

5 Estudo da torre LT103

A maioria das torres esbeltas possuem seção simétrica ao longo de sua geometria e, muitas vezes, o modelo computacional é composto por uma grande quantidade de nós. Como as barras da treliça estão sujeitas apenas a esforços de tração e compressão, para que a realidade se aproxime das hipóteses de cálculo, as cargas devem ser aplicadas nos nós da estrutura. Tendo o vento como carregamento principal nessas estruturas, a determinação da força de arrasto se dá, inicialmente, para as barras e depois é transferida para os nós. Dependendo da quantidade de nós e barras, um tempo considerável de cálculo é requerido até a aplicação do carregamento nas estruturas.

Tendo em vista simplificar a aplicação das cargas do vento, diversas hipóteses de aplicação dos carregamentos são verificadas com a finalidade de reduzir o número de graus de liberdade do modelo e, conseqüentemente, o tempo computacional da análise numérica. Preliminarmente, promove-se a sintonização do modelo computacional ajustando-se as suas freqüências naturais com base nos valores das freqüências do protótipo, medidas no campo.

5.1. Modelagem da estrutura

A partir do modelo numérico concebido inicialmente, uma calibração do mesmo é realizada para simular o sistema real da LT103. Aplicam-se, portanto, as massas da linha condutora de energia.

A Tabela 5.1 apresenta as 8 primeiras freqüências modeladas numericamente sem suportes (cabos de energia e pára-raios) e as freqüências medidas em campo.

Tabela 5.1 – Freqüências modeladas e freqüências medidas, LT103.

Modo	Freqüências Medidas (Hz)	Freqüências modeladas Sem suportes (Hz)
1	1,66	2,01
2	1,79	2,09
3	1,84	2,41
4	2,14	3,42
5	2,77	3,61
6	2,93	3,42
7	3,09	3,61
8	3,83	3,63

Ao considerar os efeitos dos cabos condutores e pára-raios, uma questão é indagada quanto à análise dinâmica: “qual a massa a ser considerada na estrutura?”. Para uma análise dinâmica que represente o sistema real, convém ajustar a massa dos cabos na torre.

O efeito do peso próprio dos condutores em uma estrutura intermediária é expresso pela média dos pesos dos dois semivãos vizinhos.

$$P_{cabo} = p_{cabo} \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \quad (5.1)$$

Onde: P_{cabo} é o peso próprio do cabo; p_{cabo} é o peso próprio do cabo por unidade de comprimento; V_1 e V_2 são os vãos adjacentes à torre.

A Tabela 5.2 apresenta os dados dos cabos condutores de energia correspondentes à LT103.

Tabela 5.2 – Parâmetros dos condutores da LT103.

Configuração	Vão maior (m)	Vão menor (m)
Indeformado	678	209,15
Deformado	683,83	211,32
<hr/>		
p_{cabo} (N/m)	Diâmetro (m)	E (N/m ²)
13	0,0252	7,562E+09

De acordo com a equação (5.1), o peso próprio de cada cabo de energia na LT103 é descrita a seguir:

$$P_{pcabo} = 5,77 \text{ kN} \quad (5.2)$$

A linha na torre LT103, é composta por 6 isoladores sustentando 2 cordoalhas de cabos de energia cada. Sendo assim, totaliza 69,20 kN de cabos condutores de energia.

Algumas tentativas são realizadas para o ajuste das frequências naturais do sistema variando-se os valores das massas dos cabos a serem consideradas na LT103. Para a sintonização das frequências, conclui-se pela consideração de uma massa de 165 kg, o equivalente aproximadamente a 2% da massa total dos cabos condutores de energia. Essa massa é distribuída nos locais de fixação desses suportes na LT103. A Tabela 5.3 mostra as frequências sintonizadas com os cabos condutores de energia e pára-raios.

Tabela 5.3 – Frequências modeladas, medidas e ajustadas.

Modo	Frequências Medida (Hz)	Frequências modeladas Com suportes (Hz)
1	1,66	1,67
2	1,79	1,79
3	1,84	1,83
4	2,15	2,27
5	2,77	2,59
6	2,94	2,95
7	3,10	3,08
8	3,83	3,29

Importante salientar que o ajuste das 3 primeiras frequências já é o suficiente para representação do modelo real, entretanto, verifica-se coerência entre o modelo numérico e o medido em campo até a oitava frequência.

5.2. Simplificação do carregamento do vento

As normas preconizam a divisão das torres em módulos para cálculo dos efeitos de carregamento provocado pela ação do vento, que, por sua vez, é em função da altura do terreno e das áreas das barras de projeção ortogonal ao vento.

O modelo numérico da torre LT103, já inclui o carregamento do vento lançado na estrutura, calculado segundo as prescrições da NBR 6123, para uma velocidade de vento de 30 m/s. A Figura 5.1 ilustra o carregamento do vento aplicado no modelo numérico, nó por nó, na direção y-y.

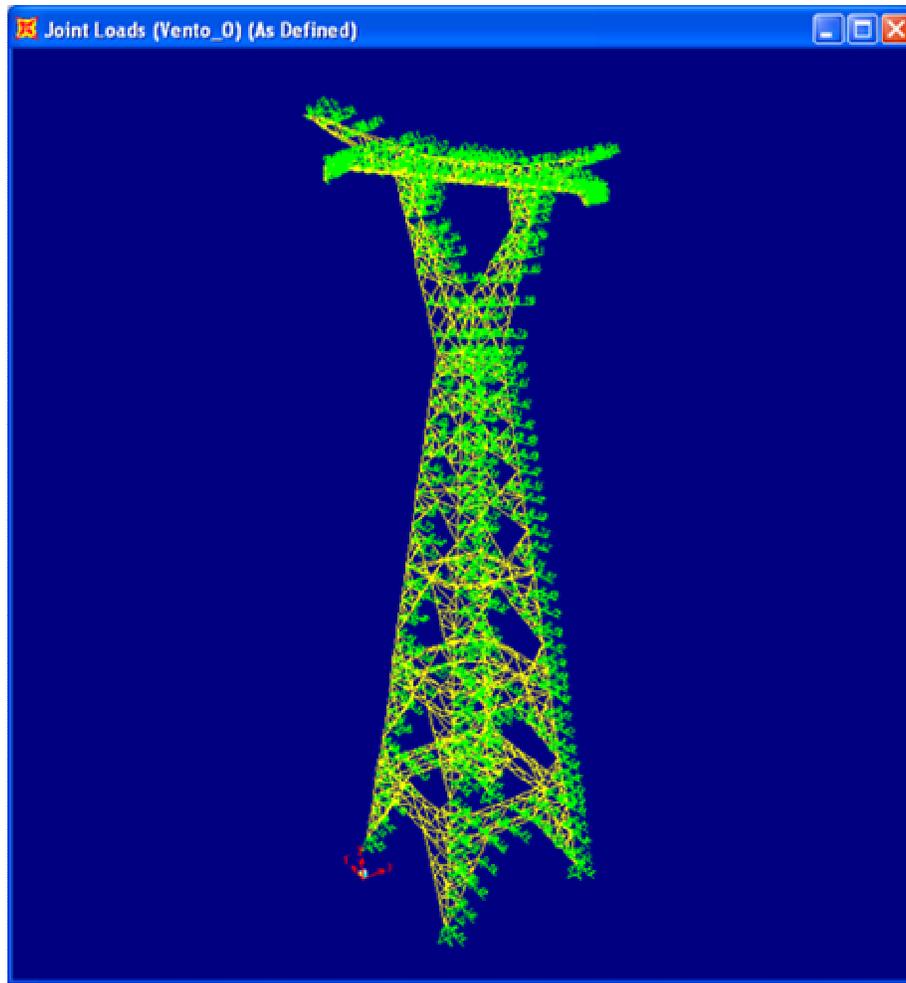


Figura 5.1 – Carregamento do vento à 30 m/s, aplicado nos nós da estrutura

A torre LT103 com os carregamentos lançados nos nós, conforme a Figura 5.1, é referida como modelo “**original**”, com a finalidade de adotar um padrão para comparação com as condições de carregamento propostas a seguir.

Para avaliação da simplificação, é feito um roteiro de obtenção e aplicação das cargas:

- divide-se o modelo original em módulos, Figura 5.2;
- retiram-se os carregamentos do vento diretamente da estrutura;
- obtêm-se carregamentos que agem por módulo;
- aplicam-se novamente esses carregamentos, conforme a Figura 5.4.

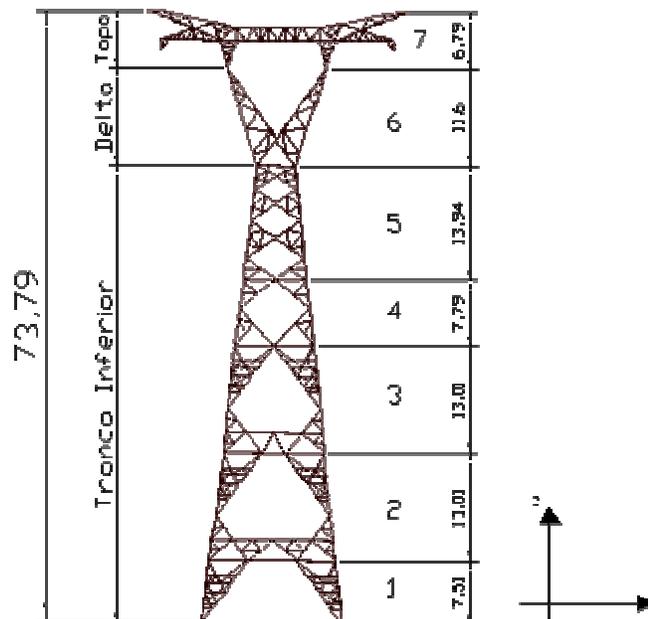


Figura 5.2 – Divisão da LT103 em módulos.

A Tabela 5.4 mostra as forças de arrasto retiradas da configuração original da LT103.

Tabela 5.4 – Força de arrasto por módulo nas torres.

Módulo	Força de arrasto (kN)
7	44,43
6	25,66
5	34,84
4	17,43
3	32,39
2	31,16
1	14,22
Total	200,13

Apenas carregamentos do vento na direção longitudinal da torre (direção dos cabos, coordenada y) são considerados para o estudo de simplificação de cargas da LT103. Para identificação das faces da torre é adotado o esquema conforme a Figura 5.3.

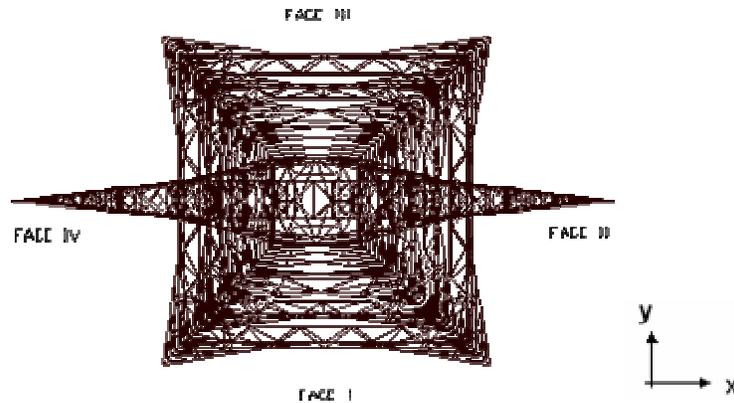


Figura 5.3 – Vista aérea, faces da LT103.

A FACE I refere-se ao vento a barlavento na torre, e a face III a sotavento.

Os carregamentos retirados da torre original apresentados na Tabela 5.4, são relançados nos nós superiores de cada módulo adotando as hipóteses, identificadas por algarismo romano, a seguir:

- I** - Apenas cargas nos 4 cantos;
- II** - Cargas distribuídas por todos os nós;
- III** - Cargas a sotavento (FACE III);
- IV** - Cargas a barlavento (FACE I);
- V** - Cargas distribuídas a sotavento e barlavento.

Assim, o carregamento é relançado, redistribuindo aos nós superiores a partir do primeiro módulo, metade do carregamento para cada, e para o primeiro, metade desse carregamento vai para as reações de apoio.

A Figura 5.4 ilustra a distribuição da força de arrasto, F_a , nos nós superiores dos módulos, conforme proposto neste trabalho.

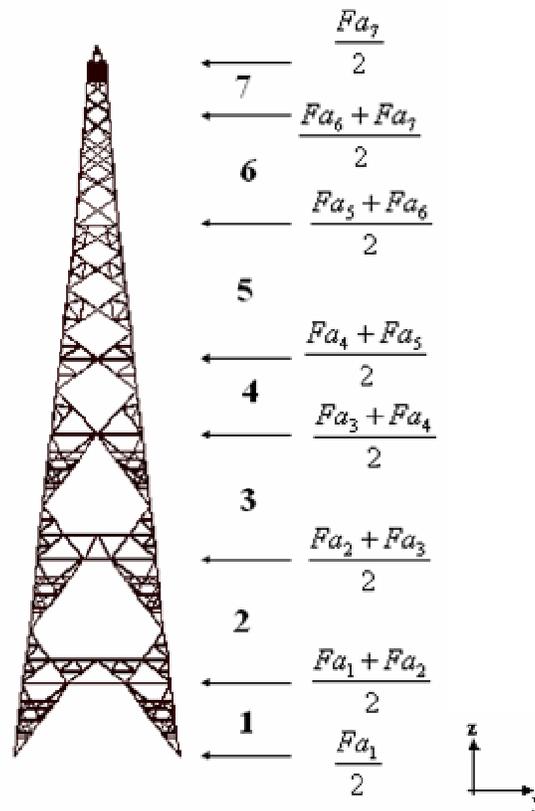


Figura 5.4 - Aplicação das cargas nós módulos, vista lateral, Torre LT103.

Com intuito de alcançar os objetivos deste item, são verificadas as seguintes condições:

- Reações nas fundações;
- Deslocamentos máximos nos nós superiores dos módulos;
- Esforços nos perfis ao longo da estrutura.

5.2.1. Reações nas fundações

Primeiramente, verificam-se esforços nas fundações, as quais têm importância significativa para a estrutura, a fim de avaliar o efeito de arrancamento na base. A Tabela 5.5 apresenta os valores dessas reações para todas as opções mencionadas acima, ressaltando que o carregamento do vento é aplicado na direção de coordenada y .

O gráfico da Figura 5.5 idealiza a diferença entre as reações na direção do vento (F_y) das hipóteses sugeridas, em relação à original.

Tabela 5.5 – Esforços nas fundações em kN, LT103.

Hipótese	Nós	Fx	Fy	Fz
Original	345	34,14	-50,20	251,07
	649	-34,35	-49,72	250,96
	781	-34,15	-50,34	-251,07
	809	34,37	-49,85	-250,96
I	345	33,35	-50,03	245,26
	649	-33,63	-50,04	245,26
	781	-33,36	-50,03	-245,26
	809	33,36	-50,03	-245,26
II	345	33,92	-51,58	251,41
	649	-34,42	-50,86	249,85
	781	-34,05	-51,54	-251,41
	809	34,54	-50,76	-249,85
III	345	34,51	-50,02	251,19
	649	-34,81	-49,78	251,41
	781	-34,03	-49,85	-251,19
	809	-34,35	-49,60	-251,41
IV	345	33,45	-50,91	246,11
	649	-33,50	-50,86	246,092
	781	-33,91	-51,08	-246,11
	809	33,96	-51,03	-246,09
V	345	33,61	-50,02	245,72
	649	-33,61	-50,03	245,72
	781	-33,61	-50,03	-245,72
	809	33,61	-50,03	-245,73

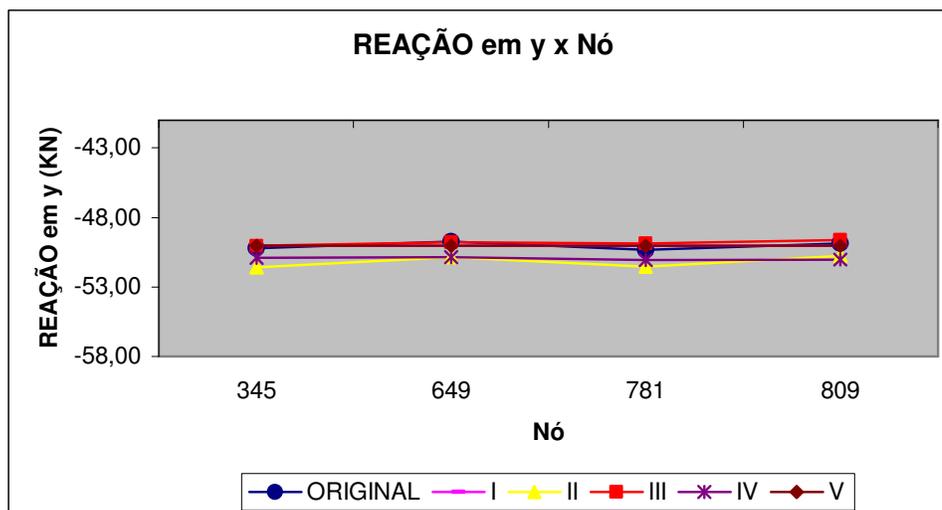


Figura 5.5 – Comparação das reações nas fundações, na direção do vento, LT103.

A Tabela 5.6 mostra as relações entre as respostas de reações, da aplicação das hipóteses de carregamento com a da torre original em questão.

Tabela 5.6 – Esforços nas fundações, Hipótese/ Original, LT103.

Hipótese	Nós	F _x	F _y	F _z
I	345	0,98	1,00	0,98
	649	0,98	1,01	0,98
	781	0,98	0,99	0,98
	809	0,97	1,00	0,98
II	345	1,00	1,02	1,00
	649	1,00	1,02	1,00
	781	1,00	1,02	1,00
	809	1,00	1,02	1,00
III	345	1,01	1,00	1,00
	649	1,01	1,00	1,00
	781	1,00	0,99	1,00
	809	1,00	1,00	1,00
IV	345	0,98	1,01	0,98
	649	0,98	1,02	0,98
	781	0,99	1,01	0,98
	809	0,99	1,02	0,98
V	345	0,98	1,00	0,98
	649	0,98	1,01	0,98
	781	0,98	0,99	0,98
	809	0,98	1,00	0,98

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.5, observa-se que há uma boa coerência para todas as hipóteses ensaiadas.

Mas, a opção que apresenta mais coerência nos resultados para com as reações de apoio, sendo praticamente igual à “original”, é a hipótese III, forças aplicadas a sotavento.

O gráfico da Figura 5.5 mostra os valores de F_y da Tabela 3, e idealiza a relação entre a “original” e as demais hipóteses.

5.2.2.Deslocamentos máximos

A seguir, a verificação é realizada para o efeito de deslocamento máximo da LT103, para isso, selecionam-se os nós superiores de cada módulo. A Tabela 5.7 apresenta os valores de deslocamentos máximos em cada módulo da torre. Em seguida, a Figura 5.6 ilustra o gráfico referente a esses deslocamentos.

Tabela 5.7 – Deslocamentos máximos (mm), LT103.

Módulos	Original	I	II	III	IV	V
7	53,93	48,86	49,45	51,52	50,68	65,05
6	44,91	43,53	44,01	44,82	43,32	57,11
5	31,35	36,98	39,30	31,42	30,9	38,22
4	21,35	21,10	22,13	21,48	21,39	23,58
5	17,45	17,25	18,24	17,67	17,51	19,50
3	10,49	10,7	11,16	10,65	10,71	11,93
1	3,65	3,78	3,82	3,78	3,79	4,11

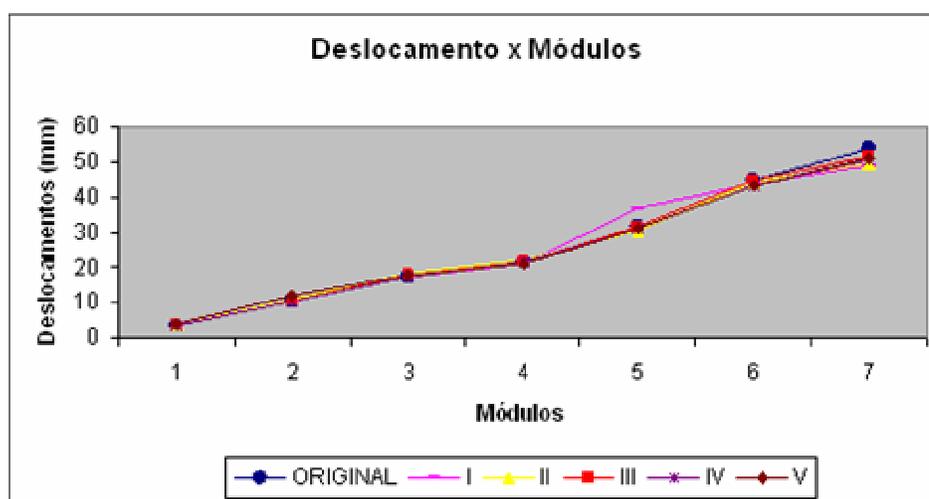


Figura 5.6 – Deslocamentos ao longo dos módulos da LT103.

Na Tabela 5.8, são apresentadas as relações entre as opções avaliadas e a original.

Tabela 5.8 – Deslocamentos máximos, Hipótese/ Original, LT103.

Módulos	I	II	III	IV	V
7	0,91	0,92	0,96	0,94	0,94
6	0,97	0,98	1,02	0,96	0,97
5	1,18	0,97	1,01	0,99	0,99
4	0,99	1,04	1,01	1,00	0,99
3	0,99	1,05	1,00	1,00	1,03
2	1,02	1,06	1,00	1,02	1,14
1	1,04	1,05	1,04	1,04	1,12

Com os resultados apresentados na Tabela 5.7, chega-se para efeito dos valores relativos dos deslocamentos máximos, e observa-se uma coerência satisfatória para todas as hipóteses ensaiadas.

Porém, as hipóteses que mais se aproximam dos resultados originais, novamente, são as hipóteses III e IV, com pequenas diferenças entre si.

5.2.3. Esforços nas barras

A seguir, uma avaliação das tensões nas barras é realizada, selecionando-se preferencialmente as barras principais (pernas), visto que são as que mais recebem esforço solicitante nesse tipo de estrutura.

As barras conhecidas como redundantes, ou contraventamento secundário, não absorvem esforços solicitantes significativos, tendo apenas como função a redução do comprimento de flambagem das barras. Não se faz necessária avaliação nessas barras, por possuírem esforços axiais pequeno, conforme apresenta a Tabela 5.9.

Os outros esforços; momentos fletores, cortantes e torção, não são considerados, pois não possuem valores significativos.

As barras são identificadas pela numeração automática do programa, porém, para idealização das funcionalidades, é determinada de acordo com os elementos da torre.

A Tabela 5.9 apresenta as tensões nas barras do modelo original e as hipóteses associadas. São selecionadas as barras mais solicitadas ao longo dos módulos da estrutura, de maneira aleatória. As barras principais do Delta da torre são também chamadas de pernas.

Tabela 5.9 – Tensões normais nas barras, em MPa, LT103.

Barra	Elemento	Original	I	II	III	IV	V
3148	Perna	21,69	20,70	21,80	21,76	21,16	21,31
1116	Perna	19,20	19,03	19,15	19,24	18,60	19,10
963	Perna	15,67	15,27	15,49	15,72	15,28	15,64
593	Perna	20,72	19,90	20,24	20,56	20,00	20,46
589	Perna	18,21	17,30	17,26	17,98	17,35	17,81
616	Perna	13,22	12,22	12,61	12,92	12,43	12,58
2236	Perna(delta)	21,18	18,59	18,99	20,37	18,87	18,91
2207	Perna(delta)	6,65	5,51	5,90	5,85	5,02	5,96
1966	Perna(delta)	10,97	11,50	11,99	12,18	10,73	12,12
157	Horizontal	4,75	5,32	5,28	4,95	5,37	6,83
99	Horizontal	-8,74	-8,16	-9,06	-8,85	-8,81	-8,74
1129	Primário	0,44	2,02	0,49	0,43	2,50	1,54
419	Primário	1,21	0,98	1,06	1,52	0,59	0,87
472	Primário	2,69	1,80	2,16	2,36	2,25	1,82
3150	Secundário	-0,87	-0,13	-0,21	-0,14	-0,34	-0,24
1134	Secundário	-0,53	-0,62	-0,57	-0,42	-0,36	-0,57

Na tabela 5.9 observa-se que as barras primárias e secundárias realmente possuem tensões muito baixas. E na Tabela 5.10, nota-se que a barra 1129 (primária) apresenta maior diferença nas relações das tensões, com exceção da hipótese III. O que se faz justificável pela relação de casas decimais muito pequenas, conforme já mencionado anteriormente. Assim, para as barras primárias e secundárias não será procedida comparação em nível de tensão.

Tabela 5.10 – Relação das tensões, demais / original, LT103.

Barra	Elemento	I	II	III	IV	V
3148	Perna	0,95	1,00	1,00	0,98	0,98
1116	Perna	0,99	1,00	1,00	0,97	0,99
963	Perna	0,97	0,99	1,00	0,97	1,00
593	Perna	0,96	0,98	0,99	0,97	0,99
589	Perna	0,95	0,95	0,99	0,95	0,98
616	Perna	0,92	0,95	0,98	0,94	0,95
2236	Perna(delta)	0,88	0,90	0,96	0,89	0,89
2207	Perna(delta)	0,83	0,89	0,88	0,76	0,90
1966	Perna(delta)	1,05	1,09	1,11	0,98	1,10
157	Horizontal	1,12	1,22	1,04	1,13	1,44
99	Horizontal	0,93	1,04	1,01	1,00	1,00

Com base na Tabela 5.10, as seguintes observações sobre as tensões nas barras podem ser apresentadas:

Para as pernas da torre, a melhor relação obtida novamente contempla a hipótese III (cargas a sotavento); as hipóteses I e IV também apresentam boas relações, com uma redução de 3 a 5 % em média.

Assim, para a verificação das tensões nas barras, de cargas aplicadas nos módulos superiores, os resultados que mais se aproximam da condição original são as hipóteses II, III e IV, destacando-se a III (cargas a sotavento).

Portanto, com base nos resultados de todas as condições verificadas: reações na fundação, deslocamento máximo e esforços nas barras. Os resultados que apresentam maior equivalência à hipótese original de cálculos são III e IV, cargas a sotavento e barlavento da estrutura, principalmente na parte simétrica (tronco inferior).

Naturalmente, entende-se que a avaliação da força total do vento sobre cada módulo da torre pode ser obtida com base na área total das barras do módulo projetada sobre um plano normal à direção do vento, ao invés de ser feito o levantamento barra a barra como o da Figura 5.1, nesta discussão aproveitada.

5.3.Síntese conclusiva

O esquema mais conveniente a uma discretização simplificada das forças de arrasto sobre o modelo computacional das torres treliçadas simétricas, são as hipóteses III e IV, com pequena vantagem para a III. Dessa maneira, o procedimento simplificado pode ser assim descrito:

- obtêm-se as forças de arrasto para cada módulo da estrutura, considerando-as agindo sobre as áreas das barras de projeção ortogonal ao vento;
- obtidas as forças de arrasto, elas são divididas ao meio e aplicadas nos níveis superior e inferior de cada módulo;
- a seguir, distribuem-se igualmente essas forças pelos nós a sotavento de cada nível; naturalmente, a envoltória de esforços deve considerar o vento agindo nos dois sentidos.