



Primeiro-Tenente (EN) William Macedo Koeller
Ajudante da Seção de Estruturas da DOCM

Graduado em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

AÇÃO DE VE DE TRANSMI

1. INTRODUÇÃO

1.1. Aspectos Gerais

No Brasil existe atualmente uma matriz energética bem diversificada, com mais de 90 mil quilômetros de linhas de transmissão de alta voltagem (69kV a 765kV), formando o Sistema Interligado Nacional (SIN), que atende cerca de 98% do consumo energético brasileiro, segundo informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Com uma malha de linhas de transmissão tão vasta para ligar as fontes produtoras de energia com os grandes centros, o correto dimensionamento de uma Torre de Transmissão de Energia Elétrica (TTEE), é primordial para manter o abastecimento energético no país.

Atualmente são utilizadas TTEE metálicas treliçadas. Com a crescente utilização desse tipo de torre, verificou-se um aumento de acidentes devido principalmente à incidência de ventos fortes. O colapso de uma TTEE poderá afetar a segurança ou possibilidade de socorro de pessoas, além de trazer prejuízos econômicos.



NTO EM TORRE DE SSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Logo, de modo a não interrompermos o fornecimento de energia elétrica, as TTEE deveriam ser projetadas de forma a resistir aos esforços a que serão submetidas, como por exemplo, à incidência de ventos de alta intensidade.

Por estarmos tratando de estruturas metálicas treliçadas, esbeltas e de baixo peso, o vento representa o principal agente dentre os carregamentos considerados no projeto de uma TTEE. Então, a correta estimativa do carregamento de vento com a região na qual a torre se localiza é de grande importância.

Contamos, atualmente, com duas normas da ABNT, as quais apresentam diretrizes para a estimativa de forças devidas a ação de vento em estruturas treliçadas. São elas:

a) ABNT, NBR 5422:1985 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica

Esta norma fixa as condições básicas para o projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, projetos de reisolamento e/ou de reforma de linhas aéreas de transmissão.

b) ABNT, NBR 6123:1988 – Forças devidas ao vento em edificações

Esta norma fixa as condições exigíveis na

consideração das forças devidas à ação estática e dinâmica do vento, para efeitos de cálculo de edificações em geral.

As duas normas apresentam diferenças quanto à definição de velocidade básica de vento e procedimentos de cálculo das forças de vento nas partes componentes da torre (suporte, isoladores e cabos). Com isso, podem ocorrer gastos desnecessários na construção de TTEE, ou até mesmo ocorrer um subdimensionamento que acarretará em um possível colapso da mesma devido a ventos menores que os previstos em projeto.

A escolha do local de análise do presente artigo reflete essa diferença de velocidades básicas de vento: a região do Sul do Brasil, mais precisamente na região oeste de Santa Catarina.

O modelo de ação de vento adotado pelas normas de projeto atualmente em vigor refere-se aos ventos fortes originados de ciclones extratropicais, também conhecidos por ventos sinóticos ou tormentas EPS (Extended Pressure System). Entretanto, ventos fortes podem ser originados por outros fenômenos meteorológicos, tais como tornados, tormentas elétricas e furacões, situações não contempladas nas normas brasileiras.

Para verificarmos o exposto acima, efetuaremos uma comparação entre as forças de vento calculadas a partir de uma torre, segundo as normas NBR 5422 e NBR 6123, utilizando como modelo a torre analisada nos trabalhos de RODRIGUES (1999) e posteriormente por BATTISTA (2010).

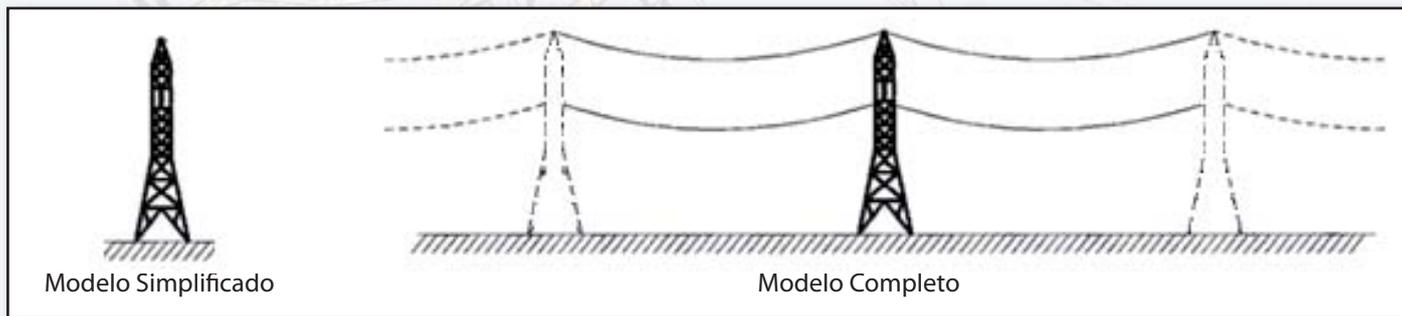


Figura 1 - Modelos estruturais

- **Modelo Simplificado** – corresponde ao modelo numérico da torre isolada, na qual se aplicam as forças de vento atuantes nos cabos e na própria torre. As resultantes das forças de vento nos cabos condutores e pararraios são aplicadas em seus pontos de ancoragem na torre.
- **Modelo Completo** – modelo numérico de uma torre e dos cabos a ela ancorados nos vãos adjacentes.

Ambas as modelagens são em pórtico espacial. As análises dos modelos foram realizadas no programa comercial SAP2000 v.14. Para o modelo simplificado foi feita uma análise linear, pois seus deslocamentos são muito pequenos, enquanto que para o modelo completo foi realizada uma análise não linear geométrica, devido aos grandes deslocamentos proporcionados pela excursão lateral dos cabos.

2. FORÇAS DEVIDAS A AÇÃO DO VENTO

Não serão expostos os procedimentos de cálculo segundo as NBR 5422 e NBR 6123 para o cálculo das forças devidas à ação do vento em torres de linha de transmissão, por serem muito extensas, sendo apenas importante neste artigo os resultados deste cálculo.

Apenas mostraremos as isopletas referentes a cada norma, que possuem tempo de integração diferentes (Figuras 2 e 3).

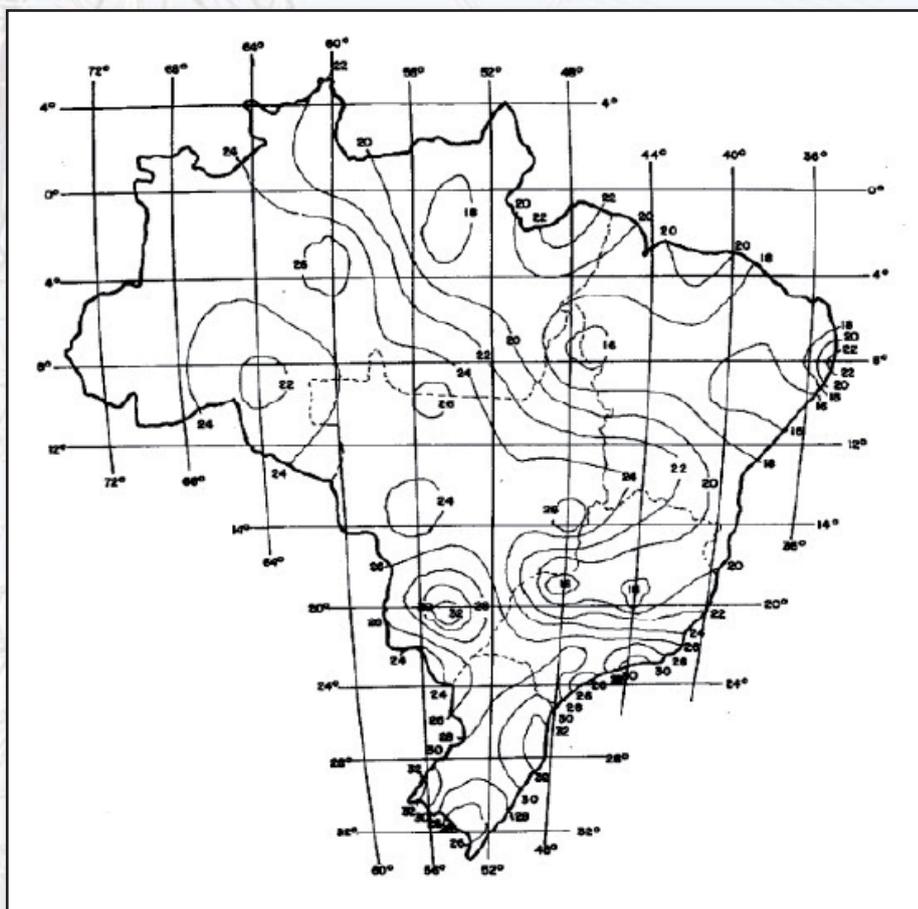


Figura 2 - Mapa de velocidade básica de vento V_b (m/s), NBR 5422. Tempo de integração de 10 minutos.

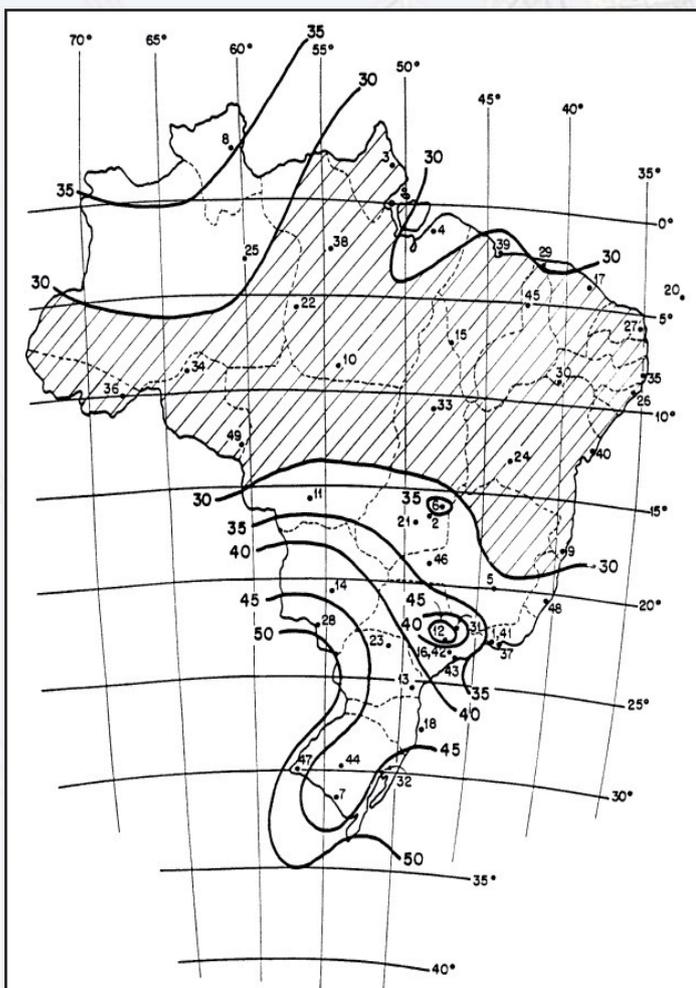


Figura 3 - Isopletas da velocidade básica V_0 (m/s), NBR 6123. Tempo de integração de 3 segundos.

3. MODELO TORRE TIPO DELTA

3.1 - Torre Autoportante Tipo Delta

O modelo estrutural adotado para a análise estática representa dois vãos adjacentes de condutores e pararraios em nível, suspensos por torres de mesma altura e silhueta, conforme Figura 4.

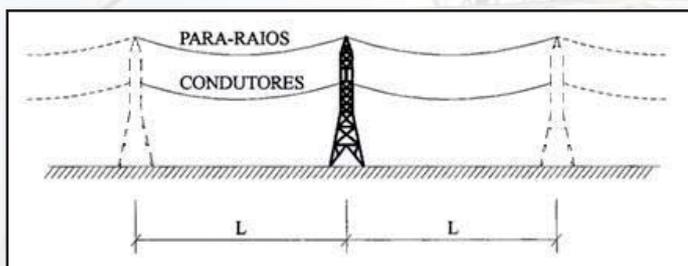


Figura 4 - Esquema estrutural adotado para análise (adaptado de RODRIGUES (1999)).

3.1.1. Descrição do modelo da torre, segundo RODRIGUES (1999)

A torre é classificada como sendo do tipo suspensão, em alinhamento reto e com vão médio máximo de 450m. O modelo computacional tridimensional foi modelado com base engastada. A carga permanente será devida ao peso próprio da estrutura e seus componentes, mais a protensão dos cabos (Figura 5).

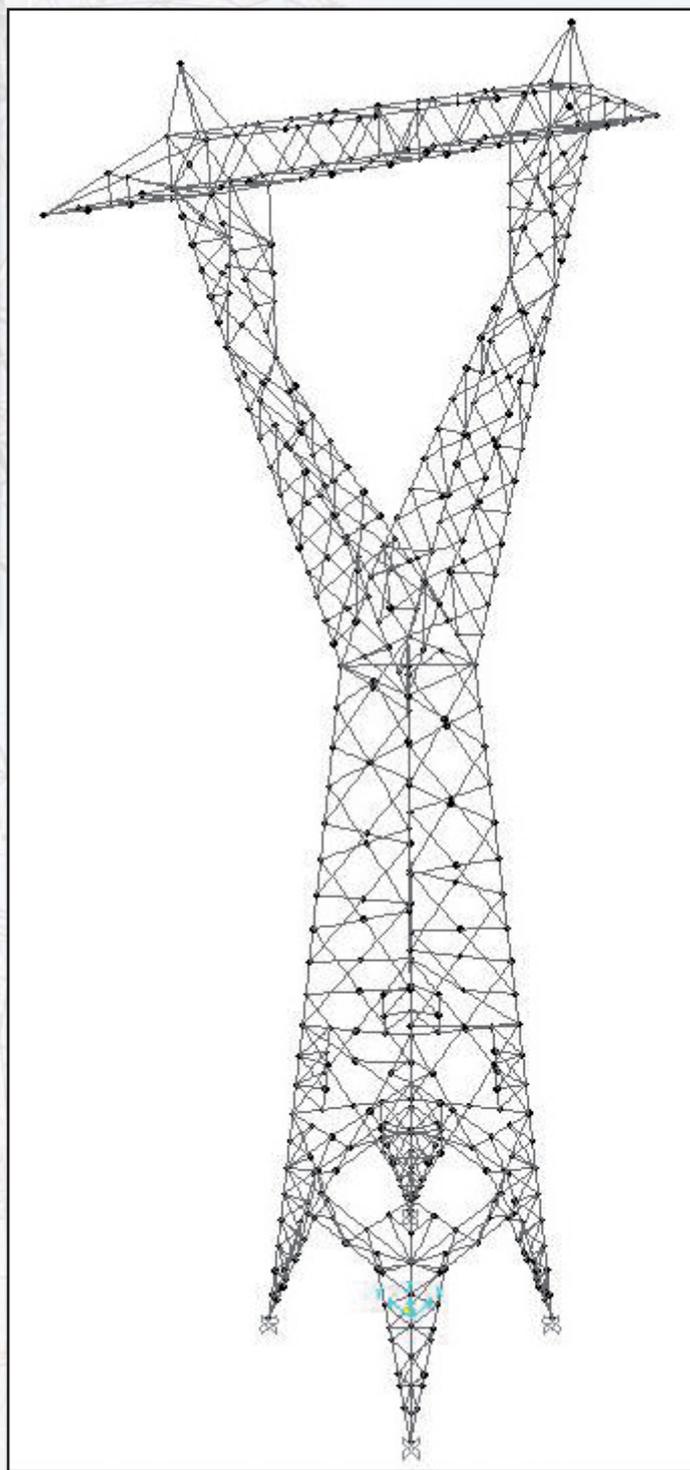


Figura 5 - Isométrico da torre treliçada de suporte, RODRIGUES (1999).

4. CARREGAMENTOS DEVIDOS AO VENTO NA TORRE DELTA, MODELO SIMPLIFICADO

4.1. Carga de vento na torre

4.1.1. Divisão em módulos

A torre treliçada foi dividida em sete partes tronco-piramidais de altura inferior a 10 metros. A velocidade de projeto, segundo a norma, deve ser calculada para o centróide de cada tronco (Figura 6).

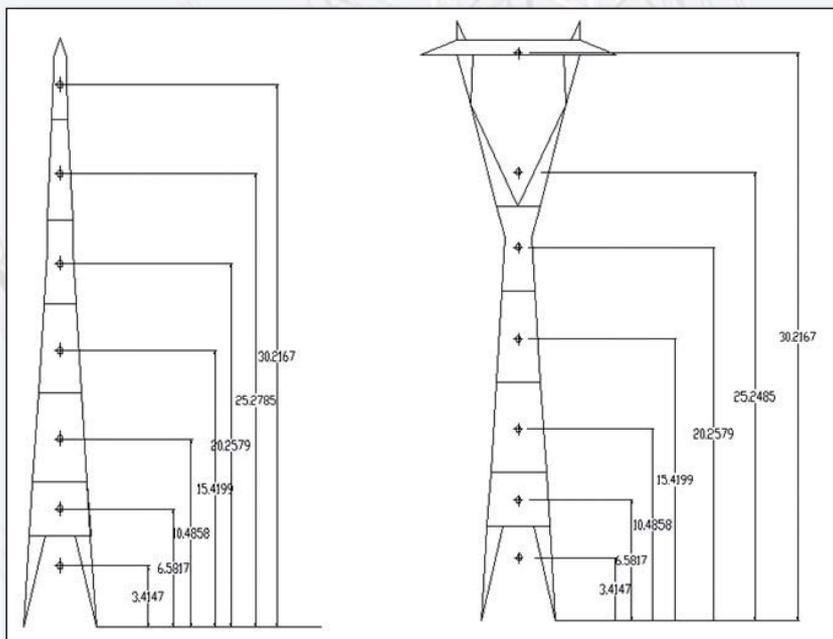


Figura 6 - Projeção dos troncos de pirâmide no plano vertical (cotas em metros), BATTISTA (2010).

4.1.2. Ação de vento na torre segundo a NBR 5422

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento de projeto, V_b , igual a 28 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 10 minutos.

4.1.3. Ação de vento na torre segundo a NBR 6123

A região escolhida apresenta velocidade básica de vento, V_0 , igual a 50 m/s, medido a 10 metros do solo, com tempo de integração de 3 segundos.

4.2. Resumo comparativo das forças de vento

A Tabela 1 mostra um resumo comparativo dos carregamentos aplicados à torre segundo as NBR 5422 e NBR 6123, enquanto a Figura 7 ilustra os pontos de aplicação destes esforços. Na torre, as forças resultantes de cada módulo estão distribuídas ao longo dos componentes principais.

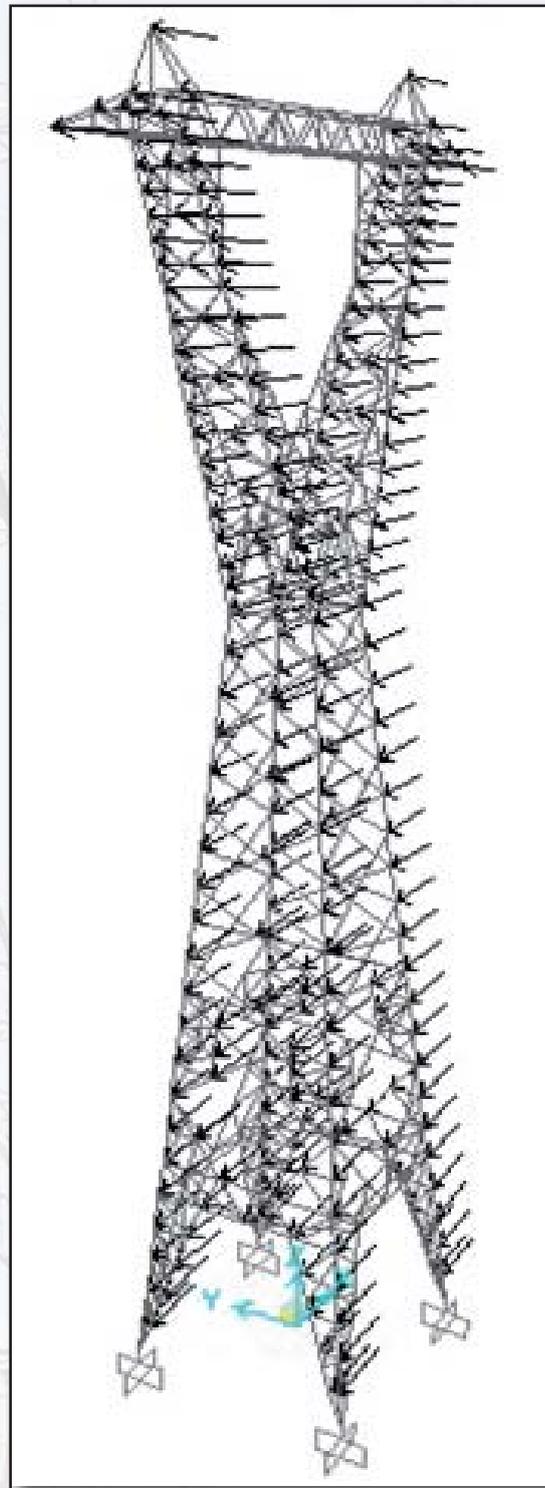


Figura 7 – Carregamento de vento aplicado no suporte (torre).

Tabela 1 – Comparação dos carregamentos segundo a NBR 5422 e NBR 6123.

ELEMENTO	Níveis	FORÇA (kN) NBR 5422 - $V_b=28$ m/s	FORÇA (kN) NBR 6123 - $V_0=50$ m/s	NBR 6123/ NBR 5422
CABOS CONDUTORES	Altura Média $z = 22,9$ m	6,95	14,88	2,14
CABOS PARARRAIOS	Altura Média $z = 28,4$ m	3,04	6,60	2,17
ISOLADORES	Ponto de Suspensão	0,10	0,20	2,00
MÓDULOS DA TORRE	1	2,04	4,07	1,99
	2	5,27	9,70	1,84
	3	3,58	6,90	1,93
	4	5,87	11,29	1,92
	5	5,30	10,30	1,95
	6	5,36	10,55	1,97
	7	3,55	6,90	1,94

Podemos observar que há uma grande diferença nos carregamentos aplicados à torre LTEE calculados segundo as normas NBR 5422 e NBR 6123, sendo as forças obtidas com a NBR 6123 do dobro das forças indicadas pela NBR 5422.

Destaca-se inicialmente a diferença dos intervalos de tempo de rajada na definição das velocidades básicas das referidas normas. A Tabela 2 corrige o valor de V_b adotado (28 m/s) para o tempo de 3 segundos e também o valor de V_0 (50 m/s) para o tempo de 10 minutos. Enquanto que a NBR 5422 faz a medida da velocidade básica V_b sobre uma média de 10 minutos, a NBR 6123 apresenta uma média da velocidade básica V_0 em 3 segundos. É importante salientar que em ambas as normas as velocidades básicas são tomadas a 10 metros sobre o nível do terreno em lugar aberto e plano, com período de retorno de 50 anos.

Tabela 2 - Valores de velocidade corrigidos de acordo com o intervalo de tempo.

t = 10 min	t = 3 s
$V_b = 28$ m/s	40,6 m/s
34,5 m/s	$V_0 = 50$ m/s

Nota-se claramente que há uma discordância dos dados referentes a uma mesma localidade, já que se chega a valores diferentes de velocidade básica referidas a um mesmo intervalo de tempo.

Um novo cálculo de forças devidas ao vento é apresentado na Tabela 3 agora com velocidades de vento compatíveis: $V_b = 38$ m/s para NBR 5422 e $V_0 = 50$ m/s para a NBR 6123.

Tabela 3 - Comparação dos carregamentos segundo a NBR 5422 e NBR 6123

ELEMENTO	Níveis	FORÇA (kN) NBR 5422 - $V_b=38$ m/s	FORÇA (kN) NBR 6123 - $V_0=50$ m/s	NBR 6123/ NBR 5422
CABOS CONDUTORES	Altura Média $z = 22,9$ m	12,80	14,88	1,16
CABOS PARARRAIOS	Altura Média $z = 28,4$ m	5,60	6,60	1,18
ISOLADORES	Ponto de Suspensão	0,18	0,20	1,11
MÓDULOS DA TORRE	1	3,77	4,07	1,08
	2	9,71	9,70	1,00
	3	6,59	6,90	1,05
	4	10,80	11,29	1,04
	5	9,75	10,30	1,06
	6	9,88	10,55	1,07
	7	6,54	6,90	1,05

Na Tabela 3 verifica-se uma boa correlação entre as forças de vento nos módulos da torre calculadas de acordo com as duas normas. Entretanto, para os cabos, as forças de vento obtidas da NBR 6123 são ainda 16% maiores do que as da NBR 5422.

A Tabela 4 apresenta os intervalos de integração para correção da velocidade de projeto associada a cada componente da LTEE, de acordo com cada norma. Se o modelo de cálculo das forças nos cabos fosse o mesmo nas duas normas de projeto, a consideração de um intervalo de tempo maior em uma delas conduziria a uma força menor. Todavia, não é o que se vê na Tabela 3, já que a força nos cabos dada pela NBR 6123 é 1,16 vezes maior que a da NBR 5422, apesar do intervalo de tempo adotado pela primeira norma (igual a 68s) ser maior do que o correspondente valor da segunda. Conclui-se, então, que há uma discrepância no modelo da força entre as duas normas.

Tabela 4 - Comparação dos intervalos de integração

	$\Delta t(s)$ NBR 5422	$\Delta t(s)$ NBR 6123
ISOLADORES	2	3
TORRE	2	5
CABOS CONDUTORES	30	68
CABOS PARARRAIOS	30	66

5. MODELO COMPLETO: TORRE, CADEIA DE ISOLADORES E CABOS

As Figuras 8 e 9 ilustram o modelo completo do sistema. Segue a modelagem no programa comercial SAP2000 v.14 do modelo completo.

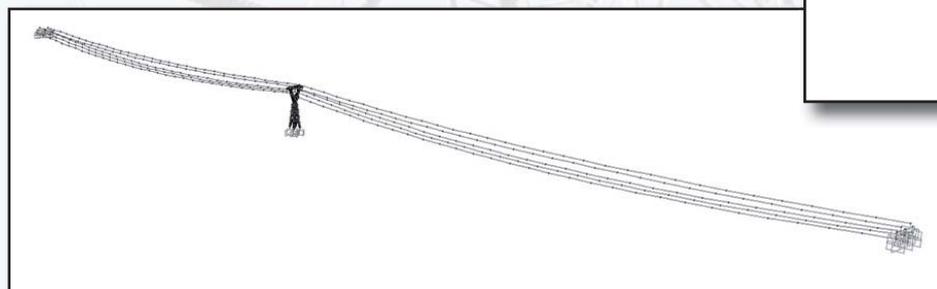


Figura 8 - Vista em perspectiva isométrica do modelo completo (1 torre representada, 2 vãos adjacentes).

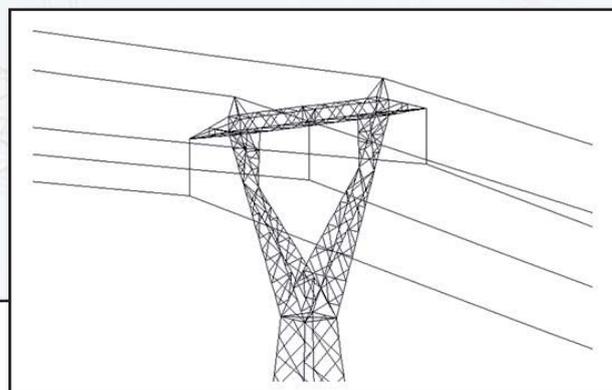


Figura 9 - Detalhe das ligações dos pararraios e cabos condutores à torre (torre em elementos de pórtico espacial).

Este modelo foi avaliado para ações de vento segundo a NBR 6123, com $V_0 = 50$ m/s.

As forças de vento estáticas em cada cabo condutor (igual a 33,1 N/m) e em cada pararraio (14,7 N/m) foram aplicadas como forças nodais concentradas ao longo dos dois vãos. Esses valores foram obtidos dividindo-se o valor da carga concentrada aplicada na torre devido aos cabos. Para aplicação no modelo completo, aplicamos nodalmente em intervalos iguais de 15 metros, nos cabos.

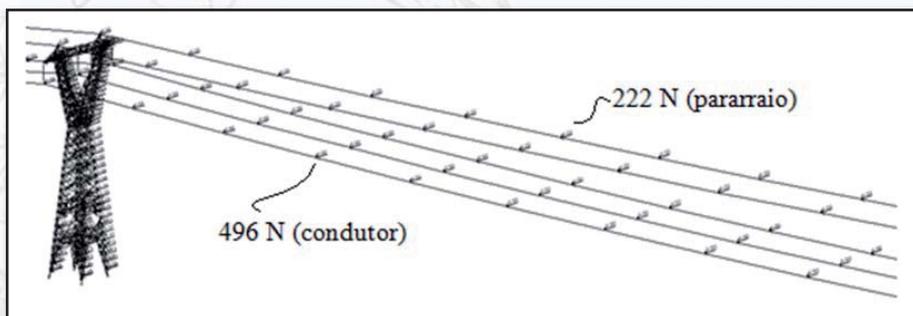


Figura 10 - Força nos cabos devido ao vento, aplicadas nodalmente.

6. RESULTADOS DA ANÁLISE

Os resultados da análise são referentes ao caso de carregamento segundo as prescrições da NBR6123 com velocidade básica de vento V_0 igual a 50 m/s, aplicados no modelo simplificado e no modelo completo. Seus esforços foram calculados pelo programa SAP2000 v.14.

A Figura 11 identifica os pontos de verificação dos deslocamentos e a biela de suspensão. O nó A1 apresenta deslocamento de -0,25m no eixo x e -0,14m no eixo z. O nó A2 apresenta deslocamento de -2,4m no eixo x e 0,80m no eixo z. Para ambos os nós, o deslocamento em relação ao eixo y é nulo.

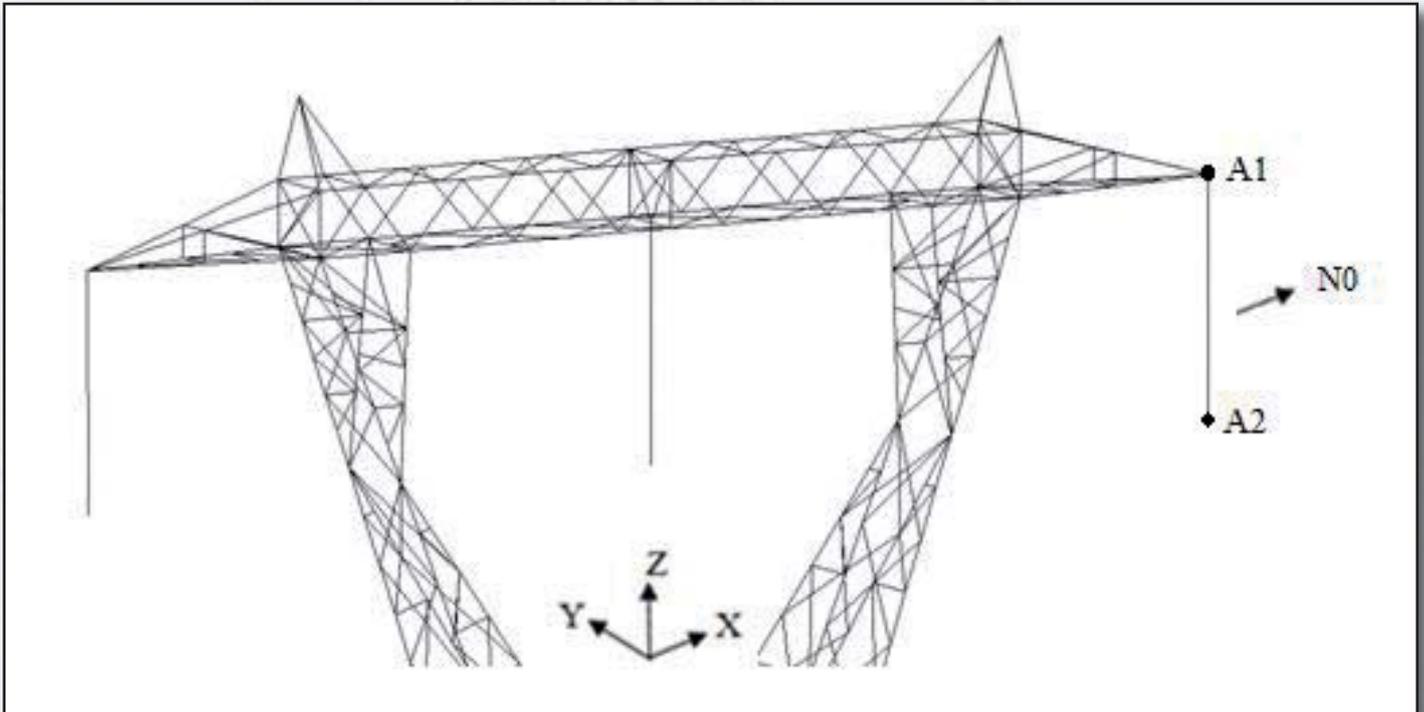


Figura 11 – Ponto de verificação do deslocamento.

A Figura 12 mostra a deformação da estrutura em escala 1:1 no modelo completo. Observa-se, na Figura 12, a elevação do ponto de ancoragem dos cabos na biela de isoladores.

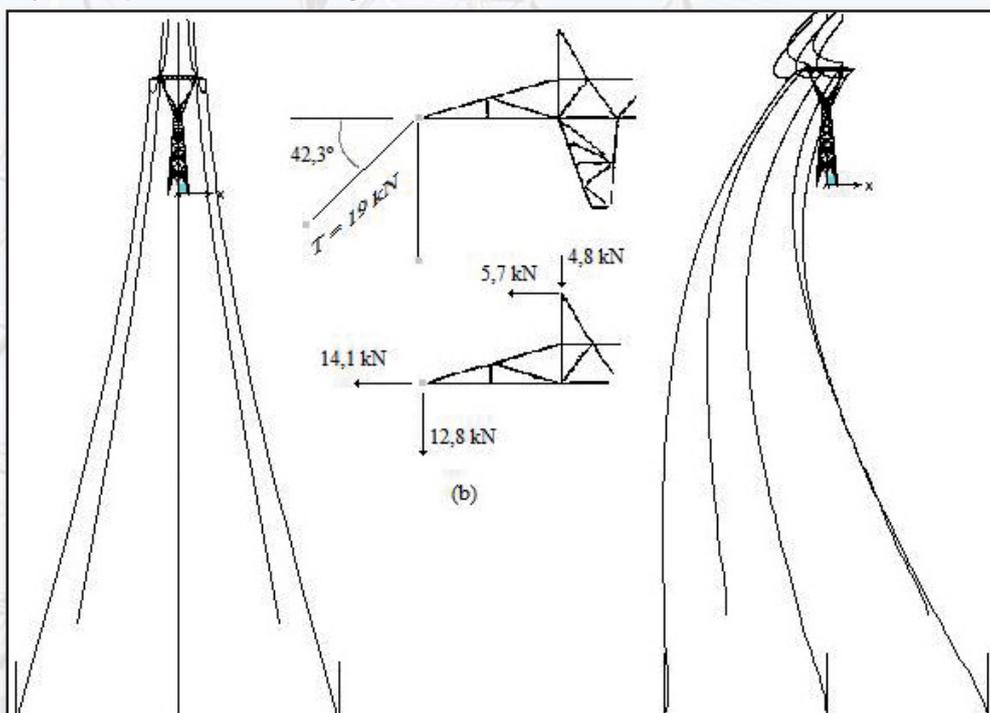


Figura 12 - Deformação dos cabos do modelo para ação de vento mais carga permanente.

Com os deslocamentos dos nós A1 e A2 do modelo completo, obtém-se o esforço na biela igual a 19,4 kN. As componentes horizontal e vertical da tração na biela resultaram em forças iguais a 14,1 kN e 12,8 kN, respectivamente. Comparando a componente horizontal com a força aplicada no modelo simplificado devido ao vento (igual a 14,9 kN – ver Tabela 3), verifica-se que são muito próximas. Já em relação à componente vertical, a força aplicada na ponta da viga de suspensão no modelo completo (igual a 12,8 kN) é bem maior do que a força no modelo simplificado (igual a 5,8 kN), a qual refere-se apenas ao peso dos cabos condutores.

Realizando o mesmo procedimento para os cabos pararraios, utilizando o deslocamento do cabo e analisando a força axial de tração que atua no mesmo (38,8 kN), obtém-se forças horizontal e vertical e iguais a 5,7 kN e 4,8 kN, respectivamente.

Comparando a componente horizontal com a força aplicada no modelo simplificado devido ao vento (igual a 6,6 kN), verifica-se que são próximas. Já em relação à componente vertical, a força aplica-

da no apoio do pararraio no modelo completo (igual a 4,8 kN) é bem maior do que a força no modelo simplificado (igual a 1,7 kN), a qual refere-se apenas ao peso dos cabos pararraios.

Nota-se, então, que a torre no modelo completo estará sujeita a uma força de compressão originada da excursão lateral dos cabos, a qual não é considerada no modelo simplificado.

As Tabelas 5 a 10 apresentam os resultados comparativos entre os dois modelos em termos de esforços axiais em algumas barras da torre, conforme notação mostrada na Figura 13. Para as barras N2, N3, N5 e N6 não há diferença significativa de resultados. Já para as barras N1 e N4, os esforços devidos às ações de carga permanente mais vento apresentam diferenças. Nota-se que a barra N1 tem maior compressão no modelo completo e a barra N4 menor tração, justamente devido ao efeito da excursão dos cabos comentados anteriormente. A diferença em termos de compressão foi de 6%, valor não desprezível na verificação de segurança.

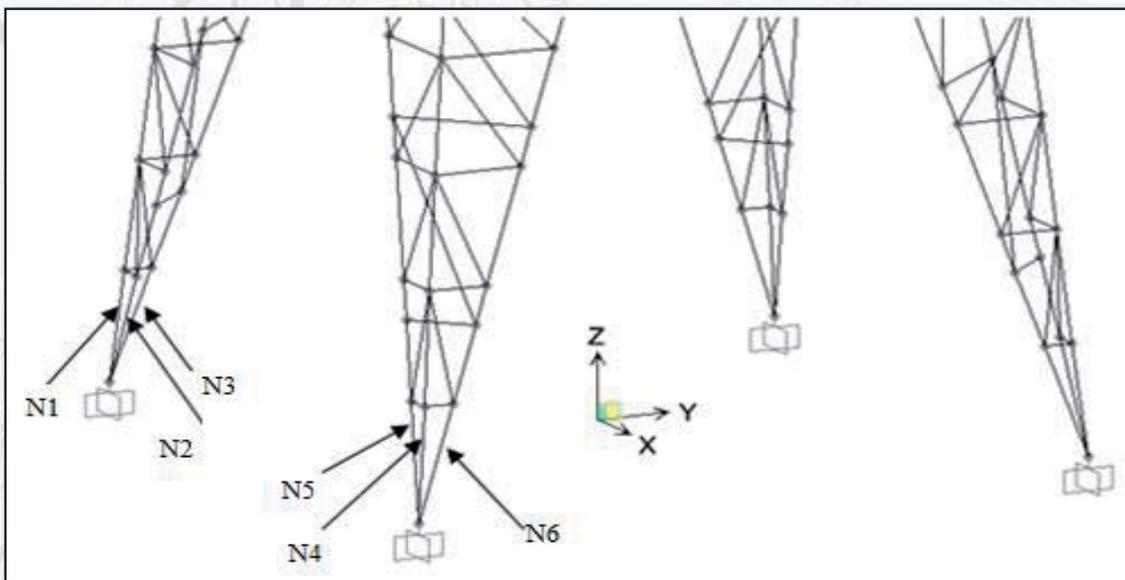


Figura 13 - Identificação dos elementos na base da torre.

Tabela 5 - Força axial elemento N1, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N1				
Modelo	Carga Permanente (CP)		CP + Vento	
	Análise Linear	Análise não Linear	Análise Linear	Análise não Linear
Simplificado	-8,95	-	-153,78	-
Completo	-	-8,93	-	-162,93

Tabela 6 - Força axial elemento N2, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N6				
Modelo	Carga Permanente (CP)		CP + Vento	
	Análise Linear	Análise não Linear	Análise Linear	Análise não Linear
Simplificado	-3,61	-	55,55	-
Completo	-	-3,60	-	51,28

Tabela 7 - Força axial elemento N3, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N2				
Modelo	Carga Permanente (CP)		CP + Vento	
	Análise Linear	Análise não Linear	Análise Linear	Análise não Linear
Simplificado	-3,39	-	-52,98	-
Completo	-	-3,37	-	-52,99

Tabela 8 - Força axial elemento N4, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N3				
Modelo	Carga Permanente (CP)		CP + Vento	
	Análise Linear	Análise não Linear	Análise Linear	Análise não Linear
Simplificado	-3,61	-	-62,72	-
Completo	-	-3,60	-	-62,84

Tabela 9 - Força axial elemento N5, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N4				
Modelo	Carga Permanente (CP)		CP + Vento	
	Análise Linear	Análise não Linear	Análise Linear	Análise não Linear
Simplificado	-8,95	-	135,96	-
Completo	-	-8,93	-	121,19

Tabela 10 - Força axial elemento N6, NBR 6123 - $V_0 = 50$ m/s.

Esforço Axial (kN) - Elemento N5				
Modelo	Carga Permanente (CP)		CP + Vento	
	Análise Linear	Análise não Linear	Análise Linear	Análise não Linear
Simplificado	-3,39	-	46,25	-
Completo	-	-3,37	-	42,63

7. CONCLUSÕES

Para o estudo proposto no presente trabalho, verificamos, a partir da comparação entre a metodologia de cálculo das NBR 5422 e NBR 6123 uma grande diferença de forças, sendo as da NBR 6123 muito superiores às da NBR 5422, considerando a mesma região de análise.

Essas diferenças são devidas a diversos motivos, dos quais podemos destacar: diferentes intervalos de integração para os componentes da torre LTEE, diferentes intervalos de tempo para definir a velocidade básica de vento, entre outros fatores não comentados no artigo. Mesmo fazendo a compatibilização da velocidade básica em termos do intervalo de tempo, foram obtidos valores distintos para o mesmo local.

Adotando velocidades de projeto compatíveis, a NBR 6123 continuou a apresentar valores de carregamento superiores aos da NBR 5422 para os cabos, na ordem de 16% maiores, enquanto que para o suporte, os carregamentos foram semelhantes.

No modelo completo foi realizada uma análise não linear geométrica, para simular de manei-

ra adequada o comportamento estrutural da torre devido aos cabos presentes nos vãos das linhas aéreas de transmissão.

Comparando os resultados obtidos em termos de esforços em elementos da torre através dos modelos completo e simplificado, observam-se resultados semelhantes para a atuação das cargas permanentes e de combinação das cargas permanentes e vento, conforme procedimento da NBR 6123.

Entretanto, devido à consideração no modelo completo da excursão lateral dos cabos, a torre apresenta resultante de compressão 6% maior do que o valor obtido no modelo simplificado, valor esse que não pode ser desconsiderado em uma verificação de compressão.

Das análises efetuadas, comprova-se a necessidade de revisão das normas NBR 5422 e NBR 6123, de modo que apresentem prescrições compatíveis.

Pode-se verificar neste artigo, que o vento representa esforços significativos em TTLL, não devendo ser desconsiderado no cálculo de outros tipos de construção.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, NBR 5422 – Projeto de linhas de transmissão de energia elétrica – procedimento, 1985.
- ABNT, NBR 5422 – Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica – procedimento, Documento de Revisão – Capítulo 7 “Ação do Vento”, Rio de Janeiro, s/data.
- ABNT, NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações – procedimento, 1988.
- *Aerodinâmica das Construções*, Blessmann, Joaquim, 2ª Edição, Sagra, 1990.
- *Colapso de Torres TEE sob Ação do Vento*, Rodrigues, R.S., Tese de Mestrado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 1999.
- *Evaluation of the Probability Distribution of the Strength of Transmission Line Steel Towers based on Tower Test Results*, Riera, J.D., de Menezes, R.C.R., da Silva, V.R., Ferreira da Silva, J.B.G.
- *Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE*, Rodrigues, R.S., Tese de Doutorado, Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2004.
- *Metodologia para Análise Estática do Efeito do Vento em Linhas de Transmissão*, Carvalho, H., Tese de Mestrado, Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da UFMG, 2010.
- *O Vento na Engenharia Estrutural*, Blessmann, Joaquim, Ed. Universidade/UFRGS, 1995.
- *Relatórios Técnicos Controllato nº 8, 10 e 14*, Battista, R.C., 2010 e 2011.
- *Verificação Estrutural de Torre LTEE Sob Ação de Vento*, Koeller, W.M., Projeto de Graduação, Engenharia Civil, Escola Politécnica da UFRJ, 2012.