



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

**ANÁLISE DIMENSIONAL E FABRICAÇÃO DE UM MODELO REDUZIDO DE UMA TORRE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO VISANDO ENSAIOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS**

**Luiz Alkimin de Lacerda\*, Paulo Alexandre de Oliveira, Amanda Jarek, Carlo Giuseppe Filippin, Borys Wictor Dagostim Horbatiuk – LACTEC**

**Francisco Gris Liberato Marcolino, Valdir Cerqueira Petersen – AMPLA**

**Paulo Ricardo Ralo Liberato da Silva – ENGETOWER**

**RESUMO**

Nesse trabalho descrevem-se os estudos realizados com o objetivo de construir um modelo reduzido de uma torre de suspensão para a realização de ensaios estruturais estáticos e dinâmicos. O modelo reduzido é definido de tal forma que as situações críticas encontradas no protótipo também possam ser vistas e avaliadas no modelo reduzido. As limitações encontradas para a fabricação de peças estruturais tipo cantoneiras de abas iguais em tamanhos reduzidos são apresentadas, bem como o possível impacto das mesmas sobre os resultados dos ensaios. Os ensaios estáticos realizados seguiram as especificações da norma NBR-8842/85 e os resultados foram comparados às medições dos testes de carga do protótipo da torre e aos resultados computacionais.

**PALAVRAS-CHAVE**

Torres de Linhas de Transmissão, Modelo Reduzido, Testes de Carga, Modelagem Numérica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Nesse trabalho apresentam-se os estudos dimensionais realizados com o objetivo de construir um modelo reduzido de uma torre de suspensão para a realização de ensaios estruturais estáticos e dinâmicos. Os ensaios estáticos realizados seguiram as especificações da norma NBR-8842/85 (1), 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 é definido de tal forma que as situações críticas encontradas no protótipo também possam ser vistas e avaliadas no modelo reduzido. Após o levantamento dos fatores que devem ser considerados para a definição do modelo reduzido, os fatores de escala geométricos e o material do modelo são definidos, levando-se em conta as relações dimensionais das solicitações, as quais a estrutura estará submetida.

Tendo em vista a limitação comercial de peças estruturais tipo cantoneiras de abas iguais em tamanhos reduzidos, optou-se 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. 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

\*BR 116, km 98 – Centro Politécnico da UFPR, Jardim das Américas – CEP 81531-980 – Curitiba/PR - BRASIL  
Tel: (041) 361-6111 - Fax: (041) 266-3582 - e-mail: alkimin@lactec.org.br

modificados. Antes do estudo numérico dos modelos da torre uma treliça simples foi estudada sob diversas condições, comprovando a grande utilidade do modelo computacional. Outras considerações sobre a semelhança incompleta entre o protótipo e o modelo reduzido são discutidas como o peso das estruturas e as conexões dos componentes.

## 2.0 - ANÁLISE DIMENSIONAL DE ESTRUTURAS TRELIÇADAS

Uma das principais aplicações da análise dimensional é a definição das condições de semelhança física que relacionam um protótipo e um modelo de laboratório. O teorema de  $\Pi$  ou de Vaschy-Buckingham é fundamental na análise dimensional e, conseqüentemente, ao desenvolvimento da teoria da semelhança física e dos modelos (2,3). Os números  $\Pi$  são parâmetros adimensionais formados pelos parâmetros do problema físico. O primeiro passo na formação de um conjunto completo de números  $\Pi$  é a definição de todos os parâmetros relevantes do problema em estudo. Para isso, é necessário o conhecimento físico qualitativo do problema em estudo. Uma vez que números  $\Pi$  tenham sido obtidos, eles podem ser interpretados como uma relação de escalas das diferentes grandezas no protótipo e no modelo. Como um dos objetivos desse trabalho é a construção de um modelo reduzido de uma torre de suspensão e a realização de ensaios de resistência estrutural sobre a mesma, faz-se a seguir o levantamento dos fatores que devem ser considerados para a definição do modelo reduzido.

### 2.1 Problemas enfocados

Usualmente, em projetos estruturais, as torres de linhas de transmissão são idealizadas como treliças tridimensionais onde apenas os esforços mecânicos de tração e compressão e a flambagem das barras são avaliados.

Nos ensaios de homologação das estruturas projetadas, verifica-se a capacidade da estrutura resistir aos carregamentos de projeto, controlando-se os deslocamentos da estrutura através de instrumentação adequada e o comportamento das conexões e das peças através de inspeções visuais.

Nesse estudo, vislumbra-se a definição de um modelo estrutural reduzido, levando-se em consideração a semelhança física entre protótipo e modelo dos seguintes aspectos: forças admissíveis e deslocamento da estrutura; flambagem e vibrações.

#### 2.1.1 Forças admissíveis e deslocamentos da estrutura

Em uma estrutura reticulada trabalhando na fase elástica do comportamento dos materiais, após uma análise dimensional, obtêm-se os seguintes números  $\Pi$ :

$$\Pi_1 = \frac{\delta}{l} \quad \Pi_2 = \frac{F}{EA} \quad \Pi_3 = \frac{\gamma}{E} \quad [1]$$

Supondo-se que as forças atuantes sobre a estrutura sejam proporcionais, o conjunto pode ser representado por uma única força  $F$  representativa, e a estrutura se desloca segundo um valor representativo  $\delta$ . Além dessas variáveis e de fatores de forma que definem o posicionamento das cargas e geometria da seção transversal das peças, tem-se ainda a dimensão representativa  $l$  para o comprimento das barras, a dimensão representativa  $A$  para a área da seção transversal das barras, o módulo de elasticidade  $E$  e peso-específico  $\gamma$  do material.

Em estruturas leves como treliças o peso-próprio da estrutura pode ser considerado desprezível em comparação às forças aplicadas. Nestas situações o número  $\Pi_3$  pode ser desprezado.

#### 2.1.2 Flambagem

Todas as barras da estrutura sob cargas de compressão axial e cujas relações comprimento/largura (esbetez) forem elevadas, estão sujeitas à flambagem, que poderá ser elástica ou inelástica dependendo dessa relação. Através da análise dimensional obtêm-se as seguintes relações,

$$\Pi_4 = \frac{\eta}{a} \quad \Pi_5 = \frac{I}{Aa^2} \quad \Pi_6 = \frac{EI}{Fl^2} \quad [2]$$

onde  $\eta$  é a deflexão lateral da barra e  $I$  o momento de inércia da seção transversal. Analisando-se as expressões conhecidas da teoria de pilares com cargas excêntricas (4), verifica-se que a dimensão  $a$  no número  $\Pi_4$  está relacionada à excentricidade da carga axial, e no número  $\Pi_5$ , a dimensão  $a$  está relacionada a uma dimensão (raio de giração) da seção transversal, pela própria definição do momento de inércia.

#### 2.1.3 Vibrações

Em vibrações livres e forçadas de treliças espaciais a seguinte relação adimensional é obtida:

$$\Pi_7 = \frac{1}{fl} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [3]$$

onde  $f$  é a frequência de vibração e  $\rho$  a massa específica do material. Como a vibração ocorre em torno da configuração deformada de equilíbrio a intensidade da gravidade é irrelevante.

### 3.0 - SEMELHANÇA ENTRE PROTÓTIPO E MODELO

#### 3.1 Semelhança

Se o protótipo e o modelo são dois processos físicos semelhantes, é possível conhecer o comportamento do protótipo, conhecendo-se o comportamento do modelo que pode ser mais facilmente ensaiado. Para que os resultados obtidos com o modelo de laboratório possam representar o comportamento do protótipo é preciso que, a princípio, os números  $\Pi$  tenham o mesmo valor.

A relação entre as magnitudes de uma grandeza no protótipo e no modelo é chamada de fator de escala  $k$ . Cada número  $\Pi$  fornece uma diferente relação de fatores de escala entre modelo e protótipo. Por exemplo, o número  $\Pi_3$  fornece a seguinte relação:

$$\frac{k_\gamma k_l}{k_E} = 1 \quad [4]$$

#### 3.2 Semelhança física incompleta

Muitas vezes não é possível respeitar todas as condições de semelhança física, mas se for possível atender às condições mais importantes, pode-se ter uma situação de semelhança incompleta. Essa condição de semelhança será aceitável se os erros obtidos com esse relaxamento forem desprezíveis.

##### 3.2.1 Distorções geométricas

A distorção pode ser compreendida por uma adoção de escalas diferentes para grandezas do mesmo tipo como, por exemplo, as dimensões longitudinal e transversal de barras. As distorções são impostas por razões práticas e podem resultar em uma semelhança incompleta entre protótipo e modelo (5).

Em estruturas reticuladas como torres de linhas de transmissão, a utilização de diferentes escalas para a dimensão longitudinal das barras e para as dimensões transversais é conveniente, podendo ser até mesmo imprescindível em virtude dos seguintes aspectos:

- Limitações quanto ao tamanho do modelo reduzido – facilidade de ensaio;
- Limitações quanto à disponibilidade comercial de perfis e ferragens;
- Torres, em geral, são compostas por barras com diferentes seções transversais.

Com relação ao último aspecto acima, deve-se salientar que a necessidade em se utilizar diferentes escalas para a espessura e para o tamanho das abas dos perfis metálicos, resulta em um erro de distorção, dado que o fator de escala de redução da área da seção transversal  $k_A$  não é linearmente proporcional à escala de redução da espessura. A distorção será tanto menor quanto menor for a diferença entre os fatores de redução da largura da aba e da espessura.

##### 3.2.2 Conexões

As tensões transmitidas pelos parafusos às chapas dependem de diversos fatores. Se as tensões atingem valores críticos, duas situações de falha podem ser verificadas: cisalhamento do parafuso ou rasgo da chapa. Em uma situação limite, o tipo de falha dependerá da relação entre diâmetro ( $d$ ) do parafuso e a espessura ( $e$ ) da chapa. Ao se utilizar distorções geométricas na definição do modelo reduzido, a relação  $d/e$  pode não ser a mesma para o protótipo e modelo reduzido. Além disso, o tamanho das folgas entre parafusos e chapas têm influência sobre as tensões na região de contato, aumentando o grau de complexidade do problema.

##### 3.2.3 Confeção do modelo

Definidas as dimensões do modelo reduzido, a partir dos fatores de escala adotados, pode-se dar início à confecção do modelo. Estruturas como torres de linhas de transmissão são compostas por uma série de perfis laminados e a utilização do mesmo material do protótipo para a construção do modelo é difícil, em virtude da pouca variedade de perfis comerciais. Deve-se atentar aos seguintes aspectos de fabricação:

- Dobras – Podem introduzir tensões residuais indesejadas;
- Colagem – Alternativa para se obter espessuras comercialmente indisponíveis;
- Imprecisão nos cortes e dobras – Podem introduzir erros de semelhança geométrica.

### 4.0 - MODELO REDUZIDO DE UMA TRELIÇA SIMPLES

#### 4.1 O protótipo da treliça simples

Para avaliar a importância da precisão na fabricação das cantoneiras do modelo reduzido e a relevância da relação adimensional que envolve o peso-próprio do material, efetuou-se um estudo sobre uma treliça simples. Considera-se como protótipo uma treliça formada por duas cantoneiras de abas iguais de aço estrutural laminado

ASTM A36 com as seguintes geometrias: 40x3mm e 50x5mm. O esquema da geometria da estrutura e do carregamento aplicado pode ser visto na Figura 1(a).

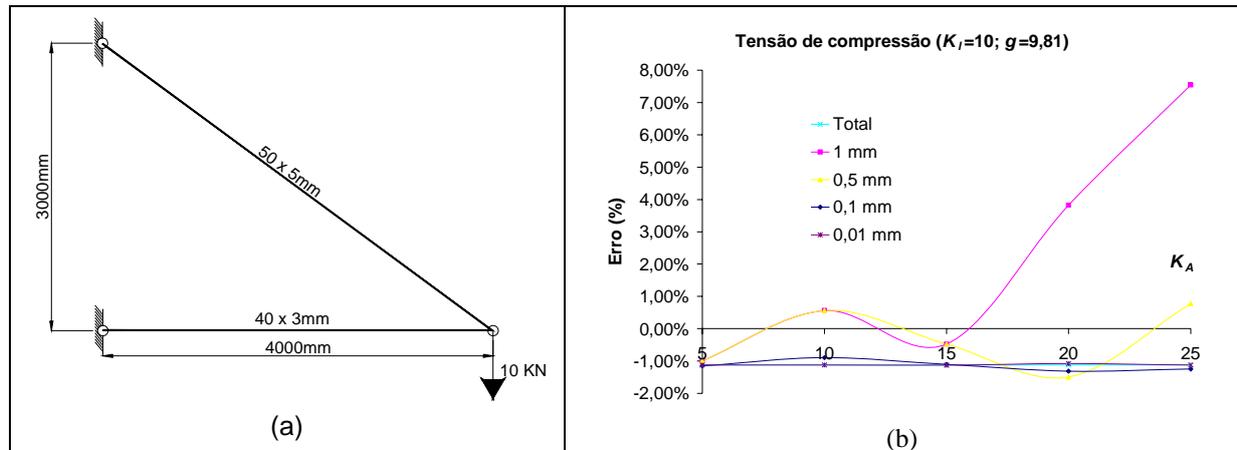


FIGURA 1 – (a) Treliça simples formada por duas cantoneiras de abas iguais; (b) Erro relativo entre a tensão de compressão no protótipo e no modelo reduzido ( $K_I = 10$ ;  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

#### 4.1.1 Semelhança de deslocamentos e cargas aplicadas

Nessa simulação, adotou-se a liga de Alumínio 6063 para o modelo reduzido. Para que haja semelhança nos deslocamentos e cargas aplicadas entre o protótipo e o modelo reduzido é preciso satisfazer as relações adimensionais [1].  $K_E$  e  $K_g$  são definidos a partir do material adotado.  $K_A$  deve ser mantido constante para as duas barras e  $K_F$  poderá ser obtido da relação  $K_F = K_E K_A$ .

Mantendo-se o formato geométrico da seção transversal das barras, para que  $K_A$  seja constante, é preciso cortar a largura das abas. Entretanto, sempre haverá um erro de precisão ( $p$ ) nos cortes que fará com que  $K_A$  deixe de ser constante. Se  $K_A$  não é constante, tem-se um erro na definição de um único  $K_F$  para toda a estrutura. Nesse exemplo, determina-se  $K_F$  a partir de um  $K_A$  médio.

De acordo com as relações adimensionais,  $K_I$  deveria ser definido com  $K_E/K_g$ , o que limitaria seriamente a redução do tamanho de um protótipo de aço em um modelo de alumínio. Em estruturas leves como treliças é possível que o erro cometido ao se ignorar essa relação seja desprezível. Esse aspecto é avaliado com a variação do fator  $K_I$ . Diversos modelos reduzidos foram numericamente avaliados através dos resultados de deslocamento total do ponto de aplicação da carga, da tensão de compressão na barra horizontal e da tensão de tração na barra inclinada. O erro relativo entre esses resultados e os do protótipo foram analisados para combinações dos fatores listados na Tabela 1.

TABELA 1 – Variações para análise do modelo reduzido.

$K_I$	2,0	5,0	10,0	---	---
$K_A$	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
$p$ (mm)	Total	0,01	0,1	0,5	1,0
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	0,0	9,81	---	---	---

A Figura 1(b) apresenta os erros obtidos para uma das combinações de fatores de escala listados na Tabela 1. Após a análise de todas as combinações verificou-se o seguinte:

- Se o corte das abas pudesse ser efetuado sem erros de precisão, ou seja, precisão total, os erros entre os resultados do protótipo e do modelo reduzido seriam exclusivamente devido à não satisfação da relação adimensional que envolve a força da gravidade. Esse erro cresce com o aumento de  $K_I$ , mas não é tão expressivo por se tratar de uma estrutura leve. Aparentemente o crescimento desse erro é assintótico, dado que a diferença dos erros entre  $K_I = 5$  e  $K_I = 10$  não é tão significativa;
- Os erros aumentam à medida que a precisão no corte das abas diminui. Os cortes de aba com precisão inferior e igual a 0,5mm resultaram em erros significativos;
- A precisão dos cortes está diretamente associada à definição de  $K_A$  e, portanto, é natural que os erros aumentem à medida que  $K_A$  aumente. Esse aumento de erro é imperceptível para cortes com precisão igual ou superior a 0,1mm, para essa estrutura;
- Em todos os casos analisados, os erros nas tensões axiais foram superiores aos erros nos deslocamentos.

De uma forma geral conclui-se que a precisão no corte das abas tem um papel fundamental na semelhança entre protótipo e modelo reduzido. É imprescindível avaliar esse aspecto para a definição do modelo reduzido da torre.

## 5.0 - CONFECÇÃO DE UM MODELO REDUZIDO DE UMA TORRE DE LT – QUESTÕES PRÁTICAS

### 5.1 Diretrizes para o dimensionamento

A seguir, são listadas algumas diretrizes básicas para a definição do modelo reduzido, tendo como base os estudos dimensionais realizados com a treliça simples.

- A intenção básica é 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.
- O modelo reduzido poderá ser distorcido no sentido que os fatores de redução das dimensões não precisam ser necessariamente iguais, entretanto, é prudente avaliar os erros introduzidos.
- Selecionar o material do modelo de tal forma que os perfis reduzidos sejam disponíveis comercialmente;
- Evitar, se possível, a execução de dobras de chapas;
- Um problema detectado é que a área da cantoneira de abas iguais não se reduz linearmente com a redução da aba. Será imprescindível cortar as abas para se manter o fator de redução das áreas.

### 5.2 Seleção do material para fabricação das peças

A primeira idéia que se verifica é a possibilidade de se utilizar o mesmo tipo de material para a confecção do modelo reduzido. Entretanto, a disponibilidade de perfis em aço laminado no mercado, com espessuras inferiores a 3 mm, é bastante limitada. A menor espessura encontrada para cantoneiras de aço foi de 2,5 mm, o que limitaria o fator de redução da espessura a  $K_e = 1,2$ .

Após uma rápida pesquisa comercial sobre a disponibilidade de cantoneiras de abas iguais, verificou-se que a melhor opção seria a utilização de cantoneiras de Alumínio que apresentava uma maior variedade de produtos. Nessa alternativa seria necessário o 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 extremamente cara, dado o grande número de peças a serem fabricadas.

Ainda visando o uso do Alumínio, seria possível a utilização de uma máquina de corte de tubos quadrados. O custo para a utilização dessa máquina é menor e a programação e uso da mesma muito mais simples, comparada à máquina tridimensional. Esse equipamento de corte também apresenta a vantagem de ser mais preciso, no que diz respeito ao posicionamento da peça para corte, e de maior produtividade visto que em um único tubo quadrado um grande número de cantoneiras (quatro quinas) poderia ser produzido. Entretanto após a verificação dos tubos, constatou-se uma grande irregularidade nas espessuras das paredes. 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 fabricação. Para o estudo dimensional essas diferenças não são 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 é inevitável. Por razões práticas de corte, o uso de tubos quadrados de aço foi avaliado. Os tubos avaliados eram formados a partir de chapas dobradas, e costuradas termicamente. Após a realização de um teste de corte, constatou-se que a tensão residual das peças tinha um grande impacto na qualidade do corte da cantoneira, as peças ficavam arqueadas.

A utilização de chapas planas de aço para a confecção das cantoneiras tornou-se a alternativa mais 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 dobras para a formação das cantoneiras, resultando 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, o que não ocorre nas peças laminadas.

## 6.0 - DIMENSIONAMENTO DO MODELO REDUZIDO

### 6.1 Informações sobre o protótipo da torre

A torre de suspensão protótipo 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 laminado ASTM A36: 100x7mm, 90x7mm, 75x7mm, 90x6mm, 75x5mm, 65x5mm, 60x5mm, 50x5mm, 65x4mm, 60x4mm, 50x4mm, 50x3mm, 45x3mm e 40x3mm. Chapas com diversos tamanhos e espessuras são utilizadas nas conexões dos perfis. As seguintes espessuras são encontradas no projeto do protótipo: 3,2mm; 4,75mm; 6,3mm; 8,0mm e 16,0mm. O material dos parafusos é o ASTM A394 tipo "0". Os parafusos e arruelas possuem diâmetro de 12,7mm. Os comprimentos dos parafusos variam entre 30mm e 50mm, e as arruelas possuem espessura de 3,2mm.

### 6.2 Fatores de escala

Com a utilização de um aço carbono LF para o modelo reduzido com propriedades semelhantes ao do aço do protótipo, tem-se os seguintes fatores de escala unitários:  $K_E = K_Y = 1,0$ . Adotando-se um fator de redução de espessura  $K_e = 6,666$  e fator de redução de área  $K_A = 42,82$  obtém-se as dimensões para as peças do modelo reduzido apresentadas na Tabela 2. As espessuras (t) para o modelo são todas comerciais e conhecendo-se a área do modelo reduzido é possível definir uma largura de aba (ver última coluna – Tabela 2) para cada peça em tamanho reduzido. Essa largura é teórica, em virtude da precisão de corte e dobra das máquinas empregadas.

TABELA 2 – Características geométricas das cantoneiras do protótipo e modelo reduzido.

Protótipo			Modelo		
a (mm)	t (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	t (mm)	A (mm <sup>2</sup> )	a (mm)
100	7	1351	1.05	31.55	15.549
90	7	1211	1.05	28.28	13.992
75	7	1001	1.05	23.38	11.657
90	6	1044	0.9	24.38	13.995
75	5	725	0.75	16.93	11.663
65	5	625	0.75	14.60	10.106
60	5	575	0.75	13.43	9.327
50	5	475	0.75	11.09	7.770
65	4	504	0.6	11.77	10.109
60	4	464	0.6	10.84	9.330
50	4	384	0.6	8.97	7.773
50	3	291	0.45	6.80	7.776
45	3	261	0.45	6.10	6.998
40	3	231	0.45	5.39	6.219

A máquina de corte a laser utilizada possui precisão de 0,1mm para as maiores peças a serem cortadas. Esse erro é bastante aceitável e provoca um pequeno ajuste nos fator de redução das áreas das seções transversais. Após a verificação de todas as condições da análise dimensional chegou-se aos seguintes valores para fator de escala de redução de área, de aba e de comprimento das peças:  $K_A = 42,82$  e  $K_l = K_a = 6,429$ . Comparando-se o fator de redução de aba e comprimento com o fator de escala adotado para a espessura, percebe-se uma leve distorção. Os parafusos de  $\frac{1}{2}$  polegada e os respectivos furos nas abas de 1,43cm de diâmetro serão representados no modelo reduzido com parafusos de 2mm e perfurações de 2,3mm de diâmetro.

### 6.3 Simulação numérica do modelo reduzido

Após a modelagem da torre no *software* ANSYS, optou-se por efetuar as comparações entre protótipo e modelo para uma das hipóteses de carregamento descrita na memória de cálculo do projeto estrutural. A hipótese adotada está relacionada à construção da linha de transmissão onde 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 ensaiado no ANSYS, bem como as deflexões causadas pelo carregamento aplicado.

Após uma análise dos resultados encontrados para os deslocamentos nodais e tensões axiais nas barras do protótipo e modelo reduzido, verificou-se que o erro obtido foi sempre inferior a 2%. Pode-se afirmar que o modelo reduzido de 6,69m representa com grande precisão o protótipo de 43m de altura. Deve-se salientar que os resultados apresentados referem-se a um modelo de treliça ideal. Portanto, os valores numéricos servem apenas como um indicativo do comportamento da estrutura real que se comporta como um pórtico tridimensional.

O *software* ANSYS também foi empregado para fazer uma análise modal das treliças que representam o protótipo e o modelo reduzido. Ao se analisar as primeiras vinte frequências naturais extraídas de cada estrutura, percebeu-se que os erros obtidos foram sempre inferiores a 5%. Os resultados são muito bons considerando-se a complexidade da estrutura.

## 7.0 - FABRICAÇÃO, PRÉ-MONTAGEM E MONTAGEM DO MODELO REDUZIDO DA TORRE

Uma vez que as dimensões das 952 peças do modelo reduzido foram definidas, os desenhos foram elaborados e encaminhados para fabricação. Para o corte das peças foi utilizada uma máquina de corte bidimensional TRUMPF 4030. Uma precisão mínima de 0,1mm pode ser atingida no processo de corte das chapas de aço que possuíam

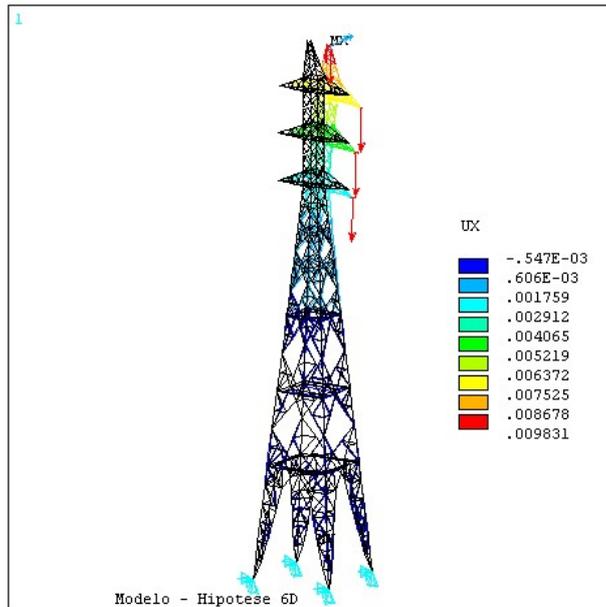


FIGURA 2 – Modelo da torre sob uma hipótese de carregamento construtiva – resultados de deslocamentos.

espessuras variando entre 0,45 e 1,20mm. 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%. Para a dobra das peças o equipamento TRUMPF 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. Após o recebimento das peças e antes de iniciar a pré-montagem da estrutura, efetuou-se a verificação do comprimento, espessura e largura das abas das cantoneiras e espessuras das chapas produzidas. Todas as medições foram feitas com um paquímetro digital Mitutoyo modelo CD-6" CR.

Para a fixação das peças do modelo reduzido foram adquiridos parafusos de aço galvanizado, tipo M2 (2mm de diâmetro), com 8mm de comprimento e rosca tipo MA. Considerando-se chapas, cantoneiras, parafusos, arruelas, porcas, mais de quatro mil peças formam a estrutura.

A figura 4 mostra o modelo reduzido da torre preparada para os ensaios estáticos. A aplicação das cargas foi efetuada com a utilização de roldanas e balanças para a colocação dos pesos mortos (ver paredes na figura 4).

## 8.0 - ENSAIOS

As mesmas oito hipóteses de carregamento aplicadas ao protótipo da torre (6) foram aplicadas ao modelo reduzido e o mesmo controle de deslocamentos da estrutura com o uso de teodolitos foi efetuado. Os pontos da estrutura monitorados nas direções transversal e longitudinal, à medida que as cargas eram colocadas nas balanças, foram o topo da mísula do pára-raios e a base da mísula inferior junto ao tronco da torre. Foi possível comparar os seguintes resultados:

- Resultados experimentais do teste de carga efetuado sobre o protótipo e o modelo reduzido da torre;
- Resultados numéricos com o modelo de treliça ideal do protótipo e modelo reduzido da torre.

O fator de redução esperado para os deslocamentos entre o protótipo e modelo reduzido é  $K_s = 12.6$ . Essa relação é obtida com grande precisão entre os modelos numéricos, conforme pode ser visto na Tabela 3, para uma das hipóteses analisadas.

TABELA 3 – Resultados para a hipótese de carregamento 6D.

Hipótese 6D	Base da mísula inferior				Topo do pára-raios			
	Longitudinal		Transversal		Longitudinal		Transversal	
	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp	Num	Exp
<b>Protótipo</b>	1.39	4	3.02	8	3.38	3	12.66	1
<b>Mod Reduzido</b>	0.11	0.0	0.24	0.1	0.27	0.0	0.98	1.3

Percebe-se na Tabela 3 que os resultados experimentais do protótipo são razoavelmente parecidos com os resultados numéricos. A maior discrepância observada foi o deslocamento transversal no topo do pára-raios cujo valor foi inferior ao observado no modelo reduzido. É possível que tenha ocorrido algum erro de leitura. Deve-se salientar que é normal que os valores experimentais tenham um comportamento aproximado em virtude do próprio processo de montagem da torre e do torque aplicado nas conexões.

Pode-se dizer que os resultados experimentais com o modelo reduzido apresentam uma melhor concordância em relação aos resultados da simulação numérica. Talvez em razão do maior controle no procedimento de montagem em laboratório. Os resultados obtidos com as outras hipóteses de carga apresentaram um bom comportamento.



FIGURA 4 – Modelo reduzido da torre preparada para os testes de carga.

## 9.0 - CONCLUSÃO

Os estudos básicos realizados permitiram avaliar a influência dos erros de fabricação das peças e de outros fatores de semelhança incompleta, auxiliando a seleção dos fatores de escala geométricos para o modelo reduzido. Apesar das limitações comerciais com relação à disponibilidade de materiais, o modelo reduzido pode ser fabricado e construído.

A realização testes de carga em modelos reduzidos envolve um custo bastante reduzido em relação aos ensaios com o protótipo e permite a avaliação da montagem da estrutura, bem como do seu comportamento estrutural.

Os ensaios estáticos realizados mostraram uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais do protótipo e modelo reduzido, indicando grande potencial para a realização de futuras pesquisas, especialmente na área de vibrações.

## 10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NBR-8842/85 – Ensaio de estruturas metálicas, 1985.
- (2) LANGHAAR, H. L. Dimensional analysis and theory of models. New York: John Wiley & Sons, 1965.
- (3) LOBO CARNEIRO, F. Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos. Ed. UFRJ, 1996.
- (4) TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. E. Mecânica dos Sólidos, 1984.
- (5) HUNTLEY, H. E. Dimensional Analysis. New York: Dover, 1967.
- (6) ENGETOWER. Programa de Testes - Torre Tipo D2S1, LT 138kV circuito duplo, CERJ, 2004.