

# **O “Q” MECÂNICO, SUA MEDIDA E IMPORTÂNCIA DENTRO DO PROJETO GRÁVITON**

RELATÓRIO FINAL  
DE  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

PIBIC — INPE

**Bolsista: Marcelo Gomes Luércio** — Aluno de graduação  
do Instituto tecnológico de Aeronáutica

**Orientador: Odylio Denys de Aguiar** — Pesquisador  
da Divisão de Astrofísica do INPE

## *Introdução*

O presente relatório visa expor o trabalho de iniciação científica realizado de primeiro de agosto de 1995 a cinco de janeiro de 1996, que teve lugar no Laboratório de Observação de Ondas Gravitacionais pertencente ao Departamento de Astrofísica do INPE.

O objetivo da iniciação científica, num primeiro momento, foi a observação e medida do decaimento de amplitude do sinal de frequências dos modos naturais de oscilação em um objeto metálico de geometria complicada, consistindo esses dados na base de cálculo para o valor do  $Q_{mec}$  desta peça. Este procedimento, na verdade, teria em si mais um fim didático do que propriamente o objetivo maior desta bolsa: uma pesquisa de materiais criteriosa e abrangente que há de realizar-se posteriormente.

Foram ainda, apesar de não figurarem como o problema central de abordagem deste trabalho, pesquisados alguns aspectos sobre a precisão da medida do  $Q_{mec}$  e da vibração em si da própria antena. Assim, questionou-se o valor das medidas de tempo do decaimento de energia dos modos estudados para certas condições relacionadas ao aparelho empregado ( condições de “janelamento”), bem como as formas de leitura das vibrações na antena para certos modos de excitação do nosso interesse.

É importante ressaltar a situação desta bolsa como o de um apêndice do Projeto Gráviton, que prevê a construção de uma antena de ondas gravitacionais para cujo material esta pesquisa tenderá a deslocar seus esforços.

## *O Projeto Gráviton*

Este projeto tem por finalidade a construção de uma antena de ondas gravitacionais esférica ( Bucky Bola ) que há de funcionar com outras três em fase de estudos na Itália ( Projeto ELSA ), Holanda ( Projeto GRAIL ) e Estados Unidos ( Projeto TIGA ). Sua importância básica para a astronomia é o de ajudar no mapeamento do cosmos pela detecção de fontes emissoras de ondas gravitacionais, que podem ser supernovas, sistemas estelares, buracos negros e etc. O papel desta bolsa é acompanhar as pesquisas do material que será utilizado para a elaboração da massa ressonante da antena quanto a sua Figura de Mérito Mecânico (  $Q_{mec}$  ) e fornecer, quem sabe, algum subsídio a essa pesquisa.

## *O $Q_{mec}$ e sua medida*

O  $Q_{mec}$  tem por definição a razão entre a energia fornecida e a dissipada por um sistema mecânico.

Para o nosso interesse, seu valor deve ser muito alto nos materiais pesquisados ( de ordem superior a  $10^8$  ) para que tenhamos um tempo de relaxação maior no decaimento da vibração dos modos de oscilação.

A temperatura, a estrutura cristalina e os amortecimentos externos devidos aos apoios — até dos próprios instrumentos de medida — são alguns dos fatores que contribuem para as alterações do resultado final. No entanto, tem a temperatura o papel mais relevante pois pode provocar grandes mudanças na ordem de grandeza deste valor.

A relação entre  $Q_{mec}$  e o tempo de relaxação é dada pela fórmula:

$$Q_{\text{mec}} = \frac{E_f}{E_d} = \frac{\tau_A}{2} \times \omega_0 \quad ; \quad \text{onde } \omega_0 = 2\pi \times f_0$$

$$\text{E, como } A = A_0 \times e^{-\frac{\Delta t}{\tau_A}}, \text{ então } \tau_A = \Delta t \frac{\log e}{\log\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} .$$

Substituindo este valor na fórmula do  $Q_{\text{mec}}$ , para um intervalo de amplitude de uma década em escala **dB**, tem-se que:

$$Q_{\text{mec}} = 2,73 f_0 \times \Delta t$$

Sendo esta a expressão final empregada para o cálculo do  $Q_{\text{mec}}$ .

### *Descrição do método, aparelhagem e resultados*

Foi utilizado na pesquisa um analisador de espectro ( SR760-Stansford Research Systems F.F.T.) para a detecção e medida das frequências dos modos naturais de oscilação, escolha daquelas que conduziam maior parcela de energia, e obtenção do tempo de decaimento por década da amplitude do sinal.

Tal aparelho lê sinais de vibração mecânica convertidos em elétricos por cristais piezelétricos, decompõe o sinal em uma série de funções senoidais e as soma segundo a teoria de Fourier, formando um espectro de amplitudes no domínio das frequências.

A prática era tão somente a coleta do tempo de decaimento do sinal, uma vez que o modo já tivesse sido escolhido, e a posterior aplicação direta da fórmula. A parte mais difícil caberia a análise e interpretação dos resultados.

Para a peça em questão, à temperatura ambiente e sem isolamento vibracional ou mesmo atmosférico, foram conseguidos

os resultados mostrados adiante, associados as **tabelas I, II e III** que estão reproduzidas na página 10 deste documento.

**Resultados:**

$$Q_I = 9,172 \times 10^3$$

$$Q_{II} = 15,347 \times 10^3$$

$$Q_{III} = 1,059 \times 10^5$$

(390Hz)

$$Q_{III} = 1,038 \times 10^5$$

(1560Hz)

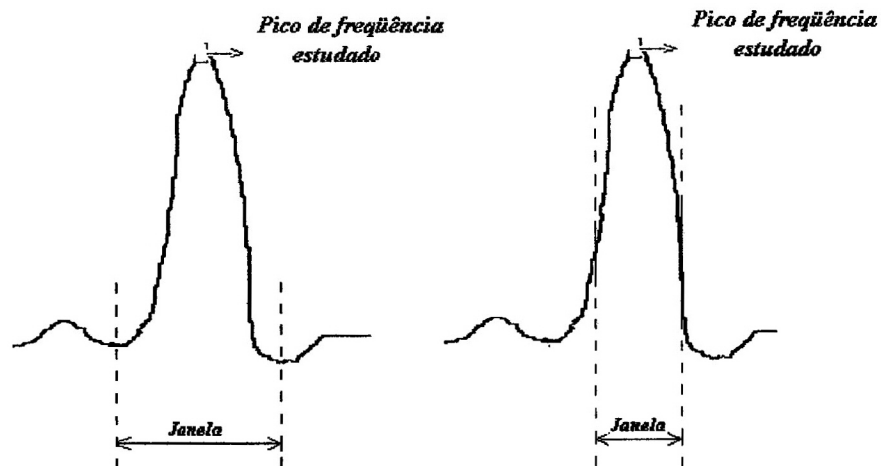
Os dois primeiros resultados foram obtidos sem a prévia escolha dos modos mais “energéticos” e referem-se as frequências de 1,015kHz e 5,343kHz respectivamente. Nestes casos não colhemos o valor de SPAN ( Janela ) para a pesquisa, o que já fizemos para as duas posteriores, onde podemos lê-lo entre parênteses abaixo do resultado. Para estas, também escolhemos o modo de vibração do nosso interesse (  $f_0 = 3,3437\text{kHz}$  ). Nota-se, pela disparidade na ordem de grandeza entre os dois primeiros resultados e os demais, a importância desta escolha. Há que se notar, também pela ordem de grandeza dos resultados, a distância que se encontra o material pesquisado dos nossos objetivos.

## O "Janelamento"

Este aspecto da medida exerce sobre o resultado final um papel decisivo quanto a precisão e veracidade dos resultados.

Consiste na escolha adequada para o tamanho da "janela", que vem a ser o menor intervalo tomado pela máquina entre duas freqüências ou, indiretamente, o tempo de amostragem do sinal. Tal escolha deve levar em conta a amplitude do sinal em relação a do ruído para que não haja interferência deste último na medida do  $\Delta t$ . Em geral o que deve-se observar é se a área compreendida sob o sinal de freqüência, dentro do espaço da janela, é bem maior que a compreendida pela do ruído .

O fato do F.F.T. fornecer dados por meio de integrações periódicas faz com que o objeto de estudo para o aparelho seja mais a área do espectro sobre a janela do que propriamente a amplitude do sinal. Adiante, temos a figura ilustrativa do problema citado:



A correta escolha da Janela a ser selecionada se faz por meio do estudo comparativo das velocidades de decaimento para diferentes intervalos de década tomados. A tendência deste valor deve ser sempre aumentar com a proximidade do ruído mas a nossa tarefa é cuidar para que ele se mantenha, o mais possível, constante.

Este estudo foi feito para a peça em questão e mostrou-se difícil e complicado devido a:

- Presença de transferência paramétrica entre as frequências mais efetivas na condução de energia;
- Imperfeições na acoplagem do pêndulo;
- Falta de isolamento vibracional;
- Falta de critério quanto ao ponto de aplicação do estímulo vibracional desferido à peça.

Sobretudo o primeiro e o segundo fatores tiveram fundamental culpa para os prejuízos causados aos resultados, devido a possibilidade imensa que abriram para a comunicação entre dois ou mais modos de vibração.

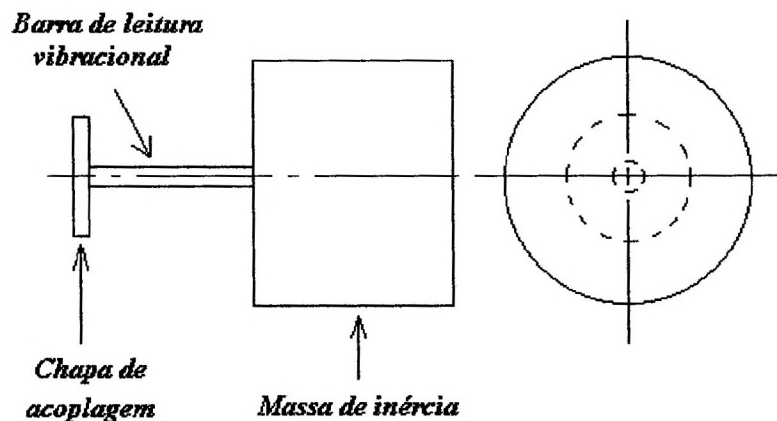
Primeiro, constatou-se uma relação entre as velocidades de decaimento das duas principais frequências naturais. Suspeitou-se então, de algum problema relacionado a acoplagem. Mais tarde, foi observada a existência de um ruído alto a uma distância da origem das frequências igual a que separava as duas já citadas. Estava caracterizada, então, a transferência paramétrica entre o ruído e os modos estudados.

## *Instrumentos Auxiliares de Medida (IAM)*

A medida de vibração da antena foi também um dos problemas objeto de estudo da nossa pesquisa.

Primeiro, constatou-se a impossibilidade de medir a vibração diretamente da antena — pelo fato de o cristal medir vibrações paralelas ao seu plano de acoplagem, enquanto o nosso interesse se prendia a medida daquelas que ocorriam perpendicularmente perpendicularmente ao plano de acoplagem.

Assim, desenvolveu-se o “modelo halteres” mostrado abaixo:



Para valores razoáveis de diâmetro e comprimento da barra, compatíveis com as dimensões do modelo da antena existente em nosso LOG, efetuou-se os cálculos para o dimensionamento deste primeiro IAM, levando em consideração seu funcionamento como o de um sistema massa-mola.

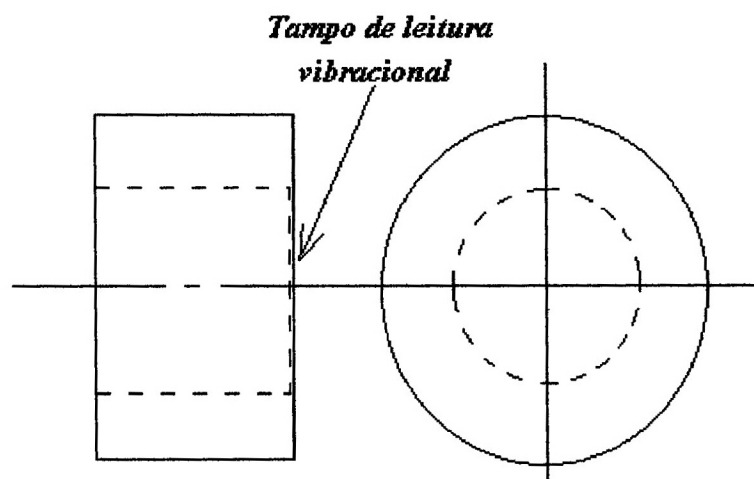
Seu projeto revelou falhas de concepção, detectadas ainda durante os cálculos, uma vez que este não isolava do cristal as vibrações de torção e flexão da barra, fornecendo, por tanto, valores incorretos. Além disso, revelou dificuldades de enquadramento



dentro da faixa de freqüência desejada e por ambos os motivos foi afastado de nossas pretensões.

Em seu lugar, foi-nos proposto um segundo IAM, “modelo tambor”, que tem seus estudos de viabilidade ainda em andamento. No caso deste modelo a vibração é lida no tampo e o acoplamento é feito na parte oca do “tambor”. Toda estrutura ao redor deve ter sua espessura dimensionada de forma a conter a influência das vibrações de tração e compressão na face da antena.

Seu esquema aparece disposto abaixo:



No caso deste modelo, não parece haver nenhuma falha estrutural. Os problemas estão no dimensionamento, que deve ser compatível com a faixa de freqüência, e na construção que, como no caso anterior, serão minuciosamente investigados antes de sua elaboração definitiva.

# Tabelas

Tabela I

$f_0(\text{kHz})$	$\Delta t(\text{s})$
1,015	3,65
//	3,05
//	3,10
//	3,16
//	3,40
//	3,34
//	3,40
//	3,37

Tabela II

$f_0(\text{kHz})$	$\Delta t(\text{s})$
5,343	1,05
//	1,05
//	0,98
//	0,96
//	1,04
//	1,05
//	1,15
//	1,15

Tabela III

SPAN (Hz)	I	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_4$	$\Delta t_5$	$\Delta t_6$	$\Delta t_7$	$\Delta t_8$	$\Delta t_9$	$\Delta t_{10}$	$\Delta t$
390	20 -40	11"59	11"36	11"46	11"37	11"53	11"41	11"48	11"43	11"60	11"53	11"47
	40 -60	10"92	10"85	11"15	11"18	11"31	11"16	11"09	11"03	11"03	11"00	11"07
	60 -80	10"53	11"24	10"46	10"67	11"24	11"47	11"28	11"21	10"59	11"42	11"11
780	20 -40	12"11	12"11	11"98	12"11	12"00	11"90	12"09	12"04	12"05	11"90	12"03
	40 -60	11"97	12"09	11"92	12"15	12"36	12"15	12"15	11"99	11"96	11"85	12"02
	60 -80	11"75	12"91	11"34	11"97	11"84	11"42	12"42	12"04	12"00	11"65	11"83
1560	20 -40	12"03	11"91	12"22	12"11	12"03	12"21	12"28	12"15	12"29	11"84	12"10
	40 -60	10"92	11"34	10"90	10"96	10"94	10"90	11"10	10"96	11"17	11"09	11"02
	60 -80	11"60	11"10	10"67	11"59	10"94	10"42	11"37	10"21	10"98	11"00	10"99

**Observações:** A grandeza **I** que figura na **tabela III** equivale ao intervalo de amplitude tomado para estudo em escala **dB** e o valor de frequência para os dados obtidos nessa tabela foi  $f_0 = 3,34375\text{kHz}$

## *Considerações sobre as qualidades técnicas do material a ser usado na antena*

O material que será empregado na elaboração da antena, como já foi dito, deve ter alto valor de  $Q_{mec}$ . Porém, não é certo que o material com o maior valor de  $Q_{mec}$  seja a melhor escolha, ou até mesmo que seja viável, para a elaboração da antena. A exemplo disso temos a safira que, apesar de apresentar o  $Q_{mec}$  mais alto já medido, dado as dimensões do projeto ( a antena deve ter cerca de **3m** de diâmetro ), jamais poderia figurar entre nossas opções.

No atual estágio de desenvolvimento, as pesquisas apontam para Alumínio (Al-5056) e o Bronze Bell como possíveis soluções devido a relativa facilidade de usinagem e fundição que apresentam.

O Alumínio em questão, no entanto, apresenta alguns problemas pelo fato de ser obtido por lingotamento contínuo e este processo não produzir peças maciças do tamanho desejado — só chapas. A solução proposta para este problema seria o **cladiamento** dessas chapas na intenção de se obter a peça maciça para usinagem. Porém, não se garantem os mesmos resultados, obtidos em testes com peças maciças, para uma peça gladiada de grandes dimensões, devido a maior possibilidades de falhas estruturais. Neste caso toda pesquisa de medida do  $Q_{mec}$  feita teria de ser repetida dentro desta nova situação.

A segunda opção, apesar de um pouco mais viável quanto a fabricação dentro dos padrões estruturais requeridos, não apresenta resultados tão animadores em relação ao  $Q_{mec}$  quanto o Alumínio. Os melhores resultados conseguidos para o Bronze se manifestam com a adição a este de pequena quantidade de Berílio que é tóxico e portanto elimina a possibilidade de utilização desta liga.

Apesar de não serem ainda preocupação da alçada do nosso estudo, essas referências apresentam-se aqui, a título de esclarecimento, como um prenúncio do ponto de convergência de nossa pesquisa e ilustração do objetivo maior deste trabalho.

## *Bibliografia:*

- K. Blevins, Fórmulas For Natural Frequency End Mode Shape (Krieger Publishing, Malabar, SL, 1979).

São José dos Campos, 28 de Abril de 1996

## RELATÓRIO DE NOTIFICAÇÃO DE TRABALHOS - PIBIC / INPE

**Bolsista:** Marcelo Gomes Luércio - Aluno de graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica

**Orientador:** Odylio Denys de Aguiar - Pesquisador da Divisão de Astrofísica do INPE

### O “Q” mecânico, sua medida e importância dentro do Projeto Gráviton

O objetivo do nosso trabalho nos últimos meses deteve-se ao estudo da medida do Q mecânico no que diz respeito ao método de obtenção, fatores que influem em sua precisão e na confiabilidade do resultado final.

Esta grandeza ( $Q_{mec}$ ) é definida como a razão entre a energia fornecida e a dissipada por um sistema mecânico e, para o nosso interesse, é função exclusiva do tempo de decaimento da amplitude de uma década, em escala dB, do sinal de vibração de uma peça. É ainda do nosso interesse que este valor seja alto nos materiais pesquisados - da ordem de  $10^7$  - pois a busca de toda nossa pesquisa está ligada ao material que irá compor a massa ressonante da antena “Einstein”, prevista pelo Projeto Gráviton, e o valor desta grandeza está intimamente relacionado com a sensibilidade da antena. É importante notarmos que as medidas devem ser feitas a temperatura criogênica, onde encontram-se, geralmente, os maiores valores de  $Q_{mec}$  para um mesmo material.

Nosso experimento consistiu, tão somente, na observação do tempo de decaimento na amplitude do sinal de tensões na superfície de uma peça submetida a estímulo vibracional, bem como da interferência, para o resultado final desta medida, de algumas escolhas ligadas a configuração do aparelho, e a montagem do experimento. Houveram também estudos e discussões a nível teórico do problema prático em medir-se modos pré-determinados de vibração na antena “Einstein”, que culminaram com a proposta de dois dispositivos de medida tendo seus estudos de viabilidade ainda em andamento.

Os resultados que esperávamos, e que obtivemos, estão longe daquilo que procuramos para atender as necessidades especificadas no Projeto Gráviton, do qual esta bolsa é apêndice. Porém a nível didático, são perfeitamente razoáveis e compatíveis, tendo em vista o material estudado e o fato de as medidas não terem nem mesmo sido feitas à frio. No momento, encotramo-nos em expectativa pelas amostras dos materiais que seriam mais indicados para a confecção da antena, já observada a viabilidade econômica e de fabricação, para que possamos iniciar os testes a temperatura criogênica e com demais elementos pertinentes que possam simular uma situação real de uso da antena.