



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-10084-PRE/5629

**ESTRUTURA MECÂNICA DOS TRANSDUTORES DO DETECTOR  
DE ONDAS GRAVITACIONAIS MARIO SCHENBERG**

Antônio Unias de Lucena\*  
José Luiz Melo

\*ITA – bolsita PIBIC/CNPq

Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE).

INPE  
São José dos Campos  
2003



**Título**

ESTUTURA MECÂNICA DOS TRANSDUTORES DO DETECTOR DE ONDAS GRAVITACIONAIS  
MARIO SCHENBERG.

**Autor**

Antônio Unias de Lucena

*Antônio Unias de Lucena*

**Tradutor**

Não há.

**Editor**

| Origem | Projeto | Série | No. de Páginas | No. de Fotos | No. de Mapas |
|--------|---------|-------|----------------|--------------|--------------|
| DMC    | Pibic   |       | 29             | 18           | 0            |

**Tipo**

RPQ  PRE  NTC  PRP  MAN  PUD  TAE

**Divulgação**

Externa  Interna  Reservada  Lista de Distribuição Anexa

**Periódico / Evento**

Seminário de Iniciação Científica do INPE - SICINPE 2003

**Convênio**

**Autorização Preliminar**

\_\_\_/\_\_\_/\_\_\_  
Data

*Mário Kato Kugo*  
Chefe do Departamento de Mecânica Espacial  
Titular da Unidade

**Revisão Técnica**

Solicitada  Dispensada

Recebida \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ Devolvida \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

*Leonel Fernando Perondi*  
Coordenador Geral  
Engenharia e Tecnologia Espacial  
Titular de Nível "A"

Assinatura do Revisor

**Revisão de Linguagem**

Solicitada  Dispensada

Recebida \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ Devolvida \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

*Leonel Fernando Perondi*  
Coordenador Geral  
Engenharia e Tecnologia Espacial  
Titular de Nível "A"

Assinatura do Revisor

**Autorização Final**

\_\_\_/\_\_\_/\_\_\_  
Data

\_\_\_\_\_  
Titular da Unidade

**Palavras Chave**

Transdutores, ondas gravitacionais, Schenberg



## Secretaria

\_\_/\_\_/\_\_

Data

Recebida \_\_/\_\_/\_\_ Devolvida \_\_/\_\_/\_\_

Encaminhado Por \_\_\_\_\_

Devolvido Por \_\_\_\_\_

## Controle e Divulgação

\_\_/\_\_/\_\_  
Data

Recebido Por: \_\_\_\_\_ Devolvido Para: \_\_\_\_\_

Pronto Para Publicação em: \_\_/\_\_/\_\_

\_\_/\_\_/\_\_  
Data

No. \_\_\_\_\_ Quant. \_\_\_\_\_

Assinatura \_\_\_\_\_

## Observações

ESTRUTURA MECÂNICA DOS TRANSDUTORES DO DETECTOR DE *g*  
ONDAS GRAVITACIONAIS MÁRIO SCHENBERG

Antônio Unias de Lucena<sup>8</sup> (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq) *Resumo*  
Dr. José Luiz Melo<sup>9</sup> (DAS/INPE)

RESUMO

Neste trabalho foi criada e desenvolvida a estrutura mecânica dos transdutores, os quais serão acoplados à massa esférica ressonante do detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg. Os transdutores terão por finalidade transformar e amplificar o sinal captado pela esfera ressonante em um sinal elétrico. Neste estudo, vários modelos em elementos finitos de possíveis transdutores a serem usados (construídos usando-se o software MSC/NASTRAN), foram criados e analisados estaticamente (cálculo de tensões e deformações) e dinamicamente (cálculo de frequências naturais de ressonância). Para tanto, o objetivo foi obter um transdutor cujo primeiro modo normal de vibração fosse radial (o movimento de oscilação de seu corpo fosse perpendicular à sua fixação na esfera). A geometria do modelo em elementos finitos deste transdutor foi ajustada iterativamente até que apresentasse uma frequência natural próxima aos primeiros modos normais quadripolares da esfera (aproximadamente 3200 Hz), o que possibilitaria uma máxima transferência de energia da esfera para o transdutor. Obteve-se desta maneira a estrutura mecânica do transdutor a ser usado no detector.

---

<sup>8</sup> Aluno do Curso de Engenharia Eletrônica, ITA. E-mail: [antoniounias@yahoo.com.br](mailto:antoniounias@yahoo.com.br)

<sup>9</sup> Pesquisador da Divisão de Astrofísica, Projeto Gráviton. E-mail: [ze@das.inpe.br](mailto:ze@das.inpe.br)





Fig. 4. 9: Balanço de Vorticidade para o Episódio Sistemas Frontais e Ciclogêneses, em 925 hPa. Análise - 29/05/99: (a) Vorticidade Relativa [ $dia^{-1}$ ]; (b) Divergência [ $dia^{-1}$ ]; (c)  $\frac{\partial \xi}{\partial t}$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (d)  $-\vec{V}_H \cdot \nabla \xi$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (e)  $-\beta v$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (f)  $-\omega \frac{\partial \xi}{\partial p}$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (g)  $\xi \nabla \cdot \vec{V}$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (h)  $f \nabla \cdot \vec{V}$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (i)  $\vec{k} \cdot (\nabla \omega \times \frac{\partial \vec{v}}{\partial p})$  [ $Hz dia^{-1}$ ]; (j) Resíduo [ $Hz dia^{-1}$ ].

\*Os valores das figuras estão multiplicados por  $10^5$



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **ESTRUTURA MECÂNICA DOS TRANSDUTORES DO DETECTOR DE ONDAS GRAVITACIONAIS MARIO SCHENBERG**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Antônio Unias de Lucena (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [antoniounias@yahoo.com.br](mailto:antoniounias@yahoo.com.br)

**ORIENTADOR**

Dr. José Luiz Melo (DAS/INPE)  
E-mail: [ze@das.inpe.br](mailto:ze@das.inpe.br)

Maio 2003

### **Qual a utilidade de se estudar ondas gravitacionais?**

Certa vez, o primeiro-ministro inglês Gladstone, perguntou a Faraday sobre a utilidade de se estudar a eletricidade. Faraday respondeu-lhe: “Para que serve uma criança?”.

Anos depois, Hertz demonstrou na prática a existência das ondas eletromagnéticas previstas pelo trabalho de Maxwell, que se baseou nas experiências de Faraday. E, com certeza, o mundo atual é inconcebível sem a utilização das ondas eletromagnéticas.



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>                    | <b>4</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>               |           |
| 2.1- ONDAS GRAVITACIONAIS .....                         | 5         |
| 2.2- DETECTORES DE ONDAS GRAVITACIONAIS .....           | 6         |
| 2.3- RUÍDOS TÉRMICOS E VIBRACIONAIS .....               | 7         |
| 2.4- MODOS NORMAIS DE VIBRAÇÃO .....                    | 10        |
| <b>CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA .....</b>                   | <b>11</b> |
| <b>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES</b>               |           |
| 4.1- ESFERA (MASSA RESSONANTE) .....                    | 12        |
| 4.2- SUSTENTAÇÃO DA ESFERA .....                        | 13        |
| 4.3- TRANSDUTOR .....                                   | 15        |
| <b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b> | <b>28</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                 | <b>29</b> |



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O detector Mario Schenberg é constituído de uma massa ressonante de CuAl6% com 65 cm de diâmetro, pesando em torno de 1,15T e com sensibilidade para ondas gravitacionais com frequência em torno de 3100 e 3300Hz. Por sua vez, o transdutor é uma parte fundamental do projeto já que, como as ondas gravitacionais produzem deformações muito pequenas para as dimensões humanas, é necessário utilizar este dispositivo eletro-mecânico para amplificar a amplitude da onda gravitacional captada, tornando mais fácil a sua detecção.

Este projeto de Iniciação Científica teve por objetivo projetar e analisar tanto estaticamente quanto dinamicamente partes do detector de ondas gravitacionais e focalizou-se principalmente no projeto mecânico do transdutor paramétrico que será utilizado no detector Mario Schenberg.

O trabalho constituiu-se basicamente na concepção dos elementos mecânicos e posterior simulação destes elementos pelo método de elementos finitos através do software **MSC/NASTRAN**, e teve desempenho satisfatório pois os resultados obtidos ajudaram a direcionar a parte final do Projeto Gráviton.

## CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Ondas Gravitacionais:

Ondas Gravitacionais são oscilações do espaço-tempo provocadas por deslocamentos assimétricos de massas, correspondendo à frente de deslocamento de um campo gravitacional provocado por estas mesmas massas. Sua real existência ainda não foi comprovada, por isto a importância deste projeto.

Não se conhece ainda a natureza da onda gravitacional mas, em analogia às ondas eletromagnéticas, já se fala de uma possível partícula chamada gráviton, sua partícula-mensageira, apesar de a onda gravitacional não ter sido quantizada ainda.

A idéia de onda gravitacional foi obtida através da resolução da equação Einstein que relaciona a curvatura do espaço-tempo com a massa do universo a partir de um caso particular (no vácuo sem matéria).

Porém, apesar de estas ondas não terem sido ainda detectadas, sua existência é tida como certa devido a uma prova indireta obtida pelos físicos Joseph Taylor e Russel Hulse. No início da década de 80, eles descobriram duas estrelas, uma orbitando em torno da outra -um pulsar- e, segundo a relatividade geral, um sistema assim emite ondas gravitacionais, perdendo energia nesse processo e emitindo ondas gravitacionais. Com a perda de energia, os pulsares espiralam um contra o outro, provocando vários efeitos físicos também explicáveis pela relatividade. Esses efeitos foram observados e concordam muito bem com os requisitos da teoria de Einstein. Por isso, ambos ganharam o prêmio Nobel de Física de 1993, por esse trabalho.

## 2.2 Detectores de Ondas Gravitacionais:

Somente nos anos 60, e portanto muito após o advento da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, vários físicos se propuseram a detectar as ondas gravitacionais propostas por ele, não para confirmar a teoria da Relatividade Geral, que já estava consolidada com a explicação do desvio da órbita de Mercúrio calculada pela física newtoniana e pela comprovação em 1919 de que as ondas eletromagnéticas são atraídas por campo gravitacional mas sim, pela possibilidade que a detecção poderia causar de se tentar desenvolver um novo tipo de astronomia: a astronomia das ondas gravitacionais.

O primeiro físico a se destacar na busca das ondas gravitacionais foi o norte-americano Joseph Weber. Em 1969, ele relatou os resultados de uma experiência para detectar ondas gravitacionais. Nela, Weber usou dois detectores de radiação gravitacional pôr ele desenvolvidos. Eles foram colocados a mais de 970km de distância um do outro, de modo que as vibrações ou outras variações locais no campo gravitacional da Terra não seriam indicadas pôr ambos detectores no mesmo instante. Porém, muitos cientistas têm dúvidas quanto à validade deste experimento.

A fim de se detectar ondas gravitacionais, existem basicamente dois tipos principais de detectores: os de ressonância de massa (barra cilíndrica e esfera) e os de laser. Os detectores de ressonância de massa funcionam pelo seguinte princípio: a onda gravitacional, ao passar pela massa, provoca uma deformação e transdutores acoplados à sua superfície, transformam essa deformação num sinal elétrico capaz de ser interpretado. Os detectores esferoidais são capazes de detectar ondas originárias de qualquer direção, enquanto os de barra estão restritos a observações em direções próximas dos planos perpendiculares ao cilindro e, por este motivo, o projeto Mario Schenberg optou por uma massa de ressonância na forma de esfera. Porém,



detectores esferoidais exigem um maior processamento de informações, sobrecarregando um ótimo computador.

Já os detectores de laser se baseiam nas interferências no espaço-tempo que a passagem da onda gravitacional provocará ao passar pelo feixe de laser. Quando a onda gravitacional atinge o interferômetro, os comprimentos dos feixes de laser de seus braços mudam, produzindo uma diferença de fase  $\Delta\phi$  proporcional à amplitude da onda, alterando a figura de interferência sobre o foto-detector. Esta alteração no padrão de interferência corresponde à detecção da onda gravitacional.

## **2.3 Ruídos Térmicos e Vibracionais**

Sem dúvida o principal motivo que levou a comunidade científica a desconsiderar os resultados obtidos por Joseph Weber com seu detector de ondas gravitacionais foi o fato do mesmo estar à temperatura ambiente e também não estar isolado de ruídos vibracionais externos.

Estando o detector à temperatura ambiente, os ruídos térmicos ocasionados pelos movimentos quânticos das moléculas (movimento browniano) podem causar a sensação de que a massa ressonante está vibrando e que por isso captou uma onda gravitacional. Além disso, ruídos vibracionais externos como por exemplo, abalos sísmicos e outros ruídos provocados pelo homem, podem ser captados pelo detector se este não estiver isolado vibracionalmente do mundo externo, podendo causar interferências numa possível detecção da onda gravitacional.

Por isto, o detector Mario Schenberg estará disposto em um sistema de câmaras criogênicas, resfriado a temperaturas de milikelvins (50 mK). Num primeiro momento o detector estará a 4K e futuramente deseja-se que ele esteja funcionando em temperaturas da ordem de 50 mK.



A fim de isolá-lo vibracionalmente, foi construído um sistema de isolamento vibracional constituído de vários estágios de conjunto de “massa-mola” (Figuras 1 e 2). Cada estágio tem por objetivo reduzir a amplitude do ruído que ocorre sobre o detector de tal forma que o ruído resultante sobre a massa ressonante após ser amortecido pelos diversos estágios do sistema de isolamento vibracional tenham uma amplitude bem inferior à da onda gravitacional que espera ser detectada, não provocando desta forma, interferência na detecção. A ordem de amortecimento de sistema de isolamento vibracional é de 300 dB. Espera-se que o detector Mario Schenberg atinja uma sensibilidade à 50mK que se possa medir ondas gravitacionais de amplitude  $4,3 \times 10^{-20}$  cm. Vale lembrar que o detector não estará medindo esta amplitude e sim o sinal resultante da ressonância da esfera após este ser amplificado pelo transdutor.

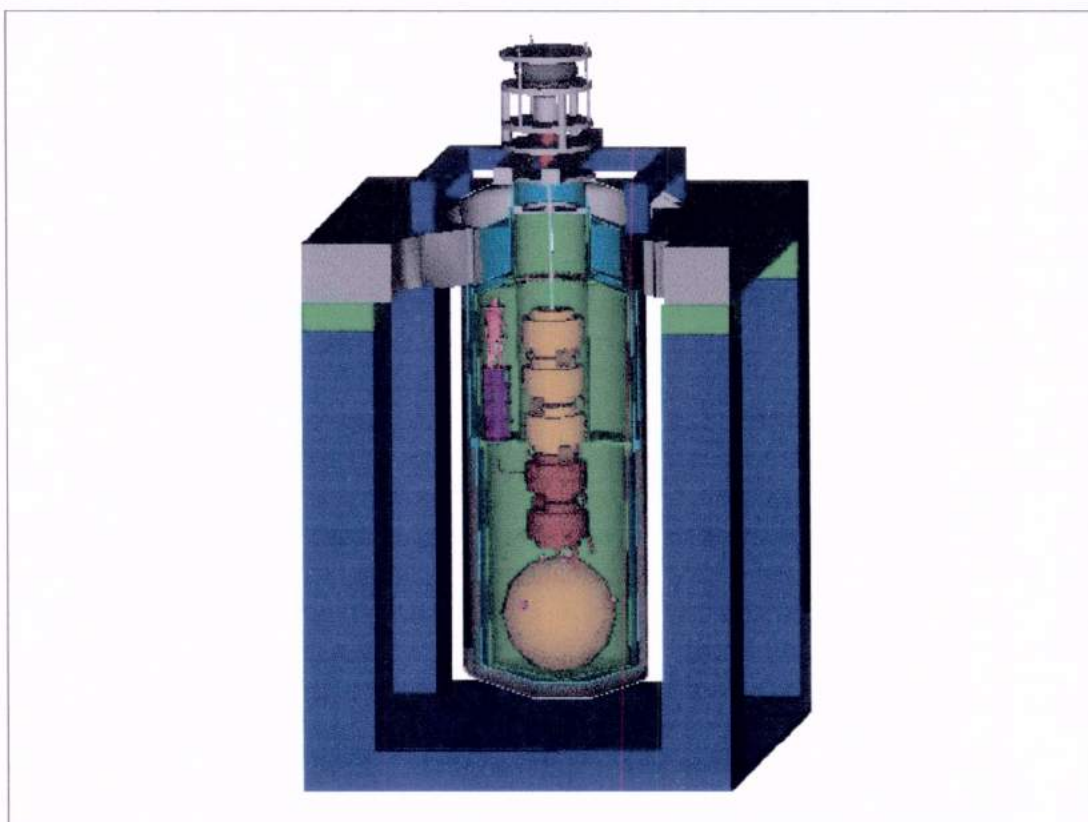


Fig.1- Desenho em AutoCad do Detector SCHENBERG em corte para visualização da parte mecânica interna

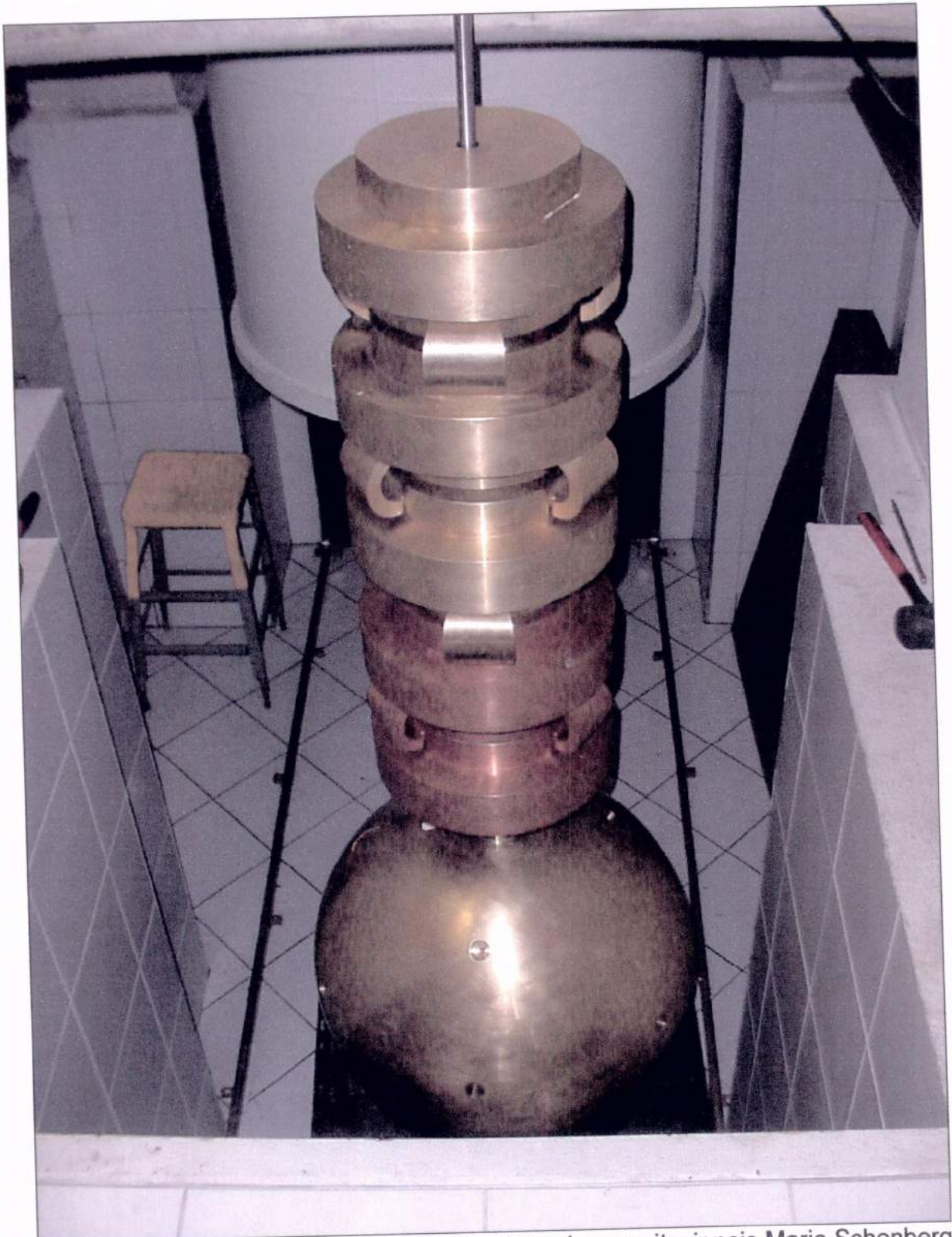


Fig.2- Estágio de construção do detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg



## 2.4 Modos Normais de Vibração

Sabe-se da Física Quântica que todas as moléculas possuem várias frequências características nas quais vibram, que são os chamados modos normais de vibração ou frequência natural de ressonância, e que quando excitadas a frequências bem próximas da sua frequência natural, as moléculas absorvem praticamente toda energia que foi depositada sobre elas.

No mundo macroscópico estes fenômenos também são observados. Qualquer objeto possui frequências características nas quais entra em vibração, que são os seus modos normais de vibração. Quando um corpo em estudo está vibrando, seus movimentos são uma combinação dos seus modos normais de vibração característicos.

Sabendo-se disso, o detector Mario Schenberg possui uma esfera cujos primeiros modos normais quadripolares estão aproximadamente a 3200Hz, que é a frequência que se espera que a onda gravitacional a ser captada tenha, pois no estado de ressonância toda energia da onda gravitacional que incidir sobre a esfera será absorvida por ela.

Espera-se que dessa forma a esfera seja capaz de captar toda a energia que a onda gravitacional depositar sobre ela e como o material da esfera possui alto Q mecânico, que é a razão entre a energia absorvida e a energia dissipada pelo tempo espera-se que a esfera seja capaz de armazenar a energia recebida por um tempo considerável. Além disso, para amplificar a amplitude a onda captada, o modo normal do corpo do transdutor e do ressonador também deve ser de 3200Hz.

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho usaram-se modelos em elementos finitos das estruturas a serem analisadas estaticamente (tensões) e dinamicamente (modos normais). Estes modelos são construídos usando o método dos elementos finitos, o qual consiste em se realizar uma aproximação discreta para um sistema físico, reproduzindo as condições de contorno às quais o sistema está sujeito.

O sistema é dividido em partes simples (elementos finitos) conectadas por nós que englobam, desta maneira, as características gerais do sistema. Estas partes simples podem ser triângulos ou quadrados, para sistemas planos e paralelepípedos ou pirâmides para sistemas tridimensionais. Quanto maior o número de divisões, maior é a precisão alcançada porém, um número de divisões muito alto exige um tempo de processamento muito longo, o que não é desejado. Os nós são importantes pois é sobre eles que as variáveis em estudo são calculadas e, a partir destes valores obtidos são então calculados por interpolação os valores da grandeza física em estudo ao longo da malha de subdivisões.

Ao longo do projeto sempre foram utilizadas malhas com mais de 1000 elementos, usando software MSC/NASTRAN. Neste software foi possível desenhar os sistemas, construir os elementos conforme o desejado, criar condições de contorno (partes fixas do sistema) e criar condições de contorno como forças e gravidade.



## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 Esfera (Massa Ressonante)

A esfera do detector de ondas gravitacionais, que no caso servirá como antena, possui 65 cm de diâmetro e é construída de Cobre-Alumínio6%. A escolha deste diâmetro se deve ao fato de a frequência de ressonância (modo quadripolar) da esfera estar em torno de 3200Hz. O material, Cobre-Alumínio6%, foi o escolhido pois possui elevado Q mecânico, que é a razão entre a energia absorvida e a energia dissipada pelo tempo e por isso é capaz de armazenar a energia recebida por um tempo razoavelmente longo. Além disso, este material possui elevada condutividade térmica, fato essencial já que todo o sistema será resfriado a temperaturas da ordem de mK, a fim de se evitar os ruídos quânticos (movimento browniano).

A esfera entrará em ressonância após receber as ondas gravitacionais pois estas irão depositar energia sobre ela. A esfera vibrará de acordo com seus modos normais de vibração, mas sem que seu centro de massa se desloque, pois a onda gravitacional não deposita momento linear e sim, momento quadripolar, octopolar, hexadecapolar e etc. O projeto da esfera considerou que a esfera deveria vibrar em seu primeiro modo normal quadripolar pois, nos modos sucessivos a ordem de grandeza da energia é menor. O modo octopolar, por exemplo, tem ordem de grandeza duas vezes menor que o do modo quadripolar.

A simulação da esfera teve por objetivos:

- Primeiramente o aprendizado e familiarização com o software MSC/NASTRAN;
- Comparar os valores obtidos computacionalmente com os valores medidos;
- Escolher os locais onde os transdutores deveriam ser colocados, que no caso serão os picos das amplitudes de vibrações quadripolares da esfera.

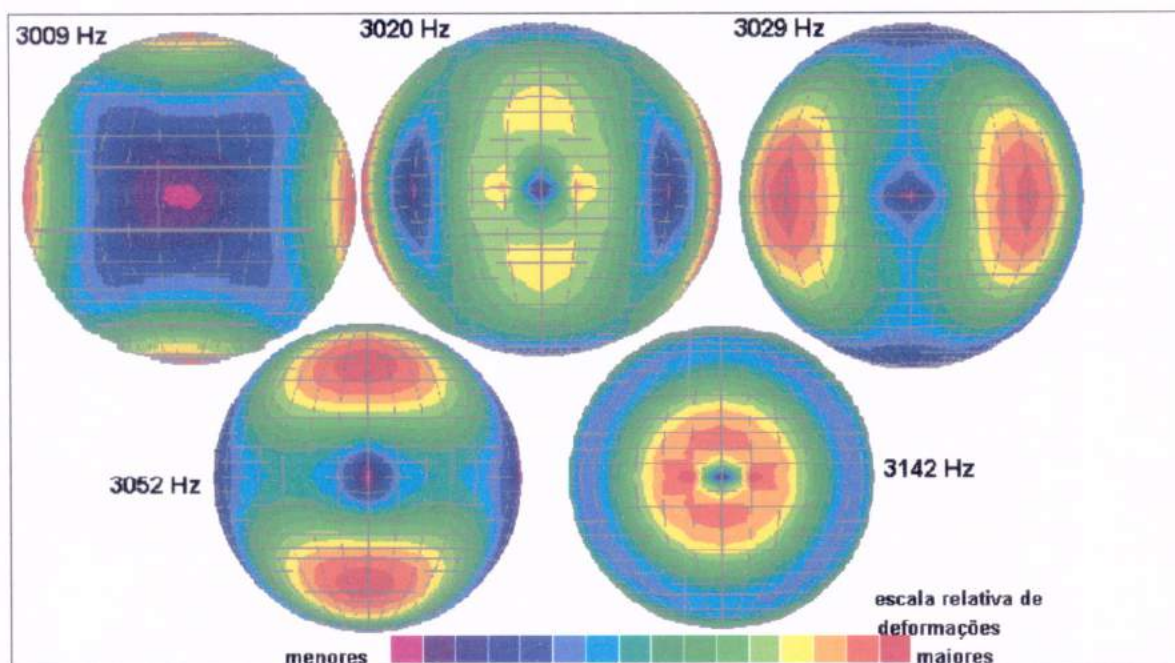


Fig.3 – Modos normais da esfera ressonantes calculados a partir da técnica de elementos finitos

Os modos quadripolares da esfera são em número de cinco. A diferença entre os valores dos modos normais se deve ao furo no centro da esfera, já que este levantou sua degenerescência. Caso isto não ocorresse, os modos normais seriam de mesmo módulo mas defasados de  $45^\circ$ .

#### 4.2 Sustentação da esfera

A barra cilíndrica de sustentação tem por finalidade suspender a esfera, evitar que parte da energia que excitar a esfera seja transferida para o sistema de isolamento vibracional e também atenuar e impedir que qualquer ruído externo possa ser captado pela esfera. Assim, a barra cilíndrica de sustentação deve ter modos normais de vibração distantes do da esfera.

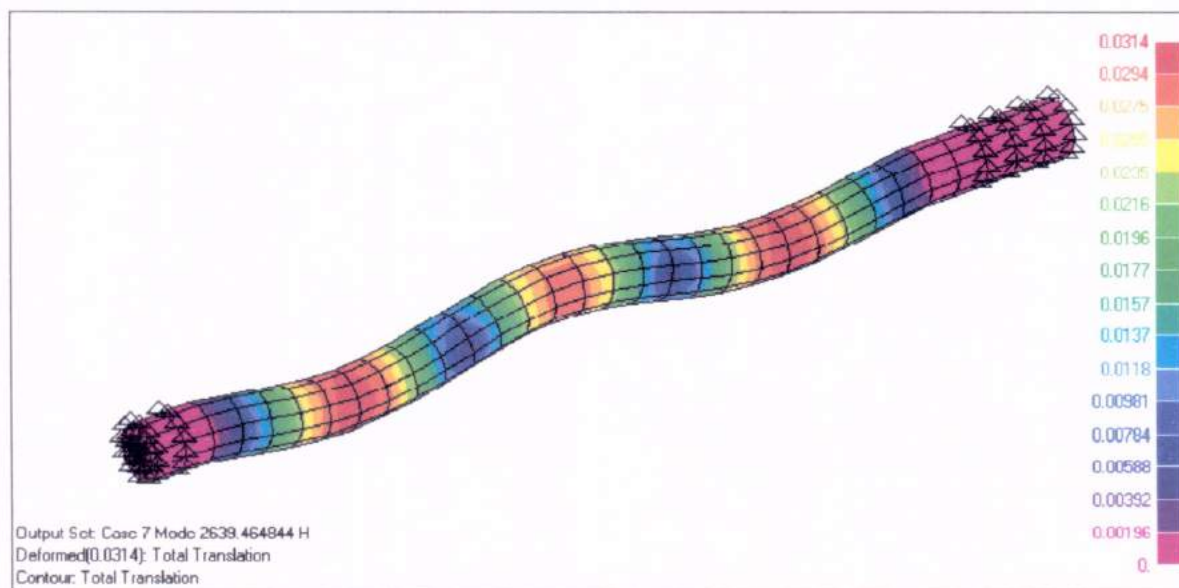


Fig.4- Modo normal mais próximo abaixo de 3200Hz

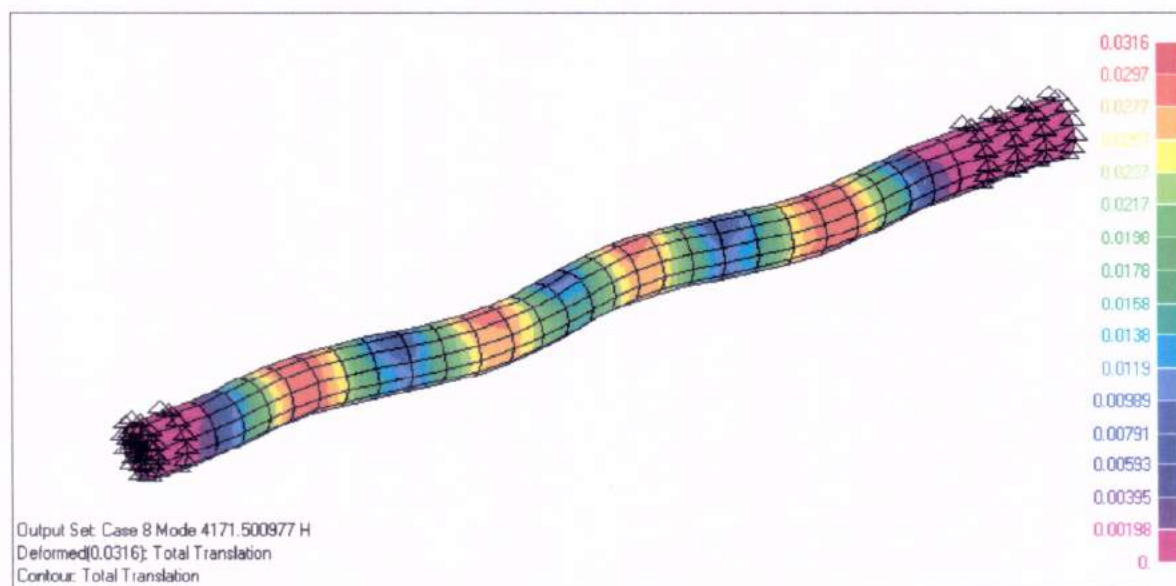


Fig.5- Modo normal mais próximo acima de 3200Hz

O sistema de isolamento vibracional tem por objetivo atenuar ruídos ou vibrações que possam vir a excitar a esfera na frequência de interesse, dando a falsa impressão de que ondas gravitacionais foram captadas. Os ruídos podem de simples barulhos causados pelas atividades humanas a abalos sísmicos. Quanto aos raios cósmicos, o



detector será construído dentro de um local fechado e além disso, haverá detectores de raios cósmicos para certificar-se de que este tipo de interferência não ocorreu.

### 4.3 Transdutor

Transdutor elétrico é um dispositivo capaz de converter uma grandeza física não elétrica, tal como deformação, temperatura ou pressão em um impulso elétrico. No caso do projeto, o transdutor irá transformar a vibração mecânica de sua membrana de ressonância em um sinal elétrico correspondente a uma grandeza previamente calibrada.

A membrana ressonante do transdutor tem por finalidade amplificar a vibração da esfera e, por isso, tem importância crucial no projeto. Deseja-se que o máximo possível da energia depositada pela onda gravitacional na massa ressonante seja transferida para o transdutor, que por isso, deverá ser sintonizado próximo às ressonâncias da esfera (modos quadripolares).

Levando em consideração as características do projeto, escolheu-se um transdutor paramétrico de microondas com uma cavidade ressonante na banda frequência dos modos quadripolares da esfera e constituído de nióbio já que este material apresenta sistemas massa-mola com um alto Q elétrico a baixas temperaturas e um coeficiente de dilatação inferior ao do CuAl(6%), facilitando dessa maneira a fixação por contração diferencial.

O transdutor de nióbio será utilizado na primeira parte do projeto, quando o detector estará resfriado a uma temperatura de 4K (He líquido). Para a próxima etapa do projeto, quando o detector estiver a 50mK, o nióbio não poderá ser utilizado pois este é supercondutor e por isso sua temperatura não pode ser inferior a 9k. Dessa forma, na segunda etapa do projeto, o transdutor será constituído de CuAl6%.



Outros pontos importantes do projeto foram o fato da geometria do transdutor ser usinada preferencialmente de uma única peça, evitando dessa maneira tensões diferenciais, como por exemplo aquelas que aparecem em soldas e, também o projeto deveria levar em consideração o fato de a massa do transdutor ser igual à média geométrica entre a massa efetiva da esfera ressonante e a massa da membrana ressonante do transdutor, pois assim haverá otimização das amplitudes de vibração.

O projeto do transdutor buscou o primeiro modo de vibração a 3200Hz, pois se houvessem modos normais de vibração anteriores, poderia ocorrer uma interferência na leitura do sinal, isto ocorre pois parte da energia da onda gravitacional pode excitar estes primeiros modos normais. Além disso, era necessária uma grande janela livre de ressonância para os modos posteriores.

O ponto crucial no projeto é o relacionado ao movimento de vibração do corpo do transdutor. A vibração do transdutor deve ser de tal forma que seu corpo central se deslocasse radialmente à esfera, isto é, efetuasse movimentos “para cima e para baixo” perpendiculares à fixação do transdutor. Modos em que ocorrem deslocamentos laterais da região superior dos transdutores não são adequados para o acoplamento, pois a excitação sobre a membrana não teria a máxima energia possível, o que é essencial para ocorrer amplitudes consideravelmente altas. Estas amplitudes são fundamentais pois é a partir da interferência deste sinal com o sinal injetado no transdutor que será possível detectar a onda gravitacional.

Quanto à dimensão, projetou-se o transdutor para que fosse fixado por contração diferencial em um orifício circular de 3 cm de diâmetro por 3 cm de profundidade. O motivo destas dimensões é que a massa do transdutor deveria ser pequena para interferir o mínimo possível nos modos normais de 3200Hz da esfera e sua massa deveria ser a média geométrica entre a massa da membrana (ressonador) e a massa efetiva da esfera.

Eletricamente, o transdutor funcionará da seguinte forma: na cavidade de microondas, um sinal de 1GHz será injetado. Quando o corpo do transdutor entrar em oscilação, fará com que a membrana do ressonador também vibre porém, com uma amplitude maior que a do corpo do transdutor. Da interferência deste sinal com o sinal injetado será possível determinar a amplitude da onda gravitacional que vier a excitar a massa ressonante. Com o conjunto de cinco transdutores será possível também determinação a direção de propagação da onda gravitacional.



Fig.6-Detalhe da cavidade onde o transdutor será colocado

### 4.3.1 Evolução da geometria do transdutor:

#### a) Primeiro Projeto

Inicialmente tentou-se a geometria mostrada na figura 6. O transdutor é constituído de uma parte circular mais externa que ficará fixa à cavidade da esfera, de uma camada fina de elementos intermediários (que desempenhará o papel de mola) entre a parte fixa e o corpo ressonante massa ressonante, que será móvel. Os resultados obtidos com o transdutor foram insatisfatórios pelos seguintes motivos:

- A frequência de vibração radial do transdutor apresentou-se distante do intervalo de frequência desejado (3100Hz-3300Hz);
- Apareceram modos normais anteriores a este, o que é indesejável pois parte da energia da onda gravitacional poderia vir a excitar modos normais anteriores;
- O transdutor não forneceu apenas modos de vibração radiais. Alguns modos normais eram transversais, fato este que poderia ocasionar incertezas na leitura no transdutor e ineficiência na detecção da onda gravitacional.



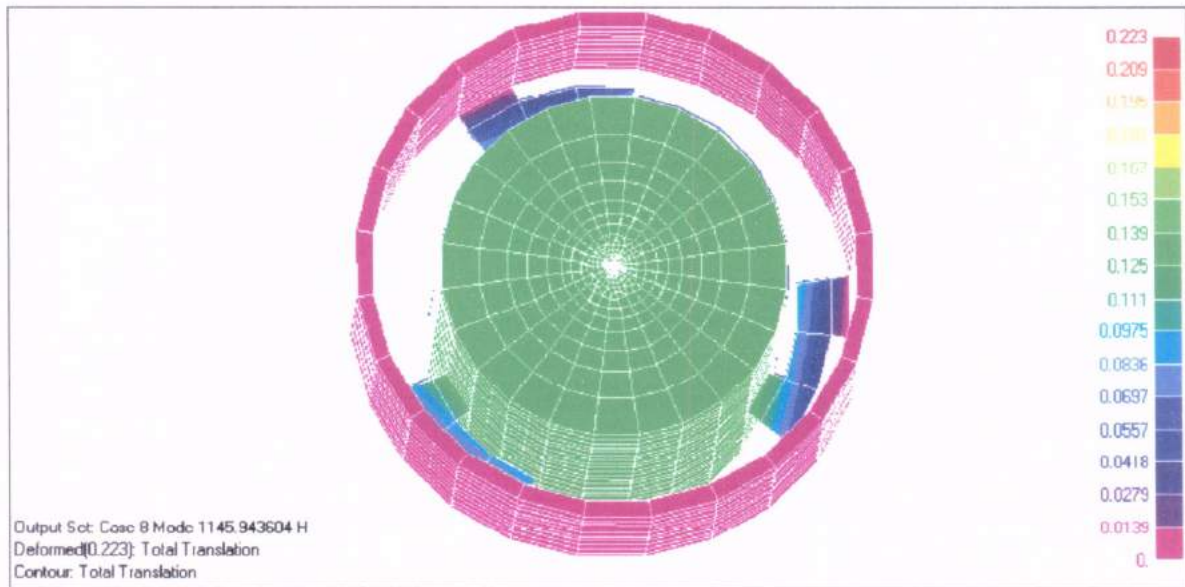


Fig.7- Visão tridimensional do primeiro projeto

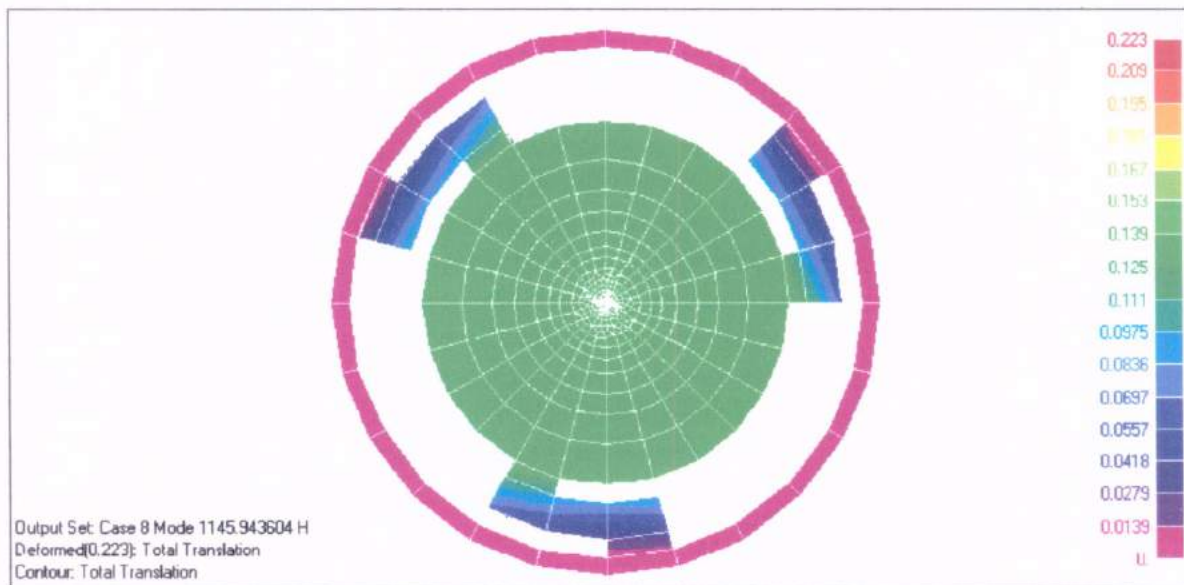


Fig.8 –Visão Superior do Transdutor

A partir destes resultados, tentou-se fazer com que a frequência de vibração do transdutor se elevasse por meio do aumento da espessura da mola do transdutor, uma vez que a massa do corpo do transdutor não poderia variar, já que a massa do corpo transdutor deve ser a média geométrica entre a massa do ressonador (membrana) e a

massa efetiva da esfera. O aumento na espessura da mola não surtiu o efeito desejado pois para que o modo de vibração chegasse a 3200Hz, a mola teria que ficar muito espessa, tendo uma espessura próxima à da do corpo do transdutor.

## **b) Segundo Projeto**

A partir dos resultados do projeto anterior, decidiu-se aumentar o número de molas pois assim seria possível aumentar a constante de rigidez elástica do sistema (analogia com associação em paralelo de molas) e também modificar a posição da mola. Estas passaram a ser dispostas simetricamente em relação à altura média do corpo do transdutor.

Para que a mola pudesse ser usinada, criaram-se duas “camadas” de molas dispostas simetricamente em relação à altura média do corpo transdutor. Esta disposição das molas está mostrada na Figura 10, sendo que cada “camada” de mola está rotacionada de 120° em relação à outra.

Este projeto mostrou-se insatisfatório pois a frequência obtida não foi próxima de 3200Hz. Seu primeiro modo normal foi de 5527Hz, com uma mola de espessura de 0.05cm. Para se chegar a uma frequência de 3200Hz, a espessura deveria ser menor ainda. Esta espessura muito fina seria difícil de ser usinada e além disso, a mola seria muito frágil para suportar as forças devido à contração diferencial a baixa temperatura. Estas forças surgem devido ao fato do coeficiente de dilatação do Nb é menor que o do CuAl6%.

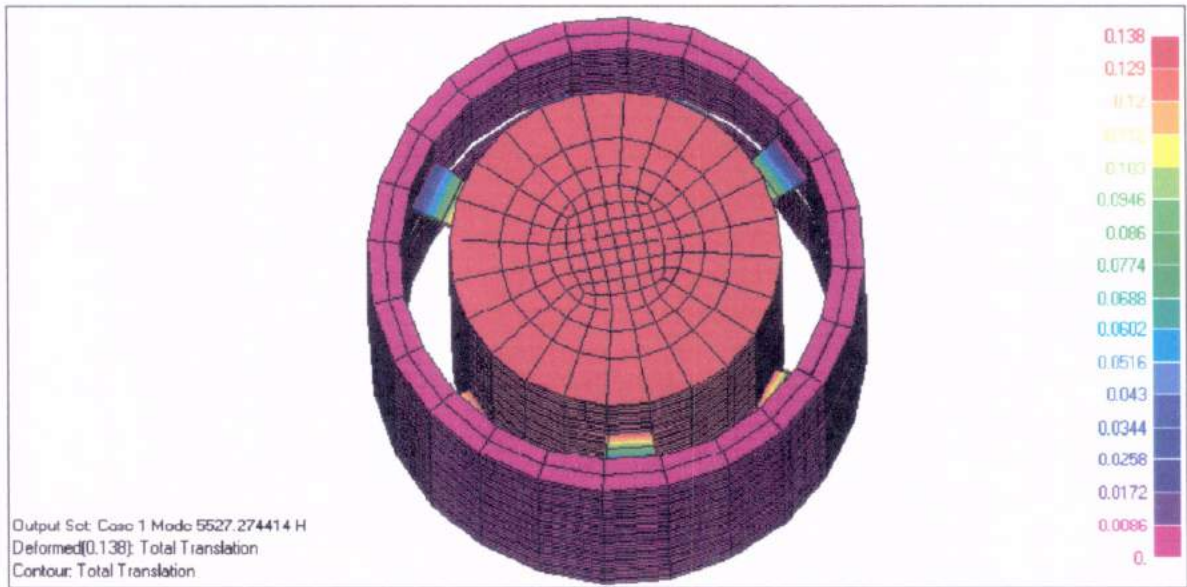


Fig.9 –Visão Tridimensional do transdutor

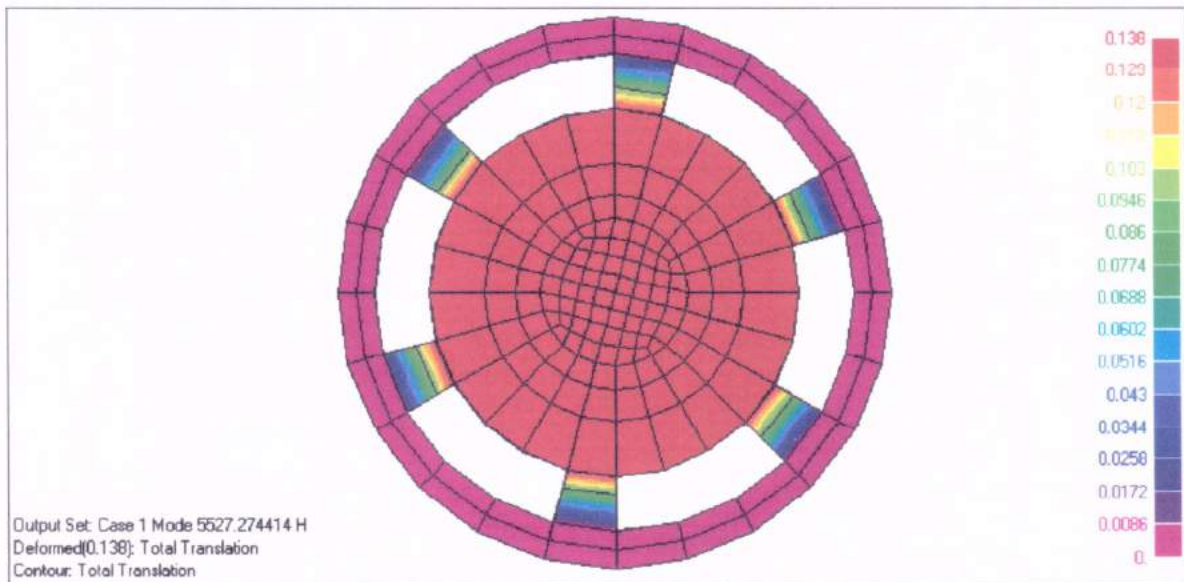


Fig.10 – Visão Superior

### c) Terceiro Projeto

Para evitar que a mola se envergasse com a força de contração diferencial, aumentou-se a área da mola com suas regiões de contato. O novo aspecto da mola está mostrado na figura abaixo:



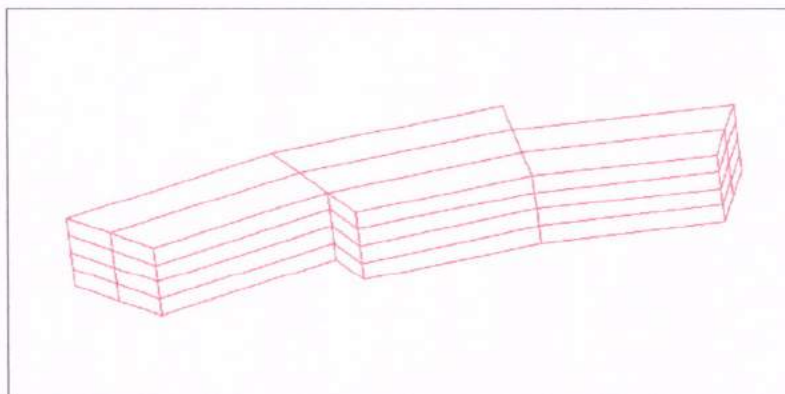


Fig.11 – Esquema da nova mola para o transdutor

Os resultados obtidos para o transdutor com esta mola foram satisfatórios porém, a presente mola ainda não seria flexível podendo mesmo assim, se envergar devido à força de contração diferencial e com isso, modificar sua constante elástica radicalmente. Fato este que inutilizaria o transdutor.

#### **d) Quarto Projeto**

Uma solução para tornar a mola flexível está mostrada abaixo. Pelo esquema percebeu-se que caso uma força paralela aos elementos seja aplicada nos pontos de junção das molas, tanto no corpo do transdutor como no seu suporte de fixação, as molas poderiam mesmo assim vibrar livremente pois não envergariam ou entortariam.

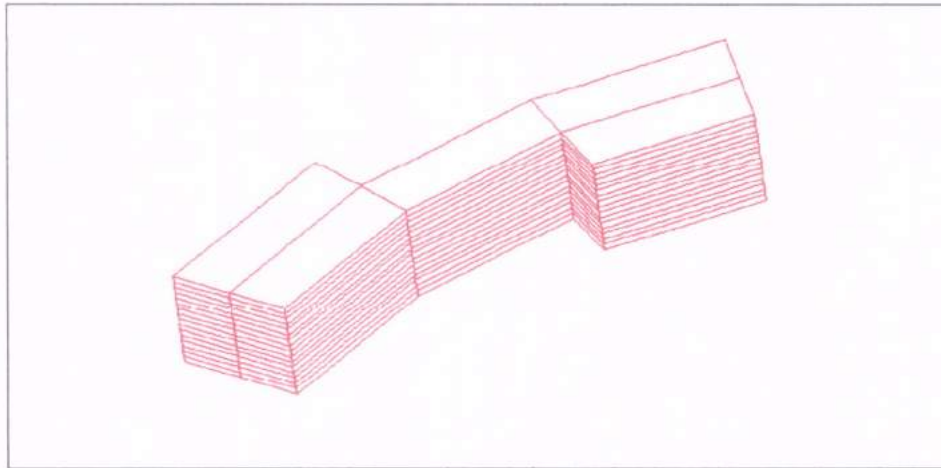


Fig.12 – Mola definitiva do projeto

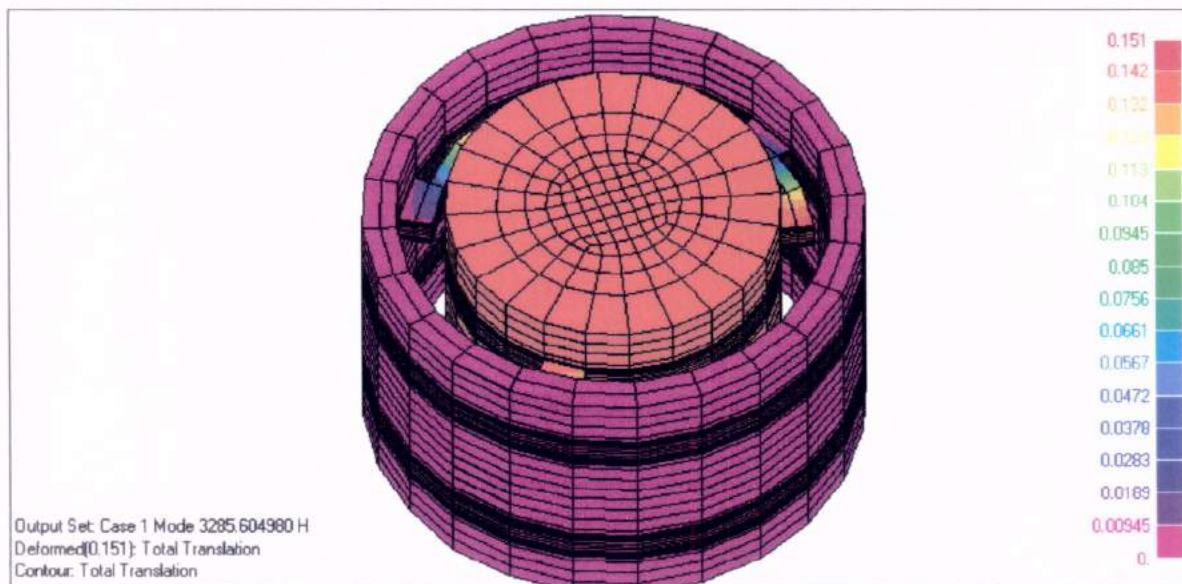


Fig.13 - Visão tridimensional do transdutor obtido

Foram criados vários modelos do projeto para se alcançar valores próximos à frequência desejada. O valor final foi obtido por meio de sucessivas iterações e interpolações. Para o projeto final do transdutor, obteve-se uma mola com espessura de: 0.16cm, dimensão capaz de ser usinada com facilidade.

Tabela 1: Primeiro Modo Normal em função da espessura da mola

| Espessura(cm) | 1º Modo Normal(Hz) |
|---------------|--------------------|
| 0,06          | 940                |
| 0,10          | 1856               |
| 0,16          | 2927               |
| 0,18          | 3285               |

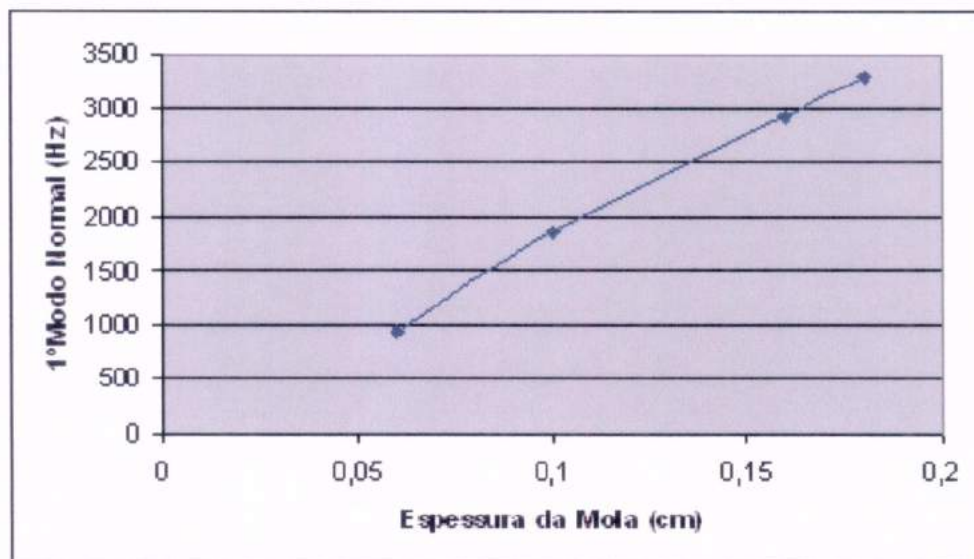


Gráfico 1 : Primeiro Modo Normal em função da espessura da mola

As gravuras a seguir (Figuras13-14) fornecem mais alguns detalhes sobre o aspecto do transdutor.



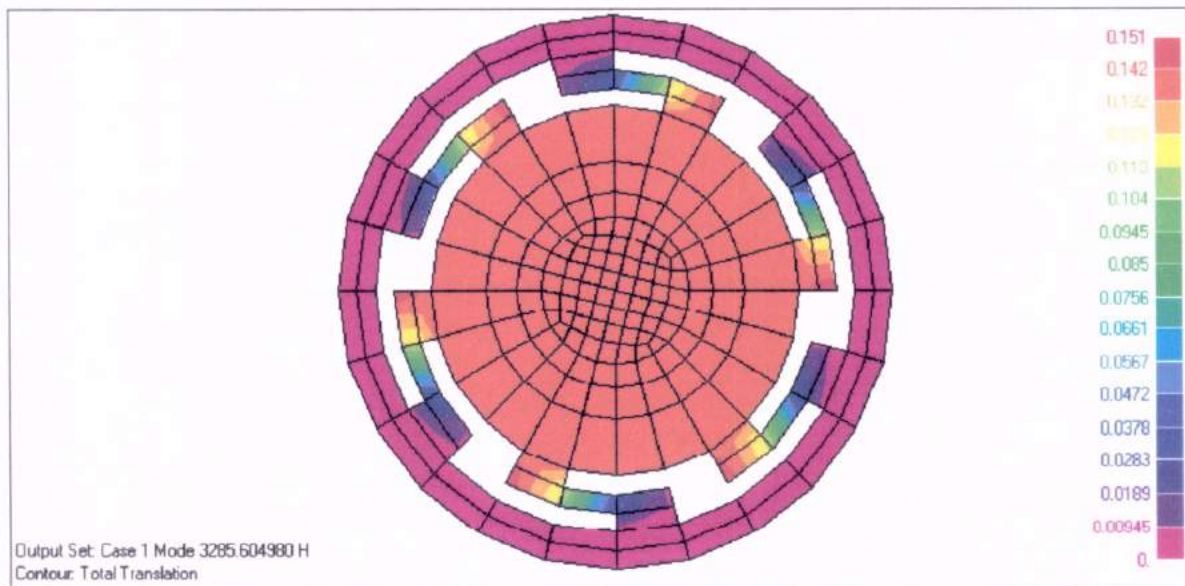


Fig.14 – Visão superior do transdutor obtido

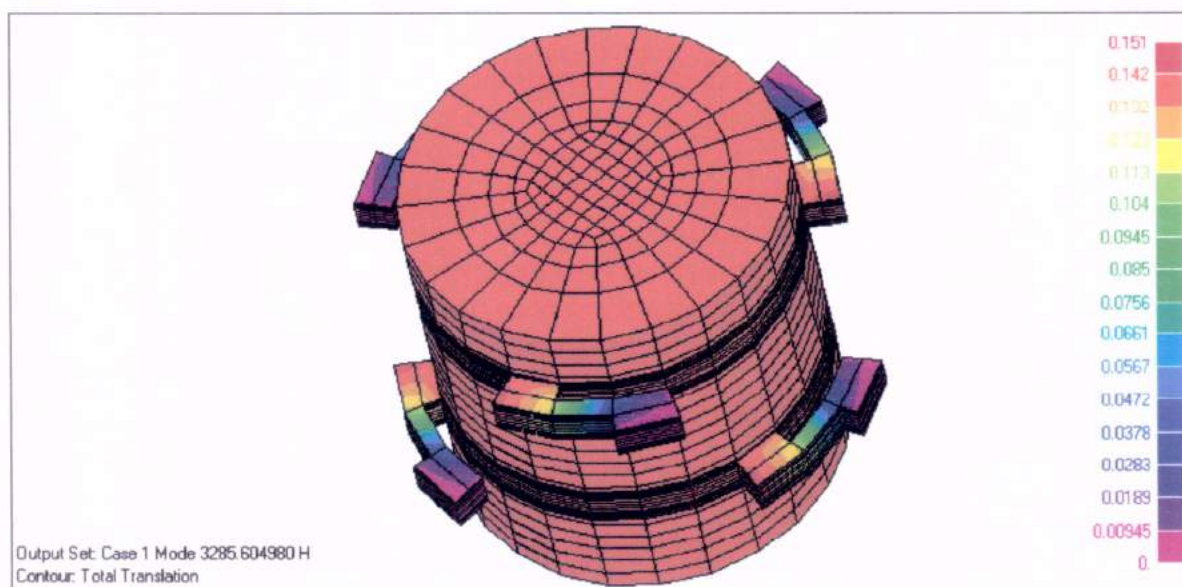


Fig.15– Aspecto do corpo do transdutor com sua mola

A análise estática do transdutor mostrou que as tensões sobre ele estão distantes da tensão de escoamento e portanto ainda estão no regime elástico. A tensão máxima obtida foi de  $2,1 \times 10^7 \text{ dyn/cm}^2$ , duas ordens de grandeza abaixo da tensão de escoamento que é de  $2,0 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ .

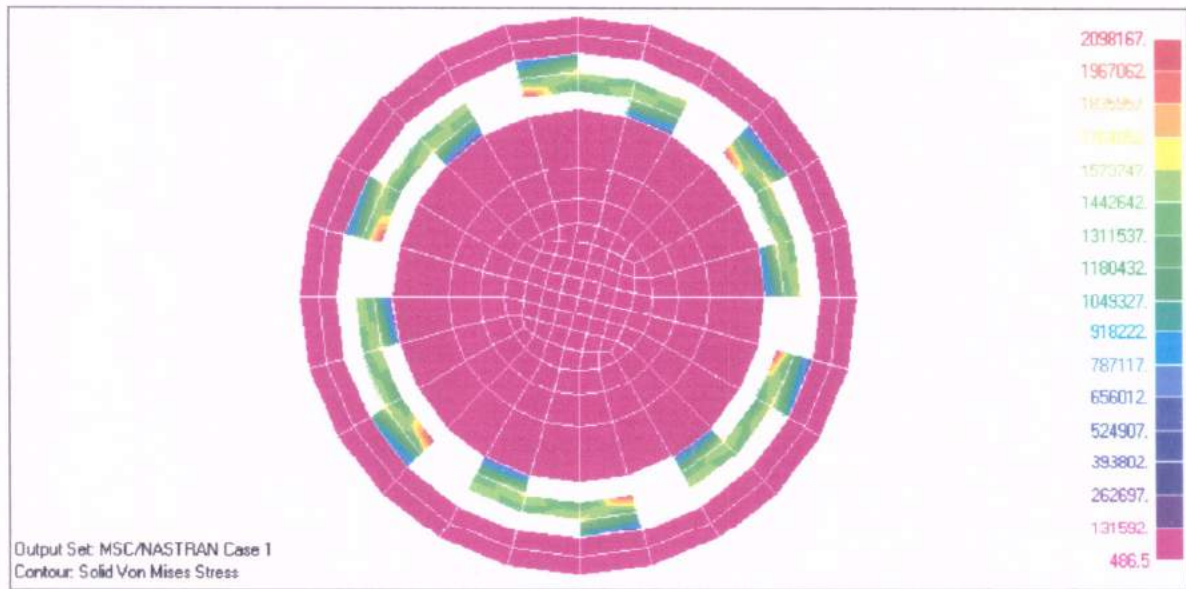


Fig.16-Análise Estrutural do transdutor

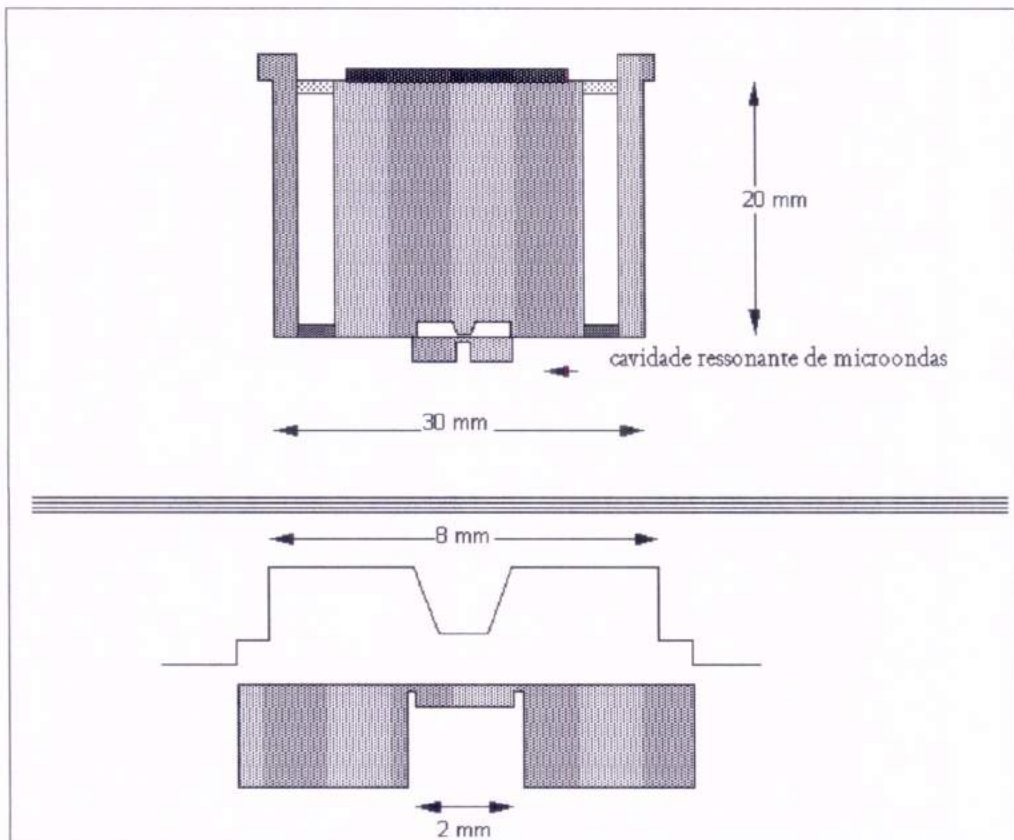


Fig.17-Desenho Técnico do Transdutor

Conforme mostrado na Figura 16, percebe-se que o modelo mecânico do transdutor foi concebido ainda sem a cavidade de microondas e o ressonador. Estas partes ainda não foram inseridas no transdutor pois ainda não foram definidas as dimensões da cavidade. Porém, já se trabalhou sobre o ressonador, chegando a uma membrana com frequência próxima a 3200Hz (3162Hz).

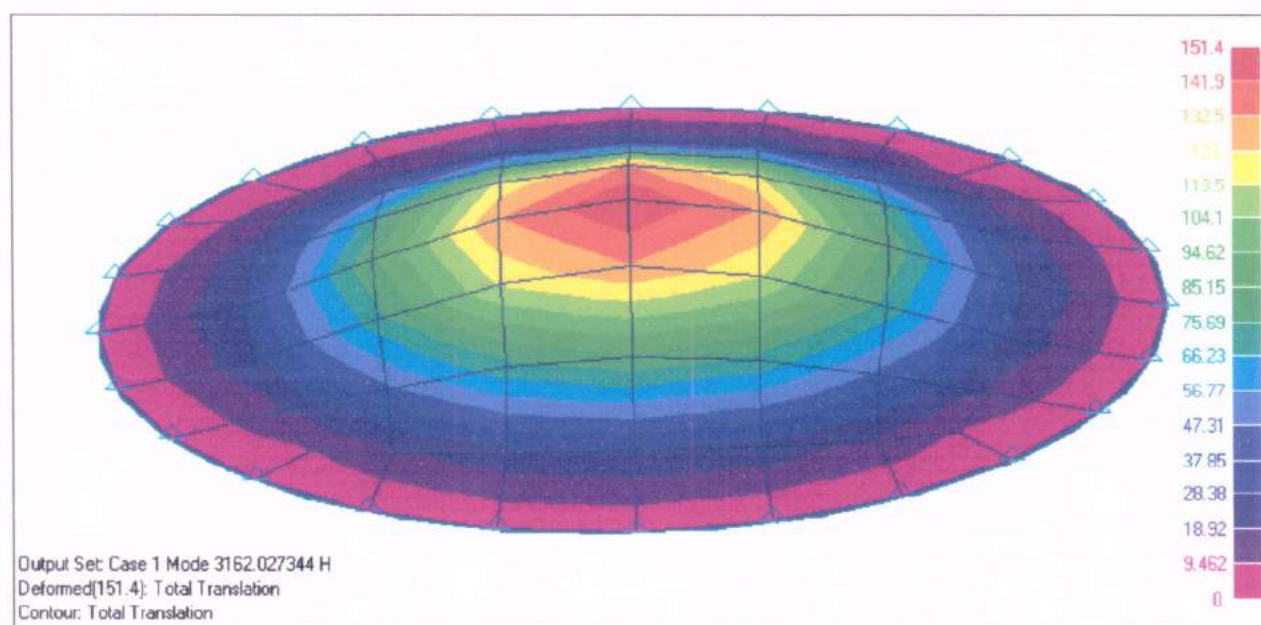


Fig.18-Ressonador obtido para o transdutor

As dimensões obtidas para o ressonador foram:

- Diâmetro: 0,30cm
- Espessura: 0,0004cm

O valor alcançado para espessura do ressonador foi muito pequeno e como exige muita precisão, seria muito difícil usinar esta parte do transdutor.