

DANIEL ANGELO FRANCISCO THOMAZI

CÁLCULO SÍSMICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA  
- VALIDAÇÃO DO MÉTODO ESTÁTICO -

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Alberto Tamagna  
Prof. Dr. Ignácio Iturrioz

Porto Alegre  
2004



**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**CÁLCULO SÍSMICO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**  
**- VALIDAÇÃO DO MÉTODO ESTÁTICO -**

**DANIEL ANGELO FRANCISCO THOMAZI**

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-  
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Flávio José Lorini  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

de modo especial, à todos com quem me relacionei durante estes cinco anos de caminhada que foram de fundamental importância para esta conquista.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* que me disponibilizou estudo público gratuito e de qualidade inquestionável durante estes cinco anos de curso de Engenharia Mecânica.

aos meus orientadores, *Prof. Dr. Alberto Tamagna e Prof. Dr. Ignacio Iturrioz* que me guiaram ao rumo certo com extremas competência e perícia.

aos meus pais *Balduino Luiz Thomazi e Lorena Rosa Bortolon Thomazi* e a minha irmã *Ana Paula Thomazi* que me deram todo o suporte necessário à minha vivência em Porto Alegre e aos meus estudos.

à AREVA T&D, em particular aos engenheiros Paulo Pohmann, Paulo Kormann e Dirk Uhde pelo auxílio, tanto na escolha quanto no desenvolvimento do estudo de caso e principalmente pela oportunidade de participar da equipe de engenharia da Empresa.

“Todas as regras fixas estão erradas,  
inclusive esta.”

*Autor desconhecido*

THOMAZI, D. A. F. **Cálculo Sísmico de Transformadores de Potência - Validação do Método Estático** -. 2004. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

## **RESUMO**

O presente trabalho visa validar a metodologia de cálculo sísmico estático aplicada para transformadores de potência. Para tanto, realiza-se o cálculo estático de um transformador de potência sob a influência de um abalo sísmico específico, além disso, são propostas alterações a esta metodologia. Em seguida, a estrutura do transformador é modelada e simulada numericamente por elementos finitos, buscando tensões e modos de vibração para aferição e discussão de resultados e hipóteses. Ao fim do estudo, conclui-se que o método estático, com as devidas alterações propostas, fornece bons resultados para o dimensionamento dos chumbadores. Para o dimensionamento estrutural da base do tanque, conclui-se que o método não representa a real distribuição de tensões, sendo necessário mais estudos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transformador de potência, Sismo, Cálculo estático

THOMAZI, D. A. F. **Cálculo Sísmico de Transformadores de Potência - Validação do Método Estático** -. 2004. 25f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

#### **ABSTRACT**

The present work has the aim of validating the static seismic calculation methodology applied to power transformers. For that, the static calculation of a power transformer by a specific seismic is made, besides of being suggested changes to this methodology. Then, the frame of the transformer is numerically simulated by finite elements to get the desired stresses and the vibration modes for checking and discussing of the results and hypotheses. By the end of the study is concluded that the static method, with the proposed changes, express good results for the design of the fastenings. For the structural design of the base of the tank is concluded that the method don't represent the real distribution of tensile, being necessary more studies.

**KEYWORDS:** Power transformers, Seismic, Static calculation

**SUMÁRIO**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ABSTRACT</b>                               | <b>7</b>  |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>2. DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO</b>       | <b>9</b>  |
| <b>2.1 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA</b>        | <b>9</b>  |
| <b>2.2 SISMO</b>                              | <b>10</b> |
| <b>3. METODOLOGIA DE CÁLCULO ATUAL</b>        | <b>12</b> |
| <b>3.1 CÁLCULO DAS FORÇAS SÍSMICAS</b>        | <b>12</b> |
| <b>3.2 CÁLCULO DO TANQUE</b>                  | <b>13</b> |
| <b>3.3 CÁLCULO DOS CHUMBADORES</b>            | <b>14</b> |
| <b>4. ALTERAÇÕES PROPOSTAS</b>                | <b>16</b> |
| <b>4.1 TANQUE</b>                             | <b>16</b> |
| <b>4.2 CHUMBADORES</b>                        | <b>17</b> |
| <b>5. MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA</b>        | <b>19</b> |
| <b>5.1 TENSÕES NA BASE DO TANQUE</b>          | <b>21</b> |
| <b>5.2 TENSÕES NOS CHUMBADORES</b>            | <b>21</b> |
| <b>5.3 DETERMINAÇÃO DOS MODOS DE VIBRAÇÃO</b> | <b>21</b> |
| <b>6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS</b>            | <b>22</b> |
| <b>6.1 TENSÕES NORMAIS NA BASE DO TANQUE</b>  | <b>22</b> |
| <b>6.2 SOLICITAÇÃO NOS CHUMBADORES</b>        | <b>22</b> |
| <b>6.3 MODOS DE VIBRAÇÃO</b>                  | <b>23</b> |
| <b>7. CONCLUSÕES</b>                          | <b>24</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS</b>                         | <b>25</b> |
| <b>10. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b>            | <b>25</b> |



## 1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um transformador de potência, bem como qualquer outro equipamento sob a influência de um abalo sísmico, vem sendo um desafio aos projetistas. Além disso, há uma crescente exigência dos clientes por produtos que satisfaçam plenamente suas necessidades com o menor custo.

Há vários métodos para o cálculo das solicitações existentes durante um abalo sísmico. Porém, muitos deles requerem softwares avançados e mão-de-obra especializada para seu desenvolvimento. Isto, por sua vez, aumentaria ainda mais os custos do produto e os tempos de projeto.

Sabe-se, também, que a preocupação das empresas com seus custos de produção é crescente para que assim elas possam tornar-se ainda mais competitivas no mercado. Com transformadores de potência não é diferente, sendo o seu maior custo existente, passível de corte as horas de engenharia gastas na fase projetual. Para isto, são desenvolvidas ferramentas que auxiliem na redução destes tempos.

Logo, o presente trabalho tem como objetivo realizar e validar a metodologia de cálculo de um transformador de potência sob influência de um abalo sísmico. Para isto, é utilizada uma metodologia padrão sobre a qual são sugeridas alterações, visando melhores resultados. Por motivos supracitados, os cálculos são realizados estaticamente.

Também é realizada uma análise numérica por elementos finitos da estrutura do equipamento, objetivando a aferição dos resultados encontrados para a validação ou não do método proposto.

## 2. DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

### 2.1 TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Transformadores de potência são equipamentos que transformam energia elétrica de um circuito para outro através de indução eletromagnética. A energia elétrica é sempre transferida sem mudança de frequência, mas pode envolver mudanças na magnitude da tensão e de corrente elétrica, de acordo com a necessidade da rede.

Por possuir uma grande gama de aplicações, os transformadores de potência são divididos em quatro grupos distintos através da sua classe de tensão como é mostrado na tabela 2.1. A partir desta divisão, foram criadas regras construtivas para cada uma destas gamas que devem ser seguidas durante o projeto.

Tabela 2.1. – classes de tensão dos transformadores de potência

| <i>Gama</i>             | <i>E</i>   | <i>N</i>     | <i>P</i>     | <i>G</i>        |
|-------------------------|------------|--------------|--------------|-----------------|
| <i>Classe de Tensão</i> | Até 123 kV | 123 a 245 kV | 245 a 525 kV | Acima de 525 kV |

#### 2.1.1 Transformador Estudado

O transformador estudado no presente trabalho é um do tipo gama P. Fisicamente ele é dividido em grupos que, por sua vez, remetem a subgrupos. Logo, serão mencionados apenas os itens que desempenham função estrutural significativa.

O item 1 compreende ao sistema de refrigeração. Nele estão presentes o conservador, 1.1, que funciona como um “pulmão”, já que recebe o excedente da dilatação ou contração térmica do óleo, os radiadores, 1.2, para a troca térmica, e o óleo, que é o fluido de resfriamento. O item 2 é o invólucro da parte ativa. Ele compreende o tanque, 2.1, a tampa, 2.2, e demais acessórios. Suas funções são de contenção do óleo e estrutural. O item 3 é a campana

e tem função de sustentar a parte ativa. O 3.1, é a base dos chumbadores e, juntamente com os chumbadores, fixa o equipamento à fundação. O último grupo compreende a parte ativa. Esta é envolvida pelo grupo 2 e resfriado pelo 1, para manter suas condições ideais de funcionamento. Na figura 2.1 estes grupos são discriminados para uma melhor compreensão.

A dimensão externa bruta da base do equipamento é 8,52 x 3,21 m. Sua altura do nível do solo a tampa é de 4,30 m e até o topo do conservador é de 6,80 m possuindo uma massa total de 269000 kg.

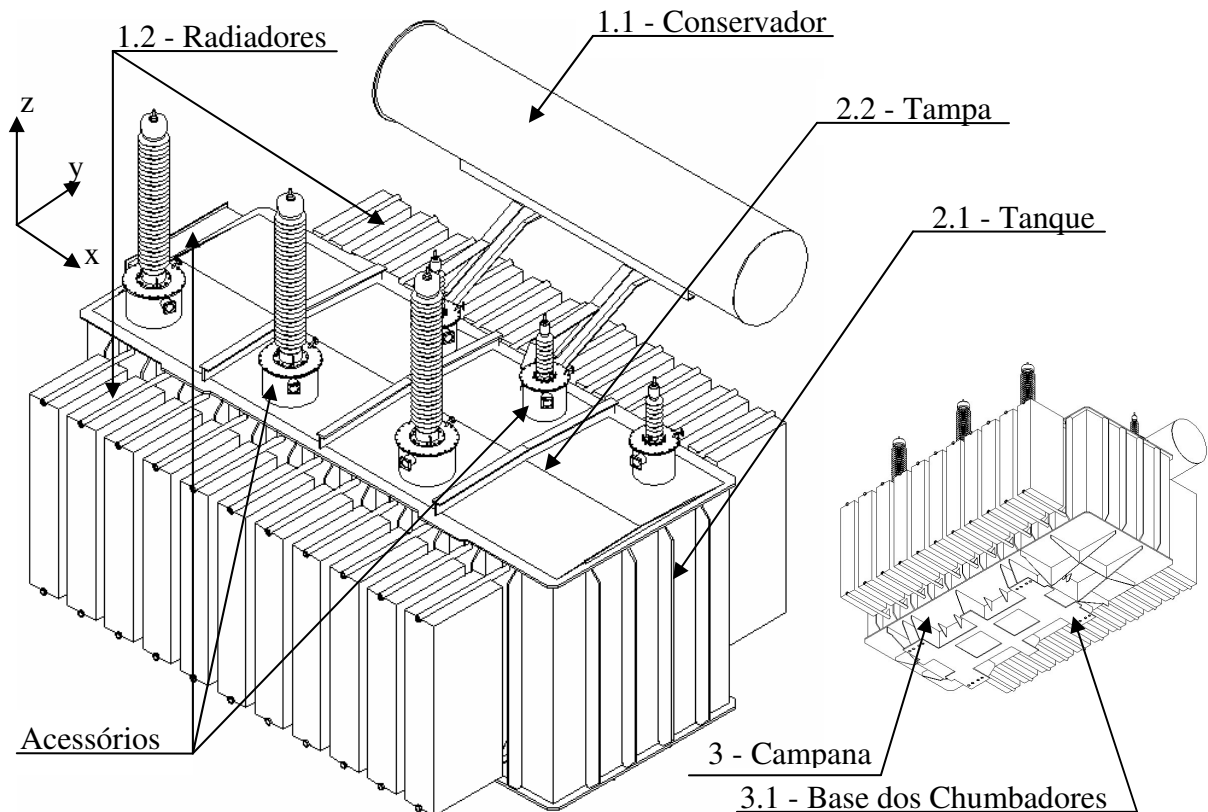


Figura 2.1. – Transformador de Potência

## 2.2 SISMO

Um sismo consiste, basicamente, da ocorrência de ondas elásticas que são geradas em uma dada fonte no globo terrestre chamada de fonte sismogenética. As ondas sísmicas se originam a partir da ruptura súbita das rochas gerada pela acumulação de energia que ultrapassa o seu limiar de deformação. Esta ruptura, por sua vez, ocorre em zonas de descontinuidade mecânica no interior da massa rochosa através do deslizamento brusco de um lado da descontinuidade relativamente ao outro.

Os sismos atuam sobre as fundações, obrigando-as a acompanhar o seu movimento, proveniente da propagação das ondas, desde a sua origem na falha que rompeu, até ao local da sua implantação. Para, além da magnitude e distância à falha, o movimento na fundação depende de um conjunto de parâmetros, entre os quais se salientam o tipo e características dos solos superficiais em que a fundação assenta. Geralmente, quanto mais brandos e espessos os solos, maior a ampliação do movimento para as frequências mais baixas do sistema.

Sendo diretamente proporcional às características do solo, cada região possui respostas próprias quanto a deslocamentos e acelerações relativos ao sismo. Por isso, cada unidade federativa desenvolve estudos sobre o fenômeno visando gerar mapas e espectros de resposta que classifiquem suas regiões.

## 2.3 ANÁLISE SÍSMICA

A análise sísmica de uma estrutura consiste na determinação da resposta dessa estrutura quando submetida a um movimento na base, que representa uma ação sísmica. Para isso, seguiu-se a Especificação Técnica N° 2325-4600-265-TS-0004 - ETGI-1.020: preparada pela empresa INGENDESA S.A. do Chile que especifica as condições para o projeto sísmico de equipamentos elétricos e obteve-se a formulação necessária para a realização dos cálculos estáticos.

Há três métodos de cálculo na Especificação Técnica em questão, sendo que dois deles podem apenas ser utilizados caso se conheçam as frequências naturais e o amortecimento do equipamento. Estes dados, por sua vez, devem ser determinados experimentalmente para a sua validação. Logo, estas exigências não são cumpridas no presente estudo, já que são demasiadamente caras visto as proporções do equipamento. Poderia-se pensar em modelos em escala, mas esta alternativa é, também, lenta e onerosa. Logo, o modelo escolhido foi o Método Estático sem a Verificação da Frequência natural e com um amortecimento de 2%.

Assim, as equações apresentadas para as cargas horizontal e vertical são:

$$F_H = 1,2 \cdot \frac{a}{g} \cdot P \cdot K \quad (1)$$

$$F_V = 0,6 \cdot \frac{a}{g} \cdot P \quad (2)$$

onde  $F_H$  [N] é a força horizontal,  $F_V$  [N] é a força vertical,  $a/g$  [-] é a razão de acelerações espectrais dada pelo espectro de resposta linear apresentado a seguir,  $P$  [N] é a força peso do corpo, resultante da multiplicação da sua massa  $m$  [Kg] pela aceleração da gravidade  $g$  [ $m/s^2$ ].  $K$  [-], por sua vez, é o fator de amplificação referente à interação solo-estrutura e depende do tipo de solo local. Este valor foi especificado como 1,0 para a região estudada.

Conforme a norma IEEE Std 693-1997, para a realização dos cálculos estáticos, a massa de todo o equipamento deve ser concentrada no centro de gravidade do mesmo. Assim, as forças sísmicas são somadas à força peso do equipamento e aplicadas neste ponto.

Como as ondas sísmicas provêm de uma fonte sismogênica e propagam-se radialmente, as forças horizontais são tratadas individualmente nas duas direções principais. Isto é, em uma primeira análise ela é aplicada na direção do eixo  $y$  (caso 1) do modelo e, em seguida, ao seu eixo  $x$  (caso 2). Após esta análise, a combinação de esforços que gera a maior solicitação de tensões será apresentado.

### 2.3.1 Espectro de Resposta

Espectro de resposta pode ser definido como a representação do valor máximo da resposta de um conjunto de osciladores de um grau de liberdade, quando solicitados por uma determinada ação sísmica.

Os equipamentos com modos de vibração entre 1,1 e 8 Hz comportam-se com a máxima aceleração de resposta. Os níveis de resposta são também função do amortecimento (quanto menor o amortecimento, maior a resposta). Equipamentos com modos de vibração acima de 33Hz são considerados rígidos e respondem ao nível constante do período de aceleração zero do espectro requerido sofrendo uma amplificação de 0,5 g conforme fig. 2.2.

Segundo Norma IEEE Std 693-1997, é responsabilidade do usuário fornecer ao fabricante o espectro de resposta e assegurar que este reflita as condições de abalo local. Além

disso, o usuário deve fornecer as acelerações a [ $m/s^2$ ] a serem aplicadas nas diferentes partes do equipamento, bem como o fator K citado na equação 1.

O termo  $a/g$  das equações 1 e 2 é determinado a partir deste espectro de resposta. Para isso, através da curva de 2% de amortecimento do espectro de resposta, obtém-se o valor de  $a/g$  para uma aceleração de 0,5 g. Para saber a amplificação local a ser utilizada nas equações 1 e 2, faz-se uma interpolação linear com a aceleração fornecida pelo usuário.

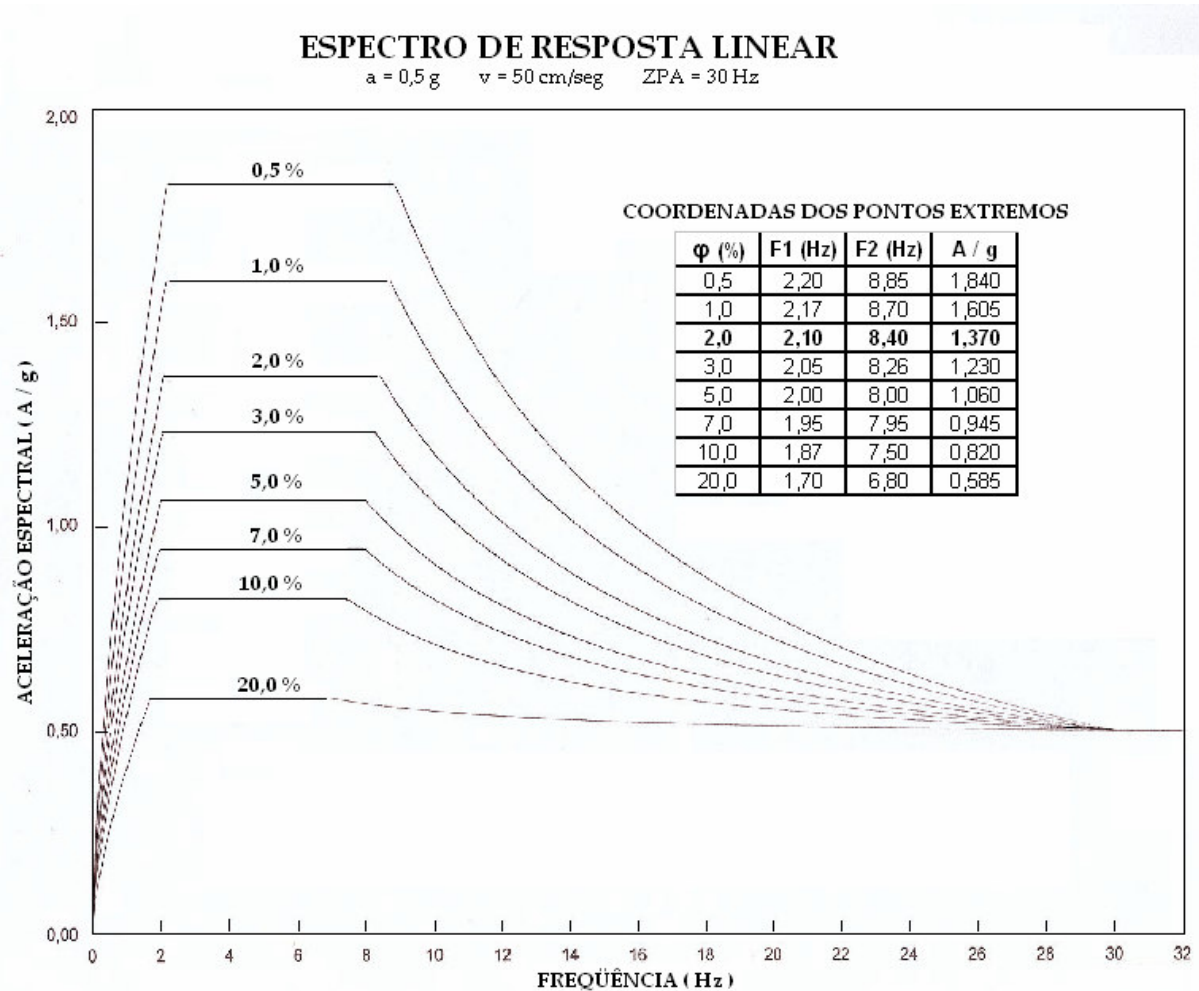


Figura 2.2 – Espectro de Resposta Linear

### 3. METODOLOGIA DE CÁLCULO ATUAL

#### 3.1 CÁLCULO DAS FORÇAS SÍSMICAS

O primeiro passo para o cálculo das forças sísmicas é determinar a razão da aceleração espectral  $a/g$  [-]. A partir da aceleração de 0,8 g requerida pelo usuário para o centro de gravidade do transformador, parte-se para o espectro de resposta linear e, como citado no item 2.3.1, se faz uma interpolação linear com a resposta do mesmo sob uma aceleração de 0,5 g na curva de 2% de amortecimento. Assim, o valor encontrado é de 2,19. Os valores das forças sísmicas referentes às equações 1 e 2, bem como a força peso P encontram-se na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Forças sísmicas e força peso

| $F_H$   | $F_V$   | P       |
|---------|---------|---------|
| 6940 kN | 3470 kN | 2460 kN |

### 3.2 CÁLCULO DO TANQUE

Para o cálculo das solicitações na base do tanque dos transformadores de potência, foi necessário um estudo das possíveis configurações da gama P de transformadores utilizada.

Assim, se determinam as variáveis conforme a figura 3.1 e na tabela 3.2 abaixo.

Tabela 3.2 – Dimensões paramétricas para o transformador estudado, em metros.

| $X_G$ | $Y_G$ | $Z_G$ | $X_T$ | $Z_C$ | $A$   | $B$   | $n$ | $H_1$ | $H_2$ | $e$     |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|---------|
| 0,38m | 0,00m | 2,25m | 0,82m | 0,70m | 2,30m | 4,16m | 4   | 3,22m | 8,52m | 0,0095m |

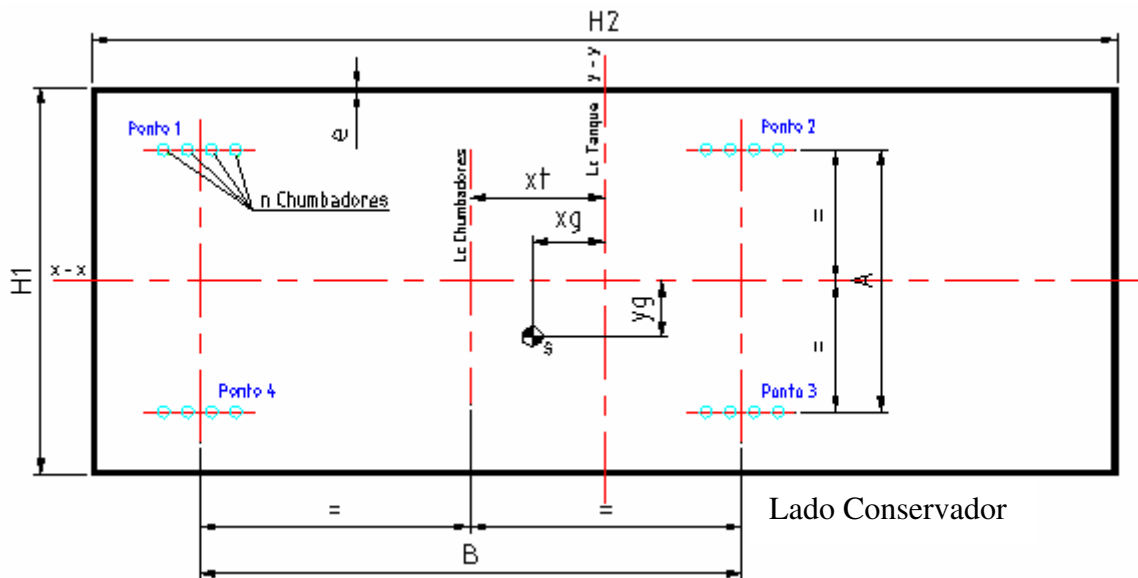


Figura 3.1 – Vista de topo em corte da base do tanque do transformador

Nestes cálculos, o tanque do transformador é considerado como uma viga de seção caixão. Assim, conforme H. Dubbel (1958), calculam-se os momentos resistentes de inércia  $W$  [ $m^3$ ] e a área da seção transversal da base do tanque  $St$  [ $m^2$ ] através das equações a seguir:

$$W_{xx} = \frac{H_2 \cdot H_1^3 - (H_2 - 2 \cdot e) \cdot (H_1 - 2 \cdot e)^3}{6 \cdot H} = 2,91E - 01m^3 \quad (3)$$

$$W_{yy} = \frac{H_1 \cdot H_2^3 - (H_1 - 2 \cdot e) \cdot (H_2 - 2 \cdot e)^3}{6 \cdot B} = 4,88E - 01m^3 \quad (4)$$

$$St = (H_2 \cdot H_1) - (H_2 - 2 \cdot e) \cdot (H_1 - 2 \cdot e) = 2,23E - 01m^2 \quad (5)$$

onde,  $H_1$ ,  $H_2$  e “ $e$ ” [m] são as dimensões conforme figura 3.1 e tabela 3.2.

Assim, o momento fletor é calculado a partir das forças horizontal e vertical, conforme tabela 3.1, aplicadas no centro de gravidade do transformador. Como se pode observar na fig. 3.2, estes momentos são gerados pela excentricidade do centro de gravidade do transformador em relação ao centro geométrico do tanque. Com isso, estes momentos nada mais são que a multiplicação das forças concentradas no ponto S pela sua distância perpendicular aos eixos principais x e y do tanque, conforme Manual Interno (1978). Estes eixos são indicados na figura 3.1 e seus momentos  $M_s$  são calculados abaixo.

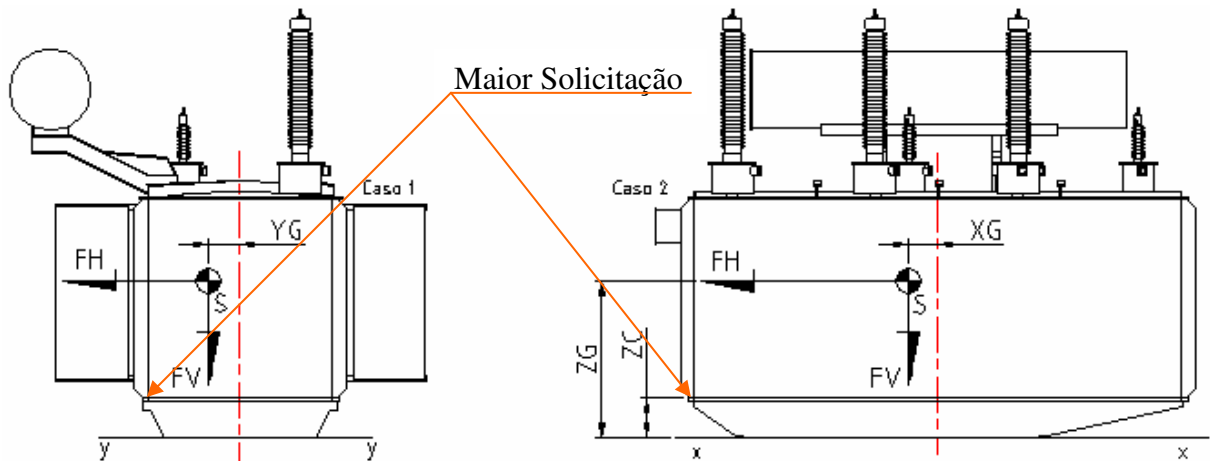


Figura 3.2 – Cargas aplicadas no centro de gravidade do transformador para os casos 1 e 2

$$M_{sx} = F_H \cdot (Z_G - Z_C) + (F_V \cdot Y_G) = 1,08E + 07 N.m \quad (6)$$

$$M_{sy} = F_H \cdot (Z_G - Z_C) + (F_V \cdot X_G) = 1,21E + 07 N.m \quad (7)$$

onde  $M_{sx}$  refere-se ao caso 1 e  $M_{sy}$  ao caso 2,  $F_H$  e  $F_V$  são dadas na tabela 3.1,  $X_G$ ,  $Y_G$ ,  $Z_G$  e  $Z_C$  [m] na tabela 3.2.

Tendo em mãos as cargas resultantes na base do tanque do transformador, calculam-se agora as tensões nas áreas de maior solicitação devido ao carregamento imposto na figura 3.2 conforme H. Dubbel (1958). Assim, a tensão normal  $\sigma_s$  [MPa] é calculada e os resultados para os casos 1 e 2 encontram-se na tabela 3.3.

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W} + \frac{P}{St} \quad (8)$$

Tabela 3.3 – Resultados das tensões normais máximas na base do tanque

|            | Caso 1  | Caso 2  |
|------------|---------|---------|
| $\sigma_s$ | 48,8MPa | 36,6MPa |

### 3.3 CÁLCULO DOS CHUMBADORES

Como se pode observar na figura 3.1, a configuração apresentada dos chumbadores é padrão para esta gama de transformadores. Logo, utiliza-se a hipótese de haver quatro pontos de fixação da estrutura na fundação. Cada um destes quatro pontos possui “n” parafusos que serão tratados simultaneamente como uma única estrutura de fixação. Isto é, todas as solicitações geradas em cada um dos quatro pontos de fixação do transformador à fundação serão distribuídas igualmente entre os seus “n” elementos.

Para a modelagem, foi considerado o caso onde os chumbadores estão sofrendo esforços de tração e cisalhamento. Para tanto, os carregamentos apresentados na figura 3.3 são aplicados e os valores das variáveis mantidos conforme a tabela 3.1. Também se observa na figura 3.3 que o centro de gravidade “S” do transformador, onde são aplicadas as cargas, está deslocado com relação centro geométrico dos chumbadores.

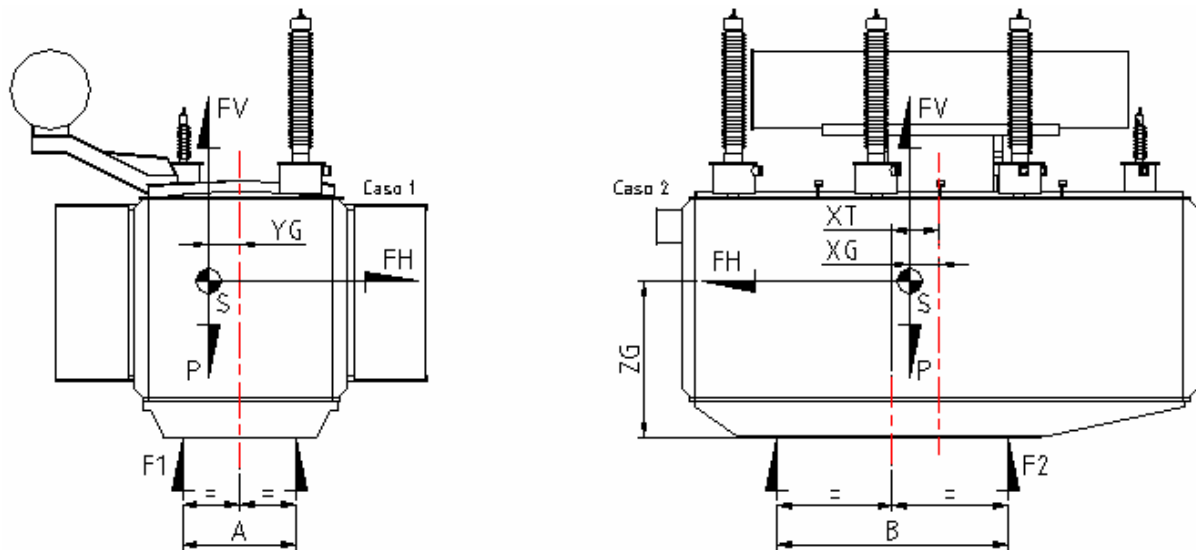


Figura 3.3 – Carregamento para cálculo dos chumbadores

Assim, para a determinação do ponto mais solicitado, são tomados dois passos conforme Manual Interno (1978). No primeiro, se calculam as forças  $F_1$  e  $F_2$  por comprimento distribuído conforme figura 3.3.

$$F_1 = \frac{F_H \cdot Z_G}{A} + \frac{(F_V - P) \cdot (A/2 + Y_G)}{A} = 7,21E + 06N \quad (10)$$

$$F_2 = \frac{F_H \cdot Z_G}{B} + \frac{(F_V - P) \cdot (B/2 + (X_T - X_G))}{B} = 4,24E + 06N \quad (11)$$

Estas, por sua vez, representam a força no plano transversal da página e são distribuídas nos dois pontos de fixação pertencentes ao plano transversal citado. Por inspeção da figura 3.4, sabe-se que para o caso 1, a maior sollicitação está em  $F_A$  e para o caso 2 em  $F_B$ .

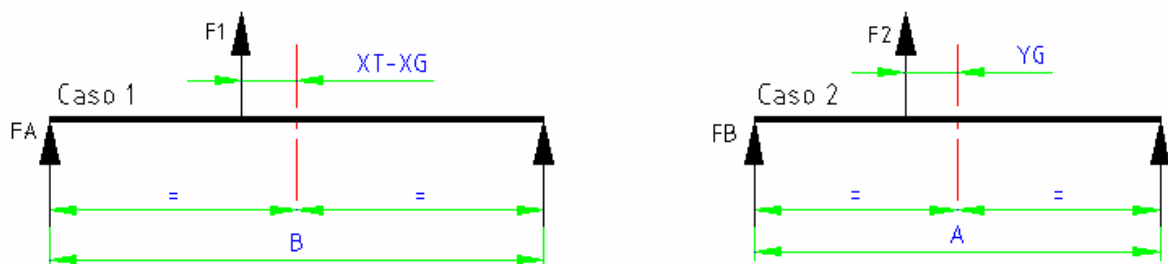


Figura 3.4 – Cálculo dos esforços nos pontos de fixação.

Considerando os casos como vigas bi-apoiadas, se calculam  $F_A$  e  $F_B$  segundo H. Dubbel (1958) como segue:

$$F_A = \frac{F_1 \cdot (B/2 + (X_T - X_G))}{B} = 4,36E + 06N \quad (12)$$

$$F_B = \frac{F_2 \cdot (A/2 + Y_G)}{A} = 2,12E + 06N \quad (13)$$

onde  $F_A$  é a máxima força de tração no ponto indicado para o caso 1 e  $F_B$  para o caso 2.

Conforme tabela 3.2,  $n = 4$  em cada ponto. Logo, a força normal de tração por unidade é determinada pela divisão das forças encontradas nos pontos de fixação mais solicitados  $F_A$  e  $F_B$  pelo número de chumbadores em cada ponto. Sendo o caso 1 o pior caso de solicitações, apenas este valor é considerado, e é igual a  $1,09E+06$  N.

Conforme NBR 8800 (2003), os chumbadores utilizados foram ISO 898 classe 8.8 M60. Assim, conforme Manual Interno (1978), calculam-se os coeficientes de segurança R:

$$R = \frac{A_{be} \cdot \sigma_{adm}}{F_A / n} = 1,16 \quad (14)$$

onde  $A_{be}$  é a área efetiva do elemento igual  $24,72E-04$  m<sup>2</sup> e  $\sigma_{adm}$  é igual a 80% da  $\sigma_{esc} = 640$  MPa do material do parafuso.

A análise do coeficiente de segurança R ao esforço cisalhante é realizada separadamente sendo igual a:

$$R = \frac{A_{be} \cdot 0,8 \cdot \sigma_{esc}}{F_H / (4 \cdot n)} = 1,46 \quad (15)$$

onde  $F_H/(4 \cdot n)$  é a força de cisalhamento em cada um dos chumbadores em Newtons.

#### 4. ALTERAÇÕES PROPOSTAS

Após a realização da metodologia de cálculo padrão apresentado, perceberam-se alguns aspectos e regras que podem ser alterados ou agregados a ela.

##### 4.1 TANQUE

No cálculo dos momentos na base do tanque, percebeu-se que há um momento relativo à excentricidade do centro de gravidade do transformador em relação ao centro de geométrico do tanque em torno do eixo y na figura 3.2. Assim, há um momento em torno do eixo y  $M_{sy1}$  [N.m] no caso 1 que deve ser considerado. O momento relativo ao eixo x  $M_{sx2}$  [N.m] no caso 2 obedece ao mesmo critério, mas como o valor de  $Y_G = 0$  seu valor também é nulo. Além disso, a força peso P deve ser incluída nos cálculos.

$$M_{sy1} = (F_V + P) \cdot X_G = 2,32E + 06N.m \quad (16)$$

A equação 10 também é alterada, sendo que seu segundo termo referente às forças verticais desconsidera o efeito sísmico. Além disso, o primeiro termo desconsidera o efeito da força peso para o cálculo de  $M_{sx1}$ . Logo, é apresentada a correção em  $\sigma_{s1}$ .

$$\sigma_{s1} = \frac{M_{sx1}}{W_{xx}} + \frac{M_{sy1}}{W_{yy}} + \frac{F_V + P}{St} = 69,10MPa \quad (17)$$

Sendo esta a tensão máxima calculada no ponto crítico da base do tanque, foi realizado o mesmo procedimento para as demais tensões conforme as respectivas condições de carregamentos. O resultado encontrado está mostrado na figura 4.1 e representa o mesmo diagrama de distribuição de tensões de uma viga carregada excentricamente.



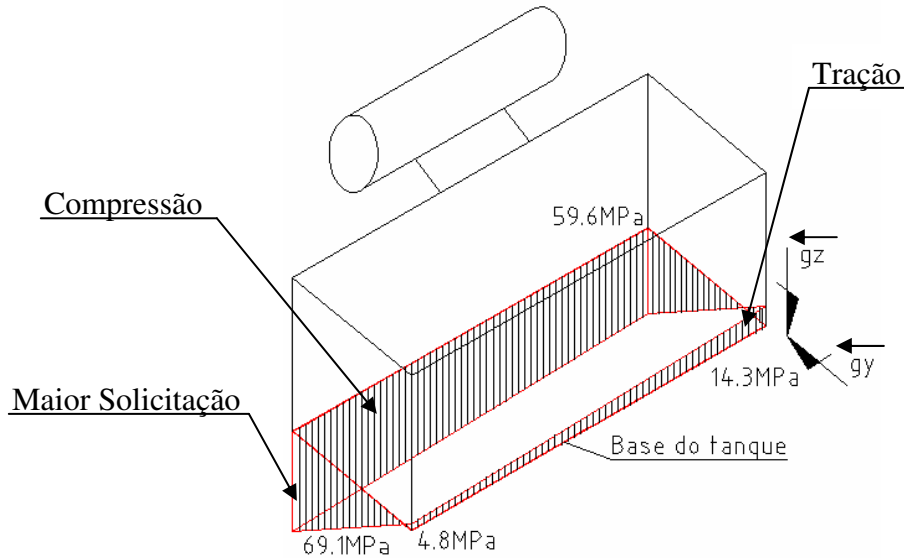


Figura 4.1 – Distribuição de tensões na base do tanque do transformador de potência

Também é considerada agora a tensão cisalhante  $\tau_s$  que é igual para os dois casos. Esta por sua vez é considerada constante por toda a seção transversal da base do tanque conforme H. Dubbel (1958).

$$\tau_s = \frac{F_H}{St} = 31,20MPa \quad (18)$$

Como o objetivo do trabalho é fazer uma comparação entre os métodos através das tensões normais, a demonstração dos resultados é encerrada. Mas para posteriores análises e seleção de materiais é utilizada a tensão equivalente de Von Misses.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left( (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right)} \quad (19)$$

## 4.2 CHUMBADORES

Neste cálculo, é adotada uma nova metodologia diminuindo assim o número de passos para chegar ao resultado. O carregamento utilizado é o mesmo apresentado na figura 3.3.

Os momentos fletores referentes ao carregamento supracitado em relação aos eixos do centro geométrico dos chumbadores foram calculados. Parte-se do princípio que o momento fletor é formado por um binário de forças e estas são as forças requeridas de cálculo. Logo, retirando o termo  $Z_C$  das equações 6 e 7 e substituindo o termo  $X_G$  pela diferença ( $X_T - X_G$ ) nas equações 7 e 16 encontram-se os resultados para  $M_{sx1}$  e  $M_{sy2}$ . Estes valores são de  $1,56E+07$  N.m e  $1,59E+07$  N.m respectivamente. O valor de  $M_{sy1}$  é de  $3,15E+05$  N.m.

Assim, as forças normais  $F_N$  são então determinadas como o somatório destes esforços.

$$F_{N1} = \frac{M_{sx1}}{2 \cdot n \cdot A} + \frac{M_{sy1}}{2 \cdot n \cdot B} + \frac{F_V - P}{4 \cdot n} = 9,09E + 05N \quad (20)$$

$$F_{N2} = \frac{M_{sy2}}{2 \cdot n \cdot B} + \frac{F_V - P}{4 \cdot n} = 5,30E + 05N \quad (21)$$

A excentricidade do centro de gravidade do transformador em relação ao centro geométrico dos chumbadores também gera um efeito de torção sobre a ligação. Para tanto, há um incremento na sua solicitação ao cisalhamento. Ver figura 4.2.

A força cisalhante gerada é calculada através da metodologia a seguir conforme McCormac (1991). O momento torsor  $M_T$  é determinado para o caso 1, já que no caso 2 é igual a zero (pois  $Y_G = 0$ ).

$$M_{T1} = F_H \cdot (X_T - X_G) = 3,05E + 06 N.m \quad (22)$$

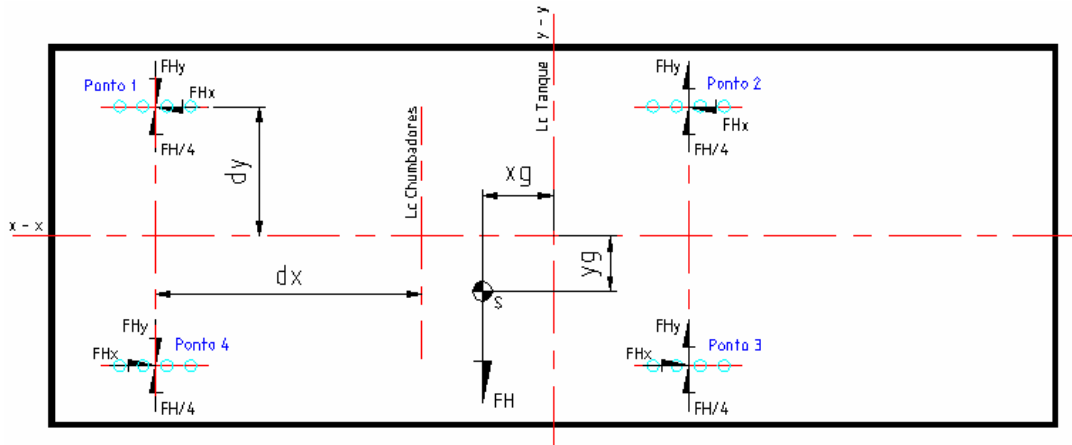


Figura 4.2 – Momento torçor referenta ao caso 1 de carregamentos.

Assim, determinam-se as forças horizontais  $F_{Hx}$  e  $F_{Hy}$  para o caso 1 como segue:

$$F_{Hx} = \frac{M_T \cdot d_y}{\sum d^2} = 1,54E + 05 N \quad (23)$$

$$F_{Hy} = \frac{M_T \cdot d_x}{\sum d^2} = 2,80E + 05 N \quad (24)$$

onde  $M_T$  [N.m] é o momento torçor conforme equação 25,  $dx$  e  $dy$  [m] são as maiores distâncias dos chumbadores ao seu centro geométrico nos respectivos eixos sendo  $B/2$  e  $A/2$  respectivamente. O termo  $\sum d^2$  é o somatório das distâncias dos chumbadores ao seu centro geométrico ao quadrado e é dado por:

$$\sum d^2 = 4 \cdot \left(\frac{A}{2}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{B}{2}\right)^2 = 22,80m^2 \quad (25)$$

Assim, a força cortante  $F_C$  resultante em cada um dos “n” chumbadores pertencentes ao ponto de maior solicitação, 2 ou 3, é calculada para o caso 1 de carregamentos. Esta, por sua vez, é determinada através da raiz quadrada da soma dos quadrados das forças nas direções indicadas na figura 4.2.

$$F_{C1} = \sqrt{\left(\frac{F_{Hx}}{n}\right)^2 + \left(\frac{F_H}{4 \cdot n} + \frac{F_{Hy}}{n}\right)^2} = 5,04E + 05 N \quad (28)$$

Tendo determinadas as forças normais  $F_N$  e de corte  $F_C$  nos elementos, parte-se para os critérios de resistência. Para isso, foi adotada a norma NBR 8800 (2003).

Conforme a NBR 8800, serão realizadas três análises, sendo que o não cumprimento de uma delas invalida os chumbadores escolhidos. Estas análises serão realizadas para o estado limite de ruptura quando o plano de corte não passa pela parte rosqueada do parafuso.

A primeira análise leva em consideração apenas a tração nos elementos e sua resistência de cálculo é  $R_{Rkt}/\gamma$ , onde  $\gamma = 1,35$  para um parafuso ou barra rosqueada com diâmetro nominal igual ou superior a 12 mm. Assim, a tração no chumbador deve ser menor que o valor da resistência encontrado.

$$R_{Rkt} = 0,75 \cdot A_p \cdot f_{up} \quad (30)$$

onde  $f_{up} = 800$  MPa é a resistência à ruptura do parafuso ISO 898 classe 8.8 M60 e  $A_p = 2,83E-03$  m<sup>2</sup> é a área bruta, baseada no diâmetro nominal do parafuso segundo NBR 8800.

Assim, a resistência dos elementos é de 1,26E+06 N. Como  $F_{N1} = 9,46E+05$  N é o maior esforço normal entre os casos estudados, os chumbadores são aceitos.

A segunda análise leva em consideração apenas o cisalhamento nos elementos e sua resistência de cálculo é  $R_{Rkv}/\gamma$ , onde  $\gamma = 1,35$ . Como o plano de corte não passa pela seção rosqueada do elemento, a equação utilizada foi a seguinte.

$$R_{Rkv} = 0,5 \cdot A_p \cdot f_{up} \quad (31)$$

Assim, a resistência dos elementos é de 8,38E+05 N. Como  $F_{C1} = 5,04E+05$  N é o maior esforço cisalhante entre os casos estudados, os chumbadores são aceitos.

A terceira análise a ser realizada leva em consideração os esforços combinados nos elementos. Para ser aprovada, a junta deve respeitar a seguinte desigualdade:

$$\frac{R_{Rkt}}{\gamma} \leq 0,73 \cdot f_{ub} \cdot A_p - 1,50 \cdot F_{C1} \quad (32)$$

Assim, o resultado do lado esquerdo da desigualdade é de 1,26.E+06 N, enquanto que seu lado direito resulta o valor de 8,95E+05 N. Com isto, comprova-se que a ligação não suporta o carregamento através do critério dos esforços combinados segundo NBR 8800.

## 5. MODELO NUMÉRICO DA ESTRUTURA

Um modelo global de toda estrutura a ser analisada foi inicialmente gerado. Para isto, utilizaram-se modelos de vigas representando os reforços do tanque, da tampa e os suportes dos radiadores e o conservador, e modelos de cascas para os demais itens como pode ser visto na Figura 5.1. Este modelo suprime muitos detalhes da estrutura completa do transformador, deixando somente os principais componentes que influenciam na resposta do sistema estático. Como apenas a base do tanque e os chumbadores serão analisados neste momento, os detalhes das seções dos elementos de viga serão suprimidos.

O modelo possui 9786 nós. A malha é mostrada na figura 5.1.

Como foram realizadas diferentes análises com o modelo, cada uma exigiu diferentes condições de contorno:

1. Tensões normais na base do tanque: o tanque foi engastado na sua base para a obtenção das respostas neste ponto.

2. Solicitação nos chumbadores: os pontos referentes a estes tiveram todos os seus deslocamentos restritos. Além disso, as áreas da base dos chumbadores, ver figura 2.1, que estão sob compressão devido ao carregamento imposto tiveram seus deslocamentos verticais restritos. Já as áreas sob tração não receberam restrições, fazendo com que os esforços fossem suportados apenas pelos chumbadores.
3. Modos de vibração: todo o transformador foi suportado pelos chumbadores, estando estes com todos os seus deslocamentos restritos.

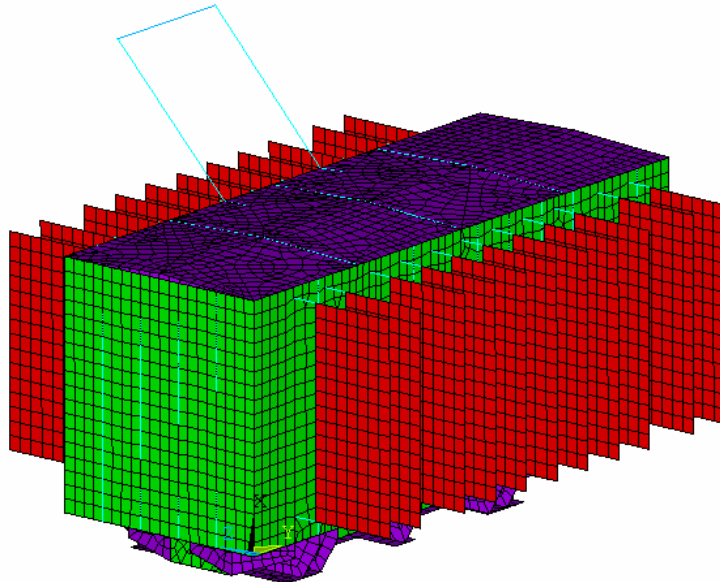


Figura 5.1 – Modelo global do transformador de potência

As propriedades de todos os elementos do modelo tiveram o Módulo de Young  $E = 200\text{GPa}$  e Coeficiente de Poisson  $\nu = 0,26$ . As demais propriedades dos elementos de casca utilizados são mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades dos elementos de casca

|                       | Paredes do Tanque | Tampa    | Radiador | Campana | Núcleo   | Base dos Chumbadores |
|-----------------------|-------------------|----------|----------|---------|----------|----------------------|
| $\rho(\text{kg/m}^3)$ | 56300             | 7850     | 35500    | 78500   | 85700    | 7850                 |
| Espessura(m)          | 9,5E-03           | 31,5E-03 | 9,5E-03  | 16E-03  | 31,5E-03 | 25E-03               |

Já os elementos de viga tiveram sua densidade  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ . Salvo o conservador, que foi modelado como uma viga com  $\rho = 63500 \text{ kg/m}^3$  devido à soma da sua massa com a do óleo integrante.

O óleo existente no tanque foi diluído nas paredes laterais, núcleo e fundo. Com isso obteve-se uma massa total de 268600 kg, muito próximo das 269000 kg reais. O centro de gravidade do modelo é também muito próximo do valor determinado no projeto. Esta comparação é realizada na tabela 5.2. Para melhor clareza, ver figura 4.1.

Tabela 5.2 – Comparação entre os centros de gravidade de projeto e modelo, em metros.

|         | $X_G$  | $Y_G$  | $Z_G$  |
|---------|--------|--------|--------|
| Projeto | 0,38 m | 0,00 m | 2,25 m |
| Modelo  | 0,47 m | 0,07 m | 2,08 m |

## 5.1 TENSÕES NA BASE DO TANQUE

Como a análise sísmica de uma estrutura consiste na determinação da resposta dessa estrutura quando submetida a um movimento na base através de sua aceleração, os carregamentos utilizados foram campos de acelerações nas direções requeridas. Para posterior comparação, será analisada apenas a situação de carregamentos onde houve uma maior solicitação nos cálculos analíticos. Esta situação se dá quando o campo de acelerações é aplicado transversalmente ao transformador como mostrado na figura 5.2.

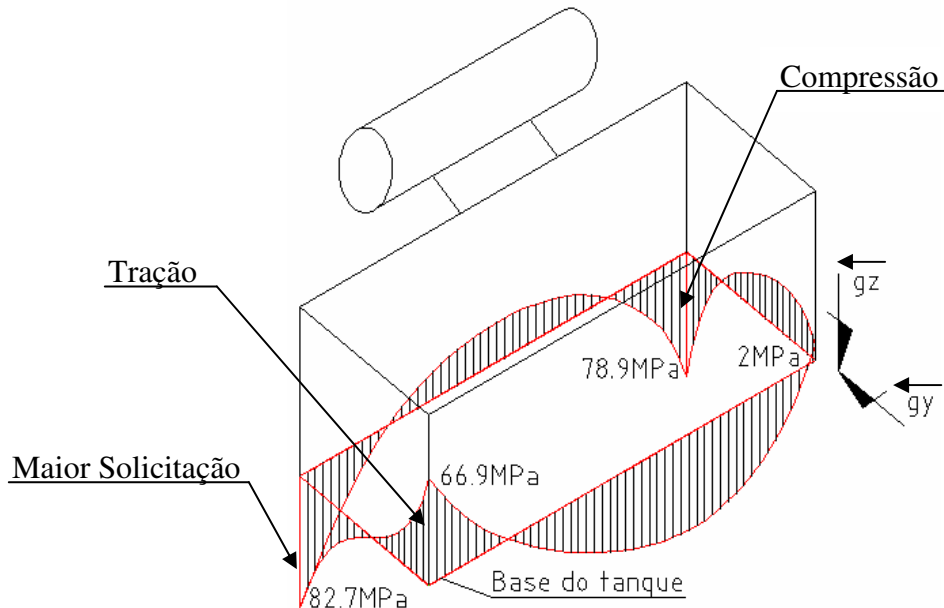


Figura 5.2 – Distribuição das tensões normais na base do tanque do transformador

Na figura, os campos gravitacionais  $g_y = 22,7 \text{ m/s}^2$  e  $g_z = 25,8 \text{ m/s}^2$ . Eles são determinados como sendo as forças sísmicas das equações 1 e 2 divididos pela massa total do transformador. Salvo o caso de  $g_z$ , onde é também somada a aceleração gravitacional.

## 5.2 TENSÕES NOS CHUMBADORES

Para a análise das tensões nos chumbadores, o modelo acima citado foi mantido. Salvo pelo fato dos carregamentos que visam submeter os elementos de fixação a tração. Para tanto, o campo de acelerações vertical é agora a diferença entre a aceleração sísmica vertical e a aceleração gravitacional sendo  $g_z = -3,08 \text{ m/s}^2$ . O campo de acelerações no plano horizontal foi mantido o mesmo valor, sendo alterada apenas sua direção de aplicação. Ver figura 5.2.

Assim, para o esforço normal, encontra-se um valor máximo de  $F_N = 1500 \text{ kN}$  no ponto 4 e para o esforço cortante  $F_C = 735 \text{ kN}$  no ponto 2. Ver figura 3.1 para localizar os pontos.

## 5.3 DETERMINAÇÃO DOS MODOS DE VIBRAÇÃO

Também é realizada a determinação dos modos de vibração principais do transformador de potência. O modelo utilizado é o mesmo do utilizado anteriormente, salvo por seus radiadores terem sido substituídos por elementos de viga na parede do tanque com massa real.

Para tal, foram requeridos 10 modos, sendo selecionados 2 que representam o global. O primeiro modo encontrado é de 5,1 Hz e o segundo é de 8,7 Hz. Ver figura 5.3.

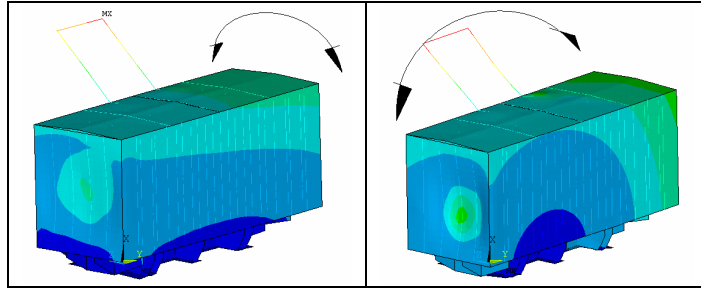


Figura 5.3 – Primeiro e segundo modos, respectivamente, de frequência do transformador

## 6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

### 6.1 TENSÕES NORMAIS NA BASE DO TANQUE

Tabela 6.1 – Resultados das tensões normais para o caso 1 de carregamentos

| Caso 1          | Método Atual | Proposto | Numérico |
|-----------------|--------------|----------|----------|
| Tensões Normais | 48,8 MPa     | 69,1 MPa | 82,7 MPa |

Como se observa na tabela 6.1, o efeito das cargas e momentos desconsiderados no cálculo analítico da metodologia atual representam um acréscimo de 41,6% em relação ao proposto. Mesmo assim, quando se compara o método proposto ao método numérico, aquele não representa a real distribuição de tensões na base do tanque. Este efeito é mais bem visualizado nas figuras 4.1 e 5.2. A figura 4.1 representa a distribuição de tensões na seção de uma viga. Já a distribuição não linear da figura 5.2 à aplicação do campo de acelerações que enxerga a carga como sendo distribuída.

Já o ponto considerado crítico para compressão no modelo analítico se repete no modelo numérico havendo uma diferença de 19,7%.

### 6.2 SOLICITAÇÃO NOS CHUMBADORES

Tabela 6.2 – Resultados das forças normais para o caso 1 de carregamentos

| Caso 1         | Método Atual | Proposto | Numérico |
|----------------|--------------|----------|----------|
| Forças Normais | 1090 kN      | 909 kN   | 1500 kN  |

No modelo analítico atual para o cálculo dos chumbadores, há uma série de erros que induzem a falsos resultados. Os valores para seu esforço normal deveriam ser iguais entre o método atual e o alterado. Assim, percebe-se que na planificação das cargas, mostrada na figura 3.4, a carga  $F_1$  deveria ser aplicada no ponto médio entre os pontos de fixação em vez de ser deslocado por  $(X_T - X_G)$ . Para aferição, divide-se  $F_1$ , equação 10, por 2 e então por  $n = 4$  (representando os 4 elementos de fixação pertencentes ao ponto calculado). Encontra-se  $F_A = 901$  kN. Na metodologia proposta encontra-se  $F_N = 909$  kN, conforme equação 20.

Com o valor máximo  $F_N = 1500$  kN encontrado no ponto 4 para o modelo numérico, percebe-se que a hipótese utilizada nos cálculos analíticos não é viável, já que analiticamente  $F_N = 909$  kN. Observando a figura 6.1, encontram-se dois pontos com esforços normais elevados e muito próximos em magnitude. Assim, é observado o efeito alavanca gerado pelo reforço existente entre eles.

Para solucionar este problema, podem ser utilizadas chapas soldadas transversalmente aos reforços. Com isso, os esforços se distribuem homoganeamente entre os chumbadores. Para verificar se a discrepância de resultados é relativa à má disposição dos reforços, somam-

se todas as reações dos elementos encontradas no método numérico para o ponto 4 e se divide  $n = 4$ . O valor encontrado é  $F_N = 900$  kN, comprovando o esperado.

Outra comparação realizada foi quanto ao cálculo das forças cisalhantes nos chumbadores. A metodologia atual, seção 4.2, considera apenas o efeito da força horizontal  $F_H$  dividida pelo número total de chumbadores. Conforme alterações propostas, seção 5.2, observa-se que a desconsideração dos esforços cisalhantes devido ao momento torsor gerado pela excentricidade do centro de gravidade do transformador em relação ao centro geométrico dos chumbadores, ver figura 4.2, amplifica em até 16% seu esforço cortante. Além disso, foi aplicado um critério de falha confiável conforme a norma NBR 8800. Com ela, observa-se a não validação dos cálculos atuais em relação aos propostos.

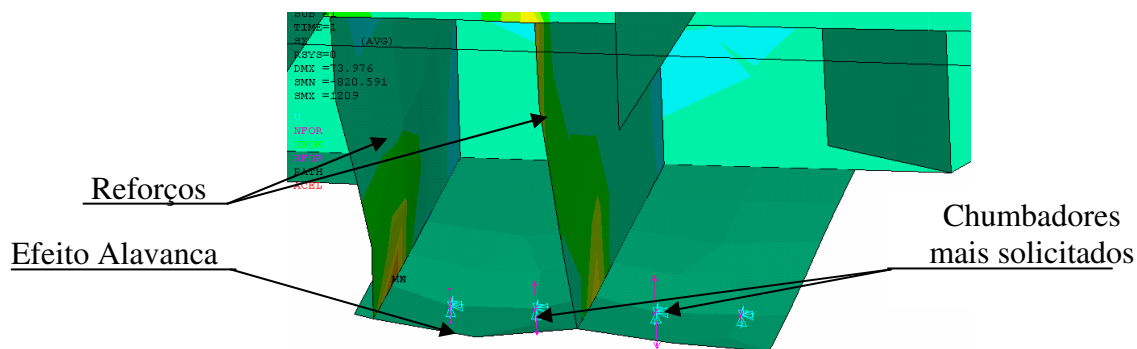


Figura 6.1 – Esforço normal nos chumbadores amplificado pelo reforço central no ponto 4

Os resultados encontrados na simulação numérica vieram ao encontro daqueles calculados analiticamente. Eles encontram-se na mesma ordem de grandeza e confirmam o ponto de fixação esperado. O valor máximo encontrado  $F_C = 735$  kN foi no ponto 2, conforme figura 4.2. O valor calculado analiticamente foi  $F_C = 504$  kN. Mais uma vez, este valor corresponde ao chumbador mais próximo ao reforço, o que já era esperado. Mais uma vez, espera-se que as chapas utilizadas para sanar o efeito alavanca funcionem distribuindo uniformemente os esforços. Repetindo o procedimento utilizado anteriormente para os esforços normais, somam-se todas as forças cisalhantes no ponto 2 e divide-se por  $n = 4$ . O resultado é 481 kN, muito próximo do calculado analiticamente.

### 6.3 MODOS DE VIBRAÇÃO

A determinação dos modos de vibração é de fundamental importância em toda a análise até aqui realizada. Segundo a Norma IEEE 693 - 1997, apenas poderiam ser calculados estaticamente os equipamentos rígidos. Logo, para ser rígido, o equipamento deve possuir uma frequência natural igual ou superior a 31 Hz, muito distante dos 5,1 Hz encontrados para primeiro modo de vibração do transformador estudado. Mesmo assim, a Especificação Técnica referencia as equações 1 e 2 ao método estático sem a verificação da frequência natural.

Assim, fica uma lacuna entre a Especificação Técnica apresentada e as conclusões do presente trabalho. Neste, os resultados encontrados comprovam que a faixa de frequências naturais encontrada para o transformador requer um método dinâmico de análises.

## 7. CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou a validação de uma metodologia de cálculo estático de um transformador de potência sob influência de um abalo sísmico. Para tanto, esta metodologia foi realizada. Posteriormente fizeram-se alterações nesta e modelou-se numericamente sua estrutura. Com todos os dados em mãos, foi realizada uma comparação entre os resultados encontrados e se obtiveram as seguintes conclusões:

- ✓ A metodologia utilizada no cálculo analítico das solicitações na base do tanque do transformador não pode ser utilizada no seu dimensionamento.
- ✓ A metodologia utilizada no cálculo analítico das solicitações nos chumbadores possui resultados muito próximos aos encontrados numericamente, desde que sejam adicionados reforços na base dos chumbadores para evitar o efeito alavanca. Logo, esta metodologia é aceita.
- ✓ Sendo determinados os modos de vibração do transformador, conclui-se que seus cálculos sísmicos deveriam ser realizados dinamicamente.

Assim, outros estudos ainda devem ser realizados antes de excluir totalmente a possibilidade de realização de um cálculo estático para dimensionamento de transformadores de potência. Neste trabalho, apenas dois pontos foram estudados, isto é, a base do tanque e os chumbadores. Para este, se obtiveram resultados bons, e para aquele, apesar de não apresentarem a mesma distribuição de tensões normais, ver figuras 4.1 e 5.2, os valores máximos de compressão foram encontrados nos mesmos pontos.

Assim, se pode realizar o mesmo estudo em outros itens do transformador como, por exemplo, o suporte do conservador ou os radiadores. Caso as mesmas conclusões daquelas da base do tanque forem encontradas, pode-se pensar na possibilidade de ser adicionado um termo às equações 1 e 2 que compense as diferenças, chegando, desta forma, a resultados mais próximos dos reais.

Mas, ainda assim, a comparação é realizada entre dois métodos estáticos. Logo, para resultados e conclusões mais confiáveis, seria necessária a comparação entre um modelo estático e um dinâmico representando as reais condições de um sismo. Para tanto, através de algum software de modelagem, pode-se refinar o modelo gerado numericamente no presente trabalho realizar uma análise dinâmica da estrutura, introduzindo como carga sísmica o espectro de resposta aplicado na sua base.



## 8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Projeto e execução de estruturas de aço e estruturas mistas aço-concreto de edifícios*. NBR 8800. Rio de Janeiro, 2003.

DUBBEL, H. Manual del constructor de máquinas. 2. ed. Barcelona: Editorial Labor S.A., 1958.

INSTITUTE ELECTRICAL OF ELECTRONICS ENGINEERS. *Recommended Practice for Seismic Design of Substations*. IEEE STD 693-1997. New York, 1997.

INGENDESA S.A. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA N° 2325-4600-265-TS-0004. *Diseño sísmico equipos electricos principales*. ETGI-1.020. Chile, 2000.

McCORMAC, J. C. Diseño de estructuras de acero, método LRFD. México: Ediciones Alfa-omega S.A., 1991.

POHLMANN, P. *Manual Interno*. Canoas, 1978.

## 10. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO - DEPARTAMENTO DO ENSINO SECUNDÁRIO. *Comunicar ciência*. Portugal, 2000.

UNIFORM BUILDING CODE. International conference of building officials. Volume 2, 1997.

POPOV, E. G. **Introdução à mecânica dos sólidos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1978.

NEWMARK, N. M.; ROSENBLUETH, E. **Fundamentals of earthquake engineering**. USA: Prentice Hall INC, 1971.

TURMA 2004. Poligrafo da Disciplina de Dinâmica Estrutural I: PPGEC UFRGS. Porto Alegre, 2004.

TERRA PLANETA VIVO. Sismos. Disponível em:  
<[http://domingos.home.sapo.pt/sismos\\_1.html](http://domingos.home.sapo.pt/sismos_1.html)>. Acesso em: 06/08/2004