



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GLT - 17
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO III
GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT**

**COEFICIENTES DE ARRASTO AERODINÂMICO EM ESTRUTURAS TRELIÇADAS DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Afonso de Oliveira e Silva*, Julio Cesar Pinto de Medeiros

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS

**Acir Mércio Loredo-Souza, Marcelo Maia Rocha,
Leandro Inácio Rippel, Elvis Antônio Carpeggiani,
Gustavo Javier Zani Núñez**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL**

RESUMO

O IT apresenta os resultados das medições das forças de vento sobre modelos reduzidos de módulos de dois tipos de estruturas de suspensão utilizados por FURNAS. Estas medições foram realizadas no túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS, dentro de um projeto de P&D, que tinha dois objetivos principais:

- verificar a aplicabilidade dos critérios para cálculo das cargas de vento sobre estruturas, constantes das normas utilizadas no projeto de linhas de transmissão (2,3)
- estabelecer coeficientes de arrasto compatíveis com as geometrias das diversas partes das torres utilizadas em LTs, como subsídio para a revisão da norma ABNT NBR 5422 (2).

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão, Vento, Torres, Túnel de Vento

1.0 - INTRODUÇÃO

Em um dos livros mais conceituados sobre os efeitos do vento sobre estruturas, em sua terceira edição de 1996, o capítulo 12, sobre estruturas treliçadas se inicia com o seguinte parágrafo:

“Estruturas treliçadas submetidas à ação do vento têm sido utilizadas de forma rotineira em aplicações da engenharia estrutural há mais de um século. Entretanto, o conhecimento dos efeitos do vento sobre este tipo de estrutura é ainda hoje imperfeito e as prescrições das normas a respeito destes efeitos são, em muitos casos mutuamente inconsistentes e em desacordo com dados experimentais” (1).

Para o caso particular de estruturas para linhas de transmissão, podemos acrescentar que as normas existentes não são, em princípio, aplicáveis à maior parte das geometrias utilizadas nas suas diversas partes.

Uma outra dúvida freqüente na aplicação destas normas diz respeito à interação entre os diversos elementos da estrutura. Por exemplo, as cargas de vento sobre a mísula e sobre o painel adjacente à mesma são calculadas, para cada uma, como se elas fossem componentes isolados, sem considerar a presença da outra. Numa estrutura real pode ser presumido que a distribuição e a conseqüente ação do vento nesta região, será função da presença destes dois elementos.

Com objetivo de procurar esclarecer algumas destas dúvidas, FURNAS contratou o Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS para o desenvolvimento de um projeto de P&D tendo por objeto a determinação dos coeficientes de arrasto aerodinâmico em estruturas treliçadas de linhas de transmissão, no túnel de vento deste laboratório. O objetivo principal do trabalho foi a obtenção de dados que permitissem estabelecer recomendações consistentes para serem utilizadas na revisão da NBR5422 (2).

Neste trabalho serão apresentados e analisados os resultados das medições efetuadas até janeiro de 2005 e apresentadas as conclusões já estabelecidas.

*Rua Real Grandeza 219, - Bloco A Sala 406 - CEP -22283-900 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (021) 2528-4387 - Fax: (021) 2528-4684 - e-mail: afonsoos@furnas.com.br

2.0 - FORÇAS EXERCIDAS PELO VENTO SOBRE ESTRUTURAS TRELIÇADAS

O método de cálculo da ação do vento em torres treliçadas previsto em normas (2,3,8), consiste na determinação das forças totais do vento em módulos da estrutura utilizando coeficientes de força aplicáveis a estas configurações específicas.

Um conceito fundamental para a análise aerodinâmica de estruturas treliçadas é o de índice de área exposta, ϕ , definido como a razão entre a área frontal efetiva do reticulado, A_e , e a área frontal da superfície limitada pelo contorno do reticulado, A .

$$\phi = \frac{A_e}{A} \quad (1)$$

sendo as áreas frontais as áreas de todos os membros do reticulado projetadas em um plano perpendicular à direção do vento incidente (área de sombra) (8).

Os coeficientes de força dos módulos das torres são determinados através de ensaios em túnel de vento nos quais são colocados modelos seccionais das torres e medidas as forças através de uma balança instalada na base dos módulos. A força total medida na direção do vento é chamada de força de arrasto, F_a . A partir da força de arrasto é calculado o coeficiente de arrasto definido pela expressão 2:

$$C_a = \frac{F_a}{q A_e} \quad (2)$$

onde:

F_a - força de arrasto média [N]

$q = \frac{1}{2} \rho V^2$ - pressão dinâmica correspondente à velocidade média de referência [N/m^2];

ρ - massa específica do ar [kg/m^3];

V - velocidade média de referência do vento ao nível da altura média do trecho reticulado [m/s];

A_e - área efetiva de referência [m^2].

O coeficiente de arrasto é então associado com o correspondente índice de área exposta do módulo testado, tornando-se adequado para fins de codificação, conforme ilustrado na Figura 1. O processo automaticamente inclui efeitos de proteção causados pelos elementos frontais sobre outros elementos porventura localizados em suas esteiras.

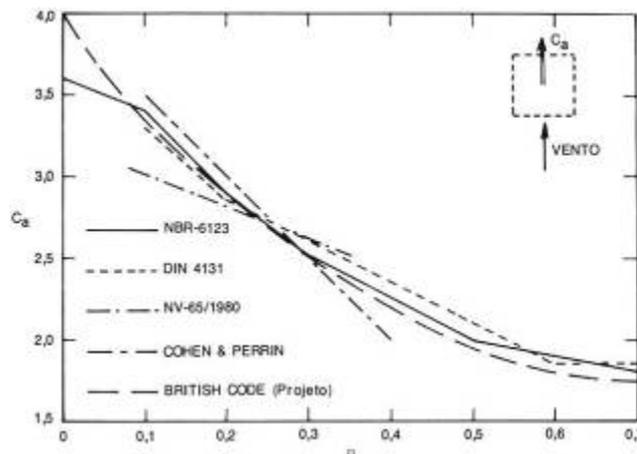


FIGURA 1 – Coeficiente de arrasto em torres reticuladas de seção quadrada (6).

As torres utilizadas em LTs são constituídas por cantoneiras com arestas vivas e por isso são pouco sensíveis ao número de *Reynolds*, Re , definido pela Equação 3, o qual influencia a forma do escoamento e, conseqüentemente, a distribuição de pressões e a força exercida sobre o sólido imerso no escoamento.

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (3)$$

sendo, V a velocidade do vento, l uma dimensão característica e ν a viscosidade cinemática do ar, a qual pode ser considerada aproximadamente constante para pequenas variações de temperatura. Então, para uma determinada dimensão característica, l , Re é diretamente proporcional à velocidade. Ou seja, em princípio, os coeficientes de arrasto podem ser considerados independentes da velocidade do vento.

3.0 - MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE ARRASTO

3.1 Modelos das estruturas

A partir dos desenhos de projeto, foram confeccionados diversos modelos reduzidos de trechos (módulos) das torres autoportantes A33 (para 345 kV) e A55 (para 500 kV, com feixe expandido). Os módulos selecionados para a confecção dos modelos foram escolhidos como sendo representativos da formação das torres citadas e

procurando seguir a recomendação da NBR 5422 e IEC 60826 de dividir a torre em troncos com altura máxima de 10m, sendo que alguns destes módulos foram ensaiados em distintas escalas para verificação de eventuais efeitos do número de *Reynolds*. Assim, foram constituídos três grupos de modelos, correspondentes às partes principais das torres:

- tronco comum e extensões;
- cabeça da torre e suas partes componentes (delta, viga, mísulas, pontinas);
- pernas.

Os modelos foram confeccionados em madeira na própria oficina do Laboratório em escalas variando de 1:20 a 1:11, em função das dimensões dos módulos. A Figura 2 mostra os modelos das cabeças das torres A33 e A55, instalados no túnel de vento.



FIGURA 2 – Modelos referentes aos trechos das cabeças da torres. (a) Torre A33; (b) Torre A55.

3.2 Túnel de vento

Os ensaios foram realizados no Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann* do Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), mostrado na Figura 3 (4,5). Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis.

Este túnel permite a simulação das principais características de ventos naturais. Apresenta a relação “comprimento/altura” da câmara de ensaios superior a 10, sendo que a velocidade máxima do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, é de 42 m/s (150 km/h). A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil (7), sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.



FIGURA 3 – Vista do Túnel de Vento *Prof. Joaquim Blessmann*.

3.3 Balança de força

Para a determinação da força de arrasto aerodinâmico sobre os modelos das torres foi confeccionada uma balança de força unidirecional, ilustrada na Figura 4, sobre a qual se acoplou a mesa de ensaios com os modelos instalados. A balança é constituída de duas placas rígidas horizontais, unidas por lâminas verticais de aço inox temperado. A placa inferior é rigidamente acoplada a um tripé fixo sobre o piso das instalações do túnel de vento,

enquanto a placa superior é acoplada à mesa de ensaios (base dos modelos), deslocando-se conjuntamente com os modelos no sentido do escoamento, na proporção da força de arrasto aerodinâmico atuante.



FIGURA 4 – Detalhe da balança de medições de forças de arrasto.

As lâminas verticais tiveram sua flexibilidade criteriosamente escolhida, de forma que o deslocamento da placa superior tivesse uma magnitude adequada à sensibilidade dos extensômetros elétricos sem, contudo, incorrer em não-linearidades físicas ou geométricas. Nesse sentido, a fim de se reduzir ao máximo a sensibilidade da balança a esforços transversais, procedeu-se a soldagem das lâminas flexíveis verticais da balança nas placas rígidas horizontais de modo a proporcionar uma maior rigidez ao conjunto da balança.

3.4 Medidas das forças de arrasto

Foram feitos registros de força de arrasto média para diferentes valores de velocidade do escoamento, de forma a se verificar uma eventual influência do número de *Reynolds* (Re). Os ensaios foram realizados com vento incidindo a 0° , 45° e 90° para os módulos da torre A33 e a 0° , 30° e 56° e 90° para os módulos da torre A55, de acordo com a convenção indicada na Figura 5.

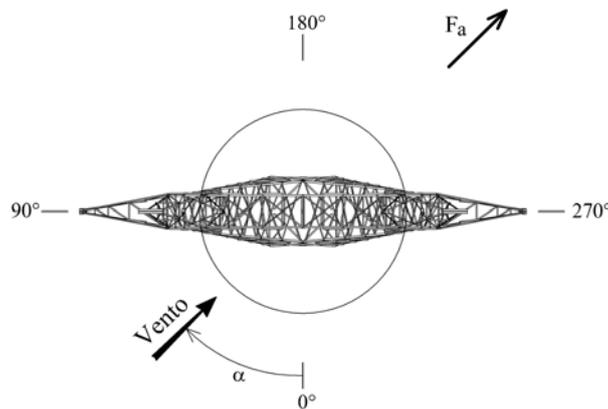


FIGURA 5 – Referência para ângulo de incidência do vento.

4.0 - PRESCRIÇÕES DAS NORMAS

De acordo com as normas ABNT e IEC (2,3), para torres treliçadas de seção retangular, a força do vento, na direção do vento, aplicada no centro de gravidade de um painel constituído por várias barras é calculada pela conhecida fórmula:

$$A_t = q_0 (1 + 0,2 \text{sen}^2 2\theta) (S_{T1} C_{xT1} \cos^2 \theta + S_{T2} C_{xT2} \text{sen}^2 \theta) G_t \quad (4)$$

Os coeficientes de arrasto (C_{xT1} e C_{xT2}) são dados na figura 7 da norma IEC 60826 (3) e definidos para um vento perpendicular a cada face o que implica que as faces devem ser verticais ou, quando muito, quase verticais. Entretanto, a fórmula 4 e a referida figura 7 são utilizadas indistintamente para o corpo básico e extensões (que normalmente têm seção retangular e são quase verticais) como também para as pernas (de seção triangular), mísulas e vigas (estruturas horizontais), delta, etc.

5.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

5.1 Geral

Os ensaios foram feitos com diferentes velocidades de vento e modelos em diferentes escalas, tendo ficado comprovada a pequena influência do número de Reynolds ou da velocidade do vento. Por este motivo e para facilitar a análise dos resultados, todas as forças medidas e calculadas foram convertidas em forças equivalentes para a velocidade de 35 m/s, e para a escala real das torres (1:1).

Deve ser observado que a torre A33 tem seção quadrada, com treliçamento igual nas quatro faces do tronco comum e extensões e nas duas faces externas das pernas. Já a torre A55 tem seção retangular e, portanto, treliçamentos diferentes nestas mesmas faces.

5.2 Tronco comum e extensões

As Tabelas 1, 2 e 3 mostram os resultados das medições e podemos ver que, para estes elementos:

- os coeficientes de arrasto determinados de acordo com a Figura 7 da norma IEC 60826 são bastante próximos daqueles obtidos no túnel de vento, para ventos normais aos eixos da estrutura;
- a fórmula 4 (item 4.0), para cálculo da força total devida ao vento conduz a resultados coerentes com os valores obtidos no túnel, para ventos oblíquos, utilizando os coeficientes medidos;
- a soma das forças medidas em duas partes consecutivas (inferior e superior) de um tronco corresponde à força total medida sobre o tronco completo (ver Tabelas 1 e 2).

TABELA 1 - Medidas efetuadas no tronco comum e extensão da torre A55.

Tronco	Força Medida (N) para Vento a		Coeficiente de Arrasto					
	0°	90°	0°			90°		
			Medido	Calcul.	Med/Calc	Medido	Calcul.	Med/Calc
Inferior	13.359	11.833	3,47	3,31	1,05	3,31	3,10	1,07
Superior	7.313	6.432	3,09	3,14	0,98	3,14	2,92	1,08
Inferior+Superior	20.672	18.265	-	-	-	-	-	-
Completo	19.093	16.127	3,23	3,28	0,98	3,28	3,07	1,07
Extensão 12m	26.754	21.489	3,68	3,24	1,10	3,34	3,20	1,04

TABELA 2 - Medidas efetuadas no tronco comum e extensão da torre A55 com vento oblíquo

Tronco	Forças (N) para Vento a:					
	30°			56°		
	Med	Calc	Med/Calc	Med	Calc	Med/Calc
Inferior	15.003	14.143	1,06	13.414	13.444	1,00
Superior	8.363	8.175	1,02	7.434	7.676	0,97
Inferior + Superior	23.366	22.318	1,05	20.848	21.120	0,99
Completo	21.704	21.463	1,01	19.826	20.345	0,97
Extensão 12m	26.804	26.606	1,01	25.084	24.730	1,01

TABELA 3 - Medidas efetuadas no tronco comum e extensão da torre A33

Elemento	Coeficiente de Arrasto			Forças (N) para Vento a 45°:		
	Med	Calc	Med/Calc	Med	Calc	Med/Calc
Tronco	2,92	3,08	0,95	6.310	7.335	0,86
Extensão 12m	3,41	3,31	1,03	20.030	21.230	0,94

5.3 Cabeça da torre

A configuração deste elemento se afasta completamente da configuração prevista nas normas. A cabeça foi ensaiada completa e também dividida em duas partes. Os resultados das medições estão nas Tabelas 4 e 5. Por razões de ordem prática para as medições, a parte que foi denominada viga, nas tabelas, inclui a parte superior do delta, a viga propriamente dita, as mísulas e pontinas. A que foi denominada delta é, na realidade, a parte inferior do delta, que poderia ser denominada V. Estas tabelas mostram que, para estes elementos:

- as forças totais medidas, sobre a cabeça completa e suas partes, apresentam diferenças significativas, da ordem de -31% a +36% com relação aos valores calculados de acordo com a IEC 60826;
- a soma das forças medidas sobre a viga e o delta é próxima da força total medida sobre a cabeça completa.

TABELA 4 - Medidas efetuadas na cabeça da torre A33 e suas partes.

Elemento	Força Medida (N) para Vento a:			Força Medida / Força Calculada		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Viga	12.007	11.790	5.940	0,92	1,10	1,26
Delta	6.517	8.138	6.445	0,89	1,12	1,36
Viga + Delta	18.524	19.928	12.385	-	-	-
Cabeça	18.447	19.611	11.703	0,90	1,09	1,23

TABELA 5 - Medidas efetuadas na cabeça da torre A55 e suas partes.

Elemento	Força Medida (N) para Vento a:				Força Medida / Força Calculada			
	0°	30°	56°	90°	0°	30°	56°	90°
Viga	18.867	19.333	15.448	8.520	0,69	0,76	1,03	1,36
Delta	11.956	14.653	14.037	9.701	0,87	0,99	1,06	0,96
Viga + Delta	30.823	33.986	29.485	18.221	-	-	-	-
Cabeça	31.293	34.932	30.171	18.438	0,76	0,86	1,05	1,08

Para avaliar o efeito de blindagem das partes a sotavento do delta, foram efetuadas medidas no delta da torre A33, sem a viga (ver Figura 2). Para o vento longitudinal (0°), foram efetuadas medidas sobre as duas “colunas” e, também, somente sobre a coluna a esquerda. Para vento transversal (90°) e oblíquo, as medidas foram feitas considerando as duas “colunas” e, também, considerando somente a “coluna” a barlavento. Não foram efetuadas medidas para a torre A55 devido à complexidade de sua cabeça. A Tabela 6 apresenta estes resultados.

TABELA 6 - Medidas efetuadas no delta da torre A33, sem a viga, e suas partes.

Elemento			Força medida (N) para vento a:			Força medida/Força calculada		
			0°	45°	90°	0°	45°	90°
Completo	1	Delta	9.588	12.218	8.989	1,00	1,20	1,21
	2	Parte superior	3.121	4.386	3.103	1,51	1,59	1,24
	3	Parte inferior	6.399	7.355	5.896	0,89	1,12	1,32
Face esquerda ou a barlavento	4	Delta	5.668	6.867	5.949	0,91	1,15	1,61
	5	Parte superior	1.645	2.146	1.797	1,59	1,56	1,43
	6	Parte inferior	3.471	4.087	3.377	0,86	0,78	0,71
Relações entre forças medidas	$1 \div 4$		1,69	1,78	1,51	-	-	-
	$2 \div 5$		1,90	2,04	1,73	-	-	-
	$3 \div 6$		1,84	1,80	1,75	-	-	-

A Tabela 6 mostra que:

- também neste caso é válida a divisão de um elemento em elementos parciais, conforme pode ser visto comparando a soma das forças sobre os elementos 2 e 3 com a força sobre o elemento 1, por exemplo;
- a relação entre as forças medidas e calculadas segundo a IEC 60826 varia de 0,71 a 1,61;
- o efeito da blindagem pelas faces a barlavento pode ser avaliado pelas relações ao pé da tabela. A prática usual e constante da revisão da NBR5422, de considerar que as forças exercidas pelo vento nas faces a barlavento e a sotavento são iguais é conservativa.

Os resultados obtidos até agora não permitem estabelecer um procedimento coerente para definição dos coeficientes de arrasto para os diversos painéis que compõem a cabeça das torres em questão.

5.4 Pernas

Uma perna de uma torre pode ser considerada como uma pirâmide triangular oblíqua, invertida, muito longe de uma torre de seção quadrada. Os seguintes aspectos foram considerados para a definição dos ensaios a serem realizados: a) existe um efeito de blindagem pelas pernas a barlavento; b) a forma e o treliçamento da face interna de uma perna são diferentes daqueles das faces externas da mesma perna; c) para um vento oblíquo, as faces atingidas nas quatro pernas bem como os ângulos de incidência do vento sobre as faces internas das pernas a sotavento são diferentes; d) para um dado comprimento de pernas, o afastamento entre elas depende da altura do tronco da torre. A Figura 6 mostra, de forma esquemática, em corte horizontal, as configurações das pernas para as medições.

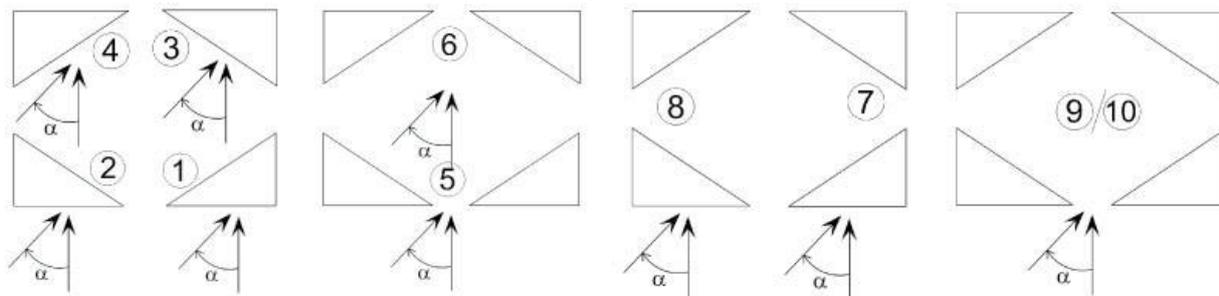


FIGURA 6 – Configurações das pernas para as medições

Inicialmente foram efetuadas medições para uma perna isolada (configurações 1 a 4). As configurações 1 e 2 correspondem às pernas a barlavento, a direita e a esquerda, respectivamente, de acordo com o sentido do vento dado na figura 5. Da mesma forma, as configurações 3 e 4 correspondem às pernas a sotavento. As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados destas medições. Nestas tabelas e nas seguintes, as pernas são identificadas por D e E, para as pernas a direita e a esquerda, respectivamente. Estas tabelas mostram que os valores medidos são muito inferiores aos calculados, o que era de se esperar devido à geometria das pernas. Observamos que, se fossem utilizados os coeficientes de arrasto para torres de seção triangular, dados na figura 9 da NBR 6123 (8), as diferenças em questão seriam um pouco menores.

TABELA 7 – Forças (N) para pernas isoladas da torre A33.

Perna	Posição		Ângulo de 0° (ou 90°)			Ângulo de 45°		
			Medida	Calculada	Med/Calc	Medida	Calc	Med/Calc
4,5m	1	Barlav. D	1.656	2.243	0,74	1.441	2.692	0,78
	2	Barlav. E				2.110	2.692	0,78
	3	Sotave. D	1.532	2.243	0,68	1.768	2.692	0,66
	4	Sotave. E				1.441	2.692	0,54
9,0m	1	Barlav. D	3.485	4.588	0,76	2.964	5.507	0,78
	2	Barlav. E				4.279	5.507	0,78
	3	Sotave. D	3.096	4.588	0,67	3.684	5.507	0,67
	4	Sotave. E				2.964	5.507	0,54

TABELA 8 – Forças (N) para pernas isoladas da torre A55

Perna	Posição		Ângulo de 90°			Ângulo de 0°			Ângulo de 30°			Ângulo de 56°		
			Med	Calc	Med/Calc	Med	Calc	Med/Calc	Med	Calc	Med/Calc	Med	Calc	Med/Calc
4,5m	1	Bar. D	1875	2842	0,66	2176	3458	0,63	2415	3799	0,64	2330	3556	0,66
	2	Bar. E	1829	2842	0,64	2176	3458	0,63	2155	3336	0,65	2116	3265	0,65
	3	Sot. D	1875	2842	0,66	2122	3458	0,61	2115	3839	0,55	2079	3826	0,54
	4	Sot. E	1829	2842	0,64	2122	3458	0,61	2126	3312	0,64	2032	3034	0,67
10,5m	1	Bar. D	4684	6619	0,71	6346	8082	0,79	5828	8874	0,66	4726	8293	0,57
	2	Bar. E	5264	6619	0,80	6346	8082	0,79	6538	8965	0,73	6456	8935	0,72
	3	Sot. D	4684	6619	0,71	6251	8082	0,77	6830	8965	0,76	6795	8935	0,76
	4	Sot. E	5264	6619	0,80	6251	8082	0,77	5960	8514	0,70	4936	8294	0,6

Para avaliar o grau de proteção e interferência entre as quatro pernas, foram efetuadas medições com diversas combinações de duas e de quatro pernas. Os resultados são apresentados nas Tabelas 10 e 11, que mostram as forças medidas no túnel e as forças calculadas a partir de medições correspondentes a configurações com uma ou duas pernas, de acordo com a Figura 6.

TABELA 9 – Forças (N) medidas e calculadas na torre A33.

Perna	Configuração para ensaio			Configuração p/ cálculo	0°		45°		
					Med	Med/Calc	Med	Med/Calc	
4,5m	5	2 pernas / Face barlav. / Afastam. máximo		1+2	3.311	1,00	3.649	1,03	
	6	2 pernas / Face sotav. / Afastam. máximo		3+4	3.233	1,06	3.443	1,07	
	7	1 perna face barlav e 1 sotav D/ Afastam máx		1+3	2.713	0,85	3.443	1,07	
	8	1 perna face barlav e 1 sotav E/ Afastam máx		2+4			3.649	1,03	
	9	4 pernas/ Afastamento máximo		7+8	5.728	1,05	6.604	0,93	
				1+2 +3 +4				0,90	0,98
				1+2+0,85(3+4)				0,97	1,05
	10	4 pernas / Afastamento mínimo		-	5.482	-	6.411	1,19	
	9,0m	5	2 pernas / Face barlav./ Afastam. máximo		1+2	7.121	1,02	7.528	1,04
		6	2pernas / Face sotav. / Afastam. máximo		3+4	7.160	1,16	7.138	1,07
7		1perna face barlav e 1sotav. D/ Afastam máx		1+3	5.686	0,86	7.138	1,13	
8		1perna face barlav e 1sotav. E/ Afastam máx		2+4			7.528	1,04	
9		4 pernas / Afastamento máximo		7+8	12.267	1,08	13.926	0,95	
				1+2 +3 +4				0,93	1,00
	1+2+0,85(3+4)			1,00				1,08	
10	4 pernas / Afastamento mínimo		-	11.972	-	13.575	-		

Nas Tabelas 9 e 10 podemos observar:

- para o mesmo ângulo de incidência, a força total medida sobre duas pernas a barlavento ou a sotavento (configurações 5 e 6) podem ser consideradas iguais à soma dos valores correspondentes para uma perna isolada (configurações 1 e 2 ou 3 e 4);
- as forças medidas sobre duas pernas, sendo uma a barlavento e a outra a sotavento (configurações 7 e 8), mostram que, para um vento normal à estrutura (0° ou 90°), existe um certo efeito de blindagem pela perna a barlavento, sendo a força total medida da ordem de 85% da soma dos valores correspondentes para uma perna isolada (configurações 1 e 3, por exemplo). Para um vento oblíquo esta blindagem, praticamente, não existe;
- as três configurações adotadas para cálculo das forças totais para as quatro pernas (configuração 9) mostram que as forças atuantes sobre cada perna podem ser calculadas individualmente, considerando a posição correta das pernas a barlavento e a sotavento. Se for considerado o efeito da blindagem pelas pernas a barlavento o

resultado será mais preciso, para um vento normal a um dos eixos da estrutura . Caso contrário, o resultado será conservativo;

- as forças totais medidas para a configuração 10 são da ordem de 2% a 5% menores que para a configuração 9 (média de 3%). Para fins práticos elas podem ser consideradas iguais.

TABELA 10 – Forças (N) medidas e calculadas na torre A55

Perna	Configur. p/ ensaio	Configur. p/ cálculo	90°		0°		30°		56°					
			Med	Med/Calc	Med	Med/Calc	Med	Med/Calc	Med	Med/Calc				
4,5m	5	1+2	2980	0,80	4232	0,97	4422	0,97	4131	0,93				
	6	3+4			3602	0,85	4375	1,03	3979	0,97				
	7	1+3	3553	0,95	3606	0,84	4437	0,98	4055	0,92				
	8	2+4	3706	1,01			4460	1,04	4171	1,01				
	9	7+8	6581	0,91	7717	1,07	9354	1,05	8069	0,98				
		1+2 +3 +4									0,89	0,90	1,06	0,94
		1+2+0,85(3+4)									0,96	0,97	1,14	1,02
10	-	6302	-	7588	-	8906	-	7814	-					
10,5m	5	1+2	8292	0,83	12821	1,01	12665	1,02	11110	0,99				
	6	3+4			11501	0,92	12624	0,99	11223	0,96				
	7	1+3	10395	1,11	10705	0,85	12861	1,02	11285	0,98				
	8	2+4	10651	1,01			12552	1,00	11561	1,01				
	9	7+8	17681	0,84	22080	1,03	25401	1,00	21031	0,92				
		1+2 +3 +4									0,89	0,88	1,01	0,92
		1+2+0,85(3+4)									0,96	0,95	1,09	0,99
10	-	16991	-	21429	-	24176	-	20318	-					

6.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados permitem as seguintes conclusões, relativamente aos tipos de torres ensaiados e acreditamos que elas serão válidas, também, para outros tipos:

- o método de cálculo e os coeficientes de arrasto das normas NBR5422 e IEC 60826 são adequados para cálculo das forças devidas ao vento sobre o tronco básico e extensões;

- para os demais elementos a aplicação desta metodologia e coeficientes não é adequada devido à grande diferença existente entre a geometria real e aquela na qual estas normas foram baseadas.

- para todos os elementos ensaiados, a decomposição em painéis ou troncos parciais é adequada;

- a força do vento sobre as pernas pode ser calculada para cada perna independentemente das outras, levando em conta o correto ângulo de incidência sobre as faces a sotavento. Esta conclusão deverá ser verificada para torres muito esbeltas ou para tensões menores, devido ao menor espaçamento entre as pernas.

Embora até o momento de elaboração do IT não tenha sido possível estabelecer uma metodologia para cálculo das forças de vento sobre a cabeça das torres e suas partes componentes e sobre as pernas, com o objetivo de estabelecer tal metodologia, serão realizados, ainda, ensaios sobre todas as pernas disponíveis para as torres A33 e A55, num total de mais nove pernas e, eventualmente, sobre pernas de outros tipos de torres. Da mesma forma serão realizados ensaios adicionais sobre as partes componentes das cabeças das torres em questão (mísulas, pontinas e vigas) isoladamente, e, eventualmente, de outros tipos de torres.

Como recomendação final, salientamos que é extremamente importante que outras configurações de torres sejam ensaiadas em túneis de vento para que, com o acúmulo de dados obtidos, possa ser estabelecida uma metodologia geral para cálculo das forças de vento em torres de linhas de transmissão.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SIMIU, E., SCANLAN, R.H. Wind effects on structures - Fundamentals and applications to design. Third edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- (2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica – NBR 5422. Rio de Janeiro. 1985
- (3) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Design criteria of overhead transmission lines - IEC 60826
- (4) BLESSMANN, J. Aerodinâmica das Construções. Ed. Sagra, 2º ed., Porto Alegre, 1990.
- (5) BLESSMANN, J. The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10. pp. 231-248. 1982.
- (6) BLESSMANN, J. Tópicos de Normas de Vento. 2ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade / UFRGS. 1990.
- (7) DAVENPORT, A. G., AND ISYUMOV, N. The Application of The Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading. In: Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures, vol. 1, p. 201-230, Ottawa, Canadá, 11-15 set. 1967.
- (8) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Forças devidas ao vento em edificações - NBR6123. Rio de Janeiro. 1988.