneira

semelhante ao que foi feito na primeira variação, usando a expres-

são $D_4(x) = \frac{D_4 - D_3}{L_4 - L_3} (x - L_3) + D_3$. Portanto, $d_4(x) = D_4(x) - 2e_4$,

$A_4(x) = \frac{\pi}{64} (D_4(x)^2 - d_4(x)^2)$ e $I_4(x) = \frac{\pi}{64} (D_4(x)^4 - d_4(x)^4)$ são,

respectivamente, o diâmetro interno, a área e a inércia variável da seção do trecho correspondente.

7.4.3.2 Cálculo da massa generalizada

A massa generalizada foi obtida por meio das seguintes integrais:

$$m_1 = \int_0^{L_1} m_I(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_I(x) = \left(\frac{A_2 - A_1}{L_1} + A_1 \right) \rho_1;$$

$$m_2 = \int_{L_1}^{L_2} m_{II} \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{II} = A_2 \rho_1;$$

$$m_3 = \int_{L_2}^{L_3} m_{III} \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{III} = A_3 \rho + m_e;$$

$$m_4 = \int_{L_3}^{L_4} m_{IV}(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_{IV} = A_4(x) \rho + m_e \text{ e}$$

$$A_4(x) = \frac{\pi}{4} (D_4(x)^2 - d_4(x)^2);$$

e

$$m_5 = \int_{L_4}^L m_V \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_V = A_5 \rho + m_e$$

Nas expressões anteriores m_e representa a massa por unidade de comprimento proveniente da escada, cabos e esteiramento, sendo $m_e = 40 \text{ kg / m}$. Designando a massa distribuída generalizada por m_R , tem-se

$$m_R = \sum_{i=1}^5 m_i$$

Com m_0 igual a 1097,76 kg, representando a massa oriunda das antenas e demais corpos fixados ao topo da estrutura. A massa generalizada total fica, então:

$$M = m_0 + m_R$$

7.4.3.3 Cálculo da rigidez generalizada

7.4.3.4 Rigidez geométrica generalizada

Para calcular a rigidez geométrica generalizada foi preciso determinar os esforços normais relativos aos trechos definidos na geometria. Do topo para a base da estrutura têm-se:

$$F_0 = m_0 g ,$$

$$F_5 = \int_{L_4}^L m_v g dx ,$$

$$F_4 = \int_{L_3}^{L_4} m_{IV}(x) g dx ,$$

$$F_3 = \int_{L_2}^{L_3} m_{III} g dx ,$$

$$F_2 = \int_{L_1}^{L_2} m_{II} g dx \text{ e}$$

$$F_1 = \int_0^{L_1} m_I(x) g dx .$$

A força normal generalizada F será obtida pela soma de suas parcelas,

$$F = \sum_{i=1}^5 F_i .$$

As rigidezes geométricas podem, por fim, serem calculadas pelas seguintes integrais:

$$K_{g5} = \int_{L_4}^L \left[F_0 + m_v(L-x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{K}_{g_4} = \int_{L_3}^{L_4} \left[F_0 + F_5 + m_{IV}(x)(L_4 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{K}_{g_3} = \int_{L_2}^{L_3} \left[F_0 + F_5 + F_4 + m_{III}(L_3 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{K}_{g_2} = \int_{L_2}^{L_3} \left[F_0 + F_5 + F_4 + F_3 + m_{II}(L_2 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{K}_{g_1} = \int_{L_2}^{L_3} \left[F_0 + F_5 + F_4 + F_3 + F_3 + m_I(x)(L_1 - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

A rigidez geométrica generalizada final \mathbf{K}_g é

$$\mathbf{K}_g = \sum_{i=1}^5 \mathbf{K}_{g_i}$$

7.4.3.5 Rigidez elástica generalizada

As parcelas da rigidez elástica para os intervalos definidos na geometria são:

$$\mathbf{K}_{01} = \int_0^{L_1} E_1 I_1(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

$$\mathbf{K}_{02} = \int_{L_1}^{L_2} E_1 I_2 \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

$$\mathbf{K}_{03} = \int_{L_2}^{L_3} E I_3 \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

$$K_{04} = \int_{L_3}^{L_4} EI_4(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

$$K_{05} = \int_{L_4}^L EI_5 \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

E a rigidez elástica generalizada K_0 é, portanto:

$$K_0 = \sum_{i=1}^5 K_{0i}$$

7.4.3.6 Rigidez das molas generalizada

Para explorar todos os recursos e avaliar a potencialidade do método proposto neste trabalho de pesquisa fez-se a introdução de molas distribuídas para representar o solo lateral.

Chamando de k_s o fator de mola, cujo valor, para o caso específico, é $k_s = 2669 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$, as molas distribuídas, no primeiro e no segundo trecho do fuste, são dadas por $k_1(x) = k_s D_1(x)$ e $k_2(x) = k_s D_2$. A rigidez generalizada das molas, designada por K_m , foi calculada por meio da seguinte expressão:

$$K_m = \int_0^{L_1} k_1(x) \phi(x)^2 dx + \int_{L_1}^{L_2} k_2(x) \phi(x)^2 dx$$

A rigidez generalizada K da estrutura pode então ser determinada pela soma algébrica das parcelas calculadas nos subitens precedentes, de forma que se obtém:

$$K = K_0 - K_g + K_m$$

7.4.3.7 Cálculo da frequência

Para o modelo de 46 m, o valor da frequência fundamental com a não-linearidade geométrica e material é de 0,145517 Hz. Uma análise exclusivamente linear pelo método proposto fornece uma frequência para o primeiro modo de 0,218848 Hz.

Já para o modelo de 40 m, tem-se, com ambas as não-linearidades, a frequência de 0,195532 Hz, e para o modelo exclusivamente linear, a frequência de 0,285602 Hz.

7.4.4 Ação do vento

7.4.4.1 Forças estáticas devidas ao vento

As forças estáticas devidas à ação do vento foram calculadas como descrito no item 6.1. Os parâmetros empregados na análise foram: fator topográfico $S_1 = 1,1$; fator de rugosidade do terreno S_2 correspondente à categoria IV, classe B, calculado conforme a expressão (6.2) com os parâmetros $p = 0,125$, $b = 0,85$ e $F_r = 0,98$, presentes na Tabela 6.1; fator estatístico $S_3 = 1,1$; velocidade básica do vento $V_0 = 35$ m/s e altura sobre o solo de 40 m.

7.4.4.2 Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88

Na determinação da resposta dinâmica pelo modelo contínuo simplificado foram empregados os seguintes parâmetros: largura da edificação 0,723 m; altura da edificação de 46 m para o cálculo da frequência; categoria do terreno IV; velocidade básica 35 m/s; fatores estatísticos S_1 e S_3 iguais a 1,1.

A frequência fundamental foi obtida fazendo $T_1 = 0,02h$ (Tabela 6.4), logo $f_1 = 1,086957$ Hz. É interessante ressaltar que a frequência fundamental da estrutura, como calculada, ficou acima de 1 Hz, o que poderia induzir ao engenheiro a eximir-se do cálculo da resposta dinâmica da estrutura, conforme previsto no capítulo 9 da NBR 6123/88.

A forma modal obedeceu à expressão (6.6) com g igual a 2,7. Conhecida a velocidade de projeto e a frequência natural da estrutura, obteve-se a relação adimensional $V_p/(f_1 L)$ de 0,013, o que leva, com uma taxa crítica de amortecimento ζ igual a 0,015, a um coeficiente de amplificação dinâmica ξ de 1,131.

No cálculo da resposta dinâmica com base no modelo contínuo simplificado da NBR 6123/88, com a inclusão da não-linearidade geométrica e material, a relação adimensional $V_p/(f_1 L)$ é de 0,115. Com os ábacos da NBR 6123/88, e para o mesmo amortecimento crítico, obtém-se $\xi = 2,758$.

7.4.4.3 Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88

Calculando a frequência pelo Método dos Elementos Finitos encontra-se uma frequência para o modo fundamental de 0,216915 Hz. A relação adimensional $V_p/(f_1 L)$ passa a ser 0,075, o que conduz a um fator de amplificação dinâmica ξ de 1,702, considerando o mesmo amortecimento crítico.

Os parâmetros usados no cálculo da resposta dinâmica discreta, com a inclusão da não-linearidade geométrica e material, são descritos na análise simplificada não-linear, apresentados no item anterior. Para os modos de 2 a 5 os fatores de amplificação dinâmica, dadas as frequências apresentadas na Figura 7.22, são, respectivamente: 1,796; 1,492; 1,321; 1,321.

7.4.5 Análise dos resultados

As diferenças no valor do esforço normal entre o método proposto e o Método dos Elementos Finitos, nas posições de interesse definidas na geometria da estrutura, podem ser encontrada na Tabela 7.18.

Tabela 7.18 – Estrutura 4: esforço normal.

L	Proposto	MEF	Diferença	
			Absoluta	(%)
(m)	(kN)	(kN)		
46,00	10,758048	10,758048	0,0000	0,0000000
19,00	181,493643	181,493637	0,0000	0,0000034
12,00	234,667745	234,667737	0,0000	0,0000035
6,00	283,847697	283,847687	0,0000	0,0000035
0,20	355,274947	355,274935	0,0000	0,0000036
0,00	360,277934	360,277921	0,0000	0,0000036

A frequência do primeiro modo, obtida pelo método proposto, como descrito no item 7.4.3, foi de 0,145517 Hz. Quando calculada pelo Método dos Elementos Finitos essa mesma frequência é de 0,141285 Hz, o que corresponde a uma diferença de apenas 2,99%. Um cálculo simplificado pelo método proposto pôde ser feito utilizando-se as propriedades geométricas e materiais da estrutura de forma ponderada. Assim, mantendo-se a rigidez elástica das molas na formulação, encontra-se um valor de 0,115210 Hz, o que representa uma diferença de 20,83% em relação ao cálculo exato; de 18,46% em relação ao mesmo modelo pelo MEF e de 89,40% em relação à prescrição da NBR 6123/88.

No entanto, para usar diretamente a expressão (4.19) é preciso considerar a estrutura simplesmente engastada na superfície do terreno. Com essa hipótese, o cálculo simplificado pelo método proposto, incluindo a não-linearidade do concreto, conduz à frequência de 0,195532 Hz, distante 34,37% do valor anterior. Pelo MEF, com o modelo correspondente, obtém-se 0,205239 Hz, o que significa uma diferença de 4,73%, e pela NBR 6123/88 encontra-se 1,25 Hz, representando uma diferença de 84,36%.

Acompanhando os resultados já encontrados para as estruturas anteriores, os valores críticos para resposta dinâmica da estrutura sob ação do vento encontram-se na comparação entre o modelo estático e o modelo dinâmico discreto simplificado não-linear. A diferença do momento fletor na estrutura entre essas duas análises atinge o valor máximo de 53%.

Já a resposta dinâmica obtida com o modelo simplificado conduz ao momento máximo 1,18 vezes maior do que o encontrado nos cálculos com o modelo de forças estáticas.

Nas análises discretas não-lineares segue-se com uma pequena influência da contribuição dos modos de vibração acima do fundamental. Quando computadas as contribuições do vento médio e as flutuações do 1° ao 5° modos surge uma diferença de 0,01%, portanto desprezível, em relação à combinação que leva em conta apenas a ação do vento médio com a contribuição do primeiro modo de vibração.

As flutuações resultantes do primeiro modo de vibração são as que aportam maior contribuição na resposta da estrutura, representando 60% do valor total. Analisando os resultados obtidos na resposta dinâmica dos modelos discretos, linear e não-linear, observa-se uma diferença na frequência do primeiro modo de 35 % e no fator de amplificação dinâmica de 8,06%. Com isso, o momento fletor máximo na estrutura ficou acrescido de 38,99 kNm, o que equivale a uma força de 1 kN aplicada no topo. Na Tabela 7.19 constam os resultados da análise dinâmica discreta não-linear.

A diferença entre a análise discreta não-linear e análise das forças estáticas, ou modelo estático, é de 8,33%, o que reduz a capacidade da estrutura em possuir área de exposição ao vento, uma vez que seu projeto foi realizado com os esforços do vento sendo computados pelo último processo.

A Tabela 7.20 resume os valores dos momentos na estrutura devidos à ação do vento das análises descritas anteriormente, comparando-as ao modelo estático.

Tabela 7.19 – Estrutura 4: momentos da análise discreta não-linear ($\zeta = 0,015$).

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	6,23	2,76	0,32	0,54	0,30	0,28
38	12,78	6,72	0,76	1,28	0,69	0,62
37	19,65	11,86	1,31	2,15	1,13	0,97
36	26,84	18,12	1,95	3,11	1,56	1,28
35	34,35	25,47	2,66	4,10	1,96	1,51
34	42,16	33,86	3,43	5,07	2,28	1,62
33	50,28	43,25	4,23	5,97	2,51	1,60
32	58,71	53,61	5,06	6,77	2,61	1,44
31	67,43	64,88	5,89	7,44	2,58	1,16
30	76,44	77,04	6,70	7,93	2,42	0,78
29	85,74	90,03	7,49	8,23	2,12	0,33
28	95,33	103,82	8,24	8,32	1,72	0,15

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
27	105,19	118,36	8,93	8,19	1,22	0,61
26	115,33	133,63	9,55	7,85	0,66	1,01
25	125,74	149,57	10,10	7,29	0,07	1,31
24	136,42	166,16	10,55	6,53	0,53	1,49
23	147,35	183,34	10,91	5,59	1,09	1,52
22	158,55	201,10	11,16	4,49	1,58	1,41
21	169,99	219,37	11,30	3,27	1,97	1,17
20	181,68	238,15	11,32	1,95	2,25	0,81
19	193,60	257,38	11,22	0,58	2,39	0,38
18	205,76	277,03	11,00	0,80	2,39	0,09
17	218,15	297,07	10,65	2,16	2,24	0,55
16	230,76	317,48	10,17	3,46	1,96	0,97
15	243,59	338,21	9,57	4,67	1,55	1,29
14	256,63	359,24	8,85	5,74	1,05	1,50

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
13	269,87	380,54	8,02	6,65	0,47	1,57
12	283,31	402,09	7,06	7,36	0,15	1,49
11	296,94	423,90	5,99	7,85	0,78	1,26
10	310,75	445,93	4,80	8,09	1,39	0,91
9	324,75	468,17	3,50	8,07	1,93	0,45
8	338,92	490,59	2,09	7,77	2,38	0,06
7	353,25	513,17	0,60	7,21	2,70	0,58
6	367,75	535,90	0,99	6,38	2,87	1,06
5	382,39	558,75	2,65	5,30	2,88	1,45
4	397,18	581,71	4,38	3,99	2,72	1,72
3	412,09	604,75	6,16	2,46	2,39	1,83
2	427,07	627,86	7,99	0,76	1,90	1,78
1	442,11	651,02	9,86	1,09	1,27	1,55
0	457,20	674,22	11,76	3,06	0,51	1,15

Tabela 7.20 – Estrutura 4: momento fletor na estrutura ($\zeta = 0,015$),

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear						ADSL	ADSNL	
	Estática			Combinação das contribuições, vento médio e								
	(kNm)	(kNm)		Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5	(kNm)			(kNm)
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	13,45	8,71	8,88	8,90	8,95	8,97	8,98	8,98	20,66	25,39	25,39	25,39
38	27,61	18,85	19,27	19,31	19,43	19,47	19,49	19,49	42,35	52,07	52,07	52,07
37	42,48	30,37	31,13	31,20	31,39	31,44	31,48	31,48	65,01	79,98	79,98	79,98
36	58,04	43,25	44,40	44,51	44,77	44,83	44,87	44,87	88,59	109,08	109,08	109,08
35	74,30	57,44	59,06	59,20	59,52	59,59	59,63	59,63	113,03	139,30	139,30	139,30
34	91,24	72,90	75,05	75,22	75,59	75,67	75,70	75,70	138,27	170,60	170,60	170,60

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNI
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições, vento médio e						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
33	108,87	89,59	92,34	92,54	92,94	93,01	93,04	164,27	202,93	
32	127,18	107,47	110,87	111,10	111,52	111,58	111,60	190,98	236,23	
31	146,16	126,50	130,60	130,86	131,28	131,33	131,34	218,34	270,46	
30	165,81	146,64	151,49	151,78	152,18	152,22	152,22	246,32	305,56	
29	186,12	167,83	173,50	173,81	174,18	174,20	174,20	274,86	341,50	
28	207,09	190,06	196,58	196,90	197,23	197,24	197,24	303,93	378,22	
27	228,71	213,26	220,68	221,01	221,29	221,30	221,30	333,49	415,68	
26	250,97	237,41	245,76	246,10	246,33	246,33	246,33	363,49	453,84	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNI
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições, vento médio e						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
25	273,88	262,46	271,79	272,12	272,30	272,30	272,30	272,30	393,91	492,65
24	297,41	288,38	298,71	299,04	299,16	299,16	299,16	299,17	424,70	532,07
23	321,58	315,11	326,48	326,80	326,88	326,88	326,89	326,89	455,84	572,06
22	346,36	342,63	355,06	355,37	355,42	355,42	355,43	355,43	487,30	612,57
21	371,76	370,90	384,42	384,71	384,73	384,73	384,74	384,74	519,04	653,58
20	397,76	399,87	414,50	414,77	414,78	414,78	414,79	414,79	551,03	695,04
19	424,36	429,50	445,27	445,52	445,52	445,52	445,53	445,53	583,25	736,92
18	451,56	459,78	476,70	476,91	476,91	476,91	476,92	476,92	615,68	779,18

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNI
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições, vento médio e						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
17	479,33	490,64	508,73	508,92	508,93	508,94	508,94	508,94	648,29	821,78
16	507,69	522,07	541,34	541,50	541,52	541,53	541,53	541,53	681,06	864,71
15	536,60	554,02	574,49	574,62	574,65	574,66	574,66	574,66	713,98	907,92
14	566,08	586,47	608,14	608,24	608,29	608,29	608,29	608,29	747,01	951,39
13	596,10	619,38	642,25	642,34	642,39	642,39	642,39	642,40	780,15	995,09
12	626,66	652,73	676,82	676,88	676,95	676,95	676,95	676,95	813,38	1039,00
11	657,76	686,50	711,82	711,86	711,93	711,93	711,93	711,94	846,68	1083,09
10	689,38	720,68	747,23	747,25	747,32	747,33	747,33	747,33	880,05	1127,34

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNI
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições, vento médio e						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
9	721,52	755,24	783,01	783,03	783,10	783,10	783,10	783,10	913,47	1171,73
8	754,18	790,15	819,15	819,16	819,22	819,23	819,23	819,23	946,94	1216,24
7	787,34	825,39	855,62	855,62	855,67	855,68	855,68	855,68	980,43	1260,86
6	821,00	860,92	892,39	892,39	892,43	892,44	892,44	892,44	1013,96	1305,57
5	855,14	896,73	929,43	929,43	929,46	929,46	929,46	929,47	1047,50	1350,36
4	889,75	932,68	966,70	966,72	966,73	966,74	966,74	966,74	1081,04	1395,16
3	924,79	968,76	1004,18	1004,21	1004,22	1004,22	1004,22	1004,23	1114,59	1439,98
2	960,10	1004,91	1041,80	1041,85	1041,86	1041,86	1041,86	1041,86	1148,14	1484,80

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL	
	Estática			Combinação das contribuições, vento médio e							
(m)	(kNm)		(kNm)	Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5	(kNm)	(kNm)	
1	995,66		1041,12	1079,54	1079,61	1079,61	1079,61	1079,61	1079,61	1181,69	1529,62
0	1031,42		1077,36	1117,35	1117,45	1117,46	1117,46	1117,46	1117,46	1215,24	1574,44
Relação	1,00		1,04	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,18	1,53
D kNm	0,00		45,94	85,93	86,03	86,04	86,04	86,04	86,04	183,82	543,02
D %	0,00%		4,45%	8,33%	8,34%	8,34%	8,34%	8,34%	8,34%	17,82%	52,65%

(ADDL – Análise Dinâmica Discreta Linear, ADSL – Análise Dinâmica Simplificada Linear, ADSNL – Análise Dinâmica Simplificada Não-Linear).

No gráfico da Figura 7.25 podem ser encontrados os resultados obtidos para a ação do vento sobre a estrutura. No traço mais inferior estão os valores do momento para a análise estática. Os traços superiores subsequentes correspondem aos valores das análises dinâmicas discretas. Logo acima se encontram as curvas das análises dinâmicas simplificadas, linear e não-linear.

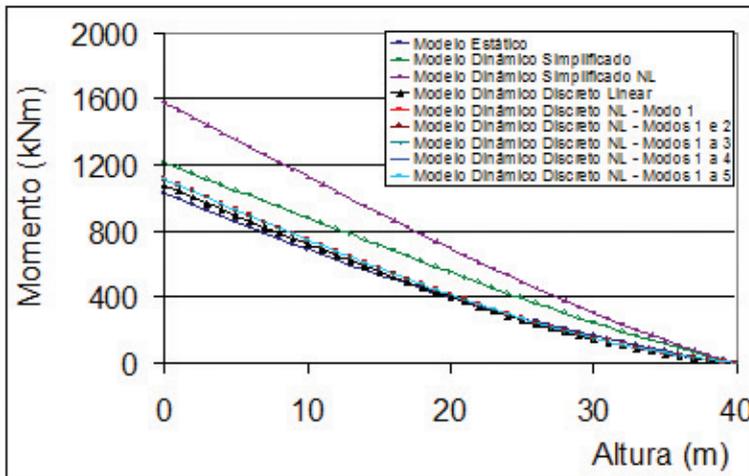


Figura 7.25 – Ação do vento na estrutura 4 ($\zeta = 0,015$).

As formas modais da NBR 6123/88, do Método dos Elementos Finitos e do Método proposto constam na Figura 7.26(a).

Uma melhor aproximação à forma modal não-linear é conseguida substituindo-se o expoente da expressão (6.6) por 1,77; tendo em vista que a curva definida com esse novo expoente oferece uma menor diferença entre seus pontos e os da curva da forma modal não-linear, como pode ser observado na Figura 7.26(b)

O expoente sugerido anteriormente distancia-se 34% do valor do recomendado pela NBR 6123/88.

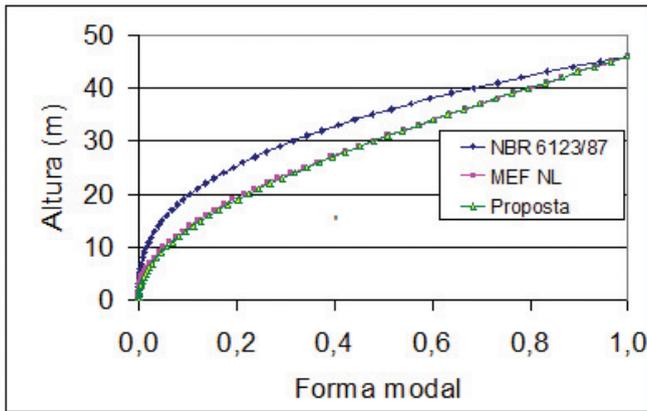
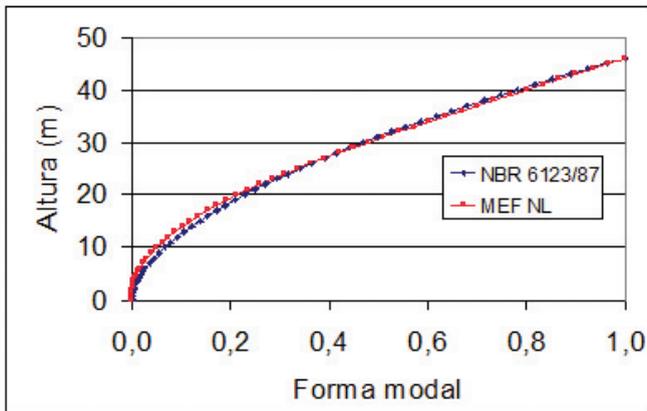
(a) expoente da forma: $\gamma=2,7$ (b) expoente da forma modal: $\gamma=1,77$

Figura 7.26 – Estrutura 4 – comparativo das formas modais: (a) usada na análise, (b) sugerida.

Ter-se-ia, entretanto, um panorama mais crítico que o anterior caso se adotasse uma razão de amortecimento crítico de 0,01. Nesse caso, o modelo dinâmico simplificado linear seria o correspondente à forma modal com expoente de 1,7 na Eq. (6.6), e essa opção levaria o período de oscilação do primeiro modo a ser calculado usando 1,5% da altura da estrutura, o que forneceria a frequência fundamental de 0,69 Hz. Nessa situação as flutuações do primeiro modo responderiam por 70% da resposta dinâmica da estrutura, quando superposta à contribuição do vento médio.

Seguindo-se com a análise para essa condição, a diferença produzida entre o valor do momento fletor máximo, do modelo discreto, do primeiro ao quinto modo, com as considerações não-lineares, tanto material quanto geométrica, chegariam a superar em 1,41 a análise das forças estáticas. E seria superior em 4,28% à análise discreta linear ao computar-se apenas o primeiro modo. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7.22, na Tabela 7.23 e no gráfico da Figura 7.27.

Tabela 7.21 – Estrutura 4: momentos da análise discreta não-linear ($\zeta = 0,01$).

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	6,23	4,13	0,48	0,82	0,45	0,41
38	12,78	10,08	1,14	1,92	1,04	0,93
37	19,65	17,79	1,97	3,23	1,69	1,46
36	26,84	27,18	2,93	4,66	2,34	1,92
35	34,35	38,20	4,00	6,14	2,94	2,26
34	42,16	50,79	5,15	7,60	3,42	2,43
33	50,28	64,88	6,35	8,96	3,76	2,40
32	58,71	80,41	7,59	10,16	3,91	2,16
31	67,43	97,32	8,83	11,15	3,87	1,74
30	76,44	115,55	10,05	11,89	3,62	1,17

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
29	85,74	135,04	11,24	12,34	3,19	0,49
28	95,33	155,72	12,35	12,48	2,58	0,22
27	105,19	177,55	13,39	12,29	1,83	0,91
26	115,33	200,44	14,33	11,77	0,99	1,51
25	125,74	224,36	15,15	10,93	0,10	1,96
24	136,42	249,24	15,83	9,79	0,79	2,23
23	147,35	275,02	16,37	8,38	1,63	2,28
22	158,55	301,64	16,74	6,73	2,37	2,12
21	169,99	329,06	16,95	4,90	2,96	1,75
20	181,68	357,22	16,98	2,93	3,38	1,22
19	193,60	386,07	16,83	0,88	3,59	0,57
18	205,76	415,55	16,49	1,20	3,58	0,13
17	218,15	445,61	15,97	3,24	3,36	0,83
16	230,76	476,22	15,26	5,20	2,94	1,45
15	243,59	507,31	14,36	7,00	2,33	1,94

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
14	256,63	538,85	13,28	8,61	1,57	2,25
13	269,87	570,80	12,02	9,97	0,70	2,35
12	283,31	603,14	10,59	11,05	0,23	2,24
11	296,94	635,85	8,98	11,78	1,18	1,89
10	310,75	668,90	7,19	12,14	2,08	1,36
9	324,75	702,25	5,24	12,10	2,90	0,68
8	338,92	735,88	3,14	11,66	3,57	0,09
7	353,25	769,76	0,89	10,81	4,05	0,87
6	367,75	803,85	1,48	9,57	4,31	1,59
5	382,39	838,13	3,97	7,95	4,32	2,18
4	397,18	872,57	6,57	5,98	4,08	2,58
3	412,09	907,13	9,24	3,70	3,59	2,75
2	427,07	941,79	11,99	1,15	2,86	2,67
1	442,11	976,53	14,79	1,63	1,91	2,32
0	457,20	1011,33	17,64	4,59	0,77	1,72

Tabela 7.22 – Estrutura 4: momento fletor na estrutura ($\zeta = 0,01$),

z (m)	Análise		ADL (kNm)	Análise Dinâmica Não-Linear					ASL (kNm)	ASNL (kNm)
	Estática (kNm)	Modo 1 (kNm)		Combinação das contribuições modais						
				1 e 2 (kNm)	1 a 3 (kNm)	1 a 4 (kNm)	1 a 5 (kNm)			
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
39	13,45	9,97	10,23	10,26	10,34	10,36	10,38	24,93	32,03	
38	27,61	21,93	22,57	22,63	22,81	22,86	22,90	51,11	65,69	
37	42,48	35,82	36,96	37,06	37,35	37,42	37,48	78,46	100,91	
36	58,04	51,59	53,33	53,48	53,87	53,97	54,03	106,90	137,63	
35	74,30	69,18	71,62	71,82	72,30	72,41	72,48	136,38	175,79	
34	91,24	88,52	91,76	92,02	92,58	92,69	92,74	166,82	215,31	

z	Análise Estática		ADL (kNm)	Análise Dinâmica Não-Linear Combinação das contribuições modais					ASL (kNm)	ASNL (kNm)
	(kNm)	(kNm)		Modo 1 (kNm)	1 e 2 (kNm)	1 a 3 (kNm)	1 a 4 (kNm)	1 a 5 (kNm)		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
33	108,87	109,57	113,70	114,01	114,61	114,72	114,76	198,16	256,14	
32	127,18	132,25	137,37	137,72	138,35	138,44	138,47	230,34	298,22	
31	146,16	156,51	162,69	163,09	163,72	163,79	163,81	263,30	341,48	
30	165,81	182,30	189,62	190,05	190,65	190,71	190,71	296,99	385,86	
29	186,12	209,54	218,07	218,54	219,09	219,13	219,13	331,35	431,31	
28	207,09	238,18	248,00	248,48	248,98	249,00	249,00	366,33	477,77	
27	228,71	268,16	279,33	279,83	280,25	280,26	280,26	401,89	525,18	
26	250,97	299,42	311,99	312,50	312,84	312,85	312,85	437,97	573,49	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ASL	ASNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
25	273,88	331,90	345,94	346,45	346,71	346,71	346,71	346,72	474,53	622,65
24	297,41	365,55	381,10	381,60	381,79	381,79	381,79	381,80	511,54	672,59
23	321,58	400,30	417,42	417,90	418,03	418,03	418,03	418,04	548,95	723,27
22	346,36	436,10	454,83	455,29	455,37	455,36	455,37	455,38	586,72	774,63
21	371,76	472,90	493,27	493,70	493,74	493,74	493,75	493,75	624,82	826,64
20	397,76	510,64	532,68	533,08	533,09	533,09	533,11	533,11	663,22	879,23
19	424,36	549,27	573,01	573,38	573,38	573,38	573,40	573,40	701,88	932,38
18	451,56	588,73	614,21	614,53	614,53	614,53	614,55	614,55	740,78	986,02

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ASL	ASNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5	(kNm)	(kNm)
17	479,33	628,97	656,21	656,49	656,50	656,52	656,52	656,52	779,88	1040,12
16	507,69	669,94	698,96	699,20	699,23	699,24	699,24	699,24	819,17	1094,64
15	536,60	711,60	742,41	742,61	742,66	742,67	742,67	742,67	858,62	1149,54
14	566,08	753,89	786,51	786,68	786,74	786,75	786,75	786,75	898,21	1204,78
13	596,10	796,78	831,22	831,34	831,43	831,43	831,43	831,44	937,91	1260,33
12	626,66	840,23	876,50	876,59	876,69	876,69	876,69	876,70	977,72	1316,15
11	657,76	884,23	922,34	922,40	922,51	922,51	922,51	922,52	1017,61	1372,21
10	689,38	928,74	968,70	968,74	968,85	968,85	968,85	968,85	1057,57	1428,50

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ASL	ASNL
	Estática			Combinação das contribuições modais						
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	Modo 1 (kNm)	1 e 2 (kNm)	1 a 3 (kNm)	1 a 4 (kNm)	1 a 5 (kNm)	(kNm)	(kNm)
9	721,52	973,73	1065,00	1015,54	1015,56	1015,66	1015,67	1015,67	1097,59	1484,97
8	754,18	1019,16	1065,00	1062,83	1062,83	1062,92	1062,93	1062,93	1137,66	1541,61
7	787,34	1065,00	1065,00	1110,52	1110,52	1110,59	1110,61	1110,61	1177,76	1598,40
6	821,00	1111,21	1111,21	1158,58	1158,58	1158,64	1158,65	1158,65	1217,89	1655,31
5	855,14	1157,75	1157,75	1206,98	1206,99	1207,02	1207,03	1207,04	1258,04	1712,33
4	889,75	1204,49	1204,49	1255,66	1255,68	1255,71	1255,71	1255,72	1298,19	1769,37
3	924,79	1251,41	1251,41	1304,59	1304,64	1304,65	1304,65	1304,66	1338,35	1826,43
2	960,10	1298,42	1298,42	1353,70	1353,77	1353,77	1353,78	1353,78	1378,51	1883,50

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ASL	ASNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
1	995,66	1345,52	1402,94	1403,05	1403,05	1403,05	1403,05	1403,06	1418,67	1940,57
0	1031,42	1392,68	1452,28	1452,43	1452,44	1452,44	1452,44	1452,44	1458,83	1997,63
Relação	1,00	1,35	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,94
D kNm	0,00	361,26	420,86	421,01	421,02	421,02	421,02	421,03	427,41	966,21
D %	0,00%	35,03%	40,80%	40,82%	40,82%	40,82%	40,82%	40,82%	41,44%	93,68%

(ADDL – Análise Dinâmica Discreta Linear, ADSL – Análise Dinâmica Simplificada Linear, ADSNL – Análise Dinâmica Simplificada Não-Linear).

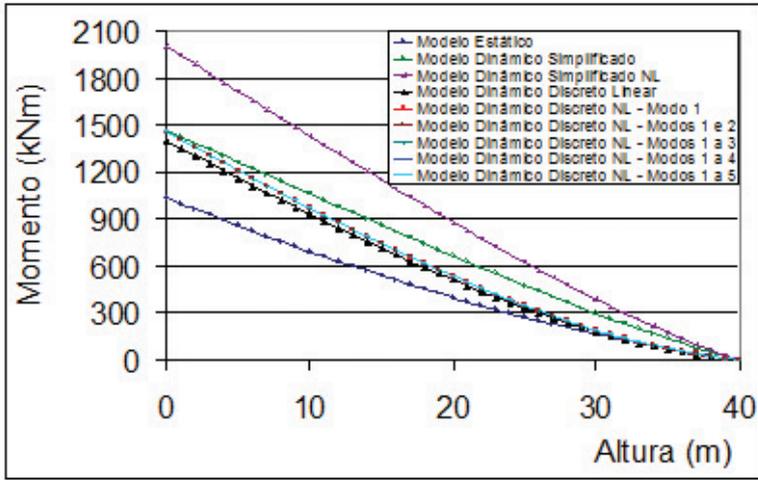
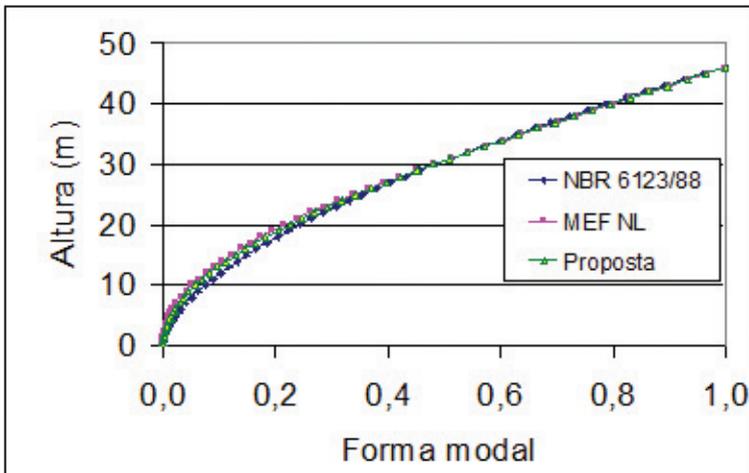


Figura 7.27 – Ação do vento na estrutura 4 ($\zeta = 0,01$).

A forma modal obtida pelo expoente da Eq. (6.6), aproxima-se bem da forma modal do modelo não-linear pelo MEF e da função proposta neste trabalho, como apresentado na Tabela 7.29.



Expoente da forma modal da NBR 6123/88: $\gamma=1,7$

Figura 7.28 – Formas modais.

7.5 ESTRUTURA 5 – POSTE METÁLICO DE 30 M

Para a estrutura que se apresenta nesta seção, cabe destacar a investigação experimental de campo que foi realizada para a obtenção da frequência de fundamental da estrutura, realizada por meio da aquisição de uma série temporal de dados experimentais, cujo intuito foi aferir a solução proposta nesta Tese. O resultado obtido está descrito no item 7.5.2

7.5.1 Dados e geometria

Esta estrutura é um poste metálico troncônico com diâmetro superior igual a 52 cm e diâmetro inferior de 82 cm. Destina-se ao suporte do sistema irradiante do sinal de telefonia móvel celular. Possui 30 metros de altura e seção circular vazada de diâmetro externo (ϕ_{ext}) e espessura (e) variáveis com a altura. Está instalada na cidade de Aracajú, Sergipe.

Os dados da estrutura foram coletados no campo, tendo os diâmetros sido medidos com trena metálica e a espessura do copo com aparelho de ultra-som. Para um mesmo tramo vertical foram feitas diversas medidas da espessura, obtendo-se uma média relativa ao trecho. A união dos segmentos do corpo do poste é formada pelo encaixe sucessivo, por sobreposição e aparafusamento, das partes metálicas. Cada trecho sobreposto possui 20 cm de extensão. Na região dessas emendas, a espessura da seção transversal corresponde à soma das medidas feitas fora da zona de sobreposição. Na Tabela 7.23 e na Figura 7.29 podem ser encontradas as propriedades e a discretização utilizadas para modelar a estrutura. A esbeltez da estrutura é de 256.

A estrutura suporta duas plataformas de trabalho; uma situada a 20 m de altura e a outra na extremidade superior. Há ainda um conjunto de antenas localizadas a 27 m da base e fixadas ao corpo do poste por meio de suportes metálicos. As plataformas e os suportes obedecem à composição presente na Tabela 7.24, onde ϕ designa o diâmetro da plataforma.

Tabela 7.23 – Estrutura 5: dados da estrutura e discretização do modelo.

cota	fext	e	cota	fext	e	cota	fext	e
(m)	(cm)	(cm)	(m)	(cm)	(cm)	(m)	(cm)	(cm)
30,00	52,00	0,60	20,00	62,00	0,60	10,00	72,00	0,76
29,00	53,00	0,60	19,00	63,00	0,60	9,00	73,00	0,76
28,00	54,00	0,60	18,10	63,90	0,60	8,00	74,00	0,76
27,00	55,00	0,60	17,90	64,10	0,60	7,00	75,00	0,76
26,00	56,00	0,60	17,00	65,00	0,60	6,10	75,90	0,76
25,00	57,00	0,60	16,00	66,00	0,60	5,90	76,10	0,76
24,10	57,90	0,60	15,00	67,00	0,60	5,00	77,00	0,76
23,90	58,10	0,60	14,00	68,00	0,60	4,00	78,00	0,76
23,00	59,00	0,60	13,00	69,00	0,60	3,00	79,00	0,76
22,00	60,00	0,60	12,10	69,90	0,60	2,00	80,00	0,76
21,00	61,00	0,60	11,90	70,10	0,76	1,00	81,00	0,76
						0,00	82,00	0,76

Tabela 7.24 – Estrutura 5: composição da plataforma e suporte.

Plataforma f = 2,5 m	Massa (kg)
Chapa piso	116
Chapa lateral piso	46
Perfil U 150x12,2 – Guarda-Corpo	96
Cantoneira L 102x76x6,4 – Guarda-Corpo	68
Cantoneira L 102x76x6,4 - Transversais – Guarda-Corpo	77
Cantoneira L102x76x6,4 – Suporte do piso	43
Anel inferior da plataforma	14
Emendas	3
Parafusos do Guarda-Corpo	5
Cantoneira L 152x102x9,5 - Suporte inferior da plataforma	33
Total =	500
Conjunto suporte para antena	Massa (kg)
Tubo f = 1' (25,4 mm)	6
Cantoneira (L203x152x19)	50
Grampos U (f = 1')	1
Chapa de topo	1
Total =	58

O levantamento feito no local revelou a presença de antenas de micro-ondas (MW) e de rádio-frequência (RF), que estão relacionadas juntamente com os demais acessórios da estrutura na Tabela 7.25. As informações relativas às antenas foram retiradas do catálogo do fabricante.

Todos os dispositivos mencionados anteriormente representam massas e forças concentradas adicionais à da estrutura, compostas conforme disposto na Tabela 7.25. A Tabela 7.26 apresenta os parâmetros estruturais e dos dispositivos existentes para o cálculo da ação do vento, o peso específico do material da estrutura, o carregamento axial distribuído e o localizado.

Tabela 7.25 – Estrutura 5: composição das massas nodais localizadas.

Dispositivo	Massa	1ª Plat (20m)		Suporte (27m)		2ª Plat (30m)	
	(kg/ unid)	Qtde	(kg)	Qtde	(kg)	Qtde	(kg)
Antena RF 2,6 m	19	2	37	3	56	1	19
Antena RF 1,23 m	4	1	4	0	0	1	4
Antena MW	19	2	38	0	0	0	0
Plataforma	500	1	500	0	0	1	500
Suporte para antenas	58	6	345	3	173	6	345
tubos $\phi = 1'$ (25,4 mm) (Balizador)	6	0	0	0	0	1	6
tubos $\phi = 3/4'$ (19 mm) (PR)	6	0	0	0	0	1	6
Total (kg) =			924		228		880

(PR = Pára-raios, MW = Micro-ondas, RF = rádio-frequência, Plat. = Plataforma)

Tabela 7.26 – Estrutura 5: carregamento axial localizado e características dos dispositivos.

Dispositivo	Área frontal	Ca	Cota	Peso, peso distribuído ou peso
Poste	Variável	0,6	de 0 a 30 m	77 kN/m ³
Escada	0,05 m ² /m	2,0	de 0 a 30 m	0,15 kN/m
Cabos	0,15 m ² /m	1,2	de 0 a 30 m	0,25 kN/m
1ª Plataforma	2,60 m ²	2,0	20 m	9,06 kN
Antenas da 1ª plataforma	1,99 m ²	1,0		
Antenas intermediárias	2,11 m ²	1,0	27 m	2,24 kN
Suportes intermediários	0,56 m ²	2,0		
2ª Plataforma	2,36 m ²	2,0	30 m	8,63 kN
Antenas da 2ª plataforma	0,90 m ²	1,0		

(Ca = Coeficiente de arrasto)

A geometria da estrutura e os dispositivos existentes foram esquematicamente representados na Figura 7.29. Da Figura 7.30 à Figura 7.36 são apresentadas imagens fotográficas do corpo, do carregamento instalado e do entorno da estrutura. A Figura 7.29 mostra detalhe da base da estrutura.

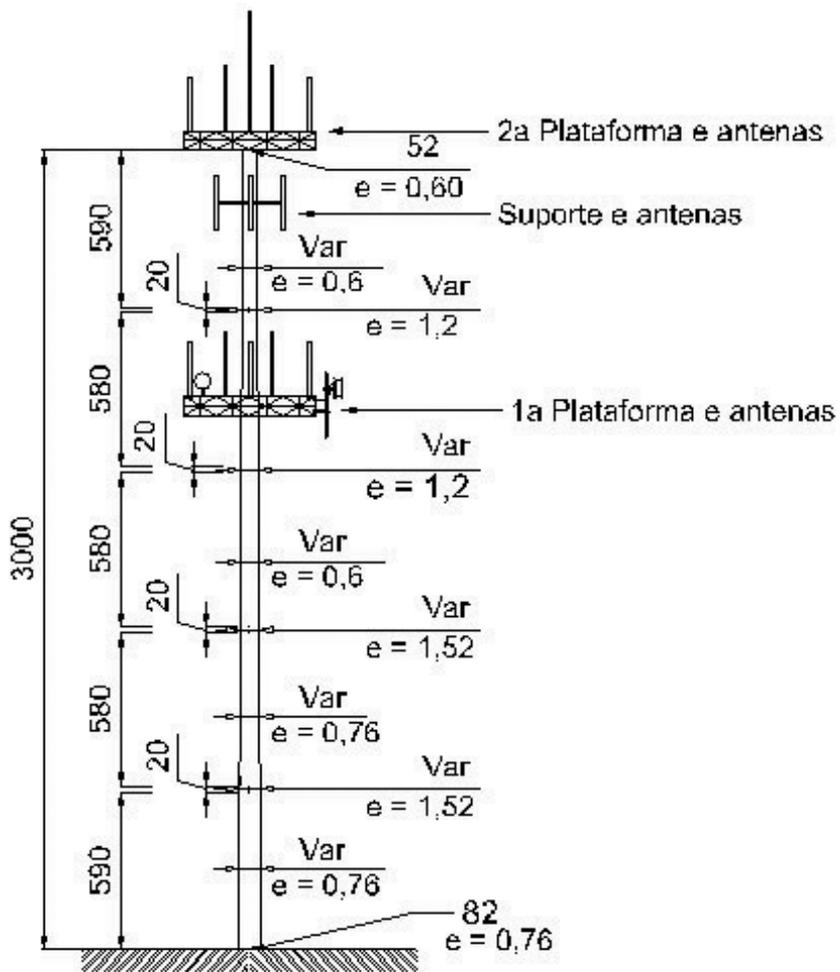


Figura 7.29 – Estrutura 5: geometria - Medidas em centímetro.

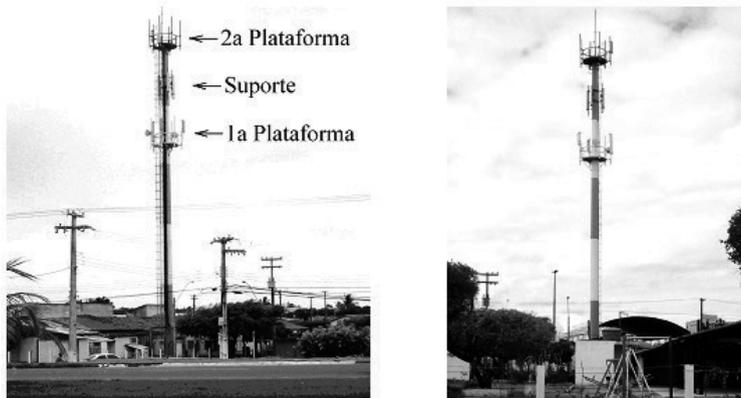


Figura 7.30 – Estrutura 5. Vista fotográfica geral.

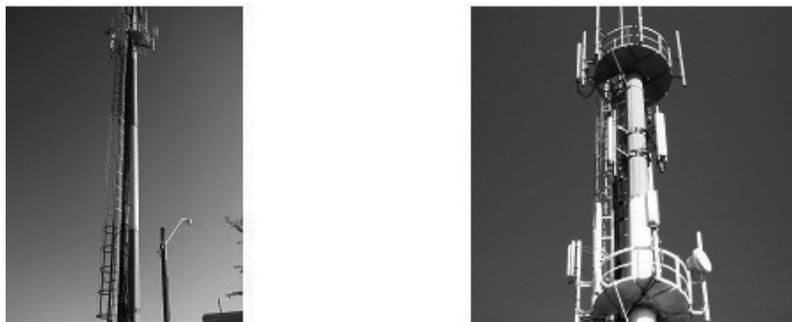


Figura 7.31 – Estrutura 5: Corpo da estrutura e carregamento.



(a) Micro-ondas



(b) Rádio Freqüência

Figura 7.32 – Estrutura 5: detalhe das antenas instaladas.



(a) Vista para o Leste



(b) Vista para o norte



(c) Vista para o Oeste



(d) Vista para o Sul

Figura 7.33 – Estrutura 5: entorno da estrutura.



Figura 7.34 – Estrutura 5: detalhe da base.

7.5.2 Investigação experimental da frequência natural de vibração da estrutura

A investigação da frequência natural da estrutura, sob excitação ambiente, foi realizada utilizando acelerômetro do tipo piezoresistivo, fabricado pela Bruel & Kjaer, com resposta DC, com sensibilidade de 1021 mV/g, com cabo integrado, capaz de medir acelerações entre ± 2 g. Esse dispositivo foi fixado à superfície da extremidade superior do poste, conforme se vê na Figura 7.35.

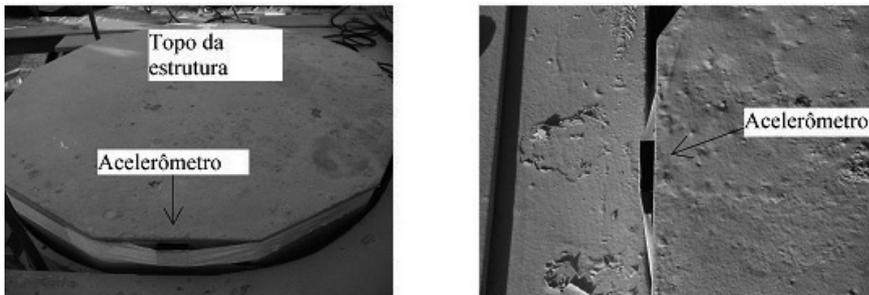


Figura 7.35 – Estrutura 5: instrumentação.

A aquisição dos dados foi feita pelo sistema ADS2000, AdDados, da Lynx informática, que estava conectado a um microcomputador portátil para gravação dos sinais. Os equipamentos foram conduzidos ao alto do poste, onde foram depositados sobre a superfície da plataforma de trabalho, conforme pode ser visto na Figura 7.36, e protegidos das intempéries. O sistema de energia elétrica da estação serviu como fonte para alimentar os equipamentos eletrônicos.



Figura 7.36 – Estrutura 5: sistema instalado na estrutura para aquisição dos dados.

A aquisição dos sinais foi realizada com taxa de 50 Hz e teve duração de 40 h 33 min 22 s, iniciando-se no dia 11 de dezembro de 2007, às 18 h 30 min 23 s. A série temporal da aceleração pode ser vista na Figura 7.37.

Percebeu-se que a estrutura estava sob suficiente excitação do vento, tendo inclusive ocorrido chuva e ventos fortes durante o período em que foi instrumentada.

A frequência fundamental da estrutura foi obtida a partir da série temporal da aquisição dos sinais pela Transformada de Fourier (FFT) no programa AqDAnalysis 7.02. O resultado obtido foi de 0,53 Hz. Na Figura 7.38 encontra-se a análise do sinal no domínio da frequência.

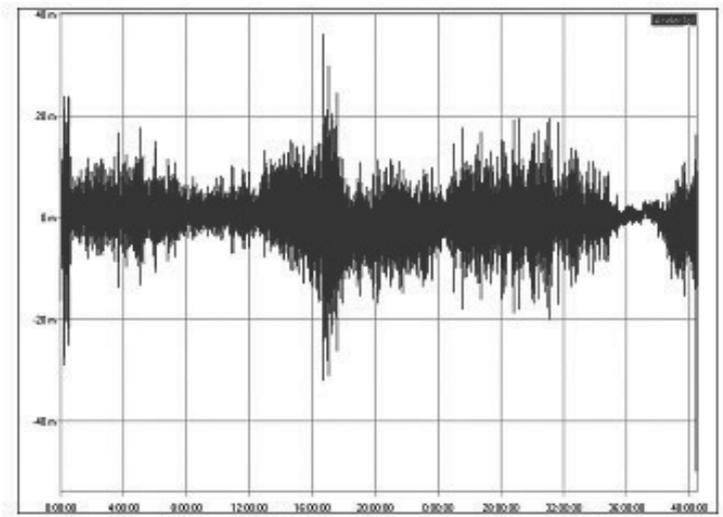


Figura 7.37 – Estrutura 5: série temporal de aceleração.

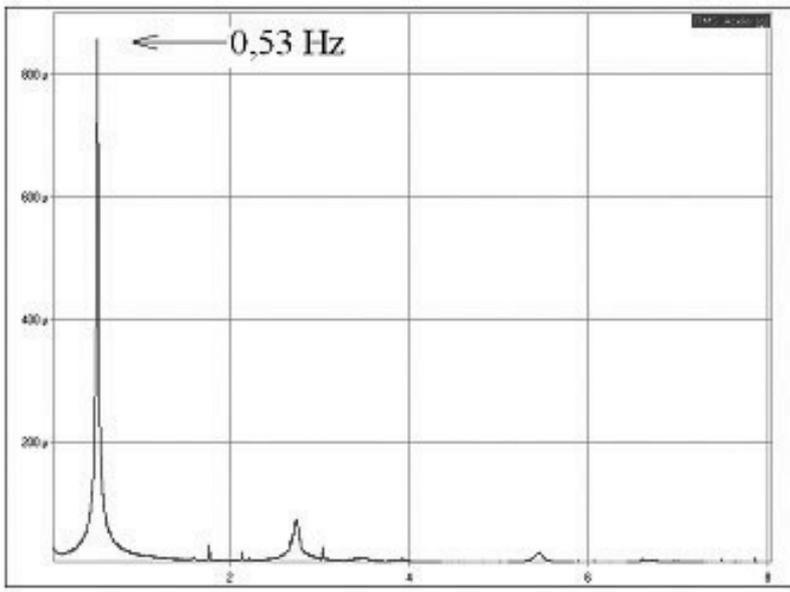
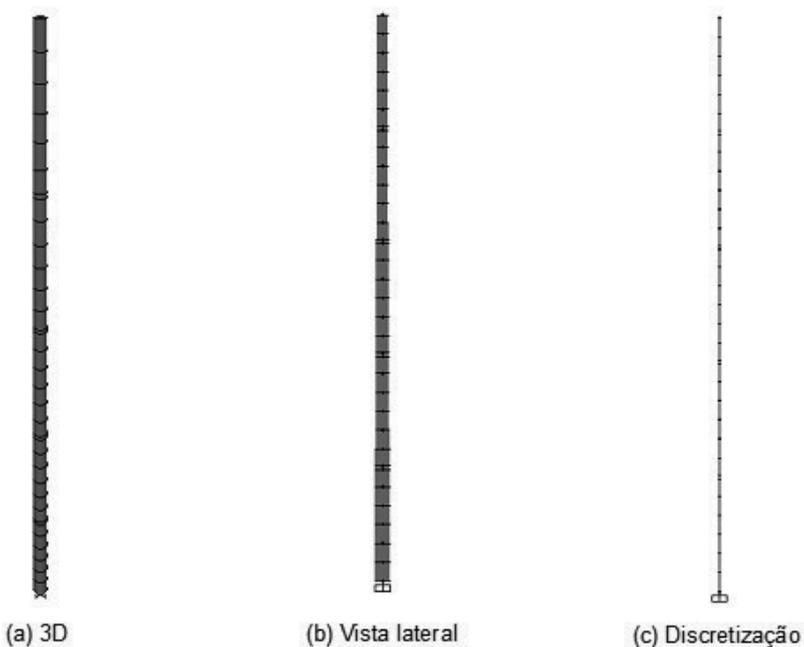


Figura 7.38 – Estrutura 5: sinal no domínio da frequência.

7.5.3 Modelagem por Elementos Finitos

A modelagem por Elementos Finitos acompanhou os critérios já utilizados nas estruturas precedentes. No entanto, há um importante detalhe que aparece na discretização deste modelo. As regiões de ligações foram tratadas como elementos de barra de seção variável de 0,2 m de comprimento e espessura correspondente à soma das espessuras das seções que estavam imediatamente acima e abaixo da zona de emenda.

Na Figura 7.39 se encontra o modelo em Elementos Finitos, com uma vista tridimensional, uma lateral e a discretização da estrutura que conta com 40 elementos de barra. Os modos de vibração e as frequências obtidas pelo Método dos Elementos Finitos são as constantes na Figura 7.40.



(NLG = Não-Linearidade Geométrica)

Figura 7.39 – Estrutura 5: modelo por Elementos Finitos.

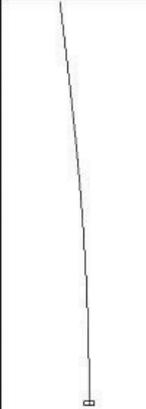
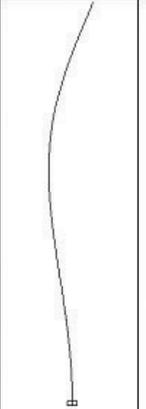
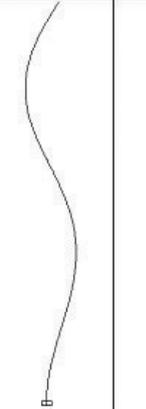
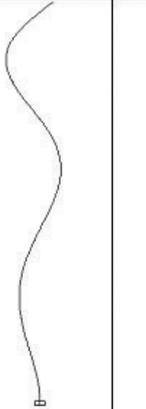
Modos naturais de vibração						
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	4º Modo	5º Modo	
	Linear	0,543873 Hz	2,895849 Hz	8,668474 Hz	16,997918 Hz	26,188995 Hz
	NLG	0,531972 Hz	2,883735 Hz	8,654253 Hz	16,984742 Hz	26,173627 Hz

Figura 7.40 – Estrutura 5: modos naturais de vibração.

7.5.4 Aplicação do método proposto

7.5.4.1 Definição dos parâmetros

Os dados para aplicação do método são:

- módulo de elasticidade: $E = 205 \text{ GPa}$,
- densidade do aço: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$,
- massa concentrada no topo: $m_0 = 880 \text{ kg}$;
- massa concentra a 27 m da altura: $m_{10} = 228 \text{ kg}$;
- massa concentrada a 20 m de altura: $m_{11} = 924 \text{ kg}$;
- massa distribuída: $m_e = 40 \text{ kg/m}$.

Em toda a estrutura o diâmetro externo varia linearmente com a altura seguindo a expressão

$$D(x) = \frac{D_9 - D_0}{L} x + D_0$$

onde D_0 é o diâmetro da extremidade superior e D_0 é o diâmetro da extremidade inferior.

As ordenadas e as espessuras das seções, dos trechos de interesse definidos na geometria são as seguintes.

Na base, quando $x = 0$, tem-se: $D_0 = 82 \text{ cm}$, $e_1 = 0,76 \text{ cm}$.

No primeiro segmento, da base do poste até $L_1 = 5,90 \text{ m}$, tem-se $e_1 = 0,76 \text{ cm}$.

No segundo segmento, entre L_1 e $L_2 = 6,10 \text{ m}$, define-se $e_2 = 1,52 \text{ cm}$.

No terceiro segmento, entre L_2 e $L_3 = 11,90 \text{ m}$, tem-se $e_3 = 0,76 \text{ cm}$.

No quarto segmento, entre L_3 e $L_4 = 12,10 \text{ m}$, tem-se $e_4 = 1,52 \text{ cm}$.

No quinto segmento, entre L_4 e $L_5 = 17,90 \text{ m}$, tem-se $e_5 = 0,60 \text{ cm}$.

No sexto segmento, entre L_5 e $L_6 = 18,10 \text{ m}$, tem-se $e_6 = 1,20 \text{ cm}$.

No sétimo segmento, entre L_6 e $L_7 = 23,90 \text{ m}$, tem-se $e_7 = 0,60 \text{ cm}$.

No oitavo segmento, entre L_7 e $L_8 = 24,10 \text{ m}$, tem-se $e_8 = 0,60 \text{ cm}$.

No nono segmento, entre L_8 e $L = 30,00 \text{ m}$, tem-se $e_9 = 0,60 \text{ cm}$.

As propriedades geométricas, como diâmetro interno, área e momento de inércia das seções, foram obtidas com as seguintes expressões gerais:

$$d_i(x) = D(x) - 2e_i$$

$$A_i(x) = \frac{\pi}{4} (D(x)^2 - d_i(x)^2)$$

$$I_i(x) = \frac{\pi}{64} (D(x)^4 - d_i(x)^4)$$

onde i caracteriza o segmento analisado.

7.5.4.2 Cálculo da massa generalizada

A massa generalizada oriunda das massas distribuídas de cada segmento, foi calculada fazendo-se

$$m_i = \int_{L_{i-1}}^{L_i} m_i(x) \phi(x)^2 dx, \text{ com } m_i(x) = A_i(x)\rho + m_c$$

com $i, i = 1, 2, \dots, 9$.

E a generalização das massas concentradas foi obtida por

$$m_{10} = m_x \phi(x_{10})^2, \text{ com } x_{10} = 27,00 \text{ m};$$

$$m_{11} = m_{x1} \phi(x_{11})^2, \text{ com } x_{11} = 20,00 \text{ m};$$

A massa distribuída generalizada fica então

$$m_R = \sum_{i=1}^{11} m_i$$

E a massa generalizada total

$$M = m_0 + m_R$$

7.5.4.3 Cálculo da rigidez generalizada

Rigidez geométrica generalizada

Os esforços normais concentrados são dados por:

$$F_0 = m_0 g,$$

$$F_{11} = m_{XI} g$$

$$F_{10} = m_X g$$

E as forças normais devidas a massa distribuída dos segmentos, por

$$F_i = \int_{L_{i-1}}^{L_i} m_i(x) g dx$$

A força normal generalizada é, então:

$$F = \sum_{i=0}^{11} F_i .$$

Com isso as parcelas das rigidezes geométricas foram calculadas pelas seguintes expressões:

$$K_{g9} = \int_{L_8}^L \left[F_0 + F_{10} + m_{IX}(x)(L-x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right],$$

$$K_{g8} = \int_{L_7}^{L_8} \left[F_0 + F_{10} + F_9 + m_{VIII}(x)(L_8-x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right],$$

que se repete para os demais segmentos, de forma que se pode escrever

$$K_{gi} = \int_{L_{i-1}}^{L_i} \left[F_0 + \sum_{i+1}^{10} F_{i+1} + m_i(x)(L_i - x)g \left(\frac{d}{dx} \phi(x) \right)^2 \right]$$

Assim, a rigidez geométrica generalizada total é:

$$K_g = \sum_{i=1}^{11} K_{gi}$$

7.5.4.3.1 Rigidez elástica generalizada

Analogamente à rigidez geométrica, calcularam-se as parcelas das rigidezes convencionais generalizadas por

$$K_{oi} = \int_{L_{i-1}}^{L_i} EI_i(x) \left(\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) \right)^2 dx$$

e a rigidez elástica generalizada pelo somatório

$$K_0 = \sum_{i=1}^{11} K_{oi}$$

7.5.5 Cálculo da frequência

As frequências do primeiro modo de vibração da estrutura calculadas pelo método proposto neste trabalho são: modelo linear = 0,550271 Hz e modelo não-linear = 0,537826 Hz.

7.5.6 Ação do vento

7.5.6.1 Forças estáticas devidas ao vento

As anotações existentes na placa de identificação da estação indicam os parâmetros empregados na determinação das forças estáticas devidas a ação do vento e utilizados no dimensionamento da

estrutura, que são: fator topográfico $S_1 = 1,0$; fator de rugosidade do terreno S_2 correspondente à categoria II, classe B; fator estatístico $S_3 = 1,1$; velocidade básica do vento $V_0 = 30$ m/s.

7.5.6.2 Resposta dinâmica pelo modelo simplificado da NBR 6123/88

Os parâmetros usados na determinação da resposta dinâmica pelo modelo contínuo simplificado da NBR 6123/88 foram os seguintes: largura da edificação 0,670 m, altura da edificação 30 m, categoria do terreno, velocidade básica do vento e fatores estatísticos como descrito no item anterior.

Para o cálculo da frequência recorreu-se à recomendação contida na Tabela 6.4 (Tabela 19 da NBR 6123/88). Com a expressão $0,29\sqrt{h} - 0,4$ obtém-se uma frequência do modo fundamental igual a 0,841471 Hz, um resultado distante 35,37% do calculado linearmente pelo Método dos Elementos Finitos e distante 36,08% do cálculo desenvolvido pelo método proposto. Com esse resultado, a relação adimensional $V_p/(f_1L)$ torna-se igual a 0,010. Adotando a taxa de amortecimento crítico ζ igual a 0,015 chega-se a um coeficiente de amplificação dinâmica ξ de 1,926. A forma de vibração do primeiro modo sugerida pela NBR6123/88 tem, para a correspondente expressão da frequência, o expoente da expressão (6.6) igual 1,7.

A segunda avaliação, usando o modelo simplificado da NBR 6123/88, feita sob não-linearidade geométrica, teve como ponto de partida a frequência de 0,531970 Hz. Com isso, a relação adimensional $V_p/(f_1L)$ fica em 0,024, o que conduziu a um fator de amplificação dinâmica $\xi = 2,180$.

7.5.6.3 Resposta dinâmica pelo modelo discreto da NBR 6123/88

A resposta dinâmica pelo modelo dinâmico discreto linear foi calculada com base na frequência e parâmetros citados no item precedente. Para esse procedimento de cálculo, a relação adimensional $V_p/(f_1L)$ foi de 0,023 e o coeficiente de amplificação dinâmica de 2,158.

O cálculo da resposta dinâmica com a inclusão da não-linearidade geométrica foi feito levando-se em conta as contribuições até o 5º modo de vibração. Para o primeiro modo a relação adimensional e o coeficiente de amplificação dinâmica constam no item anterior. Para os modos de 2 a 5, a relação adimensional e o coeficiente de amplificação dinâmica são, respectivamente, 0,004 e 1,634; 0,001 e 1,508; 0,001 e 1,463; 0,0005 e 1,444.

7.5.7 Análise dos resultados

Os esforços normais na estrutura pelo método proposto e pelo Método dos Elementos Finitos podem ser vistos na Tabela 7.27.

Tabela 7.27 – Estrutura 5: esforço normal.

L	Proposto	MEF	Diferença	
			Absoluta	(%)
(m)	(kN)	(kN)		
30,00	8,624000	8,624000	0,0000	0,000000
24,10	17,820587	17,820587	0,0000	-0,000001
23,90	18,228409	18,228409	0,0000	-0,000001
18,10	34,636570	34,636570	0,0000	-0,000001
17,90	35,079190	35,079190	0,0000	-0,000001
12,10	42,936723	42,936724	0,0000	-0,000001
11,90	43,518196	43,518196	0,0000	-0,000001
6,10	53,486859	53,486860	0,0000	-0,000001
5,90	54,112409	54,112410	0,0000	-0,000001
0,00	64,908508	64,908509	0,0000	-0,000001

A frequência do primeiro modo de vibração obtida pelo método proposto, sem a consideração da não-linearidade geométrica, foi de 0,550271 Hz e pelo Método dos Elementos Finitos, de 0,543873 Hz, apresentando uma diferença de 1,18%. Pela expressão adotada da NBR 6123/88, essa frequência corresponde a 0,841471 Hz.

A diferença entre a frequência fundamental do modelo não-linear, calculada pelo método proposto de 0,537826 Hz, e a obtida pelo MEF de 0,531972 Hz, é de 1,10%. Ambas as frequências coincidem, com a frequência medida experimentalmente, o que valida a aplicação da solução proposta nesta Tese.

Verificou-se bom ajustamento da forma de vibração adotada pelo método proposto e a do modelo não-linear do MEF.

A frequência calculada pela aproximação do método proposto, usando a expressão (4.21), foi de 0,408091 Hz, apresentando uma diferença de 24,12 % em relação ao valor exato do método e de 36,08% em relação ao resultado obtido segundo a expressão sugerida pela NBR6123/88.

Os resultados críticos da ação do vento são encontrados na comparação entre a análise estática e a análise pelo modelo dinâmico discreto não-linear, quando a análise não-linear supera a análise estática em 1,56 vezes (55,69 %).

A análise dinâmica discreta linear fica 54,67% acima da análise estática. Já as resposta dinâmicas obtida com os modelos simplificados guardam entre si uma diferença de 8,47%, com superioridade da análise não-linear.

Comparando os resultados obtidos pelas análises discretas não-lineares, verifica-se novamente uma pequena influência da contribuição dos modos de vibração que estão acima do fundamental, resultando uma diferença de 0,01% entre a resposta dinâmica da estrutura com a consideração exclusiva do primeiro modo e a combinação que inclui também as contribuições do 2º modo.

Na resposta dinâmica da estrutura com superposição das contribuições do vento médio com as flutuações devidas ao primeiro modo de vibração, as flutuações do 1º modo são responsáveis por 66% da resposta dinâmica total da estrutura, conforme pode ser visto na Tabela 7.28.

A diferença entre a frequência fundamental do modelo linear e a do modelo não-linear, de 2,19%, elevou o coeficiente de amplificação dinâmica em 1,02%. Com isso, o momento fletor máximo na estrutura foi acrescido de 4,99 kNm, uma diferença de 0,65%.

A Tabela 7.29 traz o valor dos momentos máximos devidos à ação do vento das análises realizadas, comparando-as ao modelo estático.

Tabela 7.28 – Estrutura 5: momentos fletores da análise discreta não-linear.

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,00	2,61	6,78	0,47	0,26	0,28	0,08
28,00	5,46	14,35	0,99	0,53	0,56	0,16
27,00	8,55	22,70	1,54	0,79	0,79	0,21
26,00	13,27	33,15	2,13	0,97	0,81	0,18
25,00	18,23	44,29	2,71	1,11	0,74	0,11
24,10	22,91	54,88	3,23	1,20	0,61	0,03
23,90	23,98	57,31	3,34	1,21	0,57	0,01
23,00	28,98	68,57	3,82	1,23	0,35	0,08

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
22,00	34,77	81,64	4,32	1,20	0,06	0,17
21,00	40,80	95,23	4,77	1,11	0,26	0,24
20,00	47,07	109,32	5,16	0,97	0,58	0,29
19,00	56,06	127,10	5,03	0,56	0,65	0,16
18,10	64,37	143,45	4,86	0,18	0,68	0,03
17,90	66,25	147,13	4,81	0,09	0,68	0,01
17,00	74,86	163,91	4,55	0,29	0,64	0,11
16,00	84,66	182,88	4,20	0,70	0,55	0,22
15,00	94,69	202,16	3,77	1,06	0,39	0,28
14,00	104,95	221,71	3,26	1,37	0,20	0,30
13,00	115,44	241,50	2,69	1,60	0,02	0,26
12,10	125,07	259,50	2,12	1,74	0,22	0,19
11,90	127,24	263,52	1,99	1,76	0,27	0,17

z	Vento Médio	Flutuações				
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4	Modo 5
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
11,00	137,16	281,75	1,35	1,79	0,45	0,06
10,00	148,40	302,18	0,57	1,71	0,61	0,08
9,00	159,84	322,77	0,26	1,53	0,72	0,21
8,00	171,50	343,49	1,15	1,24	0,75	0,32
7,00	183,36	364,31	2,07	0,85	0,71	0,38
6,10	194,20	383,11	2,93	0,44	0,60	0,39
5,90	196,64	387,30	3,12	0,33	0,57	0,38
5,00	207,72	406,17	4,01	0,16	0,38	0,32
4,00	220,21	427,18	5,01	0,76	0,12	0,20
3,00	232,88	448,22	6,03	1,40	0,19	0,03
2,00	245,70	469,28	7,06	2,06	0,53	0,17
1,00	258,66	490,34	8,08	2,73	0,89	0,39
0,00	271,74	511,40	9,11	3,41	1,25	0,61

Tabela 7.29 – Estrutura 5: momentos fletores na estrutura.

z	Análise Estática	ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
			Combinação das contribuições modais						
			Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)		
30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
29,00	4,61	9,22	9,29	9,30	9,31	9,31	9,10	9,97	
28,00	9,65	19,46	19,61	19,64	19,65	19,66	19,02	20,83	
27,00	15,13	30,70	30,93	30,98	31,00	31,01	29,70	32,54	
26,00	23,51	45,59	45,93	46,00	46,01	46,02	45,23	49,56	
25,00	32,33	61,40	61,86	61,94	61,95	61,96	61,44	67,34	
24,10	40,65	76,38	76,95	77,05	77,06	77,06	76,60	83,95	

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
23,90	42,56	79,82	80,42	80,51	80,52	80,53	80,53	80,53	80,06	87,75
23,00	51,47	95,79	96,50	96,61	96,62	96,62	96,62	96,62	96,03	105,24
22,00	61,79	114,30	115,14	115,26	115,27	115,27	115,27	115,27	114,32	125,29
21,00	72,56	133,57	134,55	134,67	134,68	134,68	134,68	134,68	133,15	145,91
20,00	83,77	153,57	154,69	154,81	154,82	154,82	154,82	154,82	152,47	167,06
19,00	100,04	179,85	181,15	181,25	181,25	181,25	181,25	181,25	177,02	193,79
18,10	115,07	204,06	205,52	205,61	205,61	205,61	205,61	205,61	199,48	218,23
17,90	118,47	209,52	211,02	211,10	211,10	211,10	211,10	211,10	204,53	223,72

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática			Combinação das contribuições modais						
	(kNm)	(kNm)		Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
17,00	134,08	234,45	236,12	236,18	236,18	236,18	236,18	236,18	227,49	248,70
16,00	151,86	262,70	264,55	264,60	264,60	264,60	264,60	264,60	253,35	276,80
15,00	170,08	291,48	293,51	293,55	293,55	293,55	293,55	293,55	279,54	305,23
14,00	188,74	320,75	322,98	323,00	323,01	323,01	323,01	323,01	306,01	333,96
13,00	207,85	350,49	352,91	352,92	352,93	352,93	352,93	352,93	332,74	362,94
12,10	225,42	377,62	380,22	380,22	380,23	380,23	380,23	380,23	356,99	389,22
11,90	229,39	383,71	386,34	386,35	386,35	386,35	386,35	386,35	362,41	395,09
11,00	247,53	411,35	414,15	414,16	414,16	414,16	414,16	414,16	386,93	421,62

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
10,00	268,10	442,44	445,44	445,44	445,45	445,45	445,45	445,45	414,33	451,25
9,00	289,11	473,89	477,10	477,10	477,10	477,10	477,10	477,10	441,88	481,03
8,00	310,54	505,68	509,08	509,08	509,09	509,09	509,09	509,09	469,56	510,91
7,00	332,39	537,77	541,37	541,37	541,37	541,37	541,38	541,38	497,34	540,89
6,10	352,42	566,88	570,66	570,67	570,67	570,67	570,67	570,67	522,41	567,93
5,90	356,93	573,39	577,21	577,22	577,22	577,22	577,22	577,22	527,99	573,94
5,00	377,47	602,80	606,80	606,82	606,82	606,82	606,82	606,82	553,14	601,05
4,00	400,68	635,70	639,90	639,93	639,93	639,93	639,93	639,93	581,12	631,20

z	Análise		ADL	Análise Dinâmica Não-Linear					ADSL	ADSNL
	Estática	(kNm)		Combinação das contribuições modais						
				Modo 1	1 e 2	1 a 3	1 a 4	1 a 5		
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	
3,00	424,28	668,79	673,19	673,23	673,23	673,23	673,23	673,23	661,38	
2,00	448,25	702,06	706,65	706,70	706,71	706,71	706,71	706,71	691,57	
1,00	472,56	735,46	740,26	740,32	740,33	740,33	740,33	740,33	721,77	
0,00	497,18	768,99	773,98	774,06	774,07	774,07	774,07	774,07	751,97	
Relação	1,00	1,55	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,51	
D kNm	0,00	271,81	276,80	276,88	276,90	276,90	276,90	276,90	254,79	
D %	0,00%	54,67%	55,68%	55,69%	55,69%	55,69%	55,69%	55,69%	51,25%	

(ADDL – Análise Dinâmica Discreta Linear, ADSL – Análise Dinâmica Simplificada Linear, ADSNL – Análise Dinâmica Simplificada Não-Linear).

A Figura 7.41 condensa e apresenta os resultados obtidos das análises considerando a ação do vento sobre a estrutura, onde, de baixo para cima, estão, respectivamente, a análise estática; as análises dinâmicas simplificadas, linear e não-linear; e as análises dinâmicas discretas, linear e não-linear do 1º modo e modos superiores até o 5º, respectivamente.

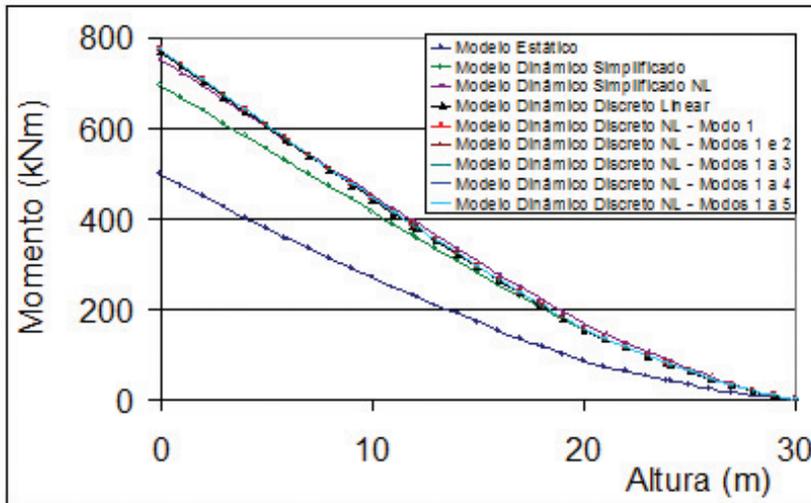


Figura 7.41 – Ação do vento na estrutura 5.

As formas modais da NBR 6123/88, a do Método dos Elementos Finitos e a do método proposto constam na Figura 7.42(a).

Uma melhor aproximação à forma modal não-linear é conseguida substituindo-se o expoente da expressão (6.6) por 1,85; tendo em vista que a curva definida com esse novo expoente oferece uma menor diferença entre seus pontos e os da curva da forma modal não-linear, como pode ser observado na Figura 7.42(b).

O expoente sugerido anteriormente distancia-se 9% do valor do recomendado pela NBR 6123/88.

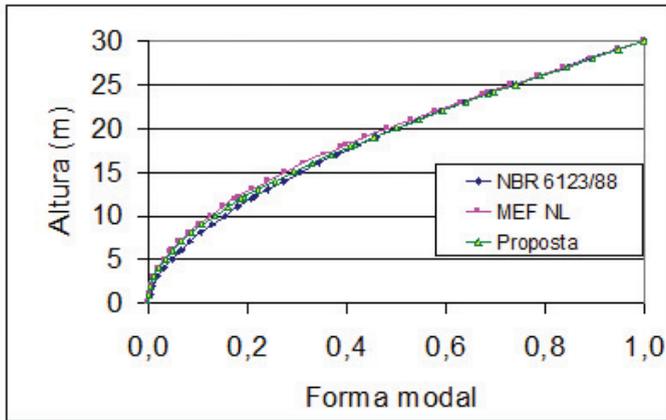
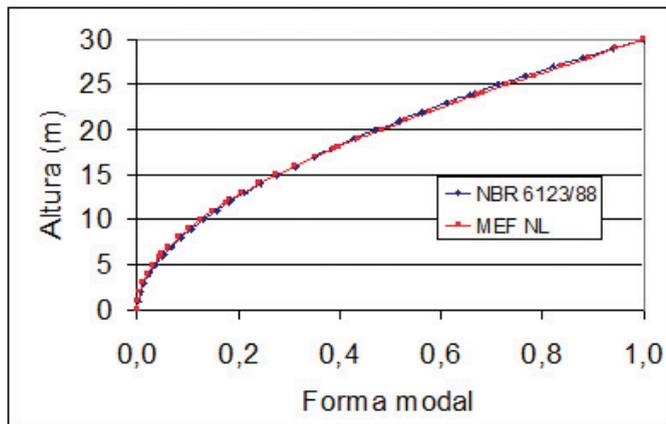
(a) expoente da forma modal: $\gamma=1,7$ (b) expoente da forma modal: $\gamma=1,85$

Figura 7.42 – Estrutura 5 – comparativo das formas modais: (a) usada na análise, (b) sugerida.

7.6 RESUMO

A Tabela 7.30 resume as frequências naturais das estruturas analisadas. Os fatores que nela são indicados se referem à relação entre os resultados da aplicação direta das Eq. (4.19) ou (4.21), denominada de solução aproximada do método proposto, com a solução completa do método e com o Método dos Elementos Finitos.

Tabela 7.30 – Frequências das estruturas reais analisadas.

Estrutura		L (m)	Método Proposto				M. Elementos Finitos			NBR
Nº	Tipo		Linear	NL	Aprox.	Fator	Linear	NL	Fator	
1	Poste metálico	48	0,569799	0,562350	0,403193	1,3947	0,492870	0,483026	1,1980	1,388889
2	Poste metálico	61	0,411504	0,403130	0,307058	1,3129	0,410567	0,402115	1,3096	1,096491
3	Poste de CA	40	0,238381	0,215715	0,189377	1,1391	0,225133	0,201796	1,0656	1,666667
4	Poste de CA*	46	0,218848	0,145517	0,115210	1,2631	0,216915	0,141285	1,2263	1,086957
5	Poste metálico	30	0,550271	0,537826	0,408091	1,3179	0,543873	0,531972	1,3036	0,841471
* Indica NLG e NLM					Média =	1,2855		Média =	1,2206	

(L = edificação, CA = concreto armado, NLG = Não Linearidade Geométrica, NLM = Não-Linearidade Material)

Puderam ser apreciados os expoentes γ da forma modal

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

prevista na NBR 6123/88, obtendo-se valores que melhor a aproximam à forma modal dos modelos não-lineares. Os resultados estão na Tabela 7.31. Para a estrutura 4 o expoente apresentado, correspondente à forma modal da NBR 6123/88, é relativo ao cálculo, cujos resultados foram mais desfavoráveis.

Tabela 7.31 – Expoente das formas modais.

Estrutura		Altura (m)	Previsto na NBR 6123/88	Sugerido por esta pesquisa	Diferença (%) em relação à NBR
Nº	Tipo				
1	Poste metálico	48	1,7	1,965	-16
2	Poste metálico	61	1,7	1,775	-4
3	Poste de CA	40	1,7	1,600	6
4	Poste de CA	46	1,7	1,770	-4
5	Poste metálico	30	1,7	1,850	-9

Para a determinação da ação do vento empregaram-se os processos normativos vigentes, assim denominados: análise estática, análise dinâmica simplificada e análise dinâmica discreta. Fez-se a introdução de mais um modelo de cálculo que ficou denominado de análise dinâmica simplificada não-linear, por estar baseada na frequência e na forma de vibração do modelo não-linear.

Foram feitas duas análises dinâmicas discretas. Uma tinha caráter puramente linear, tanto do ponto de vista geométrico quanto ma-

terial, enquanto que a outra possuía caráter não-linear geométrico e não-linear material quando indicado. No modelo dinâmico não-linear foram computadas as contribuições do 1º ao 5º modo de vibração na parcela relativa às flutuações sobre a velocidade média.

Foi visto que o 1º modo de vibração é o que aporta maior contribuição na resposta da estrutura dentre os outros modos de vibração. Supera, nos casos analisados, sempre a contribuição do vento médio na resposta dinâmica total.

Foram apreciadas as diferenças produzidas na determinação do momento em relação à base das estruturas pelos processos de cálculo mencionados. A Tabela 7.32 traz os momentos fletores máximos nas estruturas em relação à análise estática. Para a estrutura 4 os resultados apresentados são os referentes à taxa de amortecimento crítico de 0,01

A relação entre as análises dinâmicas discretas pode ser vista na última coluna da Tabela 7.32.

Tabela 7.32 – Relação do momento máximo na estrutura.

Estrutura		Categ.	Classe	V ₀ m/s	AE	ADDL [†]	ADDNL ^{††}	ADSL	ADSNL	ADDL/ ADDNL
Nº	Tipo									
1	Poste metal	III	C	45	1,00	1,33	1,34	1,49	1,46	1,0097
2	Poste metal.	III	B	40	1,00	1,58	1,61	2,14	2,22	1,0156
3	Poste de CA	IV	B	35	1,00	1,23	1,32	1,23	1,61	1,0785
4	Poste de CA*	IV	B	35	1,00	1,35	1,41	1,41	1,41	1,0428
5	Poste metal.	II	B	30	1,00	1,55	1,56	1,39	1,51	1,0065
	* NLG e NLM									

(AE = análise estática, ADDL = análise dinâmica discreta linear, ADDNL = análise dinâmica discreta não-linear, ADS = análise dinâmica simplificada linear, ADSNL = análise dinâmica simplificada não-linear).

[†] 1º modo
^{††} do 1º ao 5º modo

