Modelo reduzido de uma torre LT - ensaios mecânicos e modelagens computacionais

L. A. Lacerda, LACTEC; P. A. Oliveira, LACTEC; C. G. Filippin, LACTEC; D. A. L. Kulevicz, LACTEC; L. Fedalto, LACTEC; F. G. L. Marcolino, AMPLA; V. C. Petersen, AMPLA; P. R. R. L. Silva, ENGETOWER.

Resumo - Este trabalho apresenta os resultados do projeto "Desenvolvimento experimental de protótipos de nova família otimizada de estruturas de transmissão de energia elétrica" realizado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, apresentado à Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro - AMPLA. Nesse trabalho descrevem-se os estudos realizados para a fabricação e ensaios de um modelo reduzido de uma torre de linha de transmissão. O modelo reduzido é definido de tal forma que as situações críticas encontradas no protótipo também possam ser vistas e avaliadas no modelo reduzido. Também são apresentadas as dificuldades encontradas para a fabricação do modelo reduzido, seja na escolha do material como na fabricação das peças. Ensaios estáticos e dinâmicos foram realizados sobre o modelo reduzido e comparados com análises computacionais. Os ensaios estáticos seguiram as especificações da norma NBR-8842/85 e também foram comparados às medições dos testes de carga do protótipo da torres.

Palavras-chave — Torres de Linhas de Transmissão, Modelo Reduzido, Testes de Carga, Modelagem Numérica.

I. INTRODUÇÃO

Nesse trabalho apresentam-se os resultados do projeto de pesquisa "Desenvolvimento experimental de protótipos de nova família otimizada de estruturas de transmissão de energia elétrica" que envolveu a construção e a realização de ensaios estruturais sobre um modelo reduzido de uma torre de linhas de transmissão.

Os estudos dimensionais foram realizados tendo em vista a realização de ensaios estruturais estáticos e dinâmicos do modelo reduzido [1, 2]. Os ensaios estáticos realizados seguiram as especificações da norma NBR-8842/85 [3], que preconiza a realização de testes de carga com o objetivo de verificar o projeto do protótipo da torre, assim como o procedimento construtivo da mesma.

O modelo reduzido foi definido de tal forma que as situações críticas encontradas no protótipo também possam ser vistas e avaliadas no modelo reduzido. Tendo em vista a limitação comercial de peças estruturais tipo cantoneiras de abas iguais em tamanhos reduzidos, optouse pela imposição de distorções geométricas para se compatibilizar as dimensões dos componentes projetados para o modelo reduzido à disponibilidade comercial. A utilização de distorções geométricas implica na inclusão de uma não-linearidade no fator de redução da área da seção transversal das peças. O impacto causado pela distorção sobre os resultados é decisivo na definição do tamanho do modelo reduzido. Outro fator de grande importância sobre os resultados é a precisão dos processos utilizados na fabricação dos componentes do modelo. Um modelo computacional para a torre foi empregado para validar a definição do modelo reduzido e avaliar parte dos erros de semelhança introduzidos [4]. O emprego do modelo numérico permite avaliar de maneira rápida e sistemática a evolução dos erros em relação aos resultados esperados à medida que os fatores de escala são modificados.

Para a realização dos ensaios estáticos o modelo reduzido foi instrumentado com réguas e extensômetros para medição dos deslocamentos estruturais (teodolitos) e deformações, respectivamente.

Os ensaios dinâmicos consistiram de aplicação de cargas de impacto e medição da vibração da estrutura em pontos selecionados.

II. NOVA FAMÍLIA DE TORRES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO 138kV – CIRCUITO DUPLO

O cálculo estrutural das torres, D2S1, D2A30 e D2A60T que compõe o novo padrão de estruturas da AMPLA (CERJ), circuito duplo 138 kV foi realizado pela empresa Engetower Engenharia e Consultoria Ltda.

Os materiais empregados para o projeto foram o aço estrutural ASTM A36 e ASTM A572 e parafusos ASTM A394 tipo "0". O dimensionamento das barras e conexões das torres foi feito de acordo com as especificações da ASCE, manual N° 52 – *Guide for Design of Steel Transmission Towers*. [5].

O cálculo estrutural foi executado com um programa computacional baseado no método dos elementos finitos, desenvolvido pela própria Engetower para a análise estática elástica linear de treliças espaciais.

A torre de suspensão D2S1, por ser a de maior número na linha de transmissão projetada, foi selecionada para a realização dos estudos e ensaios em modelo reduzido.

II-1. Execução dos testes de carga no protótipo.

Os testes de carga foram executados com intuito de verificar os projetos das novas torres, bem como o procedimento construtivo das mesmas. As especificações para o ensaio de carregamento são as mesmas da norma NBR-8842/85 [3].

Resultados de três das hipóteses de carga ensaiadas são presentados adiante:

- Hipótese 6D Construção / Manutenção, apenas circuito da direita, sem vento;
- Hipótese 1 Vento Máximo Transversal, cabos intactos;
- Hipótese 1R Vento Máximo Transversal, cabos intactos, cargas verticais mínimas.



Figura 1. Ensaio do protótipo da torre de suspensão (BRAMETAL – Criciúma).

III. DIMENSIONAMENTO DO MODELO REDUZIDO

III-1. Informações sobre o protótipo.

A torre de suspensão D2S1 possui 43m de altura (cabeça + tronco comum = 22,00 m; extensão + pé = 21,00 m) e é formada por 14 tipos de cantoneiras de abas iguais de aço estrutural ASTM A36.

Chapas com diversos tamanhos e espessuras são utilizadas nas conexões dos perfís. As seguintes espessuras são encontradas no projeto: 3,2mm; 4,75mm; 6,3mm; 8,0mm e 16,0mm. A largura e o comprimento das chapas variam em quantidade e tamanho dependendo da posição na torre (cabeça, tronco, extensão ou pé).

O material dos parafusos é o ASTM A394 tipo "0". Os parafusos, arruelas e palnuts possuem diâmetro de 12,7mm. Os comprimentos dos parafusos são de 30mm, 35mm, 40mm, 45mm e 50mm. As arruelas possuem espessura de 3,2mm.

A tensão de escoamento média do material foi definida após uma série de ensaios realizados sobre as peças do protótipo.

III-2. Diretrizes para o dimensionamento.

A seguir, são listadas algumas diretrizes básicas para a definição do modelo reduzido, tendo como base os estudos dimensionais:

- Manter a semelhança geométrica dos perfis metálicos do protótipo e do modelo reduzido, aplicando, se necessário, diferentes fatores de escala para o comprimento, largura e espessura das peças constituintes.
- O modelo reduzido poderá ser distorcido no sentido que os fatores de redução das dimensões não precisam ser necessariamente iguais - avaliar os erros introduzidos.
- Selecionar o material do modelo de tal forma que os perfis reduzidos sejam disponíveis comercialmente, evitando-se, se possível, a execução de dobras de chapas;
- A espessura das abas é comercialmente limitada e a

redução das mesmas através de cortes não é trivial.

Eventualmente, dois perfis poderão ser combinados (colados) para a confecção de um terceiro perfil com espessura comercialmente indisponível;

Um problema detectado é que a área da cantoneira de abas iguais não se reduz linearmente com a redução da aba. É imprescidível cortar as abas para se manter o fator de redução das áreas.

III-3. Seleção do material.

Faz-se aqui um breve relato das dificuldades encontradas na tentativa de fabricar o modelo reduzido em Alumínio, bem como das alternativas estudadas para a fabricação da estrutura.

Conforme o terceiro relatório do presente projeto de pesquisa [6], a opção para a construção do modelo havia sido a utilização de cantoneiras de Alumínio que, comercialmente, oferece uma maior variedade de produtos (diversos tamanhos e espessuras). Na prática, verificou-se que tal disponibilidade não existia. As empresas não dispunham de todo o ferramental para a fabricação de todas as peças apresentadas em catálogo. Ou seja, os catálogos serviram apenas para avaliar as demandas de mercado.

Ainda assim, essa alternativa foi considerada viável para a fabricação do modelo reduzido, pois havia a possibilidade de combinar perfís existentes (colagem) para a obtenção de espessuras exigidas para o modelo e que não eram comerciais. Essa alternativa de projeto passaria a exigir somente a perfuração das peças e corte das abas (novas larguras) para adequar o fator de escala de redução das áreas. Entretanto, esse procedimento exige a utilização de equipamentos de corte tridimensionais, cuja utilização seria extramamente cara, dado o grande número de peças a serem fabricadas. A utilização de equipamentos de usinagem para esse procedimento consumiria muito tempo e também seria extremamente cara. Portanto, essa alternativa foi descartada.

A alternativa que surgiu, visando ainda o uso do Alumínio, foi a utilização de uma máquina de corte de tubos quadrados. O custo para a utilização dessa máquina era aceitável e programação e uso da mesma muito mais simples, comparada à máquina tridimensional. Esse equipamento de corte também apresentava a vantagem de ser mais preciso e de maior produtividade. O problema que surgiu foi a irregularidade das espessuras das paredes do tubo. As espessuras apresentavam uma alta variação em uma única peça, chegando a diferenças superiores a 30%. Essas variações ocorrem em função do desgaste das ferramentas de fanricação. A única garantia que se tinha era que as espessuras eram sempre iguais ou superiores aos valores de catálogo. Entretanto, para o estudo dimensional essas diferenças não seriam aceitáveis.

O aço que inicialmente fora descartado pela limitada variedade de perfis laminados tornou-se a alternativa mais adequada. Contudo, a utilização de chapas dobradas foi inevitável.

A utilização de chapas planas de aço laminado a frio para a confecção das cantoneiras tornou-se a alternativa viável. O corte das peças no plano exige uma máquina de corte de menor custo e maior facilidade de operação. As desvantagens apresentadas por essa alternativa são:

- A necessidade de se efetuar uma dobra, posteriormente, para a formação das cantoneiras, que certamente acarreta em erros nos tamanhos das abas, tanto pelo posicionamento da peça na máquina de dobra, quanto pelo raio da ferramenta de dobra;
- Formação de uma zona com tensões residuais na região da dobra – fato que não ocorre nas peças laminadas.

A máquina de corte a laser utilizada possui precisão de 0,1mm para as maiores peças a serem cortadas. Após a verificação de todas as condições da análise dimensional definiram-se os fatores de escala de redução de área, de aba e de comprimento das peças.

Comparando-se o fator de redução de aba e comprimento com o fator de escala adotado para a espessura, houve uma leve distorção. O modelo reduzido ficou com altura de 6,69m. Os parafusos de $\frac{1}{2}$ polegada e os respectivos furos nas abas de 1,43cm de diâmetro são representados no modelo reduzido com parafusos de 2mm e perfurações de 2,3mm. As chapas de 3,2; 4,75; 6,3; 8 e 16mm são representadas no modelo reduzido por chapas de 0,6; 0,75; 1,05; 1,2 e 2,4mm, respectivamente.

Foi realizado um ensaio de tracionamento de amostras das chapas empregadas na fabricação das cantoneiras da torre a fim de se verificar o patamar de escoamento do aço utilizado. Obteve-se um valor médio para o patamar de escoamento do aço do modelo reduzido de 200MPa.

IV. MODELAGEM NUMÉRICA COM ELEMENTOS FINITOS

IV-1. Análises estáticas.

Após a construção do modelo do protótipo e do modelo reduzidos da torre D2S1 no programa ANSYS, efetuou-se as comparações entre os resultados de deslocamento e tensões nas estruturas para todas as hipóteses de carregamento, descritas na memória de cálculo do projeto estrutural.

A seguir, apresentam-se com maiores detalhes os resultados de uma das hipóteses de carregamento – hipótese 6D. Essa hipótese está relacionada à construção da linha de transmissão em que as cargas dos cabos são aplicadas em apenas um dos lados (mísulas) da torre, além das cargas do para-raio.

A Figura 2 apresenta uma vista do modelo indeformado do protótipo da torre ensaiada no ANSYS, bem como as deflexões causadas pelo carregamento aplicado. As cores das barras indicam o deslocamento total sofrido pelas mesmas. Como esperado, as maiores deflexões ocorreram no topo da mísula do pára-raio, aproximadamente 13,1cm.

A Tabela 1 apresenta os resultados de deslocamento longitudinal e transversal do protótipo e modelo reduzido na base da mísula inferior da torre para todas as hipóteses de carga. O fator de escala teórico para os deslocamentos é, $K_d = 12,54$. Todos os valores de K_d apresentados nas tabela oscilam em torno desse número, indicando o bom comportamento das análises.



Figura 2. Modelo do protótipo sob a hipótese de carregamento 6D – resultados de deslocamentos.

 TABELA I

 Deslocamentos na base da mísula inferior no corpo da torre.

		Base da r	nísula inf	erior (cintura d	a torre)				
Hipótese	l	_ongitudinal		Transversal					
	Protótipo	Modelo red.	K _d	Protótipo	Modelo red.	K _d			
6D	1.38	0.11	12.55	3.02	0.24	12.58			
6	2.13	0.17	12.53	1.85	0.14	13.21			
5	4.91	0.39	12.59	7.63	0.61	12.51			
4es	2.65	0.21	12.62	7.41	0.60	12.35			
4di	2.29	0.19	12.05	8.01	0.64	12.52			
7E	0.00	0.00	XXX	9.39	0.76	12.36			
1	0.01	0.00	XXX	21.19	1.71	12.39			
1R	0.01	0.00	XXX	21.19	1.71	12.39			

IV-2. Análise modal do protótipo e do modelo reduzido.

O *software* ANSYS também foi empregado para fazer uma análise modal das treliças que representam o protótipo e o modelo reduzido. O método utilizado para a resolução do problema de autovalores foi o Block Lanczos. As primeiras vinte freqüências naturais extraídas de cada estrutura apresentaram ótima coerência segundo as espectativas do estudo dimensional. Esperava-se o fator de redução, $K_f = 0.1555$. As relações apresentadas na Tabela 2 (última coluna) são todas muito próximas do valor acima.

TABELA II Freqüências naturais de vibração do protótipo e modelo reduzido.

Madaa	Freque	ncias (Hz)	K	
Modos	Protótipo	Modelo reduzido	Γ,	
1	2.8674	18.4660	0.1553	
2	2.8812	18.6150	0.1548	
3	6.4587	41.6180	0.1552	
4	6.4874	41.8420	0.1550	
5	7.2012	46.5200	0.1548	
6	7.4610	48.7790	0.1530	
7	7.4675	48.8000	0.1530	
8	7.8258	51.1570	0.1530	
9	7.8430	51.2280	0.1531	
10	8.2898	54.1700	0.1530	
11	8.4216	55.0150	0.1531	
12	8.4661	55.5140	0.1525	
13	8.5389	55.9200	0.1527	
14	8.5985	56.3400	0.1526	
15	8.6505	56.6840	0.1526	
16	8.8520	57.7950	0.1532	
17	8.9574	58.4630	0.1532	
18	9.3916	60.9140	0.1542	
19	9.4314	61.2860	0.1539	
20	11.0630	72.4990	0.1526	

V. FABRICAÇÃO DO MODELO REDUZIDO

V-1. Fabricação das peças.

Uma vez que as dimensões das peças do modelo reduzido foram definidas contratou-se uma empresa de corte de metais (COMP LTDA) para a confecção de todo o lote, que compreende um número superior a 950 peças, somando-se chapas e cantoneiras.

A empresa BRAMETAL LTDA (Criciúma) que fabricou as peças do protótipo forneceu ao LACTEC os desenhos de corte de todas as peças. O número total de desenhos de corte era superior a 300 e todos os desenhos foram convertidos, através dos fatores de escala geométricos definidos, e refeitos com software CAD para envio à empresa COMP.

Os equipamentos utilizados para o corte e dobra das chapas são da marca TRUMPF. Para o corte das peças foi utilizada uma máquina de corte bidimensional modelo 4030. Uma precisão mínima de 0,1mm pode ser atingida no processo de corte das chapas de aço que possuíam espessuras variando entre 0,45 e 1,20mm. O material das chapas é aço carbono laminado a frio. Considerando-se que as menores larguras de aba eram de cerca de 6mm, estima-se que o erro de corte não tenha sido superior a 1,5%. A Figura 3 mostra uma chapa com o corte de algumas pecas.



Figura 3. Chapa de aço após execução dos cortes.

Para a dobra das peças o equipamento TRUMPF Truma Bend V130 foi utilizado. Nesse procedimento, esperava-se que as abas da cantoneira formada fossem sempre iguais. Entretanto, erros de posicionamento das peças e do próprio procedimento de dobra, resultaram em diferenças de até 5% em relação à dimensão esperada.

V-2. Verificação das peças e pré-montagem.

Após o recebimento das peças e antes de iniciar a prémontagem da estrutura, efetuou-se a verificação das cantoneiras e chapas produzidas: comprimentos, larguras das abas, espessuras e posicionamento dos furos.

Todas as medições foram feitas com um paquímetro digital Mitutoyo modelo CD-6"CR. A verificação do posicionamento da furação das peças foi feita durante o processo construtivo. Estima-se que 5% das peças foram retornadas para nova fabricação por diferentes razões: rasgos nos furos, espessura errada ou gravação incorreta da marca da peça.

Para a fixação das peças do modelo reduzido foram adquiridos parafusos de aço galvanizado, tipo M2 (2mm de diâmetro), com comprimento variando entre 6mm e 10mm e rosca tipo MA.

Durante a pré-montagem do modelo verificou-se que duas das peças fabricadas não tinham todas as furações necessárias. Além disso, em apenas três das conexões de toda a torre, houve dificuldade em se efetuar todos os encaixes. Em todos os casos, os erros estavam nos desenhos e puderam ser corrigidos com a fabricação de novas peças.

A pré-montagem do modelo foi efetuada em duas semanas. Considerando-se chapas, cantoneiras, parafusos, arruelas, porcas, mais de quatro mil peças formam a estrutura.

V-3. Galvanização e montagem da torre.

Após a pré-montagem, a torre foi dividida em módulos que por sua vez foram encaminhados à galvanização. A Figura 4 ilustra os módulos galvanizados.



Figura 4. Módulos montados e galvanizados.

A base, onde os pés da torre foram fixados, foi feita a partir de blocos de alvenaria estrutural de 15x39x19 cm que foram cerrados e preparados para servir de fôrma para o bloco de concreto que fixou a parte inferior dos pés da torre à laje sobre a qual a torre foi montada.

Executada a concretagem dos blocos, os mesmos foram fixados à laje através de cabos e barras de aço que transpassavam a laje com aproximadamente 12 cm de altura.

Todos os parafusos, arruelas e porcas foram apertadas com torque entre 20 N.cm e 50 N.cm com o emprego de torquímetro de precisão modelo Torqueleader – TT50SD. Este valor foi determinado com base no torque de projeto para o protótipo (torre em tamanho real).

VI. ENSAIOS DO MODELO REDUZIDO

Os ensaios estáticos foram realizados para as 8 hipóteses de carregamento com cargas aplicadas em 5 estágios conforme a NBR-8842 (1985), além do descarregamento. Nesses ensaios, o comportamento estrutural foi avaliado visualmente e através de instrumentação que compreendeu um monitoramento óptico com teodolitos e monitoramento eletrônico com extensômetros resistivos.

Os ensaios consistiram, basicamente, no tracionamento de cabos instalados na torre nas direções longitudinal, transversal e vertical (ver Figura 5). Entre fases do tracionamento averiguaram-se os deslocamentos da estrutura com o uso de teodolitos posicionados perpendicularmente à direção de réguas colocadas nas mísulas da torre (acompanhamento óptico) e também as deformações de determinadas barras com o uso de extensômetros e equipamento adequado (acompanhamento eletrônico).



Figura 5. Modelo reduzido da torre de suspensão D2S1 com os cabos de aço para tracionamento vertical, transversal e longitudinal.

VI-1. Instalação dos extensômetros e acessórios para aplicaçãodas cargas estáticas.

Os extensômetros foram instalados em 4 pontos da torre (2 em cada), definidos após as análises computacionais. A instalação foi efetuada visando captar, inclusive, esforços de flexão e torção das barras instrumentadas.

Cabos de aço com diâmetro de 1/16" foram empregados para a realização do ensaio. Estes cabos foram fixados nas mísulas da torre nas direções longitudinal, transversal e vertical através de manilhas, sapatilhas e clips adequados às dimensões do modelo. A cada um dos cabos, em sua outra extremidade, foi fixada uma bandeja confeccionada com madeirite e uma haste de ferro para comportar os pesos que tracionariam os cabos.

Os cabos correspondentes a aplicação das cargas longitudinais e transversais sobre a torre foram passaram por roldanas fixadas nas paredes do salão formando um ângulo de 90 graus, possibilitando a utilização dos pesos "mortos" para aplicação das cargas.

Dois teodolitos foram direcionados para as miras instaladas nas mísulas do modelo reduzido. As leituras de deflexões foram efetuadas à medida que os cabos eram tracionados em 50%, 75%, 90%, 95% e 100%, e após o descarregamento.

A Figura 6 apresenta um esquema do posicionamento dos extensômetros (E) e réguas (R) no modelo reduzido.

VI-2. Ensaio estático.

Para a execução dos ensaios, montou-se um andaime com 6m de altura ao redor do modelo reduzido. Esse andaime foi aproveitado durante os ensaios para a realização de ajustes no posicionamento dos cabos e para uma verificação visual detalhada da estrutura à medida que as cargas eram aplicadas.

Os resultados de deslocamento registrados durante o ensaio foram tabelados para cada uma das hipóteses.



Figura 6. Esquema com posicionamento da instrumentação.

Os resultados de deslocamento registrados durante o ensaio são tabelados a seguir para cada uma das hipóteses. Além das medições do ensaio (Exp), as Tabelas III e IV também apresentam os resultados numéricos (Num) esperados. Nas Tabelas V e VI apresentam-se os resultados numéricos e experimentais do protótipo da torre D2S1.

TABELA III Deslocamentos em dois pontos do modelo reduzido – resultados numéricos e experimentais – hipótese 6D.

Hipótese	Modelo Reduzido								
eD.		Base da mí	sula inferio	r	Topo do pára-raios				
60	Longi	tudinal	Transversal		Longitudinal		Transversal		
Carga	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	
0%	0.0	22.0	0.0	20.0	0.0	21.0	0.0	19.4	
50%	-0.1	22.0	0.1	20.1	-0.1	21.0	0.5	19.7	
75%	-0.1	22.0	0.2	20.2	-0.2	20.9	0.7	19.9	
90%	-0.1	22.0	0.2	20.2	-0.2	20.9	0.9	20.0	
95%	-0.1	22.05	0.2	20.3	-0.3	20.9	0.9	20.1	
100%	-0.1	22.05	0.2	20.3	-0.3	20.9	1.0	20.1	
Descarregado	XXX	22.05	XXX	20.0	XXX	21.0	XXX	19.4	
Dif. 100%	0.1	0.05	0.2	0.3	0.3	0.1	1.0	0.7	

TABELA IV Deslocamentos em dois pontos do modelo reduzido – resultados numéricos e experimentais – hipótese 1.

Hipótese		Modelo Reduzido							
		Base da mí	ase da mísula inferior Topo do pára-raio						
1	Longi	tudinal Tran		versal	Longitudinal		Trans	versal	
Carga	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	
0%	0.0	23.0	0.0	20.7	0.0	21.7	0.0	20.0	
50%	0.0	23.0	0.9	21.3	0.0	21.8	2.0	21.1	
75%	0.0	erro	1.3	22.0	0.0	erro	3.0	22.4	
90%	0.0	XXX	1.5	22.7	0.0	XXX	3.7	23.4	
95%	0.0	XXX	1.6	22.75	0.0	XXX	3.9	23.6	
100%	0.0	XXX	1.7	22.8	0.0	ХХХ	4.1	23.7	
Descarregado	XXX	XXX	XXX	21.2	XXX	XXX	XXX	20.9	
Dif. 100%	0.0	XXX	1.7	2.1	0.0	XXX	4.1	3.7	

TABELA V Deslocamentos em dois pontos do protótipo – resultados numéricos e experimentais – hipótese 6D.

Hipótese		Protótipo							
60		3ase da mísula inferior			Topo do pára-raios				
00	Longitudinal		Transversal		Longitudinal		Transversal		
Carga	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	
0%	0	100	0	83	0	68	0	70	
50%	-1	102	2	81	-2	70	6	71	
75%	-1	102	2	79	-3	70	9	71	
90%	-1	103	3	76	-3	70	11	71	
95%	-1	103	3	75	-3	71	12	71	
100%	-1	104	3	75	-3	71	13	71	
Descarregado	ххх	105	XXX	84	XXX	73	XXX	72	
Dif. 100%	1	4	3	8	3	3	13	1	

Hipótese	Protótipo								
4		Base da mi	sula inferio	r	Topo do pára-raios				
	Longi	tudinal	Transversal		Longitudinal		Transversal		
Carga	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	
0%	0	100	0	100	0	58	0	107	
50%	0	XXX	11	XXX	0	XXX	25	XXX	
75%	0	XXX	16	XXX	0	XXX	38	XXX	
90%	0	XXX	19	XXX	0	XXX	46	XXX	
95%	0	XXX	20	XXX	0	XXX	48	XXX	
100%	0	96	21	73	0	55	51	46	
Descarregado	XXX	98	ххх	93	ХХХ	59	ХХХ	90	
Dif. 100%	0	4	21	27	0	3	51	61	

 TABELA VI

 Deslocamentos em dois pontos do protótipo – resultados numéricos e experimentais – hipótese 1.

Nas Tabelas acima, nota-se que os comportamentos experimentais do protótipo e do modelo reduzido foram compatíveis com os resultados numéricos. Pode-se afirmar que o modelo reduzido construído é dimensionalmente semelhante ao protótipo da torre D2S1 ensaiada.

Os resultados experimentais de tensões obtidos dos extensômetros instalados e os correspondentes resultados numéricos obtidos do modelo computacional também tiveram uma boa correlação como mostra a Tabela VII.

TABELA VII Tensões registradas nos extensômetros e resultados numéricos correspondentes - hipóteses 1 e 1R.

Hipótese 1		Extense	ômetros		Modelo Numérico			
Estágios	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
50%	46.32	-33.74	53.09	-33.82	47.24	-55.24	50.48	-58.16
75%	63.81	-63.51	76.95	-53.81	71.00	-82.70	76.27	-86.69
90%	95.96	-63.62	104.79	-58.02	85.26	-99.18	91.74	-103.81
95%	105.05	-64.87	109.67	-56.99	90.01	-104.67	96.90	-109.51
100%	106.19	-70.67	111.83	-63.36	94.77	-110.16	102.06	-115.22
Hipótese 1R		Extense	ômetros			Modelo N	Numérico	
Hipótese 1R Estágios	E1	Extense E2	ometros E3	E4	E1	Modelo M E2	Numérico E3	E4
Hipótese 1R Estágios 50%	E1 32.98	Extenso E2 -50.40	ometros E3 31.89	E4 -50.40	E1 50.19	Modelo N E2 -51.93	Numérico E3 52.76	E4 -55.81
Hipótese 1R Estágios 50% 75%	E1 32.98 72.07	Extenso E2 -50.40 -59.27	0metros E3 31.89 68.58	E4 -50.40 -66.42	E1 50.19 75.43	Modelo M E2 -51.93 -77.75	Numérico E3 52.76 79.70	E4 -55.81 -83.16
Hipótese 1R Estágios 50% 75% 90%	E1 32.98 72.07 81.52	Extenso E2 -50.40 -59.27 -66.18	5 metros E3 31.89 68.58 83.88	E4 -50.40 -66.42 -73.28	E1 50.19 75.43 90.58	Modelo N E2 -51.93 -77.75 -93.23	Numérico E3 52.76 79.70 95.85	E4 -55.81 -83.16 -99.57
Hipótese 1R Estágios 50% 75% 90% 95%	E1 32.98 72.07 81.52 79.45	Extenso E2 -50.40 -59.27 -66.18 -80.17	5 metros E3 31.89 68.58 83.88 83.92	E4 -50.40 -66.42 -73.28 -77.33	E1 50.19 75.43 90.58 95.63	Modelo N E2 -51.93 -77.75 -93.23 -98.39	Numérico E3 52.76 79.70 95.85 -101.24	E4 -55.81 -83.16 -99.57 105.04

VI-3. Ensaio dinâmico.

O ensaio consistiu, basicamente, na aplicação de uma pequena carga de impacto em determinados pontos da estrutura e captação das vibrações com um acelerômetro posicionado em outro ponto da estrutura. Os resultados obtidos foram todos do tipo aceleração x freqüência, e possibilitam visualizar as freqüências naturais de vibração da estrutura.

O ensaio foi realizado com a aplicação da carga de impacto em três pontos diferentes nas direções longitudinal e transversal e posicionamento do acelerômetro em três locais distintos. A Figura 7 apresenta a resposta de um dos casos.



Figura 7. Aceleração x Freqüência – impacto no ponto F1 na direção transversal e acelerômetro na posição A1 na direção transversal.

Através de uma análise visual dos gráficos percebeu-se uma razoável correlação entre as freqüências naturais do modelo numérico e as freqüências do ensaio.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os objetivos traçados na proposta inicial foram atingidos. Constatou-se que a realização dos testes de carga preconizados pela norma NBR-8842/85 puderam ser adaptados para o ensaio de modelos reduzidos.

O processo de fabricação das peças do modelo reduzido envolveu dobras de chapas de aço que por sua vez produzem peças com uma área ligeiramente inferior àquela especificada, além de instalar tensões residuais indesejadas na peça.

Considerando-se que se o modelo reduzido teórico concebido for fisicamente semelhante ao protótipo, mas que na prática contém as imperfeições de fabricação citadas acima, então a resistência equivalente do modelo não deverá ser superior à resistência do protótipo. Portanto, se essa afirmação for verdadeira, pode-se dizer que as mesmas conclusões obtidas da realização dos testes de carga no protótipo (ensaio exigido por norma) poderiam ser obtidas a partir do modelo reduzido. Nesse caso, com a grande vantagem do custo do ensaio ser bastante reduzido.

Finalizando, cabe salientar que a metodologia de análise desenvolvida nesse projeto é geral e se aplica qualquer nova estrutura que venha a ser projetada.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LOBO CARNEIRO, F. Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2^a edição, 1996.
- [2] LANGHAAR, H. L. Dimensional analysis and theory of models. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- [3] ABNT NBR 8842/85 Ensaio de estruturas metálicas, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985.
- [4] Ansys[®]/Multiphysics, ANSYS Inc. Company, 1998.
- [5] ASCE Manual no. 52 Guide for design of steel transmission towers. American Society of Civil Engineers, 1988.
- [6] LACERDA, L. A.; OLIVEIRA, P. A., Desenvolvimento experimental de protótipos de nova família otimizada de estruturas de transmissão de energia elétrica. *Relatório Técnico 3* - RT DPMA 346.2004-R0, 2004.