



XXXIII JORNADAS SUDAMERICANAS  
DE INGENIERIA ESTRUCTURAL  
Santiago, 26 al 30 de Mayo de 2008



[www.asaae.org.br](http://www.asaae.org.br)

## MONITORAÇÃO PARA INTERVENÇÃO ESTRUTURAL EM UMA TORRE DA LINHA DE TRANSMISSÃO TUCURUÍ-MARABÁ

## MONITORING FOR STRUCTURAL INTERVENTION ON A TUCURUÍ - MARABÁ TRANSMISSION LINE TOWER

Luís Augusto C. M. Veloso (1); Remo M. de Souza (2); Edílson M. L. e Silva (3); Adriana L. Rolim (3); Sandro D. R. Amador (3); Paulo D. Almeida (4)

(1) Professor Doutor, Universidade Federal do Pará, FEC, NiCAE

(2) Professor Doutor, Universidade Federal do Pará, FEC, NiCAE

(3) Mestrando, Universidade Federal do Pará, FEC, NiCAE

(4) Engenheiro Civil, Centrais Elétricas do Norte do Brasil - ELETRONORTE

Campus Universitário do Guamá, Rua Augusto Correa n 01, NiCAE, Edifício do Instituto de Tecnologia, Salas 232 e 234. CEP 66075-110, Belém-Pará-Brasil, email: [nicae@ufpa.br](mailto:nicae@ufpa.br)

### Resumo

Este trabalho trata das análises para intervenção estrutural da torre 21 da linha de transmissão Tucuruí-Marabá que teve sua estrutura avariada devido à ação de vandalismo. Inicialmente, foi elaborado um modelo computacional baseado no Método dos Elementos Finitos para estimar o nível de esforços a serem aplicados para re-posicionar essa torre de modo que um montante danificado pudesse ser substituído por outro íntegro, sem que a linha fosse desligada. Esses esforços foram aplicados na torre por meio de estais fixados em sua estrutura e ancorados no terreno. Também foi utilizado um guindaste para aplicação de carga vertical no nó imediatamente superior a emenda do montante danificado. As cargas nos estais e no guindaste foram medidas por meio de dinamômetros. Para substituição do montante danificado foi realizada a monitoração dos esforços por meio de extensômetros elétricos instalados em cada um dos montantes da torre. O procedimento empregado permitiu a realização da intervenção de forma mais segura e os resultados obtidos pela instrumentação mostram que a estrutura voltou a apresentar o comportamento original.

*Palavra-chave: Torres de Linhas de Transmissão, Intervenção Estrutural, Estrutura Metálica.*

### Abstract

This work deals with the analyses for the structural intervention of the tower 21 of the Tucuruí-Marabá transmission line that had its structure damaged due to vandalism. Initially, a computational model based in the Finite Elements Method was elaborated in order to determine the efforts that should be applied to move the tower in way that a damaged part of its structure could be substituted by another one. These efforts had been applied in the tower by means of stayed cables anchored in the land. It was also used a derrick to apply vertical load in the immediately superior joint. The loads in the stayed cables and the derrick had been measured by means of dynamometers. For the substitution of the damaged leg, it was realized the monitoring of the efforts by means of electric strain gauges installed in each one of the tower legs. The used procedure allowed to make the intervention in a safer way and the results showed that the structure came back to present the original behavior.

Keywords: Transmission Line Towers, Structural Intervention, Steel Structure.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, não são raros os casos onde torres de linhas de transmissão ruíram sob ação do vento. Como exemplo pode-se citar o caso onde acidente ocorrido na linha de transmissão da usina de Itaipu entre Foz de Iguaçu e Ivaiporã no Paraná, em 02 de novembro de 1997, quando 10 torres ruíram sob o efeito de ventos de até 130 km/h (36m/s), de SOUZA [1].

Em alguns casos, esses problemas estão ligados a deficiências cometidas no projeto dessas estruturas. Segundo RODRIGUES [2], as causas de alguns desses acidentes foram atribuídas ao fato das cargas adotadas no projeto corresponderem a um período de retorno muito inferior aos cinquenta anos requeridos. Muitas análises dessas torres têm sido realizadas com modelos que não representam o comportamento real do sistema estrutural formado por torres e cabos elétricos acoplados.

Por isso, é importante ressaltar a necessidade de revisão dos procedimentos prescritos nas normas de projeto de torres de linhas de transmissão, de forma que a interação dinâmica entre as forças de escoamento turbulento e os cabos seja sempre considerada no modelo estrutural acoplado –estrutura da torre e cabos – para a obtenção das respostas dinâmicas e para análise de estabilidade das torres sob a ação do vento.

Além da preocupação com os problemas provocados pela ação do vento que já, historicamente, provocou de vários casos de queda (destruição total) de torres de linhas de transmissão no Brasil, trazendo diversos transtornos e prejuízos de ordem econômica, as empresas concessionárias vêm registrando sucessivas ocorrências de vandalismo nas estruturas das torres, caracterizadas principalmente pela retirada de barras de travamento de montantes e parafusos das ligações.

Na figura 1 estão apresentados alguns casos desse tipo registrado pelas equipes de manutenção de uma empresa concessionária de energia elétrica.



**Figura 1 – Fotografias de torres danificadas pela ação de vandalismo. Retiradas de barras de contraventamento dos montantes**

Vandalismos desse tipo podem fragilizar drasticamente a estruturas das torres, fazendo com que essas estruturas venham a ruir sob a ação de ventos de baixa intensidade.

Os riscos envolvidos em uma operação de intervenção de torres em condições de “linha viva” são grandes, tanto no que se refere aos prejuízos de ordem material, no caso da queda de uma torre e da interrupção do fornecimento de energia, quanto às vidas humanas da equipe diretamente envolvida nos trabalhos de intervenção.

Neste contexto, análises estruturais empregando-se modelos numéricos são necessárias para se prever e simular o comportamento da estrutura danificada sob intervenção.

Outra metodologia bastante eficiente neste tipo de intervenção é a monitoração da estrutura, a partir de extensômetros elétricos de resistência para a determinação das tensões atuantes nas barras.

Com o emprego de um sistema de aquisição apropriado, essas grandezas são monitoradas e avaliadas in-loco durante a intervenção, visando avaliar as reais condições de determinados elementos estruturais diante dos respectivos limites de resistência.

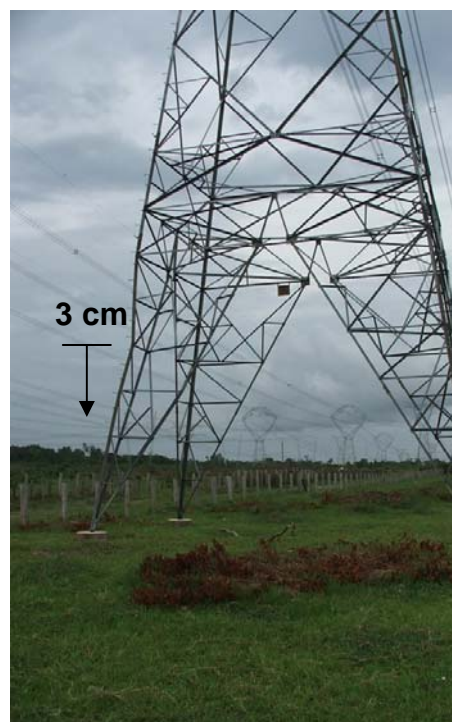
Assim, a análise estrutural aliada à monitoração da estrutura contribui para uma operação de intervenção muito mais segura, onde as variáveis chaves do problema que são os esforços aplicados para mobilizar a estrutura e os esforços solicitantes nas barras da torre são melhores controlados.

## 2 DETALHAMENTO DO PROBLEMA

A torre apresentava o montante traseiro esquerdo fletido, figura 2. Verificou-se, a partir das medições realizadas pela equipe de topografia da empresa concessionária responsável pela linha de transmissão, que a ligação entre esse montante com o restante da estrutura apresentava um deslocamento vertical para baixo de cerca de três centímetros, figura 3.

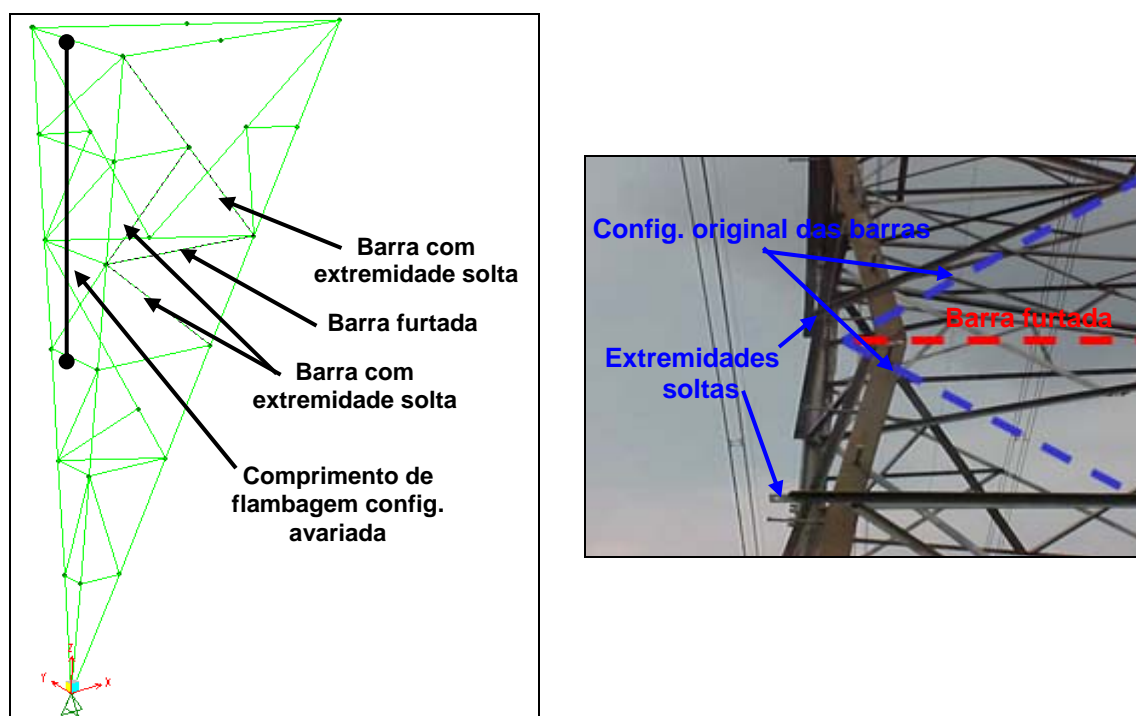


**Figura 2 - Vista geral da torre**



**Figura 3 – Deslocamento vertical da torre**

A avaria nessa estrutura foi provocada pelo furto de uma barra, conjuntamente com a liberação de duas outras barras que faziam parte da ligação do nó de travamento do montante, figura 4. Na configuração avariada, o montante passou a apresentar um comprimento de flambagem em relação ao eixo de menor inércia da seção transversal, da ordem de três vezes do comprimento de flambagem na condição original.



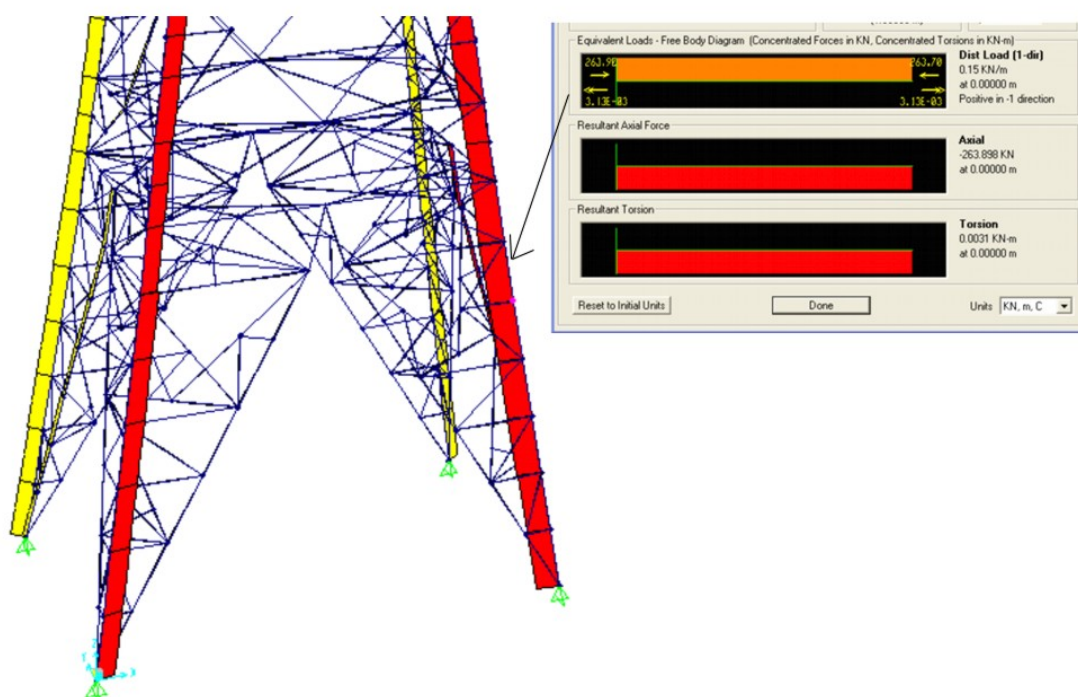
**Figura 4 – Esquema do montante avariado**

As alterações no comprimento de flambagem resultaram na diminuição da resistência da barra. Assim, considerando a sobrecarga de vento na configuração avariada, verifica-se que é atingido o limite de resistência do montante, conforme apresentado na tabela 1. De fato, segundo os relatos dos técnicos da ELETRONORTE, houve a ocorrência de um forte vendaval na região no dia 06/10/2005, pouco antes da descoberta da avaria na estrutura da torre.

**Tabela 1 – Esforços solicitantes e resistentes nas barras nas condições íntegra e avariada**

Situação da estrutura	$N_{r,n}$ (kN)	$N_{s,k}$ (kN)	$\gamma_f = N_{r,n}/N_{s,k}$
Íntegra	560,9	263,9	2,2
Avariada	264,6		1,0

Os valores de resistência do montante,  $N_{r,n}$ , foram determinados a partir das recomendações da norma NBR-8800 [3], sem o coeficiente de minoração da resistência do material. Por sua vez, o valor do esforço solicitante característico,  $N_{s,k}$ , foi obtido considerando as cargas de gravidade e o vento incidindo paralelamente a linha de transmissão, seguindo as recomendações da NBR-6123 [4], figura 5.



**Figura 5 - Esforços devido à combinação de ações das cargas de gravidade e vento**

Da tabela 1, verifica-se que quando na situação avariada, é atingido limite de resistência da estrutura,  $\gamma_f=1$ , quando se aplica o esforço de vento recomendado por norma.

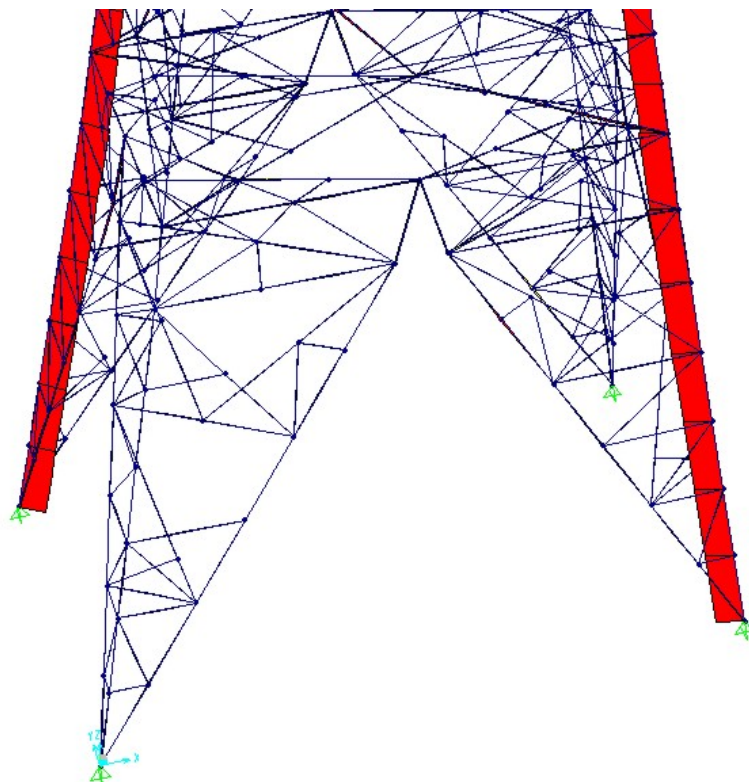
### 3 ANÁLISE ESTRUTURAL

O objetivo principal dessa análise foi estimar os esforços necessários para re-posicionar a torre de modo que todo o conjunto montante-sistema de travamento que constitui uma das “pernas da torre” pudesse ser substituído por outro íntegro.

Esse nível de esforço foi estimado observando-se os limites de resistência do restante da estrutura, de modo que esses valores não fossem superados.

Para isso, foi elaborado um modelo numérico na plataforma SAP2000® baseado no Método dos Elementos Finitos. A geometria do modelo foi baseada nos projetos cedidos pela concessionária.

Considerando somente os esforços de gravidade, verifica-se que quando um dos montantes da torre deixa de contribuir para o mecanismo resistente da estrutura, os esforços são transmitidos para a fundação, integralmente, pelos dois outros montantes diagonalmente opostos, figura 6.

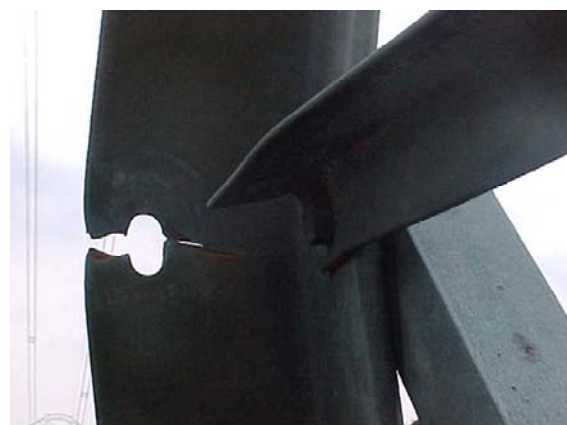


**Figura 6 – Esforços nos montantes devido às cargas de gravidade, configuração avariada**

Pode-se considerar que essa situação ocorre na torre na configuração avariada, onde o montante apresentava-se fletido e com grande parte de sua seção transversal reduzida, figura 7 e figura 8.



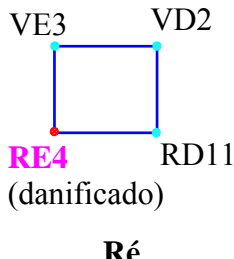
**Figura 7 – Montante fletido**



**Figura 8 – Detalhe do montante fletido**

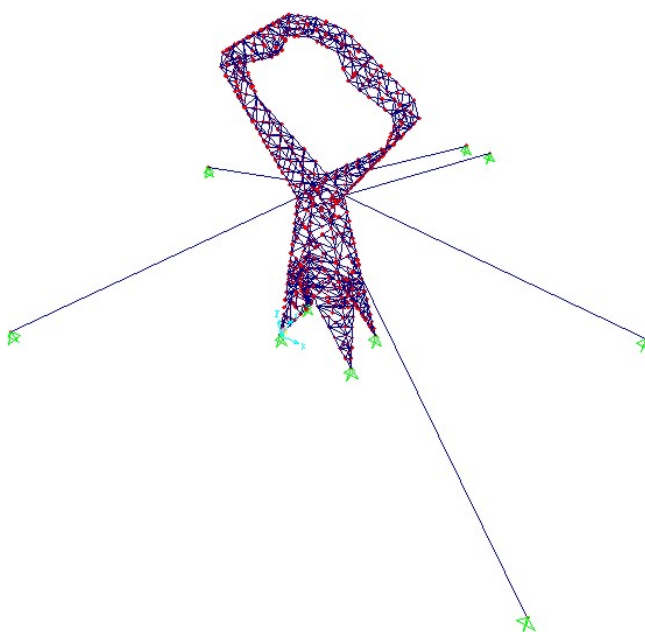
Na tabela 2, apresentam-se os valores dos esforços nos montantes devido ao carregamento de gravidade, nas condições íntegra e avariada.

**Tabela 2 – Esforço normal dos montantes devido às cargas de gravidade**

Vante VE3 VD2  RE4 (danificado) RD11 Ré	Montantes	Esforço normal (kN)	
		Condição íntegra	Condição avariada
	RD1	- 44,80 (compressão)	- 88,95 (compressão)
	VD2	- 44,80	- 0,11
	VE3	- 44,80	- 88,95
	RE4	- 44,80	0,4 (tração)

#### 4 INTERNENÇÃO ESTRUTURAL

Para a estabilização da estrutura no momento da substituição da “perna da torre” e reposicionamento da estrutura foram instalados seis estais próximos ao delta da torre, sendo quatro para vante e os outros dois para ré, conforme a figura 9.



**Figura 9 – Disposição dos estais**

Os estais foram fixados ao solo por meio de dispositivos de ancoragem enterrados no terreno, figura 10. As cargas foram aplicadas no estai por meio de tifort e medidas por dinamômetros, figura 11. Inicialmente, para a retirada do montante danificado da torre foram aplicadas cargas da ordem de 5 kN em cada estai.



**Figura 10 – Ancoragem dos estais**



**Figura 11 – Tifort acoplado ao dinamômetro**

Também foi utilizado um guindaste para aplicação de uma carga vertical no nó imediatamente superior a emenda do montante, figura 12. Incrementos de carga foram aplicados até a torre fosse re-posicionada. Assim, a ligação da “perna da torre” com a fundação pode ser liberada, figura 13.



**Figura 12 – Guindaste utilizado**

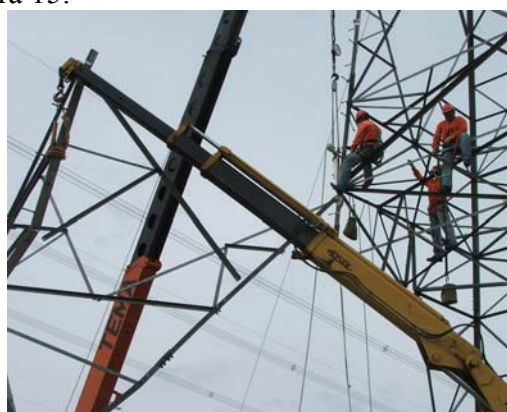


**Figura 13 – Liberação da “perna da torre” com a fundação**

Um segundo guindaste, de menor capacidade de carga, foi utilizado para a retirada da “perna” danificada, figura 14. Retirou-se a perna danificada, após a liberação das ligações da com o restante da torre, conforme pode ser visto na figura 15.



**Figura 14 – Preparação para a retirada da “perna” danificada, liberação das ligações com o restante da torre**



**Figura 15 – Retirada da “perna” danificada**



Finalmente, após a retirada da perna avariada, a nova “perna” foi introduzida sendo primeiramente fixada na estrutura da torre, figura 16 e, posteriormente, na fundação, figura 17.



**Figura 16 – Fixação da nova “perna” na torre**      **Figura 17 – Fixação da nova “perna” na fundação**

## 5 MONITORAÇÃO DAS TORRES DURANTE A INTERVENÇÃO ESTRUTURAL

Extensômetros elétricos foram instalados em cada um dos montantes das “pernas” da torre, figura 18, e conectados por cabos a um sistema de aquisição digital de dados acoplado a um microcomputador portátil, figura 19.

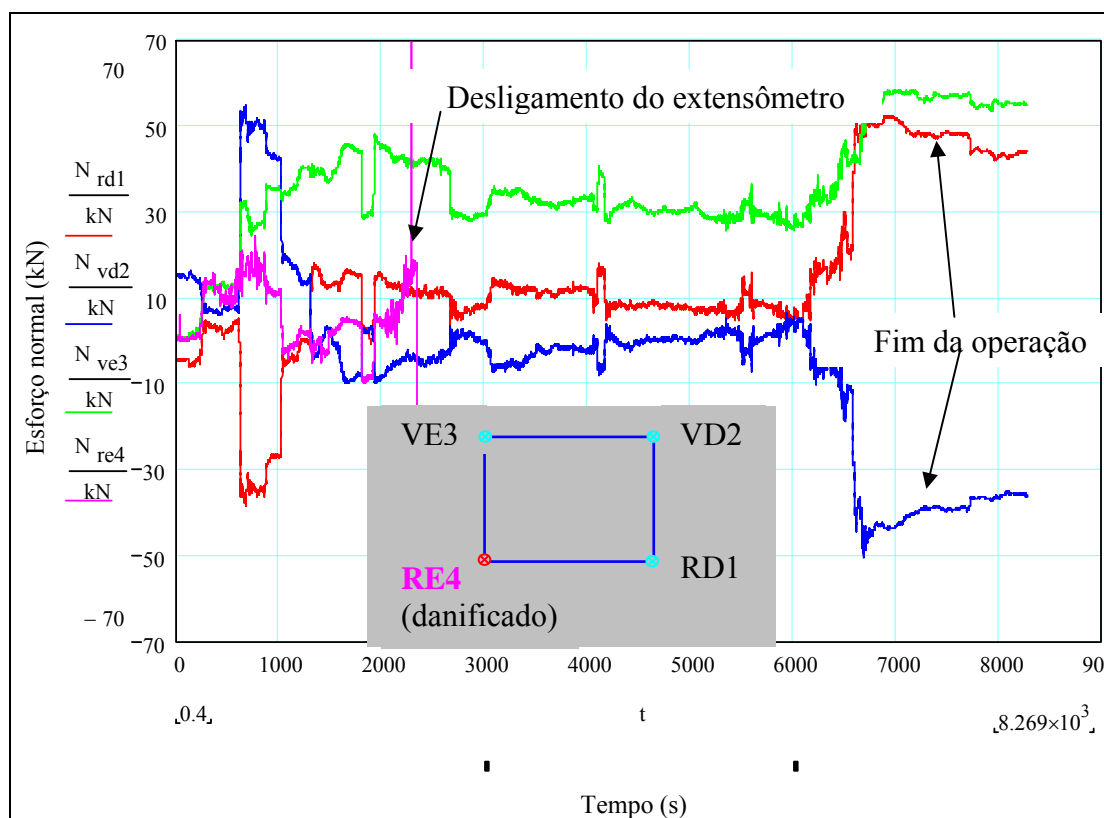


**Figura 18 – Extensômetro fixado no montante**



**Figura 19 – Equipamento de aquisição de dados**

Dessa maneira, puderam ser determinadas as variações dos esforços nos montantes durante a operação de substituição da “perna” avariada, figura 20. Para a retirada da “perna” danificada houve a necessidade do desligamento do extensômetro fixado nesta barra, a partir deste momento, foram realizadas medidas somente nos outros três montantes restantes.



**Figura 20 – Esforços normais nas barras durante a intervenção**

Na tabela 3 estão apresentados os esforços nos montantes correspondentes, desde a fase de troca da “perna” até a liberação da estrutura, após a instalação da nova “perna”. Esses resultados foram obtidos a partir do diagrama da figura 20.

**Tabela 3 - Esforços medidos nos montantes durante a intervenção**

Montante	Esforço normal (kN)	
	Fase de troca do montante	Liberação da estrutura
RD1	-37,6 (compressão)	44,2
VD2	54,8	-35,9
VE3	32,0	54,9
RE4	22,0	Não foi medido

Deve-se observar que os resultados da monitoração correspondem apenas à variação dos esforços nas barras. Portanto, para a determinação dos esforços totais nos montantes, esses valores devem ser somados aos esforços devido ao carregamento de gravidade, correspondente a condição avariada, apresentados na última coluna da tabela 2.

Os esforços totais nos montantes, já considerando os esforços devido às cargas de gravidade estão apresentado na tabela 4.

**Tabela 4 – Esforços totais nos montantes**

Montante	Esforço normal (kN)	
	Fase de troca da “perna”	Liberção da estrutura
RD1	$-88,9 + (-37,6) = -126,6$	$-88,9 + 44,2 = -44,7$
VD2	$-0,1 + 54,8 = 54,7$	$-0,1 + (-35,9) = -36,0$
VE3	$-88,9 + 32,0 = -56,9$	$-88,9 + 54,9 = -34,0$
RE4	$0,4 + 22,0 = 22,4$	Não foi avaliado

Dos resultados da tabela 4, verifica-se que, durante a fase da troca da “perna”, o esforço total solicitante não superou, em nenhum momento, o valor da resistência do montante que é de 561 kN, conforme pode ser verificado na tabela 1. Além disso, após a troca da “perna” houve redistribuição dos esforços de modo que todos os montantes ficassem comprimidos e com valores próximos dos esforços na configuração original, tabela 2.

Deve-se ressaltar que a diferença encontrada entre os esforços totais nos montantes apresentados na tabela 4 e os apresentados na última coluna da tabela 2 é atribuída à complexidade em se determinar, de forma mais precisa, os esforços nos montantes devido às cargas de gravidade, na configuração avariada da torre. Em uma modelagem mais realista do problema seria necessário levar em conta o fenômeno de flambagem em regime elasto-plástico do montante e neste trabalho, realizou-se apenas uma análise linear elástica, diante da grande urgência para a realização dos serviços de intervenção na torre.

## 6 CONCLUSÕES

Com base nas análises e nos resultados das monitorações, as principais conclusões deste trabalho são as seguintes:

a) a debilitação do travamento do montante reduziu para menos da metade o valor da sua resistência. Assim, com a ocorrência de um vento forte provocou a flambagem do montante, tabela 1;

b) durante a substituição da “perna” danificada, os esforços mobilizados nos demais montantes devido à operação de intervenção foram inferiores aos valores de resistência desses elementos, tabela 2 e tabela 4;

c) após a substituição da “perna” os esforços foram redistribuídos aos demais montantes, restabelecendo-se o comportamento original da estrutura, tabela 2 e tabela 4.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os funcionários da ELETRONORTE envolvidos na operação de intervenção da torre, a gentileza por parte da ELETRONORTE em permitir que os resultados deste trabalho pudessem ser publicados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] de SOUZA, R. M. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico Intitulado “Desenvolvimento de um Sistema para Análise de Segurança e Monitoração On-line para Previsão de Falhas Estruturais de Torres de Linhas de Transmissão”. ANEEL, 2004.
- [2] RODRIGUES, R. S. Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-8800 – Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios (método dos estados limites). Rio de Janeiro, 1986.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- [5] VELOSO, L. A. C. M; de SOUZA, R. M; AMADOR, S. D. R; SILVA, E. M L., ROLIM, A. L. Intervenção Estrutural na Torre 21 da Linha de Transmissão 500 KV Tucuruí-Marabá. Relatório Técnico, NICAIE – Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, 2006.