

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_{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_{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)

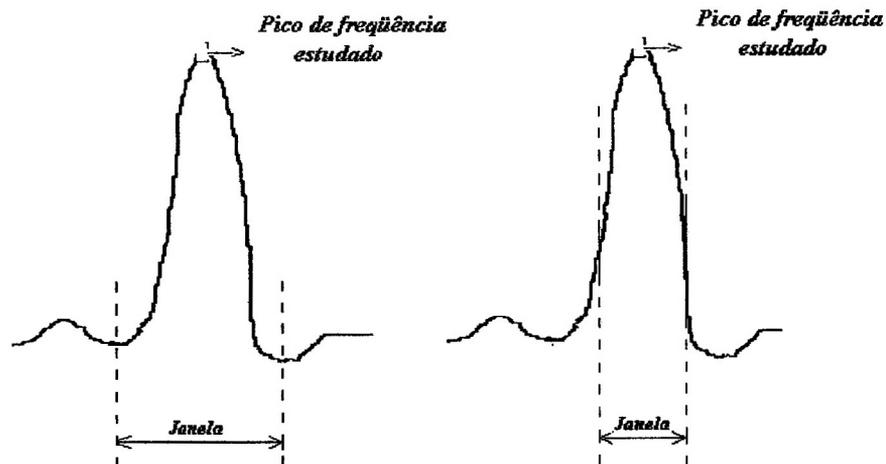
Os dois primeiros resultados foram obtidos sem a prévia escolha dos modos mais “energéticos” e referem-se as frequências de 1,015kHz e 5,343kHz respectivamente. Nestes casos não colhemos o valor de SPAN (Janela) para a pesquisa, o que já fizemos para as duas posteriores, onde podemos lê-lo entre parênteses 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 Δt . 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.

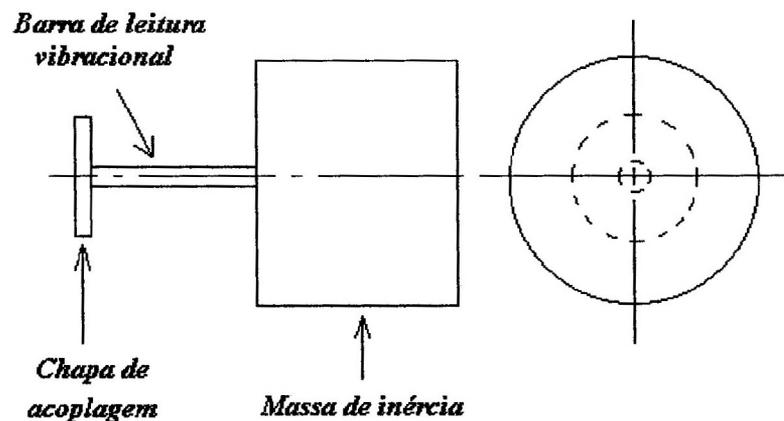
Primeiro, constatou-se uma relação entre as velocidades de decaimento das duas principais frequências naturais. Suspeitou-se então, de algum problema relacionado a acoplagem. Mais tarde, foi observada a existência de um ruído alto a uma distância da origem das frequências igual a que separava as duas 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:



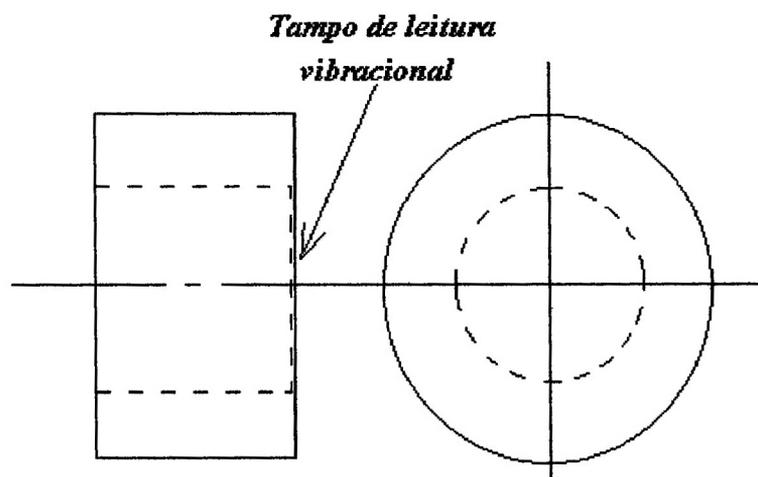
Para valores razoáveis de diâmetro e comprimento da barra, compatíveis com as dimensões do modelo da antena existente em nosso LOG, efetuou-se os cálculos para o dimensionamento deste primeiro IAM, levando em consideração seu funcionamento como o de um sistema massa-mola.

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 frequência 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 frequência, 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	Δt_1	Δt_2	Δt_3	Δt_4	Δt_5	Δt_6	Δt_7	Δt_8	Δt_9	Δt_{10}	Δt
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.