

SBI-IFUSP



305M810T3922

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

Instalação criogênica de uma antena gravitacional de baixíssima temperatura

Sérgio Turano de Souza

INSTITUTO DE FÍSICA

Serviço de Biblioteca e Informação

Tombo: 3922 ex 1

Dissertação de mestrado
submetida ao Instituto de
Física da Universidade de
São Paulo.

Orientador: Prof Dr. Nei Fernandes de Oliveira Jr.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alain André Quivy (IFUSP)

Prof. Dr. Anderson Campos Fauth (UNICAMP)

Prof. Dr. Nei F. de Oliveira Jr. (IFUSP)

São Paulo
2003

Prof. Armandinho Corbani Ferraz
Presidente da Comissão de Pós Graduação

del 03/10/03

530.14

S729i

M

ex. 1

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Souza, Sérgio Turano de

Instalação criogênica de uma antena gravitacional de
baixíssima temperatura. São Paulo, SP - 2003

Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo
Instituto de Física - Depto. de Física dos Materiais e
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Nei Fernandes de Oliveira Jr.
Área de Concentração: Física

Unitermos: 1. Detectores de Ondas Gravitacionais;
2. Ondas Gravitacionais;
3. Criogenia.

USP/IF/SBI-064/2003

SBI-IFUSP



305M810T3922

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos às pessoas cujos ensinamentos, assistências e encorajamentos contribuíram para que este trabalho fosse realizado. Primeiro gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Nei Fernandes de Oliveira Jr. pela oportunidade, apoio e dedicação. Ao Prof. Odylio Denys de Aguiar por guiar o Projeto GRAVITON. Aos colegas do Projeto, que compartilham os mesmo objetivos: Zémelo, Kilder, Frajuca, J. Weber (não esses que vocês estão pensando), Marco, Nadja, etc.

Aos funcionários do LESBT, também conhecidos como "O Exército de Brancaleone": Olympio, Walter, Jaime, Paulinho, Fábio, Carlinhos, Alexandre, Eron, Rui, Vagner, Zé Dada, Marcão, Iran, etc.

Às pessoas que primeiro acreditaram no meu esforço: prof. Roberto Szente e seus alunos.

Às pessoas próximas, que entenderam quando eu tinha que ir para o Instituto nos finais de semana e nas madrugadas. Ao Denim And Leather, por me manter ocupado nas poucas horas vagas.

Este trabalho teve apoio financeiro do CNPq (Bolsa de Mestrado 131992/2001-5) e da minha família, antes, durante e depois da bolsa. Também gostaria de agradecer também ao IFUSP e à FAPESP que proporcionaram condições para o desenvolvimento deste trabalho.

Valeu galera! Stay Heavy!

RESUMO

Esta dissertação descreve a preparação de toda a infra-estrutura mecânica e criogênica necessária para o desenvolvimento do detector de ondas gravitacionais SCHENBERG, no Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas do IFUSP. A massa ressonante do detector é uma esfera de CuAl(6%), de 1.150 kg que, juntamente com os filtros mecânicos (cerca de 650 kg), devem ser resfriados a temperaturas ultra-baixas. Foi feita a primeira montagem do sistema e o primeiro teste de resfriamento até a temperatura de hélio líquido. O resfriamento consumiu 1360 litros de hélio líquido e 500 litros de nitrogênio líquido, em um tempo de 110 horas. Através da medida de temperatura em vários pontos do sistema, pudemos avaliar as entradas de calor. Além disso, efetuamos medidas preliminares do fator de qualidade mecânico da esfera, até a temperatura de 1,95 K. De uma maneira geral, os testes mostraram um sistema eficiente, propiciando as condições necessárias para o desenvolvimento do projeto. O fator de qualidade da esfera, conquanto medido ainda preliminarmente, mostrou valores bastante altos, bem perto dos valores obtidos anteriormente em testes com amostras pequenas.

ABSTRACT

This dissertation describes the preparation of the whole mechanical and cryogenic infrastructure, necessary to the development of the gravitational-wave detector SCHENBERG, at the Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas of IFUSP. The resonant mass of the detector is a CuAl(6%) sphere weighting 1150 kg which, together with the mechanical filters (weighting about 650 kg), must be cooled to ultra-low temperatures. The first assembly of the whole system, and the first test of cooling to helium temperatures were accomplished. The cooling process took 1360 liters of liquid helium, 500 liters of liquid nitrogen, and was done in 110 hours. Through the measurement of the temperature in several points of the system, it was possible to evaluate the heat inputs into the cryostat. Besides, preliminary measurements of the Mechanical Quality Factor of the sphere were made down to the temperature of 1,95 K. In general, the tests have shown that the system is quite efficient, meeting the necessary conditions for the development of the project. The Mechanical Quality Factor, although still in preliminary measurements, exhibited very high values, near the ones obtained before, during the tests with small samples.

ÍNDICE

CAPÍTULO I	6
ONDAS GRAVITACIONAIS	6
I.1 - Introdução.....	6
I.2 - Ondas gravitacionais	8
I.3 - Detectores de ondas gravitacionais.....	9
CAPÍTULO II.....	13
INFRA-ESTRUTURA.....	13
II.1 - O "dewar"	13
II.2 - A sala.....	16
II.3 - Sistemas de vácuo	22
CAPÍTULO III.....	24
INSTALAÇÃO DO "DEWAR" E ESFERA	24
III.1 - "Dewar"	24
III.2 - A esfera e as massas de filtragem.....	25
III.2.1 - Descrição	25
III.2.2 - A suspensão	28
III.2.3 - A haste superior de sustentação.....	31
CAPÍTULO IV	34
RESFRIAMENTO	34
IV.1 - O problema.....	34
IV.2 - Projeto térmico da suspensão e placas de ancoragem de N ₂ (80K) e He (4,2K)	36
IV.3 - Termometria	41
IV.4 - Calibração dos termômetros	45
IV.5 - Resfriamento	47
IV.6 - Discussão.....	52
CAPÍTULO V	56
FATOR DE QUALIDADE MECÂNICO	56
V.1 - Introdução	56
V.2 - Resultados e discussão.....	57

CAPITULO VI	62
CONCLUSÕES	62
WEBGRAFIA	64
REFERÊNCIAS.....	65

CAPÍTULO I

ONDAS GRAVITACIONAIS

I.1 - Introdução

A detecção de ondas gravitacionais é um dos destaques da física atual. Depois de várias décadas de desenvolvimento, chegamos a um estágio tecnológico em que a sensibilidade prevista dos dispositivos de detecção sendo construídos atinge valores compatíveis com as previsões teóricas. Assim, é de se prever que em futuro próximo estas ondas venham a ser detectadas, e que este fato produza um novo patamar em áreas das ciências físicas como a Astronomia e a Cosmologia.

Países em todo o mundo, como Estados Unidos, Alemanha, França, Itália, Japão e Austrália estão envolvidos em um esforço para desenvolver detectores interferométricos, com custos de centenas de milhões de dólares cada. Antes disso, os esforços se concentraram em antenas ressonantes, destacando-se os esforços de países como a Itália, Estados Unidos e Austrália. A comunidade científica brasileira acompanhou estes desenvolvimentos, chegando mesmo a formar especialistas na área, e na última década, a idéia de dotar o Brasil de um programa de detecção de ondas gravitacionais tomou corpo. Nasceu o Projeto GRAVITON que propõe a construção de três detectores ressonantes, de uma nova geração, operando em frequências entre 1,0 e 3,2 kHz, a serem construídos em ordem crescente de tamanho. Um financiamento da FAPESP permitiu a implementação da primeira fase deste projeto, a construção do primeiro dos detectores.

Os detectores propostos no Projeto GRAVITON diferem dos já construídos por serem esféricos e super-resfriados. Até aqui os detectores

ressonantes construídos são cilíndricos e feitos de uma liga de alumínio, com exceção do projeto australiano NIOBE, que é feita de nióbio. A forma esférica é muito mais apropriada ao caráter quadrupolar das ondas gravitacionais, propiciando um ganho de quase duas ordens de grandeza na seção de choque para transferência de energia ⁱ. A utilização de uma liga de cobre, por sua vez, permite um resfriamento mais eficiente propiciando temperaturas finais bem menores do que a das atuais antenas de alumínio ⁱⁱ. A necessidade de ultra-baixas temperaturas (pretende-se uma temperatura final de 20 mK) tornou natural o envolvimento do LESBT, o Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas da USP, com sua infra-estrutura e tecnologia criogênica. É nele que se está desenvolvendo a primeira fase do GRAVITON.

Nesta dissertação relatamos o planejamento, desenvolvimento e instalação de toda a infra-estrutura mecânica e criogênica para a instalação da antena. Desde a sala vazia até a primeira montagem e o primeiro resfriamento a temperaturas de hélio líquido. Como único bolsista do programa, participei de todos os desenvolvimentos que culminaram com o primeiro resfriamento da massa esférica, e uma medida preliminar da evolução do seu fator de qualidade mecânica, durante o resfriamento. Na Figura 1 vemos um desenho mostrando a concepção básica do detector.

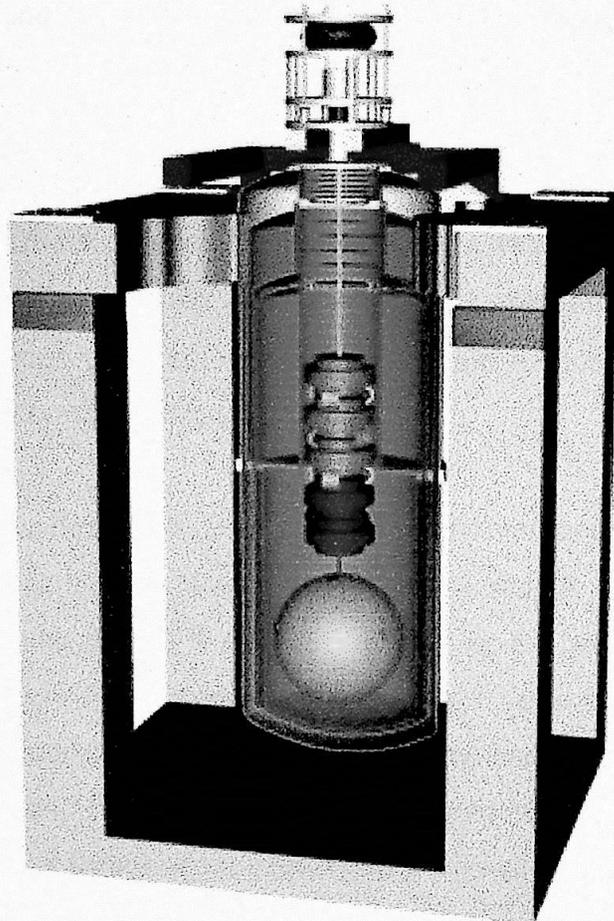


Figura 1 - O detector de ondas gravitacionais Mario SCHENBERG

1.2 - Ondas gravitacionais

Ondas gravitacionais são distorções da métrica do espaço-tempo, que se propagam com a velocidade da luz, e foram previstas pela teoria da Relatividade Geral de Einstein em 1916, mas nunca foram diretamente detectadas. Elas interagem muito fracamente com a matéria e assim chegam até nós na sua forma original, nos dando informação direta de suas fontes, como explosões de super-novas, formação de buracos negros, instabilidades de estrelas de nêutron, etcⁱⁱⁱ. Ondas Gravitacionais são ondas transversais, que se propagam perpendicularmente ao plano de deformação, e tem como primeiro momento, o momento de quadrupolo. Elas ocorrem em dois estados de polarização, usualmente conhecidos como “x” e “+”. A

polarização "X" indica uma diferença de 45° no espaço, em relação à polarização "+"ⁱⁱ.

O problema com a detecção das ondas gravitacionais é que, mesmo para as ondas mais intensas previstas, a distorção de comprimento provocada, $h = \delta\lambda/\lambda$, é muito pequena. Como exemplo, as deformações previstas para ondas gravitacionais geradas pela explosão de uma supernova no centro de nossa galáxia é $h \sim 10^{-18}$ ^{iv}.

Embora uma detecção direta de ondas gravitacionais esteja ainda por ser feita, existem já evidências indiretas fortíssimas. A binária pulsar PSR 1913+16, descoberta em 1974 por Hulse e Taylor é o melhor exemplo^v. O monitoramento contínuo desde então vem demonstrando que o decrescimento do período orbital coincide precisamente à perda de energia sob forma de ondas gravitacionais previstas pela teoria de Einsteinⁱⁱ. Por este trabalho, ambos foram agraciados com o Prêmio Nobel em 1993.

1.3 - Detectores de ondas gravitacionais

Meio século após a previsão de Einstein, Joseph Weber realizou um trabalho pioneiro de construção do primeiro detector de ondas gravitacionais^{vi}. A componente chave do detector de Weber era uma pesada barra cilíndrica, de uma liga de alumínio com um alto fator de qualidade mecânico, isolada o máximo possível de vibrações externas. Weber, em 1969, operando com dois detectores bastante distantes um do outro, registrou eventos coincidentes entre os dados fornecidos pelos dois instrumentos que ele considerou como "evidências de ondas gravitacionais".

Desde os primeiros relatos de Weber, que nunca foram confirmados, a melhoria na detecção foi muito grande. Novas antenas ressonantes foram construídas, com a mesma geometria, mas com tecnologia mais moderna e

por isso melhorando muito a sensibilidade. Há quatro antenas operando atualmente: - a batizada com o nome de NAUTILUS em Frascati, Itália; - a AURIGA em Legnaro, também na Itália; - a EXPLORER também operada por um grupo italiano, mas nos laboratórios do CERN na Suíça; - e ALLEGRO, em Louisiana nos Estados Unidos. Todas alcançam uma sensibilidade $h \sim 10^{-19}$, e a mais fria (Nautilus) opera perto de 0,1 K. Além das anteriores, a antena NIOBE operou até recentemente em Perth, Austrália, mas foi desativada e os esforços lá foram concentrados em um programa envolvendo um detector interferométrico.

A grande melhoria das antenas pós-Weber se deu nos transdutores, que transformam as vibrações mecânicas das barras em sinais elétricos. Os cristais piezelétricos utilizados por Weber foram substituídos por dispositivos mais complexos e muito mais sensíveis, envolvendo amplificadores mecânicos de amplitude, acoplamentos indutivos e capacitivos, e finalmente amplificadores no estado da arte. As antenas atualmente em operação utilizam amplificadores baseados no efeito Josephson. A melhoria na sensibilidade dos transdutores obrigou a melhorias nos sistemas de isolamento mecânico, e ao resfriamento a temperaturas cada vez mais baixas. A sensibilidade atual, em princípio, seria suficiente para detectar grandes eventos em nossa galáxia, como explosões de super-novas. Infelizmente a previsão otimista para a ocorrência de tais eventos é da ordem de um em dez anos, o que torna uma detecção muito pouco provável.

O grande esforço atual é a construção de uma série de interferômetros a *laser* com braços gigantes, que chegam a 80 km (em túneis de 4 km de comprimento) no caso americano. Uma onda gravitacional que se propaga na direção de um dos braços, produzirá no outro (a 90 graus) variações de comprimento que modificarão o padrão de interferência, imitando a forma da onda. O projeto americano, batizado de LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) é o maior deles com dois interferômetros, um ao sul e outro no norte do país a um custo que já é de

cerca de meio bilhão de dólares. Há ainda projetos semelhantes na Alemanha (Geo600), Itália (VIRGO), Japão (TAMA) e Austrália (AIGO). Em sua primeira fase, o LIGO deverá atingir sensibilidades de $h \sim 10^{-21}$ em frequências em torno de 2×10^2 Hz ^{vii}. Os interferômetros já estão funcionando com sensibilidade perto deste valor. Outro projeto importante, já em desenvolvimento, é o LISA (Laser Interferometer Space Antenna), um interferômetro a ser construído no espaço, com braços em forma de triângulo equilátero de 5 milhões de quilômetros de comprimento, com a finalidade de detectar ondas na faixa de 10^{-4} a 10^{-1} Hz ^{viii}.

O programa brasileiro se encaixa neste quadro de forma sensata. As características novas dos detectores ressonantes propostos propiciam previsões de ganhos em sensibilidade que os colocam no mesmo nível de sensibilidade dos interferômetros sendo construídos, embora em uma faixa de frequência muito mais estreita. Assim, será possível contribuir, a um custo que é ordens de grandeza menor. Vale ressaltar também aqui que o projeto brasileiro se expandiu e tem parceiros fora. Duas outras antenas idênticas estão sendo construídas, uma na Holanda e outra na Itália. O projeto em Leiden na Holanda, dirigido pelo Prof. G. Frossati, desenvolve-se em contato estreito com o nosso.

Os capítulos seguintes desta dissertação descrevem de forma razoavelmente detalhada o planejamento, confecção e instalação de toda a infra-estrutura necessária para o desenvolvimento da antena. Começamos pelo vaso criogênico, a sala e todos os apetrechos necessários para manusear os pesados componentes envolvidos. Depois descrevemos a primeira montagem completa do sistema. Finalmente passamos ao primeiro resfriamento até temperaturas de hélio líquido, monitorando as temperaturas mais importantes e a evolução do fator de qualidade da massa esférica. A Figura 2 mostra um desenho detalhado de detector.

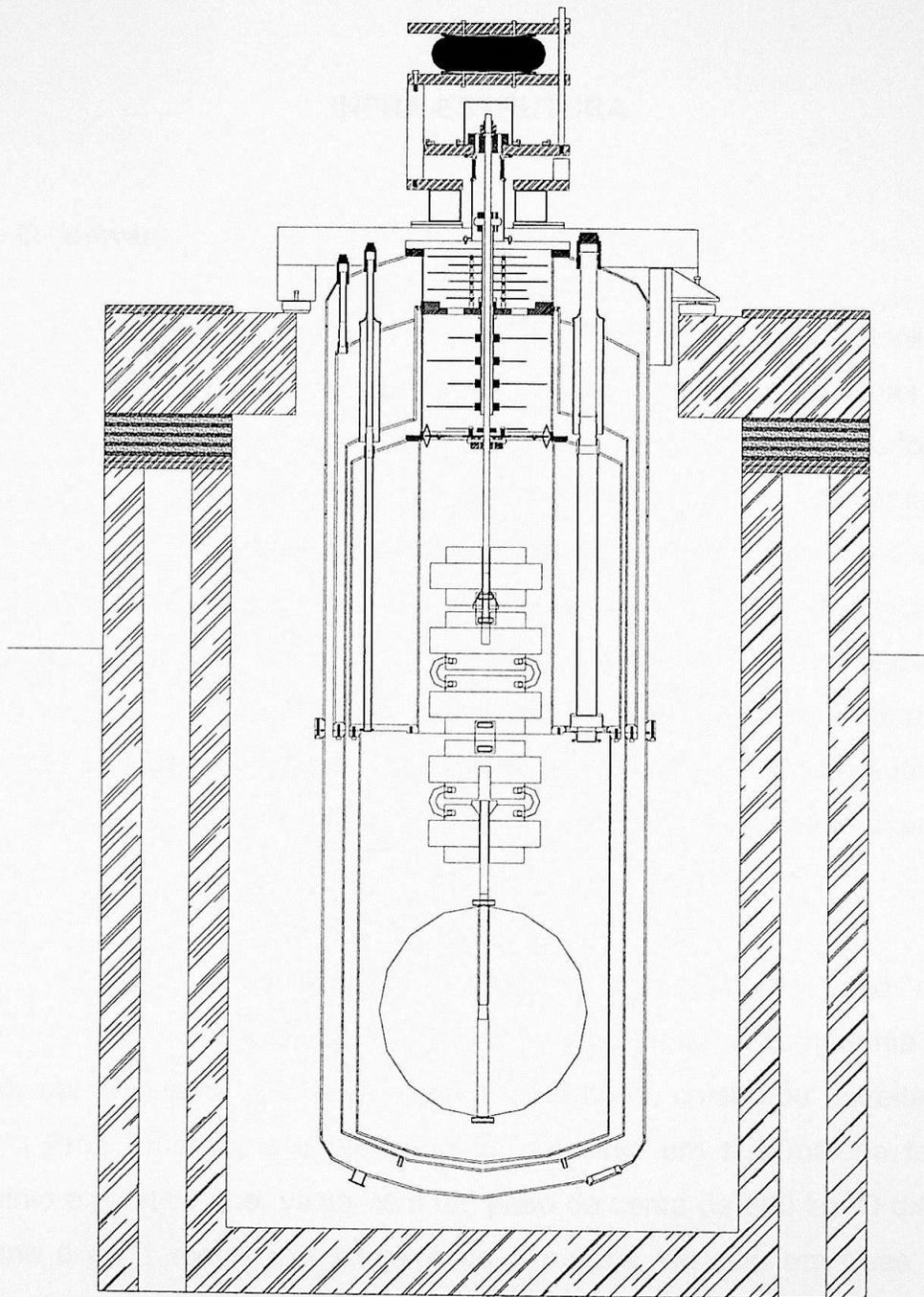


Figura 2 - Desenho esquemático do detector

CAPÍTULO II

INFRA-ESTRUTURA

II.1 - O “dewar”

O “dewar” foi projetado pelo Prof. G. Frossati e colaboradores e foi construído pela KADEL Engineering (EUA) ^{ix}. O “dewar” é uma das peças mais importantes do projeto, pois deve proporcionar um espaço criogênico para a esfera de 65 cm de diâmetro e para o sistema de isolamento vibracional, com um total em torno de 2 toneladas. Nesta fase do projeto, em que se espera muitos testes e desenvolvimentos, ele deve ser facilmente manuseável, ou seja, deve poder ser aberto e fechado em um espaço de tempo relativamente curto. Deve, também, combinar economia e capacidade de conter líquidos criogênicos (nitrogênio e hélio) em quantidades suficientes para, pelo menos, uma semana de trabalho. Além disso, é muito importante minimizar os custos.

A solução encontrada foi projetar e construir um vaso com a tecnologia tradicional utilizada em vasos de laboratório. A companhia Kadel, tradicional fabricante de “dewars” para laboratório, colaborou estreitamente com o Prof. Frossati, e o resultado foi um vaso em sua maioria feito de alumínio e plástico que, vazio, tem um peso de cerca de 800 kg. O diâmetro externo é de 1 metro e a altura é de 3 metros, dividida em duas partes iguais. A parte superior do criostato contém os reservatórios de hélio líquido e de nitrogênio líquido, e uma boca de 40 cm de diâmetro que dá acesso à parte inferior (Figura 3). O tanque de hélio tem uma capacidade de 340 litros e o de nitrogênio de 205 litros. Todas as conexões do dewar estão na parte superior. São onze acessos de entrada e saída (Figura 4). A parte inferior do criostato é constituída por dois escudos de radiação e a casca externa. Um dos escudos, a 4 K, é vedado com índio na flange inferior da câmara de

hélio, e o outro, a 77 K, é aparafusado na flange inferior da câmara de nitrogênio. A evaporação mínima projetada é em torno de 0,6 litros/hora de hélio líquido (informação do fabricante), sendo razoável esperar uma evaporação entre 1,5 e 2 litros de hélio líquido por hora com todo o sistema montado. O criostato é organizado em duas câmaras de vácuo: a câmara de vácuo externa (OVC – outer vacuum chamber) e câmara de vácuo interna (IVC – internal vacuum chamber). A OVC funciona como uma câmara de isolamento entre o meio ambiente e o espaço interno e entre os reservatórios de nitrogênio e hélio líquido. A IVC proporciona um espaço de vácuo para a esfera e o sistema de isolamento vibracional. O conjunto é suspenso pela parte superior, por três suportes que se apóiam em uma plataforma fixa do laboratório (Figura 5).

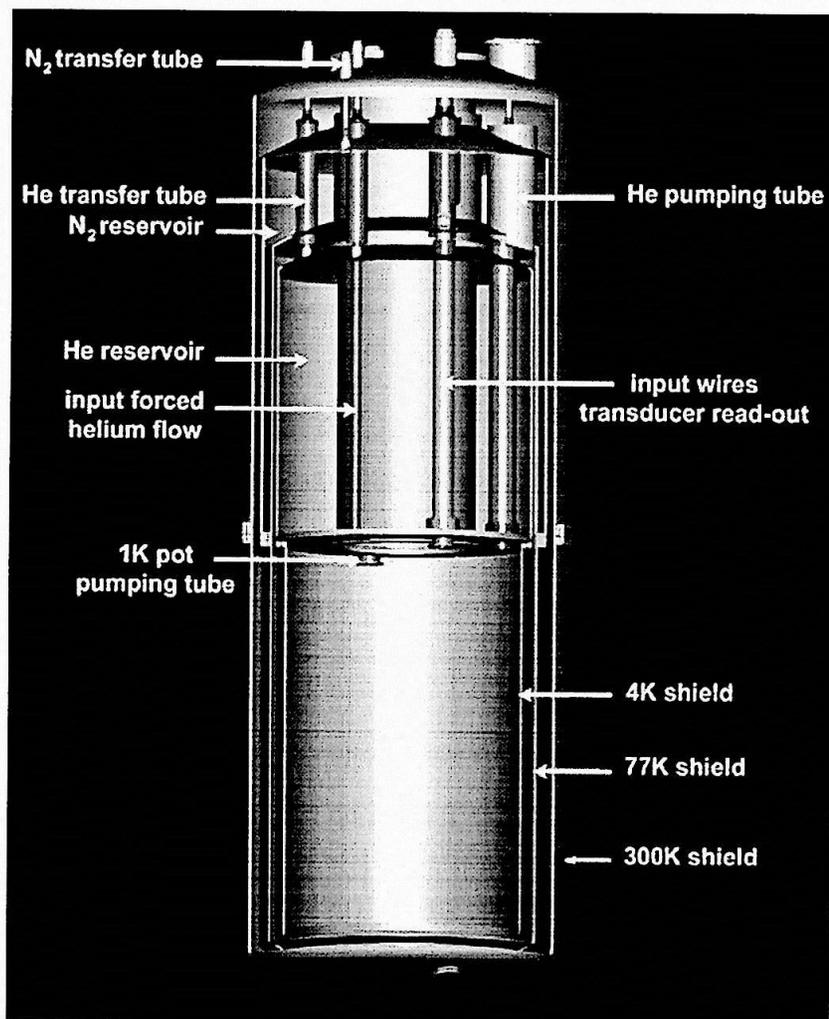
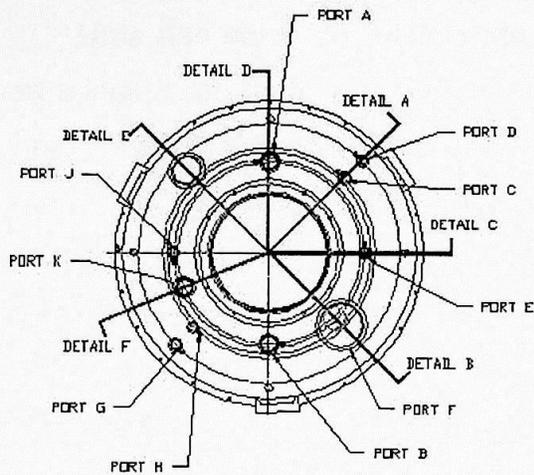


Figura 3 - "Dewar"



Detalhe A → C & H – Acesso a parte inferior do “dewar” – D & G – Acesso ao tanque de nitrogênio.

Detalhe B → F – Acesso ao refrigerador de diluição.

Detalhe C → E & J – Acesso ao tanque de hélio.

Detalhe D → A & B – Portas de acesso ao 1K POT e fiação.

Detalhe E → Porta de bombeamento de vácuo.

Detalhe F → K - Porta de Troca de Gás Câmara de Hélio).

Figura 4 - Vista superior do “dewar” e descrição das conexões

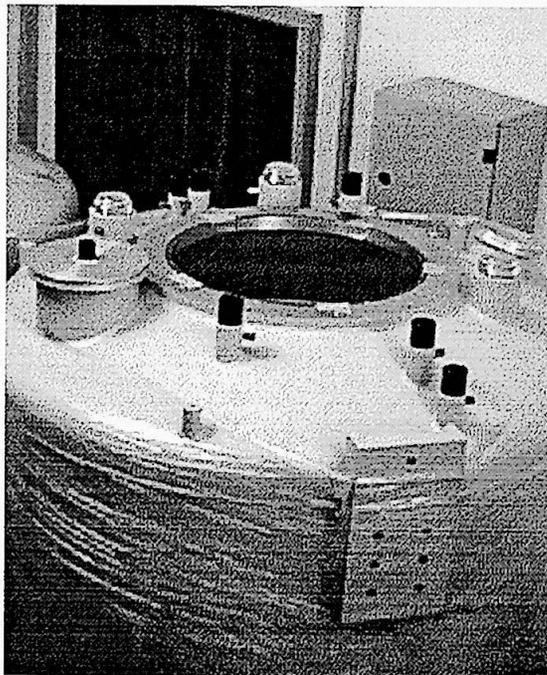


Figura 5 - Foto da parte superior do “dewar”

II.2 - A sala

Uma das salas do Edifício Mario Schenberg do IFUSP foi reservada para a instalação da antena. O primeiro problema enfrentado foi como alojar o vaso criogênico na sala (Figura 6). A primeira solução possível pareceu ser construir um pequeno buraco, apenas para termos espaço para a abertura do dewar, com todo o aparato à altura do chão. Esta solução apresentou alguns problemas. O principal foi a falta de pé direito da sala, ou seja, o espaço entre a plataforma e o teto seria por demais exíguo dificultando sobremaneira o trabalho sobre a plataforma. Vale lembrar que sobre a plataforma estão todas as conexões com o "dewar", e a suspensão do conjunto esfera-filtros.

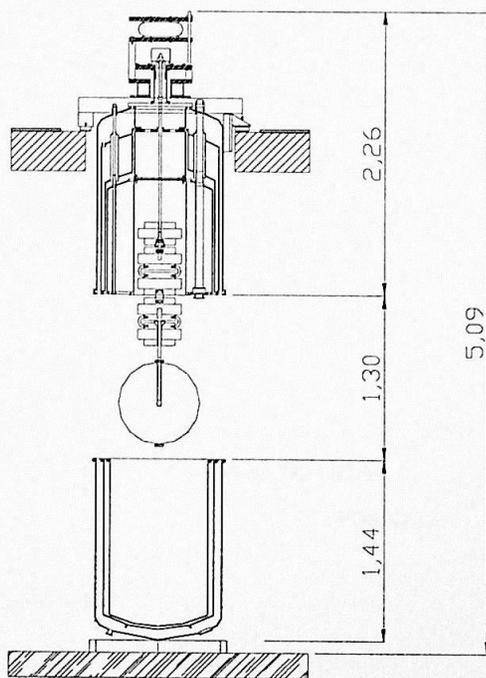


Figura 6 - Desenho do "dewar" aberto (medidas em metros)

A segunda solução, a que foi implementada, foi a de construir a estrutura de suporte a partir de um fosso que rebaixasse o piso em 1,8 metros. A estrutura é composta de quatro colunas quadradas de concreto de 40 centímetros de lado e 2,4 metros de altura. Dentro destas colunas foram

engastados tubos de PVC de 100 mm de diâmetro para acomodar um sistema hidráulico capaz de suspender a plataforma de apoio do “dewar” a uma altura superior a 1,5 m. Com isso, a abertura e o fechamento do vaso se faria deslocando para cima e para baixo a plataforma, e o trabalho na esfera poderia ser feito tanto no fundo do fosso como no nível do chão (com a plataforma suspensa). Com esse desenho, o acesso às conexões superiores do dewar (a aproximadamente 1,1 m do piso) ficariam grandemente facilitados. O fosso foi projetado em forma de cruz (Figura 7) para prover espaço para se trabalhar dentro dele (tendo fácil acesso à esfera) e para que houvesse espaço para acomodar a parte inferior do “dewar” (os três canecos) quando este estivesse aberto (Figura 8). Para isso, foi também projetado e construído um carrinho sobre trilhos no chão do fosso, para movimentar mais facilmente os canecos do “dewar”. Nas Figuras 9, 10 e 11, vemos fotos da construção do fosso e da plataforma de concreto.

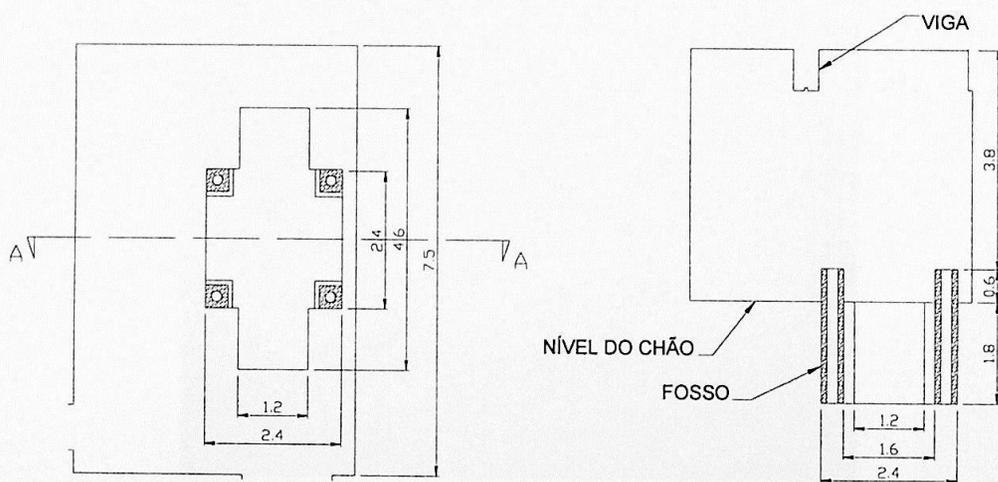


Figura 7 - Vista superior e corte lateral A-A da sala com o fosso (medidas em metros)

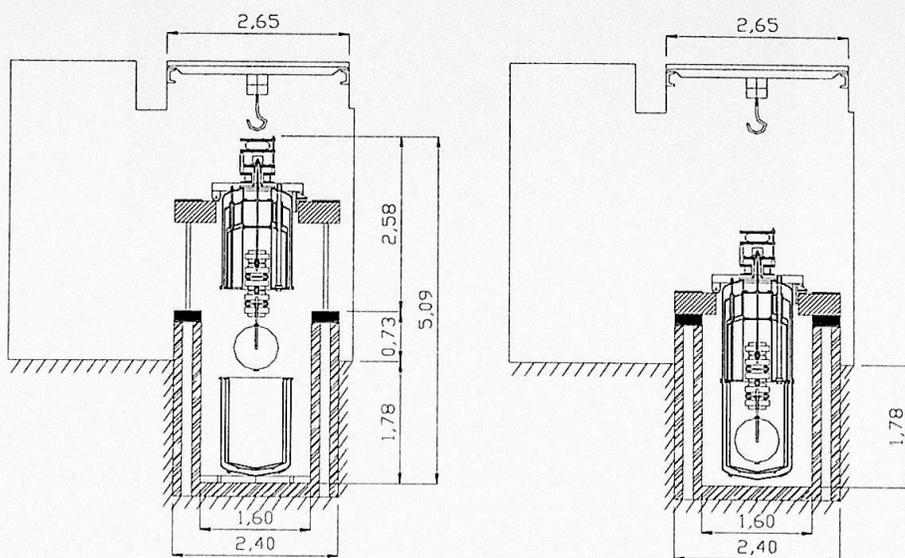


Figura 8 - "Dewar" aberto e fechado. Posicionamento na sala em corte (medidas em metros).

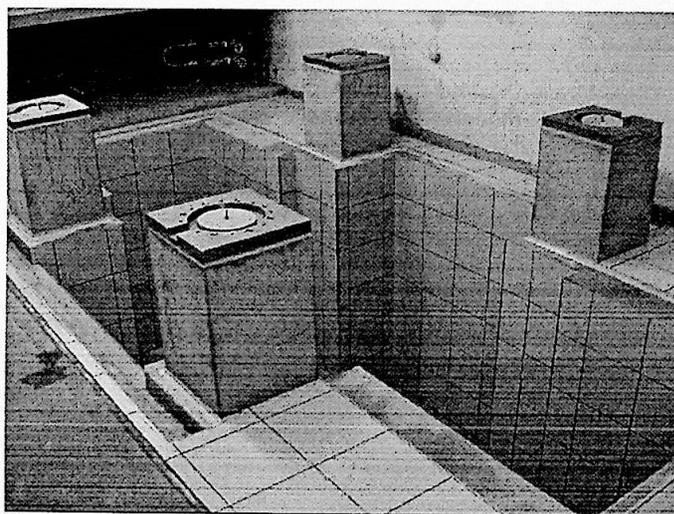


Figura 9 - Foto do fosso (maio 2001)

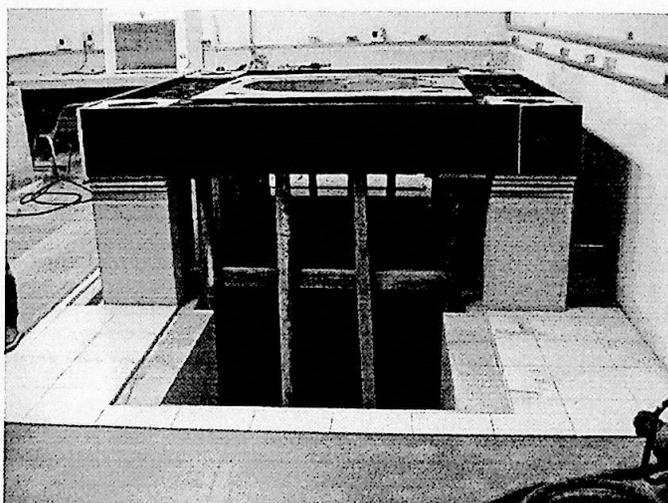


Figura 10 - Foto da construção da plataforma de concreto (junho 2001)

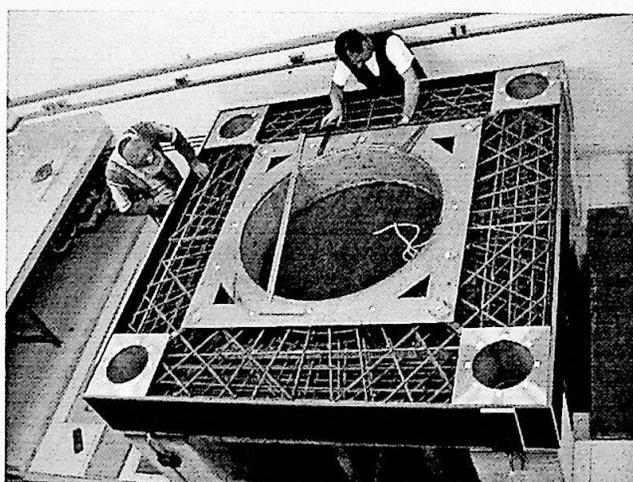


Figura 11 - Foto da construção da plataforma de concreto - estrutura de ferro (junho 2001)

Na realidade, na solução final adotada, optou-se por um máximo de flexibilidade. As dificuldades de manusear um vaso criogênico tão grande, e peças tão pesadas requeriam uma infra-estrutura capaz de movimentos variados sustentando pesos de várias toneladas. Definiu-se que seria necessária uma talha de, pelo menos, 3 toneladas, presa ao teto. Ainda aqui, optamos por uma máxima flexibilidade, e acabamos projetando e construindo uma ponte rolante com movimentos motorizados nas duas direções do plano horizontal. O carrinho principal da ponte é sustentado por dois trilhos presos às vigas horizontais de sustentação do prédio. É claro

que, antes da construção, um engenheiro da Prefeitura da Cidade Universitária foi consultado e aprovou o projeto. A talha utilizada é do tipo mais simples e comum (e barata), acionada por corrente, e foi motorizada nas oficinas do Laboratório. Aliás, toda a construção da ponte foi realizada no Laboratório e custou menos de R\$20.000,00. Um orçamento anterior feito para construção em uma companhia especializada, havia resultado em cerca de R\$90.000,00 (Figura 12).



Figura 12 - Fotos da ponte rolante (outubro 2001)

Os pistões e o sistema hidráulico foram construídos pela companhia Engehidro^x, sob encomenda e especificações nossas. Os pistões medem 60 mm de diâmetro e estão dispostos com grande precisão em cada um dos quatro cantos do fosso em forma de um quadrado com lado de 2 m (Figura

13). Esse sistema hidráulico pode erguer em 2 m a base de concreto de 4 toneladas mais o devar, a esfera, as massas e todo o restante do detector, com um peso aproximado de 6,5 toneladas.

O sistema hidráulico de elevação apresentou problemas. Apesar de várias modificações no circuito hidráulico, feitas pela própria companhia, nunca foi possível subir a plataforma mantendo-a completamente nivelada. A solução por nós implementada foi a de prover cada cilindro de um acionamento elétrico individual (Figura 14) tornando possível mover cada cilindro individualmente, e assim ajustar a horizontalidade da plataforma em qualquer ponto da subida ou descida. Verificamos ser possível controlar a altura de um pistão com precisão da ordem de milímetro. Assim, embora de forma mais demorada, o sistema permite subir e descer a plataforma em estágios, mantendo sempre um grau adequado de horizontalidade.

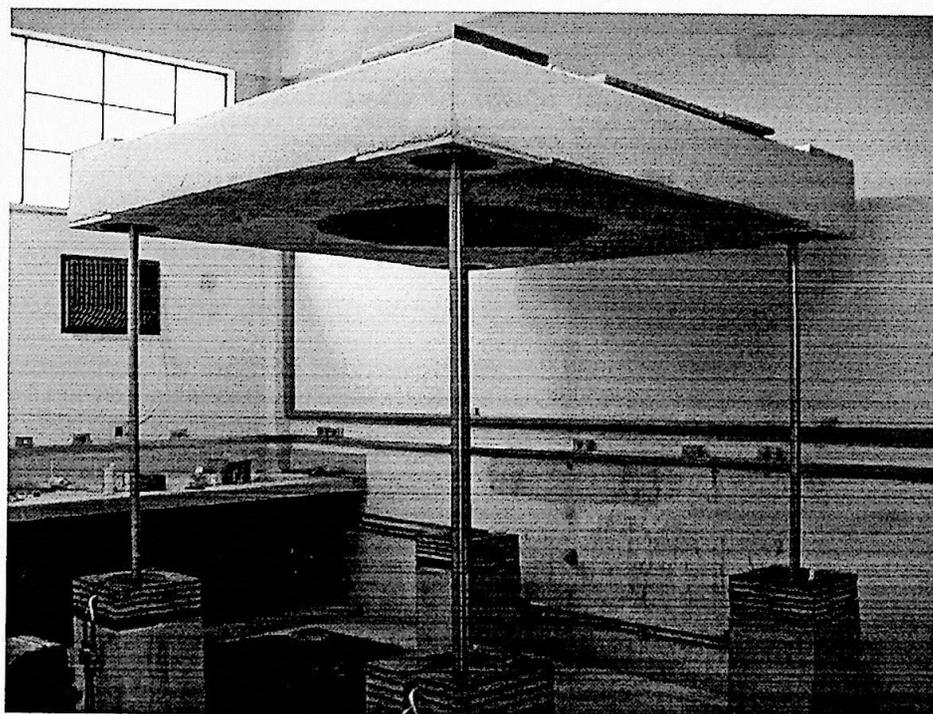


Figura 13 - Sistema hidráulico suspendendo a placa de concreto (junho 2001)

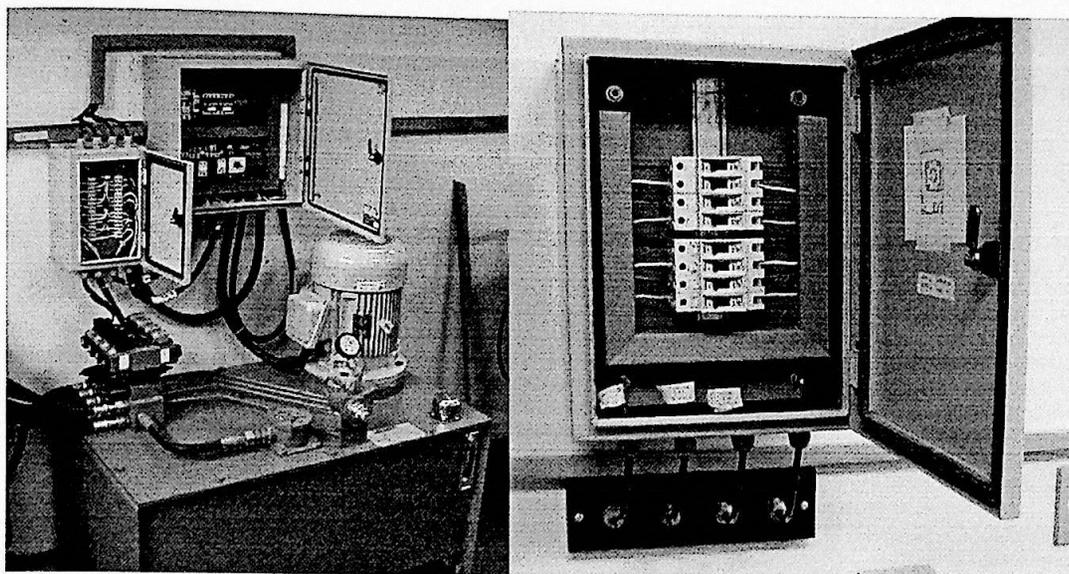


Figura 14 - Fotos do sistema de acionamento elétrico individual do sistema hidráulico (junho 2002)

II.3 - Sistemas de vácuo

Foram providos dois sistemas de vácuo independentes para os dois espaços de vácuo do "dewar". Foram compradas duas bombas mecânicas (Edwards E2M-30) ^{xi} com deslocamento de 30 m³/h. Para a câmara de vácuo externo foi utilizada uma bomba de difusão (CVC PVMS-100) com velocidade de vazão de 2500 litros/segundo, emprestada temporariamente pelo Laboratório de baixas temperaturas do IFUSP. Para a câmara de vácuo interno foi utilizada uma bomba turbomolecular (BOC Edwards) com velocidade de 210 l/s, também provisoriamente emprestada do Laboratório. Devido ao tamanho, a bomba de difusão foi acomodada no chão perto da plataforma do "dewar", e um tubo de bombeamento relativamente longo teve que ser construído (Figura 15). Nos primeiros testes de vácuo, tomou-se a precaução de fazer o vácuo inicialmente no espaço de isolamento, caso contrário poderia haver um colapso da câmara interna do "dewar". Testes posteriores mostraram que a câmara interna resiste ao vácuo interno, mesmo com pressão atmosférica no espaço de isolamento. Com os

sistemas descritos foi possível evacuar completamente os dois espaços do “dewar” com as bombas mecânicas em algumas horas, levando cerca de um dia para se conseguir pressões finais da ordem de 10^{-5} - 10^{-6} mbar.

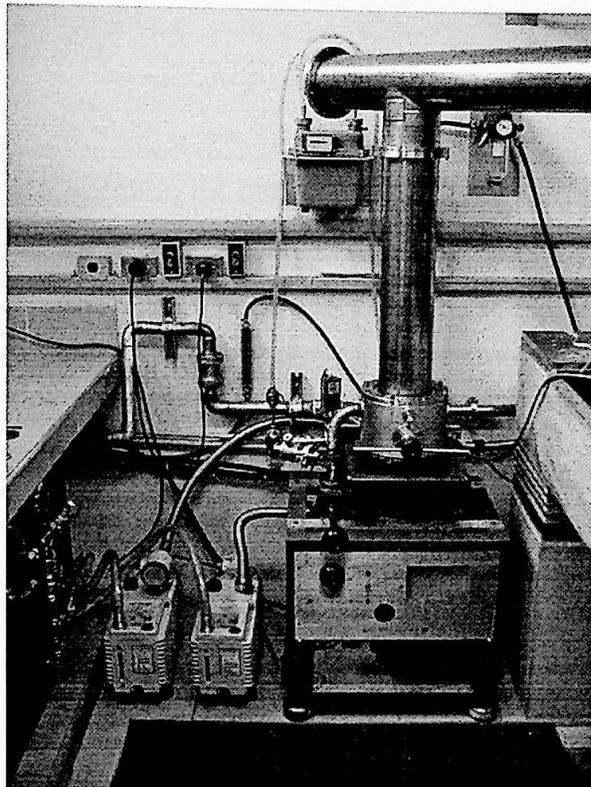


Figura 15 - Bombas do sistema de vácuo. É visto também parte do tubo de vácuo construído.

CAPÍTULO III

INSTALAÇÃO DO “DEWAR” E ESFERA

III.1 - “Dewar”

O “dewar” está apoiado na plataforma de concreto por três “patas” em forma de mão-francesa, onde estão colocados “vibra-stops” (Figura 16). Esses “vibra-stops”, além de proporcionarem um isolamento à vibração, permitem também nivelar o “dewar”.

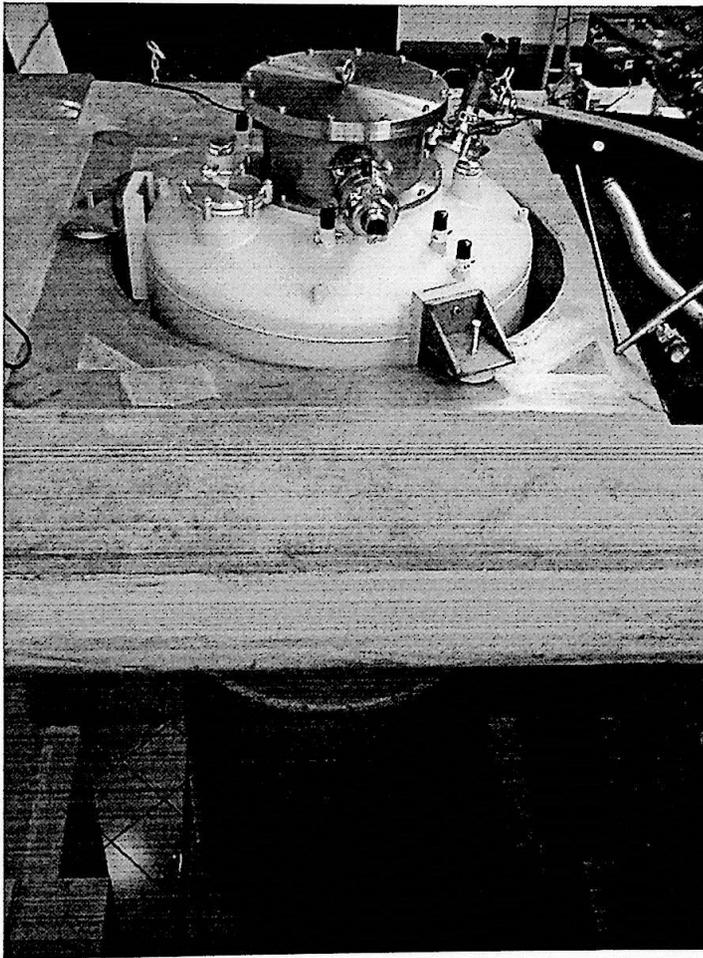


Figura 16 - “Dewar” apoiado na plataforma de concreto (julho 2002)

III. 2 - A esfera e as massas de filtragem

Uma pequena vibração induzida na esfera devido à passagem de uma onda gravitacional é facilmente mascarada não apenas pelo ruído térmico (fazendo-se necessário esfriar a esfera), mas também por ruídos acústicos e mecânicos. O ruído acústico vindo de todo o meio ambiente do laboratório é suprimido colocando-se a esfera em uma câmara de vácuo. Um desafio mais difícil é reduzir o ruído mecânico devido a vibrações do solo, causado por qualquer veículo em movimento ou uma pessoa andando perto da antena e, principalmente, pelo ruído sísmico. Para minimizar o problema, a suspensão da esfera incorpora um sistema de filtros mecânicos constituídos basicamente por uma sucessão de conjuntos massas-mola que se constituem em um filtro passa-baixa. O filtro efetivamente construído foi projetado tomando como base o estudo desenvolvido por J. L. Melo ^{xii} em sua tese de doutoramento.

III.2.1 - Descrição

A esfera foi fundida e usinada pela ITALBRONZE (Brasil) ^{xiii} (Figuras 17 e 18). A escolha da composição da liga (Cobre com 6% de Alumínio) vem de um estudo realizado pelo grupo holandês que testou um grande número de ligas objetivando maximizar o fator de qualidade mecânica ^{xiv}. Este fator reflete o tempo de decaimento de uma vibração mecânica, que se pretende ser o maior possível. As amostras estudadas, em forma de pequenas esferas, foram resfriadas até 20 mK, e dentre as ligas de cobre, a escolhida apresentou os melhores resultados.

Para suportar a esfera, foi feito um furo central de 35 mm de diâmetro que vaza a esfera verticalmente. No meio deste furo (centro da esfera) há um cone com medidas menores do que do furo. Introduce-se, pela parte inferior da esfera, um bastão de cobre com 25 mm de diâmetro e 54,5 cm de comprimento com um cone igual ao de dentro da esfera em uma

extremidade e com uma rosca (de 27 mm) na outra extremidade. Este é o único contato da esfera com o resto da suspensão. O material do bastão (Cobre) foi escolhido por ser um bom condutor de calor.

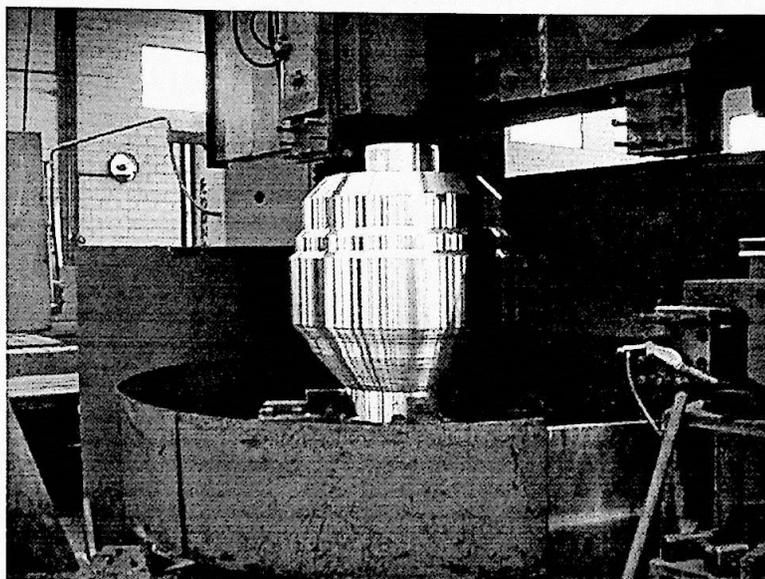


Figura 17 - Foto da usinagem da esfera - Italbronze (dezembro 2000)

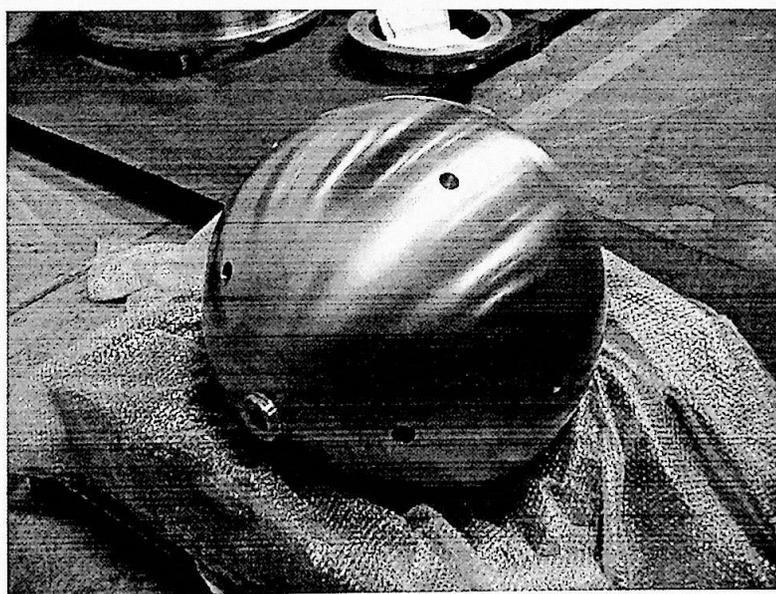


Figura 18 - Foto da chegada da esfera no laboratório (outubro 2002)

O isolamento vibracional é composto de cinco massas de 120 kg cada, sendo duas de Cobre e três de CuAl6% (Figura 19). Cada uma das massas é conectada uma a outra por três barras em formato de "C" (Figura 20) que funcionam como molas extremamente rígidas. São 12 "C's", três de Cobre e nove de Cobre-alumínio (~2 kg cada). O último estágio da suspensão (i.e. o último sistema massa-mola de Cobre) é provido de um cone encaixado na massa, no qual é rosqueada a haste que suspende a esfera. Na massa superior (de CuAl6%) há também um cone onde é encaixada, através de uma peça com rosca, uma barra de aço inox que suspende o conjunto. No topo, acima do "dewar", a coluna massas-esfera é presa a um cavalete externo apoiado na plataforma de concreto através de uma mola pneumática.

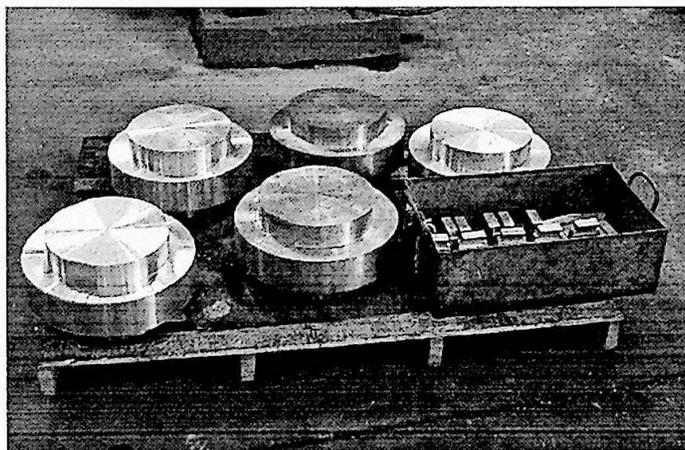
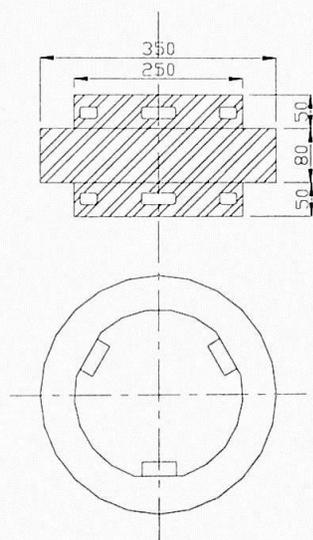


Figura 19 - Massas (isolante vibracional) (medidas em milímetros)

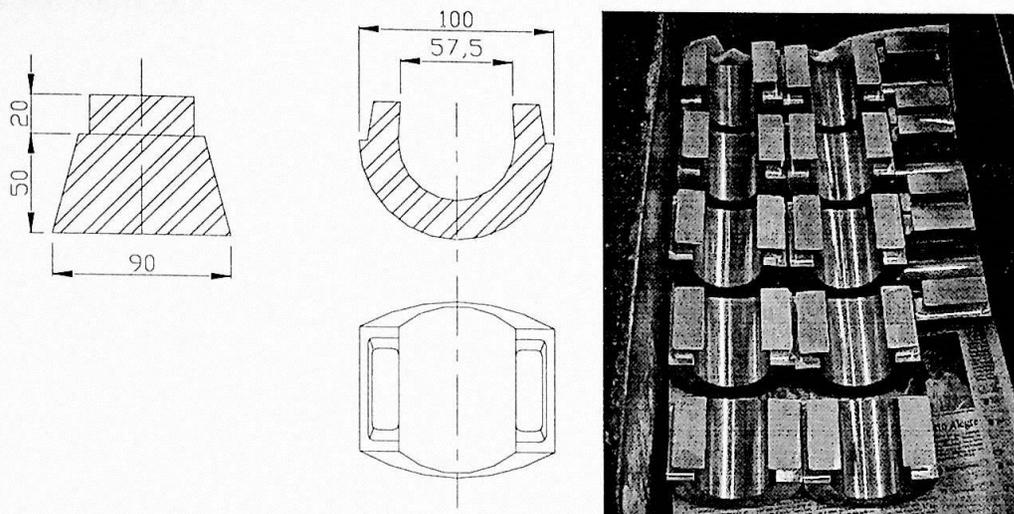


Figura 20 - Molas "C's" (medidas em milímetros)

III.2.2 - A suspensão

O sistema de isolamento vibracional, constituído pela sucessão de massa-mola, funciona como um filtro passa-baixa, e foi projetado teoricamente por J. L. Mello para produzir uma atenuação de 300 dB em 3200 Hz (Figura 21).

A suspensão da coluna massas-esfera através de uma mola pneumática atende a três finalidades. Em primeiro lugar ela atua como um filtro passa-baixa atenuando significativamente freqüências acima de 10-20 Hz. Embora a freqüência de trabalho da antena esteja próxima de 3 kHz, é sabido que mesmo solicitações de freqüências muito mais baixas podem excitar modos de vibração de freqüência bem mais alta. Este efeito é conhecido como "efeito violino", onde a solicitação do arco (baixa freqüência) excita modos de vibração da corda, de freqüência muito mais alta. Em segundo lugar, a mola pneumática serve para amortecer pequenos solavancos causados pelo sistema hidráulico durante a movimentação da plataforma. Finalmente, serve também para ajustar a posição da esfera dentro do "dewar", uma vez que inflando e desinflando a mola é possível

alterar a posição da coluna em até 10 cm. A mola utilizada foi uma Firestone Airstroke Airmount 113 com capacidade de 4 ton.

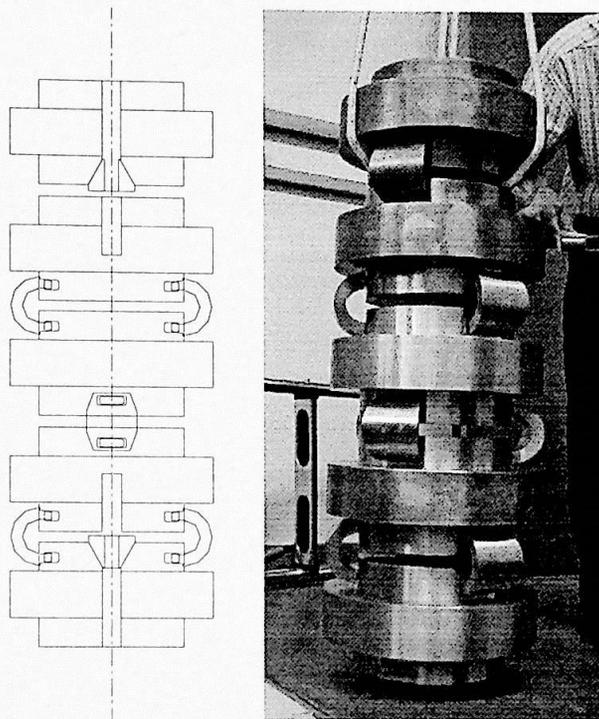


Figura 21 - Sistema de isolamento vibracional (desenho e foto). Observação: nesta foto o sistema de isolamento está montado de cabeça para baixo.

Devido ao seu tamanho e construção, a mola pneumática precisa ficar fora do vaso, e fora do espaço de vácuo da esfera. Foi necessário, então, desenhar e construir um sistema para a fixação do suporte da esfera e da mola (Figuras 22 e 23) composto de uma série de flanges de aço inox de 510 mm de diâmetro e 30 mm de espessura. Como a mola admite movimentos angulares com arcos de até 30 graus, a suspensão foi provida de guias para evitar esses movimentos.

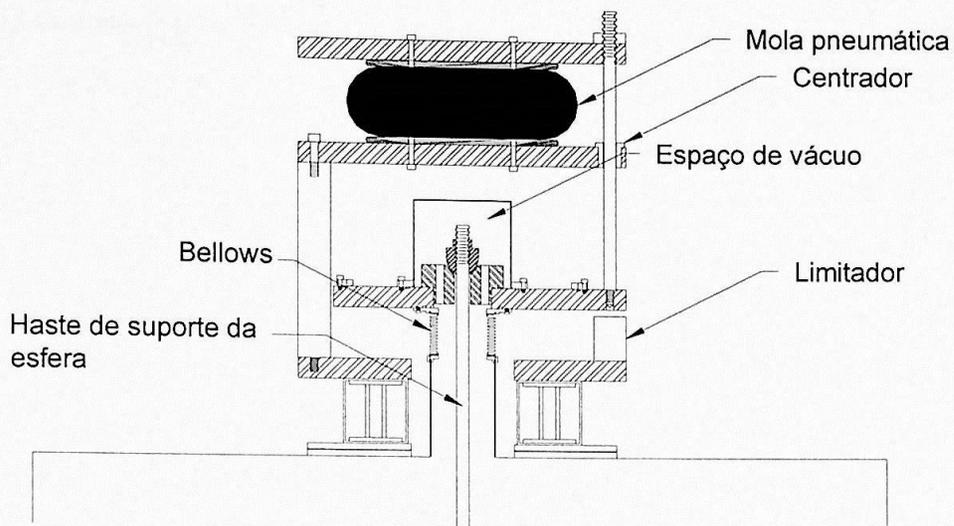


Figura 22 - Sistema pneumático - desenho

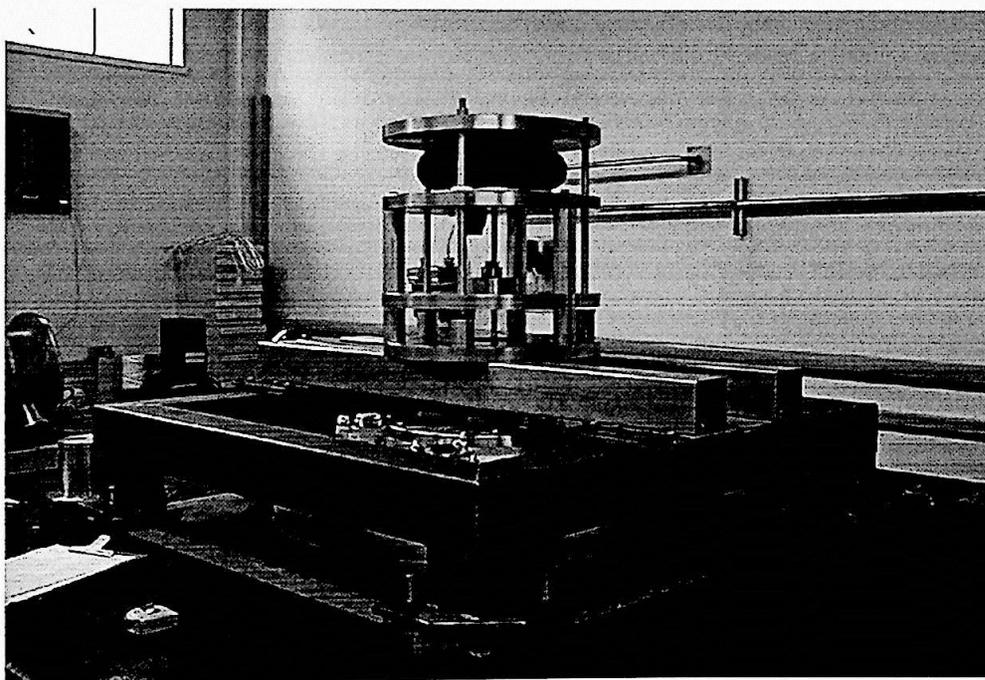


Figura 23 - Sistema pneumático - foto (dezembro 2002)

Para não apoiar diretamente o conjunto massas-esfera (cerca de 2 toneladas) diretamente sobre "dewar" foi construído um cavalete de metal,

apoiado sobre a plataforma por "vibra-stops" (Figura 23). Esse suporte foi construído com um perfilado de ferro quadrado de lado 12 cm e parede de 4 mm de espessura formando um quadrado de 1,32 metros de lado e 22,5 cm de altura, mais 4 cm dos isolantes de vibração. Sobre este suporte, cruzando-o, foram colocadas duas barras de aço inox, de perfil quadrado de 10 cm de lado e 3 mm de espessura, reforçadas com barras, também de aço inox, em forma de "duplo I" com $\frac{1}{4}$ " de espessura. A conexão entre o sistema que sustenta as massas, e conseqüentemente a esfera, e o dewar (Figura 24) é feita por um "bellows" (tipo de sanfona que permite elongações e suporta vácuo interno). O "bellows" utilizado é feito do material "tombac" (uma liga de cobre extremamente macia) emprestado do laboratório.

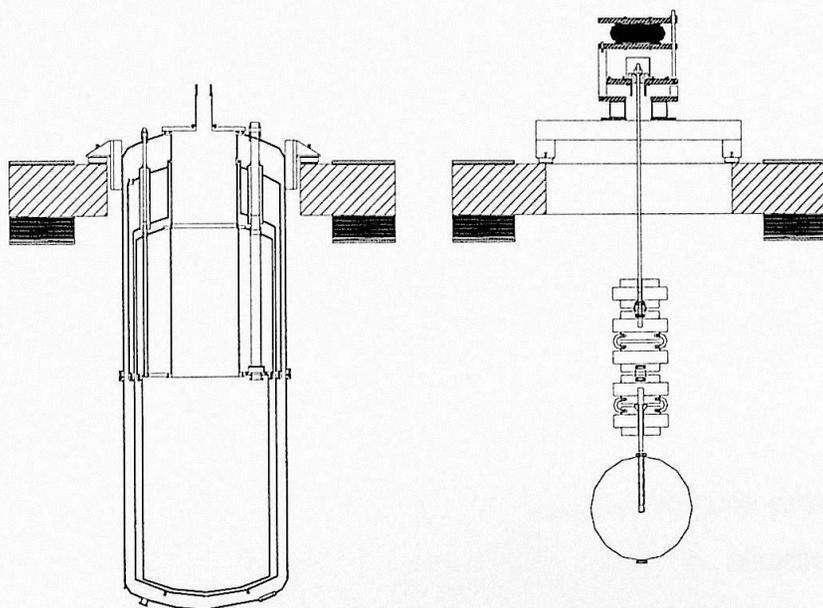


Figura 24 - Suporte do "dewar" e sistema de isolamento da esfera

III.2.3 - A haste superior de sustentação

A haste superior de sustentação necessita de um projeto cuidadoso, pois deve ser forte o suficiente para sustentar os 1.850 kg do conjunto massas-esfera e ao mesmo tempo precisa prover um excelente isolamento

térmico, pois todo o calor conduzido termina na esfera, aquecendo-a. Em princípio estes dois requisitos se opõem, e uma solução de compromisso é necessária.

O material mais comumente utilizado em estruturas criogênicas é o aço inoxidável austenítico 304, por sua capacidade bastante testada de suportar ciclos térmicos sem degradação de suas propriedades mecânicas e térmicas. A resistência máxima à tração deste material é de 60 kg/mm^2 ^{xv}, e o dimensionamento da barra para sustentação dos 1.850 kg do conjunto massas-esfera depende de se escolher um fator de segurança razoável. Assumindo uma carga de 30 kg/mm^2 (fator de segurança 2), seriam necessários 62 mm^2 , o que corresponde a uma barra com cerca de 9 mm de diâmetro. Utilizando dados de condutividade térmica do aço 304^{xvi} pode-se estimar uma entrada de calor, entre temperatura ambiente e 4,2 K, de 0,1 W. Se todo este calor terminar na esfera, esta aquecerá até uma temperatura em que a radiação emitida corresponda a esta potência. Tomando o "dewar" como uma cavidade absorvedora perfeita, esta temperatura seria dada por $dQ/dt = \sigma A (T^4 - 4,2^4)$ com $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, e A é a área irradiante. Ou seja, $T \cong 36 \text{ K}$.

Em uma primeira etapa pretende-se operar a antena próxima de 4,2 K. O exposto acima demonstra que, para isso, é necessário cortar drasticamente o calor que chega à esfera, ou seja, o calor conduzido pela haste terá que ser desviado para os reservatórios de nitrogênio e hélio líquido. Na realidade, para que a esfera estabilize perto de 5 K, por exemplo, a entrada de calor teria que ser menor que $3 \times 10^{-5} \text{ W}$, ou seja, da ordem de 10^{-4} do calor mínimo de condução por uma haste de aço 304. Isto requereria um aterramento térmico quase perfeito da haste o que, com certeza, é difícil de ser conseguido.

Para o funcionamento da antena abaixo de 4,2 K, parte do calor de condução poderá ser jogado no estágio de refrigeração a 1,4 K (hélio

bombeado). Aqui, uma entrada de calor de 0,2 W corresponderia a um consumo da ordem de 0,2 litros de hélio líquido por hora ^{xvi}, e seria razoável que a maior parte deste consumo fosse no hélio a 4,2 K. De qualquer forma, fica claro que a haste de suspensão, bem como os seus aterramentos térmicos, necessitam um projeto cuidadoso para desempenhar satisfatoriamente sua função.

Para os primeiros testes de resfriamento, como não é necessário manter a esfera fria continuamente, resolvemos adotar uma solução, antes de mais nada, mecanicamente sadia, ou seja, utilizamos uma haste de aço 304, mas com um fator de segurança muito maior. A necessidade de mover o conjunto por meio dos acionadores hidráulicos, para poder fechar o "dewar", adiciona uma incerteza grande quanto aos esforços solicitados à suspensão. Além disso, como as conseqüências de um rompimento da haste seriam desastrosas, resolvemos inicialmente utilizar uma haste de 19 mm de diâmetro, um fator de segurança para a resistência à tração de cerca de 8. Para minimizar um pouco os efeitos da condução, projetamos duas ancoragens térmicas, que serão descritas no capítulo seguinte.

CAPÍTULO IV

RESFRIAMENTO

IV.1 - O problema

Resfriar cerca de 2000 kg de Cobre a temperaturas criogênicas e mantê-los nestas temperaturas com um mínimo de perdas não é exatamente um problema trivial. Utilizando dados de S. B. Jacobs ^{xvii}, estimamos que é necessário retirar cerca de 3×10^9 Joules de entalpia. Isto equivale a toda a entalpia de aproximadamente 1.600 litros de hélio líquido. Poderíamos, é claro, pré-resfriar com nitrogênio líquido até cerca de 80 K e depois utilizar o hélio. O calor a ser retirado, neste caso, corresponderia a toda a entalpia de cerca de 600 litros de nitrogênio e 350 litros de hélio. O problema é como utilizar o máximo possível a entalpia disponível no refrigerante.

A idéia mais simples, e utilizada em antenas existentes, é encher o "dewar" com os líquidos criogênicos, nos espaços apropriados e manter no espaço da antena uma pressão de gás hélio para prover o resfriamento, que ocorre principalmente por convecção. Há dois problemas neste caso: - em primeiro lugar o fato de que é utilizado apenas o calor latente do líquido criogênico; - em segundo, o tempo necessário para o resfriamento. Para resfriar até ~ 80 K seriam necessários cerca de 1000 litros de nitrogênio, e de 80 K a 5 K, cerca de 4.500 litros de hélio. Além disso, a julgar pela experiência das antenas maiores, o tempo estimado para o resfriamento em nosso caso seria perto de um mês.

Os dados acima mostram que, pelo menos para o hélio, é absolutamente necessária a utilização da entalpia contida no gás (aquecimento desde o ponto de ebulição até a temperatura ambiente). Para

isso, o líquido tem que ser transferido até o vaso que contém a antena para aí ser colocado em contato direto com a massa a ser resfriada.

Uma experiência interessante foi realizada pelo grupo holandês ^{xviii} que optou por resfriar a esfera ("dewar" semelhante ao nosso) utilizando, entre 300 K e 100 K, um circuito fechado de gás hélio, resfriado a nitrogênio líquido. O gás é movimentado por duas bombas "roots" (250 e 1200 m³/hora) e passa por uma serpentina imersa em nitrogênio líquido. Após a serpentina (na temperatura do nitrogênio) o gás é conduzido para dentro do "dewar" por um tubo isolado a vácuo, e na câmara da antena é levado por outro tubo até debaixo da esfera, soprando diretamente sob ela com um fluxo de 0,4 mol/s. Em 1,5 dias a esfera atingiu 100 K, com um consumo de 2000 litros de nitrogênio líquido. Entre 100 K e 80 K o resfriamento se deu exclusivamente por gás de troca, e abaixo de 80 K despejando hélio líquido diretamente abaixo da esfera. O consumo de hélio foi de 600 litros em 15 horas.

A experiência do grupo de Leiden mostrou que a refrigeração por fluxo forçado de gás é bastante rápida. A eficiência de utilização do conteúdo entálpico do refrigerante esteve perto de 0,5, tanto com o nitrogênio como com o hélio, o que é bastante razoável. No nosso caso, entretanto, a montagem de um circuito fechado de hélio, com a capacidade de fluxo requerida, não era viável. Não dispúnhamos, por exemplo, das bombas de vácuo necessárias para a movimentação do gás. Assim, optamos por um resfriamento por fluxo forçado de hélio desde 300 K, a partir do hélio líquido. Em princípio, contando apenas com o resfriamento proveniente do hélio, seriam necessários, no mínimo, 1600 litros de hélio líquido. Mantendo cheio, porém, o reservatório de nitrogênio do "dewar" durante o resfriamento, com certeza parte do calor acabaria, por condução, evaporando nitrogênio e economizando hélio. Como veremos mais adiante, de fato foi isto que aconteceu. A Figura 25 mostra o posicionamento do tubo de transferência de hélio no "dewar".

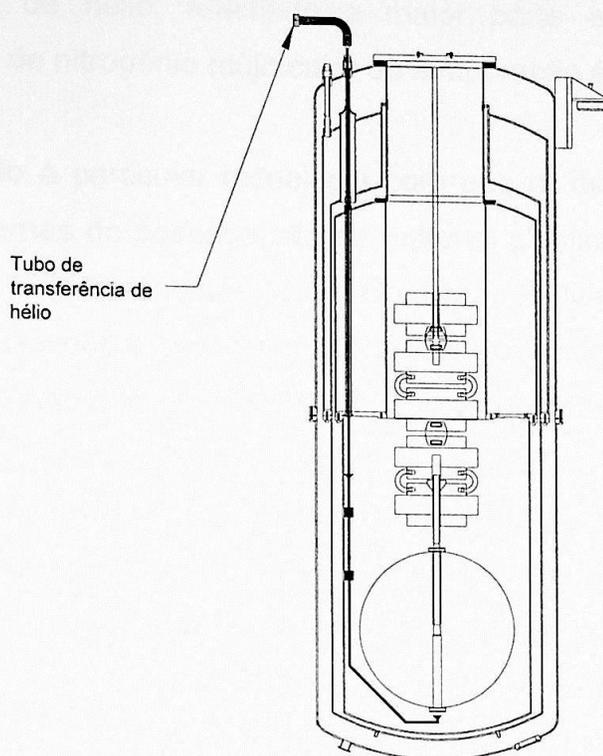


Figura 25 - Tubo de transferência de hélio, diretamente abaixo da esfera

IV.2 - Projeto térmico da suspensão e placas de ancoragem de N_2 (80K) e He (4,2K)

Para acomodar a coluna de massas de filtragem mecânica, o "dewar" foi projetado com uma abertura de 40 cm de diâmetro desde a flange superior (300 K) até o espaço da esfera (4,2 K). Sem dúvida, um pescoço dessa dimensão é um duto importante para entrada de calor. A radiação vinda da temperatura ambiente, por exemplo, representa uma entrada potencial de calor de cerca de 60 W. Este número deve ser comparado com a evaporação mínima teórica do "dewar", fornecida pelo fabricante, que é cerca de 0,6 litros de hélio líquido por hora, e que equivale a uma entrada de calor menor que 0,5 W. É claro que é necessário projetar um dispositivo a ser instalado no pescoço, que não permita que este calor atinja o

reservatório de hélio, refletindo a maior parte e jogando o resto no reservatório de nitrogênio (cujo calor de evaporação é muito maior).

Devido à particular tecnologia com que o "dewar" foi construído, as paredes internas do pescoço são de material plástico dificultando o contato térmico com os reservatórios de líquido. Para resolver o problema, o tubo de plástico do pescoço é interrompido por dois anéis metálicos, um mais acima, em contato direto com as paredes do reservatório de nitrogênio, e outro mais abaixo, em contato com as paredes do reservatório de hélio. A finalidade destes anéis é proporcionar uma ancoragem térmica com aqueles reservatórios. O anel de cima, na temperatura do nitrogênio, é ligeiramente cônico, com o diâmetro inferior um pouco menor que o diâmetro superior.

Com a finalidade de interceptar o calor que desce pelo duto central, foram projetadas e construídas duas flanges ajustadas aos anéis metálicos (Figura 26). A flange superior, de alumínio, que está em contato térmico com o tanque de nitrogênio (77 Kelvin), tem as bordas cônicas (3 graus de inclinação) para se ajustarem perfeitamente ao anel (Figura 27). A flange inferior, de cobre, fica a 600 mm da tampa do "dewar", e encontra-se em contato térmico com o tanque de hélio (4 Kelvin). A flange tem 7mm de espessura e 390 mm de diâmetro e têm uma terminação externa de 40 lâminas de cobre de 2 mm de espessura, moldadas de forma a funcionarem como molas que se comprimem contra o anel, para suportarem o peso do disco e para fazerem o contato térmico (Figura 28). Estas flanges têm uma abertura central para a haste de sustentação, e aberturas escamoteadas (cobertas por flanges menores) para permitir o rápido bombeamento do espaço da esfera. A idéia é estabelecer duas superfícies a temperaturas próximas do nitrogênio líquido e do hélio líquido, desviando o calor para os reservatórios e reduzindo a entrada de calor para o espaço da esfera. Presos à flange superior foram montados vários refletores de alumínio para interceptar e reduzir a radiação.

Como já mencionado, optou-se, para um primeiro resfriamento, por uma haste de sustentação bastante robusta mecanicamente, de aço 304 com 19 mm de diâmetro, o que representa uma entrada de calor direta por condução de cerca de 0,6 W. Numa tentativa de reduzir esta entrada de calor, a haste foi ligada às flanges por meio de anéis de cobre e tiras de cobre fino bastante flexíveis (Figura 29). A idéia é desviar parte do calor que desce pela haste, mas ao mesmo tempo minimizar o acoplamento mecânico capaz de transmitir vibrações do "dewar" para a haste. Para facilitar a montagem do conjunto, o acoplamento à flange superior foi feito acima dos refletores, com os anéis ligados à flange por um tubo de cobre.

Durante os primeiros testes de montagem, verificou-se que o anel superior do pescoço do "dewar" estava ligeiramente ovalizado (provavelmente como consequência do processo de montagem do "dewar") não permitindo um encaixe perfeito da flange de ancoragem. Para remediar a situação, durante a montagem foi colocada uma camada de Índio entre o anel e a flange preenchendo os espaços vazios para melhor contato térmico.

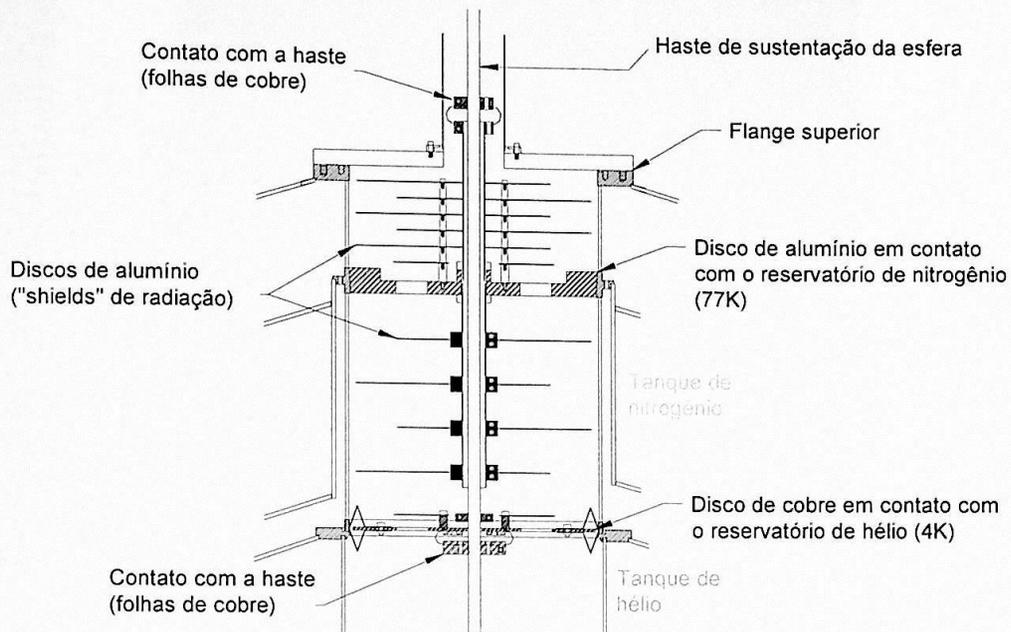


Figura 26 - Desenho das placas de ancoragem térmica no pescoço do "dewar"



Figura 27 - Instalação da flange de alumínio em contato com o reservatório de nitrogênio (77K) e dos "shields" de radiação inferiores

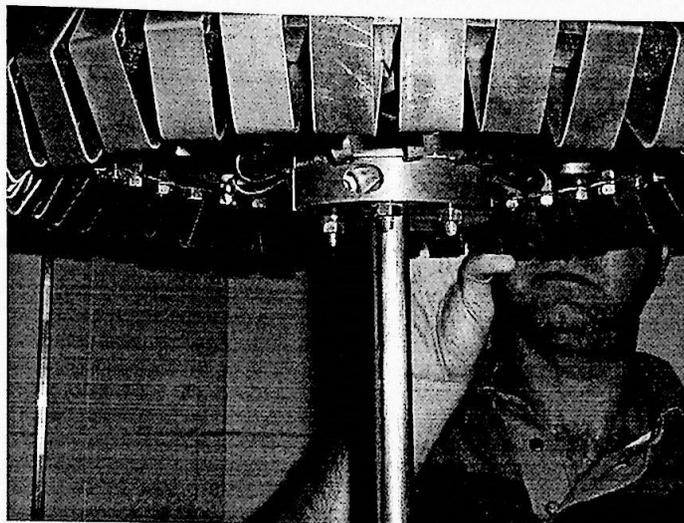


Figura 28 - Instalação da flange de cobre em contato com o reservatório de hélio (4K)

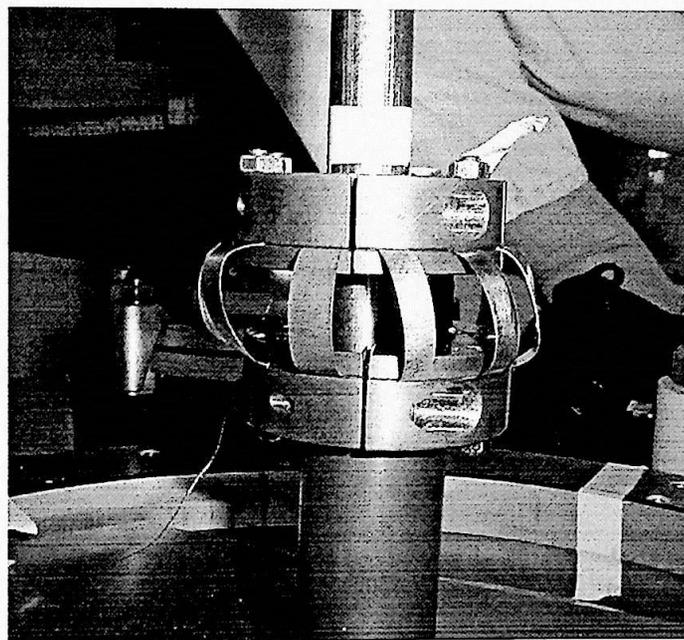


Figura 29 - Detalhe das folhas de cobre - Ancoragem térmica entre a haste e as placas.

IV.3 - Termometria

Para a primeira corrida criogênica, foram espalhados oito termoresistores por todo o interior do "dewar", sendo seis resistores de platina (Pt1000) e dois resistores de RuO_2 ($2 \text{ K}\Omega$). As resistências ôhmicas dos termômetros foram "checadas" inicialmente em temperatura ambiente, de nitrogênio líquido e de hélio líquido. Os resistores de platina apresentam uma excelente sensibilidade entre a temperatura ambiente e cerca de 40 K, perdendo depois gradativamente a sensibilidade e sendo praticamente inúteis abaixo de 10 K. Os termômetros de RuO_2 , por sua vez têm excelente sensibilidade abaixo de 4,2 K e razoável entre 4,2 e 10 K. Os termômetros de platina têm uma escala muito bem estabelecida e uma reprodutibilidade bastante razoável, compatível com a precisão necessária no experimento. Já para os termômetros de RuO_2 é necessária uma calibração, que foi feita entre 4,2 K e 2 K, em função da pressão de vapor do hélio, quando do resfriamento da esfera. Os gráficos de calibração dos dois tipos de termômetros encontram-se no item IV.4.

Os termômetros foram dispostos como mostra a figura abaixo (Figura 30). Para instalar cada sensor, foi aplicada sobre a superfície metálica primeiro uma fita adesiva de "mylar" com 0,025 mm de espessura, para evitar contato elétrico entre a fiação e as peças de metal, e sobre ela o resistor foi colado com cola instantânea. Para medir a temperatura da esfera, os sensores foram presos à sua haste (de cobre), imediatamente acima do cone de sustentação (Figura 31).

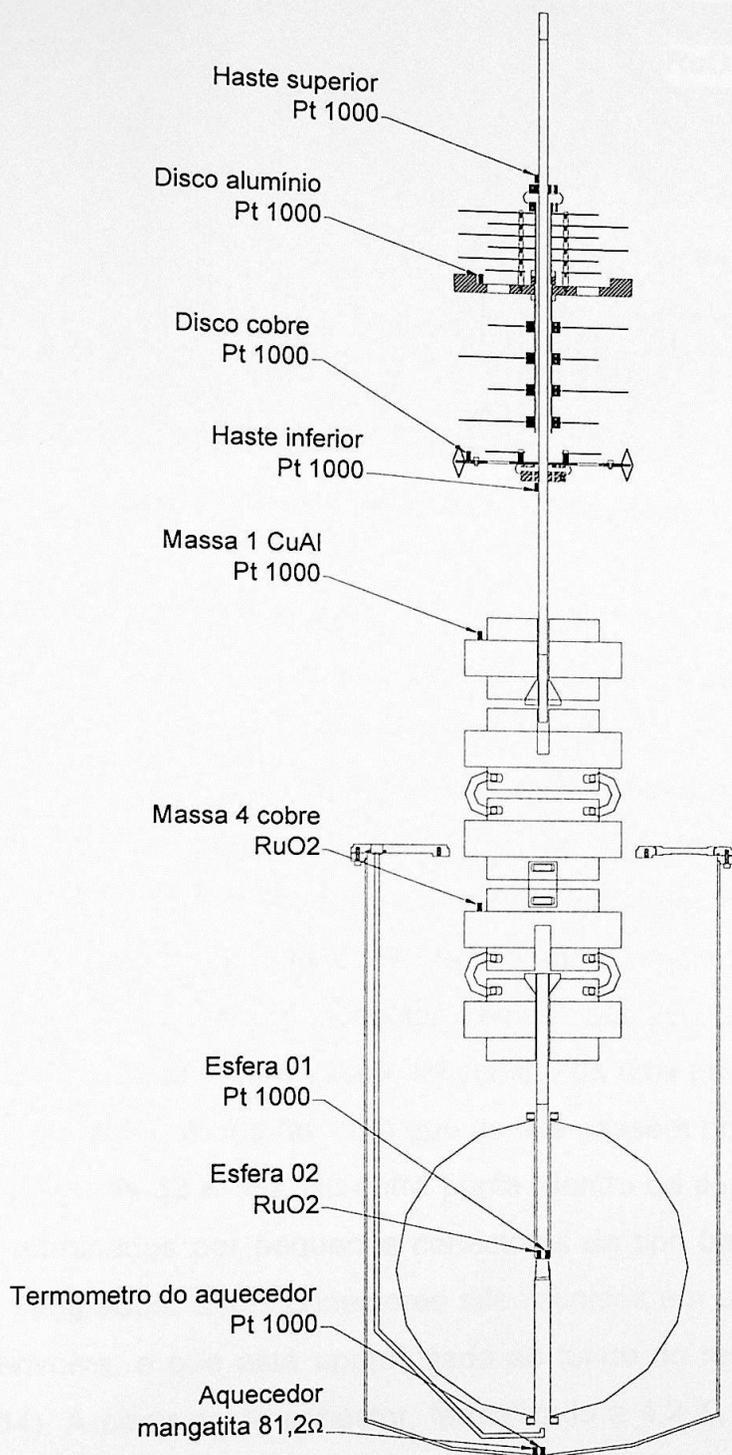


Figura 30 - Disposição dos termôresistores

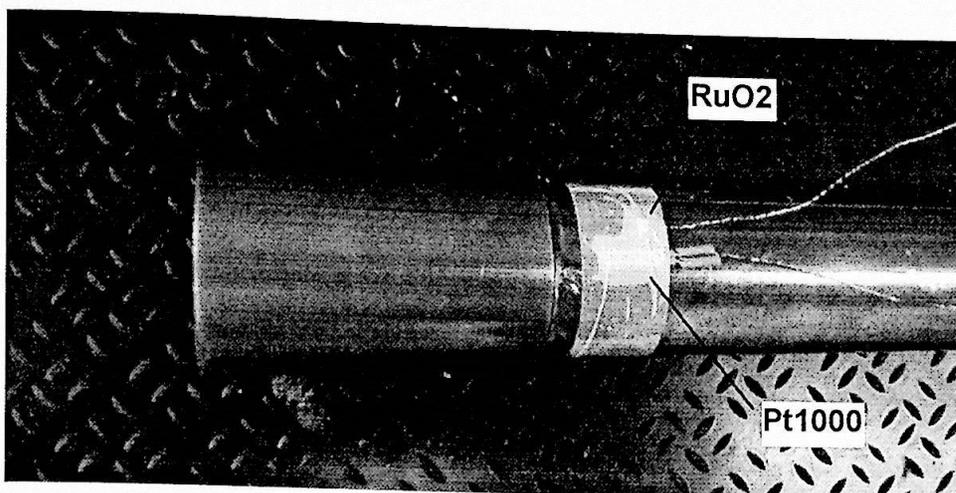


Figura 31 - Termômeresistores colados na haste da esfera

Para as conexões entre os terminais dos termômetros e os conectores externos, ou seja, com uma das pontas a 4 K e a outra a 300 K, foram utilizados 10 pares de fio de cobre trançado AWG 38 ($\varnothing = 0,09\text{mm}$; seção = $0,006\text{ mm}^2$). Os 10 pares são referentes aos 8 termoresistores instalados mais um aquecedor feito de fio de mangatita que foi preso ao fundo do "shield" de 4 K, para eventualmente retirarmos hélio líquido que se acumula no fundo do "shield". À temperatura ambiente, os fios foram conectados através de um conector Lemo EGG 2B. Como este tipo de conector não é próprio para vácuo, foi construída uma peça de alumínio que suporta o conector, e que faz com que os fios passem por uma vedação de "stycast" (Figuras 32 e 33). Na outra ponta, dentro do espaço da esfera, os fios são terminados por pequenos conectores do tipo barra de soquete de circuitos integrados. Estes conectores são reunidos em uma peça de cobre que os envolve, e que está aparafusada ao fundo do reservatório de hélio (Figura 34). A partir deste conector, termalizado a 4,2 K, faz-se as ligações para os vários termômetros. Para melhor assegurar a termalização do conector, os fios que chegam, vindos dos termômetros, são presos com fita adesiva ao fundo do reservatório de hélio, em um comprimento de cerca de um metro.

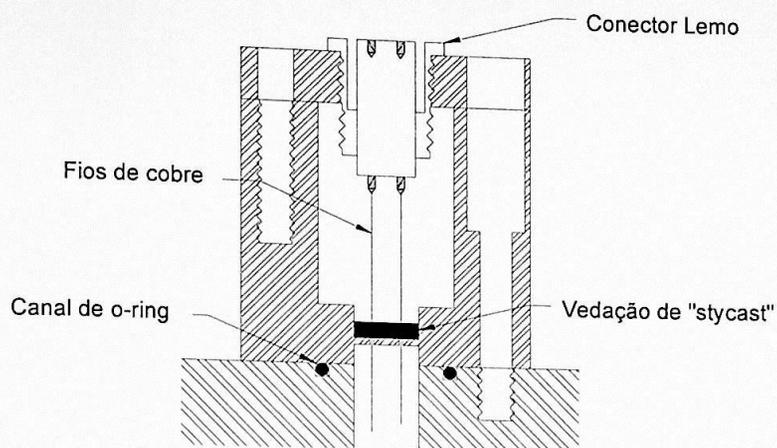


Figura 32 - Desenho da peça de alumínio com vedação de "stycast" para conectores Lemo.

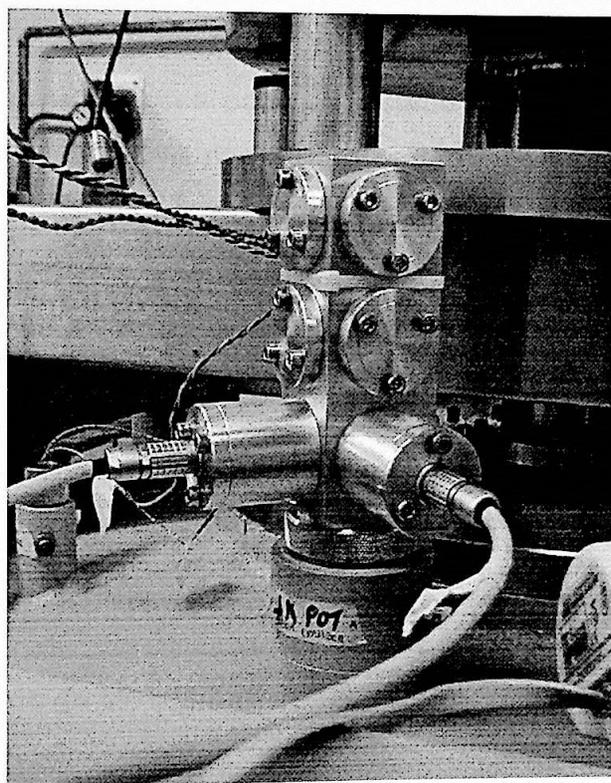


Figura 33 - Peça de alumínio que pode suportar até 6 conectores Lemo, instalada em um dos "ports" do "dewar".

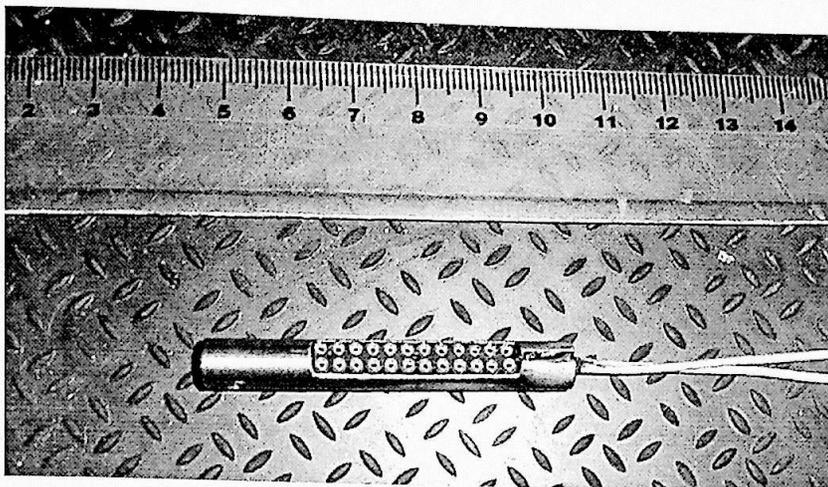


Figura 34 - Peça de cobre que reúne os conectores dos termômetros e que está aparafusada ao fundo do reservatório de hélio.

O calor total conduzido pelos fios de cobre entre 300 e 4,2 K é de aproximadamente $1,3 \times 10^{-2}$ Watts^{xvi}, o que corresponde a uma evaporação de hélio na taxa de 0,02 litros por hora. Como a evaporação esperada do "dewar" é em torno de 2 litros por hora, a entrada de calor devido aos fios é aceitável.

A fim de inibir a radiação térmica, foram dispostos, ao longo do tubo de conexão da fiação dos termômetros, dez discos de alumínio de 46 mm de diâmetro e 1 mm de espessura.

IV.4 - Calibração dos termômetros

Termômetros de platina são termômetros bastante reprodutivos, e por isso têm uma escala própria, muito utilizada industrialmente. O padrão industrial mais usado é o Pt100, um resistor de platina com 100 Ω no ponto do gelo. Um teste inicial à temperatura ambiente, do nitrogênio e do hélio, mostrou que era possível utilizar os termômetros, calibrados por uma escala padrão, com erro menor que 1 K, até temperaturas da ordem de 10 K. Foi utilizada, então, uma escala padrão existente no laboratório, vindo da companhia Lakeshore (EUA)^{xix}, obtida originalmente em função de padrões

do laboratório de metrologia americano (NIST). A Figura 35 mostra a escala em gráfico.

Os termômetros de RuO_2 precisaram ser calibrados em função da pressão de vapor de hélio, entre 4,2 K e 1,95 K. Isto foi feito admitindo-se gás de troca no espaço da esfera e bombeando o reservatório de hélio líquido. Mais adiante, no item IV.5, descreveremos a operação. A Figura 36 mostra os pontos obtidos. A resistência do termômetro obedece a uma lei bem definida, o que nos permitiu extrapolar os valores para temperaturas até 10 K, com uma razoável confiança de que a precisão é ainda melhor que 1 K.

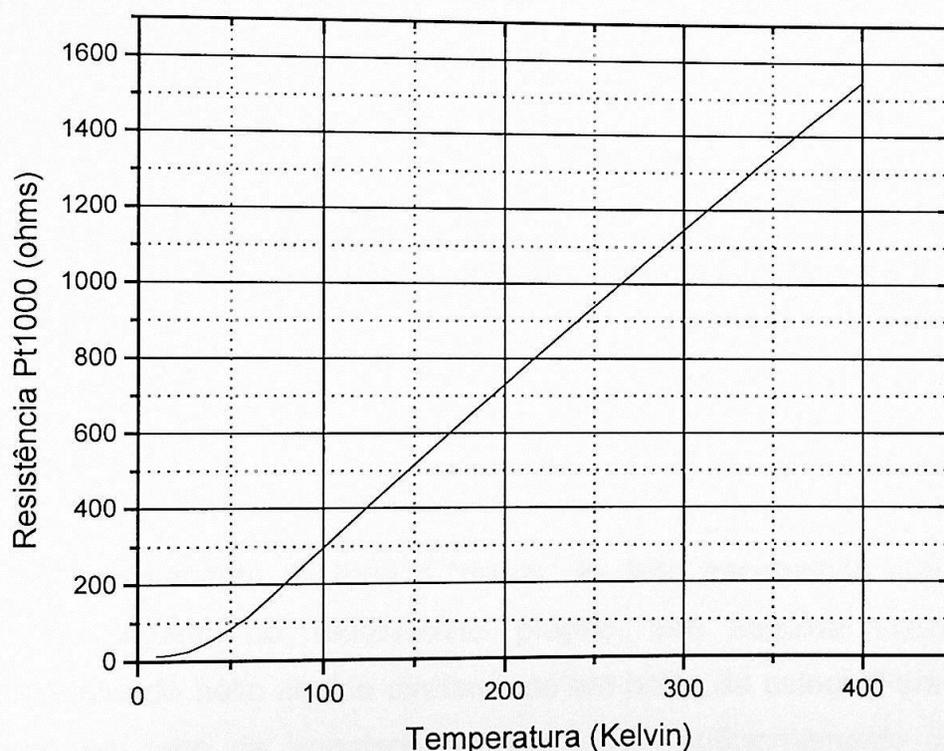


Figura 35 - Curva de calibração do termoresistor Pt1000 em função da temperatura

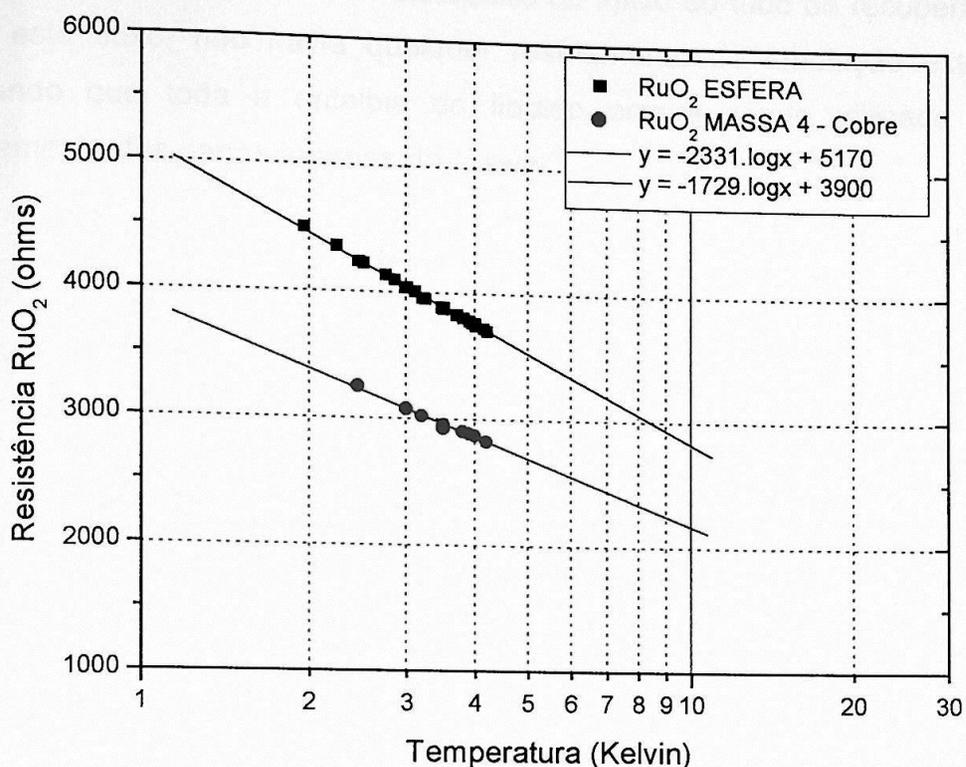


Figura 36 - Curva de calibração dos dois termômetros de RuO₂ (2 K Ω) dispostos, um no centro da esfera e outro na massa 4 (primeira massa de CuAl6%), entre 2 K e 4,2 K.

IV.5 - Resfriamento

O resfriamento de todo o "dewar" foi feito transferindo inicialmente nitrogênio líquido no reservatório próprio. Em seguida iniciou-se a transferência de hélio líquido diretamente em baixo da esfera. Para isso foi utilizado um tubo de transferência modificado, suficientemente comprido para que a parte isolada entrasse dentro do tubo guia (Figura 25) até, pelo menos, a metade deste. O hélio líquido, em contato com as paredes quentes da esfera e do "dewar", se expande, saindo do vaso através de uma serpentina instalada pelo fabricante dentro do recipiente de hélio (Figura 37), e que conecta o espaço da esfera com o topo do "dewar". O fluxo de gás hélio pôde ser controlado por uma válvula instalada no próprio reservatório externo (de 500 litros), e foi mantido em cerca de 120 litros de gás por

minuto, medido por rotômetros instalados no início do tubo de recuperação. Com este fluxo, não havia qualquer resfriamento da tubulação externa, indicando que toda a entalpia do líquido estava sendo utilizada para resfriamento das partes internas do "dewar".

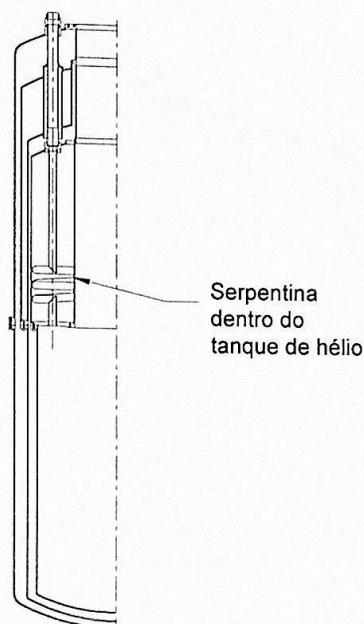


Figura 37 - Serpentina interna do reservatório de hélio.

A evolução com o tempo da temperatura medida pelos termômetros de platina pode ser vista na Figura 38. A Figura 39 mostra apenas a temperatura da esfera em função do tempo. Estes gráficos mostram períodos de resfriamento rápido e períodos de resfriamento lento ou quase inexistente. Os períodos de resfriamento rápido correspondem aos períodos de transferência de hélio propriamente dito, e os períodos lentos às paradas para trocar o tanque de hélio, esperar outro tanque, ou mesmo descansar uma vez que houve um fim de semana no período de resfriamento. A Figura 40 é uma tentativa de eliminar os períodos mortos no processo, mostrando como seria um resfriamento contínuo.

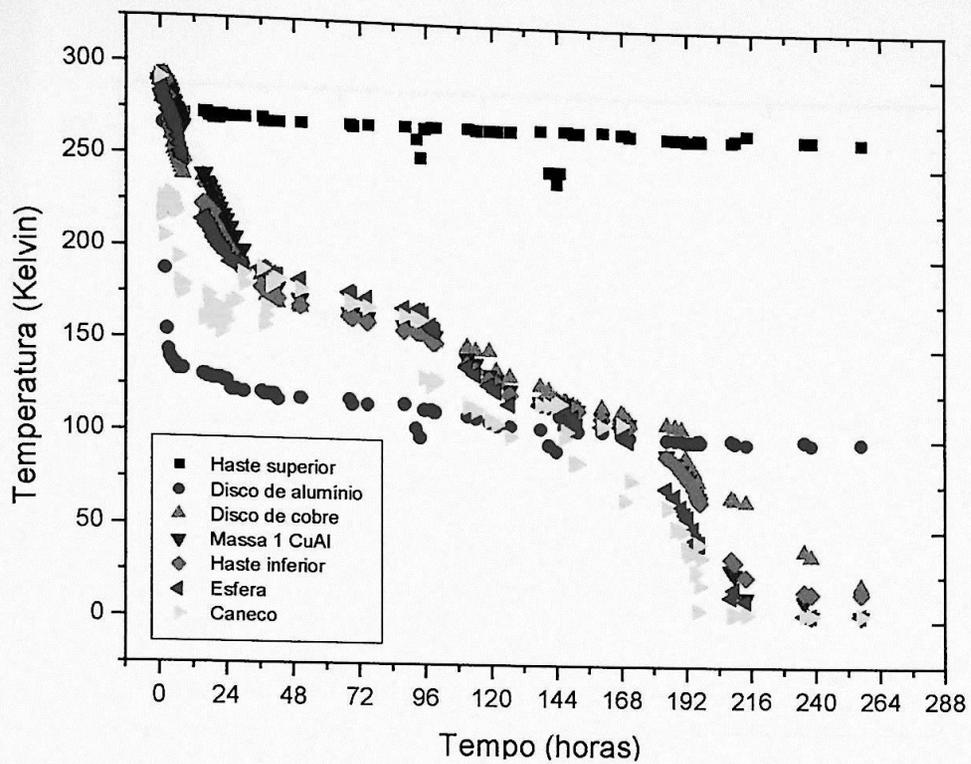


Figura 38 - Evolução com o tempo das temperaturas medidas com os termoresistores de platina

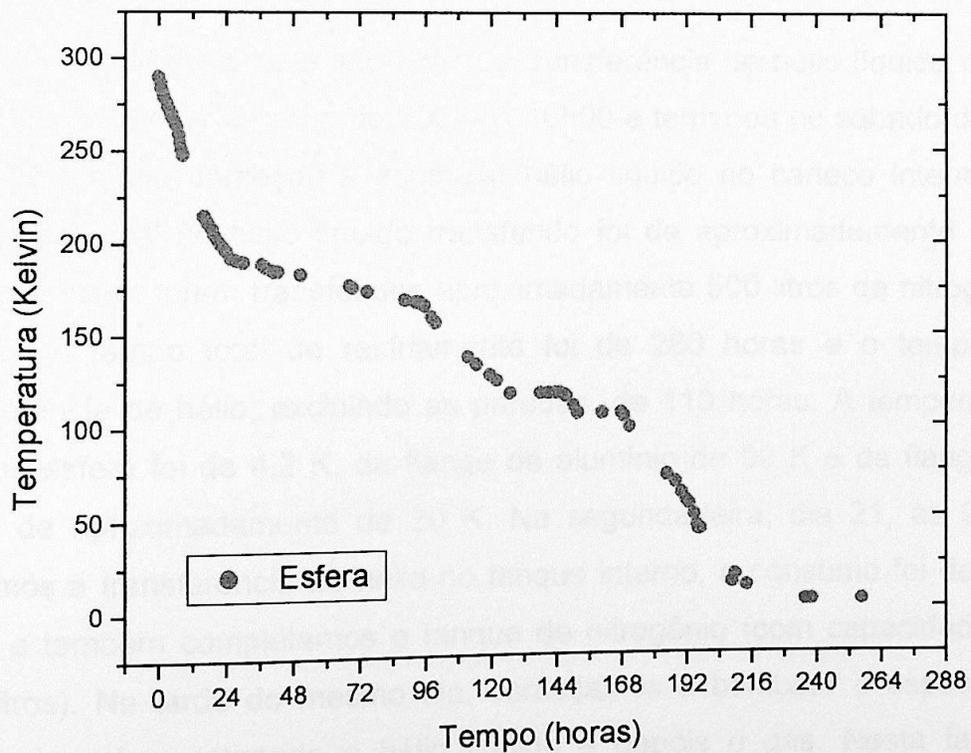


Figura 39 - Evolução com o tempo da temperatura da esfera.

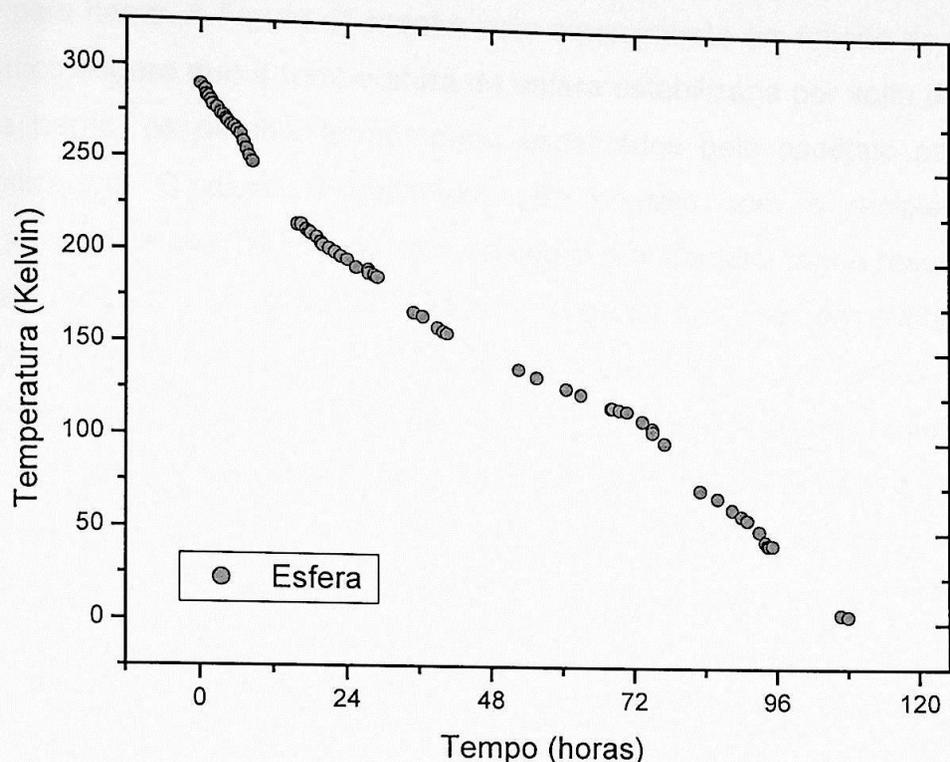


Figura 40 - Estimativa de tempo gasto para o caso de um resfriamento contínuo da esfera.

O resfriamento teve início com a transferência de hélio líquido direto na esfera no dia 10 de julho de 2003 às 16h00 e terminou no sábado dia 19 as 8h00 quando começou a acumular hélio líquido no caneco interno do "dewar". O total de hélio líquido transferido foi de aproximadamente 1360 litros. Também foram transferidos aproximadamente 500 litros de nitrogênio líquido. O tempo total do resfriamento foi de 260 horas e o tempo de transferência de hélio, excluindo as paradas, de 110 horas. A temperatura final da esfera foi de 4,2 K, da flange de alumínio de 99 K e da flange de cobre de aproximadamente de 20 K. Na segunda-feira, dia 21, às 9h00, iniciamos a transferência de hélio no tanque interno, o consumo foi de 310 litros, e também completamos o tanque de nitrogênio (com capacidade de 205 litros). Na tarde do mesmo dia, começamos a bombear o espaço de vácuo da esfera retirando o hélio líquido e depois o gás. Nesta fase a temperatura da esfera inicialmente abaixou até 3 K com o bombeamento do líquido, e depois com a remoção do gás, perdeu o contato térmico com o

reservatório de hélio líquido, e começou a esquentar devido à entrada de calor pela haste. A Figura 41 mostra este aquecimento em função do tempo. O gráfico sugere que a temperatura da esfera estabilizaria por volta de 10 K. Neste ponto, os demais termômetros espalhados pelo criostato pareciam estabilizados. O disco de alumínio (em contato com o recipiente de nitrogênio) estava a 94 K, e o disco de cobre (em contato com o reservatório de hélio) estava a cerca de 20 K. A parte superior da haste, em contato com a flange de alumínio estava a 238 K e a parte inferior, em contato com a flange de cobre, estava a 89 K. A massa superior estava a aproximadamente 25 K, e a massa inferior, a primeira de cobre, estava praticamente na mesma temperatura da esfera. A temperatura do "shield" de 4,2 K (o caneco) estava bem próxima de 4,2 K.

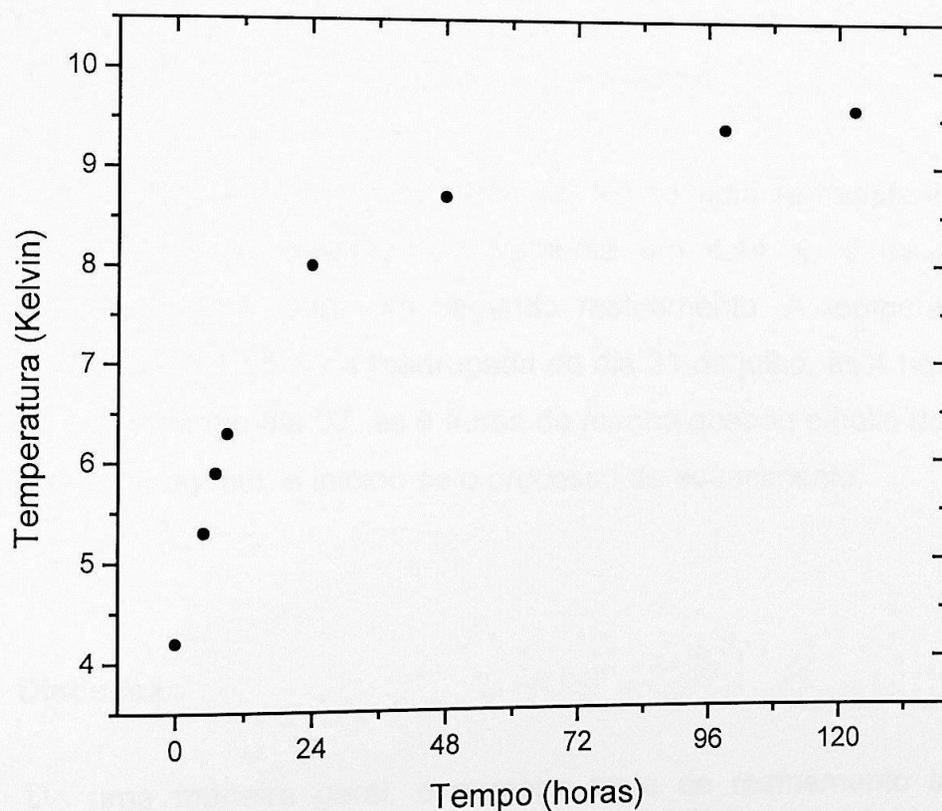


Figura 41 - Aquecimento da esfera em função do tempo

No dia 29 de agosto, às 9 horas da manhã, iniciamos o resfriamento abaixo de 4 K, bombeando diretamente o tanque de hélio líquido, depois de

colocar uma pressão de cerca de 2 mm de Hg de gás de troca (hélio) no espaço da esfera. Para isso, utilizamos uma bomba de vácuo mecânica, existente no laboratório, de 120 m³ por hora. Para resfriar um volume inicial de cerca de 300 litros de líquido, a uma temperatura menor que 2 K, é preciso evaporar mais de 100 litros, ou seja, bombear perto de 100.000 litros de gás. Este gás está inicialmente muito frio, e se não tiver tempo para aquecer, chegará frio à bomba, podendo danificá-la. Para evitar isto, o bombeamento foi feito através de uma serpentina com cerca de 5 metros de tubo corrugado, colocada dentro de um vaso térmico, e aquecida através de sopradores de ar quente. Ainda assim, foi necessário restringir bastante o fluxo para garantir que o gás chegasse na bomba a temperatura ambiente. Com isso, a temperatura foi descendo bem devagar e, de tempos em tempos, fazia-se uma parada no bombeamento, mantendo a pressão constante através de uma válvula de agulha, para medir a resistência do termômetro de RuO₂ e o fator de qualidade da esfera.

Terminado o primeiro resfriamento, fez-se uma re-transferência de hélio, a temperatura estabilizou novamente em 4,14 K, e iniciamos o processo novamente, para um segundo resfriamento. A temperatura da esfera chegou em 1,95 K na madrugada do dia 31 de julho, às 4 horas e 50 minutos. No domingo dia 03, as 8 horas da manhã acabou o hélio do tanque e também o nitrogênio, e iniciou-se o processo de aquecimento.

IV.6 - Discussão

De uma maneira geral, o primeiro teste de resfriamento teve um resultado bastante satisfatório. Passamos a listar em seguida as observações que julgamos importantes.

O tempo de resfriamento foi bastante bom. O tempo de resfriamento propriamente dito, sem contar as paradas, foi de cerca de 120 horas (cinco

dias). Este tempo já é razoável do ponto de vista operacional, e pode ser melhorado aumentando-se o fluxo de gás. Atualmente, o limite máximo de recuperação de gás do laboratório é de 500 litros por minuto (valor de pico, que não pode ser mantido continuamente), e o fluxo utilizado foi inicialmente de 120 litros de gás por minuto. Foi depois aumentado (ao longo do resfriamento) mas o fluxo médio não passou de 150 l/min. Assim, seria possível dobrar o fluxo médio, o que possivelmente reduziria o tempo a perto da metade. Um estudo deste resfriamento foi feito no MiniGRAIL ^{xviii} e o menor tempo foi obtido com fluxo forçado de gás hélio, pré-resfriado por nitrogênio líquido, e movimentado por uma seqüência de bombas "roots", conseguindo resfriar a 100 K o criostato e a esfera (idênticos aos nossos) em apenas 1 dia. Este tempo é cerca de 3 vezes menor que o gasto por nós. Como não dispomos das bombas necessárias para implementar o circuito fechado utilizado na Holanda, optamos pela solução mais simples de produzir um fluxo forçado partindo diretamente do hélio líquido.

O consumo de hélio líquido também foi bastante razoável. Foram gastos 1.360 litros de hélio, o que é significativamente menor do que o mínimo previsto (1.600 litros) se toda a entalpia fosse removida pelo hélio. Ou seja, uma parte significativa do calor foi retirada evaporando nitrogênio líquido. O consumo deste foi de pouco mais de 500 litros. Como o calor de evaporação de 500 litros de nitrogênio corresponde à entalpia de cerca de 350 litros de hélio líquido, vê-se que a remoção do calor foi feita de maneira bastante eficiente.

Um ponto importante é a temperatura dos elementos colocados dentro do pescoço do "dewar". A Figura 42 mostra a evolução destas temperaturas com o "dewar" frio e vácuo no espaço da esfera. A esfera e as massas de cobre têm a mesma temperatura e estabilizam em 10 K. O disco de cobre estabiliza pouco acima de 20 K. A massa mais alta estabiliza pouco abaixo de 30 K. A parte inferior da haste de sustentação estabiliza pouco abaixo de 90 K e a flange superior, em contato com o reservatório de

nitrogênio, a cerca de 94 K. Isto mostra claramente que a grande entrada de calor é pela haste de sustentação, como previmos. Vale lembrar que a parte inferior da haste está em contato com a flange de cobre por meio de anéis e fitas de cobre (Figura 29) mas a diferença de temperatura entre elas é bastante grande. A seqüência 90 K - 20 K - 4,2 K para a haste - flange de cobre - banho de hélio, mostra um fluxo relativamente grande de calor terminando por evaporar hélio. De fato, a evaporação medida foi de cerca de 2,5 litros por hora bem acima do esperado, indicando uma entrada de calor "extra" entre 0,3 e 0,6 W.

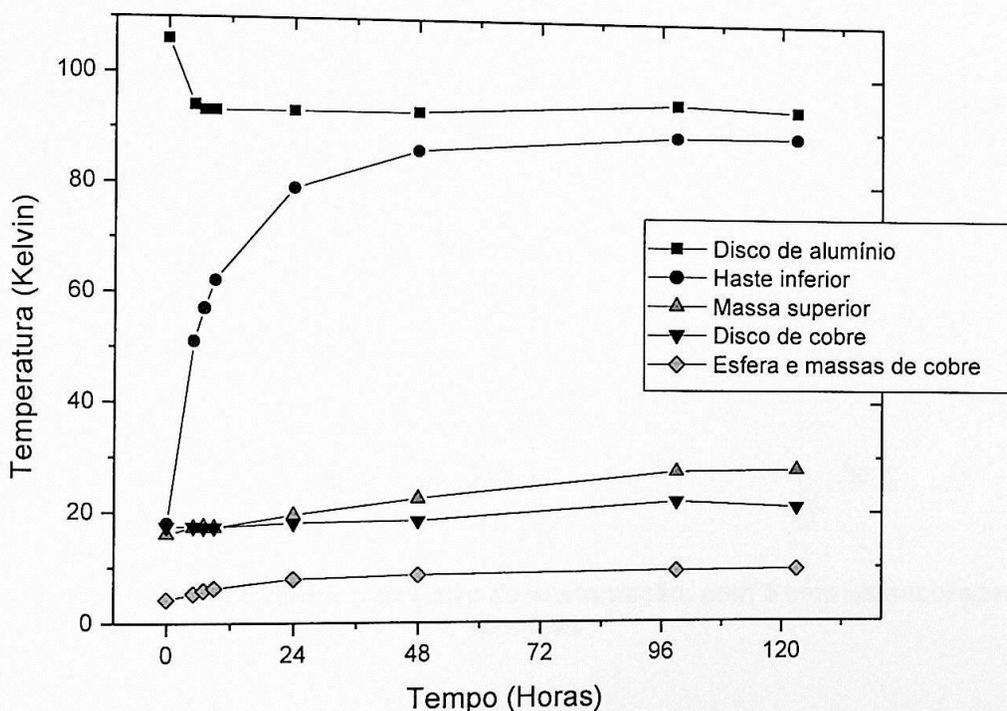


Figura 42 - Evolução das temperaturas dos elementos dentro do pescoço do "dewar"

A Figura 43 ilustra um esboço de balanço térmico da barra de sustentação, a partir de dados de condutividade térmica do aço 304^{xv}. O calor desviado para o nitrogênio é muito pequeno, 0,04 W, comparado com o calor desviado para o hélio, de 0,48 W. Isto mostra que a ancoragem à temperatura do nitrogênio não funcionou (sobrecarregando a ancoragem na

temperatura de hélio) e precisa ser melhor elaborado. O calor desviado para o hélio é, em parte pelo menos, responsável pela alta evaporação observada. O calor que chega ao sistema massas-esfera é de 0,25 W. Para comparação, estimamos também o calor transportado diretamente ao sistema massas-esfera, se não houvesse as ancoragens térmicas, resultando em 0,6 W.

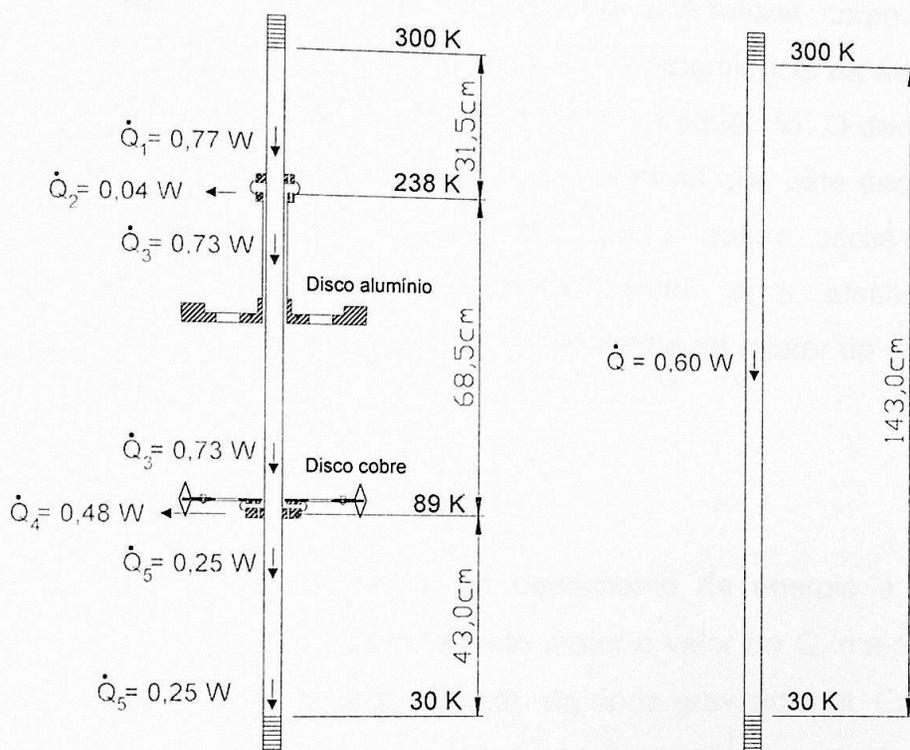


Figura 43 - Balanço térmico da barra de sustentação, com e sem os ancoragens térmicas

De qualquer forma, é preciso reduzir em muito a entrada de calor na esfera se se pretende mantê-la perto de 5 K por um longo tempo. Para isso, é preciso um projeto muito mais cuidadoso da suspensão. Uma possibilidade atraente é substituir toda a barra, ou partes dela (entre as ancoragens térmicas, por exemplo) por um outro material, que seja mais, ou igualmente, resistente e menos condutor que o aço 304. Estimamos que é possível reduzir em até duas ordens de grandeza o calor que chega à esfera.

CAPITULO V

FATOR DE QUALIDADE MECÂNICO

V.1 - Introdução

Quando uma onda gravitacional passa por uma massa, como a esfera do detector SCHENBERG, os modos normais de ressonância da esfera são excitados pelas componentes da onda de mesma frequência. O decaimento desta excitação é na forma exponencial. É desejável que este decaimento seja o mais lento possível, fazendo com que a esfera oscile após a passagem da onda gravitacional, "memorizando" seus efeitos. Para caracterizar a perda da vibração com o tempo define-se o fator de qualidade mecânico Q como:

$$Q = \tau_E \times \omega_0$$

onde τ_E é a constante de tempo de decaimento da energia e ω_0 é a frequência de ressonância. Assim, quanto maior o valor de Q , maior será o tempo disponível para se detectar a ação da onda gravitacional. Em suma, deste ponto de vista, uma antena gravitacional de massa ressonante é como um sino de altíssima qualidade. Como em um sino, o fator Q é uma característica não apenas do material, mas também da particular peça que é posta a vibrar. Peças idênticas, do mesmo material, podem ter valores diferentes de Q dependendo dos processos com que foram confeccionadas.

O material que vem sendo utilizado em todos os detectores de massa ressonante até aqui construídos é a liga de alumínio Al5056^{xx}, por apresentar um altíssimo valor de Q . A única exceção é a antena Niobe na Austrália, que foi feita de Nióbio. Como já mencionado anteriormente, o material para a confecção das antenas esféricas dos projetos SCHENBERG, MiniGRAIL e Sfera foi escolhido a partir de uma pesquisa realizada pelo

grupo de Leiden. Naquele trabalho foram medidos os fatores de qualidade mecânicos de um número grande de pequenas esferas (107 a 160 mm de diâmetro) de vários materiais (e procedências diferentes) até temperaturas de 20 mK. A escolha recaiu sobre a liga CuAl(6%), fundida pela companhia brasileira Italbronze ^{xiii}, que atingiu Q de até 20 milhões. Outro fator importante é que, por ser uma liga de cobre, tem o resfriamento a baixíssimas temperaturas facilitado pela boa condutividade térmica.

V.2 - Resultados e discussão

Embora o principal objetivo da experiência aqui relatada seja o teste geral dos equipamentos e procedimentos necessários para o resfriamento da esfera, aproveitou-se para também medir a evolução com a temperatura do Q da esfera. Normalmente, o resfriamento é acompanhado de um grande aumento de Q. Foi utilizado o método mais simples de proceder à medida. Uma bobina de campainha, com seu respectivo martelo, foi presa à haste da esfera, pouco acima desta (Figura 44), de modo que, quando acionado por uma voltagem elétrica, a esfera era atingida por uma pequena pancada. A vibração então produzida era transformada em vibrações elétricas por dois cristais piezelétricos colados à esfera. Este sinal elétrico era introduzido em um analisador de espectro ^{xxi} que mostrava na tela as freqüências excitadas e suas intensidades. A medida do decaimento era então feita com um cronômetro.

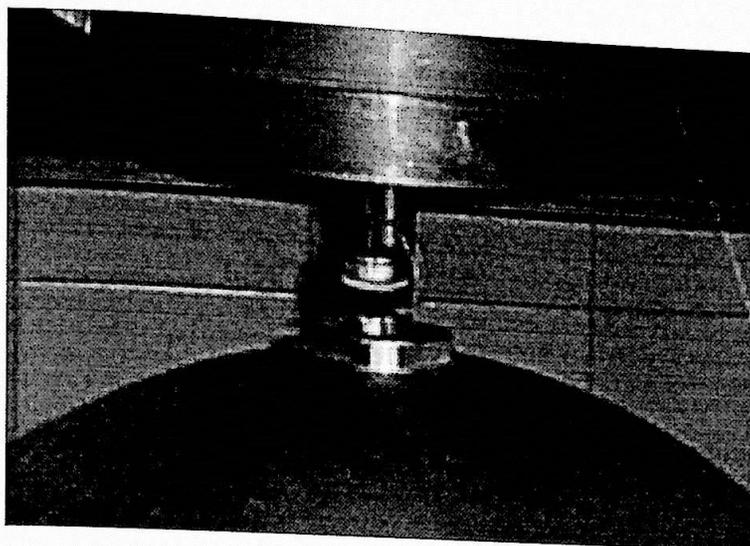


Figura 44 - Relê preso à haste de sustentação da esfera.

Em geral, a medida realizada foi do tempo necessário para um amortecimento da amplitude correspondente a 10 dB (τ_{10dB}). Neste caso, o fator de qualidade mecânico é dado por

$$Q = 2,72875 \times \tau_{10dB} \times f$$

onde f é a frequência de ressonância do modo fundamental em Hz, τ_{10dB} é medido em segundos e Q é adimensional. Para uma frequência de 3.200 Hz, um Q de um milhão corresponde a um tempo de 115 segundos, um tempo bastante confortável para a medida. Na Figura 45 vemos os dados obtidos.

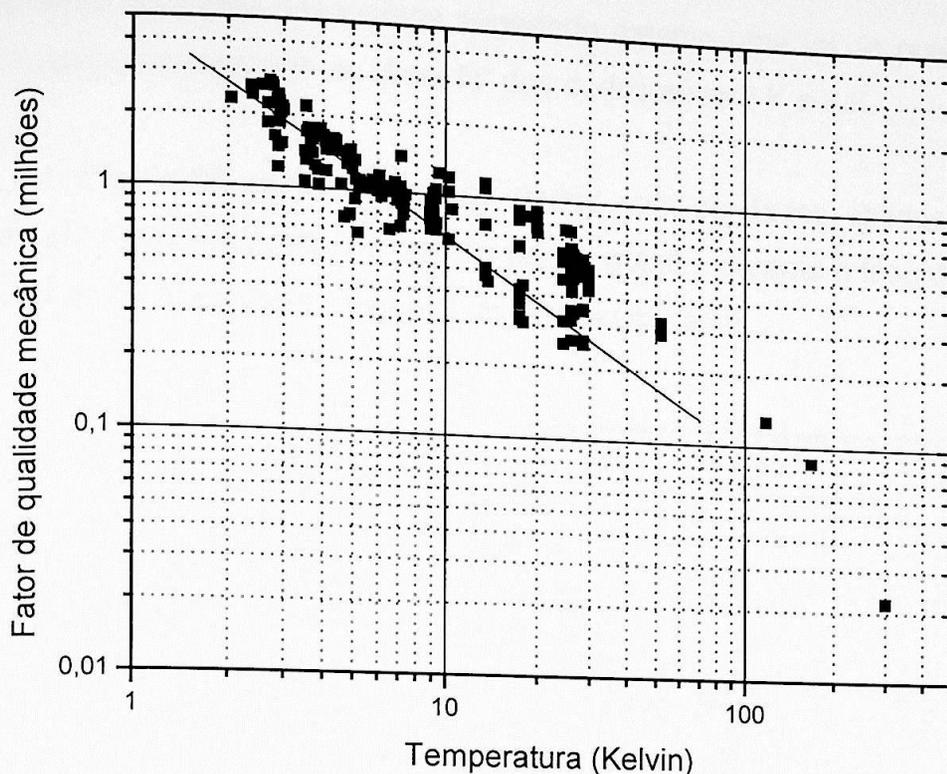


Figura 45 - Fator de qualidade mecânico do detector SCHENBERG em função da temperatura

Embora o aumento dos valores de Q seja evidente, os dados mostram uma dispersão muito grande para temperaturas abaixo de 30 K. Esta dispersão, provavelmente, se deve ao fato da excitação ter sido feita com uma pequena pancada. Neste caso todos os modos de vibração são excitados, o ruído é muito grande e acaba havendo transferência de energia entre as frequências próximas. Com isso, nem sempre o decaimento ocorre de forma "limpa". O melhor seria fazer a excitação através de um cristal piezelétrico, selecionando a frequência de interesse. Este método foi utilizado pelo grupo de Leiden para medir o fator de qualidade mecânico da sua esfera e de uma pequena esfera de teste de 17 cm de diâmetro que foi enviada à eles para testes iniciais. Infelizmente não dispúnhamos de cristais piezelétricos suficientemente grandes para produzir uma excitação mensurável, e tivemos que medir o decaimento das excitações produzidas por batidas. Na Figura 45 optamos por incluir todos os pontos medidos sem qualquer tipo de seleção. Embora a dispersão seja grande, pode-se ver que

Q aumenta de forma sistemática sugerindo mesmo uma lei de potência. A reta traçada corresponde ao "best fit" dos dados entre 2 K e 8 K.

A Figura 46 compara nossos dados com os dados obtidos para a esfera enviada para Leiden e com os dados obtidos durante a fase de testes em uma pequena amostra esférica do mesmo material.

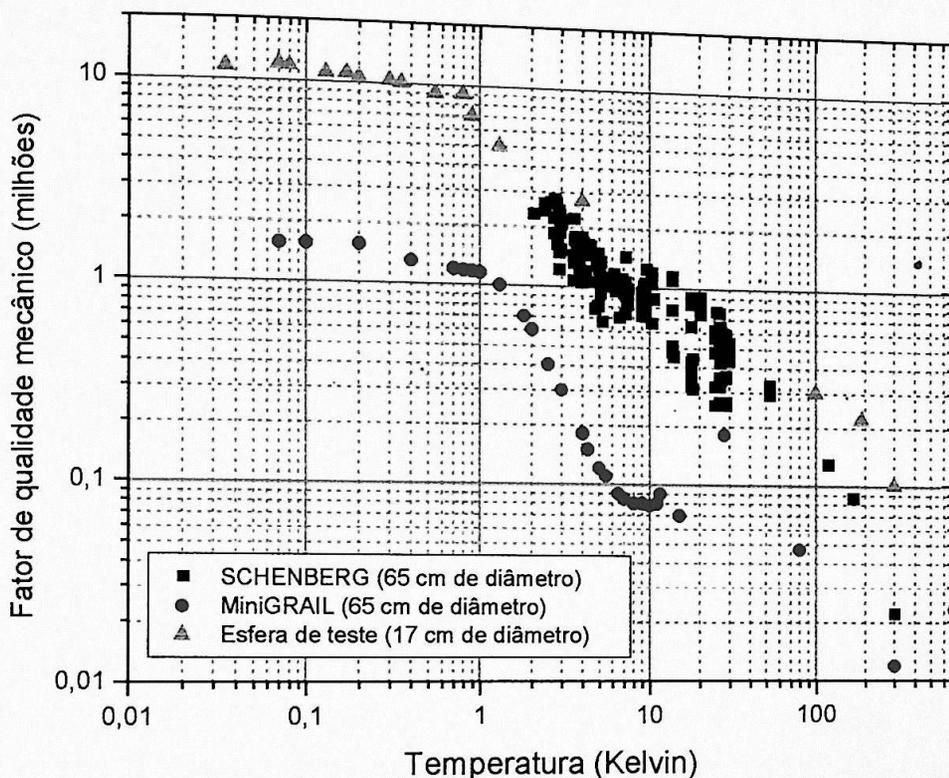


Figura 46 - Fator de qualidade mecânica da esfera SCHENBERG comparado à esfera MiniGRAIL e a uma amostra de CuAl6% de 17 cm de diâmetro, ambas fabricadas também pela Italbronce.

Claramente, nossos valores se situam bem acima dos valores obtidos para a esfera de Leiden, e se aproximam bastante dos valores obtidos na amostra pequena. Também não é observada a forte absorção que parece existir em torno de 10 K para a esfera de Leiden.

Embora estes dados devam ser encarados como preliminares, e certamente pretendemos repetir as medidas com uma excitação seletiva, já

se pode concluir que o fator de qualidade de nossa esfera se aproxima bastante dos valores obtidos durante a pesquisa com amostras pequenas, e não apresenta os problemas (baixos valores) observados na esfera de Leiden.

CAPITULO VI

CONCLUSÕES

Nesta dissertação descrevemos a instalação, no Laboratório de Estado Sólido e Baixas Temperaturas do IFUSP, de toda a infra-estrutura mecânica e criogênica necessária ao desenvolvimento da antena de ondas gravitacionais Mário SCHENBERG, parte do projeto GRAVITON. Como bolsista do projeto, tomei parte desde o planejamento, a instalação, até o primeiro teste de resfriamento a temperaturas de hélio. Juntamente com o teste realizamos medidas preliminares do fator de qualidade mecânica até a temperatura de 2 K.

O teste mostrou que, apesar da exigüidade do espaço e do peso considerável das partes massivas da antena (esfera e massas de filtragem), a infra-estrutura de suporte do "dewar" permite uma montagem e desmontagem eficiente do sistema. O sistema de resfriamento adotado, fluxo forçado de gás partindo do hélio líquido, é simples e eficiente permitindo atingir 4,2 K em cerca de uma semana. O balanço térmico mostrou que a haste de suporte da antena precisa ser re-projetada para reduzir bastante a entrada de calor por ela. Já esperávamos este resultado, uma vez que o suporte adotado é provisório, e foi dimensionado para garantir robustez mecânica nos testes iniciais. As medidas preliminares do fator de qualidade mecânica da esfera mostram valores bastante altos a baixas temperaturas, chegando muito perto dos valores obtidos em amostras pequenas durante a pesquisa para a escolha do material da esfera.

Este trabalho deve continuar com: - o projeto e instalação de uma nova haste de sustentação do conjunto massas-esfera; - medidas finais do fator de qualidade mecânica utilizando excitação seletiva em frequência, ao invés da excitação por batida que foi utilizada nas medidas preliminares; - e

instalação do primeiro transdutor paramétrico sendo desenvolvido. Com isso a esfera já poderá ser testada como antena a 4,2 K. Paralelamente estará sendo desenvolvida a infra-estrutura para resfriamento abaixo de 4,2 K, com o sistema de circulação e estocagem do refrigerado por diluição. Finalmente, com a construção e instalação do refrigerador, estaremos atingindo a fase final do projeto.

WEBGRAFIA

Detectores esféricos:

- MiniGRAIL (Leiden, Holanda) <http://www.minigrail.nl>
- Projeto Graviton (São Paulo, Brasil) - em construção
- Sfera (Rome, Italia) <http://www.lnf.infn.it/>

Detectores de barra ressonante:

- Allegro (Louisiana, Estados Unidos) <http://sam.phys.lsu.edu/>
- Auriga (Lengaro, Itália) <http://www.auriga.lnf.infn.it/>
- Explorer (CERN, Suíça) <http://www.roma1.infn.it/rog/explorer/explorer.html>
- Nautilus (Frascati, Itália) <http://www.roma1.infn.it/rog/nautilus/nautilus.html>
- Niobe (Perth, Austrália) <http://www.gravity.uwa.edu.au/bar/bar.html>

Interferômetros a laser:

- AIGO (Wallingup Plain, Austrália)
<http://www.gravity.uwa.edu/AIGO/AIGO.html>
- Geo 600 (Hannover, Alemanha) <http://www.geo600.uni-hannover.de>
- LIGO (Livingston / Hanford, Estados Unidos) <http://www.ligo.caltech.edu>
- TAMA (Tóquio, Japão) <http://tamago.mtk.nao.ac.jp>
- VIRGO (França / Itália) <http://www.virgo.infn.it>

Interferômetro espacial a laser:

- LISA (ESA, NASA)
<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=27>

REFERÊNCIAS

- ⁱ Aguiar, O. D., et al. "The GRAVITON Project - Construction of a Gravitational Wave Observatory in Brazil, (First Phase) - The MÁRIO SCHENBERG DETECTOR - Proposal for the design, construction and operation of a Spheroidal Gravitational Wave Detector of 0.6-meter diameter". Proposta à FAPESP (1988).
- ⁱⁱ Blair, D. G., "The Detection of Gravitational Waves", Cambridge University Press (1991).
- ⁱⁱⁱ Aguiar, O. D.; Araújo J. C. N.; Miranda O. D. & Velloso W. F., Jr. "Prováveis fontes candidatas à observação pelo detector de ondas gravitacionais MARIO SCHENBERG", XXV^a Reunião Anual da SAB, 1999.
- ^{iv} Michelson, P. F. et al. (1987) "Resonant Mass Detectors of Gravitational Radiation", Science 10 Jul 87, 237, p150-57.
- ^v Ruthen, R., "Catching the Wave", Scientific American, March 1992, p72-p81.
- ^{vi} Weber, J., Phys. Ver. **117** (1) 306 (1960)
- ^{vii} Sigg, D. "Commissioning of LIGO Detectors", Presented talk at 5th Edoardo Amaldi Conference, July 7, 2003.
- ^{viii} <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=27>
- ^{ix} Kadel Engineering, 1627 East Main Street, Danville Indiana 46122 - EUA. <http://www.kadel.com>
- ^x Engehidro Equipamentos Industriais Ltda., Av. Aricanduva, 11600 - São Mateus - 03951-040, São Paulo/SP. <http://www.engehidro.com.br>
- ^{xi} Edwards High Vacuum International, Manor Royal, Crawley, West Sussex, RH10 2LW, Reino Unido. <http://www.edwards.boc.com>
- ^{xii} Melo, J. L., "Sistemas de Isolamento Vibracional e de Acoplamento Antena-Transdutores para o Protótipo de um Detector de Ondas Gravitacionais", Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos, 2002.
- ^{xiii} Fundação Mecânica Italbronze, Rua Tamotsu Iwasse, nº 10, 07176-000, Guarulhos/SP. <http://www.italbronze.com.br>
- ^{xiv} Waard, A. de, "MiniGRAIL, The first spherical gravitational wave antenna", Tese de Doutorado, Universidade de Leiden, Holanda, 2003.

-
- ^{xv} Tebecherani, Ciro de Toledo Piza, "Aços Inoxidáveis", Pypesystem - O Portal da Hidráulica e Sistemas de Condução de Flúidos. http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/artigos_tecnicos.html
- ^{xvi} APD Cryogenic Inc. - CRYOGENIC DATA TABLE.
- ^{xvii} Jacobs, S. B., "Advances in Cryogenic Engineering", vol 8, pág. 529 (1963).
- ^{xviii} Waard, A de, Gottardi, L. and Frossati, G., "MiniGRAIL progress report 2001: the first cooldown", Class. Quantum Gravity. **19** (2002) 1935-1941
- ^{xix} Lake Shore Cryotronics, Inc. 575 McCorkle Blvd., Werterville OH 43082-8888 EUA.
- ^{xx} Coccia, E. et al, Proceedings os OMNI-1, Edited by W.F. Velloso, O.D. Aguiar and N.S. Magalhães, World Scientifis (1997), p. 169.
- ^{xxi} STANFORD RESEARCH SYSTEMS - Model SR760 FFT Spectrum Analyzer.