

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá  
Departamento de Mecânica

LEANDRO FRANCISCO ANDRIOLI

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS SUJEITAS A AÇÕES  
SÍSMICAS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS  
FINITOS.**

Guaratinguetá  
2015

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá  
Departamento de Mecânica

LEANDRO FRANCISCO ANDRIOLI

**ANÁLISE DE ESTRUTURAS SUJEITAS A AÇÕES SÍSMICAS UTILIZANDO O  
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.**

Trabalho de graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá  
2015

Andrioli, Leandro Francisco

A573a Análise de estruturas sujeitas a ações sísmicas utilizando o método dos elementos finitos / Leandro Francisco Andrioli – Guaratinguetá, 2015.  
70 f. : il.  
Bibliografia : f. 63-64

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

1. Análise estrutural (Engenharia) 2. Abalos sísmicos 3. Método dos elementos finitos I. Título

CDU 624.04

**LEANDRO FRANCISCO ANDRIOLI**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

  
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI  
UNESP-FEG

  
Prof. Me. FABRÍCIO VIEIRA SILVA  
UNESP-FEG

**Novembro de 2015**

Dedico este trabalho aos meus pais, que mesmo com todos os obstáculos impostos pela vida se sacrificaram por seus filhos, e conseguiram que todos se tornassem pessoas do bem. Sempre enfatizaram a importância dos estudos para a construção de um futuro melhor, cobraram bons resultados e nunca duvidaram da minha capacidade de chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, foi Nele que busquei força e discernimento durante a minha caminhada;

à minha mãe Lina por estar sempre ao meu lado, me incentivando e ensinando o que a vida lhe ensinou. Me dando carinho, me escutando e sempre falando o que precisava ouvir, e com toda a sua humildade me ensinou a ser um homem correto, obrigado;

ao meu pai Reneu por estar ao meu lado sempre, por me demonstrar pelo exemplo como um homem de bem deve ser, por não medir esforços para dar a todos os seus filhos o melhor possível, obrigado;

ao meu irmão Reneu, por todo o investimento de tempo e dinheiro, por tudo que deixou de lado para tentar tornar meu caminhar mais fácil que o dele próprio, e por demonstrar que era possível esse sonho, obrigado;

à minha irmã Michele, que me mostra todos os dias como uma pessoa esforçada deve agir, por todos os conselhos e por me apoiar em todas as decisões, obrigado;

ao meu irmão Reinaldo, por ter me adotado como irmão mais novo e por me mostrar que coisas boas acontecem com pessoas boas, obrigado;

ao meu cunhado-irmão André, por nunca ter dito um não a qualquer favor que precisei nesse período, por toda a ajuda e conselhos menos polidos, obrigado;

aos meus parceiros de turma André e Barbosinha, por terem se revezado em me ajudar em trabalhos e apresentações, pelas viagens a Guará sem entrar na FEG, obrigado;

aos camaradas da estufa, Jack, Pigatto e Léo, pela parceria de fins de semana afora para estudar para as matérias de energia e por me deixar dormir no palquinho, obrigado;

aos colegas de turma, Igor, cabra, ET, marquito, Débora, Thalita, Benedito, Naty, Felipe, Thaiane, Kelly, por tornarem menos difíceis esses anos, obrigado;

aos meus amigos da CEMEF Engenharia, em especial Pablo, Tosti e Fabião, por contribuírem para o profissional que sou hoje e por tudo que posso alcançar, obrigado;

aos meus amigos da Zodiac, por me tolerarem diariamente, por me ajudarem sempre que preciso e por me darem motivos todos os dias para fazer piadas, obrigado;

à Natália, pela companhia mesmo estando longe durante as viagens no momento quando elas pareciam intermináveis, pela franqueza em todas as conversas, obrigado;

aos meus amigos molões, que me acolheram como membro da turma mais mole de toda a nação, me ensinando que família não é sangue, família é sintonia, obrigado.

aos meus amigos de infância, por sempre me incentivarem com meu sonho, por todas as horas passadas juntos na famosa rua 3, obrigado;

aos parceiros de viagem de todos os dias, Carlão, Dói, Sidão, Jody, Pri, Gorfo, Raissa, Vanessinha, Vanessão, Will, por fazerem 100km parecerem 10km, obrigado;

aos meus amigos da EJNS, por me darem força para seguir no caminho de Deus, por sempre escutarem minhas lamentações e preocupações, obrigado;

Aos meus amigos do movimento escoteiro, com os quais aprendi valores que levarei para vida toda, obrigado;

ao Professor Marcelo, que me orientou e me me ajudou nesse trabalho, com todo seu conhecimento e paciência, obrigado;

por fim, agradeço aos percalços da vida, por me fazerem uma pessoa forte e resiliente, porque sem essas características não atingiria o meu objetivo.

"Às vezes, para fazer a coisa certa, é preciso ser firme e desistir daquilo que mais queremos. Até dos nossos sonhos."

Parker, Peter

Andrioli, Leandro F. **Análise de estruturas sujeitas a ações sísmicas utilizando o método dos elementos finitos**. Guaratinguetá, 2015. 73 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

## RESUMO

Neste trabalho, é apresentada a verificação estrutural de um equipamento sujeito a cargas sísmicas. A correta avaliação de cargas é de extrema importância para a segurança e efetividade estrutural e, como no Brasil quase a totalidade de estruturas não necessitam da consideração de ações sísmicas em seus projetos, a aplicação dessas cargas muitas vezes é negligenciada, mesmo quando o equipamento/estrutura é exportada. Este trabalho visa exemplificar a criticidade desse problema. Para essa avaliação, foi utilizada uma ferramenta cada vez mais comum entre os engenheiros: o Método dos Elementos Finitos. Para a elaboração desta avaliação é utilizada a especificação técnica ETG1015 (Endesa) que estabelece quais carregamentos devem ser aplicados a estruturas sujeitas a sismos para o projeto El Quimbo, localizado na Colômbia. Os carregamentos aplicados sobre a estrutura, de acordo com a ETG1015, são acelerações laterais simulando assim as condições enfrentadas em um abalo sísmico. As análises estruturais são realizadas através do método dos elementos finitos com o auxílio do software Cosmos. Desta forma, é possível a determinação das tensões atuantes na estrutura e, assim, comparar com as tensões admissíveis propostas pela norma AISC e propor modificações de projeto visando o atendimento das normas.

**Palavras-chave:** FEM, elementos finitos, análise estrutural, cargas sísmicas.



Andrioli, Leandro F. **Analysis of structures subject to seismic actions using the finite element method.** Guaratinguetá, 2015. 73 p. Monograph (Graduate in Mechanical Engineering) – Engineering Faculty, Campus of Guaratinguetá, São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho”.

### **ABSTRACT**

This study approaches the structural verification of a piece of equipment that may suffer seismic loads. The proper evaluation of loads is extremely important for safety and structural effectiveness and, as in Brazil almost all structures do not require consideration of seismic action in their designs, the application of these loads is frequently overlooked, even when the structure is for exportation. This study aims to illustrate the criticality of this issue. For this evaluation, an increasingly common tool among engineers is used, the Finite Element Method. The technical specification ETG1015 is used for the preparation of this evaluation, that establishes which loads should be applied to structures subjected to earthquakes for the project El Quimbo. The loads applied to the structure, according to ETG1015, are lateral accelerations simulating earthquake conditions. Structural analyses are made by the Finite Element Method, using Cosmos software. Thereby, it is possible to determine stresses on the structure and therefore compare with the allowable values by the AISC standard and, if necessary, design modifications targeting the fulfillment of standards proposed.

**Keywords:** FEM, finite elements, structural analysis, seismic loads.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma para a análise em questão. ....	14
Figura 2 - Rede de elementos finitos. ....	17
Figura 3 - Malha de Elementos Finitos. ....	18
Figura 4 - Tensões sobre um elemento infinitesimal tridimensional. ....	18
Figura 5 – Matriz de tensões e deformações. ....	19
Figura 6 – Espectro resposta, em função dos períodos naturais. ....	25
Figura 7 – Espectro de resposta, em função das frequências naturais. ....	26
Figura 8 – Interface do programa Cosmos ..... 28	28
Figura 9 – Desenho do suporte ..... 30	30
Figura 10 – Desenho do suporte, interação com o interruptor ..... 31	31
Figura 11 – Modelo do suporte do interruptor – Vista isométrica. .... 33	33
Figura 12 – Modelo do suporte do interruptor – Vista lateral. .... 33	33
Figura 13 – Modelo do suporte do interruptor – Vista superior. .... 34	34
Figura 14 – Detalhe dos componentes estruturais. .... 34	34
Figura 15 – Condição de contorno, detalhe da restrição nos chumbadores ..... 35	35
Figura 16 – Condição de contorno, detalhe da restrição nos chumbadores ..... 36	36
Figura 17 – Direção diagonal para os casos de carga LC3 e LC6. .... 38	38
Figura 18 – Direção diagonal para os casos de carga LC3 e LC6. .... 38	38
Figura 19 – Esforços devido a carga de curto circuito do interruptor, cargas para sismo em - Y. .... 39	39
Figura 20 – Esforços devido a carga de curto circuito do interruptor, cargas para sismo em +Y. .... 40	40
Figura 21 – Tensões LC3 (Von Mises) [Pa]. .... 42	42
Figura 22 – Tensões LC3 (Von Mises) [Pa] – Vista superior. .... 43	43
Figura 23 – Deslocamentos LC3 [m]. .... 43	43
Figura 24 – Deslocamentos LC3 [m] – Configuração deformada. .... 44	44
Figura 25 – Localização dos parafusos. .... 47	47
Figura 26 – Localização dos chumbadores. .... 48	48
Figura 27 – Numeração dos nós de acordo com as tabelas. .... 48	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões Máxima.....	41
Tabela 2 – Deslocamentos máximos.....	42
Tabela 3 – Verificação dos parafusos.....	46
Tabela 4 – Reações de apoio, LC1.....	49
Tabela 5 – Reações de apoio, LC2.....	50
Tabela 6 – Reações de apoio, LC3.....	52
Tabela 7 – Reações de apoio, LC4.....	54
Tabela 8 – Reações de apoio, LC5.....	55
Tabela 9 – Reações de apoio, LC6.....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.4 APRESENTAÇÃO.....	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	16
2.3 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA ETG 1015 .....	23
2.3.1 Introdução.....	23
2.3.2 Classificação de estruturas segundo a ETG1015.....	24
2.3.4 Espectros de resposta suavizados .....	25
2.3.5 Método estático sem verificação da frequência natural.....	26
2.4 AISC .....	27
2.5 COSMOS.....	28
<b>3 MATERIAS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 MATERIAL .....	29
3.2 MÉTODO .....	29
3.2.1 Estrutura a ser analisada .....	30
3.2.2 Modelo de elementos finitos .....	32
3.2.3 Condições de Contorno .....	35
3.2.4 Carregamentos .....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO .....	41
4.3 ELEMENTOS DE LIGAÇÃO – PARAFUSOS .....	44
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>62</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados da análise modal.....</b>	<b>64</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Segundo Buchholddt (1999), a crosta terrestre é dividida em placas tectônicas, as quais caracterizam-se por serem extensos conjuntos de rochas, que são limitadas por regiões de deslizamento. Como descrito por McGuire (1968), nas fronteiras entre elas, podem vir a ocorrer interações, as quais podem ser intensas ou mais amenas, essas interações geram ondas mecânicas propagadas através do solo, que são conhecidas como terremotos.

Os terremotos, ou sismos, são fenômenos naturais, que mesmo apesar dos esforços despendidos para a clarificação destes fenômenos, eles continuam imprevisíveis no tempo e espaço, o que pode vir a ter consequências catastróficas, tanto econômicas quanto sociais.

Ainda não aconteceu nenhum evento sísmico significativo no Brasil porém, em instalações onde qualquer falha pode vir a gerar perdas gigantescas, como em barragens e nas usinas nucleares, esses efeitos mesmos que pequenos já são levados em conta, para esses casos específicos o mais usual é seguir recomendações de normas internacionais.

Como no Brasil é muito difícil ter que se levar em conta ações sísmicas, muitas vezes se ignora essas ações no dimensionamento de estruturas, porém estas devem ser levadas em conta em vários países da América Latina, América do Norte e outros grandes centros que recebem produtos brasileiros, e caso essas cargas não sejam levadas em conta em fase de projeto é necessário a modificação para que a estrutura suporte as cargas provenientes de sismos.

Conforme COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE, 1993), quando ocorre um evento sísmico a principal preocupação é de se preservar vidas humanas e a minimização de danos estruturais, e são nessas premissas que se baseiam os cálculos deste trabalho.

## 1.2 OBJETIVOS

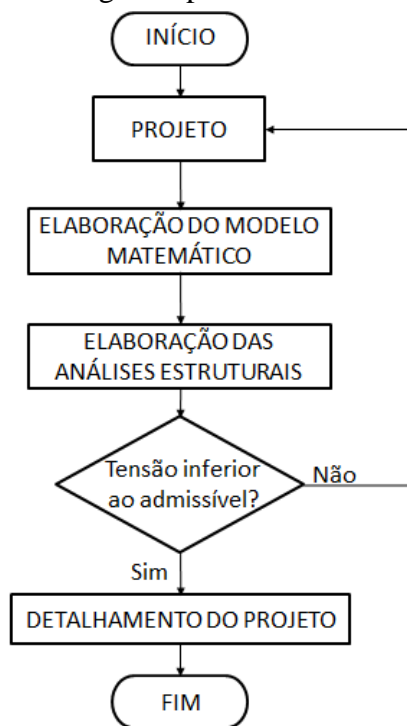
O objetivo principal deste trabalho é comprovar a possibilidade de utilização do método de elementos finitos para a avaliação de estruturas sujeitas a ações sísmicas utilizando o método da análise estática equivalente, em uma estrutura de base que suporta outro conjunto, do qual não se tem informações detalhadas.

Esse trabalho também visa demonstrar a importância da consideração das cargas provenientes de sismos em estruturas a serem implantadas em zonas sísmicas, fato muitas vezes esquecido no Brasil.

## 1.3 METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Para solucionar o problema é adotada uma metodologia, facilmente entendida com o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma para a análise em questão.



Fonte: (do próprio autor).

Para a resolução do problema foi adota uma sistemática, na qual segue os passos a seguir.

- 1°) Projeto de acordo com a configuração proposta;
- 2°) Elaboração do modelo matemático (elementos finitos);
- 3°) Realização das análises estruturais;
- 4°) Verificação de tensões e esforços;

Se a tensão ou esforço atuante  $<$  tensão ou esforço admissível.

Ir para o passo 5.

Senão

Voltar ao passo 1.

- 5°) Prosseguimento no detalhamento e implementação do projeto

#### 1.4 APRESENTAÇÃO

A estrutura a ser analisada é uma plataforma na qual será instalada um interruptor. A estrutura da plataforma é disponibilizada em detalhes para o cálculo, porém para o interruptor se tem apenas os pontos de fixação com a plataforma, seu centro de gravidade e massa. A falta de informações completas para se efetuar projetos e verificações na indústria hoje é comum, mesmo com contratos de confidencialidade o envio de informações detalhadas é muito difícil.

A plataforma do interruptor é composta basicamente por placas dobradas e perfis estruturais e será instalado na hidrelétrica de El Quimbo, Colombia, seguindo a ETG1015.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Comumente no cotidiano de profissionais ligados a engenharia, é inviável e por vezes até mesmo impossível, analisar e certificar estruturas de forma analítica, apenas com os conceitos aprendidos em mecânica dos sólidos e resistência dos materiais, pois o estudo pode apresentar inúmeras variáveis aplicadas.

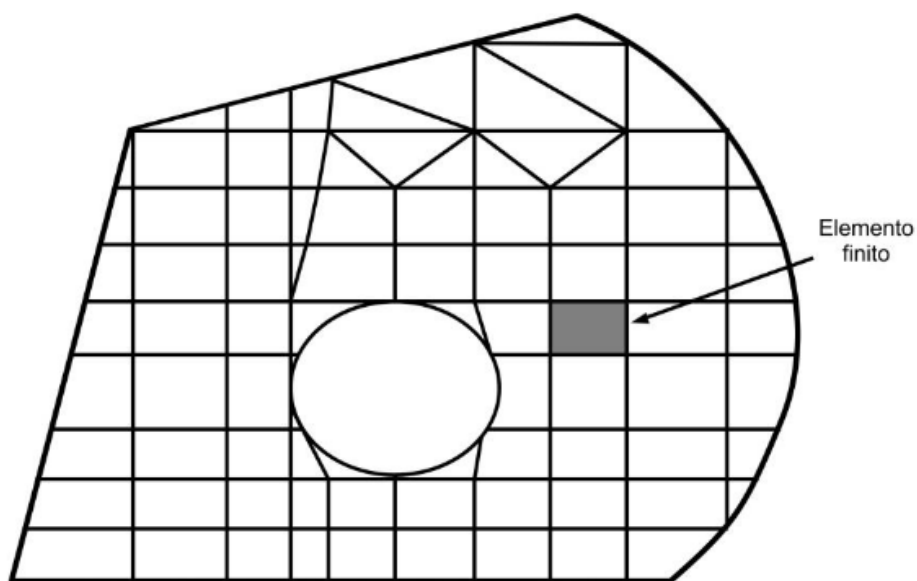
O método dos elementos finitos calcula computacionalmente muitas informações, que podem ser usadas para certificar ou reprovar a estrutura em questão, o método não resulta em valores exatos, assim como a grande maioria de métodos computacionais, porém normalmente as aproximações são ótimas e os resultados altamente confiáveis.

O método dos elementos finitos (MEF) teve origem entre as décadas de 1940 e 1950, sendo utilizado na indústria aeronáutica. O surgimento deste método possibilitou a resolução de problemas relacionados à teoria da elasticidade. Utilizou como alicerce o método de Rayleigh-Ritz, que prevê a divisão do domínio da integração, continuamente, em um número finito de elementos. (ASSAN, 2003).

Tem como objetivo a determinação do estado de tensão e deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. (AZEVEDO, 2003). A Figura 2 demonstra uma rede de malha de elementos finitos.



Figura 2 - Malha de elementos finitos.



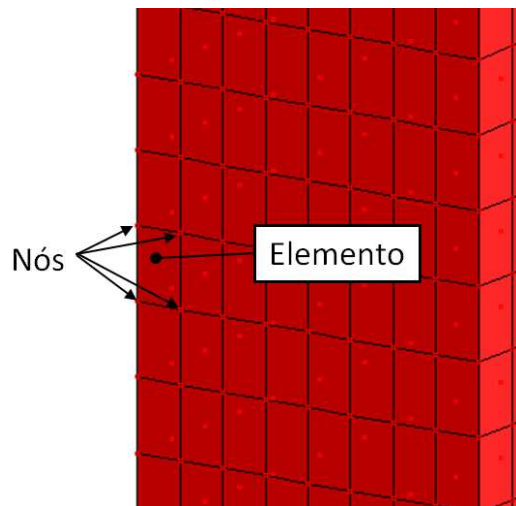
(Fonte: ASSAN, 2003).

Os primeiros princípios da aplicação do nome Método dos Elementos Finitos tem data de 1960 com o autor Ray Clough. Porém, anteriormente, algumas técnicas já eram conhecidas e foram posteriormente incorporadas ao MEF, contribuindo para o formato utilizado atualmente. Sua viabilidade só é possível através de meios digitais devido a enorme quantidade de cálculos necessários para resolução de grandes sistemas de equações. Devido a esta condição, a disseminação do método teve início apenas após a década de 80 com o advento dos computadores. (AZEVEDO, 2003).

O processo de criação dos modelos de elementos finitos é dividido em duas etapas distintas: criação de malha e análise. No modelo, a densidade da malha deve ser apropriada de modo a reduzir erros de solução. De forma simplificada, a criação de malha divide em subdomínio de elementos finitos cada região do modelo analisado. (GUIMARÃES, 2006).

Os tipos de elementos são variáveis e apresentam formas geométricas diversas (triangulares, quadrilátero, cúbico, etc) dependem da adaptabilidade a geometria desejada. São conectados entre si através de nós (pontos nodais) conforme Figura 3.

Figura 3 - Malha de Elementos Finitos.



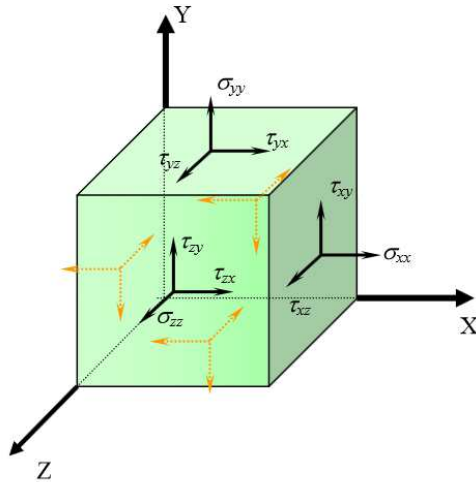
Fonte: (do próprio autor)

Para compreensão do método, é fundamental compreender como os elementos se deformam e as relações diferenciais envolvendo estas deformações.

As tensões atuantes sobre um elemento infinitesimal tridimensional são dadas na Figura 4.

Neste caso, em cada face do elemento atuam duas tensões paralelas à face (tensões de cisalhamento) e uma tensão normal (perpendicular) ao plano. Este é o caso mais comum de solicitação.

Figura 4 - Tensões sobre um elemento infinitesimal tridimensional.



Fonte: (GESUALDO, 2010).

Em cada direção considerada ocorrerão deformações produzidas pelas respectivas tensões, dadas por  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$  e  $\gamma_{xz}$ . (GESUALDO, 2010).

Considerando o caso de material isótropo (mesma propriedade em todas as direções), ou seja,  $E$  (módulo de elasticidade) e  $\nu$  (coeficiente de Poisson) iguais e constantes em qualquer direção, tem-se a equação presente na Figura 5, que relaciona tensões com deformações, para o caso tridimensional.

Figura 5 – Matriz de tensões e deformações.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}$$

Fonte: (do próprio autor)

A utilização dos elementos finitos tem vantagens e desvantagens associadas. Dentre as vantagens: a relativa precisão nos resultados, utilização de diversos materiais distintos em diversos corpos, a variação no tamanho dos elementos permitindo cálculos mais refinados para algumas áreas específicas, o aumento da confiabilidade de projetos e em alguns casos a eliminação de certos testes no produto. (TAVARES, 2005).

Dentre as desvantagens contam apenas a necessidade do uso de meios digitais com certa capacidade de cálculo para resolução dos problemas, a qual foi praticamente eliminada com o passar do tempo e o crescimento da tecnologia. (TAVARES, 2005).

## 2.2 CRITÉRIO DE FALHA DE VON MISES

Segundo Shigley (1984), a teoria da energia de distorção também conhecida como teoria de von Mises-Hencky, prevê que o início do escoamento de um material dúctil (predominantemente utilizado para aços) começa quando a energia de distorção do cristal é igual ou superior a energia de distorção do cristal quando submetido a um ensaio de tração.

As equações a seguir ilustram como são obtidas as tensões equivalentes de von Mises, que são utilizados em projetos para a determinação das tensões admissíveis dos mesmos.

Primeiramente, para a determinação da energia de deformação, é considerado um cubo unitário que apresenta tensões principais, de modo que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ . Assim, o trabalho realizado em qualquer uma das três direções principais pode ser desenvolvido como mostra a equação 1:

$$u_n = \frac{\sigma_n \times \varepsilon_n}{2} \quad (1)$$

Onde:

$u_n$ : Energia de deformação para uma direção n;

$\sigma_n$ : Tensão principal para uma direção n;

$\varepsilon_n$ : Deformação específica para uma direção n.

Portanto, para energia total de deformação temos:

$$u = u_1 + u_2 + u_3 = [1/(2E)] \times [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2)$$

Onde:

$\mu$ : Coeficiente de Poisson.

Definindo uma tensão média como sendo igual à média aritmética das tensões principais, pode-se determinar a quantidade de energia devido à variação de volume em função da tensão média, o que é mostrado na equação 3:

$$u_v = \frac{3\sigma_{méd}^2}{2E} \times (1 - 2\mu) \quad (3)$$

Sendo,  $\sigma_{méd}^2 = [(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3]^2$ , temos:

Na equação 4, a energia de distorção é a subtração entre a energia total de deformação e a energia devido à variação de volume:

$$u_d = u - u_v = \frac{1 + \mu}{3E} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (4)$$

Para a definição do critério, determina-se a energia de distorção para o teste de tração simples, onde  $\sigma_1 = S_e$  e  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ .

$$u_d = \frac{1 + \mu}{3E} S_e^2 \quad (5)$$

Iguala-se então este resultado (5) a equação (4):

$$2S_e^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (6)$$

Entretanto, no início do escoamento temos  $\sigma_3 = 0$ , portanto:

$$S_e^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \quad (7)$$

Por último, define-se então como tensão equivalente de von Mises, para fins de projeto:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

## 2.3 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA ETG 1015

### 2.3.1 Introdução

A especificação técnica estabelece as bases gerais para os projetos sísmicos de estruturas, edifícios, equipamentos elétricos, equipamentos mecânicos e suas respectivas estruturas de suporte, conexões, bases civis e chumbadores a serem instalados no projeto El Quimbo, e quando necessário a qual procedimento e ensaios que os equipamentos devem ser submetidos para se garantir o perfeito funcionamento, verificando-se a resistência e a viabilidade operacional.

A ETG1015 não é aplicável para obras e estruturas que por sua importância econômica, particularidade ou magnitude de risco, requerem estudos específicos para verificação estrutural ou resposta ao sismo, como por exemplo, centrais nucleares, barragens de represas, e estruturas que caso haja colapso venha a colocar em risco assentamentos localizados à frente da hidrelétrica.

### **2.3.2 Classificação de estruturas segundo a ETG1015**

Para efeitos de projeto, as estruturas e equipamentos são classificados nas seguintes categorias:

**Categoria A:** Equipamentos, obras e estruturas cuja operação seja especialmente importante durante ou imediatamente após o sismo, ou, caso a falha ou colapso ponha em perigo de morte um grande número de pessoas, ou ainda, que causem perda econômica, direta ou indiretamente, excepcionalmente altas em comparação com custo de aumentar a segurança. Equipamentos que a falha ou mau funcionamento venha a afetar a operação de um equipamento classificado na categoria A.

**Categoria B:** Pertencem a essa categoria equipamentos e construções cuja falha ocasione perdas de magnitude intermediária, que não é comum um acúmulo de pessoas próximas, que não tem salas de controle próximas. Equipamentos necessários para a operação normal e contínua do conjunto, porém não essenciais para o funcionamento de equipamentos da Categoria A. O equipamento em questão foi classificado junto ao cliente e ao órgão verificador como sendo da categoria B.

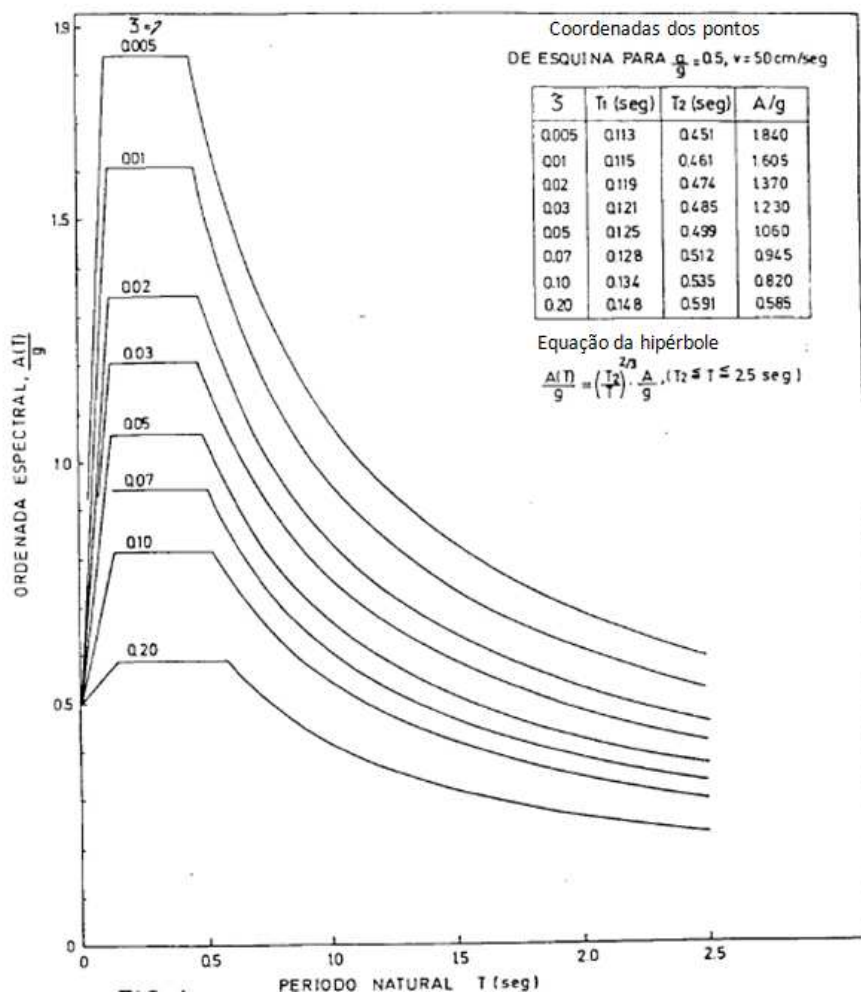
**Categoria C:** Equipamentos cuja falha não gera mau funcionamento de equipamentos em categorias A ou B e, não são essenciais para o contínuo funcionamento de nenhum outro equipamento.



### 2.3.4 Espectros de resposta suavizados

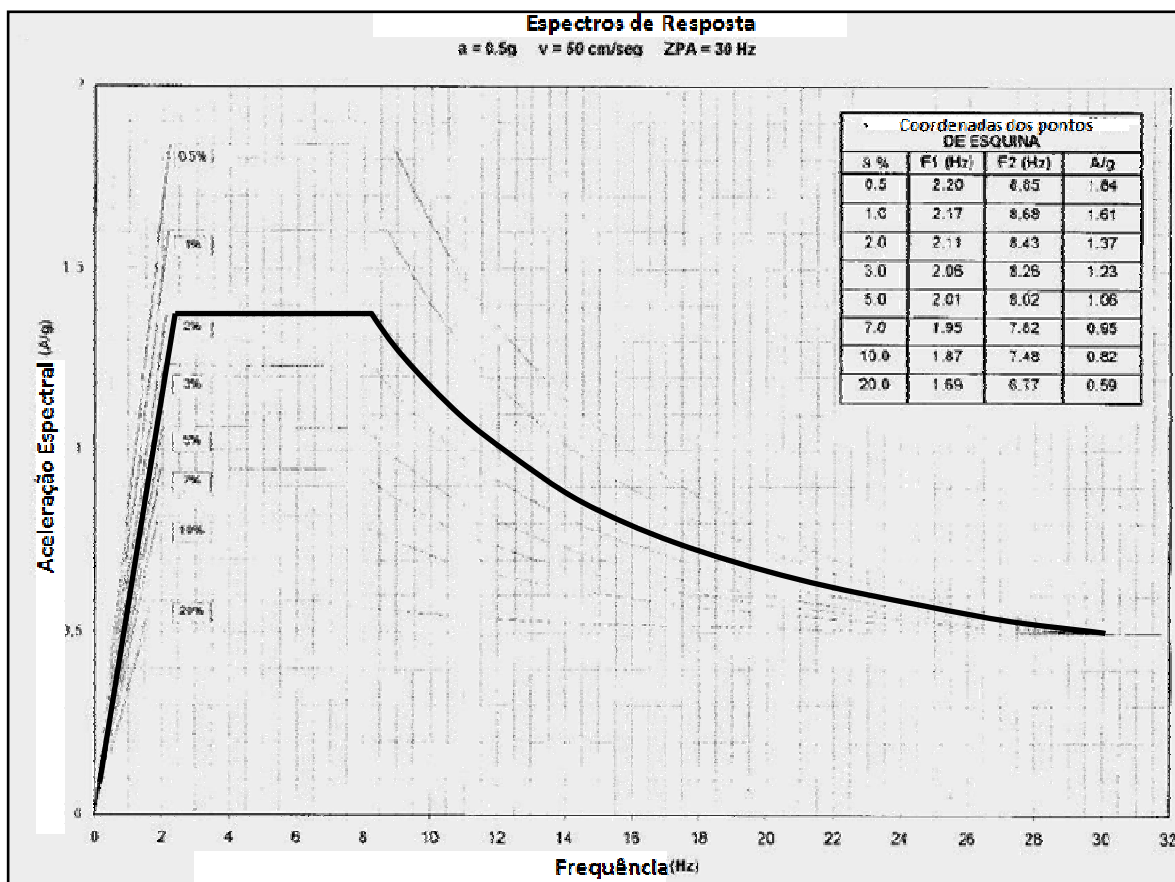
Segundo a seção 02.07.02 da ETG1015 os espectros de resposta a serem utilizados na verificação de equipamentos das subestações elétricas são estabelecidos por especificações técnicas especiais, caso essas especificações não descrevam a estrutura em questão os espectros são determinados a partir da Figura 6 e Figura 7, as figuras representam valores para equipamentos da categoria A, para os equipamentos da categoria B, as ordenadas devem ser multiplicadas por 0,8.

Figura 6 – Espectro resposta, em função dos períodos naturais.



Fonte: (ETG1015, editado).

Figura 7 – Espectro de resposta, em função das frequências naturais.



Fonte: (ETG1015, editado).

### 2.3.5 Método estático sem verificação da frequência natural

Segundo Seção 02.07.06 da ETG1015 caso não tenha sido feita comprovação de que a menor frequência natural do equipamento supera os 30Hz, ou ainda, se o equipamento não cumpre essa condição pode-se verificar o equipamento utilizando o método estático equivalente, com componentes horizontais e verticais conforme equações 9 e 10 respectivamente.

$$H = \frac{1,2AW}{g} \quad (9)$$

$$V = \frac{0,6AW}{g} \quad (10)$$

Onde A é a ordenada máxima do espectro de resposta suavizado, W é o peso próprio, g é a aceleração da gravidade, H e V as cargas totais nas direções horizontais e verticais respectivamente. O valor de amortecimento empregado para a determinação de A para a estrutura em questão é de 4% segundo ETG1015, porém a fim de se obter resultados conservativos dado ao fato de não se conhecer a estrutura a ser suportada é considerado um amortecimento de 2% para todas as verificações.

## 2.4 AISC

Utiliza-se a norma AISC para a determinação das tensões máximas admissíveis para os variados casos de carga, para isso os carregamentos são classificados como:

- Caso de carga convencional:

Nesta situação se enquadram apenas o peso próprio da estrutura, mais o da estrutura suportada, que por inspeção os esforços são muito menores que os da carga sísmica considerada, por isso nem são apresentados os resultados.

- Caso de carga eventual:

Todos os casos com carga sísmica.

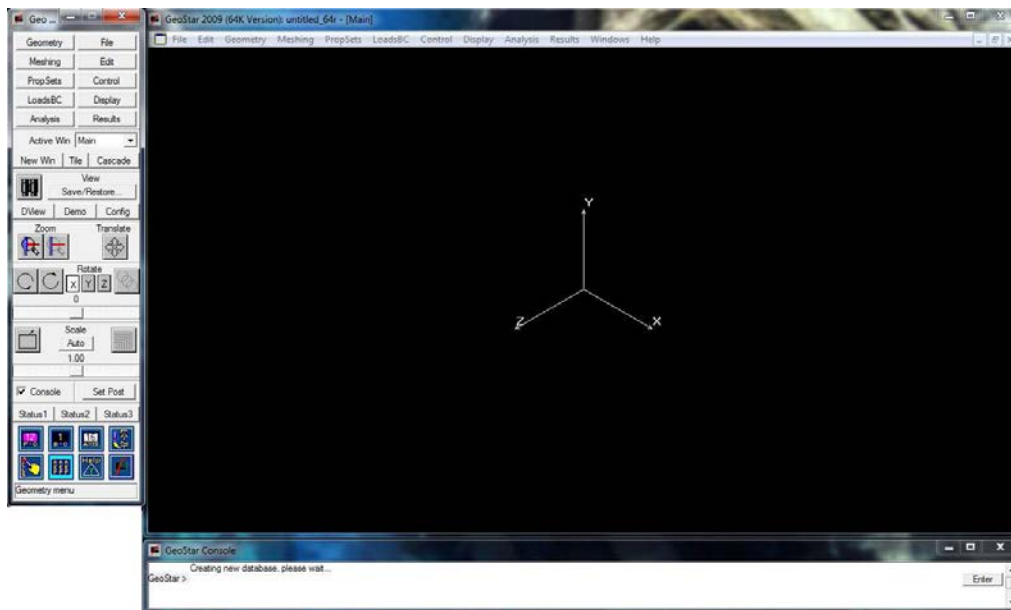
No caso de carga convencional a tensão admissível é 60% da tensão de escoamento e no caso eventual é de 80%.

A tensão atuante na estrutura, que deve ser comparada com a tensão admissível, é a tensão equivalente de von Mises (obtida no modelo de elementos finitos nas análises estruturais).

## 2.5 COSMOS

A análise estrutural é executada através do método dos elementos finitos com o auxílio do programa COSMOS/M ® 2.95 2009 (64k version). O software COSMOS/M foi desenvolvido pela *Structural Reserch and Analysis Corporation (SRAC)*, para a utilização em computadores pessoais e estações de trabalho. Nele estão incluídos módulos para resolução de problemas lineares, não lineares, estáticos, dinâmicos, entre outros. A Figura 8 ilustra a interface que o programa apresenta ao usuário.

Figura 8 – Interface do programa Cosmos



Fonte: (COSMOS/M ® 2.95, 2009)

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

Para a verificação estrutural do suporte do interruptor é necessário a utilização de normas que forneçam os carregamentos e método de aplicação, bem como tensões e esforços admissíveis. A seguir estão listadas as normas e os softwares utilizados, e uma breve descrição de sua finalidade:

- Software DraftSight: Utilizado na visualização dos desenhos 2D.
- Software Cosmos: Utilizado para a elaboração do modelo matemático (elementos finitos) e para a análise estrutural.
- Especificação técnica ETG 1015: Através desta norma são determinados os carregamentos considerados na análise estrutural do suporte.
- Norma AISC: A norma AISC é utilizada para a determinação das tensões admissíveis para a estrutura.
- Norma NBR 8800: Através desta norma são determinados os esforços admissíveis para os parafusos, olhais e soldas existentes na estrutura.

#### 3.2 MÉTODO

Para a fabricação do suporte do interruptor precisa-se inicialmente de um projeto da estrutura, cumprindo as premissas iniciais estabelecidas pelo cliente, como por exemplo o posicionamento das fixações com o solo e com o interruptor, dimensões máximas e material a ser utilizado.

Com essas premissas estabelecidas o projeto básico é feito, e com estas informações faz-se o modelo de elementos finitos, com o modelo finalizado são elaboradas as análises estruturais, de acordo com os passos a seguir:

1º) Análise modal para determinação da frequência natural de vibração;

2º) Aplicação das cargas sísmicas e análise estática equivalente para verificação da estrutura;

3º) Verificação dos elementos de ligação;

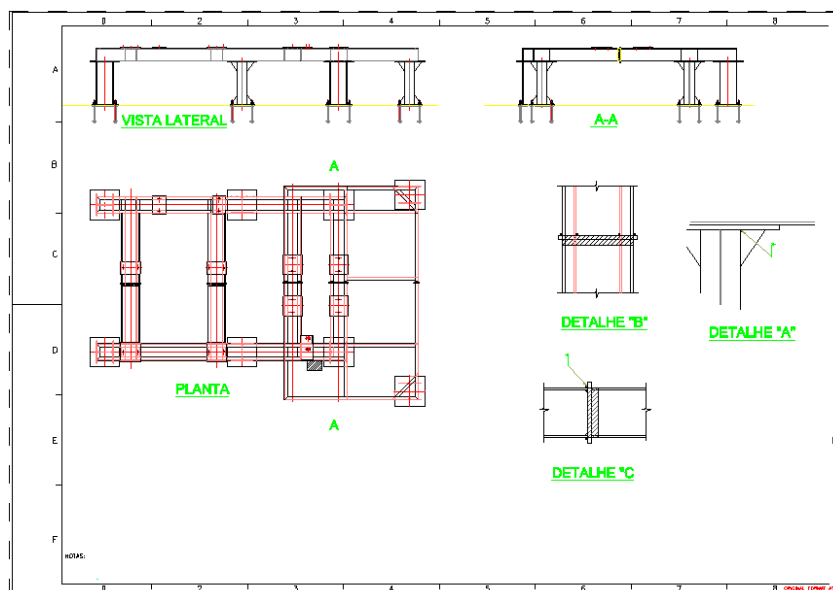
Após a obtenção dos resultados das análises, as tensões encontradas são comparadas com as tensões admissíveis, caso as tensões encontradas não sejam menores que as admissíveis são efetuadas alterações de projeto ou material até se obter resultados satisfatórios.

### 3.2.1 Estrutura a ser analisada

A estrutura a ser verificada apresenta as seguintes características:

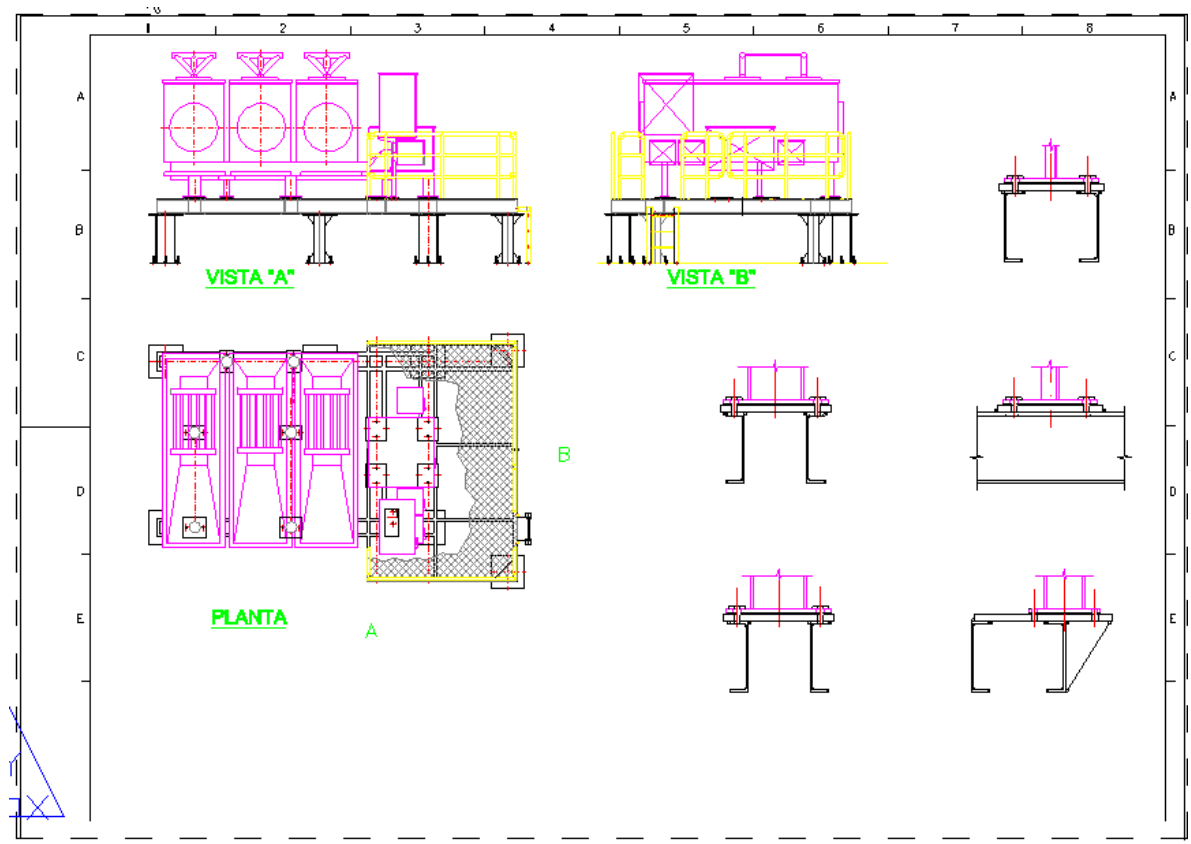
Massa (estrutura + interruptor) .....	9715,0 kg
Comprimento .....	6576,0 mm
Largura .....	4327,0 mm
Altura .....	1179 mm

Figura 9 – Desenho do suporte



Fonte: (Cliente indeterminado, cotas ocultas, 2014)

Figura 10 – Desenho do suporte, interação com o interruptor



Fonte: (Cliente indeterminado, cotas e detalhes ocultos, 2014)

A estrutura é toda construída em aço ASTM A36, os parafusos são todos M16 classe 8.8 e os chumbadores segundo ASTM A193 grau B7.

As principais características dos materiais empregados são as seguintes:

#### **ASTM A193 grau B7**

Tensão de ruptura:  $\sigma_f$  ..... 860 MPa

#### **ASTM A36**

Módulo de elasticidade: E ..... 200,0 GPa

Poisson:  $\nu$  ..... 0,3

Densidade:  $\rho$  ..... 7850 kg/m<sup>3</sup>

Tensão de escoamento:  $\sigma_y$  ..... 250 MPa

### 3.2.2 Modelo de elementos finitos

O modelo de elementos finitos é construído utilizando elementos de placa (SHELL4), elementos de viga (BEAM3D), elementos rígidos (RBAR), elementos de massa (MASS) e elementos de contato (GAP).

SHELL4: elemento de casca quadrilateral de 04 nós com membrana e flexibilidade para modelos tridimensionais estruturais e térmicos. Possui 6 graus de liberdade por nó (3 de translação e 3 de rotação);

BEAM3D: elemento estrutural e térmico tridimensional com 2 nós uniaxiais. Possui 6 graus de liberdade por nó (3 de translação e 3 de rotação).

RBAR: elemento de barra rígida com 2 nós uniaxiais. Possui até 6 graus de liberdade por nó (3 de translação e 3 de rotação).

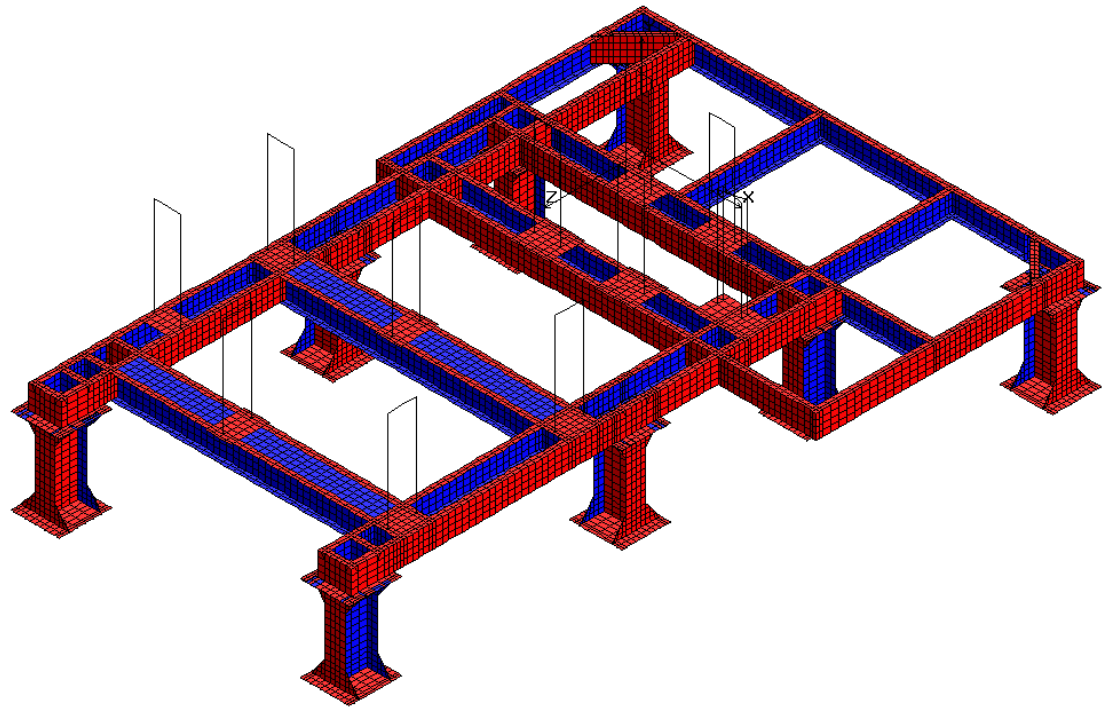
MASS: elemento de massa concentrada em um nó. Possui até 6 graus de liberdade (3 de translação e 3 de rotação).

GAP: elemento de contato com 2 nós uniaxiais, similar ao elemento rígido, porém tem rigidez elevada somente no sentido de compressão, ou seja, não tem rigidez quando submetido a tração ou esforços transversais. Possui até 6 graus de liberdade por nó (3 de translação e 3 de rotação).

SHELL4 é utilizado para representar a estrutura em si, todas as chapas e perfis, BEAM3D é utilizado para representar os parafusos, RBAR é utilizado para ligação entre o elemento de massa e a estrutura, os elementos de massa (MASS) são utilizados para representar o interruptor a ser suportado e os elementos de contato (GAP) para representar o contato entre as chapas nas ligações aparafusadas e também o contato da base da estrutura com o solo.

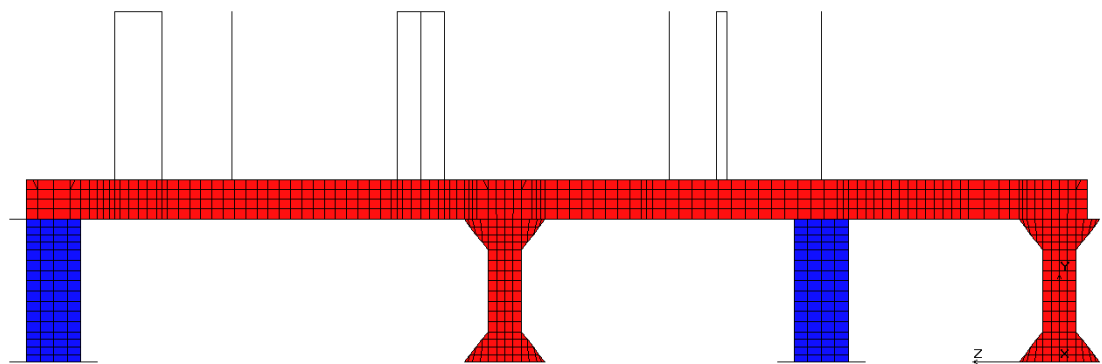


Figura 11 – Modelo do suporte do interruptor – Vista isométrica.



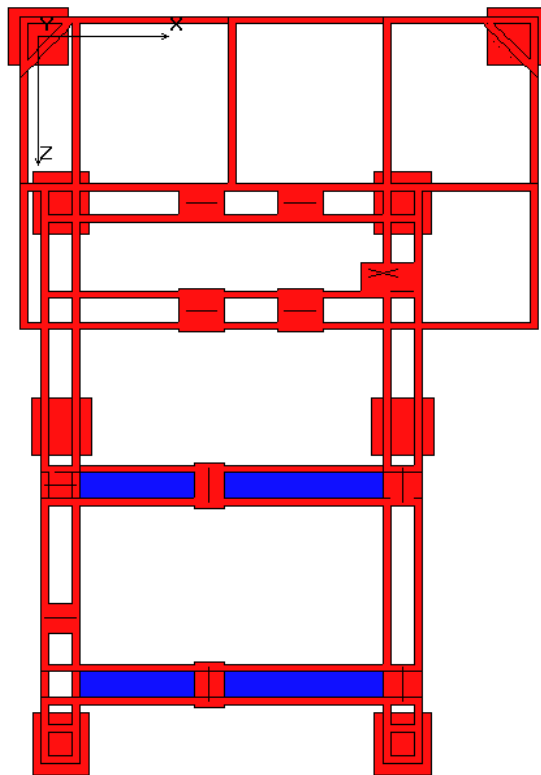
Fonte: (do próprio autor)

Figura 12 – Modelo do suporte do interruptor – Vista lateral.



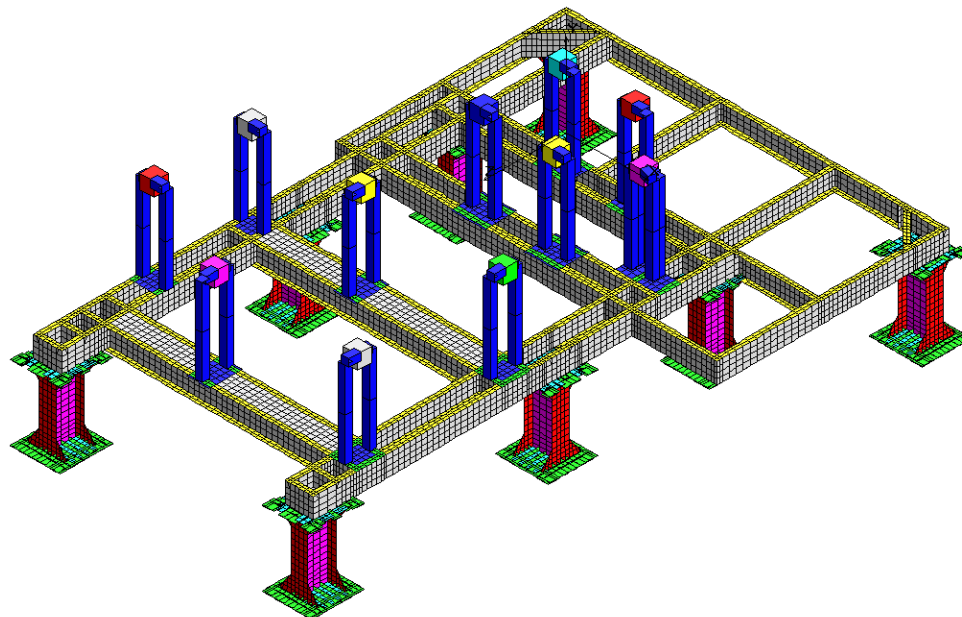
Fonte: (do próprio autor)

Figura 13 – Modelo do suporte do interruptor – Vista superior.



Fonte: (do próprio autor)

Figura 14 – Detalhe dos componentes estruturais.

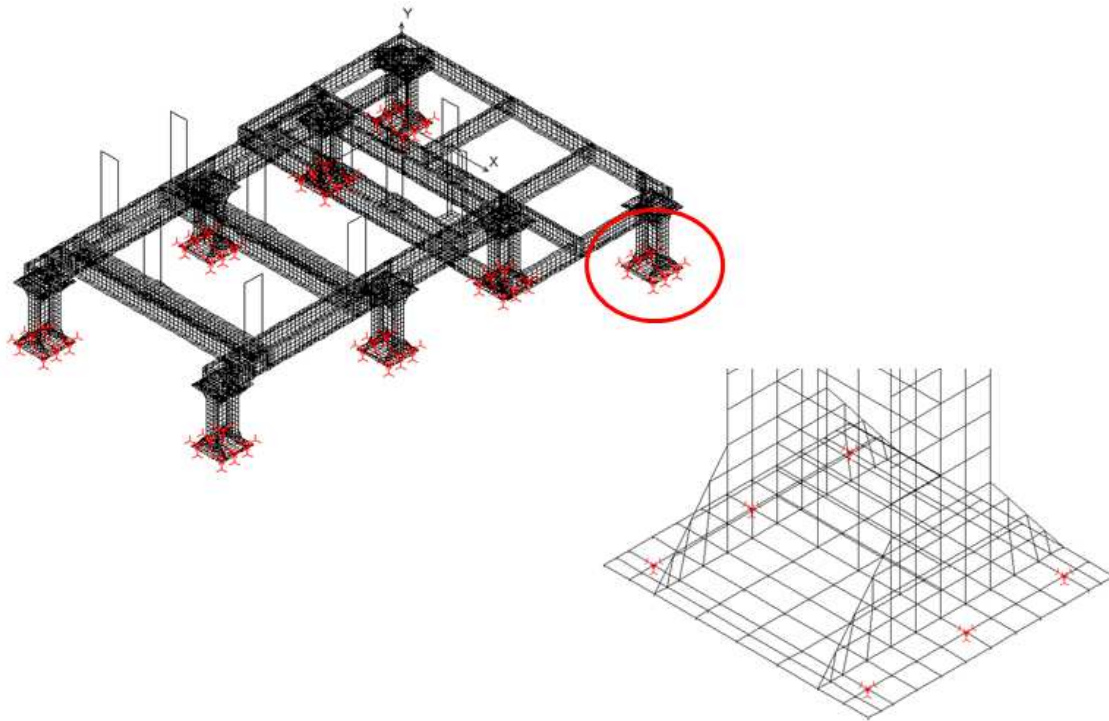


Fonte: (do próprio autor)

### 3.2.3 Condições de Contorno

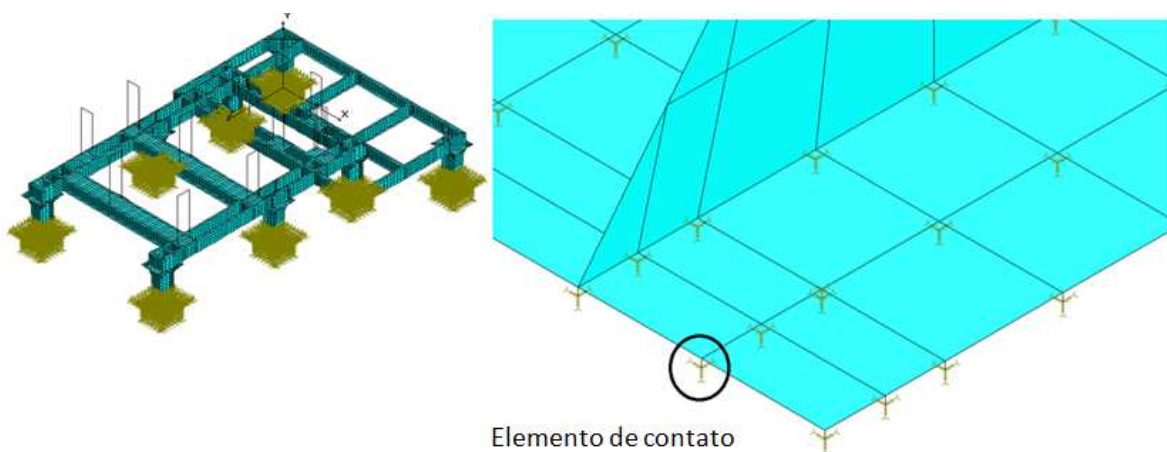
A condição de contorno utilizada é a restrição da translação no sentido  $x$ ,  $y$ , e  $z$  nos nós da base dos chumbadores. O contato da estrutura com a base é considerado por elementos de contato, na base dos elementos de contato são consideradas restrições translacionais e rotacionais. As reações de apoio encontradas nos nós dos chumbadores são utilizadas para a verificação dos chumbadores.

Figura 15 – Condição de contorno, detalhe da restrição nos chumbadores



Fonte: (do próprio autor)

Figura 16 – Condição de contorno, detalhe da restrição nos chumbadores



Fonte: (do próprio autor)

### 3.2.4 Carregamentos

As cargas são impostas de acordo com a ETG-1015, seção 02.07.06.

Considerando o pico do gráfico da Figura 7 referente a 2% de amortecimento obtém-se o valor de de 1,37 para a aceleração espectral. De acordo com a seção 01.04 se os equipamentos das categorias B e C pode-se multiplicar as ordenadas por 0,8 e 0,6 respectivamente, assim sendo o pico para o amortecimento de 2% para a estrutura a ser analisada é de  $0,8 \times 1,37$ , que resulta numa ordenada máxima de 1,096.

São analisados 6 casos de carga, aqui denominados de LC1 até LC6.

**LC 1** = Carga sísmica (efeito lateral, direção X mais efeito vertical, direção -Y) + Peso próprio da estrutura + Carga de curto circuito.

**LC 2** = Carga sísmica (efeito lateral, direção Z mais efeito vertical, direção -Y) + Peso próprio da estrutura + Carga de curto circuito.

**LC 3\*** = Carga sísmica (efeito lateral, direção XZ mais efeito vertical, direção -Y) + Peso próprio da estrutura + Carga de curto circuito.

**LC 4** = Carga sísmica (efeito lateral, direção X mais efeito vertical, direção Y) + Peso próprio da estrutura + Carga de curto circuito.

**LC 5** = Carga sísmica (efeito lateral, direção Z mais efeito vertical, direção Y) + Peso próprio da estrutura + Carga de curto circuito.

**LC 6\*** = Carga sísmica (efeito lateral, direção XZ mais efeito vertical, direção Y) + Peso próprio da estrutura + Carga de curto circuito.

\*A direção da aceleração diagonal e sua intensidade podem ser visualizadas nas Figura 17 e Figura 18.

**LC1 – Excitação em X e -Y:**

Aceleração horizontal (x)	→	$1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$
Aceleração vertical (y)	→	$-6,5 - (9,81) = -16,31 \text{ m/s}^2$

**LC2 – Excitação em Z e -Y:**

Aceleração horizontal (z)	→	$1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$
Aceleração vertical (y)	→	$-6,5 - (9,81) = -16,31 \text{ m/s}^2$

**LC3 – Excitação em XZ e -Y:**

Aceleração horizontal (z)	→	$1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$
Aceleração vertical (y)	→	$-6,5 - (9,81) = -16,31 \text{ m/s}^2$

**LC4 – Excitação em X e Y:**

Aceleração horizontal (x)	→	$1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$
Aceleração vertical (y)	→	$6,5 - (9,81) = -3,31 \text{ m/s}^2$

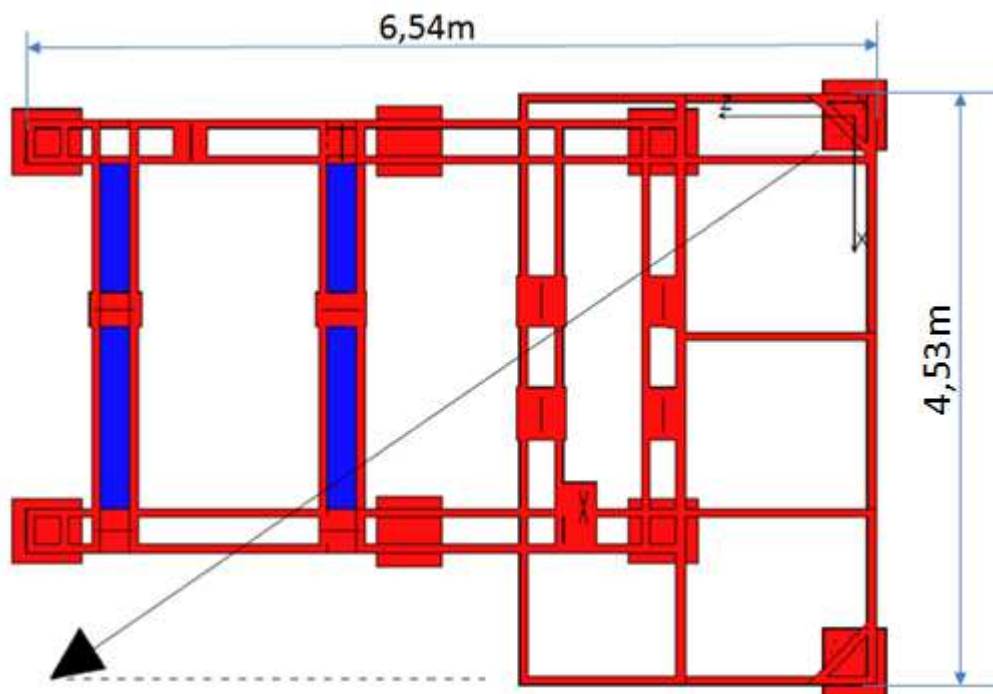
**LC5 – Excitação em Z e Y:**

Aceleração horizontal (z)	→	$1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$
Aceleração vertical (y)	→	$6,5 - (9,81) = -3,31 \text{ m/s}^2$

**LC6 – Excitação em XZ e Y:**

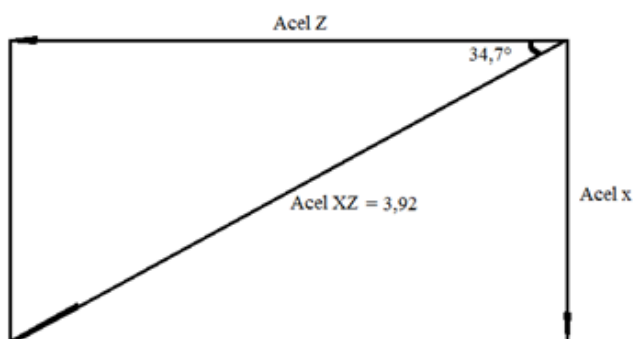
Aceleração horizontal (z)	→	$1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$
Aceleração vertical (y)	→	$6,5 - (9,81) = -3,31 \text{ m/s}^2$

Figura 17 – Direção diagonal para os casos de carga LC3 e LC6.



Fonte: (do próprio autor)

Figura 18 – Direção diagonal para os casos de carga LC3 e LC6.



$$\text{Aceleração na direção XZ} = 12,9 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Acel } x = 12,9 \times \sin 34,7 = 7,34 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Acel } Z = 12,9 \times \cos 34,7 = 10,61 \text{ m/s}^2$$

Fonte: (do próprio autor)

De acordo com a equação 9 e 10, temos:

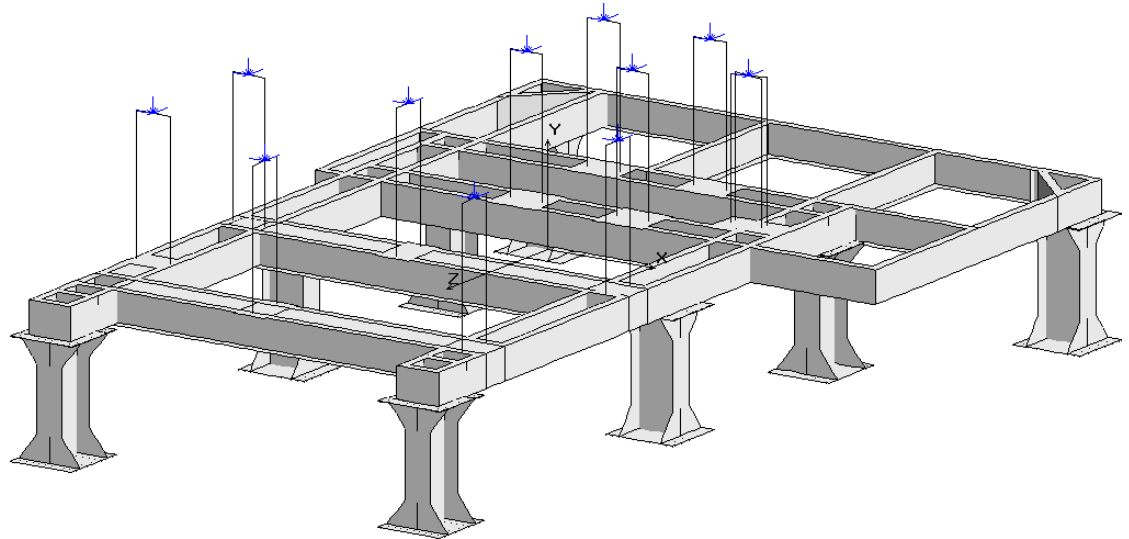
$$\text{Efeitos horizontais: } 1,2 \times A = 1,2 \times 1,096 \times 9,81 = 12,9 \text{ m/s}^2$$

$$\text{Efeitos verticais: } 0,6 \times A = 0,6 \times 1,096 \times 9,81 = 6,5 \text{ m/s}^2$$

Além das cargas sísmicas o fabricante do interruptor fornece cargas de curto cargas essas que poderão surgir na ocorrência de um sismo, na Figura 19 e

Figura 20 pode-se observar a localização e o sentido das cargas, porém os valores foram passados por uma outra empresa e em regime de confiabilidade.

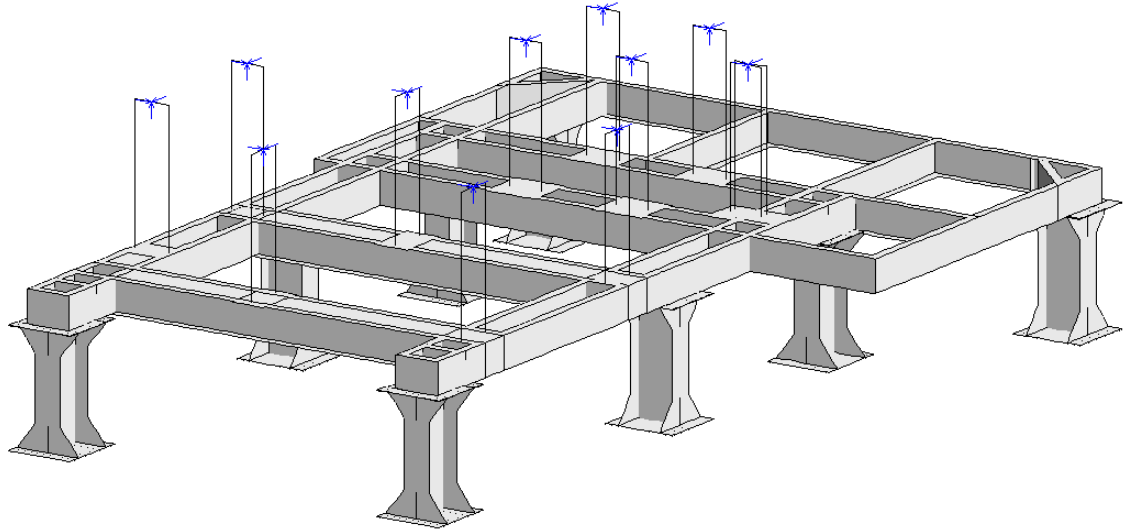
Figura 19 – Esforços devido a carga de curto circuito do interruptor, cargas para sismo em -Y.



Fonte: (do próprio autor)



Figura 20 – Esforços devido a carga de curto circuito do interruptor, cargas para sismo em +Y.



Fonte: (do próprio autor)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO

Mesmo tendo já efetuando os cálculos com os valores pico do gráfico de espectro de resposta, Figura 7, é efetuada a análise de frequências para se confirmar, como verifica-se no anexo 1 é possível verificar que os primeiros modos de frequência natural apresentam valores pico, porém participação de massa pequena, isso demonstra que a análise estática equivalente é conservativa.

### 4.2 TENSÕES E DESLOCAMENTOS

Os principais resultados obtidos para todos os casos de carga podem ser visualizados nas tabelas a seguir:

Tabela 1 – Tensões Máxima.

Caso Carga	de	Tensão Máxima [MPa]	Tensão Admissível [MPa]	M.S. *
LC1		104,4	200,0	0,91
LC2		133,4	200,0	0,50
LC3		164,3	200,0	0,22
LC4		111,0	200,0	0,80
LC5		129,4	200,0	0,55
LC6		160,0	200,0	0,25

Fonte: (do próprio autor)

$$* M.S. = \left( \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{max}} \right) - 1 \quad (11)$$

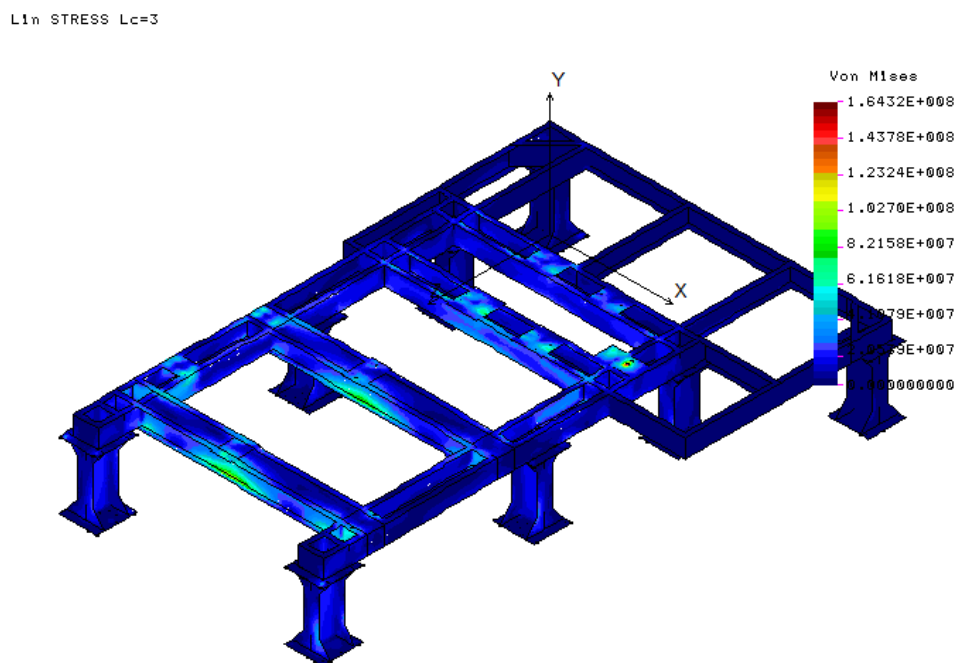
Tabela 2 – Deslocamentos máximos.

Caso de Carga	Deslocamento [mm]
LC1	1,5
LC2	4,4
LC3	3,8
LC4	1,1
LC5	3,7
LC6	3,2

Fonte: (do próprio autor)

Os resultados para o caso de carga que apresenta menor margem de segurança, o caso de carga LC3, o qual considera o peso próprio, carga sísmica vertical no sentido negativo do eixo Y, carga sísmica horizontal no sentido oblíquo dos eixos X e Z e a carga de curto-circuito podem ser visualizados a seguir:

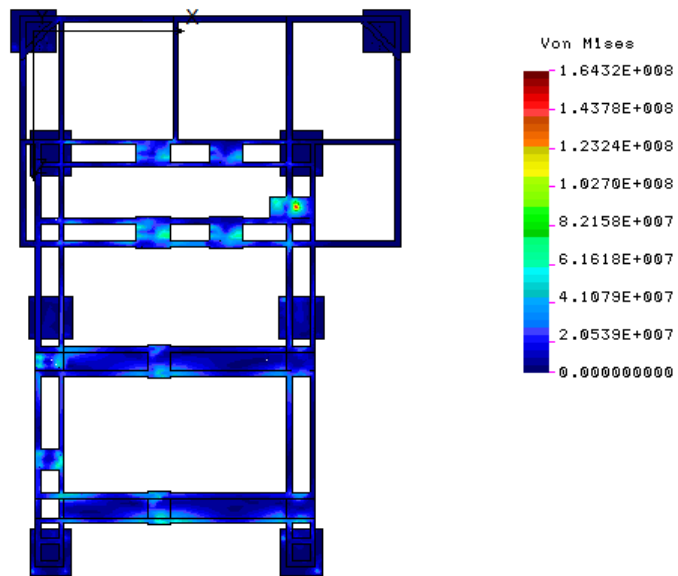
Figura 21 – Tensões LC3 (Von Mises) [Pa].



Fonte: (do próprio autor)

Figura 22 – Tensões LC3 (Von Mises) [Pa] – Vista superior.

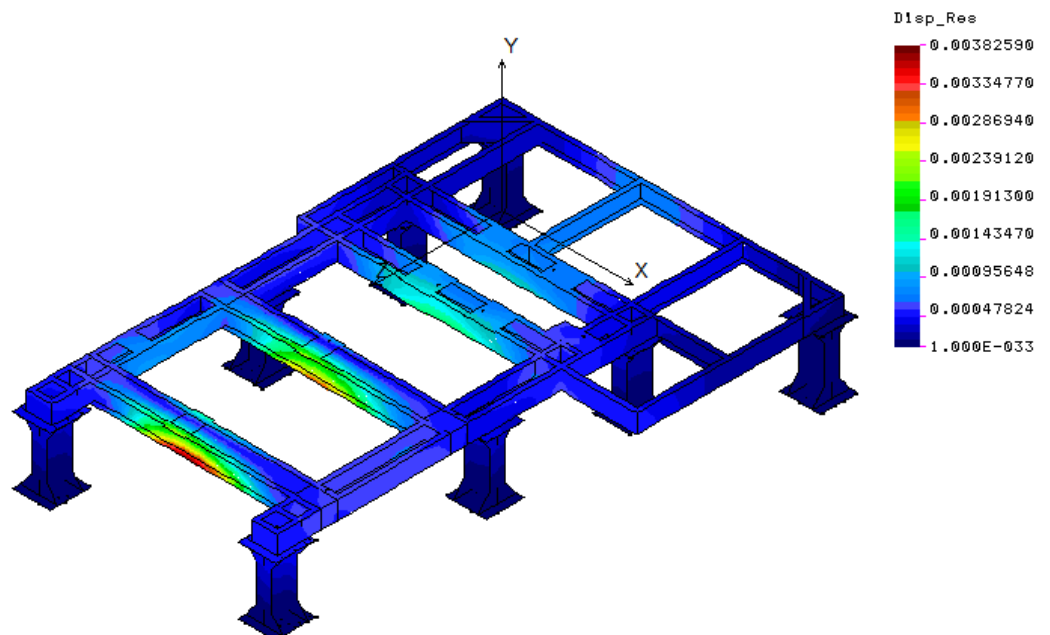
L1n STRESS Lc=3



Fonte: (do próprio autor)

Figura 23 – Deslocamentos LC3 [m].

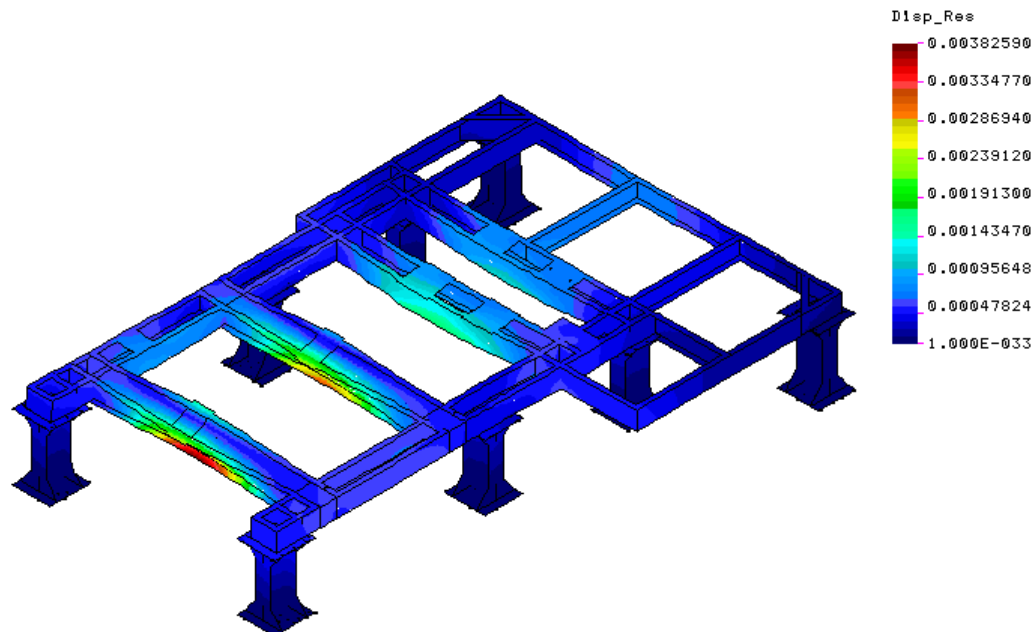
L1n DISP Lc=3



Fonte: (do próprio autor)

Figura 24 – Deslocamentos LC3 [m] – Configuração deformada.

Lin DISP Lc=3



Fonte: (do próprio autor)

#### 4.3 ELEMENTOS DE LIGAÇÃO – PARAFUSOS

Os parafusos são analisados de acordo com a norma brasileira NBR-8800, seção 6.3, página 76. Os cálculos e tabelas contendo os resultados obtidos são apresentados a seguir:

Aplicação da norma NBR8800 para os parafusos da estrutura, todos os parafusos de ligação são parafusos M16 classe 8.800:

Cálculo da Área resistente (NBR8800, seção 6.3.2.2):

$$A_b = \frac{\pi \times d_b^2}{4} = 201,06 \text{ mm}^2$$

$$A_{be} = 0,75 \times A_b = 150,8 \text{ mm}^2$$

$A_{be}$  : Área resistente ou área efetiva do parafuso;

$d_b$  : Diâmetro externo da rosca = 16mm

$A_{be}$  : Área resistente ou área efetiva do parafuso;

Força de tração resistente (NBR8800, seção 6.3.3.1):

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{be} \times f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{150,8 \times 800}{1,35} = 89,4 \text{ kN}$$

$f_{ub}$  : Resistência a ruptura do parafuso, especificada no Anexo A da norma NBR8800;

$\gamma_{a2}$  : Coeficiente de ponderação da resistência a ruptura (seção 4.8.2.3 – pág. 23)

Força de cisalhamento resistente (NBR8800, seção 6.3.3.2):

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 \times A_b \times f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{0,4 \times 201,06 \times 800}{1,35} = 47,7 \text{ kN}$$

Tração e corte combinados (NBR8800, seção 6.3.3.4):

$$\left( \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1,0$$

Margem de segurança:

$$MS = \left\{ \left( \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \right\}^{-1} - 1$$

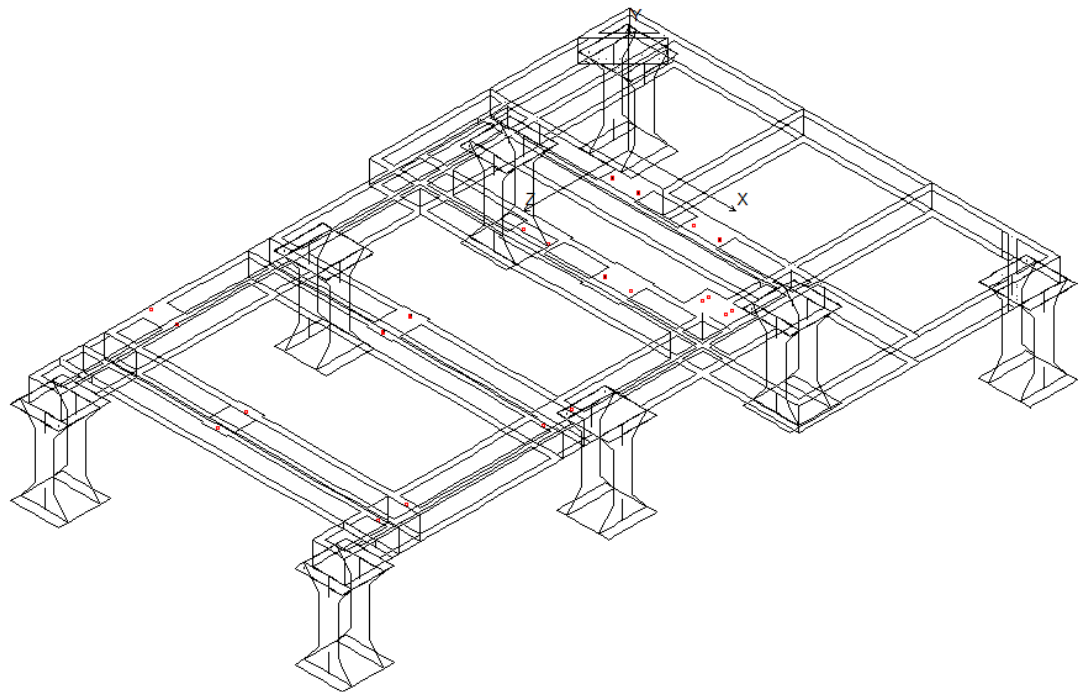
Para obter os esforços nos parafusos, são modelados elementos do tipo BEAM3D e com resultados extraídos do caso de carga LC3 é construída a tabela a seguir:

Tabela 3 – Verificação dos parafusos.

Caso de Carga	$F_{t,Sd}$ [N]	$F_{v,Sd}$ [N]	$F_{t,Rd}$ [N]	$F_{v,Rd}$ [N]	$\left(\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1,0$	MS
14691	2,47E+04	8,34E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,11	>2
14692	3,94E+04	3,26E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,20	>2
14693	3,35E+04	4,89E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,15	>2
14694	2,09E+04	4,41E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,06	>2
14695	2,90E+04	2,25E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,11	>2
14696	1,82E+04	6,85E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,06	>2
14697	1,54E+04	4,70E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,04	>2
14698	3,03E+04	6,65E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,13	>2
14699	2,32E+04	3,30E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,07	>2
14700	1,45E+04	3,14E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,03	>2
14701	8,05E+03	2,52E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,01	>2
14702	1,55E+04	3,01E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,03	>2
14703	6,93E+03	2,23E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,01	>2
14704	1,34E+04	2,52E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,03	>2
14705	5,73E+03	1,80E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,01	>2
14706	1,11E+04	2,17E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,02	>2
14925	4,68E+03	1,61E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,00	>2
14926	9,01E+03	1,58E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,01	>2
14927	2,67E+04	2,74E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,09	>2
14928	1,58E+04	1,39E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,03	>2
14929	5,05E+04	1,16E+03	8,94E+04	4,77E+04	0,32	>2
<b>14930</b>	<b>7,10E+04</b>	<b>5,71E+03</b>	<b>8,94E+04</b>	<b>4,77E+04</b>	<b>0,65</b>	<b>0,5</b>

Fonte: (do próprio autor)

Figura 25 – Localização dos parafusos.



Fonte: (do próprio autor)

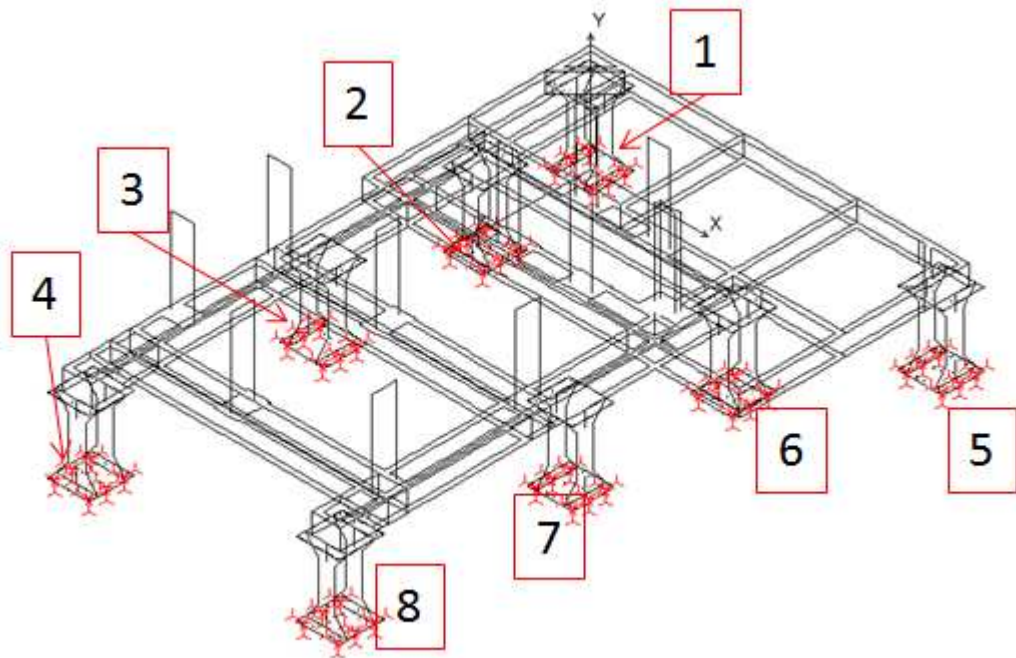
#### 4.4 REAÇÕES DE APOIO E CALCULO DOS CHUMBADORES

O projeto especifica 6 chumbadores por base, a representação no modelo e os números dos nós com condição de contorno são encontradas na

Figura 26 e Figura 27:



Figura 26 – Localização dos chumbadores.



Fonte: (do próprio autor)

Figura 27 – Numeração dos nós de acordo com as tabelas.

4	3	2	1
1582 1461 1450	690 618 628	1105 984 973	213 140 151
1644 1525 1530	576 487 496	1167 1048 1053	99 10 19
			Z ↓ X
7869 7750 7755	6801 6712 6721	7392 7273 7278	11901 11812 11821
7807 7686 7675	6915 6843 6853	7330 7209 7198	12015 11943 11953
8	7	6	5

Fonte: (do próprio autor)

As reações de apoio para todos os casos de carga são apresentados nas tabelas 4 à 9:

Tabela 4 – Reações de apoio, LC1.

Nó	RFX [N]	RFY [N]	RFZ [N]
10	-9,93E+02	2,40E+02	-1,48E+02
19	-3,43E+02	1,39E+02	4,82E+02
99	-4,58E+02	1,63E+01	-7,15E+02
140	-1,12E+03	-4,15E+03	-2,25E+02
151	-4,55E+02	-4,15E+03	-1,12E+03
213	-3,76E+02	-9,97E+02	3,44E+02
487	-4,56E+03	1,26E+03	1,76E+03
496	-1,84E+03	5,64E+02	5,25E+03
576	-1,48E+03	4,23E+02	-1,56E+03
618	-5,35E+03	-2,38E+04	3,14E+02
628	-1,44E+03	-1,48E+04	-3,84E+03
690	-2,02E+03	-1,37E+04	4,10E+03
973	-1,80E+03	-6,71E+03	-1,87E+02
984	-1,19E+03	-3,12E+03	-1,41E+02
1048	-1,36E+03	-1,45E+02	-9,79E+01
1053	-2,00E+03	1,50E+02	8,53E+00
1105	-2,01E+03	-8,45E+03	2,19E+01
1167	-2,46E+03	1,87E+02	-1,43E+02
1450	-3,11E+03	-1,32E+04	-6,46E+02
1461	-1,32E+03	-4,56E+03	-8,14E+02
1525	-1,71E+03	-2,45E+02	-1,05E+03
1530	-3,51E+03	2,36E+02	-5,45E+02
1582	-1,44E+03	-9,38E+03	-4,97E+02
1644	-2,89E+03	1,73E+02	-6,98E+02
6712	-9,43E+03	-2,46E+04	8,20E+02
6721	-2,92E+03	-1,24E+04	-4,03E+03
6801	-3,46E+03	-1,60E+04	5,52E+03
6843	-9,13E+03	1,64E+03	1,27E+03
6853	-3,46E+03	3,76E+02	6,58E+03

6915	-3,02E+03	4,69E+02	-3,89E+03
7198	-4,86E+03	1,44E+02	9,10E+02
7209	-3,01E+03	-3,78E+02	9,42E+02
7273	-2,20E+03	-2,52E+03	7,99E+02
7278	-1,69E+03	-5,51E+03	3,81E+02
7330	-4,89E+03	1,21E+02	2,57E+02
7392	-3,22E+03	-8,95E+03	7,40E+02
7675	-6,23E+03	3,18E+02	-1,29E+03
7686	-3,48E+03	-5,56E+02	-2,65E+03
7750	-2,41E+03	-4,51E+03	-2,16E+03
7755	-4,92E+03	-1,50E+04	-1,69E+03
7807	-6,05E+03	1,26E+02	-1,93E+03
7869	-1,23E+03	-1,02E+04	-1,39E+03
11812	-1,29E+03	-3,32E+03	2,98E+01
11821	-4,45E+02	-1,67E+03	-6,07E+02
11901	-5,28E+02	-2,18E+03	7,27E+02
11943	-1,25E+03	2,25E+02	2,49E+02
11953	-5,12E+02	5,64E+01	9,20E+02
12015	-4,58E+02	6,84E+01	-3,45E+02
GAPS	0,00E+00	3,79E+05	0,00E+00

---

Fonte: (do próprio autor)

Tabela 5 – Reações de apoio, LC2.

Nó	RFX [N]	RFY [N]	RFZ [N]
10	7,16E+02	-3,32E+03	-6,88E+02
19	3,07E+02	-7,05E+03	-1,26E+03
99	-1,83E+02	1,19E+02	-1,99E+03
140	-4,55E+02	-3,09E+03	-9,20E+02
151	-2,17E+02	-6,84E+03	-1,29E+03
213	2,71E+02	1,21E+02	-2,17E+03
487	2,97E+02	1,50E+02	-1,24E+03
496	1,85E+02	-2,03E+03	-3,45E+02
576	-3,11E+02	1,64E+01	-2,92E+03

618	-1,41E+02	-8,72E+02	-7,09E+02
628	-1,94E+02	-3,65E+03	-6,05E+02
690	3,54E+02	4,17E+01	-1,99E+03
973	-4,87E+03	-1,32E+04	-2,18E+03
984	-3,52E+01	-3,95E+03	-2,46E+03
1048	1,25E+03	-4,15E+03	-2,87E+03
1053	5,26E+03	-1,42E+04	-2,37E+03
1105	4,18E+03	1,39E+02	-2,24E+03
1167	-1,37E+03	-2,69E+00	-2,14E+03
1450	-3,81E+03	-6,37E+03	-4,52E+03
1461	6,67E+02	-1,72E+03	-6,43E+03
1525	1,59E+03	-3,90E+03	-6,21E+03
1530	7,87E+03	-1,59E+04	-4,73E+03
1582	6,58E+03	5,07E+01	-4,88E+03
1644	-4,51E+03	1,05E+02	-4,60E+03
6712	-1,39E+03	-1,45E+03	-2,87E+03
6721	-8,02E+02	-7,86E+03	-1,89E+03
6801	5,45E+02	7,81E+01	-5,43E+03
6843	7,53E+00	-2,60E+03	-2,48E+03
6853	3,80E+02	-9,18E+03	-1,90E+03
6915	-1,01E+03	1,04E+02	-4,96E+03
7198	6,44E+03	-1,91E+04	-2,27E+03
7209	3,96E+02	-5,52E+03	-2,33E+03
7273	-1,22E+03	-4,80E+03	-2,83E+03
7278	-5,67E+03	-1,56E+04	-2,44E+03
7330	-4,54E+03	1,71E+02	-2,27E+03
7392	1,82E+03	1,05E+02	-2,24E+03
7675	3,89E+03	-8,84E+03	-3,68E+03
7686	-5,27E+02	-2,53E+03	-5,03E+03
7750	-1,71E+03	-4,82E+03	-4,78E+03
7755	-8,02E+03	-1,88E+04	-3,89E+03
7807	-5,93E+03	7,01E+01	-4,00E+03
7869	3,99E+03	1,22E+02	-3,71E+03

11812	-2,75E+02	-1,50E+03	-4,08E+02
11821	-1,61E+02	-3,28E+03	-6,49E+02
11901	1,41E+02	6,80E+01	-1,02E+03
11943	2,34E+02	-1,03E+03	-6,18E+02
11953	1,35E+02	-2,87E+03	-6,17E+02
12015	-1,58E+02	6,07E+01	-1,27E+03
GAPS	0,00E+00	3,69E+05	0,00E+00

Fonte: (do próprio autor)

Tabela 6 – Reações de apoio, LC3.

Nó	RFX [N]	RFY [N]	RFZ [N]
10	1,50E+01	-1,52E+03	-7,49E+02
19	4,09E+01	-4,72E+03	-6,83E+02
99	-4,32E+02	8,06E+01	-2,10E+03
140	-1,06E+03	-4,81E+03	-8,09E+02
151	-4,57E+02	-8,27E+03	-1,74E+03
213	-1,48E+01	2,25E+02	-1,66E+03
487	-3,00E+03	8,25E+02	-6,78E+02
496	-9,00E+02	4,87E+02	1,57E+03
576	-1,31E+03	-3,97E+01	-3,50E+03
618	-3,35E+03	-1,44E+04	-6,35E+02
628	-1,29E+03	-1,53E+04	-3,83E+03
690	-9,23E+02	-2,78E+03	9,58E+02
973	-5,60E+03	-1,63E+04	-2,03E+03
984	-1,21E+03	-4,44E+03	-2,29E+03
1048	-8,90E+01	-2,62E+03	-2,35E+03
1053	3,17E+03	-8,12E+03	-1,93E+03
1105	1,54E+03	-2,92E+01	-1,82E+03
1167	-3,02E+03	8,87E+01	-1,95E+03
1450	-5,30E+03	-1,39E+04	-3,63E+03
1461	-6,24E+02	-3,47E+03	-5,05E+03
1525	2,20E+02	-1,54E+03	-4,80E+03
1530	4,42E+03	-5,51E+03	-3,65E+03

1582	3,66E+03	7,85E+01	-3,74E+03
1644	-5,07E+03	4,48E+01	-3,70E+03
6712	-5,64E+03	-9,91E+03	-1,37E+03
6721	-2,29E+03	-1,42E+04	-4,04E+03
6801	-1,43E+03	2,03E+02	-1,51E+03
6843	-5,22E+03	9,26E+02	-2,08E+03
6853	-1,49E+03	-8,13E+01	1,17E+03
6915	-2,40E+03	1,40E+01	-5,60E+03
7198	3,42E+03	-9,50E+03	-1,59E+03
7209	-9,65E+02	-3,01E+03	-1,60E+03
7273	-1,94E+03	-4,12E+03	-2,31E+03
7278	-5,32E+03	-1,54E+04	-1,99E+03
7330	-6,05E+03	1,03E+02	-1,88E+03
7392	3,02E+01	-1,65E+03	-1,67E+03
7675	-2,11E+02	-1,20E+03	-3,55E+03
7686	-2,15E+03	-4,56E+02	-4,86E+03
7750	-2,53E+03	-5,52E+03	-4,96E+03
7755	-8,37E+03	-2,30E+04	-3,84E+03
7807	-7,77E+03	3,71E+01	-3,97E+03
7869	2,08E+03	-1,23E+03	-3,52E+03
11812	-8,37E+02	-2,74E+03	-2,43E+02
11821	-3,76E+02	-3,87E+03	-9,34E+02
11901	-1,78E+02	-3,83E+00	-3,55E+02
11943	-5,65E+02	2,07E+02	-4,86E+02
11953	-1,66E+02	-5,94E+02	-9,55E+00
12015	-3,73E+02	3,45E+01	-1,11E+03
GAPS	0,00E+00	3,71E+05	0,00E+00

---

Fonte: (do próprio autor)

Tabela 7 – Reações de apoio, LC4.

Nó	RFX [N]	RFY [N]	RFZ [N]
10	-1,06E+03	2,72E+02	-1,07E+02
19	-3,67E+02	1,90E+02	4,38E+02
99	-4,91E+02	4,29E+01	-6,25E+02
140	-1,37E+03	-5,53E+03	-2,57E+02
151	-5,14E+02	-5,46E+03	-1,39E+03
213	-4,37E+02	-1,40E+03	4,39E+02
487	-4,92E+03	1,63E+03	3,90E+02
496	-1,70E+03	9,14E+02	3,12E+03
576	-1,90E+03	5,96E+02	-2,12E+03
618	-7,07E+03	-3,57E+04	-7,52E+02
628	-2,14E+03	-2,57E+04	-6,75E+03
690	-2,12E+03	-1,73E+04	4,67E+03
973	-3,55E+03	-1,24E+04	-4,31E+02
984	-2,05E+03	-5,76E+03	-3,12E+02
1048	-1,85E+03	-5,49E+02	-2,00E+02
1053	-2,24E+03	3,48E+02	-1,42E+02
1105	-3,44E+03	-1,33E+04	7,27E+00
1167	-3,29E+03	3,98E+02	-2,51E+02
1450	-4,04E+03	-1,97E+04	4,23E+02
1461	-2,06E+03	-8,18E+03	9,41E+02
1525	-1,67E+03	-8,30E+02	6,49E+02
1530	-4,19E+03	5,66E+02	5,19E+02
1582	-4,17E+03	-1,64E+04	8,09E+02
1644	-1,42E+03	3,24E+02	6,19E+02
6712	-8,97E+03	-3,17E+04	3,90E+02
6721	-2,74E+03	-1,85E+04	-5,28E+03
6801	-3,06E+03	-1,89E+04	5,81E+03
6843	-7,78E+03	1,74E+03	8,02E+02
6853	-2,90E+03	6,21E+02	5,25E+03

6915	-2,67E+03	6,02E+02	-3,49E+03
7198	-3,07E+03	1,58E+02	3,05E+02
7209	-1,96E+03	-2,46E+02	2,56E+02
7273	-1,55E+03	-3,24E+03	1,87E+02
7278	-1,90E+03	-7,13E+03	4,67E+00
7330	-3,39E+03	1,49E+02	2,24E+00
7392	-2,51E+03	-9,42E+03	2,64E+02
7675	-4,94E+03	3,92E+02	-6,44E+02
7686	-2,63E+03	-4,35E+02	-1,29E+03
7750	-2,02E+03	-6,02E+03	-9,95E+02
7755	-4,32E+03	-1,68E+04	-8,69E+02
7807	-4,59E+03	1,89E+02	-9,40E+02
7869	-2,17E+03	-1,31E+04	-6,08E+02
11812	-1,28E+03	-4,51E+03	1,11E+02
11821	-3,99E+02	-2,75E+03	-7,27E+02
11901	-5,13E+02	-2,61E+03	8,40E+02
11943	-1,07E+03	2,37E+02	3,25E+02
11953	-4,70E+02	1,02E+02	8,54E+02
12015	-3,88E+02	8,22E+01	-2,47E+02
GAPS	0,00E+00	3,14E+05	0,00E+00

---

Fonte: (do próprio autor)

Tabela 8 – Reações de apoio, LC5.

Nó	RFX [N]	RFY [N]	RFZ [N]
10	7,46E+02	-4,73E+03	-5,93E+02
19	2,97E+02	-8,89E+03	-1,48E+03
99	-2,03E+02	1,81E+02	-1,99E+03
140	-7,63E+02	-4,65E+03	-9,54E+02
151	-2,87E+02	-9,06E+03	-1,67E+03
213	1,95E+02	1,79E+02	-2,32E+03
487	2,24E+02	-4,31E+03	-1,89E+03



496	1,83E+02	-1,11E+04	-1,93E+03
576	-6,90E+02	1,46E+02	-4,31E+03
618	-1,93E+03	-9,69E+03	-1,30E+03
628	-8,57E+02	-1,48E+04	-3,15E+03
690	5,95E+01	2,41E+02	-2,19E+03
973	-7,06E+03	-1,97E+04	-2,59E+03
984	-1,05E+03	-5,86E+03	-2,78E+03
1048	6,80E+02	-5,12E+03	-3,07E+03
1053	5,59E+03	-1,59E+04	-2,57E+03
1105	3,01E+03	1,45E+02	-2,37E+03
1167	-2,52E+03	1,18E+02	-2,45E+03
1450	-5,22E+03	-1,27E+04	-3,38E+03
1461	-8,60E+01	-3,87E+03	-4,35E+03
1525	1,34E+03	-5,01E+03	-4,28E+03
1530	7,29E+03	-1,81E+04	-3,51E+03
1582	4,88E+03	9,62E+01	-3,50E+03
1644	-3,53E+03	1,07E+02	-3,34E+03
6712	-1,06E+03	-5,67E+03	-2,90E+03
6721	-6,15E+02	-1,46E+04	-2,91E+03
6801	7,93E+02	1,83E+02	-5,94E+03
6843	1,59E+03	-8,48E+03	-2,37E+03
6853	8,73E+02	-1,66E+04	-3,46E+03
6915	-5,79E+02	3,03E+02	-4,66E+03
7198	9,15E+03	-2,71E+04	-2,90E+03
7209	1,51E+03	-8,08E+03	-2,93E+03
7273	-7,83E+02	-6,63E+03	-3,22E+03
7278	-6,89E+03	-2,00E+04	-2,87E+03
7330	-3,11E+03	1,91E+02	-2,56E+03
7392	2,95E+03	1,58E+02	-2,68E+03
7675	5,86E+03	-1,58E+04	-3,03E+03
7686	2,81E+02	-4,96E+03	-3,64E+03

7750	-1,48E+03	-6,23E+03	-3,54E+03
7755	-8,01E+03	-2,20E+04	-3,14E+03
7807	-4,58E+03	1,25E+02	-3,08E+03
7869	3,43E+03	1,32E+02	-2,93E+03
11812	-2,64E+02	-2,52E+03	-2,90E+02
11821	-1,18E+02	-4,67E+03	-7,74E+02
11901	1,47E+02	9,93E+01	-1,02E+03
11943	4,83E+02	-1,99E+03	-5,11E+02
11953	1,84E+02	-4,21E+03	-7,98E+02
12015	-7,52E+01	6,59E+01	-1,24E+03
GAPS	0,00E+00	3,41E+05	0,00E+00

---

Fonte: (do próprio autor)

Tabela 9 – Reações de apoio, LC6.

Nó	RFX [N]	RFY [N]	RFZ [N]
10	2,45E+01	-2,55E+03	-6,30E+02
19	2,33E+01	-6,32E+03	-8,36E+02
99	-4,62E+02	8,65E+01	-2,17E+03
140	-1,38E+03	-6,45E+03	-8,50E+02
151	-5,29E+02	-1,05E+04	-2,14E+03
213	-9,54E+01	2,55E+02	-1,78E+03
487	-2,88E+03	1,40E+03	-1,98E+03
496	-8,14E+02	-3,21E+03	3,68E+02
576	-1,76E+03	8,58E+01	-4,96E+03
618	-5,33E+03	-2,64E+04	-1,64E+03
628	-2,01E+03	-2,71E+04	-6,76E+03
690	-1,06E+03	-6,03E+03	1,44E+03
973	-7,77E+03	-2,30E+04	-2,40E+03
984	-2,12E+03	-6,38E+03	-2,53E+03
1048	-6,96E+02	-3,45E+03	-2,49E+03
1053	3,40E+03	-9,96E+03	-2,12E+03
1105	6,45E+02	-1,72E+03	-1,94E+03
1167	-4,31E+03	1,06E+02	-2,22E+03
1450	-6,64E+03	-2,12E+04	-2,47E+03
1461	-1,36E+03	-5,65E+03	-2,93E+03
1525	-1,08E+02	-2,54E+03	-2,82E+03
1530	3,69E+03	-7,78E+03	-2,40E+03
1582	1,97E+03	-3,55E+02	-2,30E+03
1644	-4,14E+03	5,13E+01	-2,40E+03
6712	-5,15E+03	-1,61E+04	-1,77E+03
6721	-2,13E+03	-2,11E+04	-5,39E+03
6801	-1,05E+03	-6,22E+02	-1,35E+03
6843	-3,71E+03	1,09E+03	-2,60E+03
6853	-9,55E+02	-2,48E+03	3,77E+02

6915	-2,08E+03	1,09E+01	-5,91E+03
7198	5,86E+03	-1,63E+04	-2,14E+03
7209	1,29E+02	-5,19E+03	-2,13E+03
7273	-1,49E+03	-5,85E+03	-2,61E+03
7278	-6,37E+03	-1,95E+04	-2,33E+03
7330	-4,47E+03	1,50E+02	-2,09E+03
7392	9,82E+02	-1,22E+03	-2,03E+03
7675	2,12E+03	-4,53E+03	-2,87E+03
7686	-1,31E+03	-1,52E+03	-3,51E+03
7750	-2,36E+03	-6,51E+03	-3,72E+03
7755	-8,51E+03	-2,62E+04	-3,12E+03
7807	-6,61E+03	2,26E+01	-3,10E+03
7869	1,55E+03	-1,64E+03	-2,78E+03
11812	-8,28E+02	-3,80E+03	-1,50E+02
11821	-3,31E+02	-5,17E+03	-1,06E+03
11901	-1,67E+02	-1,09E+02	-2,99E+02
11943	-3,07E+02	-7,55E+01	-3,83E+02
11953	-1,24E+02	-1,46E+03	-8,39E+01
12015	-3,03E+02	1,81E+01	-1,12E+03
GAPS	0,00E+00	3,27E+05	0,00E+00

---

Fonte: (do próprio autor)

Os chumbadores são de 1", fabricados com o material ASTM A-193 B7, seguem os cálculos, seguindo a mesma metodologia aplicada na verificação dos parafusos:

$$A_b = \frac{\pi \times d_b^2}{4} = 506,71 \text{ mm}^2$$

$$A_{be} = 0,75 \times A_b = 380,03 \text{ mm}^2$$

Diâmetro externo = 25,4mm

$$F_{t,Rd} = \frac{A_{be} \times f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{380,03 \times 860}{1,35} = 242 \text{ kN}$$

Resistência a ruptura do material = 860MPa.

$$F_{v,Rd} = \frac{0,4 \times A_b \times f_{ub}}{\gamma_{a2}} = \frac{0,4 \times 506,71 \times 860}{1,35} = 129 \text{ kN}$$

Esforços máximos são encontrados no nó 618, LC4:

$$F_{t,Sd} = 35670N$$

$$F_{v,Sd} = 7110N$$

$$\left( \frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \right)^2 + \left( \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \right)^2 = 0,025$$

$$M.S > 2$$

## 5 CONCLUSÕES

As tensões atuantes e esforços máximos resultantes das análises e verificações apresentados no capítulo 4 são inferiores aos admissíveis, desta forma, não são esperados problemas estruturais no suporte do interruptor, sujeito a cargas de curto circuito e cargas sísmicas.

Além de se avaliar a estrutura do suporte do interruptor, o trabalho também demonstrou a metodologia de cálculo para estruturas sujeitas a cargas sísmicas, assim, podemos expandir o raciocínio adotado neste trabalho para outras estruturas, atentando sempre para as curvas de espectro de resposta, que dependem da frequência natural da estrutura e amortecimento modal.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **AISC 360–05: Specification for structural steel buildings**. Chicago, 2005.

ASSAN, A. E., **Método dos Elementos Finitos**. 2ª edição. Campinas: Editora da Unicamp, 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projetos de estruturas de aço e de estruturas e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, A. F. M. - **Mecânica dos Sólidos e Métodos dos Elementos Finitos**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

AZEVEDO, A. F. M. - **Método dos Elementos Finitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

BUCHHOLDT, H. A. **An introduction to cable roof structures**. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1999. 285 p.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE). **Manual de diseño de obras civiles: Estructuras: criterios de diseño: C.1.3. Diseño por sismo**. México, DF, 1993. 36 p.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES, DISEÑO SISMICO, **ETG-1015**, ENDESA, 1987.

GESUALDO, Professor Francisco Antonio Romero. **Método dos Elementos Finitos**. 2010. 53 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Cívil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

GUIMARÃES, W. R. S.. **Método dos Elementos Finitos Generalizados com Continuidade C1 Aplicados a Placas de Kirchhoff**. 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Puc - Mg, Belo Horizonte, 2006.

McGUIRE, W. **Steel structures**, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1968, 1112 p.

MIRANDA, Daniel H. L. - **Análise estrutural do suporte de pastilha de grafite para lubrificação de roda ferroviária.** Guaratinguetá, 2015. 89 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

MOREIRA, André F. R. **Caracterização do fator de intensidade de tensão em corpos trincados através do método dos elementos finitos.** Guaratinguetá, 2015. 68 p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

TAVARES, André Guilherme da Silva. **Método dos Elementos Finitos.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mecânica Espacial e Controle, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

SHIGLEY, Joseph Edward. **Elementos de máquina Volume 1.** 3. ed. Rio de Janeiro: LTC: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. v. 3, 347 p.



## APÊNDICE A – Resultados da análise modal

F R E Q U E N C Y    A N A L Y S I S  
by  
S U B S P A C E    A L G O R I T H M

FREQUENCY NUMBER	FREQUENCY (RAD/SEC)	FREQUENCY (CYCLES/SEC)	PERIOD (SECONDS)
1	0.2443249E+02	0.3888552E+01	0.2571652E+00
2	0.2457797E+02	0.3911706E+01	0.2556429E+00
3	0.2630379E+02	0.4186378E+01	0.2388700E+00
4	0.2864399E+02	0.4558833E+01	0.2193544E+00
5	0.2890873E+02	0.4600967E+01	0.2173456E+00
6	0.3094952E+02	0.4925769E+01	0.2030140E+00
7	0.3168737E+02	0.5043201E+01	0.1982867E+00
8	0.3384853E+02	0.5387161E+01	0.1856265E+00
9	0.3479710E+02	0.5538130E+01	0.1805664E+00
10	0.3636037E+02	0.5786933E+01	0.1728031E+00
11	0.4115549E+02	0.6550100E+01	0.1526694E+00
12	0.6367949E+02	0.1013491E+02	0.9866890E-01
13	0.6545048E+02	0.1041677E+02	0.9599907E-01
14	0.6743581E+02	0.1073274E+02	0.9317283E-01
15	0.7280542E+02	0.1158734E+02	0.8630107E-01
16	0.9756304E+02	0.1552764E+02	0.6440129E-01
17	0.1019960E+03	0.1623317E+02	0.6160226E-01
18	0.1055370E+03	0.1679674E+02	0.5953538E-01
19	0.1140632E+03	0.1815372E+02	0.5508514E-01
20	0.1216402E+03	0.1935964E+02	0.5165384E-01
21	0.1331494E+03	0.2119139E+02	0.4718898E-01
22	0.1442329E+03	0.2295537E+02	0.4356278E-01
23	0.1905371E+03	0.3032491E+02	0.3297619E-01
24	0.2060072E+03	0.3278706E+02	0.3049984E-01
25	0.2230412E+03	0.3549810E+02	0.2817052E-01
26	0.2735475E+03	0.4353644E+02	0.2296926E-01
27	0.2841665E+03	0.4522650E+02	0.2211093E-01
28	0.3047809E+03	0.4850738E+02	0.2061542E-01
29	0.3280498E+03	0.5221074E+02	0.1915315E-01
30	0.3385974E+03	0.5388946E+02	0.1855651E-01
31	0.3525481E+03	0.5610977E+02	0.1782221E-01
32	0.3571485E+03	0.5684194E+02	0.1759264E-01
33	0.3915312E+03	0.6231412E+02	0.1604773E-01
34	0.4094378E+03	0.6516405E+02	0.1534589E-01
35	0.4223919E+03	0.6722576E+02	0.1487525E-01
36	0.4307651E+03	0.6855840E+02	0.1458610E-01
37	0.4406738E+03	0.7013542E+02	0.1425813E-01
38	0.4485445E+03	0.7138808E+02	0.1400794E-01
39	0.4556230E+03	0.7251465E+02	0.1379032E-01
40	0.4725699E+03	0.7521184E+02	0.1329578E-01
41	0.4734941E+03	0.7535893E+02	0.1326983E-01
42	0.4801570E+03	0.7641936E+02	0.1308569E-01
43	0.4877429E+03	0.7762669E+02	0.1288217E-01
44	0.5142532E+03	0.8184594E+02	0.1221808E-01
45	0.5206761E+03	0.8286818E+02	0.1206736E-01
46	0.5248757E+03	0.8353656E+02	0.1197081E-01
47	0.5375687E+03	0.8555671E+02	0.1168815E-01
48	0.5414047E+03	0.8616723E+02	0.1160534E-01
49	0.5680796E+03	0.9041267E+02	0.1106040E-01
50	0.5878890E+03	0.9356544E+02	0.1068771E-01
51	0.6311043E+03	0.1004434E+03	0.9955859E-02
52	0.6354086E+03	0.1011284E+03	0.9888418E-02
53	0.6506057E+03	0.1035471E+03	0.9657440E-02
54	0.7022585E+03	0.1117679E+03	0.8947111E-02
55	0.7181606E+03	0.1142988E+03	0.8748998E-02

56	0.7607498E+03	0.1210771E+03	0.8259201E-02
57	0.8372479E+03	0.1332521E+03	0.7504570E-02
58	0.8764579E+03	0.1394926E+03	0.7168839E-02
59	0.8785138E+03	0.1398198E+03	0.7152062E-02
60	0.8945668E+03	0.1423747E+03	0.7023718E-02
61	0.8971600E+03	0.1427874E+03	0.7003417E-02
62	0.8995209E+03	0.1431632E+03	0.6985036E-02
63	0.9050519E+03	0.1440435E+03	0.6942348E-02
64	0.9358211E+03	0.1489405E+03	0.6714088E-02
65	0.9409455E+03	0.1497561E+03	0.6677524E-02
66	0.9477160E+03	0.1508337E+03	0.6629819E-02
67	0.9572622E+03	0.1523530E+03	0.6563703E-02
68	0.9787237E+03	0.1557687E+03	0.6419774E-02
69	0.9797864E+03	0.1559378E+03	0.6412811E-02
70	0.9828511E+03	0.1564256E+03	0.6392815E-02
71	0.1011942E+04	0.1610555E+03	0.6209038E-02
72	0.1016888E+04	0.1618427E+03	0.6178840E-02
73	0.1025474E+04	0.1632093E+03	0.6127103E-02
74	0.1048958E+04	0.1669469E+03	0.5989929E-02
75	0.1059029E+04	0.1685497E+03	0.5932969E-02
76	0.1069033E+04	0.1701419E+03	0.5877447E-02
77	0.1074464E+04	0.1710063E+03	0.5847738E-02
78	0.1085037E+04	0.1726890E+03	0.5790755E-02
79	0.1088967E+04	0.1733145E+03	0.5769856E-02
80	0.1100176E+04	0.1750984E+03	0.5711074E-02
81	0.1106435E+04	0.1760945E+03	0.5678768E-02
82	0.1115403E+04	0.1775218E+03	0.5633109E-02
83	0.1128649E+04	0.1796300E+03	0.5566998E-02
84	0.1138805E+04	0.1812465E+03	0.5517349E-02
85	0.1145050E+04	0.1822403E+03	0.5487259E-02
86	0.1156827E+04	0.1841147E+03	0.5431397E-02
87	0.1161397E+04	0.1848420E+03	0.5410026E-02
88	0.1171844E+04	0.1865047E+03	0.5361794E-02
89	0.1187741E+04	0.1890348E+03	0.5290032E-02
90	0.1194749E+04	0.1901501E+03	0.5259002E-02
91	0.1238990E+04	0.1971914E+03	0.5071214E-02
92	0.1264282E+04	0.2012167E+03	0.4969767E-02
93	0.1274844E+04	0.2028977E+03	0.4928591E-02
94	0.1325447E+04	0.2109515E+03	0.4740427E-02
95	0.1345818E+04	0.2141936E+03	0.4668673E-02
96	0.1365512E+04	0.2173280E+03	0.4601341E-02
97	0.1396314E+04	0.2222302E+03	0.4499838E-02
98	0.1423554E+04	0.2265656E+03	0.4413732E-02
99	0.1428609E+04	0.2273702E+03	0.4398114E-02
100	0.1445181E+04	0.2300077E+03	0.4347680E-02
101	0.1447481E+04	0.2303738E+03	0.4340771E-02
102	0.1458499E+04	0.2321272E+03	0.4307982E-02
103	0.1470460E+04	0.2340310E+03	0.4272939E-02
104	0.1485263E+04	0.2363869E+03	0.4230353E-02
105	0.1496425E+04	0.2381635E+03	0.4198796E-02
106	0.1502821E+04	0.2391814E+03	0.4180926E-02
107	0.1506508E+04	0.2397682E+03	0.4170696E-02
108	0.1516798E+04	0.2414059E+03	0.4142400E-02
109	0.1517964E+04	0.2415914E+03	0.4139220E-02
110	0.1529764E+04	0.2434696E+03	0.4107289E-02
111	0.1532546E+04	0.2439123E+03	0.4099834E-02
112	0.1547266E+04	0.2462550E+03	0.4060831E-02
113	0.1548737E+04	0.2464891E+03	0.4056974E-02
114	0.1568823E+04	0.2496859E+03	0.4005031E-02
115	0.1570996E+04	0.2500317E+03	0.3999493E-02
116	0.1573637E+04	0.2504521E+03	0.3992780E-02
117	0.1590779E+04	0.2531803E+03	0.3949754E-02
118	0.1595566E+04	0.2539422E+03	0.3937904E-02
119	0.1599931E+04	0.2546369E+03	0.3927161E-02
120	0.1607428E+04	0.2558301E+03	0.3908844E-02
121	0.1608253E+04	0.2559614E+03	0.3906840E-02
122	0.1611738E+04	0.2565160E+03	0.3898392E-02
123	0.1612473E+04	0.2566331E+03	0.3896614E-02
124	0.1613125E+04	0.2567368E+03	0.3895039E-02
125	0.1614780E+04	0.2570002E+03	0.3891047E-02
126	0.1619024E+04	0.2576757E+03	0.3880846E-02
127	0.1630477E+04	0.2594984E+03	0.3853588E-02

128	0.1648130E+04	0.2623080E+03	0.3812312E-02
129	0.1654668E+04	0.2633486E+03	0.3797249E-02
130	0.1663977E+04	0.2648302E+03	0.3776005E-02
131	0.1670497E+04	0.2658678E+03	0.3761268E-02
132	0.1677559E+04	0.2669918E+03	0.3745433E-02
133	0.1682250E+04	0.2677384E+03	0.3734989E-02
134	0.1695512E+04	0.2698491E+03	0.3705774E-02
135	0.1698736E+04	0.2703622E+03	0.3698742E-02
136	0.1711117E+04	0.2723327E+03	0.3671980E-02
137	0.1715084E+04	0.2729641E+03	0.3663486E-02
138	0.1717722E+04	0.2733840E+03	0.3657859E-02
139	0.1736871E+04	0.2764316E+03	0.3617532E-02
140	0.1753684E+04	0.2791075E+03	0.3582849E-02
141	0.1768698E+04	0.2814971E+03	0.3552435E-02
142	0.1770583E+04	0.2817970E+03	0.3548654E-02
143	0.1780718E+04	0.2834100E+03	0.3528457E-02
144	0.1789172E+04	0.2847555E+03	0.3511785E-02
145	0.1789968E+04	0.2848823E+03	0.3510222E-02
146	0.1790983E+04	0.2850438E+03	0.3508233E-02
147	0.1799049E+04	0.2863275E+03	0.3492504E-02
148	0.1806001E+04	0.2874339E+03	0.3479060E-02
149	0.1816988E+04	0.2891825E+03	0.3458023E-02
150	0.1818233E+04	0.2893807E+03	0.3455655E-02
151	0.1830476E+04	0.2913292E+03	0.3432543E-02
152	0.1837842E+04	0.2925016E+03	0.3418785E-02
153	0.1844034E+04	0.2934871E+03	0.3407305E-02
154	0.1849496E+04	0.2943563E+03	0.3397243E-02
155	0.1864122E+04	0.2966842E+03	0.3370587E-02
156	0.1868247E+04	0.2973408E+03	0.3363144E-02
157	0.1871551E+04	0.2978667E+03	0.3357207E-02
158	0.1882558E+04	0.2996184E+03	0.3337578E-02
159	0.1896596E+04	0.3018527E+03	0.3312875E-02
160	0.1902053E+04	0.3027212E+03	0.3303370E-02
161	0.1914368E+04	0.3046811E+03	0.3282121E-02
162	0.1918116E+04	0.3052776E+03	0.3275707E-02
163	0.1926671E+04	0.3066392E+03	0.3261162E-02
164	0.1941263E+04	0.3089615E+03	0.3236649E-02
165	0.1942503E+04	0.3091589E+03	0.3234583E-02
166	0.1954594E+04	0.3110834E+03	0.3214573E-02
167	0.1960437E+04	0.3120132E+03	0.3204993E-02
168	0.1962670E+04	0.3123686E+03	0.3201346E-02
169	0.1966461E+04	0.3129720E+03	0.3195174E-02
170	0.1974199E+04	0.3142035E+03	0.3182650E-02
171	0.1992808E+04	0.3171652E+03	0.3152931E-02
172	0.2010437E+04	0.3199709E+03	0.3125284E-02
173	0.2021736E+04	0.3217693E+03	0.3107817E-02
174	0.2034325E+04	0.3237729E+03	0.3088584E-02
175	0.2035671E+04	0.3239871E+03	0.3086542E-02
176	0.2043774E+04	0.3252767E+03	0.3074306E-02
177	0.2048648E+04	0.3260525E+03	0.3066991E-02
178	0.2052909E+04	0.3267306E+03	0.3060625E-02
179	0.2061151E+04	0.3280423E+03	0.3048388E-02
180	0.2069608E+04	0.3293884E+03	0.3035930E-02
181	0.2076211E+04	0.3304393E+03	0.3026274E-02
182	0.2093231E+04	0.3331481E+03	0.3001668E-02
183	0.2100052E+04	0.3342337E+03	0.2991919E-02
184	0.2120557E+04	0.3374971E+03	0.2962988E-02
185	0.2124955E+04	0.3381971E+03	0.2956855E-02
186	0.2126327E+04	0.3384155E+03	0.2954947E-02
187	0.2128890E+04	0.3388234E+03	0.2951390E-02
188	0.2139692E+04	0.3405425E+03	0.2936491E-02
189	0.2147191E+04	0.3417360E+03	0.2926235E-02
190	0.2152808E+04	0.3426300E+03	0.2918600E-02
191	0.2164460E+04	0.3444845E+03	0.2902888E-02
192	0.2181402E+04	0.3471809E+03	0.2880343E-02
193	0.2189299E+04	0.3484378E+03	0.2869953E-02
194	0.2205831E+04	0.3510689E+03	0.2848444E-02
195	0.2219966E+04	0.3533186E+03	0.2830306E-02
196	0.2229886E+04	0.3548974E+03	0.2817715E-02
197	0.2234815E+04	0.3556819E+03	0.2811501E-02
198	0.2236050E+04	0.3558784E+03	0.2809948E-02
199	0.2238010E+04	0.3561903E+03	0.2807488E-02

200	0.2239892E+04	0.3564899E+03	0.2805129E-02
201	0.2240311E+04	0.3565566E+03	0.2804604E-02
202	0.2243498E+04	0.3570638E+03	0.2800620E-02
203	0.2245407E+04	0.3573676E+03	0.2798239E-02

## Lista de participação de massa:

MODE No.	INDIVIDUAL MODAL MASS			CUMULATIVE EFFECTIVE MASS		
	TOTAL MASS			TOTAL MASS		
	Mx MASS	My MASS	Mz MASS	Cum. Mx MASS	Cum. My MASS	Cum. Mz MASS
1	0.605E-05	0.944E-05	0.893E-01	0.605E-05	0.944E-05	0.893E-01
2	0.971E-01	0.185E-06	0.216E-04	0.971E-01	0.963E-05	0.893E-01
3	0.728E-01	0.158E-04	0.929E-04	0.170	0.254E-04	0.894E-01
4	0.674E-01	0.620E-07	0.450E-04	0.237	0.255E-04	0.895E-01
5	0.114E-04	0.173E-05	0.799E-01	0.237	0.272E-04	0.169
6	0.697E-04	0.151E-03	0.785E-01	0.237	0.178E-03	0.248
7	0.516E-01	0.870E-05	0.150E-02	0.289	0.187E-03	0.249
8	0.280E-04	0.366E-06	0.956E-02	0.289	0.187E-03	0.259
9	0.968E-06	0.137E-05	0.530E-01	0.289	0.188E-03	0.312
10	0.579E-03	0.923E-04	0.727E-01	0.290	0.281E-03	0.385
11	0.241E-07	0.319E-06	0.947E-02	0.290	0.281E-03	0.394
12	0.286E-02	0.684E-03	0.104	0.292	0.965E-03	0.498
13	0.184E-01	0.900E-04	0.531E-01	0.311	0.105E-02	0.551
14	0.148	0.150E-02	0.134E-02	0.459	0.256E-02	0.552
15	0.689E-01	0.192E-02	0.107E-01	0.528	0.447E-02	0.563
16	0.108	0.150E-02	0.777E-04	0.636	0.598E-02	0.563
17	0.310E-01	0.397E-03	0.235E-03	0.667	0.637E-02	0.563
18	0.842E-02	0.358E-02	0.521E-03	0.675	0.996E-02	0.564
19	0.104E-02	0.514E-02	0.713E-01	0.676	0.151E-01	0.635
20	0.171E-01	0.802E-03	0.235E-05	0.693	0.159E-01	0.635
21	0.333E-01	0.595E-03	0.811E-05	0.726	0.165E-01	0.635
22	0.371E-03	0.234E-02	0.944E-01	0.727	0.188E-01	0.730
23	0.264E-02	0.240	0.187E-02	0.729	0.259	0.731
24	0.273E-02	0.165	0.563E-05	0.732	0.424	0.731
25	0.414E-02	0.103	0.266E-03	0.736	0.527	0.732
26	0.678E-02	0.934E-02	0.561E-01	0.743	0.536	0.788
27	0.474E-02	0.401E-02	0.400E-01	0.748	0.540	0.828
28	0.632E-03	0.477E-01	0.179E-03	0.748	0.588	0.828
29	0.403E-02	0.636E-02	0.340E-01	0.752	0.595	0.862
30	0.114	0.173E-02	0.253E-04	0.866	0.596	0.862
31	0.145E-01	0.309E-02	0.188E-01	0.881	0.599	0.881
32	0.113E-01	0.148E-02	0.212E-02	0.892	0.601	0.883
33	0.421E-04	0.671E-02	0.187E-01	0.892	0.608	0.902
34	0.156E-01	0.305E-02	0.280E-04	0.908	0.611	0.902
35	0.942E-02	0.839E-02	0.911E-04	0.917	0.619	0.902
36	0.675E-03	0.683E-01	0.177E-03	0.918	0.687	0.902
37	0.330E-02	0.308E-01	0.139E-04	0.921	0.718	0.902
38	0.263E-03	0.112E-01	0.258E-02	0.921	0.729	0.905
39	0.438E-04	0.126E-01	0.255E-02	0.921	0.742	0.907
40	0.570E-04	0.622E-02	0.411E-04	0.922	0.748	0.907
41	0.763E-05	0.351E-04	0.314E-04	0.922	0.748	0.907
42	0.192E-02	0.113E-01	0.975E-03	0.923	0.759	0.908
43	0.199E-02	0.192E-03	0.268E-03	0.925	0.760	0.908
44	0.988E-03	0.483E-01	0.147E-03	0.926	0.808	0.909
45	0.218E-02	0.234E-01	0.114E-03	0.929	0.831	0.909
46	0.897E-04	0.150E-02	0.214E-01	0.929	0.833	0.930
47	0.692E-03	0.684E-03	0.182E-02	0.929	0.834	0.932
48	0.374E-03	0.205E-03	0.353E-03	0.930	0.834	0.932
49	0.513E-03	0.176E-03	0.104E-02	0.930	0.834	0.933
50	0.243E-03	0.441E-03	0.778E-02	0.931	0.834	0.941
51	0.156E-02	0.351E-03	0.160E-03	0.932	0.835	0.941
52	0.110E-03	0.103E-02	0.161E-04	0.932	0.836	0.941
53	0.360E-02	0.318E-04	0.228E-03	0.936	0.836	0.942
54	0.475E-03	0.301E-07	0.180E-04	0.936	0.836	0.942
55	0.778E-05	0.263E-04	0.624E-03	0.936	0.836	0.942
56	0.186E-03	0.225E-03	0.278E-04	0.936	0.836	0.942
57	0.480E-03	0.272E-04	0.607E-06	0.937	0.836	0.942
58	0.300E-05	0.797E-05	0.812E-06	0.937	0.836	0.942
59	0.577E-04	0.225E-03	0.116E-04	0.937	0.836	0.942
60	0.320E-04	0.395E-04	0.142E-04	0.937	0.836	0.942
61	0.292E-05	0.200E-03	0.133E-03	0.937	0.837	0.942

62	0.287E-07	0.919E-05	0.180E-04	0.937	0.837	0.942
63	0.919E-04	0.238E-05	0.112E-04	0.937	0.837	0.942
64	0.606E-05	0.176E-09	0.745E-05	0.937	0.837	0.942
65	0.152E-04	0.916E-04	0.474E-06	0.937	0.837	0.942
66	0.263E-03	0.432E-04	0.237E-07	0.937	0.837	0.942
67	0.968E-04	0.145E-05	0.399E-05	0.938	0.837	0.942
68	0.411E-03	0.715E-05	0.200E-04	0.938	0.837	0.942
69	0.906E-05	0.271E-04	0.488E-05	0.938	0.837	0.942
70	0.720E-04	0.635E-04	0.719E-06	0.938	0.837	0.942
71	0.140E-03	0.335E-05	0.288E-05	0.938	0.837	0.942
72	0.451E-04	0.339E-04	0.410E-04	0.938	0.837	0.942
73	0.872E-04	0.318E-04	0.425E-05	0.938	0.837	0.942
74	0.102E-03	0.531E-03	0.900E-04	0.938	0.837	0.943
75	0.201E-04	0.236E-02	0.278E-05	0.938	0.840	0.943
76	0.485E-05	0.575E-04	0.194E-04	0.938	0.840	0.943
77	0.691E-05	0.398E-03	0.201E-04	0.938	0.840	0.943
78	0.131E-07	0.199E-03	0.141E-04	0.938	0.840	0.943
79	0.202E-05	0.618E-05	0.388E-04	0.938	0.840	0.943
80	0.170E-04	0.965E-03	0.717E-05	0.938	0.841	0.943
81	0.842E-05	0.124E-02	0.187E-03	0.938	0.843	0.943
82	0.273E-03	0.356E-02	0.136E-04	0.939	0.846	0.943
83	0.239E-03	0.193E-01	0.220E-05	0.939	0.865	0.943
84	0.196E-03	0.740E-03	0.897E-05	0.939	0.866	0.943
85	0.800E-08	0.493E-04	0.232E-04	0.939	0.866	0.943
86	0.324E-05	0.341E-02	0.257E-05	0.939	0.870	0.943
87	0.101E-04	0.137E-02	0.283E-04	0.939	0.871	0.943
88	0.576E-03	0.164E-02	0.251E-03	0.940	0.873	0.943
89	0.104E-03	0.363E-03	0.330E-05	0.940	0.873	0.943
90	0.507E-04	0.170E-02	0.434E-04	0.940	0.875	0.943
91	0.135E-04	0.149E-03	0.146E-03	0.940	0.875	0.943
92	0.119E-05	0.515E-03	0.212E-04	0.940	0.875	0.943
93	0.146E-03	0.111E-02	0.343E-05	0.940	0.876	0.943
94	0.371E-05	0.362E-02	0.470E-04	0.940	0.880	0.943
95	0.186E-03	0.233E-04	0.800E-06	0.940	0.880	0.943
96	0.291E-04	0.774E-04	0.702E-05	0.940	0.880	0.943
97	0.315E-05	0.349E-05	0.122E-04	0.940	0.880	0.943
98	0.135E-04	0.957E-02	0.135E-04	0.940	0.890	0.943
99	0.297E-03	0.179E-01	0.725E-04	0.941	0.908	0.944
100	0.791E-05	0.396E-03	0.682E-05	0.941	0.908	0.944
101	0.253E-05	0.768E-03	0.357E-04	0.941	0.909	0.944
102	0.130E-04	0.124E-01	0.236E-04	0.941	0.921	0.944
103	0.103E-05	0.113E-02	0.695E-04	0.941	0.922	0.944
104	0.346E-04	0.101E-02	0.124E-04	0.941	0.923	0.944
105	0.979E-05	0.536E-05	0.177E-05	0.941	0.923	0.944
106	0.457E-04	0.981E-04	0.148E-05	0.941	0.923	0.944
107	0.141E-04	0.896E-05	0.276E-05	0.941	0.923	0.944
108	0.620E-06	0.330E-03	0.509E-07	0.941	0.924	0.944
109	0.130E-04	0.218E-03	0.869E-07	0.941	0.924	0.944
110	0.106E-03	0.843E-03	0.776E-05	0.941	0.925	0.944
111	0.228E-04	0.109E-03	0.258E-06	0.941	0.925	0.944
112	0.422E-06	0.527E-04	0.373E-04	0.941	0.925	0.944
113	0.231E-03	0.118E-02	0.611E-04	0.941	0.926	0.944
114	0.239E-04	0.203E-03	0.252E-05	0.941	0.926	0.944
115	0.251E-04	0.154E-03	0.961E-05	0.941	0.927	0.944
116	0.782E-06	0.424E-07	0.430E-06	0.941	0.927	0.944
117	0.334E-06	0.228E-03	0.683E-05	0.941	0.927	0.944
118	0.187E-04	0.649E-04	0.182E-04	0.941	0.927	0.944
119	0.432E-05	0.271E-04	0.948E-04	0.941	0.927	0.944
120	0.690E-05	0.131E-03	0.377E-04	0.941	0.927	0.944
121	0.907E-07	0.308E-06	0.323E-03	0.941	0.927	0.944
122	0.196E-03	0.317E-05	0.714E-04	0.941	0.927	0.944
123	0.165E-03	0.281E-08	0.958E-06	0.942	0.927	0.944
124	0.144E-03	0.620E-05	0.195E-03	0.942	0.927	0.945
125	0.359E-03	0.144E-03	0.148E-04	0.942	0.927	0.945
126	0.193E-05	0.565E-06	0.718E-05	0.942	0.927	0.945
127	0.126E-05	0.459E-06	0.124E-04	0.942	0.927	0.945
128	0.158E-05	0.259E-03	0.585E-09	0.942	0.927	0.945
129	0.151E-05	0.385E-02	0.241E-05	0.942	0.931	0.945
130	0.317E-04	0.104E-06	0.295E-05	0.942	0.931	0.945
131	0.957E-07	0.255E-02	0.593E-05	0.942	0.934	0.945
132	0.503E-05	0.110E-02	0.353E-06	0.942	0.935	0.945
133	0.847E-05	0.213E-03	0.122E-07	0.942	0.935	0.945

134	0.826E-08	0.329E-02	0.244E-04	0.942	0.938	0.945	
135	0.192E-04	0.346E-04	0.118E-05	0.942	0.938	0.945	
136	0.191E-06	0.397E-03	0.899E-06	0.942	0.939	0.945	
137	0.256E-05	0.286E-03	0.191E-06	0.942	0.939	0.945	
138	0.446E-05	0.228E-02	0.540E-05	0.942	0.941	0.945	
139	0.124E-06	0.287E-03	0.781E-05	0.942	0.942	0.945	
140	0.814E-07	0.133E-03	0.831E-05	0.942	0.942	0.945	
141	0.420E-05	0.329E-03	0.199E-08	0.942	0.942	0.945	
142	0.187E-05	0.925E-02	0.589E-05	0.942	0.951	0.945	
143	0.488E-06	0.617E-03	0.646E-06	0.942	0.952	0.945	
144	0.693E-06	0.360E-06	0.427E-06	0.942	0.952	0.945	
145	0.102E-05	0.166E-08	0.250E-05	0.942	0.952	0.945	
146	0.327E-07	0.313E-04	0.770E-06	0.942	0.952	0.945	
147	0.589E-07	0.209E-02	0.907E-07	0.942	0.954	0.945	
148	0.199E-04	0.727E-03	0.558E-05	0.942	0.955	0.945	
149	0.711E-05	0.400E-03	0.554E-05	0.942	0.955	0.945	
150	0.112E-04	0.150E-02	0.625E-04	0.942	0.957	0.945	
151	0.798E-06	0.536E-04	0.492E-06	0.942	0.957	0.945	
152	0.836E-06	0.469E-06	0.479E-05	0.942	0.957	0.945	
153	0.953E-06	0.400E-05	0.459E-06	0.942	0.957	0.945	
154	0.922E-06	0.861E-06	0.501E-06	0.942	0.957	0.945	
155	0.110E-04	0.475E-05	0.153E-04	0.942	0.957	0.945	
156	0.159E-04	0.220E-03	0.219E-04	0.942	0.957	0.945	
157	0.878E-05	0.920E-04	0.520E-08	0.942	0.957	0.945	
158	0.128E-04	0.234E-03	0.333E-05	0.942	0.957	0.945	
159	0.107E-04	0.553E-04	0.944E-06	0.942	0.957	0.945	
160	0.258E-05	0.232E-03	0.682E-05	0.942	0.958	0.945	
161	0.351E-03	0.736E-03	0.141E-04	0.943	0.958	0.945	
162	0.350E-04	0.424E-03	0.970E-07	0.943	0.959	0.945	
163	0.523E-05	0.144E-04	0.892E-07	0.943	0.959	0.945	
164	0.188E-08	0.417E-03	0.104E-05	0.943	0.959	0.945	
165	0.190E-04	0.188E-03	0.445E-06	0.943	0.959	0.945	
166	0.850E-05	0.430E-03	0.437E-04	0.943	0.960	0.945	
167	0.628E-05	0.101E-04	0.396E-05	0.943	0.960	0.945	
168	0.257E-04	0.780E-04	0.141E-04	0.943	0.960	0.945	
169	0.138E-04	0.170E-05	0.180E-04	0.943	0.960	0.945	
170	0.874E-05	0.310E-03	0.128E-04	0.943	0.960	0.945	
171	0.246E-05	0.310E-04	0.105E-05	0.943	0.960	0.945	
172	0.756E-04	0.112E-02	0.117E-04	0.943	0.961	0.945	
173	0.905E-04	0.311E-03	0.284E-04	0.943	0.962	0.945	
174	0.123E-05	0.546E-03	0.160E-04	0.943	0.962	0.945	
175	0.346E-04	0.374E-02	0.781E-04	0.943	0.966	0.945	
176	0.923E-05	0.145E-02	0.288E-04	0.943	0.968	0.945	
177	0.473E-05	0.623E-05	0.305E-04	0.943	0.968	0.945	
178	0.753E-04	0.374E-04	0.213E-05	0.943	0.968	0.945	
179	0.101E-04	0.246E-04	0.409E-05	0.943	0.968	0.945	
180	0.185E-04	0.279E-02	0.380E-04	0.943	0.970	0.945	
181	0.106E-04	0.123E-02	0.190E-04	0.943	0.972	0.945	
182	0.345E-05	0.144E-04	0.425E-04	0.943	0.972	0.945	
183	0.238E-05	0.427E-03	0.328E-04	0.943	0.972	0.945	
184	0.258E-06	0.369E-05	0.440E-05	0.943	0.972	0.945	
185	0.191E-04	0.230E-03	0.423E-05	0.943	0.972	0.945	
186	0.141E-06	0.621E-04	0.311E-05	0.943	0.972	0.945	
187	0.240E-05	0.820E-04	0.562E-06	0.943	0.972	0.945	
188	0.182E-06	0.321E-03	0.281E-05	0.943	0.973	0.945	
189	0.451E-05	0.162E-03	0.307E-06	0.943	0.973	0.945	
190	0.753E-05	0.280E-04	0.114E-05	0.943	0.973	0.945	
191	0.382E-05	0.573E-03	0.627E-05	0.943	0.974	0.945	
192	0.540E-05	0.410E-04	0.317E-07	0.943	0.974	0.945	
193	0.571E-04	0.435E-03	0.965E-05	0.943	0.974	0.945	
194	0.206E-06	0.666E-04	0.135E-05	0.943	0.974	0.945	
195	0.776E-06	0.167E-03	0.320E-05	0.943	0.974	0.945	
196	0.242E-05	0.148E-04	0.671E-06	0.943	0.974	0.945	
197	0.519E-05	0.104E-04	0.773E-05	0.943	0.974	0.945	
198	0.363E-04	0.466E-04	0.326E-04	0.943	0.974	0.945	
199	0.348E-06	0.108E-04	0.675E-05	0.943	0.974	0.945	
200	0.129E-05	0.154E-09	0.465E-05	0.943	0.974	0.945	
TOTAL EFFECTIVE MASS							
-----				=	0.943	0.974	0.945
TOTAL MASS							

