



**XXIII SNTPEE  
SEMÍNÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GLT/05  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT**

**EFEITO DA EXCENTRICIDADE NAS LIGAÇÕES EM PROJETOS DE TORRES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO – ESTUDO DE CASO**

**Angelo Braz Fadini Fabri  
Brametal S.A.**

**RESUMO**

É comum que falhas ocorram durante testes de carregamento em escala real em torres para linhas de transmissão. O comportamento real da estrutura difere do seu comportamento teórico por uma série de razões, entre elas citamos o efeito da excentricidade das ligações aparafusadas.

Neste trabalho será feita a análise de uma ligação excêntrica utilizando o Método dos Elementos Finitos. A ligação em questão pertence a uma torre estaiada para linha de 500 kV que já foi testada na Estação de Testes Estruturais da Brametal, localizada em Linhares, ES, Brasil.

Durante o teste ocorreu uma falha na estrutura causada pela excentricidade de uma importante ligação. Como solução, a seção do perfil colapsado foi aumentada, mas a ligação não foi refeita e isto resultou em uma nova falha. Como solução definitiva, a ligação foi redesenhada, desta vez excluindo a excentricidade original.

Todas as situações descritas acima serão avaliadas empregando o Método dos Elementos Finitos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Ligações Aparafusadas, Excentricidade, Elementos Finitos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Nas etapas de cálculo e detalhamento (elaboração dos desenhos de montagem e fabricação) de uma torre, um ponto que deve ser avaliado com cuidado é o efeito das excentricidades nas ligações aparafusadas. O modelo de cálculo considera que a torre é uma treliça espacial e que todas as ligações são nós perfeitos, ou seja, não há excentricidade e as barras estão sujeitas apenas a esforços de tração e compressão. No entanto, na fase de detalhamento, muitas vezes, não é possível criar essas ligações perfeitas, dando origem a excentricidades e esforços de flexo-compressão ou flexo-tração nas barras.

Hoje os cálculos estruturais são automatizados por meio de softwares específicos para o seguimento, tais como o PLSTOWER da Power Line Systems Inc., enquanto o detalhamento é realizado, na maioria das vezes com ferramentas CAD em 2D. No entanto, estes softwares não possuem ferramentas automáticas para a avaliação destas excentricidades, apenas tenta-se reduzi-las o máximo possível na fase de detalhamento, minimizando seus efeitos.

Como validação da etapa de projeto, um protótipo em escala real é montado e submetido às cargas previstas no cálculo. É relativamente comum que ocorram falhas na estrutura durante estes testes. O comportamento real da

estrutura difere do modelo teórico adotado por diversos motivos, entre eles podemos citar as folgas dos furos das ligações e o já mencionado efeito das excentricidades.

## 2.0 - EXCENTRICIDADES NAS LIGAÇÕES APARAFUSADAS

Mas o que são estas excentricidades e por que não é possível evitá-las sempre? Conforme mostrado na figura 01, as torres são constituídas por perfis de seção L (cantoneiras), os quais podem estar diretamente conectados, sem o uso de chapas de ligação. Neste caso, os eixos longitudinais dos membros conectados podem não convergir em um único ponto da estrutura, originando excentricidades na ligação. As conexões em que são utilizadas chapas são detalhadas de forma a minimizar estas excentricidades.

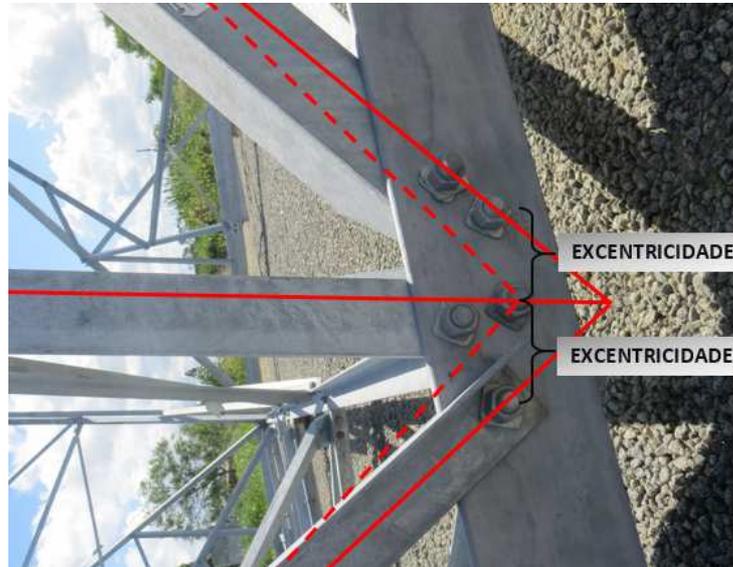


FIGURA 01 – Detalhe de uma ligação excêntrica

As linhas tracejadas da figura 01 indicam a orientação dos eixos das barras convergindo em um único ponto, ou seja, gerando um nó não excêntrico perfeito, mas para que essa ligação fosse passível de ser realizada, seria necessário fazer diversos recortes nos membros e isto poderia enfraquecer em excesso estas peças. Outra opção seria a utilização de uma chapa de ligação entre estes membros, no entanto esta chapa significaria utilizar uma maior quantidade de peças e parafusos, o que aumentaria o peso da torre e conseqüentemente elevaria os custos de produção e montagem. Portanto, temos uma situação delicada em mãos, pois não podemos enfraquecer os membros com recortes excessivos e também não podemos tornar as estruturas mais pesadas e com mais peças para montagem. O que precisa ser feito é avaliar estas ligações de forma que estas excentricidades não levem a torre ao colapso em sua vida útil e aferir até que ponto estas excentricidades comprometem a segurança da estrutura.



FIGURA 02 – Detalhe de uma ligação excêntrica complexa



O quadro F-F mostrado na figura 04 é de extrema importância para a sustentação da torre, visto que os estais ficam ancorados na posição 135, uma chapa com 25,4 milímetros de espessura. A imagem a seguir traz a localização na estrutura do quadro estudado.

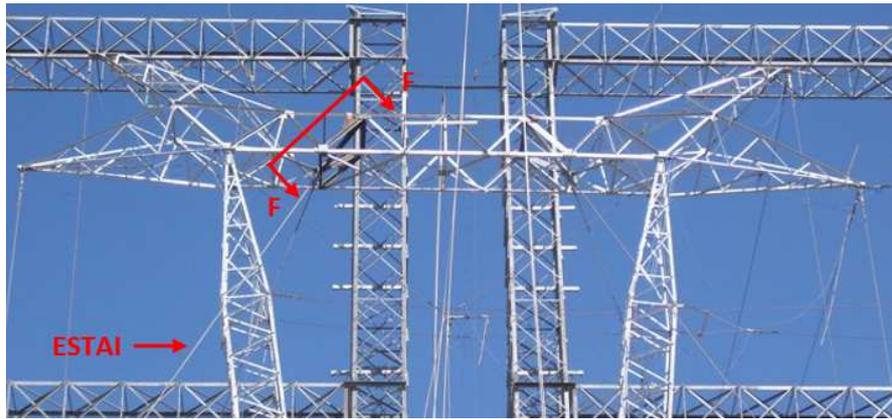


FIGURA 05 – Localização do Quadro F-F na torre

#### 4.0 - TESTE DE CARREGAMENTO EM ESCALA REAL

##### 4.1 Estação de Testes

A Estação de Testes em que foi realizado o teste da torre G52 é de propriedade da Brametal S.A. e está localizada na cidade de Linhares, Espírito Santo, Brasil.

A estação é dotada de três conjuntos de guinchos elétricos, servindo um deles para a aplicação das cargas longitudinais, o segundo para as cargas transversais e o terceiro para as cargas verticais. Dos guinchos partem os cabos de aço que formam, juntamente com o conjunto de roldanas, o sistema de transmissão e multiplicação de cargas que se apoia nos pórticos metálicos. Este sistema permite a aplicação das cargas nos pontos definidos na torre de teste de modo a simular as hipóteses de carga.

O sistema de monitoramento das cargas é composto por células de carga localizadas proximo ao protótipo e inseridas em série com o cabo de aço que chega ao ponto de aplicação da carga. Através de cabos elétricos blindados, as células de carga são conectadas à bancada de controle que permite a leitura direta do carregamento aplicado nos seus vários displays.

##### 4.2 Hipótese de Carga

A hipótese de carga aplicada e que gerou as falhas na estrutura é a hipótese de Vento Extremo Transversal. Além das cargas (em quilograma-força) mostradas na figura 06, ainda foram aplicadas cargas em sete níveis ao longo do mastro para simular o efeito do vento na torre.

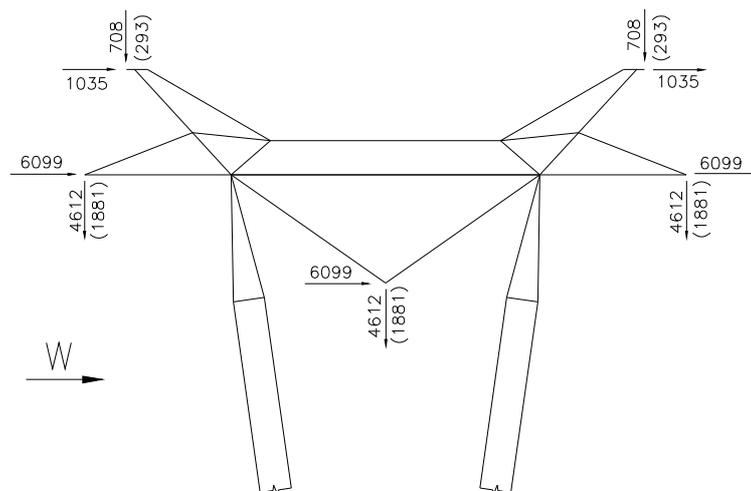


FIGURA 06 – Hipótese de Carga – Vento Extremo Transversal

### 4.3 Teste de Carregamento

O teste teve início no dia 16 de junho de 2011. A primeira hipótese a ser testada foi de Vento Máximo a 45°. Esta hipótese foi concluída sem que nenhuma falha fosse percebida. A seguir descarregou-se a torre e deu-se início a aplicação das cargas para a hipótese seguinte, Vento Máximo Transversal.

#### 4.3.1 Situação A: Primeira Falha

Quando as cargas se aproximavam de 75% do valor de cálculo, houve o colapso do quadro F-F conforme as imagens a seguir:



FIGURA 07 – Situação A: Falha com 75% de carga

Como solução para esta falha, o perfil da posição 143 (ver figura 04) foi modificado, passando de L 60x4 para L 75x5, ambos em ASTM A572 Grau 50. Estas alterações foram montadas na torre e o teste foi retomado no dia 22 de junho de 2011.

#### 4.3.2 Situação B: Segunda Falha

A solução discutida anteriormente mostrou-se ineficaz, pois durante o novo teste para a mesma hipótese observou-se que novamente aos 75% da carga final, uma nova falha se iniciou no mesmo ponto conforme a figura 08.



FIGURA 08 – Situação B: Falha com 75% de carga

Como solução definitiva para esta falha, procedeu-se com a revisão do quadro F-F (ver figuras 04 e 10), retirando a excentricidade da ligação entre as posições 128, 134 e 143.

#### 4.3.3 Situação C: Torre Aprovada

O ensaio foi reiniciado no dia 27 de junho de 2011, com as alterações no quadro F-F montadas na estrutura. Foram aplicadas as cargas previstas para as etapas de 0%, 50%, 75%, 90%, 95% e 100% e efetuadas as leituras das deflexões. Não foi registrada nenhuma falha durante a execução desta hipótese de carga.

As demais hipóteses (rompimento do cabo para-raios, rompimento do cabo condutor e hipótese vertical de construção) foram testadas a seguir e não foi observada nenhuma falha, portanto a torre foi considerada aprovada, visto que com as modificações implementadas, a estrutura foi capaz de suportar satisfatoriamente os esforços previstos no Programa de Testes proposto.

A figura 09 mostra a solução adotada para o quadro F-F. É possível perceber que não há excentricidade na ligação, uma vez que os eixos das posições 128, 134 e 143 convergem para o mesmo ponto.

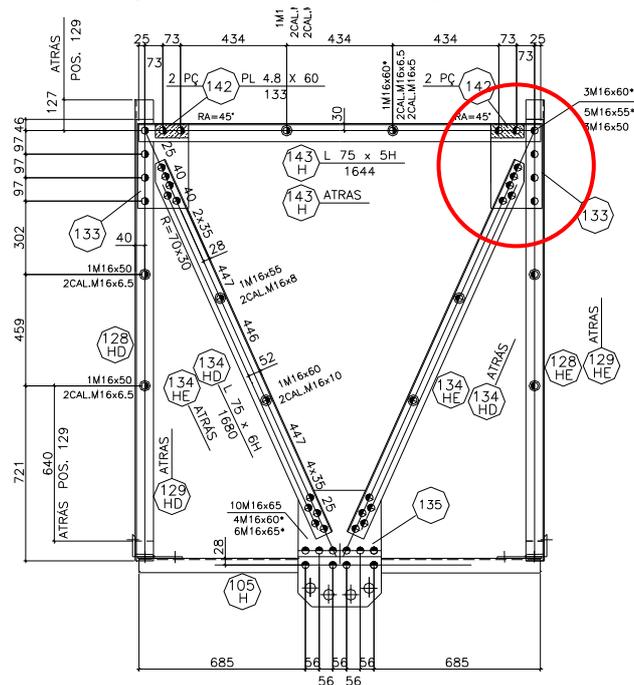


FIGURA 09 – Quadro F-F – Situação Não-excêntrica (Dimensões em mm)

## 5.0 - ANÁLISE COM O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método de simulação computacional e vem sendo utilizado por diversos anos para a resolução dos mais distintos problemas de engenharia. O MEF é um procedimento numérico para a análise de estruturas e meios contínuo, e é baseado no conceito de discretização. A ideia consiste em transformar um problema complexo na soma de diversos problemas simples, ou seja, dividir o objeto de estudo, representando-o, ainda que de forma aproximada, por uma reunião de um número finito de elementos e resolver não o problema original global, mas sim um que é associado aos seus elementos.

Alguns programas utilizados no cálculo de torres para linhas de transmissão utilizam o MEF, mas consideram todos os elementos da estrutura como barras e não como sólidos. Ou seja, são simuladas apenas as cantoneiras (barras) e não são simulados os outros elementos, como chapas e parafusos por exemplo.

A seguir serão mostrados os resultados da simulação utilizando o MEF, elaborada com o software ANSYS 15.0, para as situações A, B e C do teste de carregamento discutidas no item 4.0.

### 5.1 Situação A: Primeira Falha

Esta situação representa o detalhamento do modelo original do quadro F-F conforme mostrado na figura 04, com detalhe para a excentricidade de 60 milímetros no encontro das posições 128, 134 e 143.

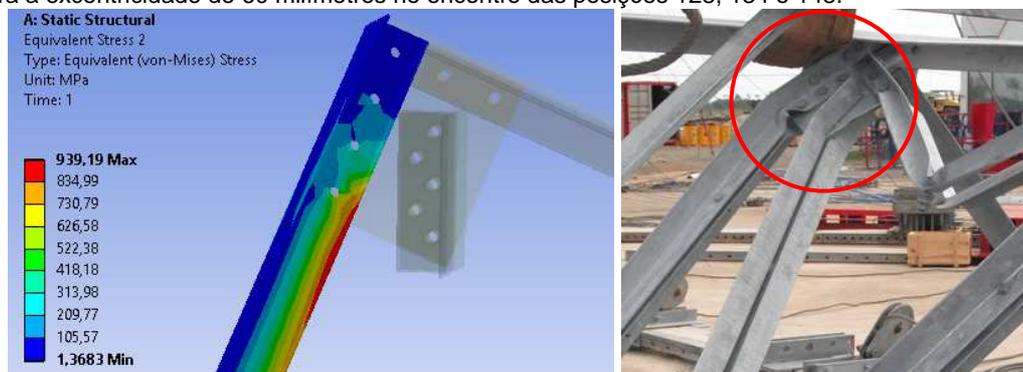


FIGURA 10 – Tensões atuantes (Von Mises) na posição 128 – Situação A

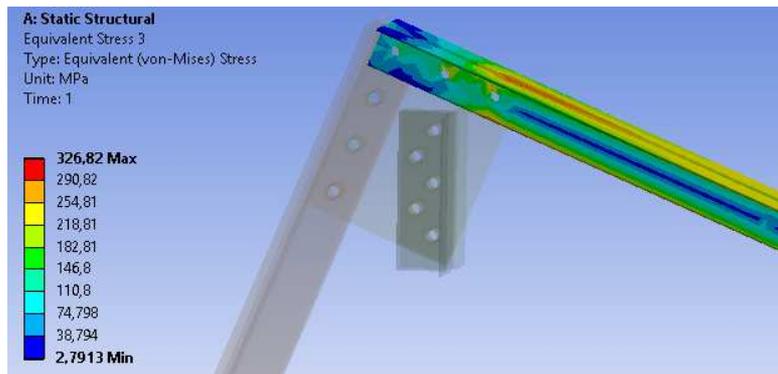


FIGURA 11 – Tensões atuantes (Von Mises) na posição 143 – Situação A

Através destas imagens é possível perceber que a tensão atuante na posição 128 está bem acima do limite de escoamento do aço utilizado que é de 345 MPa, visto que se trata do aço ASTM A572 Grau 50. É possível notar também que a região que concentra as mais altas tensões atuantes está sujeita a flexão, uma vez que a tensão não é constante na seção do perfil.

Comparando ainda o estado de tensões da figura 10 com a foto da falha, vemos que a região em vermelho realmente representa a zona com o maior acúmulo de tensões.

### 5.2 Situação B: Segunda Falha

Na situação B foi alterado o perfil da posição 143, passando de L 60x4 para L 75x5, no entanto a excentricidade de 60 mm da ligação foi mantida. Os resultados contidos nas figuras 12 e 13 comprovam que esta solução é equivocada e ineficaz, uma vez que a tensão máxima na posição 143 se eleva, passando de 326 para 359 MPa e, apesar de uma ligeira diminuição nas tensões da posição 128, passando de 939 para 802 MPa, este valor ainda se encontra bastante acima do limite do material utilizado.

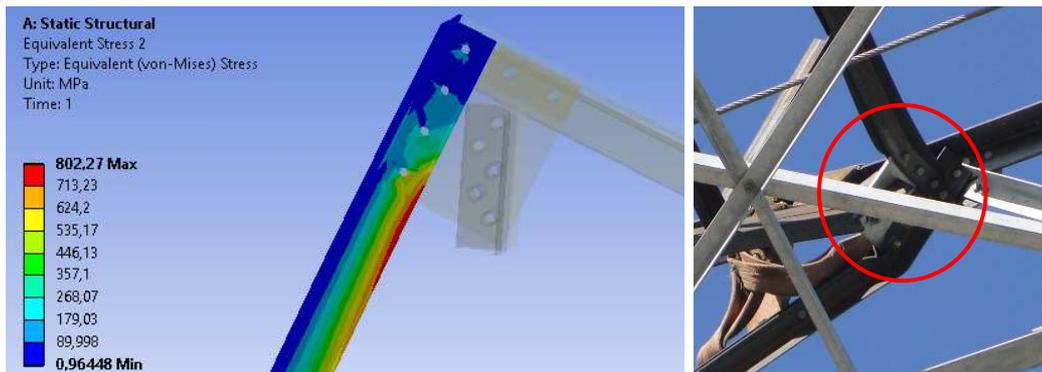


FIGURA 12 – Tensões atuantes (Von Mises) na posição 128 – Situação B

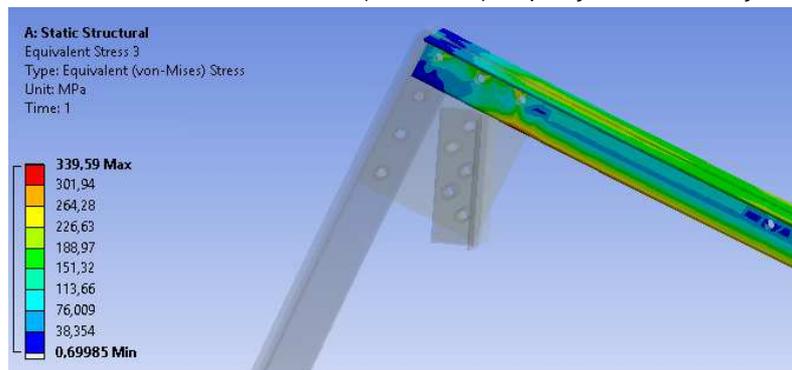


FIGURA 13 – Tensões atuantes (Von Mises) na posição 143 – Situação B

### 5.3 Situação C: Torre Aprovada

Na situação C, o quadro F-F foi detalhado conforme a figura 09, retirando a excentricidade inicial que havia na ligação das posições 128, 134 e 143. Conforme comprovado com o teste de carga, esta solução se mostrou eficaz.

Analisando a figura 14, vemos que a tensão máxima encontrada na análise foi de 356 MPa, que ainda está acima do limite do material, no entanto esta tensão é localizada em uma pequena região próxima a borda de um furo. Bordas de furo e cantos vivos são áreas de acúmulo de tensões já conhecidas, e neste caso por se tratar de uma tensão pontual, pode ser descartada. A tensão máxima efetiva ocorre na fibra externa da posição 128 e tem o valor de 317 MPa, ou seja, abaixo do limite de 345 MPa.

A retirada da excentricidade também diminuiu consideravelmente a tensão máxima da posição 143, que agora é de 176 MPa.

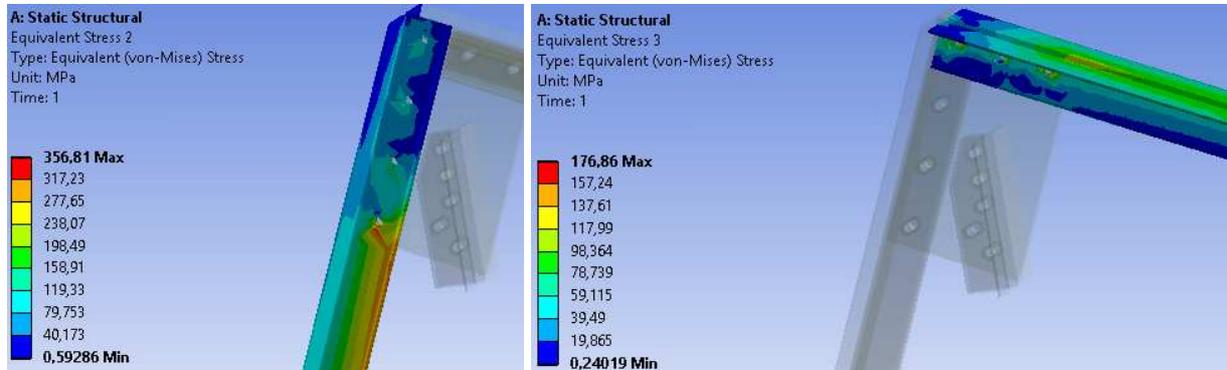


FIGURA 14 – Tensões atuantes (Von Mises) nas posição 128 e 143 – Situação C

## 6.0 - CONCLUSÃO

Um ponto interessante a ser notado é que uma torre possui um número bastante elevado de ligações e não existe nenhum software no mercado hoje que verifique automaticamente o efeito das excentricidades nestes nós, e com o ritmo acelerado de produção exigido pela indústria, fica inviável analisar todas estas ligações pontualmente. Isso nos faz salientar dois assuntos importantes da etapa de projeto de uma torre. Primeiro: a troca de informações entre o desenhista e o calculista da estrutura, uma vez que ao detalhar uma determinada ligação e que esta for excêntrica, é importante que o projetista chame a atenção do calculista que irá verificar as condições de resistência da ligação e, se preciso, requisitar que esta seja refeita. Segundo: a importância da validação do cálculo e detalhamento através dos testes de resistência ao carregamento em escala real.

Os softwares que utilizam o Método dos Elementos Finitos com a análise de elementos sólidos disponíveis no mercado ainda são pouco amigáveis para o cálculo de torres para linhas de transmissão e não atendem o já citado acelerado ritmo da indústria, no entanto são excelentes ferramentas para a análise de pontos específicos da estrutura, como o mostrado neste trabalho, desta forma evitando falhas e limitando o retrabalho e os custos gerados.

Em suma: é preciso uma análise mais profunda das ligações mais importantes de uma torre, visto que uma pequena excentricidade pode levar uma estrutura ao colapso.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, A. Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE. Editora Erica S.A. São Paulo, SP, Brasil, 2002

FABRI, A.B.F. PT-10021-100 Programa de Testes da Torre G52, Linhares, ES, Brasil, 2011

FABRI, A.B.F. RT-10021-100 Relatório de Testes da Torre G52, Linhares, ES, Brasil, 2011

KAMINSKI JUNIOR, J. Incertezas de Modelo na Análise de Torres Metálicas Trelaçadas de Linhas de Transmissão. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil, 2007

OSHIRO, R.T. MC-10021-100 Memória de Cálculo da Torre G52, São Paulo, SP, Brasil, 2011

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Nome: Angelo Braz Fadini Fabri

Local e ano de nascimento: Governador Lindenberg, ES - 1986

Local e ano de graduação: Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES - 2008

Local e ano de pós graduação: ESSS, São Paulo, SP - 2015

Experiência Profissional: Brametal S.A., 2009-Presente. Responsável pelo acompanhamento e execução de testes de carga e cálculo de diversas estruturas para subestações e torres para linhas de transmissão no Brasil e América do Sul.