



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.04.18.31-TDI

**MOLAS DE GÁS PARA O SISTEMA DE PÊNDELÓS  
MULTI-ANINHADOS PARA FUTURAS GERAÇÕES DO  
LIGO E DESENVOLVIMENTO DOS TRANSDUTORES  
DA ANTENA SCHENBERG**

Elvis Camilo Ferreira

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Odylio Denys  
Aguiar, aprovada em 26 de feve-  
reiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FMELKS>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.04.18.31-TDI

**MOLAS DE GÁS PARA O SISTEMA DE PÊNDELÓS  
MULTI-ANINHADOS PARA FUTURAS GERAÇÕES DO  
LIGO E DESENVOLVIMENTO DOS TRANSDUTORES  
DA ANTENA SCHENBERG**

Elvis Camilo Ferreira

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Odylio Denys  
Aguiar, aprovada em 26 de feve-  
reiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FMELKS>>

INPE  
São José dos Campos  
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Ferreira, Elvis Camilo.

F413m Molas de gás para o sistema de pêndulos multi-aninhados para futuras gerações do LIGO e desenvolvimento dos transdutores da antena Schenberg / Elvis Camilo Ferreira. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxvi + 81 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2014/02.04.18.31-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientador : Dr. Odylio Denys Aguiar.

1. detector Mario Schenberg. 2. LIGO. 3. ondas gravitacionais. 4. transdutores. 5. isolamento vibracional. I.Título.

CDU 520.12

---

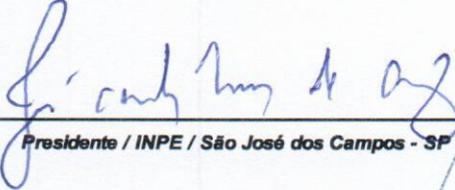


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

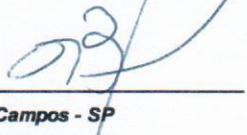
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Astrofísica**

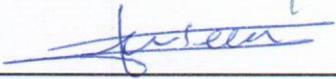
Dr. José Carlos Neves de Araújo

  
\_\_\_\_\_  
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Odylio Denys de Aguiar

  
\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Xavier Pierre Marie Gratens

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / IFUSP / São Paulo - SP

Dr. Fábio da Silva Bortoli

  
\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / IFSP / Canindé - SP

*Este trabalho foi aprovado por:*

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Elvis Camilo Ferreira**

São José dos Campos, 26 de Fevereiro de 2014



*O Universo, como já foi dito anteriormente, é um lugar  
desconcertantemente grande, um fato que, para continuar levando  
uma vida tranquila, a maioria das pessoas tende a ignorar.*

DOUGLAS ADAMS  
em “O Mochileiro das Galáxias”.



*A meus pais e a meus irmãos.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Dr. Odylio, por quem tenho grande admiração, pelo conhecimento, ensinamento, discussões e conversas que fizeram parte do meu “amadurecimento” científico, e pela oportunidade que me uniu à equipe exploradora do Universo gravitacional.

Agradeço a meus amados pais, Roberto e Zulmira, meus eternos professores e conselheiros, a minha irmã Camila e a minha vó Maria, incentivadores, por sempre acreditarem e apoiar as minhas escolhas.

Aos amigos do grupo, Ms. Márcio, Marcos, Dr. José Carlos, Dr. César, por compartilharem seus conhecimentos, técnicas e por toda ajuda e apoio ao trabalho. Ao colega Allan, pelos desenhos técnicos referentes à mola de gás. Aos colegas Antônio Carlos e Laércio com a ajuda no desenvolvimento das peças mecânicas.

Aos docentes da divisão de astrofísica, que foram imprescindíveis na minha formação.

Aos meus amigos Luiz, Márcia, Lânia, Karleyne, Tereza, Carol, Valéria, Pedro e outros, que sempre apoiaram, acreditaram e estiveram dispostos a viver bons instantes.

Aos demais professores que tive em toda vida, de quem guardo conhecimento, lembranças e admirações.

Agradeço às agências CAPES e FAPESP pelo suporte financeiro, direta e indiretamente, e ao INPE pela estrutura que possibilitou a realização desta pesquisa.



## RESUMO

A detecção direta das ondas gravitacionais poderá ser a maior descoberta científica deste século. Entretanto, há demanda de alta tecnologia no desenvolvimento dos detectores de ondas gravitacionais, pois as perturbações causadas no espaço-tempo pela onda gravitacional são muito pequenas (provavelmente menores que uma parte em  $10^{21}$ ), segundo a relatividade geral e o nosso modelo astrofísico do Universo. Esta dissertação descreve o trabalho experimental realizado em duas frentes de detecção de ondas gravitacionais: uma associada ao detector esférico brasileiro Mario Schenberg e a outra ao detector interferométrico americano LIGO. No caso do detector Schenberg, foi realizado o desenvolvimento dos transdutores, visando aumentar a sensibilidade do detector, de forma a colocá-lo para operação de coleta de dados com interesse científico. São apresentados métodos de ajuste das frequências de ressonância elétrica das cavidades de microondas dos transdutores. Cinco transdutores foram ajustados com sucesso e já estão prontos para serem acoplados ao detector. No caso do detector LIGO, se encontra em desenvolvimento um sistema de isolamento vibracional multipendular para ser utilizado nas terceira e quarta gerações (3G e 4G) do LIGO. Esse sistema de isolamento será capaz de atenuar ruídos sísmicos nos espelhos do interferômetro enquanto economiza espaço vertical. Para esse sistema, foram desenvolvidas molas de gás visando o isolamento vertical dos estágios. São apresentadas as etapas de desenvolvimento e de construção da mola de gás e os seus primeiros testes de transmissibilidade. Entretanto, para o caso do uso criogênico, sugere-se o desenvolvimento de molas metálicas; um tipo promissor que está sendo investigado é a chamada anti-mola geométrica.



**GAS SPRINGS FOR THE MULTI-NESTED PENDULA SYSTEM  
FOR THE LIGO FUTURE GENERATION AND DEVELOPMENT  
OF THE SHENBERG ANTENNA'S TRANSDUCERS**

**ABSTRACT**

The direct detection of gravitational waves may be the greatest scientific discovery of this century. However, there is a demand for high-tech development of gravitational wave detectors, because the perturbations caused in spacetime by the gravitational wave are very small (probably less than one part in  $10^{21}$ ), according to general relativity and our astrophysical model of the Universe. This dissertation describes the experimental work on two gravitational waves detection fronts: one associated with the Brazilian spherical detector Mario Schenberg and the other the American LIGO interferometer detector. In the case of the Schenberg detector, it has been conducted the development of the transducers in order to increase the detector sensitivity and to put it into operation for data collection with scientific interest. Methods for adjusting the electrical frequencies of the transducers' microwave resonant cavities are presented. Five transducers were adjusted successfully and are now ready to be coupled to the detector. In the case of the LIGO detector, a system for multipendular vibration isolation has been developed for use in the third and fourth generation (3G and 4G) of LIGO. This vibration isolation system will be able to attenuate seismic noise at the interferometer mirrors while saving vertical space. For this system, gas springs have been developed for the vertical isolation stages. The gas spring construction and development and its first transmissibility test are presented. However, for the case of the cryogenic use, it is suggested the development of metal springs, a promising type that has been investigated called geometric anti-spring (GAS).



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Movimento causado em um anel de partículas de teste devido à passagem de uma onda gravitacional perpendicular ao plano da folha, polarizada em “+” e em “×”. O anel é distorcido durante a passagem de uma onda plana. Em cada um dos cinco pares, as fases da onda são $0$ , $\pi/2$ , $\pi$ , $3\pi/2$ e $2\pi$ . . . . .	9
3.1 À esquerda, imagem conceitual do projeto do detector esférico de massa ressonante Mario Schenberg. À direita, o mesmo detector instalado na USP em São Paulo. . . . .	17
3.2 Conjunto de oito transdutores paramétricos, da sexta geração, desenvolvidos para próxima corrida do detector Mario Schenberg. Nesta imagem, as cavidades estão abertas e as “tampas” podem ser vistas separadas dos corpos dos transdutores. . . . .	20
3.3 À esquerda e centro, imagem e corte representando o modelo atual de transdutor para a antena Schenberg. À direita, esquema da cavidade ressonante de um transdutor (fora de escala). . . . .	21
3.4 Esquema do sistema eletrônico para a próxima corrida do detector Mario Schenberg. . . . .	23
4.1 Redução do <i>gap</i> da amostra no torno mecânico. À esquerda desgaste realizado com retífica. À direita, atrito em lixas coladas com fitas adesivas à uma base de vidro presa em uma peça adaptada no mandril. . . . .	26
4.2 Lixamento manual. . . . .	27
4.3 Amostras após a primeira bateria de lixamento manual. . . . .	28
4.4 À esquerda montagem das cavidades dos transdutores na sala limpa. À direita, transdutor após a montagem. . . . .	30
4.5 Acima, analisador de rede instalado na sala limpa com os cabos presos na peça de ajuste micrométrico que foi utilizada para introduzir as sondas nas cavidades dos transdutores. Abaixo, a introdução das sondas nas cavidades para medição. . . . .	35
5.1 Esquema de um interferômetro de Michelson. . . . .	40

5.2	Representação de uma cavidade Fabry-Perot. Parte de uma componente do campo elétrico incidente $E_{in}$ é transmitida para o interior da cavidade $E_{cav}(0)$ e se propaga até o outro espelho, do qual é parcialmente transmitida $E_t$ e parcialmente refletida $E'_{cav}(L)$ . E, novamente, é parcialmente refletida e parcialmente transmitida, e assim por diante. . . . .	41
5.3	Resposta da antena interferométrica para a polarização “+” (esquerda), polarização “×” (meio), e ondas não polarizadas (direita). A cor indica a sensibilidade (crescendo do violeta para o vermelho). O interferômetro é localizado na origem com os braços paralelos aos eixos x e y. . . . .	41
5.4	Esboço do interferômetro para o aLIGO. Basicamente, é um interferômetro de Michelson com cavidades de Fabry-Perot (formada pelas ITM e ETM), espelhos de reciclagem de potência (PRM) e de reciclagem de sinal (SRM). . . . .	43
5.5	Estimativa das contribuições individuais das fontes de ruído para a sensibilidade do <i>Advanced LIGO</i> . . . . .	45
5.6	Sistema de isolamento vibracional utilizado no <i>Advanced LIGO</i> . É composto por um subsistema pré-isolador hidráulico externo ao vácuo, e dois subsistemas internos ao vácuo, uma plataforma de isolamento ativo e suspensões (pêndulo quádruplo) das massas de teste. . . . .	46
5.7	Plataforma de isolamento ativo: subsistema de isolamento sísmico interno à câmara de vácuo. O estágio 0 é apoiado pelo subsistema externo. O estágio 1 é apoiado pelo estágio 0 através de lâminas de aço que funcionam como molas. E o estágio 2 é similarmente apoiado pelo estágio 1. . . . .	48
5.8	Diagrama esquemático do sistema de suspensão de pêndulo quádruplo desenvolvido para o <i>Advanced LIGO</i> . À esquerda uma visão frontal dos estágios. No meio, a visão lateral do mesmo arranjo. À direita, o projeto conceitual da estrutura que suporta todo o sistema cuja altura total é de, aproximadamente, 2 metros. . . . .	49
5.9	Acima, flanges superior e inferior dos cilindros, com braços internos e externos, respectivamente. Abaixo, uma casca cilíndrica com flanges inferior e superior, e um corte 3D do MNP desenvolvido para implementar o sistema de isolamento sísmico das gerações posteriores ao <i>Advanced LIGO</i> . Os braços dos flanges funcionam como molas, para amortecimento vertical.	51
5.10	<i>Multi-Nested Pendula</i> montando. À esquerda, visão superior do sistema. À direita é possível obter uma noção da altura do mesmo. . . . .	52
6.1	Isolador composto por tampas de metal e por fole de borracha 26. . . . .	55

6.2	À esquerda, fole de borracha que será usado para montar mola de gás. À direita, representação conceitual para protótipo da mola de gás. . . . .	56
6.3	À esquerda, fole cortado para ser retirado da tampa. À direita, tampa cortada com restante do fole queimado preso à mesma. A tampa tem uma borda curvada para encaixe do cabo de aço do fole. . . . .	56
6.4	Desenho do anel para encaixe no fole da mola de gás. . . . .	57
6.5	Desenho das tampas superior e inferior para serem aparafusadas nos anéis para vedação do fole. Os valores indicados estão em milímetros. . . . .	58
6.6	Desenho e corte 3D do protótipo da mola de gás. . . . .	58
6.7	Estrutura externa do protótipo da mola de gás: fole com os anéis encaixados e a tampa superior ao lado do fole. . . . .	59
6.8	Mangueiras de látex sobre o teste de pressão. O vácuo interno da mangueira é gerado por uma bomba. À esquerda, modelo 504. À direita, modelo 211. . . . .	60
6.9	Mola de Gás suspendendo, através da haste, uma massa de aproximadamente 60 kg. . . . .	61
6.10	Aparato experimental para medição do isolador. Todo o conjunto está suspenso. Abaixo do atenuador encontram-se um ímã e uma bobina para aplicação de uma força oscilatória. Dois acelerômetros medem as amplitudes de oscilação. . . . .	62
6.11	Gráfico da transmissibilidade para os testes realizados com o isolador. . .	64
6.12	Distribuição das mola de gás no MNP e corte transversal do sistema. . .	65
7.1	À esquerda, esquema de uma <i>GAS</i> de três lâminas em perspectiva. À direita, representação do efeito geométrico (modelo <i>GAS</i> ). . . . .	67



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Detectores do tipo barra em operação na década de 1990 . . . . .	15
4.1 Medidas dos <i>gaps</i> das amostras (tampas) após a primeira bateria de lixamento manual. . . . .	29
4.2 Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) das oito amostras em dois corpos de transdutores. . . . .	31
4.3 Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores na primeira montagem. . . . .	32
4.4 Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores após a compressão. . . . .	32
4.5 Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores (etapas 1 a 5). . . . .	34
4.6 Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores (etapas 6 a 9). . . . .	36
5.1 Detectores interferométricos ao redor do mundo . . . . .	39
5.2 Domínio das principais fontes de ruído para o aLIGO sobre faixas frequências de ondas gravitacionais. . . . .	45
6.1 Especificações gerais do fole 26 como isolador. . . . .	55



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
OG	–	Onda Gravitacional
OGs	–	Ondas Gravitacionais
TRG	–	Teoria da Relatividade Geral
EN	–	Estrela de Nêutrons
BN	–	Buraco Negro
SN	–	Supernova
CERN	–	<i>European Organization for Nuclear Research</i>
LIGO	–	<i>Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory</i>
aLIGO	–	<i>Advanced LIGO</i> (versão avançada do LIGO)
DC	–	Corrente contínua.
AC	–	Corrente alternada.
<i>GAS</i>	–	<i>Geometric Anti-Spring.</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	–	Velocidade da luz no vácuo.
$G$	–	Constante gravitacional.
$\kappa$	–	Constante de Boltzmann.
$M_{\odot}$	–	Massa do Sol.
$k$	–	Constante elástica (de mola).
$\rho_0$	–	Densidade de matéria.
$V$	–	Volume.
$\omega_0$	–	Frequência angular de ressonância.
$Q_{\text{mec}}$	–	Fator de qualidade mecânico.
$Q_e$	–	Fator de qualidade elétrico.
$f_0^{\text{cav}}$	–	Frequência de ressonância elétrica das cavidades dos transdutores.
$\sim$	–	Da ordem de.
$\approx$	–	Aproximadamente de.
$\pm$	–	Mais ou menos.
$\ll$	–	Muito menor que.
$\langle m \rangle$	–	Média de $m$ .



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 ONDAS GRAVITACIONAIS</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Linearização das equações de Einstein . . . . .	5
2.2 Polarização de ondas gravitacionais . . . . .	8
2.3 Fontes de ondas gravitacionais . . . . .	10
<b>3 O DETECTOR MARIO SCHENBERG</b> . . . . .	<b>15</b>
3.1 Detecção por massa ressonante . . . . .	15
3.2 O detector Schenberg . . . . .	16
3.2.1 Fontes de ruído, isolamento vibracional e resfriamento . . . . .	18
3.2.2 Modos de ressonância da esfera e disposição dos transdutores . . . . .	19
3.2.3 Transdutores . . . . .	19
3.2.4 Sistema de detecção . . . . .	22
<b>4 DESENVOLVIMENTO DOS TRANSDUTORES</b> . . . . .	<b>25</b>
4.1 Ajuste das cavidades . . . . .	25
4.2 Politriz . . . . .	25
4.3 Torno mecânico . . . . .	26
4.4 Lixamento manual . . . . .	27
4.5 Montagem das cavidades . . . . .	28
4.6 Medições no analisador de rede . . . . .	30
4.6.1 Medições com dois corpos de transdutores . . . . .	30
4.6.2 Medições da primeira montagem dos oito transdutores . . . . .	31
4.6.3 Compressão da cavidade . . . . .	32
4.7 Reajuste das cavidades . . . . .	33
4.8 Instalação do cabeamento para um conjunto completo de oito transdutores	36
4.9 Corrida criogênica, testes, calibração e aquisição de dados . . . . .	37
<b>5 DETECTORES INTERFEROMÉTRICOS</b> . . . . .	<b>39</b>
5.1 Princípio de funcionamento . . . . .	39
5.2 Resposta do interferômetro à perturbação no espaço-tempo . . . . .	41
5.3 O detector LIGO e suas “gerações” . . . . .	42

5.3.1	<i>Advanced</i> LIGO . . . . .	43
5.3.2	Sensibilidade e fontes de ruído . . . . .	44
5.3.3	Isolamento sísmico . . . . .	45
5.4	Sistema de Pêndulos Multi-Aninhados . . . . .	49
<b>6</b>	<b>MOLAS DE GÁS PARA ISOLAMENTO VERTICAL . . . . .</b>	<b>53</b>
6.1	Transmissibilidade . . . . .	53
6.2	Desenvolvimento do protótipo de uma mola de gás . . . . .	54
6.3	Montagem do protótipo da mola de gás . . . . .	57
6.3.1	Testes de vazamento da estrutura externa . . . . .	59
6.3.2	Teste de pressão na mangueira de látex com a mola de metal . . . . .	59
6.3.3	Instalação dos componentes e montagem para testes . . . . .	60
6.4	Resultados dos testes com o isolador . . . . .	62
6.5	Instalação das molas de gás no sistema de pêndulos multi-aninhados . . . . .	64
<b>7</b>	<b>ANTI-MOLA GEOMÉTRICA: NOVA PROPOSTA DE ISOLA- MENTO VERTICAL . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A - RUÍDO DE FASE DA FONTE <i>ANRITSU</i> . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO B - PROPRIEDADES DOS MODELOS DE ISOLADORES DA <i>FIRESTONE</i>® . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO ISOLADOR 26 . . . . .</b>	<b>81</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A detecção direta das ondas gravitacionais (OGs) poderá ser a maior descoberta científica deste século. Muitos projetos de detectores vem sendo implementados. No entanto, o efeito causado pela onda gravitacional (OG) é quase imperceptível, devido a suas propriedades peculiares. Por isso, há demanda de alta tecnologia, principalmente no sistema de detecção e no isolamento de ruídos dos detectores de OGs.

Segundo a Teoria da Relatividade Geral (TRG) de Einstein, que prevê a existência de OGs, estas são perturbações no espaço-tempo que se propagam à velocidade da luz (EINSTEIN, 1916). Tais ondas foram uma previsão teórica por mais de 50 anos, até ter-se uma evidência com a descoberta e observações do pulsar binário 1913+16 por Russell Hulse e Joseph Taylor (HULSE; TAYLOR, 1975). O período orbital desse sistema está diminuindo justamente na razão predita pela relatividade geral por emissão de OGs (WEISBERG; TAYLOR, 2005), sendo, portanto, uma prova indireta da existência das mesmas. Vários sistemas astrofísicos tem se mostrado fontes potenciais de OGs, como, por exemplo, estrelas de nêutrons binárias, buracos negros e supernovas (KOKKOTAS, 2008; SATHYAPRAKASH; SCHUTZ, 2009; CATTANI, 2010b). Vide Capítulo 2.

A detecção direta de OGs começou a ser investigada já na década de 1960, e seu pioneiro foi Joseph Weber, que desenvolveu o primeiro detector do tipo massa ressonante (WEBER, 1969). Nesse tipo de detector, a energia da onda é depositada na massa e causa uma vibração ressonante. A vibração pode ser monitorada através de dispositivos chamados transdutores.

O Brasil possui um detector do tipo massa ressonante esférico, denominado Mario Schenberg (AGUIAR, 2011), localizado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, no *campus* de São Paulo. Seu desenvolvimento foi iniciado no ano 2000 e seis anos depois ele foi ligado, realizando sua primeira “corrida”. Desde então, vem sendo aperfeiçoado para ser ligado novamente. Vide Capítulo 3.

Um conjunto de oito transdutores está sendo desenvolvido para a próxima “corrida” do detector Schenberg. Essa dissertação descreve as técnicas utilizadas para a montagem e o ajuste das cavidades ressonantes elétricas dos transdutores em 9,44 GHz (que é a mesma frequência de uma fonte injetora de sinal). São apresentadas as dificuldades encontradas no sensível ajuste, além do método que foi capaz de ajustar cinco dos oito transdutores e torná-los aptos para a corrida. Além disso, parte da ins-

talação de todo cabeamento para um conjunto de transdutores está sendo instalada para a corrida criogênica. Em breve o detector poderá ser ligado à procura de sinais de OGs. O Capítulo 4 descreve os métodos e resultados obtidos no desenvolvimento dos transdutores.

Além da técnica de detecção de OGs por massas ressonantes, há também a técnica de interferometria. O princípio do interferômetro é utilizar a característica ondulatória da luz para gerar um padrão de interferência, que é sensível a variações das posições dos espelhos. Os espelhos funcionam como massas de teste e se deslocam relativamente à passagem da onda gravitacional.

O LIGO (do inglês *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) está localizado nos Estados Unidos da América e é composto por dois interferômetros, distribuídos em dois sítios, nos estados de Washington e Louisiana (ABBOTT et al., 2009). Atualmente, ambos estão desligados e em desenvolvimento para uma versão mais avançada, que se denomina *Advanced LIGO* (segunda geração) (WALDMAN, 2011). Esta versão tem grandes chances de detectar OGs. Contudo, é muito importante aumentar ainda mais sua sensibilidade. Um grande empecilho é a barreira de ruído vibracional, em baixas frequências. A fim de superar isso, os espelhos contêm um sistema de isolamento vibracional de três estágios (HARRY et al., 2010), de isolamento hidráulico, ativo e multipendular. Para mais detalhes vide Capítulo 5.

Paralelamente à pesquisa com o detector Schenberg, foi realizada uma pesquisa sobre molas de gás para sistemas de isolamento vibracional. Tal dispositivo fará parte do isolamento vertical de um subsistema, o MNP (do inglês *Multi-Nested Pendula*, ou pêndulos multi-aninhados), desenvolvido para pertencer ao sistema de isolamento vibracional em baixas frequências ( $\leq 10$  Hz) das futuras gerações do LIGO.

A descrição do desenvolvimento e dos processos de construção da mola de gás a partir de um fole de borracha é feita no Capítulo 6. Também são apresentados os testes de estabilidade e os testes preliminares de transmissibilidade de um isolador, além dos últimos procedimentos para medir a transmissibilidade da mola de gás. A partir deste modelo, quinze molas serão montadas para serem instaladas no MNP e será investigada a transmissibilidade do sistema como um todo.

Uma nova proposta que está sendo investigada é a anti-mola geométrica, construída a partir de lâminas de aço curvadas como uma vara de pescar. Um conjunto destas anti-molas poderá constituir o isolamento vertical de um novo sistema de pêndulos multi-aninhados, que está em desenvolvimento para futuras gerações do LIGO. Vide

## Capítulo 7.

As conclusões do trabalho realizado nas duas frentes de detecção de OGs – o detector Schenberg e o LIGO – estão apresentadas no Capítulo 8 dessa dissertação.



## 2 ONDAS GRAVITACIONAIS

Este capítulo é destinado a uma breve discussão da natureza das OGs, que são previsões da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Nesta teoria, a gravidade é um efeito da geometria do espaço-tempo, que é uma entidade dinâmica e deformável. As *equações de campo de Einstein* podem ser escritas como:

$$T_{\mu\nu} = \frac{c^4}{8\pi G} G_{\mu\nu} , \quad (2.1)$$

onde  $G_{\mu\nu}$  é o tensor de curvatura de Einstein, que descreve a deformação do espaço-tempo,  $T_{\mu\nu}$  é o tensor energia-momento, que expressa a fonte causadora desta curvatura,  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $G$  é a constante gravitacional e  $c^4/8\pi G$  é a constante de acoplamento. Os índices gregos representam coordenadas espaço-temporais  $\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$ . Considerando o espaço-tempo um meio elástico e fazendo uma analogia com a lei de Hooke, sendo  $T_{\mu\nu}$  a “força” e  $G_{\mu\nu}$  o “deslocamento”, a equação 2.1 tem uma solução de onda, assim como a solução da lei de Hooke. A analogia não é perfeita, contudo, pois a constante de acoplamento tem dimensões de força ( $c^4/G \sim 10^{43}$  N). Por fim, pode-se concluir que o espaço-tempo é um meio elástico capaz de suportar ondas, mas extremamente rígido (constante elástica muito alta), onde as amplitudes das ondas são extremamente pequenas, e com densidades de energia muito altas (BLAIR, 1991).

Uma forma de obter explicitamente a equação da OG é através da linearização das *equações de campo de Einstein* no limite de campos gravitacionais fracos.

### 2.1 Linearização das equações de Einstein

Na Relatividade Geral, as *equações de campo de Einstein* são dadas por<sup>1</sup>

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2.2)$$

onde  $g_{\mu\nu}$  é a métrica quadridimensional que pode ser usada para definir distâncias e comprimentos de vetores numa *variedade Riemanniana* (D'INVERNO, 1992).

O *tensor* e o *escalar de Ricci*,  $R_{\mu\nu}$  e  $R$ , respectivamente, são obtidos do *tensor de*

---

<sup>1</sup>Considerando a constante cosmológica  $\Lambda = 0$ .

Riemann  $R_{\sigma\mu\rho\nu}$  (BUONANNO, 2007):

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} \quad (2.3a)$$

$$R_{\mu\nu} = R_{\mu\rho\nu}^{\rho} = g^{\rho\sigma} R_{\sigma\mu\rho\nu} \quad (2.3b)$$

$$R_{\mu\sigma\nu}^{\rho} = \Gamma_{\mu\nu,\sigma}^{\rho} - \Gamma_{\mu\sigma,\nu}^{\rho} + \Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} \Gamma_{\lambda\sigma}^{\rho} - \Gamma_{\mu\sigma}^{\lambda} \Gamma_{\lambda\nu}^{\rho} , \quad (2.3c)$$

onde admitimos a *convenção de soma de Einstein*  $g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} \equiv \sum_{\mu,\nu} g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$  .

Os  $\Gamma_{\nu\rho}^{\mu}$  são chamados *símbolos de Christoffel* ou *conexões afim* e são dadas por

$$\Gamma_{\nu\rho}^{\mu} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} (g_{\sigma\rho,\nu} + g_{\sigma\nu,\rho} - g_{\nu\rho,\sigma}) , \quad (2.4)$$

onde  $g_{\mu\nu,\rho} = \partial_{\rho} g_{\mu\nu} = \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}}$  .

Deste modo, a equação 2.2 pode envolver cálculos muito complicados. No entanto, considerando um campo gravitacional fraco, assumindo um espaço-tempo aproximadamente plano, esta dificuldade se reduz bastante (D'INVERNO, 1992). Logo, o método mais utilizado para se obter uma expressão matemática da OG é linearizar as equações de campo de Einstein, estudando uma expansão do espaço-tempo plano. Isto é,

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} , \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1, \quad (2.5)$$

onde  $\eta_{\mu\nu}$  é a métrica plana, também conhecida como *métrica de Minkowski*, e  $h_{\mu\nu}$  é a deformação da expansão considerada.

Ao se usar a métrica estabelecida na equação 2.5 e considerar  $|h_{\mu\nu,\rho}| \ll 1$ , bem como lembrar que  $\eta_{\mu\nu,\rho} = 0$ , a equação 2.4 se torna

$$\Gamma_{\nu\rho}^{\mu} = \frac{1}{2} \eta^{\mu\sigma} (h_{\sigma\rho,\nu} + h_{\sigma\nu,\rho} - h_{\nu\rho,\sigma}) . \quad (2.6)$$

Substituindo o resultado acima na equação 2.3c e desprezando os termos  $\mathcal{O}(h^2)$  obtem-se

$$R_{\mu\sigma\nu}^{\rho} = \frac{1}{2} \eta^{\rho\lambda} (h_{\lambda\nu,\mu\sigma} - h_{\mu\nu,\lambda\sigma} - h_{\lambda\sigma,\mu\nu} + h_{\mu\sigma,\lambda\nu}) , \quad (2.7)$$

e fazendo a contração, como na equação 2.3b, obtém-se o tensor de Ricci

$$R_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \left[ \left( h_{\nu}^{\rho} - \frac{1}{2} \delta_{\nu}^{\rho} h \right)_{,\mu\rho} + \left( h_{\mu}^{\lambda} - \frac{1}{2} \delta_{\mu}^{\lambda} h \right)_{,\nu\lambda} - \eta^{\lambda\rho} h_{\mu\nu,\lambda\rho} \right], \quad (2.8)$$

onde  $h = h_{\mu}^{\mu} = \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu}$ . Nesta última passagem, além de ter feito a contração, foi utilizada a igualdade

$$h_{,\mu\nu} = \frac{1}{2} \delta_{\mu}^{\lambda} h_{,\lambda\nu} + \frac{1}{2} \delta_{\nu}^{\rho} h_{,\rho\mu}.$$

Agora, define-se

$$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} h \quad (2.9)$$

e usa-se o *gauge de Lorentz* (MAGGIORE, 2008; BUONANNO, 2007), que é dado por

$$\bar{h}_{\mu\nu,}{}^{\nu} = 0, \quad (2.10)$$

para simplificar o tensor de Ricci, obtido na equação 2.8, para obter-se:

$$R_{\mu\nu} = -\frac{1}{2} \eta^{\lambda\rho} h_{\mu\nu,\lambda\rho}. \quad (2.11)$$

É possível usar a notação do operador d'Alembertiano  $\square = \eta_{\mu\nu} \partial^{\mu} \partial^{\nu} = \partial_{\mu} \partial^{\mu}$  para representar o tensor de Ricci, obtido acima, e seu escalar nas seguintes formas, respectivamente,

$$R_{\mu\nu} = -\frac{1}{2} \square h_{\mu\nu} \quad (2.12a)$$

$$R = -\frac{1}{2} \square h \quad (2.12b)$$

Finalmente, substituindo os resultados acima nas equações de Einstein 2.2, chega-se a uma equação de onda em termos do tensor de deformação  $\bar{h}_{\mu\nu}$ :

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (2.13)$$

já que o operador d'Alembertiano comuta na derivação.

A fim de se estudar a propagação destas ondas no vácuo, e sua interação com massas

de teste, considera-se  $T_{\mu\nu} = 0$ , o que leva a

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0 \quad (2.14)$$

Ao rescrever  $\square = -(1/c^2)\partial_0^2 + \nabla^2$ , a equação acima implica que estas ondas viajam à velocidade da luz. A propagação da deformação do espaço-tempo plano é nomeada onda gravitacional.

## 2.2 Polarização de ondas gravitacionais

Para o vácuo, é possível escolher o *gauge* transverso e de traço nulo, ou *gauge* TT, cujo tensor de perturbação da métrica segue o seguinte conjunto de equações (BUONANNO, 2007; MAGGIORE, 2008):

$$h^{0\mu} = 0, \quad h^i_i = 0, \quad h_{ij,j} = 0, \quad (2.15)$$

onde  $i, j = 1, 2, 3$  são as coordenadas espaciais. Nota-se que as componentes temporais do tensor de perturbação são nulas. As componentes espaciais são transversas à direção de propagação, livres de divergência e possuem traço nulo. Neste *gauge*, a deformação da métrica pode ser escrita como  $h_{ij}^{\text{TT}}$  e as soluções para a equação da OG no vácuo 2.14 assumem a forma (MAGGIORE, 2008)

$$h_{ij}^{\text{TT}}(x) = e_{ij}(\mathbf{k})e^{ikx}, \quad (2.16)$$

onde  $k^\mu = (\omega/c, \mathbf{k})$  e  $e_{ij}(\mathbf{k})$  é nomeado tensor de polarização.

Ao considerar uma onda plana monocromática viajando na direção  $+z$  é possível obter

$$h_{ij}^{\text{TT}}(t, z) = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{ij} \cos[\omega(t - z/c)], \quad (2.17)$$

onde  $h_+ \equiv h_{xx}^{\text{TT}} = -h_{yy}^{\text{TT}}$  e  $h_\times \equiv h_{xy}^{\text{TT}} = h_{yx}^{\text{TT}}$  são as amplitudes (campos tensoriais) “mais” e “cruz” que definem os dois modos de polarização das OGs.

Os campos  $h_+$  e  $h_\times$  deformam o espaço-tempo dando origem a forças que agem sobre a matéria (CATTANI, 2010a), denominadas “forças de maré” gravitacionais (PRESS; THORNE, 1972). Para visualizar o efeito destas forças, considere OGs planas pola-

rizadas incidentes na direção perpendicular ao plano que contém um conjunto de partículas de teste dispostas em forma de um anel (Figura 2.1). Sobre a incidência da onda, o anel sofre dois tipos de deformação, ou melhor, oscilação relativas, perpendiculares à direção de propagação da onda. Na polarização “+”, o anel oscila com amplitudes máximas nos eixos  $x$  e  $y$ , se contraindo em  $x$  e se expandindo em  $y$  durante primeiro meio ciclo e vice-versa no meio ciclo seguinte. Na polarização “ $\times$ ”, o mesmo tipo de oscilação ocorre, porém nas direções  $x = -y$  e  $x = y$ , com uma rotação de  $45^\circ$  em relação a “+” (BLAIR, 1991).

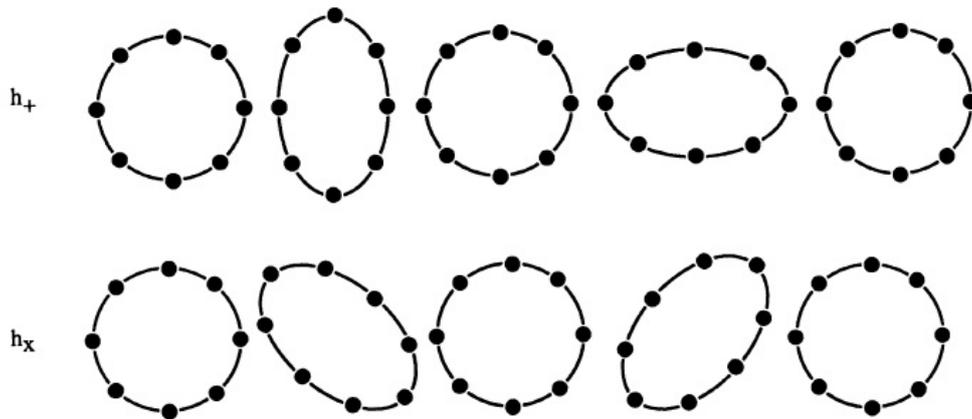


Figura 2.1 - Movimento causado em um anel de partículas de teste devido à passagem de uma onda gravitacional perpendicular ao plano da folha, polarizada em “+” e em “ $\times$ ”. O anel é distorcido durante a passagem de uma onda plana. Em cada um dos cinco pares, as fases da onda são  $0$ ,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  e  $2\pi$ .  
Fonte: Adaptada de Blair (1991).

A amplitude da deformação adimensional  $h \equiv \Delta L/L$ , é uma grandeza relativa de deslocamento que poderá ser medida pelos detectores de OGs. Ela depende das duas amplitudes de polarização por meio da expressão

$$h = \sqrt{h_+^2 + h_\times^2} . \quad (2.18)$$

Antes de entrar em detalhes sobre a detecção de OGs, é importante destacar suas prováveis fontes.

### 2.3 Fontes de ondas gravitacionais

O momento de quadrupolo de massa é o primeiro termo na expansão multipolar do campo de radiação gravitacional (CATTANI, 2010b). Logo, eventos como colapsos estelares simetricamente esféricos não emitem OGs (BLAIR, 1991), por exemplo.

A energia irradiada por unidade de tempo por um sistema, devido à emissão de OGs, é a luminosidade gravitacional  $L_{\text{OG}}$ , que pode ser determinada em relação à terceira derivada temporal do momento de quadrupolo  $\ddot{Q}_{ij}$ :

$$L_{\text{OG}} = \frac{G}{45c^5} \langle \ddot{Q}_{ij}^2 \rangle, \quad (2.19)$$

onde  $Q_{ij} = \int \rho_0(3x^i x^j - \delta_{ij} r^2) dV$ .

Esta energia é conduzida por uma onda plana com amplitude  $h$  e frequência  $\omega$  que podem ser relacionadas da seguinte forma (CATTANI, 2010b):

$$h^2 = \left( \frac{32\pi G}{\omega^2 c^3} \right) \left( \frac{L_{\text{OG}}}{4\pi r^2} \right), \quad (2.20)$$

onde  $r$  é a distância da fonte, muito maior que as dimensões da mesma.

Seguindo o exemplo de Cattani (2010b), pode-se estimar as luminosidades e amplitudes da OG devido uma fonte astrofísica e devido uma fonte hipotética construída em laboratório. Nos dois casos, considera-se um corpo rígido que vibra com simetria não-radial com frequência  $\omega$  e velocidade superficial  $v$ . No primeiro caso, considerando uma estrela de nêutrons com  $M \approx 1,4 M_{\odot}$ ,  $R = 10$  km e  $v/c \sim 0,03$ , a equação 2.19 fornece  $L_{\text{OG}} \sim 3 \times 10^{48}$  W. Se essa estrela estiver a uma distância de  $r = 10$  kpc, então a equação 2.20 fornece  $h \sim 10^{-20}$ .

Entretanto, para o caso de uma fonte construída em laboratório, considerando-se uma esfera sólida com  $M = 4 \times 10^3$  kg,  $R = 2$  m e  $v \approx 5 \times 10^3$  m/s, então,  $L_{\text{OG}} \sim 10^{-17}$  W e, a uma distância de  $r = 1$  m, a amplitude seria de  $h \sim 10^{-33}$ .

Este exemplo mostra que as OGs geradas em laboratório teriam amplitudes tão pequenas que não seria possível detectá-las com as técnicas atuais (que possuem sensibilidade de até  $h \sim 10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$ , em alguns casos). Contudo, alguns sistemas astrofísicos são possíveis fontes de OGs com amplitudes detectáveis.

Dentre as fontes de OGs citam-se:

- a) **Sistemas de estrelas compactas espiralando**, tais como binárias de EN-EN, EN-BN e BN-BN. Nestes sistemas, a emissão de OGs se dá por meio da perda energia e momento angular do sistema. O sistema fica por algumas centenas de milhões de anos nesta fase, emitindo uma OG monocromática e periódica. A frequência da OG é o dobro da frequência orbital e cresce lentamente, assim como a amplitude, enquanto a distância entre os dois corpos diminui, até eventual fusão.

Uma estimativa para a amplitude  $h$  de uma OG com frequência  $f_{\text{OG}}$  recebida de um sistema binário com órbita circular pode ser dada como (KOKKOTAS, 2008).

$$h \sim 5 \times 10^{-22} \left( \frac{M}{2,8M_{\odot}} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu}{0,7M_{\odot}} \right) \left( \frac{f_{\text{OG}}}{100 \text{ Hz}} \right)^{2/3} \left( \frac{15 \text{ Mpc}}{r} \right), \quad (2.21)$$

onde, aqui,  $\mu$  é a massa reduzida do sistema e  $M$  é a massa total do sistema.

Sistemas binários compactos podem emitir OGs totalmente polarizadas, dependendo da posição do plano de rotação do sistema, que seria observado da Terra. Considerando  $z$  a direção da fonte observada da Terra e  $xy$  o plano perpendicular a ela, se o plano de rotação esteja na horizontal ( $xz$ ) ou vertical ( $yz$ ) o sinal recebido é polarizado em “+”. Se o plano estiver formando  $\pm 45^\circ$  com o plano horizontal, o sinal recebido é polarizado em “ $\times$ ”. Se o plano de rotação for  $xy$ , o sinal é circularmente polarizado. Caso o plano de rotação estiver em outra posição, o sinal detectado é uma combinação não circular das polarizações “+” e “ $\times$ ”.

Quando um sistema binário compacto está chegando ao fim, isto é, quando os corpos estão muito próximos um do outro, no final da espiralação, a frequência e amplitude da OG aumenta rapidamente, emitindo um sinal denominado *chirp*.

Talvez o exemplo mais famoso de sistemas binários compactos seja o pulsar binário 1913+16, descoberto por Russell Hulse e Joseph Taylor em 1974 (HULSE; TAYLOR, 1975). A partir das observações da modulação do período de pulso, eles mostraram que o período orbital desse sistema está diminuindo justamente na razão predita pela TRG por emissão de OGs

(WEISBERG; TAYLOR, 2005). Portanto, esta é uma prova indireta da existência das OGs e eles foram agraciados com o Prêmio Nobel por esta descoberta em 1993.

Outros eventos ocorrem em LMXBs (do inglês *Low-Mass X-ray Binary systems*). São sistemas binários onde uma EN sofre acréscimo de matéria de seu par. O acréscimo dura o tempo suficiente para girar a EN até as taxas de milissegundo de rotação. Ele adiciona momento angular, que pode causar a emissão de radiação gravitacional (SATHYAPRAKASH; SCHUTZ, 2009).

- b) **Coalescência ou choque de estrelas compactas**, tais como o choque de EN-EN, EN-BN e BN-BN. Na fase de fusão (ou choque), os objetos possuem velocidades altíssimas, próximas a  $c/3$ , e experimentam campos gravitacionais extremamente intensos (ABERNATHY et al., 2011). O sinal é impulsivo, isto é, de curta duração (de milissegundos a segundos) e são, geralmente, denominados *bursts*.
- c) **Excitação dos modos quasi-normais de BN**, devido à acreção de matéria, que causa distorções assimétricas e emissão de OGs. De acordo com Kokkotas (2008), neste caso, uma estimativa para a amplitude da OG seria dada por

$$h \sim 2 \times 10^{-21} \left( \frac{\varepsilon}{0,01} \right) \left( \frac{10 \text{ Mpc}}{r} \right) \left( \frac{m}{M_{\odot}} \right), \quad (2.22)$$

onde  $\varepsilon$  é o grau de assimetria que pode ser  $\varepsilon \gtrsim 0,01$ ,  $r$  é a distância da fonte e  $m$  a massa que cai no BN. As frequências típicas destes sinais são altas, elas estão entre 1 e 3,2 kHz para BN com massas de cerca de 3 a 10  $M_{\odot}$ . A emissão ocorre em *bursts*, num fenômeno denominado *ringdown*, quando o BN tem seus modos excitados e começa a estabelecer um estado de repouso das deformações.

Estes sinais contêm informações da massa e do momento angular de BN. Além disso, eles podem fornecer detalhes da formação de BN e, consequentemente, dos sistemas que eles são formados (BLAIR, 1991).

- d) **Supernovas.**

Supernovas (SN) são classificadas em tipo I e tipo II. No primeiro caso ocorre uma detonação nuclear de uma anã branca, depois de ter acretado matéria de uma estrela companheira. No segundo caso ocorre um colapso

gravitacional do núcleo estelar nos estágios finais da evolução de uma estrela. Diferentes fases do processo de colapso de uma SN podem produzir sinais de OGs. Se o colapso for não esférico, talvez induzido por alta rotação, então sinais impulsivos (*bursts*) de OGs podem ser gerados, carregando parte da energia de ligação e do momento angular. Além disso, a emissão anisotrópica de neutrinos pode causar ressalto do núcleo e gerar sinais de OGs (KOKKOTAS, 2008).

Simulações sugerem que, em uma SN típica, entre cerca de  $10^{-7}$  e de  $10^{-5}$  da matéria-energia total pode ser transformada em OGs. Uma estimativa grosseira para a amplitude  $h$  recebida em um *burst* de duração  $\tau$  e com energia  $E$  de uma SN pode ser dada como (SATHYAPRAKASH; SCHUTZ, 2009):

$$h \sim 6 \times 10^{-21} \left( \frac{E}{10^{-7} M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{1 \text{ ms}}{\tau} \right)^{1/2} \left( \frac{1 \text{ kHz}}{f_{\text{OG}}} \right) \left( \frac{10 \text{ kpc}}{r} \right). \quad (2.23)$$

e) **Pulsares ou EN, emitindo *bursts*.**

A queda de blocos (*blobs*) de matéria numa EN pode causar a emissão de sinais impulsivos de OGs. A emissão pode ocorrer tanto através da queda do material, como também através dos modos vibracionais da EN que foram excitados pela acreção abrupta.

*Bursts* de OGs também podem ocorrer na recém-nascida EN, após o colapso nuclear de uma SN. Neste instante, a EN pode ter uma rotação muita alta e formar um modo barra e, assim, dissipar energia através de sinais intensos de OG. Parte do material da EN pode “espurrar” para fora e formar um disco irregular não uniforme. Esse material pode cair novamente na EN e excitar seus modos vibracionais. Todas esses processos são fontes impulsivas de OGs. Os discos de matéria podem ter uma emissão um pouco mais longa, mas não por muito tempo. A intensidade da onda (amplitude) depende da massa do material acretado e a frequência depende da aceleração (ou tempo de queda) do material. Já a OG emitida pela excitação dos modos normais, tem a mesma frequência deles.

f) **Pulsares ou EN, emitindo sinais periódicos.**

Sinais periódicos de OGs podem ser gerados por movimentos convectivos na EN e instabilidades na superfície (KOKKOTAS, 2008). Se a rotação da

EN variar então a obliquidade também pode variar; normalmente a EN perde rotação e a linha que cicunda a superfície da estrela no plano de rotação fica mais estreita. Com isso, a crosta, possivelmente formada por ferro, rígida, resiste à mudança até um instante em que ela muda repentinamente. Logo, ocorre a quebra brusca da crosta, que causa pontas na superfície, irregularidades. Irregularidades como estas, não simétricas, causam a emissão de OGs. A periodicidade do sinal é devido à rotação da EN e o sinal é monocromático.

Sinais periódicos também podem ser gerados através de um material que cai continuamente, e excita os modos normais de vibração. Isso pode, também, aumentar a rotação da EN, que depois pode emitir OGs através da perda de momento angular.

g) **Fontes estocásticas e outras.**

A superposição de OGs geradas por muitas fontes não correlacionadas e fontes não resolvidas produzem um fundo *estocástico* de OGs. Estes sinais podem conter informações exclusivas sobre o início da evolução do Universo (LESGOURGUES et al., 2000; EASTHER; LIM, 2006), e podem permitir a investigação de modelos de inflação e cosmologias alternativas.

Há também previsões de fontes exóticas, como, por exemplo, cordas cósmicas, que são defeitos topológicos lineares que poderiam ser formados em uma quebra de simetria durante a fase inicial do Universo (DAMOUR; VILENKIN, 2000). Outros causadores não previstos de “defeitos” ou de perturbações no espaço-tempo também poderiam ser investigados através das OGs.

### 3 O DETECTOR MARIO SCHENBERG

#### 3.1 Detecção por massa ressonante

A detecção direta de OGs começou a ser investigada já na década de 1960, e seu pioneiro foi Joseph Weber, que desenvolveu o primeiro detector de massa ressonante (WEBER, 1969). Os primeiros detectores, ou antenas, de ondas gravitacionais consistiam de barras cilíndricas maciças.

Com o tempo, vários projetos de detectores foram propostos. Na década de 1990, cinco detectores de ondas gravitacionais, produzidas com massas ressonantes no formato de barras cilíndricas, foram ligados (Tabela 3.1). Nesta mesma época, projetos para o desenvolvimento de esferas ressonantes foram propostos, denominados TIGA, GRAVITON, GRAIL e SFERA (AGUIAR, 2011), de onde um deles resultou na construção do detector Mario Schenberg (Gráviton) e outro na construção do detector holandês MiniGRAIL (GRAIL). Ambos foram construídos a partir esferas ressonantes idênticas, gêmeas.

Tabela 3.1 - Detectores do tipo barra em operação na década de 1990

Detector	Ano de operação para corrida científica	Localização
EXPLORER	1990	CERN (Genebra, Suíça)
ALLEGRO	1991	Baton Rouge (Louisiana, USA)
NIOBE	1993	Perth (Austrália Ocidental, Austrália)
NAUTILUS	1995	Frascati (Roma, Itália)
AURIGA	1997	Legnaro (Padova, Itália)

Fonte: Aguiar (2011).

Tanto barra quanto esfera devem estar suspensas, isoladas de vibrações (inclusive som) e resfriadas (temperaturas criogênicas, de cerca de 5 K a dezenas de mK). Além disso, devem ser produzidas de material de baixa perda mecânica para que a energia da OG cause vibrações passíveis de medição.

Em teoria, quando uma OG incide sobre um detector de massa ressonante, ele absorve certa quantidade de energia, o que causa um certo deslocamento relativo entre os pontos do material. Se o material for ressonante então ele permanece oscilando

durante um certo tempo após a passagem da OG. As respostas das massas ressonantes podem ser expressas em termos da *seção de choque de absorção*  $\sigma_{\text{abs}}(\omega)$  que caracteriza o detector e é definida por (MAGGIORE, 2008)

$$\frac{dE_{\text{abs}}}{dt} = \sigma_{\text{abs}}(\omega) \frac{dE_{\text{in}}}{dAdt} , \quad (3.1)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular da OG monocromática incidente,  $dE_{\text{in}}/dAdt$  é a energia incidente em uma área por unidade de tempo e  $dE_{\text{abs}}/dt$  é a energia absorvida por unidade de tempo.

A seção de choque de absorção é proporcional ao *fator de qualidade mecânico*  $Q_{\text{mec}}$ , que por sua vez depende de propriedades do material (por exemplo, a velocidade do som) do sólido. Sinais *bursts* excitam o sólido durante um intervalo de tempo da ordem de milissegundos, que é muito menor que o *tempo de relaxação*  $\tau_0 \sim 600$  s do material (MAGGIORE, 2008). Neste sentido, tem-se a relação

$$Q_{\text{mec}} = \omega_0 \tau_0 , \quad (3.2)$$

onde  $\omega_0$  é a frequência de ressonância do material. Sinais periódicos, por sua vez, excitam o sólido durante um intervalo de tempo maior. Isso ocorre até que a taxa com que a energia absorvida se iguale às perdas acústicas.

Uma questão importante é de como os deslocamentos da massa ressonante podem ser medidos. Para isso, são usados *transdutores* eletromecânicos, dispositivos que transformam as oscilações mecânicas em sinais elétricos. Particularmente, nos *transdutores ressonantes*, o deslocamento é amplificado mecanicamente antes de ser convertido em sinal elétrico (MAGGIORE, 2008). Após a transdução, os sinais são enviados para um sistema de aquisição de dados.

### 3.2 O detector Schenberg

No final da década de 1980 iniciaram-se pesquisas em esferas ressonantes como antenas para detecção de OGs. Já a pesquisa para a criação de um detector brasileiro iniciou-se no começo da década de 1990, e seu pioneiro foi Odylio Aguiar (AGUIAR, 2011). No ano 2000 foi iniciado o desenvolvimento do detector Mario Schenberg, após a formação do grupo Gráviton.

O detector de OGs brasileiro Mario Schenberg (Figura 3.1) se localiza em São Paulo no Laboratório de Física do Estado Sólido e Baixas Temperaturas do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (LESBT/IFUSP) e envolve a colaboração de muitas instituições. Seu principal componente é uma esfera de massa ressonante com cerca de 1150 kg e 65 cm de diâmetro, composta de uma liga Cu-Al(6%). O  $Q_{\text{mec}}$  da antena é de  $2,7 \times 10^6$  na temperatura  $T = 2$  K e segue a dependência  $Q_{\text{mec}} = 4,9 \times 10^6 T^{-0,86}$  (AGUIAR, 2011).



Figura 3.1 - À esquerda, imagem conceitual do projeto do detector esférico de massa ressonante Mario Schenberg. À direita, o mesmo detector instalado na USP em São Paulo.

Fonte: Gratens (2014) (esquerda).

Em relação aos detectores do tipo barra, os do tipo esfera têm muitas vantagens. Por exemplo, a detecção pela esfera pode identificar a direção de incidência e a polarização de uma OG, inclusive em teorias alternativas de gravitação. Isso porque cada um de seus modos quadrupolares (vide Seção 3.2.2) pode vibrar e ser monitorado distintamente.

O objetivo da antena Schenberg é detectar sinais numa banda passante de 100 Hz, centrada em 3,2 kHz (que é a frequência de ressonância dos modos quadrupolares e, portanto, região com maior sensibilidade), com sensibilidade até  $\sim 10^{-22}/\sqrt{\text{Hz}}$  quando resfriada a temperaturas da ordem de dezenas de milikelvins. Em 2006 ela operou a temperatura de 5 K com três transdutores (AGUIAR, 2011). Atualmente, o detector está em desenvolvimento.

### 3.2.1 Fontes de ruído, isolamento vibracional e resfriamento

Os detectores de OGs são projetados para realizarem medidas de movimentos com amplitudes extremamente pequenas. Assim, qualquer fonte de ruído pode ser um empecilho à medida do sinal da OG. Quanto menor for a ação das fontes de ruído sobre a antena Schenberg, maior será sua sensibilidade de detecção. Dentre as fontes de ruído, citam-se (MELO, 2002):

- a) **ambiental**, decorrente das atividades humanas (trânsito, construção civil, etc.), condições climáticas, marés, fauna, etc.
- b) **sísmico**, decorrente dos movimentos da crosta terrestre, são inevitáveis e tem maiores amplitudes em frequências menores que 10 Hz.
- c) **térmico**, que tem origem no movimento browniano da antena, e é proporcional à razão entre o tempo de integração da medida e o tempo de relaxação, isto é,  $\kappa T(\tau_m/\tau_0)$ , onde  $\kappa$  é a constante de Boltzmann (BLAIR, 1991).
- d) **eletrônico** de reação do transdutor, no qual uma perturbação linear originada no ruído de entrada do amplificador é reintroduzida na antena pelo transdutor. Este ruído é minimizado usando transdutores especificamente construídos para contornar esse problema e amplificadores de baixíssimo ruído, como os SQUIDS<sup>1</sup>, por exemplo.

As fontes mais limitantes são o ruído sísmico vibracional e o ruído térmico. O detector conta com um sistema de isolamento vibracional que isola os ruídos sísmicos ou ambientais em um nível de cerca de 300 dB na região de detecção. Há isolamento vibracional em três regiões (MELO, 2002):

- a) **na esfera**, onde os filtros mecânicos são uma suspensão de vários estágios de massas e molas (ver Figura 3.1).
- b) **na fixação** dos transdutores, onde diferentes massas devem ser presas aos cabos coaxiais para que as vibrações do laboratório não cheguem à antena através dos mesmos.

---

<sup>1</sup>SQUID, do inglês *Superconducting Quantum Interface Device*, pode ser pensado como um dispositivo que transforma uma variação de fluxo em voltagem. Opera-se, geralmente, como um detector nulo em um circuito *feedback* (ANDRADE, 2001).

c) e na conexão térmica com o refrigerador por diluição.

O sistema de refrigeração do detector é composto por um vaso de pressão externo que possui camadas criogênicas para nitrogênio e hélio líquidos. Parte do sistema de isolamento vibracional fica dentro da região do nitrogênio e a parte mais próxima da esfera fica na região do hélio, inclusive. As temperaturas da ordem de dezenas de milikelvins são obtidas por um refrigerador de diluição de hélio. Além de tudo, quando o detector estiver operando, a esfera será mantida no vácuo.

### 3.2.2 Modos de ressonância da esfera e disposição dos transdutores

A esfera possui cinco modos normais quadrupolares de vibração, cada um com massa efetiva de 287 kg e com frequência de ressonância de cerca de 3200 Hz. Estes valores dependem, essencialmente, das dimensões da esfera. Por razões econômicas, a construção do vaso criogênico impôs um diâmetro máximo permitido para a esfera (65 cm), que determinou os valores de frequência dos modos.

Tais modos devem ser monitorados pelos transdutores e, como não existe um poliedro regular que tenha exatamente cinco ou dez faces, optou-se por utilizar o icosaedro truncado para configuração de orientação dos transdutores. Este arranjo, onde seis transdutores ocupam seis faces pentagonais não opostas, é denominado TIGA (do inglês, *Truncated Icosahedron Gravitational Antenna*) (JOHNSON; MERKOWITZ, 1993). Além desses seis transdutores, outros dois serão utilizados para monitorar o primeiro modo monopolar da esfera.

Quando uma OG na faixa de frequências dos modos normais atingir a esfera ressonante uma parte da energia será absorvida pelo sólido e excitará os modos normais de vibração. A ressonância destes modos permitirá que os transdutores, acoplados na superfície da esfera, produzam um sinal proporcional às amplitudes de vibrações. No total, o conjunto de transdutores poderá informar a polarização da OG, inclusive em teorias alternativas de gravitação, e a direção da fonte.

### 3.2.3 Transdutores

Como mencionado no fim da Seção 3.1, os transdutores empregados na detecção de OGs servem para medir com precisão pequenos deslocamentos, transformando-os em sinais elétricos. Há basicamente dois sistemas utilizados para isso, que distinguem dois transdutores: os *passivos* e os *paramétricos*. Os passivos modulam um campo DC sem uma fonte de potência externa e os processos de transdução e amplificação

do sinal são distintos. Já nos paramétricos o campo AC modulado é gerado por uma fonte de potência externa e os processos de transdução e amplificação estão combinados (BLAIR, 1991).

A geração atual de transdutores (Figura 3.2) desenvolvidos para a antena Schenberg são feitos de nióbio e são do tipo *ressonantes paramétricos*.



Figura 3.2 - Conjunto de oito transdutores paramétricos, da sexta geração, desenvolvidos para próxima corrida do detector Mario Schenberg. Nesta imagem, as cavidades estão abertas e as “tampas” podem ser vistas separadas dos corpos dos transdutores.

O funcionamento básico destes transdutores ocorre da seguinte maneira: a vibração mecânica do modo quadrupolar da esfera é amplificada mecanicamente pelo transdutor e em seguida um sinal eletromagnético dentro de sua cavidade é modulado por essa vibração.

Quando acoplado na antena, o sistema esfera-transdutor funcionará como três sistemas massa-mola (osciladores harmônicos) de três massas (AGUIAR et al., 2012), cujas massas são:

- a) a massa efetiva do modo quadrupolar da antena de cerca de 287,5 kg,
- b) o corpo do transdutor com massa de cerca de 25 g,
- c) e a membrana do transdutor, cuja massa é aproximadamente de 2 mg.

Desta maneira, a oscilação da esfera será transmitida para a membrana com um ganho da ordem de  $10^4$  em amplitude. Essa membrana constitui uma das paredes

da cavidade ressonante do transdutor. A cavidade do transdutor tem estrutura cilíndrica e um “poste” cônico central no interior. Ela é formada quando a “tampa” (peça em formato de círculo com furos; oito são mostradas na Figura 3.2) é encaixada ao restante do corpo do transdutor. A Figura 3.3 mostra um corte transversal desta cavidade, bem como as aberturas para entrada e saída do sinal de microondas.

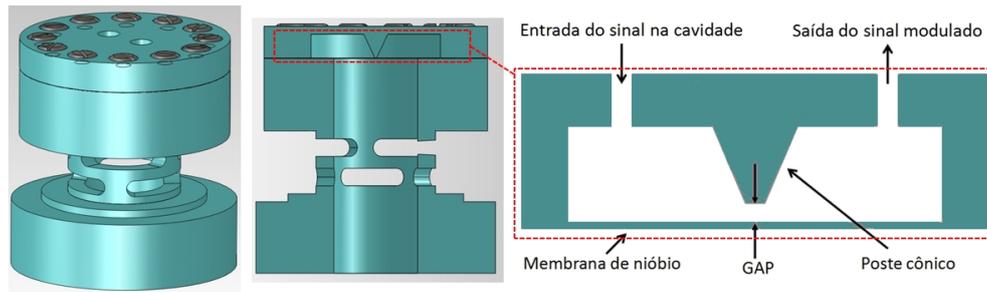


Figura 3.3 - À esquerda e centro, imagem e corte representando o modelo atual de transdutor para a antena Schenberg. À direita, esquema da cavidade ressonante de um transdutor (fora de escala).  
Fonte: Adaptada de Aguiar (2013).

A distância entre a base superior (ponta) do poste e a membrana forma um *gap* (de cerca de  $3 \mu\text{m}$ ). Essa configuração forma uma capacitância e uma indutância na cavidade, que determinam a frequência de ressonância elétrica (TURNER, 1995). Desta forma, o sinal injetado  $\omega_b$  pode ser modulado pela frequência de ressonância da cavidade que, por sua vez, é modulada pela oscilação da membrana  $\omega_0$  (com  $\omega_b > \omega_0$ ), produzindo bandas laterais na frequência do sinal injetado ( $\omega_b \pm \omega_0$ ) (MAGGIORE, 2008).

A frequência de ressonância da membrana deve ser de 3,2 kHz, ou seja, a mesma dos modos quadrupolares da esfera. Já as cavidades dos transdutores foram projetadas para ressoar microondas em 9,44 GHz, que é a mesma frequência produzida pela fonte externa injetora do sinal, um oscilador de Safira de ultra-baixo ruído de fase. O *gap* é um dos parâmetros principais para se atingir esse valor de frequência de ressonância na cavidade. Em simulações realizadas, o valor obtido para o *gap* foi de  $3 \mu\text{m}$  (AGUIAR, 2013). Baixos valores de *gap* ocorrem quando uma maior sensibilidade para a transdução é requerida (TURNER, 1995).

O estudo realizado com as simulações também revelou uma sensibilidade de deslocamento para o *gap* de aproximadamente  $800 \text{ MHz}/\mu\text{m}$  e, além disso, um  $Q_e$  de cerca

de  $5 \times 10^5$ . O fator  $Q_e$  é um parâmetro importante na caracterização de desempenho, ele é proporcional a razão entre a energia armazenada e a energia dissipada na cavidade (FURTADO, 2009) e depende da geometria escolhida (BLAIR, 1991).

O nióbio foi escolhido como material para fabricação por apresentar supercondutividade abaixo de 9,2 K, o que reduz as perdas elétricas na transdução. Além disso, o nióbio possui alto  $Q_{mec}$ , uma propriedade útil à vibração da membrana e do corpo do transdutor.

### 3.2.4 Sistema de detecção

Um esquema do sistema eletrônico para a próxima corrida do detector Mario Schenberg é apresentado na Figura 3.4. Um sinal em microondas de 9,44 GHz é produzido por um oscilador de Safira de baixo ruído de fase. O ajuste fino para a frequência de ressonância da cavidade é feito utilizando-se uma fonte comercial de microondas (*Anritsu*), também com baixo ruído de fase (FURTADO, 2009). O sinal resultante é dividido em duas partes de potências iguais.

Uma parte do sinal é injetada na cavidade do transdutor através de sondas (as sondas são as pontas dos cabos coaxiais que se posicionam em frente aos orifícios da cavidade). Tais sondas não estão ligadas mecanicamente ao transdutor para evitar que o cabeamento transfira à esfera qualquer ruído vibracional. Uma vez que a cavidade ressonante está acoplada ao detector e em decorrência de sua frequência de oscilação mecânica, bandas laterais (de  $\pm 3,2$  kHz) são produzidas na frequência de ressonância elétrica da cavidade (FURTADO, 2009).

Após a transdução, basicamente, o sinal modulado é captado pela outra sonda do par de sondas, volta e é misturado com a segunda parte do sinal original. Assim, o sinal resultante carregará somente a informação modulada pela cavidade ressonante. Este sinal é analisado em busca da presença de OGs.

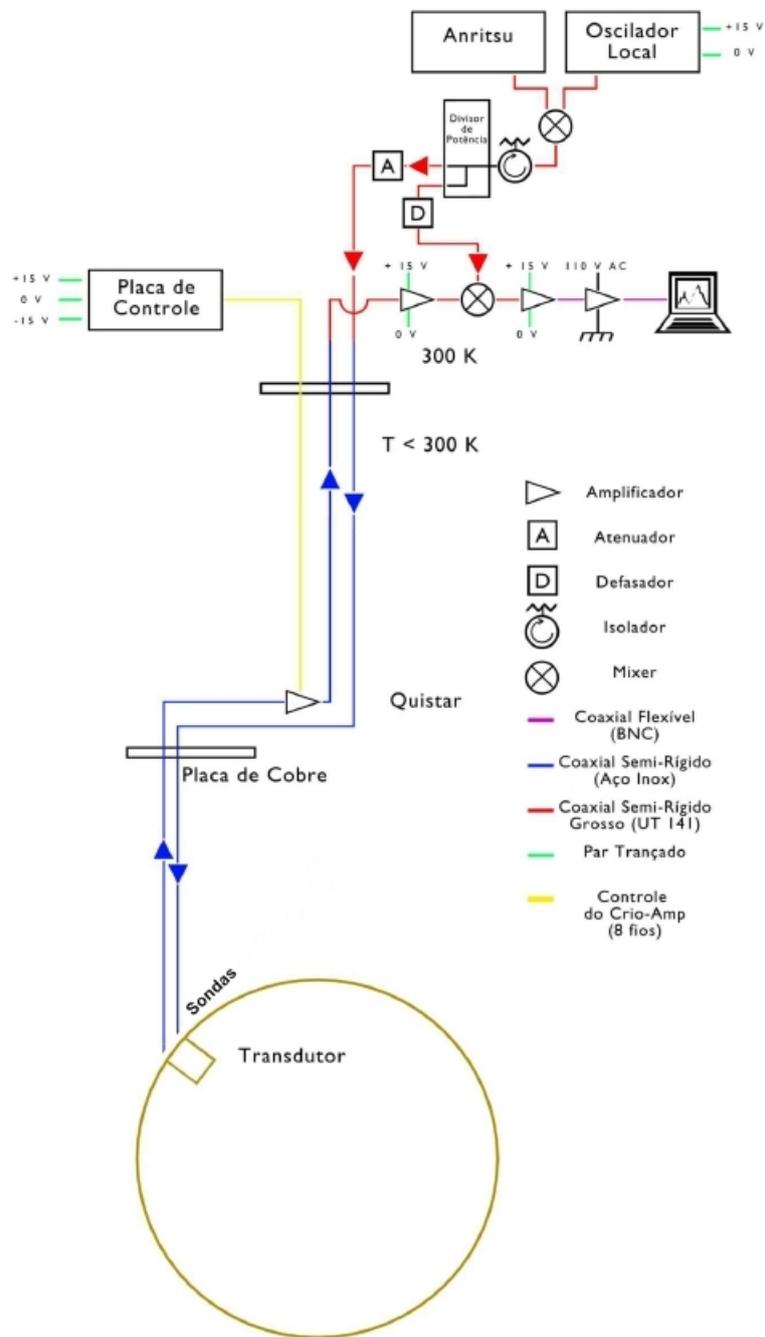


Figura 3.4 - Esquema do sistema eletrônico para a próxima corrida do detector Mario Schenberg.

Fonte: Adaptada de Aguiar et al. (2012).



## 4 DESENVOLVIMENTO DOS TRANSDUTORES

### 4.1 Ajuste das cavidades

A chave para se obter a melhor *performance* dos transdutores é o ajuste das cavidades para ressoar microondas em cerca de 9,44 GHz. Em teoria, isso será alcançado quando o *gap* estiver próximo de 3  $\mu\text{m}$ . No entanto, os *gaps* das oito amostras (“tampas” das cavidades dos transdutores), medidos com o uso de um micrômetro digital, são da ordem de 100  $\mu\text{m}$ . Logo, eles devem ser reduzidos.

Contudo, ajustar as cavidades para ressonarem em uma frequência específica é um grande desafio da fase de comissionamento. Isso porque o tamanho do *gap* precisa estar regulado na ordem de microns. Além disso, será evidenciado adiante que essa distância está ligada de forma não linear ao valor da frequência de ressonância. A seguir, são apresentados os métodos experimentais que foram testados e os métodos adotados para o ajuste dessa frequência.

### 4.2 Politriz

Um método utilizado para diminuir o *gap* foi desgastar mecanicamente a superfície da amostra (tampa) que fica em contato com o corpo do transdutor, com exceção do poste central. Obviamente, isso faz com que a altura da amostra diminua e o poste se aproxime do plano superficial, no qual fica a membrana de nióbio. Deste modo, o poste se aproxima da membrana (*gap* diminui).

A primeira tentativa realizada foi o lixamento numa politriz de laboratório. Esse equipamento usa energia elétrica para girar um disco – no qual é possível prender lixas – com velocidade de rotação que pode ser controlada conforme necessidade. Possui também uma torneira para molhar as lixas com água.

Para lixar somente a superfície da base da amostra e não o poste, foi feito um furo central na lixa de modo a ficar centrado quando a politriz estivesse ligada. A amostra foi segurada com as mãos no centro e sua superfície lixada. Entretanto, surgiram algumas dificuldades nesse processo. Uma delas foi manter a amostra fixa no centro com uma força suficiente para ocorrer o desgaste. A amostra saía do centro com facilidade. O desgaste foi monitorado com medições do *gap* entre poste e base. Em cerca de uma hora usando este método, não houve avanço significativo. Foram usadas lixas de granulações relativamente grossas, como as de número 80, 100 e 200.

### 4.3 Torno mecânico

Não havendo sucesso com o teste na politriz, as oito amostras foram levadas para a oficina mecânica do INPE. Lá, um torno mecânico foi preparado para prender as amostras, uma de cada vez, para serem desgastadas com uma retífica adaptada com uma pedra de carborundum. A parte esquerda da Figura 4.1 mostra esse processo: a amostra era encaixada e girada pela placa do torno. A retífica era posicionada de tal forma que somente o canto (aresta) da pedra desgastava a amostra, girando.

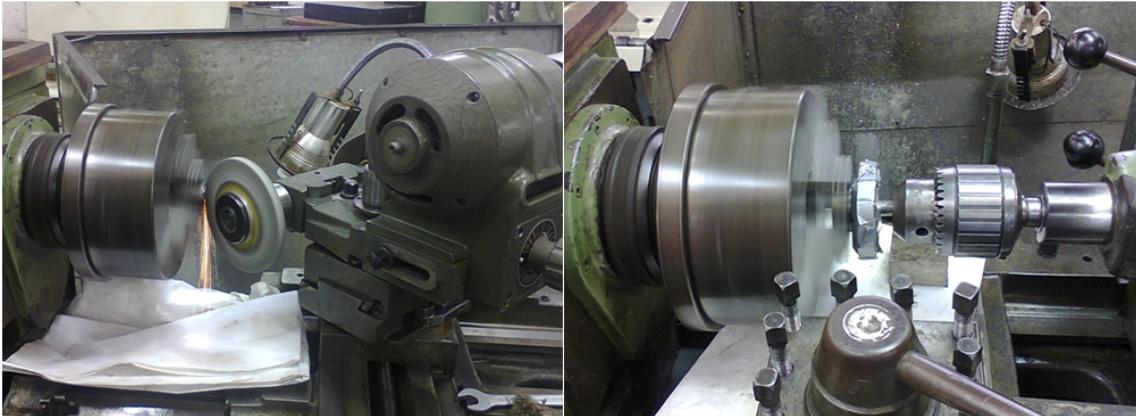


Figura 4.1 - Redução do *gap* da amostra no torno mecânico. À esquerda desgaste realizado com retífica. À direita, atrito em lixas coladas com fitas adesivas à uma base de vidro presa em uma peça adaptada no mandril.

Esse procedimento foi mais eficaz que o anterior pois os valores de *gap* que eram  $\sim 100 \mu\text{m}$  se tornaram entre 10 e 20  $\mu\text{m}$ .

Após o procedimento com a retífica, as amostras foram desgastadas com lixas no mesmo torno mecânico. E para auxiliar esse processo, uma peça de metal foi desenvolvida com a finalidade de apoiar e prender suavemente uma placa de vidro. O objetivo desta placa de vidro é apoiar as lixas garantindo uma superfície plana, lisa e uniforme para o lixamento. As lixas foram presas sobre o vidro com uma fita colante (parte direita da Figura 4.1). Tal como na retífica, as lixas possuíam um furo fixado no centro de rotação para não desgastar o poste da amostra. Entre a peça de metal e o vidro foi fixada uma membrana de borracha (com espessura  $\sim 5 \text{ mm}$ ) capaz de amenizar uma força excessiva entre a amostra e o vidro, absorvendo parte dela.

A lixa em uso era mantida molhada durante o procedimento de desgaste. Para

facilitar a troca de lixas, várias foram fixadas juntas na placa de vidro e, conforme foram desgastadas, eram rasgadas para dar lugar à próxima. Desta forma, as lixas com numerações maiores (granulações menores) foram postas nas últimas camadas. Estas etapas garantiram que a superfície da amostra ficasse mais homogênea em comparação ao desgaste obtido com a retífica e os *gaps* ficaram com cerca de 10  $\mu\text{m}$ .

#### 4.4 Lixamento manual

Mesmo após o cuidadoso lixamento no torno mecânico, as amostras não ficaram com a superfície suficientemente lisa ou homogênea para vedarem as cavidades dos transdutores. Era possível ver ranhuras e irregularidades nas superfícies desgastadas. Então, a ideia para o procedimento seguinte foi o lixamento manual para garantir um controle mais sensível do desgaste.

Nesta etapa, lixas eram cortadas em tiras de aproximadamente 10 mm de largura e eram fixadas duas a duas, próximas cerca de 5 mm uma da outra, numa mesa de vidro plana e limpa<sup>1</sup>. A fixação das tiras foi feita colando suas pontas na mesa com fita adesiva. Neste arranjo, as amostras foram atritadas com as lixas em um movimento alternado (de vai-e-vem), uma de cada vez, mantendo-se os postes fora de contato (Figura 4.2). As lixas estavam sempre molhadas, e a cada passo girava-se um pouco a amostra para desgastar toda sua superfície.

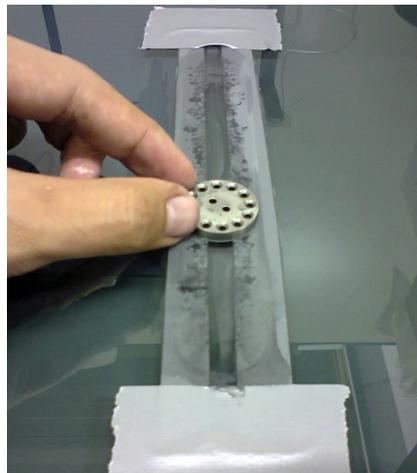


Figura 4.2 - Lixamento manual.

Em todo processo na primeira bateria de lixamento manual, foram usadas lixas de granulações sucessivamente menores (numerações 600, 1200 e 2000). Em cada

---

<sup>1</sup>A limpeza da mesa foi feita com água e guardanapos de papel.

amostra, todas as tiras de lixas eram usadas até seu desgaste completo, quando então o atrito se tornava desprezível. Para retirar as ranhuras e irregularidades, foram necessárias de 3 a 5 pares de tiras de lixa 600 e de lixa 1200 em cada amostra. Somente um par de tiras de lixas 2000 era usado em cada amostra, também até o desgaste completo. Toda vez que a lixa era trocada, a mesa era limpa. E quando a numeração era aumentada, a amostra era cuidadosamente limpa para não deixar grãos ou partículas maiores que as da próxima lixa, pois isso poderia dificultar o polimento e/ou deixar ranhuras na amostra. Aqui, a limpeza foi realizada com água, papéis toalha, cotonetes e ar comprimido, cuidadosamente.



Figura 4.3 - Amostras após a primeira bateria de lixamento manual.

As superfícies das amostras obtiveram um acabamento muito bom, especular (Figura 4.3). Os *gaps* se reduziram para a ordem de grandeza esperada, e alguns ficaram negativos<sup>2</sup>. O *gap* negativo não é um problema, isso será mostrado adiante. A Tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para os *gaps*.

#### 4.5 Montagem das cavidades

Com as amostras dimensionadas, resta montar as cavidades para verificar se há frequências de ressonância eletromagnética e se estão dentro dos limites esperados.

O primeiro passo foi garantir a limpeza das amostras para retirar gorduras e também impurezas deixadas pelas lixas. A limpeza teve duas etapas. A primeira foi realizada com água, cotonetes e jato de ar comprimido. A segunda foi realizada mergulhando

---

<sup>2</sup>Um *gap* negativo significa que a ponta do poste está para fora da base da amostra.

Tabela 4.1 - Medidas dos *gaps* das amostras (tampas) após a primeira bateria de lixamento manual.

Amostra	Gap médio aproximado [em $\mu\text{m}$ ]
1	0
2	0
3	0
4	-7
5	0
6	-15
7	0
8	-15

as amostras em álcool isopropílico dentro de um béquer, e todo esse conjunto foi levado para um aparelho ultrassom durante 10 min. Depois disso, as amostras foram secas a temperatura ambiente e guardadas em um dessecador, com sílica gel e vácuo.

O segundo passo foi a montagem das cavidades. Inicialmente, as oito amostras foram montadas em dois corpos de transdutor, uma a cada vez, e tiveram os seus valores de frequências medidos (os resultados são mostrados na Subseção 4.6.1).

Depois disso, uma nova limpeza foi feita e as amostras e os oito corpos dos transdutores foram levados para uma sala limpa, classe 10.000<sup>3</sup>, no prédio dos Sensores, no INPE, e lá a montagem foi realizada. Esse procedimento garante que nenhuma micropartícula de poeira, por exemplo, fique na cavidade e interfira nas medidas das frequências. Os corpos dos transdutores já estavam limpos e guardados em um dessecador. Contudo, dentro da sala limpa, todas as peças receberam um jato de ar seco comprimido. Em seguida, as amostras eram presas aos corpos dos transdutores usando porcas e parafusos roscados (Figura 4.4).

O ato de aparafusar oferece algumas vantagens, uma delas é a opção de reabrir a cavidade para realizar novos ajustes, caso necessário. Pensando nisso, para ter controle sobre o processo de reajuste, os transdutores e as amostras foram numerados e marcações foram feitas para alinhar o encaixe na remontagem. Além disso, como as medidas de frequência seriam inicialmente realizadas fora da sala limpa, eram coladas fitas adesivas sobre as entradas das cavidades para vedá-las, deixando apenas furos para as entradas das sondas. Os corpos dos transdutores também foram parcialmente cobertos com um filme plástico, deixando apenas o espaço para aparafusar.

<sup>3</sup>Ou seja, 10.000 partículas em suspensão no ar maiores que 0,5 microns por pé cúbico.

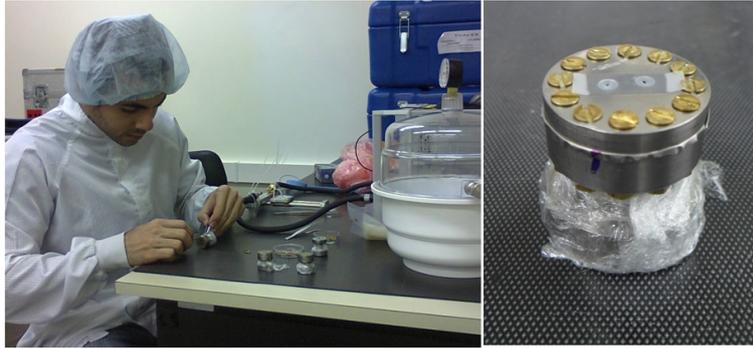


Figura 4.4 - À esquerda montagem das cavidades dos transdutores na sala limpa. À direita, transdutor após a montagem.

## 4.6 Medições no analisador de rede

Foi utilizado um analisador de rede para medir as frequências de ressonância eletromagnética das cavidades dos transdutores. Ele foi configurado para uma faixa de frequências de 7 a 15 GHz em um nível de cerca de -50 dB. No par de cabos do analisador de rede foram adaptadas sondas (pontas de cabos coaxiais) para serem introduzidas nas aberturas das cavidades. As medidas foram realizadas por transmissão, isto é, um dos cabos era responsável por inserir o sinal na cavidade (entrada) enquanto que o outro era responsável por ler o sinal modulado da cavidade (saída).

### 4.6.1 Medições com dois corpos de transdutores

As primeiras cavidades medidas foram formadas pelas amostras, de 1 a 8, combinadas, uma a uma, com dois corpos de transdutores. A intenção disso foi apenas verificar os valores das frequências de ressonâncias. Os demais corpos seriam usados após essa verificação preliminar.

Quando a configuração estava pronta, e as sondas posicionadas sobre as aberturas de uma cavidade, um pico de ressonância aparecia claramente no monitor do analisador de rede. Os valores de frequência de ressonância de cada cavidade de transdutor ( $f_0^{cav}$ ), formada pelas amostras da Tabela 4.1, foram registrados na Tabela 4.2.

Note que, com exceção da amostra 8, os valores de  $f_0^{cav}$  do corpo 2 são menores. Uma possível explicação para isso é que a membrana do corpo 2 está mais próxima dos postes das amostras, em relação a do corpo 1. Essa hipótese também explica a ausência de sinal nas amostras 4 e 6 para o corpo 2, onde os postes devem ter tocado na respectiva membrana, fechando o circuito. Nota-se também que as amostras 4 e 6 tem *gaps* negativos.

Tabela 4.2 - Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) das oito amostras em dois corpos de transdutores.

Amostra	$f_0^{\text{cav}}(1)$ [GHz]	$f_0^{\text{cav}}(2)$ [GHz]
1	12,52	9,75
2	11,32	7,50
3	12,48	10,06
4	9,85	(nenhum pico)
5	12,06	10,00
6	11,32	(nenhum pico)
7	12,65	10,80
8	9,58	10,04

A amostra 8 também apresentou *gap* negativo e mesmo assim obteve um bom resultado. Isso pode ter ocorrido devido à medida de *gap* ser uma média grosseira (realizada com o micrômetro) de diferentes regiões da superfície circular da base da amostra.

Com a obtenção de valores diferentes nos corpos 1 e 2, espera-se valores distintos nas medidas ao utilizar os demais corpos. Estes fatos mostram a importância da realização das medidas de  $f_0^{\text{cav}}$  em todas as amostras para determinar se o ajuste foi concluído, e não apenas as medidas dos *gaps*.

#### 4.6.2 Medições da primeira montagem dos oito transdutores

De um modo geral, os resultados preliminares foram animadores, pois mostraram que manter o *gap* na ordem de microns fez com que os valores de  $f_0^{\text{cav}}$  ficassem próximos aos desejados. O procedimento seguinte foi a montagem dos oito transdutores na sala limpa, como descrito anteriormente. Em seguida, as cavidades foram medidas no analisador de rede (Tabela 4.3).

Nesta primeira montagem obteve-se dois transdutores (7 e 8) com suas cavidades ajustadas a  $f_0^{\text{cav}}$  suficientemente próximas a 9,44 GHz. A partir de agora, as cavidades consideradas prontas serão apresentadas com o valor de  $f_0^{\text{cav}}$  em negrito, como na tabela acima.

A condição para que os valores das frequências de ressonância das cavidades sejam considerados aceitos tem a ver com o nível de ruído de fase da fonte comercial de microondas (*Anritsu*) para estes valores, lembrando que essa fonte será usada no ajuste fino para o valor de  $f_0^{\text{cav}}$ . Assim, o nível de ruído de fase típico para uma frequência deslocada em até 500 MHz de 9,44 GHz é de cerca de -128 dB,

Tabela 4.3 - Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores na primeira montagem.

Amostra	$f_0^{\text{cav}}$ [GHz]
1	12,69
2	11,36
3	13,08
4	10,98
5	(nenhum pico)
6	11,99
7	<b>9,88</b>
8	<b>9,50</b>

considerando a modulação do sinal, gerada pela membrana de nióbio, de 3,2 kHz (vide Anexo A).

Vale notar também que a amostra 5 não apresentou sinal, a hipótese é que o corpo 5 teve sua membrana em contato com o poste, o que causou curto-circuito.

#### 4.6.3 Compressão da cavidade

Se os parafusos forem apertados, “comprimindo” a cavidade, então o *gap* e, consequentemente, o valor de  $f_0^{\text{cav}}$  diminuem? Essa foi a questão que determinou o procedimento seguinte para as amostras 1, 2, 3, 4 e 6. No entanto, este teste mostrou que quando os parafusos são submetidos a um aperto maior os valores de  $f_0^{\text{cav}}$  aumentam ao invés de diminuírem (ver Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores após a compressão.

Amostra	$f_0^{\text{cav}}$ [GHz]
1	12,83
2	12,45
3	13,28
4	11,46
5	(nenhum pico)
6	12,38
7	<b>9,88</b>
8	<b>9,50</b>

Este fato inesperado foi uma descoberta vantajosa, pois agora tem-se uma nova

opção para diminuir o valor de  $f_0^{\text{cav}}$ , que é diminuir o aperto dos parafusos. Contudo há um limite: nenhum parafuso pode ficar frouxo para não comprometer o fator de qualidade mecânico do transdutor.

Uma possível explicação para esse efeito é que a região da borda interna da amostra é mais espessa que a correspondente externa. Assim, quando o aperto dos parafusos era aumentado, a tampa se curvava, fazendo o poste se distanciar da membrana. No sentido contrário, quando os parafusos estavam menos apertados, o poste se aproximava da membrana, e o valor de  $f_0^{\text{cav}}$  diminuía.

Essa diferença na espessura da amostra pode estar associada ao lixamento manual, onde a superfície mais próxima à borda externa sofre mais atrito e desgaste devido à força exercida pelas mãos.

#### 4.7 Reajuste das cavidades

Baseando-se nos dados das duas tabelas anteriores, afim de ajustar  $f_0^{\text{cav}}$ , decidiu-se reduzir o *gap* (em cerca de  $5 \mu\text{m}$ ) das amostras 1, 2 e 4, usando o método do lixamento manual. Já os transdutores 3, 5 e 6 foram escolhidos para verificar a eficácia de substituir a membrana de nióbio por uma nova, pois estas três membranas estavam aparentemente curvadas.

De uma folha de nióbio foram cortadas as membranas com diâmetro adequado de modo a não bloquear o espaço da furação para os parafusos. Elas foram imersas em álcool isopropílico em um béquer e o conjunto foi levado ao ultrassom durante 10 minutos, para limpeza, e depois secadas à temperatura ambiente. As membranas foram coladas (com cola extra forte, *Loctite<sup>®</sup> Super Bonder<sup>®</sup>*), uma em cada transdutor, e mantidas imóveis para secarem durante 24 horas. Depois disso, as seis cavidades foram montadas e levadas para medição no analisador de rede. As medidas são apresentadas na coluna Etapa 1 da Tabela 4.5. É importante salientar que todo procedimento de remontagem das cavidades foi realizado na sala limpa.

Os dados dessa etapa mostram que a troca das membranas não alterou significativamente os valores de  $f_0^{\text{cav}}$ . Além disso, apesar de alguns *gaps* já estarem negativos, a redução de  $5 \mu\text{m}$  nas demais amostras foi insuficiente para reduzir significativamente a frequência de ressonância. É importante lembrar que essa redução, medida com o micrômetro, é apenas uma média de toda a superfície da amostra, podendo, ser maior ou menor em diferentes posições.

Infelizmente, a  $f_0^{\text{cav}}$  da amostra 8 aumentou, devido à um descuido durante uma

nova medição, quando a sonda entrou na cavidade e tocou na membrana, afastando-a para longe do poste. Houve também uma mudança na  $f_0^{\text{cav}}$  da amostra 7, mas que, felizmente, não modificou a sua condição de aceitação.

Tabela 4.5 - Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores (etapas 1 a 5).

Amostra	$f_0^{\text{cav}}$ [GHz]				
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4	Etapa 5
1	12,76	12,88	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>
2	12,44	12,32	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>
3	13,40	13,88	13,36	13,16	12,76
4	10,96	10,92	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>
5	13,12	13,28	13,00	12,76	12,64
6	12,64	13,20	12,36	12,00	11,74
7	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>
8	11,28	11,28	10,60	10,08	<b>9,48</b>

A próxima etapa para tentar diminuir o valor de  $f_0^{\text{cav}}$  (ou ao menos verificar o quanto ela é alterada) foi desparafusar as amostras e reparafusá-las após um giro de 180° em relação ao corpo do transdutor (posição original da tampa). As amostras foram levadas ao analisador de rede e os resultados são apresentados na coluna Etapa 2 da Tabela 4.5. Comparando os dados com a Etapa 1 observou-se que a frequência de ressonância pode ser alterada em décimos quando a posição de fechamento da tampa é alterada. Logo, para ter controle no reajuste, é importante que as amostras sempre sejam reparafusadas na posição original.

Nestas etapas, nada foi feito com o transdutor 7, nem mesmo uma nova medição. A partir de agora, os transdutores prontos serão guardados em uma dessecadora para evitar acidentes, como ocorreu com o transdutor 8.

Na terceira etapa do reajuste, o analisador de rede foi levado à sala limpa e as cavidades foram medidas pelas sondas introduzidas suavemente com auxílio de um suporte de ajuste micrométrico (Figura 4.5). Os métodos de reajuste foram dois: i) apertar e/ou afrouxar os parafusos e depois medir, e ii) curvar a membrana do transdutor introduzindo cotonete protegido com um filme plástico ao mesmo tempo em que a cavidade é medida.

As amostras 1, 2 e 4 obtiveram sucesso com primeiro método e ficaram prontas. As amostras 3, 5, 6 e 8 também tiveram o valor de  $f_0^{\text{cav}}$  reduzido, no entanto não o

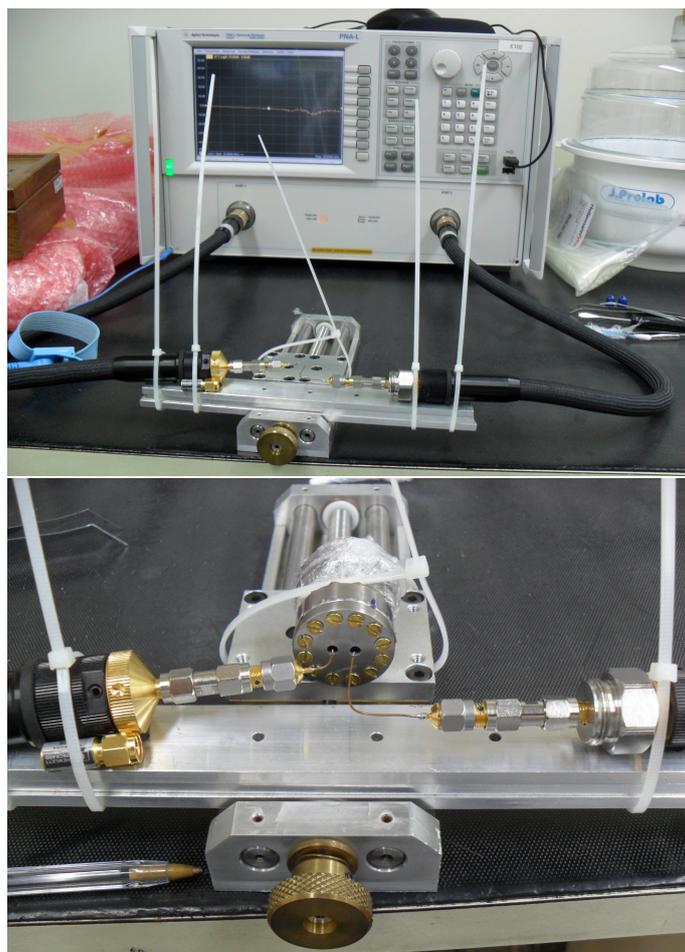


Figura 4.5 - Acima, analisador de rede instalado na sala limpa com os cabos presos na peça de ajuste micrométrica que foi utilizada para introduzir as sondas nas cavidades dos transdutores. Abaixo, a introdução das sondas nas cavidades para medição.

suficiente. Além disso, o método de empurrar as membranas não funcionou, pois elas voltavam às posições iniciais. Os novos valores são apresentados na coluna Etapa 3 da Tabela 4.5. Nesta altura do trabalho, metade das cavidades já foram ajustadas com sucesso.

Nas etapas seguintes foram realizadas novas baterias de lixamento manual nas amostras ainda não ajustadas. Na quarta e quinta etapa, as amostras tiveram seus *gaps* reduzidos de cerca de 8 a 15  $\mu\text{m}$  em cada etapa. Quanto maior fosse o valor de  $f_0^{\text{cav}}$  de uma amostra, mais se reduzia o *gap*. Por fim, a amostra 8 foi reajustada com sucesso, para um valor bem próximo de 9,44 GHz. Observando os resultados na Tabela 4.5 é evidente que o valor do *gap* está ligado de forma não linear ao valor da frequência de ressonância e isso dificulta o trabalho de reajuste.

Na sexta etapa, as cavidades das amostras restantes (3, 5 e 6) foram abertas na sala limpa e as membranas dos respectivos transdutores foram empurradas no sentido do poste, utilizando um cotonete com filme plástico. Não houve sucesso e o sinal da amostra 6 desapareceu. Por isto, a amostra 6 teve seu poste lixado e reduzido apenas 3  $\mu\text{m}$ .

Nas etapas seguintes (7, 8 e 9) as amostras restantes passaram por novas baterias de lixamento manual, limpeza e fechamento da cavidade e medição. O *gap* de cada uma foi sucessivamente diminuído, acompanhado pela evolução dos valores de  $f_0^{\text{cav}}$ . Atualmente, os valores estão em cerca de  $-30$  a  $-80 \mu\text{m}$  e os valores de frequência de ressonância em cada uma destas etapas podem ser vistos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Frequências de ressonância eletromagnéticas das cavidades ( $f_0^{\text{cav}}$ ) dos transdutores (etapas 6 a 9).

Amostra	$f_0^{\text{cav}}$ [GHz]			
	Etapa 6	Etapa 7	Etapa 8	Etapa 9
1	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>
2	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>	<b>9,52</b>
3	12,72	12,32	12,06	11,08
4	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>	<b>9,88</b>
5	12,08	11,92	11,56	10,54
6	(nenhum pico)	12,52	12,20	12,13
7	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>	<b>9,76</b>
8	<b>9,48</b>	<b>9,48</b>	<b>9,48</b>	<b>9,48</b>

Por fim, cinco transdutores já estão prontos para serem acoplados à esfera do detector Mario Schenberg e os três restantes estão sendo paulatinamente ajustados para o mesmo propósito.

#### 4.8 Instalação do cabeamento para um conjunto completo de oito transdutores

Oito circuitos completos estão sendo instalados para o funcionamento de 8 transdutores. Cada um desses circuitos é composto por um amplificador criogênico, um amplificador de microondas a temperatura ambiente, um mixer, um amplificador de áudio e todo o cabeamento correspondente.

As peças para fixação dos amplificadores criogênicos da Quinstar já estão montadas. Os cabos coaxiais semi-rígidos estão em processo de montagem (com serviço auxiliar

de terceiros), a partir da definição dos seus comprimentos.

Um dos conjuntos de cabos semi-rígidos é especial, pois segue o projeto de isolamento vibracional já definido (BORTOLI, 2011). Neste caso, os cabos devem possuir diferentes massas distantes entre si, segundo o projeto. Assim, as massas foram preparadas por um torneiro mecânico e soldadas posteriormente. A soldagem, porém, não teve êxito. Foi necessária a colagem das massas nos cabos, usando uma cola extra forte (*Super Bonder*<sup>®</sup>). Estes cabos ainda serão levados para instalação no detector.

Essa etapa de instalação do cabeamento está sendo realizada pelo grupo experimental do INPE que é vinculado ao detector Schenberg. Após toda a montagem completa, vários testes serão realizados para se garantir o funcionamento de todo o sistema.

#### **4.9 Corrida criogênica, testes, calibração e aquisição de dados**

Caso os testes iniciais do sistema sejam satisfatórios, será realizada uma corrida criogênica da antena. Durante esta corrida, testes do funcionamento do detector serão realizados, além de calibração e aquisição de dados. Estas etapas se realizarão também com o apoio do grupo (orientador e pós-doutores).



## 5 DETECTORES INTERFEROMÉTRICOS

A ideia da utilização de interferômetros para detecção de ondas gravitacionais foi independentemente proposta por Felix Pirani em 1956, M. Gertsenshtein e V.I. Pustovoit em 1962, J. Weber em 1964 e R. Weiss no final da década de 1960 (THORNE, 1987). O princípio do interferômetro é utilizar a característica ondulatória da radiação eletromagnética para gerar um padrão de interferência. Esse padrão é sensível às posições relativas dos espelhos do interferômetro. A Tabela 5.1 mostra o *status* e a localização de cada interferômetro. O tamanho dos braços será explicado depois.

Tabela 5.1 - Detectores interferométricos ao redor do mundo

Detector	Tamanho dos Braços	Localização	Status Atual
AIGO	-	Austrália	Em construção
CLIO	100 m	Kamioka Mine (Japão)	Operacional
EINSTEIN	10 km	Continente Europeu	Projeto
GEO600	600 m	Hannover (Alemanha)	Operacional
KAGRA	3 km	Kamioka Mine (Japão)	Em construção
LIGO	4 km	Livingston/Hanford (EUA)	Desligado (retorno previsto para 2014)
TAMA300	300 m	Tóquio (Japão)	Operacional
VIRGO	3 km	Cascina (Itália)	Desligado (retorno previsto para 2015)
LIGO-India (Indigo)	4 km	Próximo a Bangalore (Índia)	Em construção (previsto para iniciar em 2020)

### 5.1 Princípio de funcionamento

A Figura 5.1 apresenta um esquema conceitual de um interferômetro de Michelson. Ele consiste de um *laser*, cuja luz é enviada para um divisor de feixes, separando-a em dois feixes perpendiculares. No final da extensão de cada braço, existem espelhos que refletem os feixes de volta ao divisor, recombina-os. O feixe recombina-se para o fotodetector, onde é gerado um padrão de interferência.

A ação de uma onda gravitacional, de amplitude  $h$ , propagando-se na direção normal ao plano do interferômetro causa uma variação  $\delta L$  nas distâncias  $L$  entre as massas

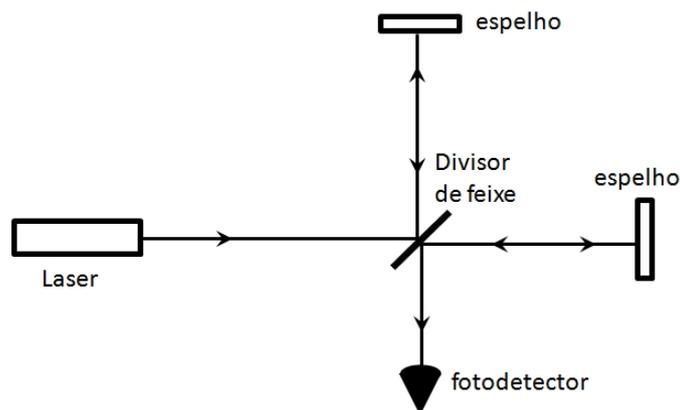


Figura 5.1 - Esquema de um interferômetro de Michelson.  
 Fonte: Adaptada de Maggiore (2008).

de teste (espelhos), na qual  $\delta L/L = h$  (BLAIR, 1991). A variação no comprimento dos braços do interferômetro provoca uma diferença de fase no sinal eletromagnético no fotodetector. Isso caracteriza a detecção da onda gravitacional.

De acordo com Maggiore (2008), o comprimento ótimo dos braços para ocorrer detecção, isto é, para que a OG cause o máximo deslocamento possível nas massas de teste, é

$$L \simeq 750 \text{ km} \left( \frac{100 \text{ Hz}}{f_{\text{OG}}} \right), \quad (5.1)$$

onde  $f_{\text{OG}}$  é a frequência da onda gravitacional. Logo, em razão dos interferômetros terrestres (de solo) serem restritos a detecção na faixa de 10 Hz a 10 kHz (BLAIR, 1991), os braços devem ter várias centenas de quilômetros. Em termos práticos, isso é inviável. Mas este problema pode ser contornado, ao considerar  $L$  como o caminho que a luz tem que percorrer. Uma primeira solução encontrada foi considerar “linhas de atraso”, onde os feixes vão e voltam em cada braço, sendo refletidos pelos espelhos, em caminhos não superpostos. Porém, neste caso, são necessários espelhos muito grandes, difíceis de se construir e caros. A solução que tem sido adotada pelos detectores interferométricos atuais é transformar o interior de cada braço em uma cavidade de Fabry-Perot (MAGGIORE, 2008).

Uma cavidade Fabry-Perot (FP) é composta por dois espelhos paralelos, na qual, em cada espelho, parte da luz é refletida e parte é transmitida (ver Figura 5.2). Os espelhos contêm um substrato no lado do interior da cavidade responsável pela alta

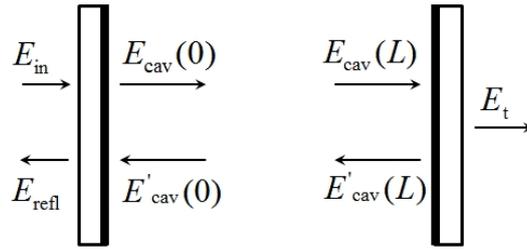


Figura 5.2 - Representação de uma cavidade Fabry-Perot. Parte de uma componente do campo elétrico incidente  $E_{in}$  é transmitida para o interior da cavidade  $E_{cav}(0)$  e se propaga até o outro espelho, do qual é parcialmente transmitida  $E_t$  e parcialmente refletida  $E'_{cav}(L)$ . E, novamente, é parcialmente refletida e parcialmente transmitida, e assim por diante.  
 Fonte: Adaptada de Maggiore (2008), p. 481.

refletividade. A quantidade de reflexões no interior da cavidade não influencia no desvio de fase entre os feixes.

## 5.2 Resposta do interferômetro à perturbação no espaço-tempo

A passagem de uma OG perpendicular ao plano dos braços de um interferômetro causa uma mudança de fase entre os dois braços de  $\Delta\Phi \approx 2h_+(2\pi L/\lambda)$ , no caso de uma onda polarizada em “+” com um período muito maior que o tempo de viagem da luz nos braços, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do *laser*.

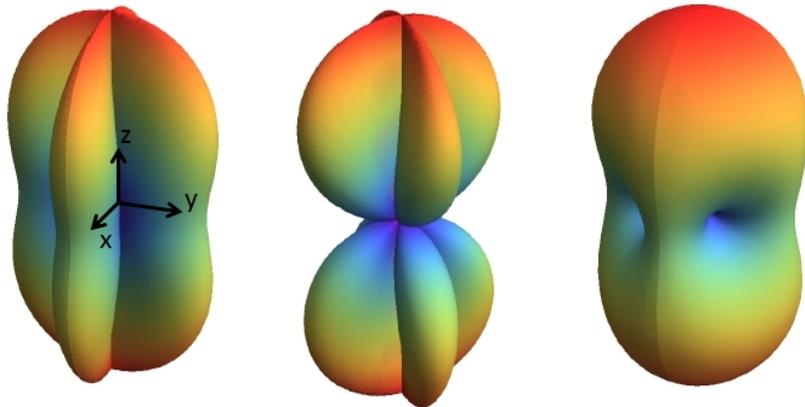


Figura 5.3 - Resposta da antena interferométrica para a polarização “+” (esquerda), polarização “x” (meio), e ondas não polarizadas (direita). A cor indica a sensibilidade (crescendo do violeta para o vermelho). O interferômetro é localizado na origem com os braços paralelos aos eixos x e y.  
 Fonte: Adhikari (2013).

No caso de uma onda arbitrária, a perturbação ao longo dos braços (em coordenadas esféricas) é (ADHIKARI, 2013):

$$h_{xx} = -\cos\theta \sin 2\phi h_{\times} + (\cos^2\theta \cos^2\phi - \sin^2\phi)h_{+} \quad (5.2a)$$

$$h_{yy} = \cos\theta \sin 2\phi h_{\times} + (\cos^2\theta \sin^2\phi - \cos^2\phi)h_{+} \quad (5.2b)$$

A resposta do interferômetro é proporcional a  $|h_{yy} - h_{xx}|$ . Esta resposta é apresentada em forma de diagrama na Figura 5.3.

### 5.3 O detector LIGO e suas “gerações”

O objetivo do LIGO (*Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory*) é detectar e estudar OGs de origem astrofísica ou cosmológica. Basicamente, é composto por dois interferômetros de Michelson com braços de 4 km de comprimento. Um interferômetro localiza-se em Livingstone, no estado da Louisiana e o outro em Hanford, no estado de Washington, nos EUA, e estão separados de uma distância de  $\approx 3000$  km (ABBOTT et al., 2009). O uso de dois ou mais interferômetros permite identificar detecções coincidentes na análise dos dados. Além disso, uma separação entre eles é necessária para localizar as possíveis fontes emissoras de OGs.

Inicialmente, o LIGO atingiu sensibilidade  $h \sim 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$  em uma faixa de frequências de OGs entre 40 e 7000 Hz (ABBOTT et al., 2009; HILD et al., 2007). Atualmente, o detector está sendo atualizado para uma versão mais avançada, denominada *Advanced LIGO* (ou aLIGO), previsto para ser ligado este ano (2014). O objetivo desta nova versão é aumentar a sensibilidade em um fator 10 ao longo da faixa frequências e ampliá-la para valores próximos a 10 Hz (HARRY et al., 2010).

Estima-se que o volume de fontes astrofísicas de OGs detectáveis pelo aLIGO terá um aumento por um fator de 1000 em comparação com o LIGO. É possível haver detecções de dezenas de eventos por ano, como por exemplo a espiralação de objetos compactos. Além das fontes corriqueiras, especula-se detectar emissões não-modeladas e fontes de natureza não conhecida. Com o tempo, dados acumulados poderão fornecer informações de um fundo estocástico de OGs, objetos exóticos ou não detectados eletromagneticamente (HARRY et al., 2010).

O aLIGO faz parte da segunda geração do LIGO. Contudo, a colaboração científica do LIGO busca melhorar ainda mais a sensibilidade para futuras atualizações (terceira e quarta gerações – 3G e 4G). A seguir, uma breve descrição do aLIGO.

### 5.3.1 *Advanced* LIGO

A estrutura óptica simplificada do aLIGO pode ser vista na Figura 5.4. Na configuração óptica constam cavidades de Fabry-Perot, uma cavidade de reciclagem de potência e uma cavidade de reciclagem de sinal (WALDMAN, 2011).

As cavidades de FP são formadas por Massas Iniciais (ITM, do inglês *Initial Test Mass*) e Finais (ETM, do inglês *End Test Mass*) de Teste. A primeira é parcialmente reflexiva e a segunda é altamente reflexiva, o que gera repetidas reflexões do feixe e o aumento do caminho óptico e da potência do laser.

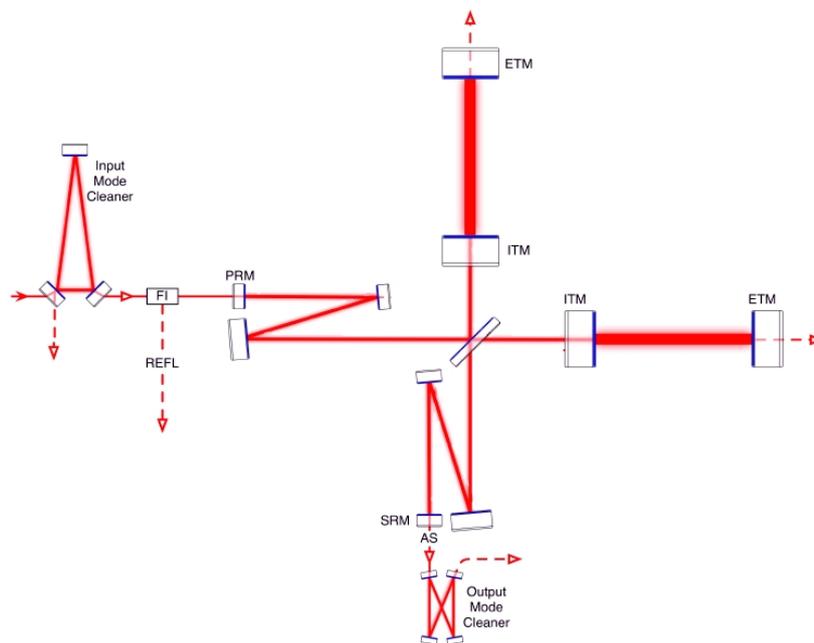


Figura 5.4 - Esboço do interferômetro para o aLIGO. Basicamente, é um interferômetro de Michelson com cavidades de Fabry-Perot (formada pelas ITM e ETM), espelhos de reciclagem de potência (PRM) e de reciclagem de sinal (SRM).  
Fonte: Waldman (2011).

Parte da luz que retorna das cavidades de FP e passa pelo divisor de feixes segue em direção à fonte de laser. A função do Espelho de Reciclagem de Potência (PRM, do inglês *Power Recycling Mirror*) é refletir esta luz que retorna do divisor, fazendo com que seja reutilizada no interferômetro. Juntas, a cavidade de FP e a reciclagem de potência são responsáveis por aumentar a potência nos braços do interferômetro por um fator de  $\approx 6000$  (WALDMAN, 2011).

Os feixes de *laser* chegam na porta Anti-Simétrica (AS), onde é possível observar a interferência. O aLIGO funciona de tal modo que esta porta é escura na ausência de sinal. Portanto, se a interferência deixar de ser destrutiva, então ocorre a detecção de sinal. A detecção ocorre diretamente como uma amplitude modulada no campo estático, usando uma leitura DC na porta AS. Contudo, existem modos que não estão relacionados às ondas gravitacionais na porta AS. Logo, um subsistema de Limpeza do Modo de Saída (*Output Mode Cleaner*) foi incorporado para filtrar estes modos transmitindo apenas a luz proveniente das cavidades dos braços (possivelmente relacionado a sinais de OGs).

O Espelho de Reciclagem de Sinal (SRM, do inglês *Signal Recycling Mirror*) na porta AS forma uma cavidade de reciclagem do sinal, onde a potência do *laser* é aumentada. Em princípio, esta cavidade possibilita o ajuste sobre uma ampla faixa de frequências de OGs (MEERS, 1988), funcionando como um tipo de “sintonização”. Desta forma, a sensibilidade em algumas frequências seria aumentada, à custa de outras (HARRY et al., 2010). A sintonização possibilitaria otimizar a detecção numa banda de frequências de acordo com as oportunidades de fontes astrofísicas e com as restrições instrumentais.

No início do sistema há um arranjo denominado Modo de Limpeza de Entrada (*Input Mode Cleaner*) que filtra ruídos em frequência e amplitude e fornece um feixe estável ao interferômetro. Há também um Isolador de Faraday (FI, do inglês *Faraday Isolator*) que evita que o *laser* refletido atinja o sistema de injeção inicial, desviando-o do controle de frequência do feixe (REFL).

### 5.3.2 Sensibilidade e fontes de ruído

Já foi visto que OGs produzem variações muito pequenas no espaço-tempo. Para detectá-las, é um desafio minimizar os ruídos e tornar o detector cada vez mais sensível. As massas de teste (espelhos), por exemplo, devem estar isoladas da melhor maneira possível a fim de aumentar a sensibilidade às amplitudes das OGs. A Tabela 5.2 mostra as principais fontes de ruído e seus domínios em cada faixa de frequência para um interferômetro do aLIGO.

A Figura 5.5 mostra a curva de sensibilidade estimada para o aLIGO, limitada pelas fontes de ruído. A seguir, o foco será o isolamento dos ruídos sísmicos.

Tabela 5.2 - Domínio das principais fontes de ruído para o aLIGO sobre faixas frequências de ondas gravitacionais.

Faixa de frequência	Domínio de ruídos
Frequências muito baixas, até 10 Hz	Ruídos sísmicos e distúrbios ambientais
Entre 10 e 40 Hz	Ruídos da pressão de radiação, ruído térmico das suspensões e, possivelmente, ruídos do gradiente gravitacional
Entre 40 e 200 Hz	Ruído térmico dos revestimentos óptico dos espelhos e efeitos quânticos da luz
Acima de 200 Hz	Ruído de Poisson da luz (“shot noise”)

Fonte: Harry et al. (2010).

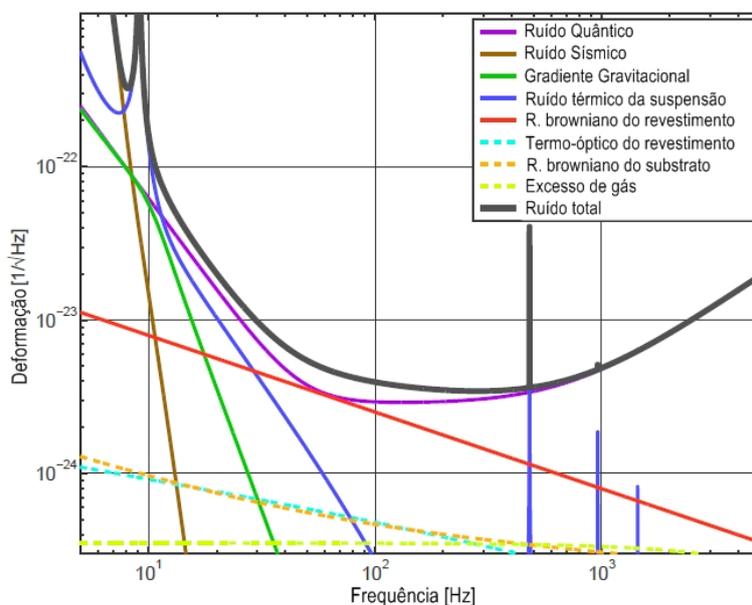


Figura 5.5 - Estimativa das contribuições individuais das fontes de ruído para a sensibilidade do *Advanced LIGO*.

Fonte: Adaptada de Instrument... (2012).

### 5.3.3 Isolamento sísmico

O sistema de isolamento sísmico do aLIGO é projetado para proporcionar uma plataforma estável e controlada em todos os seis graus de liberdade, suspendendo as massas de teste.

Movimentos de cerca de  $1 \mu\text{m}$  podem chegar do solo em frequências abaixo de 10 Hz.

A fim de minimizar isso, o aLIGO utiliza um sistema para permitir que as massas de teste e o separador de feixe sejam suspensos. Este sistema é composto de três estágios (HARRY et al., 2010):

- a) um estágio pré-isolador hidráulico externo ao vácuo,
- b) uma plataforma de isolamento ativo composta por dois estágios no vácuo,  
e
- c) suspensões das massas de teste também no vácuo (ver Figura 5.6).

No estágio final há um espelho de sílica de 40 kg suspenso, que é a massa de teste. Tal massa é suspensa por fibras de sílica fundida. O material das fibras tem função de minimizar o ruído térmico da suspensão. O ultra-vácuo, que pode chegar a  $10^{-9}$  torr, é suficiente para reduzir ruídos de excesso de gases. Todo o sistema deve fornecer um fator de isolamento de  $\approx 1000$  em amplitude de vibração na banda de 1 a 10 Hz (HARRY et al., 2010).

Nas próximas subseções, cada parte do sistema será apresentada individualmente.

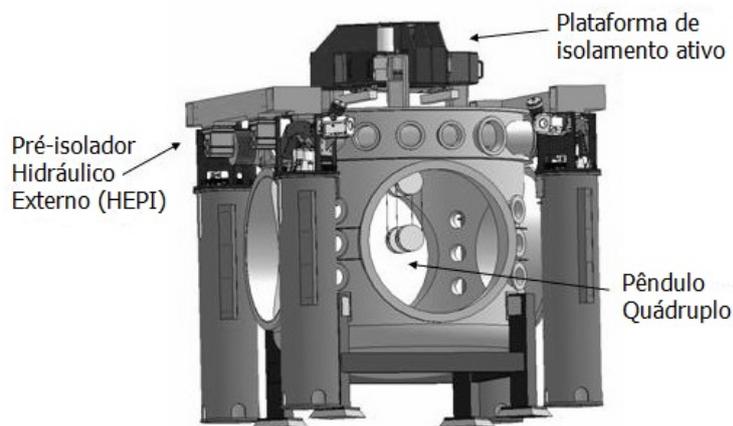


Figura 5.6 - Sistema de isolamento vibracional utilizado no *Advanced LIGO*. É composto por um subsistema pré-isolador hidráulico externo ao vácuo, e dois subsistemas internos ao vácuo, uma plataforma de isolamento ativo e suspensões (pêndulo quádruplo) das massas de teste.

Fonte: Adaptada de Robertson et al. (2004).

## Pré-Isolador Hidráulico Externo

O subsistema Pré-Isolador Hidráulico Externo ao vácuo (HEPI, do inglês *Hydraulic External Pre-Isolator*) fornece alinhamento e isolamento na banda de frequência de 0,1 a 5 Hz, com deslocamentos  $\pm 1$  mm nas posições e  $\pm 1$  mrad nos ângulos, em todos os graus de liberdade (HARRY et al., 2010). O esquema do HEPI é mostrado na Figura 5.6.

Os atuadores hidráulicos de baixa velocidade e fluxo laminar exercem 1800 N nos tubos de suporte que sustentam o subsistema de isolamento sísmico interno. Os foles permitem o movimento ser transmitido para a câmara de vácuo. Para obter uma melhoria, os sinais de sensores inercial e de deslocamento no atuador são misturados para fornecer uma realimentação (*feedback*) enquanto sismômetros fornecem um *feedforward* (HARRY et al., 2010).

O HEPI fornecerá um fator de 10 na redução de amplitude de distúrbios sísmicos devido a atividade humana, bem como deslocamento de marés e ondas oceânicas da Terra, mudanças nos níveis de lençóis freáticos, ou outros efeitos naturais de grande amplitude e baixa frequência. Este subsistema já foi instalado em ambos interferômetros.

## Plataforma de isolamento ativo

A plataforma de isolamento ativo (Figura 5.7) é o subsistema de isolamento sísmico no vácuo. Ela fornece isolamento acima de 0,2 Hz e consiste de dois estágios de plataformas conectadas uma a outra por meio de molas. Cada estágio é apoiado por molas de lâminas de aço *maraging*<sup>1</sup> e pêndulos curtos que fornecem amortecimento nos seis graus de liberdade. Além disso, em cada estágio, há seis sensores de posição e seis sismômetros que coletam medidas do movimento em todos seis graus de liberdade. Os sinais coletados são utilizados por atuadores magnéticos que aplicam forças como resposta para reduzir o movimento das plataformas (HARRY et al., 2010).

As frequências naturais dos estágios estão entre 1,3 e 7 Hz. Juntos, estes estágios fornecem um fator de isolamento em amplitude de  $\approx 300$  em 1 Hz e  $\approx 3000$  em 10 Hz (HARRY et al., 2010). O segundo estágio contém uma mesa óptica, de onde a suspensão junto com os espelhos é pendurada.

---

<sup>1</sup>Este aço é conhecido por ter uma alta dureza e ultra alta resistência, sem perda de maleabilidade. É uma liga composta por alto teor de níquel (de 10 a 30 %) e outros elementos, podendo ser, dentre eles, cobalto, molibdênio, titânio e ferro.



Figura 5.7 - Plataforma de isolamento ativo: subsistema de isolamento sísmico interno à câmara de vácuo. O estágio 0 é apoiado pelo subsistema externo. O estágio 1 é apoiado pelo estágio 0 através de lâminas de aço que funcionam como molas. E o estágio 2 é similarmente apoiado pelo estágio 1. Fonte: Adaptada de [Harry et al. \(2010\)](#).

## Suspensões

As massas de teste do aLIGO serão penduradas abaixo das plataformas de isolamento sísmico por suspensões. Estas suspensões são pêndulos de multiestágios, onde o estágio final consiste de uma massa de teste pendurada por fibras de sílica fundida. Elas fornecerão um isolamento passivo adicional, permitindo que as forças de controle necessárias sejam aplicadas sem ruídos excessivos adicionais ([HARRY et al., 2010](#)).

A Figura 5.8 mostra o subsistema de suspensão do aLIGO. A primeira, das quatro massas, do pêndulo de multiestágio é pendurada por dois arames de aço conectados a duas lâminas que funcionam como molas. A segunda está em uma suspensão quádrupla e é similarmente pendurada. Estas duas massas são feitas de metal, mas a terceira massa é vidro de sílica. Ela é suspensa por fios de aço que laceiam em volta de seu corpo cilíndrico. A massa final é a massa de teste do interferômetro, um cilindro de 40 kg feito de vidro de sílica fundida. Esta é conectada à penúltima massa somente por sílica fundida, para redução do ruído térmico.

Cada estágio do pêndulo fornece um isolamento em amplitude de vibração que cai com o inverso do quadrado da frequência. As ressonâncias são escolhidas para estar entre 0,4 Hz e 4 Hz ([HARRY et al., 2010](#)).

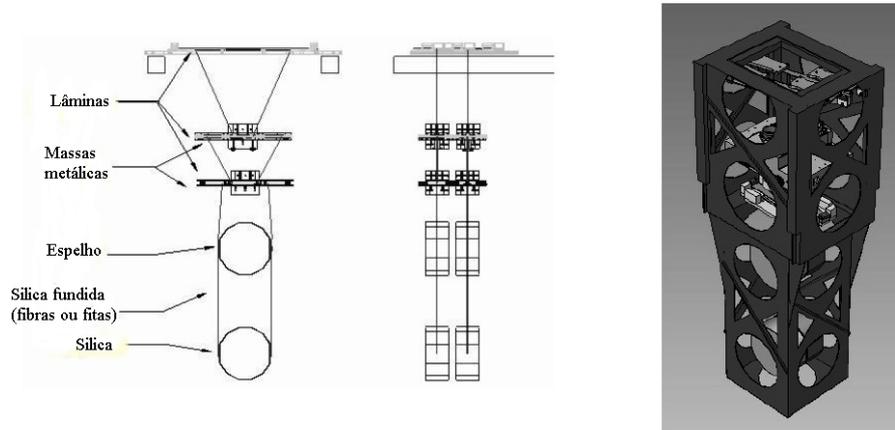


Figura 5.8 - Diagrama esquemático do sistema de suspensão de pêndulo quádruplo desenvolvido para o *Advanced LIGO*. À esquerda uma visão frontal dos estágios. No meio, a visão lateral do mesmo arranjo. À direita, o projeto conceitual da estrutura que suporta todo o sistema cuja altura total é de, aproximadamente, 2 metros.

Fonte: Adaptada de Robertson et al. (2004).

Quatro fibras de sílica fundida de diâmetro  $400 \mu\text{m}$  e comprimento 60 cm mantêm as duas massas conectadas. O diâmetro das fibras de sílica é escolhido tal que o estresse é  $1/3$  da força de quebra. O comprimento é tão longo quanto possível para que as frequências dos modos violino sejam altas suficientes para deixarem a faixa de frequências de maior sensibilidade. O nível de ruído térmico esperado da suspensão será abaixo do ruído da pressão de radiação da luz.

Segundo Robertson et al. (2004), a transmissibilidade estimada das suspensões é de  $\approx 3 \times 10^{-7}$  em 10 Hz e cai com cerca de  $1/f^7$ . O nível global de ruído sísmico, isto é, considerando as contribuições vertical e longitudinal, atinge  $10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ , em 10 Hz, .

#### 5.4 Sistema de Pêndulos Multi-Aninhados

Seguindo a necessidade de tornar os detectores interferométricos mais sensíveis a OGs, há uma busca incessante por desenvolver sistemas capazes de atenuar os ruídos das mais diversas fontes. Com o objetivo de aumentar a sensibilidade em baixas frequências, o Grupo de Ondas Gravitacionais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (GWINPE) tem desenvolvido o *Multi-Nested Pendula* (MNP), ou Pêndulos Multi-Aninhados, que basicamente é um sistema pendular de multiestágios (CONSTANCIOJR, 2013).

A utilização de sistemas pendulares é a ideia mais simples e eficiente para isolamento em baixas frequências. A transmissibilidade (TR) para um sistema de  $N$  pêndulos em cascata é pequena quando a frequência de vibração  $\omega$  está bem acima da frequência de ressonância  $\omega_0$ . Neste caso, a transmissão de deslocamento da  $N$ -ésima massa é da ordem de  $(\omega_0/\omega)^{2N}$  (ALDCROFT et al., 1992).

Com isso em mente, o objetivo do MNP é fornecer um isolamento passivo em baixas frequências (de cerca de 10 Hz). O sistema consiste em cinco cascas cilíndricas concêntricas aninhadas, produzidas de uma liga de alumínio (denominada 5052), ligadas umas às outras por meio de fios (ou hastes) de aço. A ligação dos fios com cada casca cilíndrica é auxiliada por flanges com braços, existentes nas partes inferior e superior de cada casca (Figura 5.9). Sendo que uma haste conecta o braço interno do flange superior de um cilindro ao braço externo do flange inferior do cilindro de diâmetro imediatamente menor.

Os cilindros possuem 1,3 m de altura, diâmetros de 72 cm, 84 cm, 96 cm, 108 cm e 121 cm, e massas de cerca de 60 kg, 70 kg, 80 kg, 90 kg e 100 kg, respectivamente, totalizando 400 kg (Figura 5.10). Estas dimensões foram escolhidas de acordo com os limites requeridos pelas gerações posteriores ao aLIGO.

O espaço vertical é ganho ao instalar o subsistema de suspensão (que é mostrado na Figura 5.8) no último estágio do MNP, localizando-o dentro da casca mais interna. Desta maneira, o MNP tem sido proposto como um novo subsistema de isolamento para futuras instalações do LIGO (3G e 4G). O projeto ligado ao MNP é o primeiro a colocar uma instituição brasileira na LSC (*LIGO Scientific Colaboration*).

O princípio de funcionamento do MNP é que o movimento pendular seja responsável pelo isolamento de vibrações horizontais e o movimento dos braços atuem como molas para o isolamento de vibrações verticais. De acordo com Constancio Jr (2013), é possível reproduzir os modos de ressonância de um pêndulo em cascata utilizando um sistema pendular aninhado, ganhando espaço vertical.

A seguir é apresentado o desenvolvimento de molas de gás como proposta para realizarem o isolamento vertical de cada estágio do MNP.

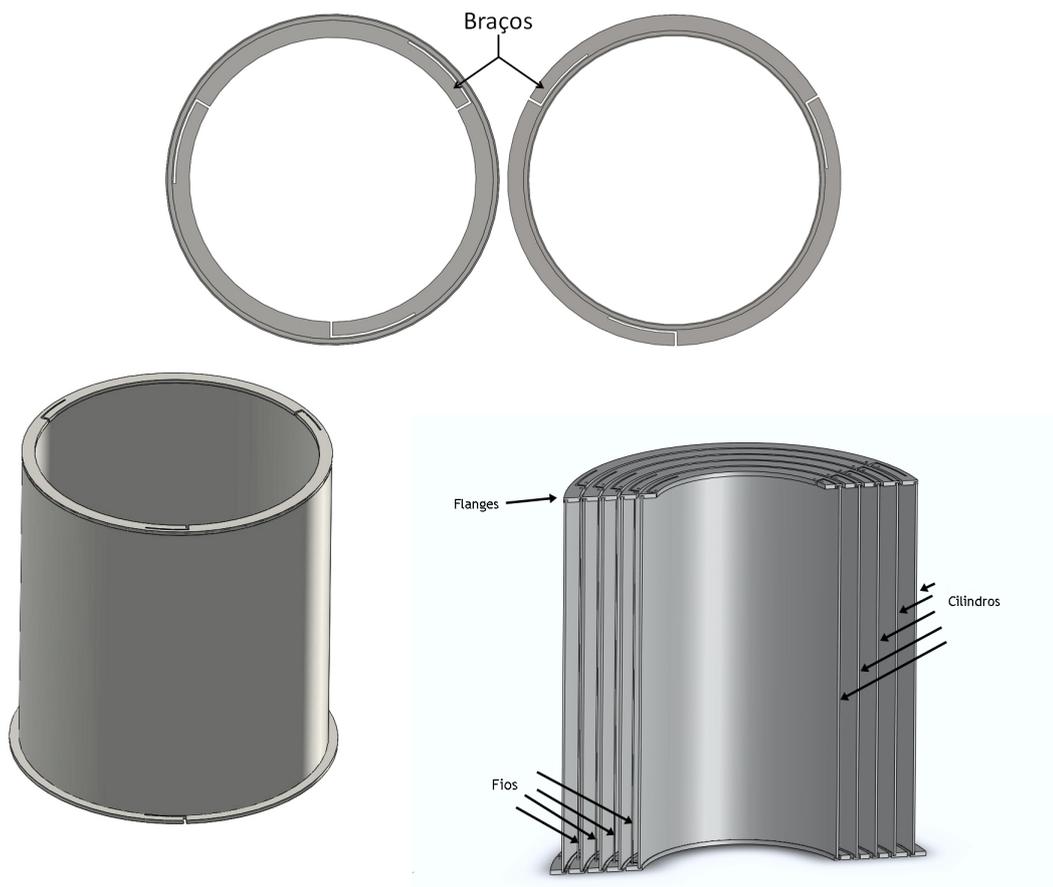


Figura 5.9 - Acima, flanges superior e inferior dos cilindros, com braços internos e externos, respectivamente. Abaixo, uma casca cilíndrica com flanges inferior e superior, e um corte 3D do MNP desenvolvido para implementar o sistema de isolamento sísmico das gerações posteriores ao *Advanced LIGO*. Os braços dos flanges funcionam como molas, para amortecimento vertical.  
 Fonte: Adaptada de [ConstancioJr \(2013\)](#)



Figura 5.10 - *Multi-Nested Pendula* montando. À esquerda, visão superior do sistema. À direita é possível obter uma noção da altura do mesmo.  
Fonte: ConstancioJr (2013)

## 6 MOLAS DE GÁS PARA ISOLAMENTO VERTICAL

A ideia de desenvolver molas de gás (GS, do inglês *Gas Spring*), surgiu com a proposta de adicionar filtros ao sistema de isolamento sísmico do LIGO, tal como o MNP. É importante destacar que esta é uma proposta para versões futuras (terceira e quarta gerações) do detector LIGO, cuja versão em atual desenvolvimento é o aLIGO.

Nos detectores interferométricos, o sinal da OG é medido através dos deslocamentos horizontais dos espelhos. Entretanto movimentos verticais podem gerar movimentos horizontais por um fator de conversão  $\epsilon$ , que depende da configuração experimental, mas em geral  $\epsilon \leq 10^{-2}$  (FABBRO et al., 1988). É justificável, assim, atentar-se também para o isolamento dos deslocamentos verticais.

Atualmente, os braços dos flanges atuam como molas verticais de cada estágio do MNP. Porém, eles possuem um baixíssimo isolamento vertical. Com isso, a ideia é substituí-los pelas GS. Assim, três GS serão instaladas em cada flange superior preso no cilindro. Cada GS sustentará uma haste, que por sua vez, sustenta 1/3 da massa acumulada dos cilindros internos (isto é, da carga abaixo). A hipótese é que elas tenham baixa transmissibilidade e, assim, sejam responsáveis pelo isolamento vibracional na direção vertical em cada estágio do MNP.

Uma grande vantagem da GS é a possibilidade de controle de sua constante elástica  $k$  através do aumento ou da diminuição da pressão interna  $P$ , e isso pode ser alterado independentemente em cada haste do MNP. Este recurso permite um maior controle da estabilidade do sistema. Os braços dos flanges, no entanto, não têm essa propriedade.

### 6.1 Transmissibilidade

A GS tem a missão de reduzir o quanto possível a amplitude das vibrações, isto é, ter a mínima transmissibilidade. A *transmissibilidade* para uma suspensão passiva é definida como a razão entre a amplitude do movimento transmitido e a amplitude do movimento de excitação:

$$\text{TR} = A_t/A_0 = \sqrt{1 + (2\zeta r)^2} / \sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}, \quad (6.1)$$

onde  $\zeta$  é o fator de amortecimento e  $r = \omega/\omega_0$ , sendo  $\omega$  a frequência de oscilação do sistema e  $\omega_0$  a frequência de ressonância natural.

Para casos sem amortecimento ( $\zeta = 0$ ), a equação 6.1 é simplificada para

$$\text{TR} = \omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2) . \quad (6.2)$$

E para frequências muito acima da frequência de ressonância  $\omega_0$ , a transmissibilidade é aproximadamente  $(\omega_0/\omega)^2$ .

A transmissibilidade de um sistema também pode ser determinada experimentalmente através das medidas de valores em decibéis que relacionam as amplitudes de oscilação:

$$\Delta\text{dB} = 20 \log(A_t/A_0) = 20 \log(\text{TR}) , \quad (6.3)$$

onde  $\Delta\text{dB}$  é a diferença entre os valores de decibéis medidos no movimento transmitido e no movimento de excitação.

Graficamente, em um sistema ideal, a transmissibilidade em função da frequência aumenta até a frequência de ressonância, tem um pico em  $\omega_0$  e depois diminui, de acordo com a equação 6.2.

## 6.2 Desenvolvimento do protótipo de uma mola de gás

Uma pesquisa no mercado revelou estruturas para isoladores e atuadores que podem ser adequadas ao protótipo de uma GS com as características necessárias neste projeto. Especificamente, a *Firestone Tire and Rubber Company*<sup>®</sup> apresenta uma lista de modelos de isoladores e atuadores feitos de borracha – que podem ser vistos no Anexo B.

Seguindo as especificações técnicas, o fole de borracha número 26 foi escolhido para ser usado no protótipo. Algumas especificações deste fole estão transcritas na Tabela 6.1. A Figura 6.1 apresenta o isolador<sup>1</sup> composto pelo fole 26 e por duas tampas de metal.

Os principais requisitos para escolha do fole foram, principalmente, o diâmetro máximo e o fator de isolamento. O diâmetro máximo foi determinado através da distância existente entre os apoios das hastes do MNP segundo um arranjo que será

---

<sup>1</sup>Aqui, denomina-se isolador o fole com as tampas; modelo pré-definido pela *Firestone*<sup>®</sup>, antes da montagem do protótipo da mola de gás.

apresentado na Seção 6.5. Esse diâmetro é de  $\approx 220$  mm.

Tabela 6.1 - Especificações gerais do fole 26 como isolador.

Diâmetro máximo	Altura mínima	Percentual aproximado de isolamento à 6,7 Hz
218,4 mm	80,0 mm	91,0

O isolamento da GS ocorre através da compressão, então é necessário que o peso seja aplicado na superfície (tampa) superior do fole. Portanto, uma solução encontrada para o protótipo, é a haste atravessar o interior do fole e ambas as tampas, apoiando-se externamente na tampa superior. Logo, as tampas deverão ter aberturas centrais. Portanto, foram adquiridos 15 foles sem tampas (como na Figura 6.2) para construção de 15 molas de gás, uma para cada haste. Também foi adquirido um isolador (como na Figura 6.1) para que o encaixe do fole com as tampas sirva de modelo e seja copiado para o encaixe do fole com as tampas com aberturas centrais que serão projetadas. Além disso, será realizada uma medida prévia de transmissibilidade deste isolador.



Figura 6.1 - Isolador composto por tampas de metal e por fole de borracha 26.

Mas se a tampa tiver aberturas centrais, como manter a pressão interna maior que a atmosférica quando a mola for comprimida? Para solucionar isso, uma mangueira de borracha natural (látex) será instalada internamente ao fole e conectará ambas as tampas de modo a vedar a parte interna da externa (Figura 6.2). Para que a mangueira não colapse sob pressão, ela conterá uma mola de metal internamente para reforço estrutural. Esta mola, contudo, não deve tocar em ambas aberturas das tampas para não ocorrer transmissão de vibração entre elas. Assim, a haste ficará dentro da mangueira e dentro da mola, sem tocar nelas.

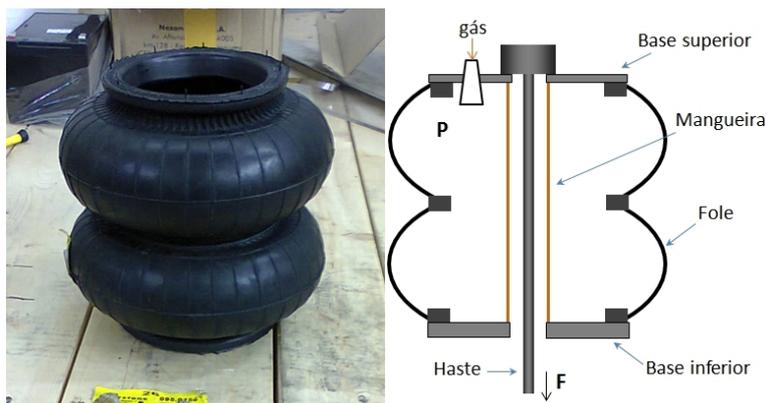


Figura 6.2 - À esquerda, fole de borracha que será usado para montar mola de gás. À direita, representação conceitual para protótipo da mola de gás.

Após a realização das medidas de transmissibilidade – que estão descritas na Seção 6.4 – o isolador foi aberto para observação de como é o encaixe do fole com as tampas. Contudo, foi praticamente impossível separar as tampas do fole com os instrumentos do laboratório sem danificá-lo.

Assim, não havendo sucesso nas tentativas de separação, o fole foi cortado. Depois, a parte restante do fole preso à tampa foi queimada, porém a borracha não cedeu e não se separou da tampa. Por fim, a tampa foi cortada em duas partes. Então verificou-se que a borda do fole contém um cabo de aço interno e a tampa apresenta uma borda curvada com espaço para encaixe deste cabo (Figura 6.3).



Figura 6.3 - À esquerda, fole cortado para ser retirado da tampa. À direita, tampa cortada com restante do fole queimado preso à mesma. A tampa tem uma borda curvada para encaixe do cabo de aço do fole.

Evidentemente, a tampa é encaixada e fixada no fole por uma máquina que aplica nela uma força de grande intensidade. A montagem desta tampa sem uma máquina especial para prendê-la no fole é de enorme dificuldade. Não é possível realizá-la no

laboratório de ondas gravitacionais.

Entretanto, há um modelo de tampa mais antigo, que requer menor dificuldade durante a montagem. Um desenho deste modelo foi cedido por uma fornecedora da *Firestone*<sup>®</sup>. Neste tipo de vedação do fole há duas partes: i) um anel (Figura 6.4) que se encaixa na borda do fole e ii) a tampa que se prende neste anel e fica em contato com a borda do fole, vedando seu interior. O anel possui seis furos para a tampa ser aparafusada.

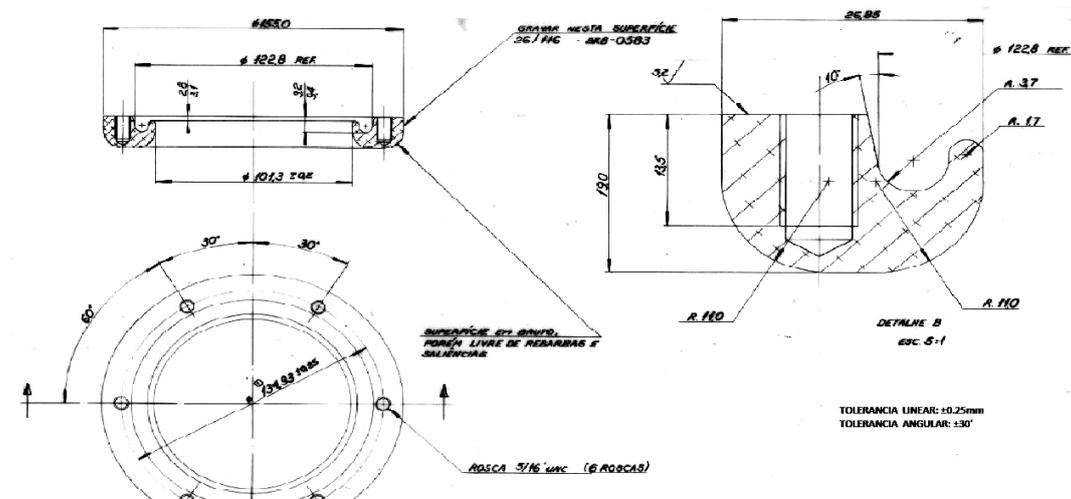


Figura 6.4 - Desenho do anel para encaixe no fole da mola de gás.  
Fonte: Cortesia da *Firestone*<sup>®</sup>.

Com o desenho do anel e a informação de como é feito o encaixe, foi possível projetar as tampas superior e inferior com a abertura central e apoios para prender a mangueira. O diâmetro das aberturas centrais e da mangueira devem ser suficientes para permitir a passagem do pino inferior da haste (cerca de 20 mm), que é soldado na mesma. Além disso, a tampa superior deve possuir um furo roscado para encaixe do pino de ar. O desenho das tampas é apresentado na Figura 6.5.

Assim, foi possível criar uma montagem conceitual do protótipo da GS no programa *SolidWorks*, que é mostrada na Figura 6.6.

### 6.3 Montagem do protótipo da mola de gás

Para montagem do protótipo da mola de gás, as tampas superior e inferior (Figura 6.5) foram usinadas em um torno mecânico, e os dois anéis (Figura 6.4) foram

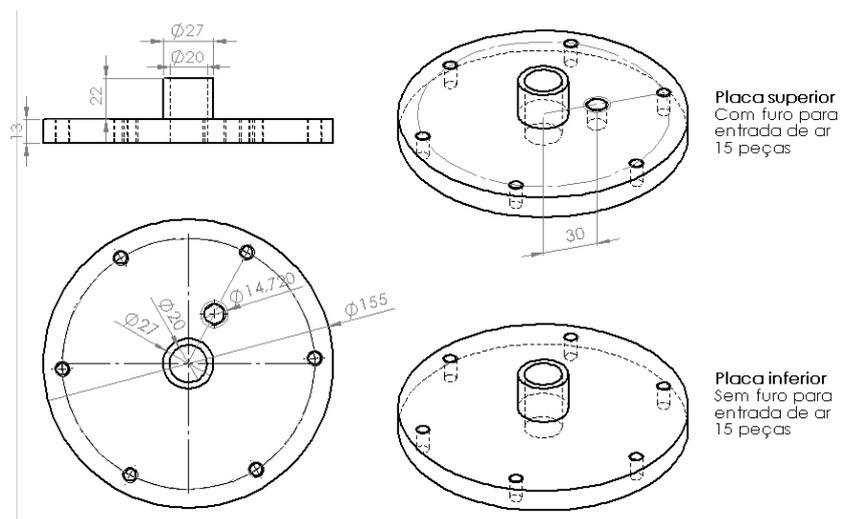


Figura 6.5 - Desenho das tampas superior e inferior para serem aparafusadas nos anéis para vedação do fole. Os valores indicados estão em milímetros.

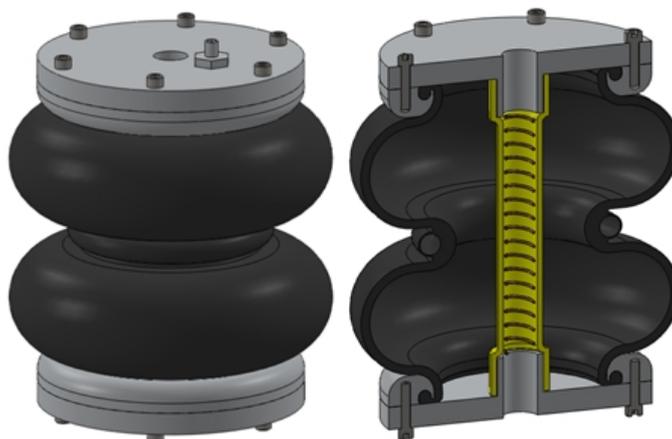


Figura 6.6 - Desenho e corte 3D do protótipo da mola de gás.

produzidos em um torno CNC<sup>2</sup> na oficina mecânica do INPE. O encaixe do anel de metal no fole não foi possível de ser realizado, por isso, ele foi cortado em duas metades. Desta maneira, o encaixe pode ser feito pelas laterais e finalizado com o parafusamento da tampa. A Figura 6.7 mostra o fole aberto com os anéis encaixados e a tampa superior desparafusada ao lado do fole.

<sup>2</sup>Torno mecânico onde o processo de usinagem é feito por Comandos Numéricos Computadorizados.



Figura 6.7 - Estrutura externa do protótipo da mola de gás: fole com os anéis encaixados e a tampa superior ao lado do fole.

### 6.3.1 Testes de vazamento da estrutura externa

Após a fabricação, os anéis e as tampas foram instalados no fole para verificação de vazamento de ar. As aberturas das tampas foram vedadas com rolhas de borracha e o fole foi enchido com ar, o bastante para vazar caso houvesse defeitos na montagem. O conjunto permaneceu cerca de três dias imerso em um recipiente com água e não ocorreu vazamento. Assim, a estrutura externa do protótipo da GS foi aprovado no teste.

### 6.3.2 Teste de pressão na mangueira de látex com a mola de metal

As mangueiras de látex que ficarão dentro do fole devem ter diâmetro interno de cerca de 20 mm, para serem encaixadas nos bicos das aberturas centrais das tampas. Foram encontradas disponíveis no mercado duas mangueiras (da marca *Altaflex*<sup>®</sup>) com diâmetros interno de 19,05 mm (modelo 211) e 19,00 mm (modelo 504) e espessuras de 3,18 mm e 0,50 mm, respectivamente<sup>3</sup>.

Depois dos testes da estrutura externa da GS, foram realizados testes de pressão nas duas mangueiras de látex, cada uma com uma mola de metal interna. Uma extremidade da mangueira foi conectada à abertura central, projetada para passagem da haste, de uma tampa e a outra extremidade à uma bomba de vácuo. A mola de metal foi posicionada dentro da mangueira e a abertura da tampa foi bloqueada para impedir a entrada de ar. A Figura 6.8 mostra os testes feitos com as mangueiras.

<sup>3</sup>Mais informações sobre as mangueiras no sítio <http://www.altaflex.com.br/normal.php>.

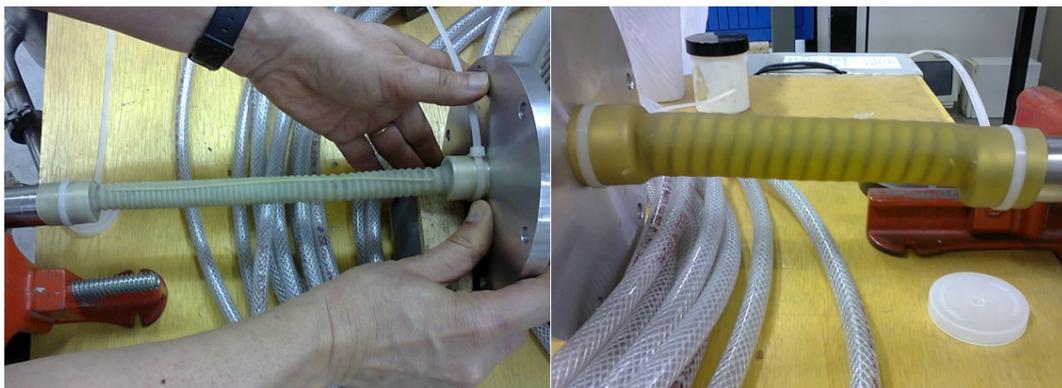


Figura 6.8 - Mangueiras de látex sobre o teste de pressão. O vácuo interno da mangueira é gerado por uma bomba. À esquerda, modelo 504. À direita, modelo 211.

A mangueira 504 é mais fina e, sob pressão, ficou muito justa sobre a mola interna. Além disso, neste caso, a mola deve ter o passo muito pequeno para que a borracha não entre em seus espaçamentos. Isso pode ser um empecilho, já que o espaço relativamente pequeno pode comprometer o movimento (mobilidade) da mola de gás.

Já a mangueira 211 tem a espessura da parede maior e não necessitou de uma mola interna com espaçamento muito pequeno. Portanto, este caso garante maior confiabilidade pois, além da resistência da mangueira à pressão ser nitidamente maior, a mola de maior espaçamento pode ser comprimida, se necessário, durante os testes da GS.

Portanto, apesar de ambas mangueiras terem sido capazes de suportar a pressão atmosférica, a mangueira 211 junto a respectiva mola de metal foi escolhida para montagem da GS.

### 6.3.3 Instalação dos componentes e montagem para testes

Após os testes de vazamento e de pressão, realizou-se a instalação de todos os componentes no fole. As etapas para instalação dos componentes são as seguintes:

- a) A haste possui uma cabeça de parafuso na ponta superior e um pino na ponta inferior. Este pino deve atravessar a abertura da tampa superior do fole.
- b) Em seguida, introduzir a haste dentro da mola de metal. Nenhuma das pontas da haste pode atravessar a mola. Então, esta deve ser colocada

girando-se de modo que a haste atravesse os espaços entre as voltas do arame da mola (passo da mola).

- c) Atravessar o pino da haste dentro da mangueira de látex. Então, colocar a mola dentro da mangueira para que a haste passe através de ambas. Em seguida, prender a ponta mangueira no ressalto da abertura da tampa superior, usando uma cinta de metal.
- d) Atravessar o pino da haste no fole e parafusá-lo na tampa superior.
- e) Atravessar o pino da haste na abertura da tampa inferior e prender a mangueira nela.
- f) Aparafusar a tampa no fole. E, por fim, colocar o bico (válvula para entrada e saída de ar) na tampa superior.



Figura 6.9 - Mola de Gás suspendendo, através da haste, uma massa de aproximadamente 60 kg.

Nas junções dos componentes, como por exemplo entre os anéis e as tampas, foi colocada um pouco de graxa de silicone para vácuo.

Após a conclusão da montagem, uma massa de cerca de 60 kg foi presa à haste e suspensa pela GS. A suspensão da massa foi realizada cautelosamente ao mesmo

tempo que se inseria ar na GS para que a altura de trabalho do fole permanecesse 205 mm. Este procedimento foi realizado com sucesso. A Figura 6.9 ilustra a montagem realizada.

#### 6.4 Resultados dos testes com o isolador

Antes da montagem do protótipo da GS, descrita na seção anterior, foram verificadas a estabilidade e transmissibilidade do isolador (aquele da Figura 6.1). Este procedimento necessitou de algumas adaptações no isolador: sobre cada tampa do fole foi instalada uma armação. A armação superior foi responsável por suspender uma massa de teste (de cerca de 20 kg) e, desta forma, comprimir fole. A armação inferior foi a base do isolador e foi responsável por suspender todo o conjunto (Figura 6.10).

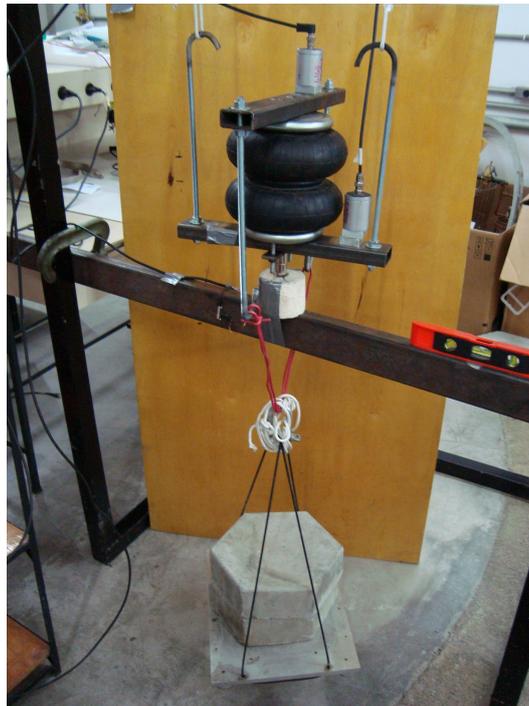


Figura 6.10 - Aparato experimental para medição do isolador. Todo o conjunto está suspenso. Abaixo do atenuador encontram-se um ímã e uma bobina para aplicação de uma força oscilatória. Dois acelerômetros medem as amplitudes de oscilação.

Não foi inserido ar no fole, além daquele existente em sua posição inicial sem carregamento. Deste modo, o isolador estabeleceu o equilíbrio entre o peso exercido pela massa de teste e a força interna causada pela compressão, reduzindo sua altura.

Dois acelerômetros foram emprestados da Universidade de Stanford para medir as amplitudes relativas de vibração dos experimentos realizados no laboratório de ondas gravitacionais do INPE. Estes apresentam uma melhor resposta aos sinais a partir da frequência de 5 Hz porque as suas frequências naturais de ressonância estão abaixo deste valor.

Cada acelerômetro foi instalado em uma armação (inferior e superior). Eles foram conectados via cabos coaxiais a um analisador de espectro modelo SR760 FFT<sup>4</sup>, que possui uma variação dinâmica de 90 dB e uma banda de frequência em tempo real de 100 kHz.

A base inferior do isolador foi sujeita a oscilações forçadas. Estas oscilações foram geradas através de um dispositivo composto por ímãs colocados na base e uma bobina presa em uma viga de metal fixa. A frequência de oscilação pode ser controladas via uma fonte elétrica externa de 2 V ligada a bobina.

As frequências utilizadas tiveram intervalos de 1 Hz, na faixa de 5 a 20 Hz, depois intervalos de 2 Hz na faixa de 20 a 30 Hz e por fim intervalos de 5 Hz na faixa de 30 a 60 Hz.

As amplitudes relativas, medidas em decibéis, por cada acelerômetro, foram apresentadas no analisador de espectro e registrados. Utilizando a equação 6.3 foi possível determinar a transmissibilidade, onde  $\Delta\text{dB}$  é a diferença entre os valores medidos da base superior (isolada) e da base inferior (excitada). A Figura 6.11 mostra o gráfico da transmissibilidade em função da frequência de oscilação.

O gráfico de transmissibilidade de um sistema ideal para uma frequência de ressonância ( $f_0$ ) de 2,5 Hz reproduz, aproximadamente, os valores obtidos experimentalmente de TR para as frequências de 5 a 12 Hz.

No entanto, o gráfico indica que o sistema não se comportou como era esperado, isto é, a transmissibilidade não continuou a reduzir com o aumento da frequência. Ocorreram picos em frequências mais altas como, por exemplo, em 17 Hz. Isso pode ter ocorrido pelo fato do sistema ser complexo e não ideal. A complexidade é devida às armações usadas no aparato experimental e a consequente formação de osciladores acoplados ao isolador. Além disso, a massa de teste de cerca de 20 kg, é considerada baixa para o isolador. O Anexo C descreve características dinâmicas para o isolador com altura ideal de 205 mm e cargas de cerca de 300 a 900 kg. Nestes casos,  $f_0$  é de

---

<sup>4</sup>Mais informações em: <http://www.thinksrs.com/products/SR760770.htm>.

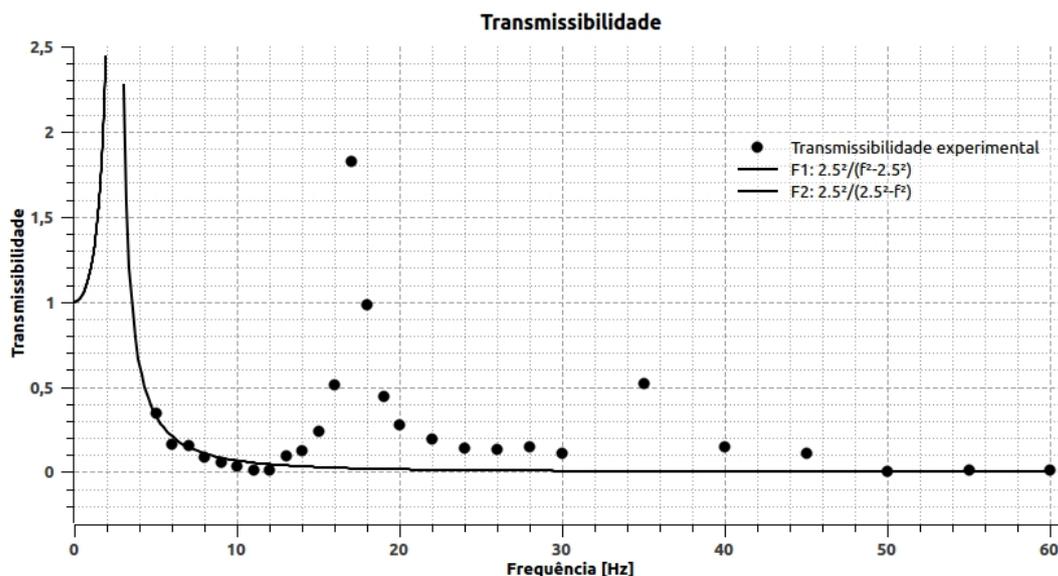


Figura 6.11 - Gráfico da transmissibilidade para os testes realizados com o isolador.

cerca de 2 Hz.

As futuras medições do protótipo da GS trarão informações mais importantes que os testes do isolador, já que a GS é o dispositivo que será usado no MNP.

### 6.5 Instalação das molas de gás no sistema de pêndulos multi-aninhados

Quinze molas de gás serão montadas e instaladas no MNP. A configuração atual das posições das hastes do sistema – que são alinhadas em 3 eixos radiais com 120° entre eles – será alterada, devido ao espaçamento requerido pelo diâmetro máximo do fole da GS (220 mm). As novas posições das hastes e dos flanges e a distribuição das molas são apresentados na Figura 6.12. Cada haste será defasada em 30° em relação à haste da casca cilíndrica sucessivamente interna.

Quando as GS estiverem instaladas no MNP, as frequências de ressonâncias e amplitudes serão medidas. Será utilizado o analisador de espectro modelo SR760 FFT. As medições serão realizadas com cristais piezoelétricos e os resultados serão comparados com os anteriores (CONSTANCIOJR, 2013), isto é, com o sistema sem as GS. Os cilindros serão excitados por um dispositivo gerador de forças senoidais – que pode ser uma bobina e ímas, como no caso dos testes do isolador –, ou por uma força impulsiva gerada por alguma ferramenta.

A expectativa para o MNP com as molas de gás é o aumento da atenuação e isolamento de ruídos sísmicos, isto é, a redução da transmissibilidade, em relação ao

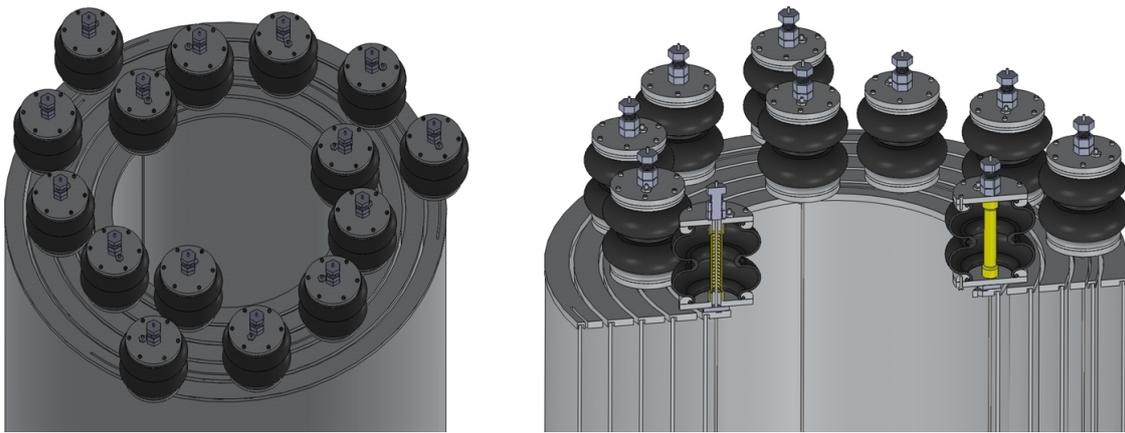


Figura 6.12 - Distribuição das mola de gás no MNP e corte transversal do sistema.

sistema sem as GS. Contudo, as GS não poderão ser utilizadas nas futuras gerações do LIGO, isso porque o fole de borracha não suporta temperaturas criogênicas (que serão utilizadas LIGO 3G em diante). Logo, surge a necessidade de substituí-las por molas de metal. Essa ideia de molas de metal para o MNP é descrita no próximo capítulo.



## 7 ANTI-MOLA GEOMÉTRICA: NOVA PROPOSTA DE ISOLAMENTO VERTICAL

A anti-mola geométrica (*Geometric Anti-Spring* ou *GAS*) é uma nova proposta para o isolamento vibracional em detectores interferométricos de ondas gravitacionais. Elas são construídas a partir de lâminas de aço, geralmente de ligas especiais como o aço *maraging* (conhecido por ter uma alta dureza e ultra alta resistência, sem perda de maleabilidade).

Para a montagem de uma *GAS*, as bases das lâminas, aproximadamente triangulares, são presas em uma estrutura circular e suas pontas são conectadas a uma pequena base central. Desta base, uma massa de teste é suspensa. Assim, as lâminas se curvam como uma vara de pescar (Figura 7.1). Nesse arranjo, além das lâminas exercerem uma força vertical, elas também exercem forças horizontais uma sobre a outra.

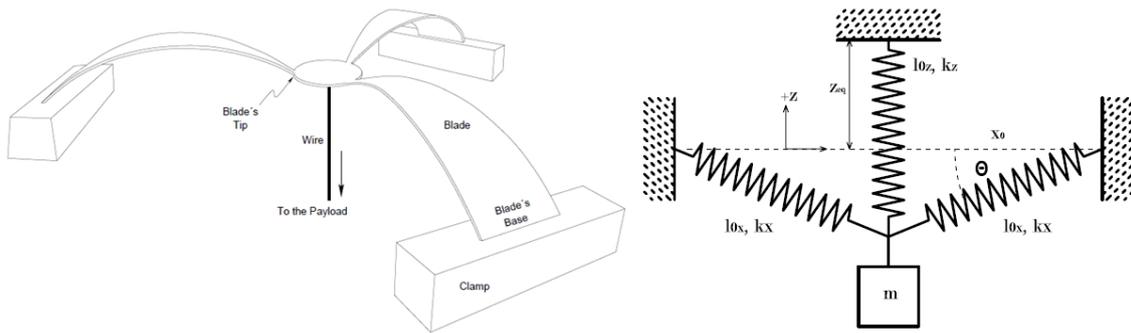


Figura 7.1 - À esquerda, esquema de uma *GAS* de três lâminas em perspectiva. À direita, representação do efeito geométrico (modelo *GAS*).

Fonte: Cintio et al. (2009) (esquerda) e Stochino (2007) (direita).

Esse arranjo tem um efeito anti-mola, isto é, ele reduz a constante de mola efetiva, mantendo a mesma capacidade de carga das lâminas. De acordo com Stochino (2007) a constante de mola efetiva é

$$k_{eff} = k_z + k_x - \frac{k_x l_{0x}}{x_0}, \quad (7.1)$$

onde  $k_z$  é a constante elástica da mola vertical,  $k_x$  é a constante elástica da mola horizontal,  $l_{0x}$  é o comprimento de repouso da mola horizontal e  $x_0$  é a distância indicada na Figura 7.1.

As *GAS* devem ser projetadas levando-se em consideração a espessura, área e quantidade de lâminas, bem como o tipo de aço utilizado. Planeja-se futuramente construir protótipos com aço 301<sup>1</sup> para testes e depois com o aço *maraging*. Além disso, realizar a análise de elementos finitos, que é uma ferramenta que permite simular o comportamento dinâmico de uma estrutura. Para este tipo de análise pode ser utilizado o Software *SolidWorks*.

Após a construção, planeja-se realizar testes de estabilidade e gerar a função de transferência, com metodologia análoga às molas de gás. A instalação das *GAS* será realizada na segunda versão do MNP (em fase de projeto e desenho), no qual os cilindros serão substituídos por armações tubulares, mais leves, e com bases triangulares. Isso irá garantir um sistema estável com atenuação vertical e horizontal capaz de ser resfriado à temperaturas criogênicas, atendendo os objetivos das futuras gerações do LIGO. Os testes de criogenia serão realizados numa câmara de vácuo com sistema de refrigeração a nitrogênio líquido, no Laboratório de Integração e Testes do INPE.

Por fim, as principais vantagens das *GAS* são a redução da constante de mola efetiva, o que permite reduzir a transmissibilidade, e o uso em sistemas criogênicos. Com bons resultados, o sistema será agregado em futuras gerações do LIGO e aumentará sua sensibilidade, principalmente em baixas frequências. O aumento da sensibilidade do detector aumentará significativamente o número de fontes astrofísicas detectáveis.

---

<sup>1</sup>Aço inoxidável com valores aproximados de 17% de cromo e de 7% de níquel. Aço de alta resistência, dureza e alongamento (vide <http://www.kloecknermetals.com.br/pdf/3.pdf>).

## 8 CONCLUSÕES

Durante o trabalho de mestrado deu-se continuidade ao desenvolvimento da geração atual de transdutores para o detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg. Nesta dissertação foram descritos com detalhes os métodos utilizados para ajustar as frequências de ressonância elétrica dos transdutores para valores o mais próximo possível de 9,44 GHz.

O método que se mostrou mais eficaz foi o desgaste das “tampas” das cavidades dos transdutores para ajuste (principalmente redução) do *gap*, que existe no interior da mesma. Este *gap* é a distância, da ordem de microns, entre a ponta do “poste” central do interior da cavidade e a membrana de níobio, que pode ressoar em 3,2 kHz, a frequência de oscilação do modo quadrupolar da esfera do detector.

Para não haver problemas durante o ajuste, após a cuidadosa limpeza das tampas, todo o procedimento de fechar a cavidade foi realizado em ambiente limpo (classe 10.000), e as medições foram feitas cautelosamente.

As medições realizadas nas etapas de ajuste mostraram que a redução do *gap* não está relacionada de forma linear com a redução da frequência de ressonância elétrica de cada cavidade. Além disso, os *gaps* não são controlados facilmente.

Apesar da grande dificuldade experimental, dos oito transdutores, cinco já estão prontos para serem acoplados à esfera do detector Mario Schenberg. Os três restantes estão sendo paulatinamente ajustados para o mesmo propósito. Além disso, a maior parte do cabeamento necessário para o conjunto de oito transdutores está instalado no detector. Caso os testes iniciais do sistema sejam satisfatórios, será realizada uma corrida criogênica da antena para coleta de dados com interesse científico, na busca de sinais de ondas gravitacionais.

A segunda parte do trabalho, diz respeito ao desenvolvimento e montagem de molas de gás para isolamento vertical nas futuras gerações do observatório interferométrico de ondas gravitacionais LIGO. Uma das vantagens é a possibilidade de alterar a pressão interna, que permite controlar a constante elástica e a altura de trabalho desejada.

O texto descreve os processos de construção da mola de gás a partir de um isolador, composto, principalmente, por um fole de borracha. A construção exigiu modificações radicais no isolador como, por exemplo, a abertura das tampas e a mangueira de látex e mola de metal internas para permitir a passagem da haste da suspensão.

Os testes preliminares de transmissibilidade do isolador revelaram um comportamento em baixas frequências ( $< 13$  Hz) de um oscilador passivo de cerca de 2,5 Hz de ressonância. Contudo, alguns picos de transmissibilidade surgiram em frequências acima de 13 Hz, devido, possivelmente, à “contaminações” do aparato experimental, formando um conjunto complexo de osciladores.

Os últimos procedimentos para medir a transmissibilidade da mola de gás estão sendo providenciados. A partir deste modelo, quinze molas serão montadas. Seguindo a proposta inicial, elas serão instaladas no sistema de pêndulos multi-aninhados desenvolvido para ser um subsistema de isolamento vibracional dos espelhos do interferômetro. Elas serão responsáveis pelo isolamento vertical de cada estágio. Assim, será possível estudar a transmissibilidade do sistema como um todo.

As anti-molas geométricas, construídas a partir de lâminas de aço de ligas especiais, curvadas como uma vara de pescar, estão começando a ser investigadas. A proposta é que elas constituam o isolamento vertical de um novo modelo do sistema de pêndulos multi-aninhados, que está em desenvolvimento. Esse sistema conjunto poderá ser usado em temperaturas criogênicas nas futuras gerações do LIGO.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, B. P. et al. LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory. **Reports on Progress in Physics**, v. 72, n. 7, p. 076901, 2009. 2, 42
- ABERNATHY, M. et al. **Einstein gravitational wave telescope conceptual design study**. 2011. Disponível em: <<https://tds.ego-gw.it/ql/?c=7954>>. 12
- ADHIKARI, R. X. Gravitational radiation detection with laser interferometry. **ArXiv e-prints**, maio 2013. 41, 42
- AGUIAR, O. D. Past, present and future of the resonant-mass gravitational wave detectors. **Research in Astronomy and Astrophysics**, v. 11, n. 1, p. 1–42, 2011. ISSN 1674-4527. 1, 15, 16, 17
- \_\_\_\_\_. **Frequência de ressonância do transdutor para o detector Mario Schenberg**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. Comunicação Pessoal. 21
- AGUIAR, O. D. et al. Status report of the Schenberg gravitational wave antenna. **Journal of Physics Conference Series**, v. 363, n. 1, p. 012003, jun. 2012. 20, 23
- ALDCROFT, T. et al. Six-degree-of-freedom vibration isolation systems with application to resonant-mass gravitational radiation detectors. **Review of Scientific Instruments**, v. 63, p. 3815–3827, 1992. 50
- ANDRADE, L. A. **Cálculo do ruído de uma antena esférica para ondas gravitacionais acoplada a transdutores paramétricos**. 103 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.38>>. Acesso em: 21 jan. 2014. 18
- BLAIR, D. G. **The detection of gravitational waves**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 5, 9, 10, 12, 18, 20, 22, 40
- BORTOLI, F. S. **Sistemas vibracionais do detector de ondas gravitacionais Mário Schenberg**. Tese (Doutorado) — Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 37
- BUONANNO, A. Gravitational waves. **ArXiv e-prints**, sep 2007. 6, 7, 8

- CATTANI, M. Gravitational waves I: basic emission equations. **ArXiv e-prints**, 2010. 8
- \_\_\_\_\_. Gravitational waves II: emitting systems. **ArXiv e-prints**, 2010. 1, 10
- CINTIO, A. D. et al. Dislocation movement and hysteresis in maraging blades. **Classical and Quantum Gravity**, v. 26, n. 20, out. 2009. 67
- CONSTANCIOJR, M. **Multi-Nested Pendula: Um novo conceito em isolamento vibracional para a terceira e quarta geração do LIGO**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. 49, 50, 51, 52, 64
- DAMOUR, T.; VILENKIN, A. Gravitational wave bursts from cosmic strings. **Physical Review Letters**, v. 85, p. 3761–3764, oct 2000. 14
- D'INVERNO, R. A. **Introducing Einstein's relativity**. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 5, 6
- EASTHER, R.; LIM, E. A. Stochastic gravitational wave production after inflation. **JCAP**, v. 0604, n. 4, p. 010, 2006. 14
- EINSTEIN, A. Näherungsweise integration der feldgleichungen der gravitation. **Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)**, p. 688–696, 1916. 1
- FABBRO, R. del et al. Performance of a gas spring harmonic oscillator. **Review of Scientific Instruments**, v. 59, p. 292–297, 1988. 53
- FURTADO, S. R. **Desenvolvimento de transdutores paramétricos de alta sensibilidade para o detector de ondas gravitacionais mario schenberg**. 378 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.07.14.53>. Acesso em: 16 maio 2013. 22
- GRATENS, X. P. M. **Instalação do detector Mario Schenberg no IFUSP**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Comunicação Pessoal. 17
- HARRY, G. M. et al. Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors. **Classical and Quantum Gravity**, v. 27, n. 8, p. 084006, 2010. 2, 42, 44, 45, 46, 47, 48

HILD, S. et al. Demonstration and comparison of tuned and detuned signal recycling in a large-scale gravitational wave detector. **Classical and Quantum Gravity**, v. 24, p. 1513–1523, 2007. 42

HULSE, R. A.; TAYLOR, J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 195, p. L51–L53, 1975. 1, 11

INSTRUMENT science white paper. LIGO Scientific Collaboration, 2012. Relatório técnico científico da colaboração. Disponível em: <<https://dcc.ligo.org/public/0091/T1200199/002/wp2012.pdf>>. 45

JOHNSON, W. W.; MERKOWITZ, S. M. Truncated icosahedral gravitational wave antenna. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 70, p. 2367–2370, Apr 1993. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.70.2367>>. 19

KOKKOTAS, K. D. Gravitational wave astronomy. In: RÖSER, S. (Ed.). **Reviews in Modern Astronomy**. Würzburg, Germany: Wiley and Sons, 2008. v. 20, p. 140. 1, 11, 12, 13

LESGOURGUES, J. et al. Detectability of the primordial origin of the gravitational wave background in the universe. **Astron Astrophys**, v. 359, p. 414–418, jul 2000. 14

MAGGIORE, M. **Gravitational waves, volume I: theory and experiments**. New York: Oxford University Press, 2008. 7, 8, 16, 21, 40, 41

MEERS, B. J. Recycling in laser-interferometric gravitational-wave detectors. **Physical Review D**, v. 38, p. 2317–2326, 1988. 44

MELO, J. L. **Sistemas de isolamento vibracional e de acoplamento antena-transdutores para o protótipo de um detector de ondas gravitacionais**. 199 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/05.23.09.02>>. Acesso em: 20 jan. 2014. 18

PRESS, W.; THORNE, K. Gravitational-wave astronomy. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, p. 335, 1972. 8

ROBERTSON, N. et al. Seismic isolation and suspension systems for advanced ligo. In: **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)**

**Conference Series**. Glasgow, Scotland: J. Hough and G. H. Sanders, 2004.  
v. 5500, p. 81–91. 46, 49

SATHYAPRAKASH, B.; SCHUTZ, B. Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves. **Living Reviews in Relativity**, v. 12, p. 2, 2009. 1, 12, 13

SERIES MG3702xA RF/Microwave signal generators. Morgan Hil, CA, USA: Anritsu Company, 2008. Manual de operação. 75

STOCHINO, A. **The HAS SAS seismic isolation system for the advanced LIGO gravitational wave interferometers**. Tese (Doutorado) — Università di Pisa, Pisa, 2007. Disponível em:  
<<http://www.nikhef.nl/~jo/virgo/gw/theses/Stochino.pdf>>. Acesso em: nov. 2013. 67

THORNE, K. Gravitational radiation. In: \_\_\_\_\_. **Three hundred years of gravitation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. p. 330–458. 39

TURNER, H. J. **Operation of the southern hemisphere resonant bar gravitational radiation detector**. Tese (Doutorado) — University of Western Australia, Western Australia, 1995. 21

WALDMAN, S. The advanced LIGO gravitational wave detector. **ArXiv e-prints**, 2011. 2, 43

WEBER, J. Evidence for discovery of gravitational radiation. **Physical Review Letters**, v. 22, p. 1320–1324, jun. 1969. 1, 15

WEISBERG, J. M.; TAYLOR, J. H. The relativistic binary pulsar B1913+16: thirty years of observations and analysis. **arXiv:astro-ph/0407149**, 2005. 1, 12

## ANEXO A - RUÍDO DE FASE DA FONTE *ANRITSU*

### Single-Sideband Phase Noise \*

*Single-Sideband Phase Noise (dBc/Hz): (typical)*

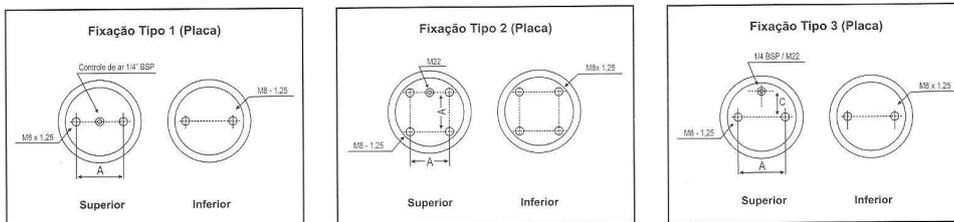
Frequency Range	Offset from carrier					
	10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz
10 MHz to 15.625 MHz (Option 4)	-101 (-115)	-126 (-132)	-139 (-143)	-142 (-145)	-142 (-145)	-145 (-148)
>15.625 MHz to 31.25 MHz (Option 4)	-95 (-106)	-121 (-127)	-134 (-142)	-139 (-145)	-139 (-145)	-145 (-148)
>31.25 MHz to 62.5 MHz (Option 4)	-89 (-96)	-116 (-122)	-129 (-140)	-135 (-145)	-137 (-145)	-142 (-150)
>62.5 MHz to 125 MHz (Option 4)	-83 (-92)	-110 (-116)	-127 (-139)	-129 (-140)	-134 (-139)	-138 (-146)
>125 MHz to 250 MHz (Option 4)	-77 (-89)	-104 (-113)	-123 (-133)	-123 (-137)	-128 (-134)	-132 (-144)
>250 MHz to 500 MHz (Option 4)	-71 (-85)	-98 (-105)	-117 (-126)	-117 (-130)	-122 (-128)	-126 (-140)
>500 MHz to 1050 MHz (Option 4)	-65 (-77)	-92 (-100)	-111 (-118)	-111 (-119)	-116 (-118)	-120 (-131)
>1050 MHz to < 2.2 GHz (Option 4)	-59 (-70)	-86 (-95)	-105 (-112)	-105 (-117)	-110 (-114)	-114 (-122)
2 GHz (2.2 GHz with Option 4) to 6 GHz	-50 (-60)	-77 (-88)	-96 (-104)	-96 (-108)	-101 (-107)	-105 (-115)
>6 GHz to 10 GHz	-46 (-55)	-73 (-83)	-92 (-102)	-92 (-105)	-100 (-104)	-101 (-115)
>10 GHz to 20 GHz	-40 (-50)	-67 (-77)	-86 (-95)	-86 (-98)	-94 (-98)	-95 (-114)

\* Phase Noise is specified and guaranteed only with internal reference. In external reference mode, the phase noise of the external supplied reference and the external reference bandwidth will dictate the instrument phase noise performance. Phase noise is not degraded when adding the high power Option 15.

Fonte: Series... (2008)



# ANEXO B - PROPRIEDADES DOS MODELOS DE ISOLADORES DA FIRESTONE®



Especificações Gerais								Como Atuadores		
Número	Diâmetro máximo a 7kgf/cm <sup>2</sup> mm	Altura mínima mm	Modelo	Placa de fixação - detalhes				Curso Máximo mm	Carga em kgf no curso máximo	
				Tipo de Fixação	Dimensões - mm		Quantidade de parafusos por flange Tipo 4		A 7 kgf/cm <sup>2</sup>	A 5,6 kgf/cm <sup>2</sup>
A	C	100 psi	80 psi							
16	153	50	1	1 ou 4	44.5 / 114.3	-	5 ♦	34	318	232
131	165	60	1	1 ou 4	44.5 / 114.3	-	5 ♦	44	567	331
110	210	60	1	1 ou 4	44.5 / 114.3	-	5 ♦	70	680	550
116	231	60	1	1	69.9	-	-	70	658	544
115	257	60	1	3 ou 4	88.9 / 160.3	44.5	8 ♦	70	938	717
19	328	60	1	3 ou 4	157.5 / 228.6	73.2	12 ●▼	80	2043	1578
113	386	60	1	2 ou 4	158.8 / 287.3	-	12 ●▼	87	3428	2667
25	163	80	2	1 ou 4	44.5 / 114.3	-	5 ♦	75	372	286
26	219	80	2	1	69.9	-	-	141	735	562
20	252	90	2	3 ou 4	88.9 / 160.3	44.5	8 ♦	141	1085	840
22	328	90	2	3 ou 4	157.5 / 228.6	73.2	12 ●▼	166	2156	1725
21	384	90	2	2 ou 4	158.8 / 287.3	-	12 ●▼	169	3200	2452
203	508	100	2	2 ou 4	215.5 / 419.1	-	24 ●▼	175	7446	5811
29	577	100	2	2 ou 4	269.4 / 482.6	-	24 ●▼	182	9761	7627
200	663	100	2	4	558.8	-	24 ●▼	182	13665	10760
313	384	120	3	2 ou 4	158.8 / 287.3	-	12 ●▼	261	3178	2497
1T15M-4 (0326)	320	193	4	5	200	140	-	230	2200	1500
1T15M-6 (0292)	320	216	4	5	200	140	-	270	2200	1500
1T15M-9 (0294)	320	260	4	5	200	140	-	330	2200	1500
1T19F-7 (0386)	361	210	4	5	200	140	-	280	2700	2000
1T19F-11 (0378)	361	245	4	5	200	140	-	350	2700	2000



- Prever guias
- ▼ Flanges com furos passantes, sem rosca
- ♦ Flanges com furos não passantes, com rosca
- Parafusos incluídos no fornecimento

Pressão máxima de Trabalho recomendada = 7 Kg f/cm2 À Firestone

# stone

## e Isoladores

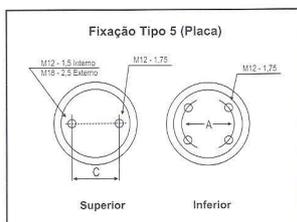
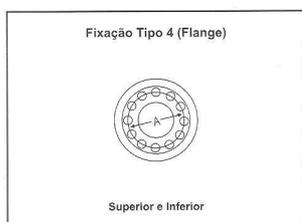


MODELO 3



MODELO 4

### um modelo adequado



#### Como Isoladores

Número	Carga de Trabalho (kgf/cm <sup>2</sup> )		(% Percentual aproximado de isolamento à frequência de vibração de			Altura ideal de trabalho (mm)	
	A 3,5 kgf/cm <sup>2</sup>	A 7,0 kgf/cm <sup>2</sup>	à frequência de vibração de				
	De	Até	400 CPM	800 CPM	1500 CPM	De	Até
16	227	590	50	90	97	70	76
131	204	636	65	93	98	95	100
110	294	634	73	94	98	110	123
116	318	999	75	95	98	110	123
115	454	1317	77	95	98	110	123
19	999	2724	83	96	99	121	130
113	1589	4540	86	97	99	121	140
25	204	613	83	96	99	120	152
26	272	885	91	98	99	180	210
20	409	1226	90	98	99	180	210
22	999	2860	91	98	99	216	250
21	1589	4313	93	98	99	216	250
203	3178	8853	93	98	99	229	254
29	5221	12258	94	98	99	229	254
200	6356	16344	94	98	99	229	254

1T15M-4 (0326) ■	1550	3100	96	99	99	290	350
1T15M-6 (0292) ■	1550	3100	97	99	99	350	410
1T15M-9 (0294) ■	1550	3100	97	99	99	440	500
1T19F-7 (0386) ■	1900	3700	97	99	99	350	410
1T19F-11 (0378) ■	1900	3500	97	99	99	430	490

■ Prever guias

está reservado o direito de alterar as especificações sem prévio aviso

# Firestone

World's Number 1  
Air Spring.



FIRESTONE INDUSTRIAL PRODUCTS COMPANY



Em constante desenvolvimento, a tecnologia Firestone inova e aperfeiçoa seus produtos. Intensas pesquisas e testes realizados em diversos laboratórios no Brasil e no mundo, garantem à Firestone um excelente desempenho com total qualidade em seus produtos nos mais variados segmentos. Os atuadores pneumáticos AIRSTROKE e os isoladores de vibrações, choques e ruídos AIRMOUNT são resultados destes esforços.

É singular (diversas) a participação da Firestone na aplicação de atuadores e isoladores pneumáticos. São produtos extremamente versáteis, adaptam-se à variadas aplicações em máquinas e equipamentos

nas indústrias, fundições e forjarias, construções, instrumentos, etc.

O AIRSTROKE é compacto e resistente, tem baixo custo, dispensa manutenção e lubrificação. Não tem partes móveis sujeitas ao atrito e ao desgaste. Não desperdiça ar porque não vaza. E sua grande flexibilidade admite movimentos angulares com até 30 graus. A almofada de ar comprimido AIRMOUNT isola vibrações de até 300 CPM, alcançando 90% de eficiência em diferentes condições de uso.

Permite o nivelamento preciso da base e suporta carga desde 45kg até mais de 20 ton, por exemplo. AIRSTROKE e AIRMOUNT FIRESTONE: Disponha desta tecnologia, consultando nossa Divisão de Produtos Industriais.

## Aplicações

MAX 11 4472 0780

<p>Movimento angular pivotante. O AIRSTROKE de 1 ou 2 ondas permite flexão de até 30° conforme o seu modelo.</p>	<p>Atuador de articulação linear. AIRSTROKE de 1 ou 2 ondas aciona o eixo guiado com retorno por gravidade, força oposta, mola ou pela própria elasticidade do AIRSTROKE.</p>	<p>Grampo. O AIRSTROKE de 1 ou 2 ondas aciona o mordente flexionando-se até 30°. Retorno por mola.</p>	<p>Os AIRMOUNTS evitam que as vibrações interfiram no funcionamento de equipamentos sensíveis</p>
<p>O uso de AIRMOUNTS como base de equipamentos vibratórios faz com que seu funcionamento não prejudique os pontos de fixação, prolongando a durabilidade do conjunto</p>	<p>Prensa de ação direta AIRSTROKE de 1, 2 e 3 ondas, instalados individual ou conjuntamente. Retorno por gravidade</p>	<p>O amortecimento controlado de impactos com AIRMOUNT acelera a produção, aumentando a velocidade de deslocamento dos materiais</p>	<p>Atuador de articulação pivotante, proporciona movimento giratório do eixo, até 145 graus. Permite desalinhamento até 30 graus. Retorno por mola ou força oposta</p>

# Firestone

World's Number 1  
Air Spring.



FIRESTONE INDUSTRIAL PRODUCTS COMPANY

Novembro  
2007

[www.avitechhp.com.br](http://www.avitechhp.com.br)

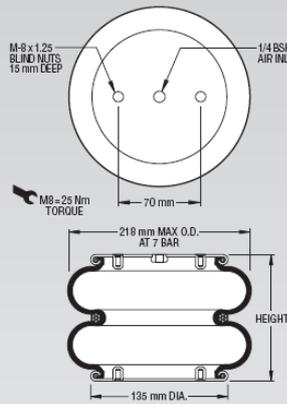


# ANEXO C - CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO ISOLADOR 26

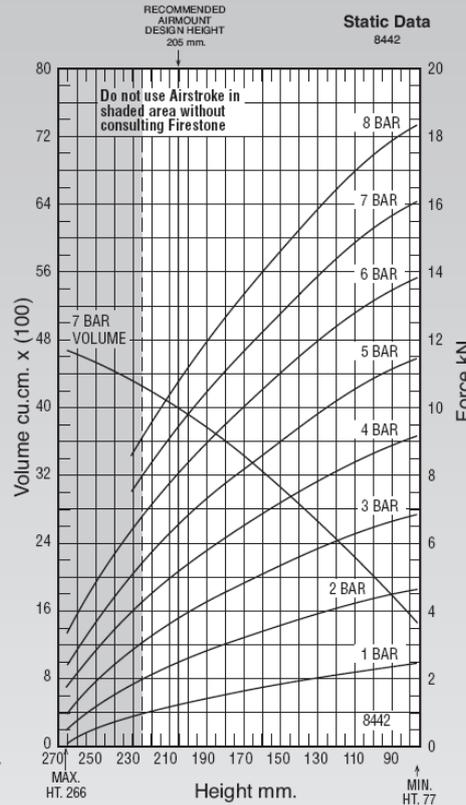


**NOTE: All Assembly Order Numbers are for bead plate parts unless noted otherwise.**

	Description	Assembly Order No.
Style 26	Blind nuts, 1/4 BSP	W01-M58-6353
	Blind nuts, 3/4 BSP	W01-M58-6387
Two Ply	Countersunk steel bead rings	W01-M58-6988
Bel lows	40 mm bolts, nuts, washers	W01-358-0142
	Rubber bellows only	
Assembly weight.....		2.40 kg.
Force to collapse to minimum height (@ 0 BAR)		102 N.



**NOTE: A bead plate part is shown. This part is also available with bead rings. See pages 8-10 for explanation.**



See page 12 for instructions on how to use chart.

Gauge Pressure (BAR)	Load (kN)	Spring Rate (kN/m)	Natural Frequency Hz
3	3.74	59	1.99
4	5.15	76	1.92
5	6.52	93	1.88
6	8.03	109	1.83
7	9.41	124	1.81

Assembly Height (mm)	Volume @ 7 BAR (cu cm)	EFF Area @ 7 BAR (cm sq)	MN Force				
			@ 3 BAR	@ 4 BAR	@ 5 BAR	@ 6 BAR	@ 7 BAR
220	4202	118	3.19	4.44	5.66	7.06	8.29
200	3918	139	3.90	5.35	6.76	8.32	9.73
180	3594	157	4.51	6.12	7.70	9.43	11.00
160	3233	174	5.08	6.82	8.57	10.46	12.20
140	2840	191	5.60	7.48	9.40	11.46	13.35
120	2434	206	6.05	8.09	10.16	12.36	14.38
100	2007	218	6.42	8.63	10.81	13.11	15.25
80	1564	228	6.76	9.08	11.34	13.72	15.94

HLM PNEUMÁTICA  
 Tel.: (11) 2506-7366  
[vendas@hlmneumatica.com.br](mailto:vendas@hlmneumatica.com.br)  
[www.hlmneumatica.com.br](http://www.hlmneumatica.com.br)



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.