



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CÁLCULO DAS ESTRUTURAS METÁLICAS DO DETECTOR MÁRIO SCHENBERG

Hugo Matheus da Silva

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Odylio D Aguiar.

INPE
São José dos Campos
2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

CÁLCULO DAS ESTRUTURAS METÁLICAS DO DETECTOR MÁRIO SCHENBERG

Hugo Matheus da Silva

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr.
Odylio D Aguiar.

INPE
São José dos Campos
2021



RESUMO

Este trabalho teve início após a transferência do detector Mário Schenberg do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) para o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos. Para a remontagem do detector, agora no laboratório de ondas gravitacionais do INPE, será necessária uma nova estrutura para a fixação da antena e todos os equipamentos que a acompanham, com os cuidados em relação às vibrações que o equipamento receberá. Os desenhos e uma primeira análise das peças que farão parte da estrutura, foram desenvolvidos em um trabalho de conclusão de curso no ano de 2018. A estrutura foi dividida entre a parte interna, que sustentará o detector; a parte externa, que sustentará o piso onde ficarão os pesquisadores; e, uma base superior, que servirá de apoio para a parte superior da câmara que se encontra no laboratório; além de uma bancada onde será alojado a eletrônica do detector. Para a parte interna, onde o nível de vibração deve ser o mínimo possível, foram apresentados três tipos de geometria de tubos: geometria circular, geometria quadrada e geometria triangular, sendo a opção triangular escolhida, através de testes e estudos feitos no software SolidWorks. A parte externa e superior, terão tubos com geometria quadrada, pois terão uma distribuição diferente das cargas em relação a parte interna. O conceito final do desenho do projeto de toda a estrutura, foi apresentado pelos alunos que trabalharam no TCC mencionado, e, no início de 2020, o projeto teve continuidade como uma Iniciação Científica no próprio INPE, para que seja executado uma revisão dos desenhos e análises técnicas estruturais, como também os cálculos necessários para o fator de segurança que deve haver em toda a estrutura e assim, satisfazer todos os critérios para que o projeto possa ser funcional e seguro.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de ondas gravitacionais no espaço-tempo	6
Figura 2. Representação em corte do detector Mário Schenberg	7
Figura 3. Esquema de classificação para as ligas ferrosas	10
Figura 4. Gráfico curvas de tensão-deformação de alguns metais e ligas	11
Figura 5. Desenho estrutura externa	13
Figura 6. Desenho estrutura interna	13



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS

2D	Desenho em duas dimensões
CEA	Ciências Espaciais e Atmosféricas
CGCEA	Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas
DIDAS	Divisão de Astrofísica
EUA	Estados Unidos da América
IFUSP	Instituto de Física da Universidade de São Paulo
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIGO	Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory
OG	Onda gravitacional
USP	Universidade de São Paulo



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS DO TRABALHO	9
2.1 Objetivo geral.....	9
2.2 Objetivos específicos	9
3.1 Ondas Gravitacionais	10
3.2 Princípio de Funcionamento do Detector Mário Schenberg	10
3.3 Estrutura Metálica	11
3.3.1 Montagem da Estrutura.....	14
3.3.2 Vibrações	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	15
4.1 Módulos utilizados no SolidWorks.....	15
5. RESULTADOS	16
6. CONCLUSÕES	16
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17



1. INTRODUÇÃO

"Foi um registro muito curto de cerca de um segundo, mas foi suficiente para que conseguíssemos detectar a ocorrência das ondas gravitacionais. Elas ocorrem sob o mesmo princípio de quando jogamos uma pedra em um lago e vemos as ondas se formarem em várias direções, para longe do epicentro. Constatarmos que elas existem abriu um campo totalmente novo na astronomia, e nosso desafio agora é prosseguir com as pesquisas para entendermos cada vez mais esse fenômeno" (AGUIAR, O D, 2018). Confirmando parte fundamental da Teoria da Relatividade Geral formulada pelo físico Albert Einstein, foi realizada em 2015 a primeira detecção de ondas gravitacionais (**figura 1**), resultado da interação de dois buracos negros com massas aproximadamente iguais a 29 e 36 vezes a massa do Sol, pela equipe de cientistas do LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), que também, recentemente, com a colaboração LIGO-Virgo, e a participação da equipe do INPE, liderada pelo Prof. Dr. Odylio Denys de Aguiar, publicou um paper no *Astrophysical Journal* relatando um novo evento relacionado as ondas gravitacionais.

“Trata-se da observação de ondas gravitacionais das últimas órbitas e fusão (coalescência) de dois objetos compactos, um de 23 e o outro de 2,6 massas solares. O objeto de 23 massas solares é claramente um buraco negro, enquanto o de 2,6 massas solares pode ser a mais massiva estrela de nêutrons até hoje detectada ou o buraco negro de menor massa já observado. Somente observações futuras irão dizer, para esta massa de objeto compacto, qual a sua natureza. De qualquer forma, este é o evento de binária detectada em ondas gravitacionais que envolve a maior razão entre as massas dos dois objetos (~9:1).” (INPE, 2020)

Como membro da equipe do LIGO e líder dos estudos de ondas gravitacionais no INPE, o Prof. Dr. Odylio Denys de Aguiar, do departamento de Astrofísica, é o responsável pelo detector Mário Schenberg.

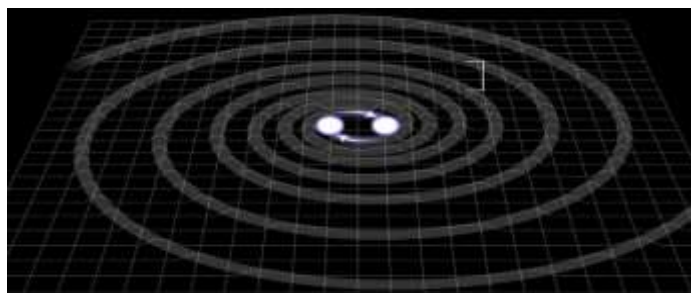


Figura 1. Representação ondas gravitacionais no espaço-tempo (National Geographic, 2017)

O detector Mário Schenberg (**figura 2**), que carrega esse nome em homenagem ao físico brasileiro que foi professor no Instituto de Física da USP, tem em sua composição, uma esfera maciça de liga de cobre (94%) e alumínio (6%) com um diâmetro de 650 milímetros pesando em torno de 1150kg. Essa esfera possui sensores, e, se uma onda gravitacional passar por ela, ocorrerá uma oscilação, que será captada por seis transdutores de alta sensibilidade e todo um sistema de amplificação e digitalização, que a transformarão em sinal para análise nos computadores. Todo esse processo ocorre em temperaturas muito baixas, utilizando-se de criogenia para tais fins. Havendo a necessidade de montar uma estrutura física no INPE para o equipamento, foi desenvolvido o estudo de um projeto para a estrutura que suportará o detector, o qual está em desenvolvimento e será manufaturado após todos os estudos realizados. A primeira etapa, de estudo dos desenhos já feitos, foi concluída nesse primeiro semestre de 2020, embora tenha existido um pouco de dificuldade pela atual situação de pandemia que o país está vivenciando. A segunda etapa será a revisão e complementação (se necessário) dos desenhos, e está prevista para o segundo semestre de 2020. E, na terceira etapa, com o término previsto para maio de 2021, serão realizados os cálculos de todas as partes estruturais presentes no projeto, sendo essa, a etapa mais longa e trabalhosa, pois deve atender todos os requisitos para a segurança e utilidade da estrutura para que não afete de maneira negativa o desempenho do detector.

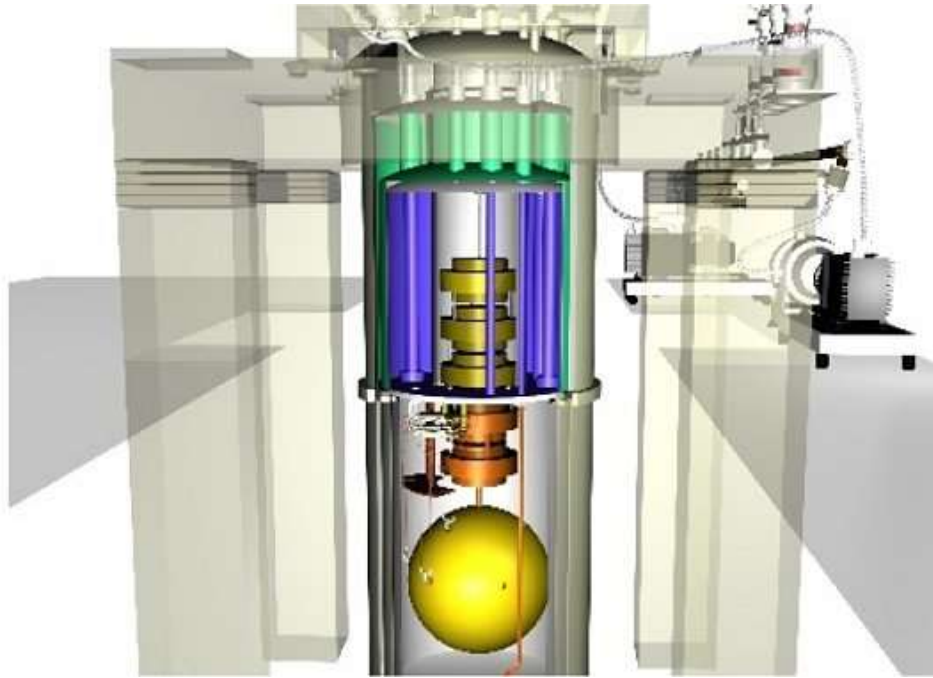


Figura 2. Representação em corte detector Mário Schenberg (Xavier P.M.Gratens, 2013)

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é participar do projeto do detector de ondas gravitacionais Mário Schenberg, projetando, revisando e desenvolvendo uma estrutura metálica fixa para sustentar este detector com total segurança e funcionalidade para a realização de experimentos com o mesmo.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar o projeto do detector Mário Schenberg e todos os desenhos já realizados em SolidWorks para a construção de estruturas metálicas para a remontagem do detector;
- Revisar todos estes desenhos já existentes, procurando completar o projeto com todas as peças necessárias para a montagem completa (checagem quantitativa);
- Realizar os cálculos necessários para a montagem da estrutura dentro de um fator 2 de segurança (checagem qualitativa).



3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Ondas Gravitacionais

Ondas gravitacionais são perturbações da métrica do espaço-tempo, provocadas pela aceleração relativa entre massas distribuídas assimetricamente (variação do momento quadripolar). Estas ondas foram previstas teoricamente por Einstein (1916) como uma solução radiativa no vácuo para as equações da relatividade geral. (MELO, J. L., 2002). De acordo com Thorne (1987), *“existem inúmeras fontes astrofísicas possíveis de ondas gravitacionais: a saber, supernovas, o colapso de uma estrela ou aglomerado de estrelas para formar um buraco negro, inspiração e coalescência de binários compactos, queda de estrelas e buracos negros em buracos negros supermassivos, estrelas de nêutrons rotativas, estrelas binárias comuns, relíquias do big bang, vibração ou colisão de monopolos, cordas cósmicas e bolhas cósmicas, entre outros”*. (apud J. C. N. de Araujo, O. D. Miranda, O. D. Aguiar, 2001). Considerando a importância dos estudos das ondas gravitacionais, busca-se o aperfeiçoamento de técnicas e instrumentos para tais fins, a tecnologia é a grande aliada para que novas pesquisas sejam realizadas com máxima precisão e qualidade. Baseado nesses conceitos, pode-se entender a relevância da remontagem do detector Mário Schenberg e uma estrutura que atenda às necessidades do equipamento.

3.2 Princípio de Funcionamento do Detector Mário Schenberg

Os detectores de ondas gravitacionais esféricos permitem a análise de múltiplos canais e, portanto, são capazes de determinar as direções e polarizações das ondas gravitacionais. Dois detectores esféricos foram desenvolvidos: MiniGRAIL (Holanda) e Mário Schenberg (Brasil). Ambos compartilham o mesmo princípio de detecção e os principais recursos. (C. F. Da Silva Costa, O. D. Aguiar 2014). O detector Mário Schenberg, segue um princípio diferente dos detectores por interferometrias a laser, pois se utiliza do princípio do tipo massa ressonante onde, o detector, *“consiste de um corpo rígido metálico (antena), cujos modos fundamentais de vibração (com frequências características de oscilação) são excitados na incidência de um pulso de radiação*



gravitacional com frequência característica próxima da frequência de oscilação da antena” (Weber, 1960). O seu funcionamento se dá por qualquer modo vibracional de um corpo que possua momento quadripolar de massa não nulo, como o modo longitudinal de uma antena cilíndrica ou esférica, podendo ser excitado por uma OG com densidade espectral de energia diferente de zero. (Sérgio Ricardo Furtado, 2009). A polarização da OG deve ser favorável de forma a se obter a maior amplitude de oscilação possível na antena (Blair, 1991). Segundo Paik (1974), “transdutores eletromecânicos conectados mecanicamente à antena são utilizados para aumentar a amplitude de vibração. Estes transdutores convertem as oscilações produzidas no sólido em sinais elétricos que são, posteriormente, enviadas para um sistema de aquisição de dados”. (apud Sérgio Ricardo Furtado, 2009, p.27).

3.3 Estrutura Metálica

A estrutura do detector Mário Schenberg será composta pela parte externa (tubos, piso e guarda corpo – esse último, desenhado de acordo com a NBR 14718) e parte interna (apoio do detector). Ambas serão feitas de aço em sua maior parte, devido as propriedades que o metal apresenta e que são interessantes e viáveis para o projeto. As ligas metálicas, em virtude da sua composição, são agrupadas com frequência em duas classes: ferrosas e não-ferrosas. As ligas ferrosas, aquelas em que o ferro é o principal constituinte, incluem os aços e os ferros fundidos. As ligas não-ferrosas, são as ligas que não são à base de ferro.

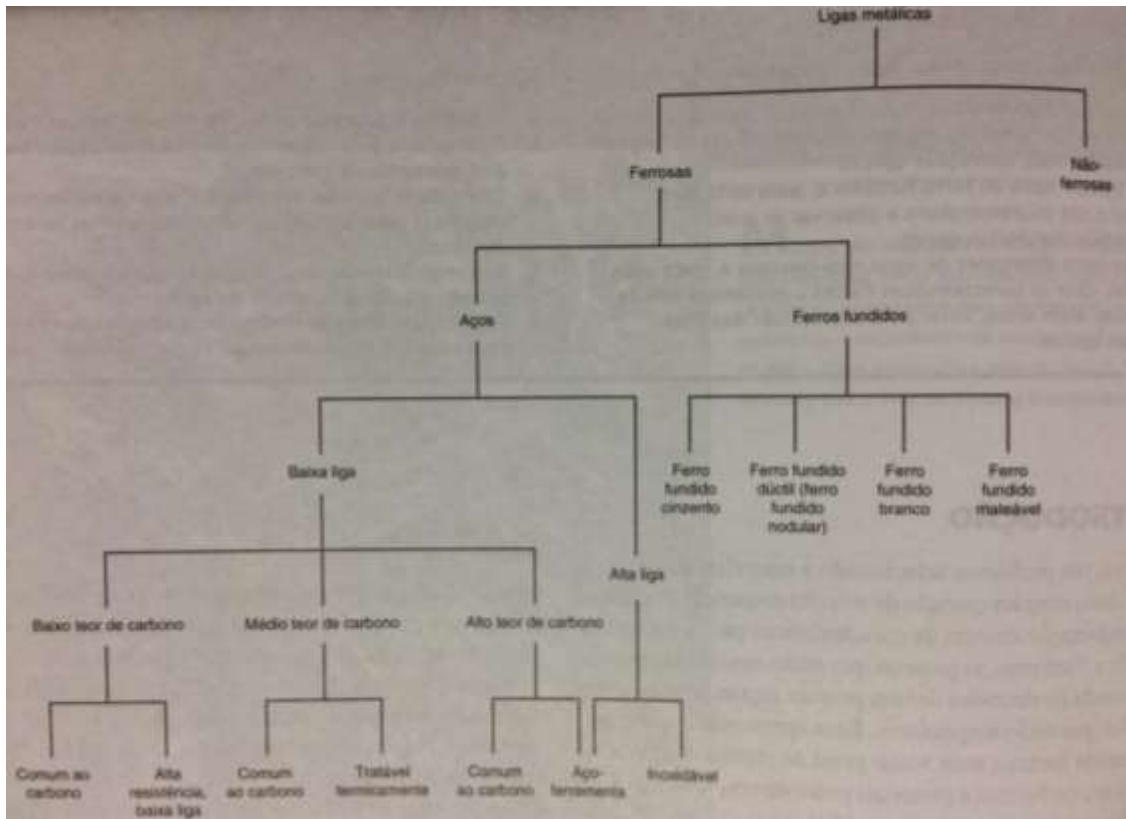


Figura 3. Esquema de classificação para as ligas ferrosas (Callister Jr., 2013)

Os aços estruturais são fabricados conforme as características mecânicas e/ou químicas desejáveis no produto final. A escolha do tipo de aço a ser utilizado em uma estrutura, será determinante no dimensionamento dos elementos que a compõem. (Pinheiros, Antonio Carlos da Fonseca Bragança, 2005), sendo assim, o estudo do projeto ainda pretende chegar ao melhor tipo de metal (aço) para a fabricação da estrutura, observando as principais propriedades dos aços estruturais que são:

- Ductibilidade: capacidade do material se deformar sob a ação de cargas
- Fragilidade: comportamento oposto à ductilidade, uma facilidade de fratura
- Resiliência: capacidade do material de absorver energia mecânica quando ele é deformado elasticamente, e depois, com a remoção da carga, recuperar essa energia

- Tenacidade: capacidade do material de absorver energia mecânica com deformações elásticas e plásticas. A geometria do corpo-de-prova e a maneira como a carga é aplicada, são fatores importantes para essa propriedade
- Dureza: resistência ou risco a abrasão
- Fadiga: resistência a carregamentos repetitivos

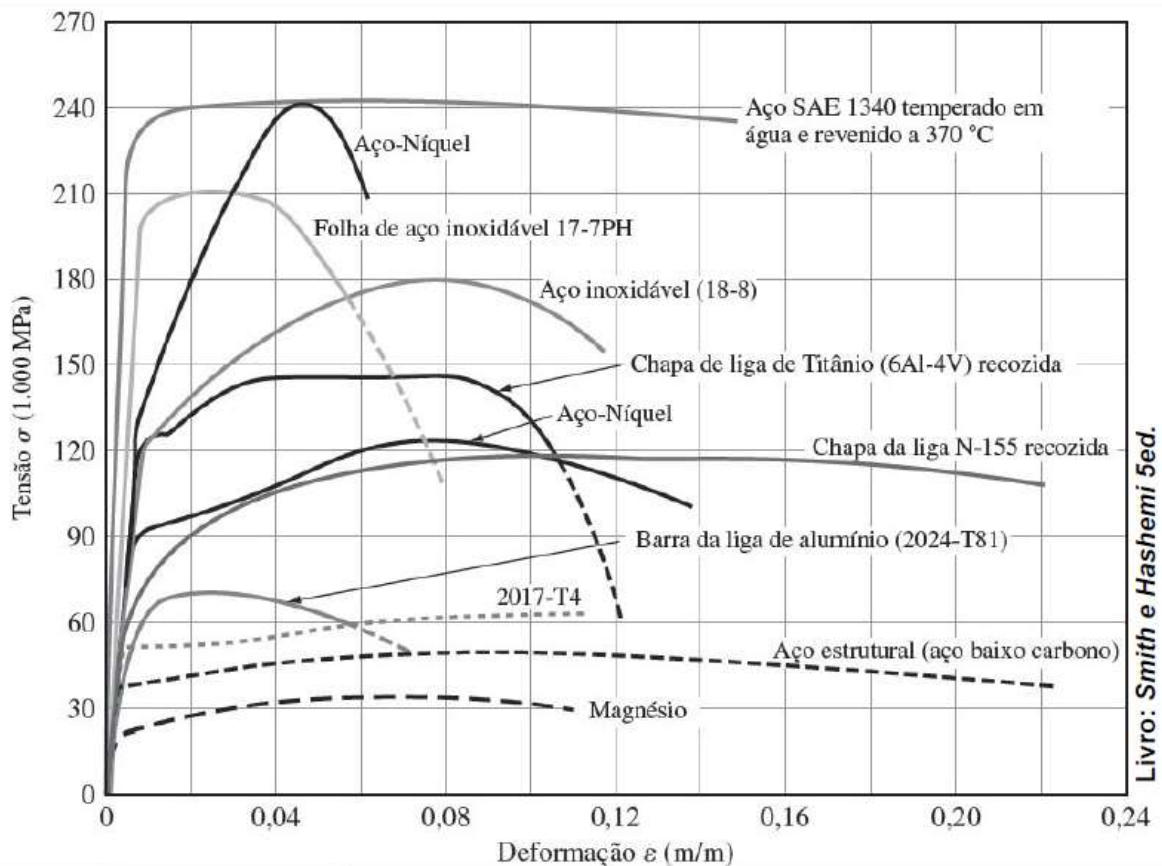


Figura 4. Curvas de tensão-deformação de alguns metais e ligas

Baseado nesses dados e outras pesquisas, foi adotado o aço (a liga ainda será definida de acordo com a necessidade do projeto) como material a ser usado para a produção da estrutura do detector.



3.3.1 Montagem da Estrutura

A montagem da estrutura se dará por meio de soldagem, visto que essa técnica é de suma importância no campo estrutural e permite obter um uso mais eficiente dos materiais. Uma junta soldada é basicamente uma peça única. Todos os outros métodos de conexão de membros são juntas mecânicas. Uma junta adequadamente soldada é mais forte que o material unido. As juntas fundidas criam uma estrutura rígida em contraste com a estrutura não rígida feita com juntas mecânicas. A compactação e o grau calculável de maior rigidez permitem que as suposições do projeto sejam realizadas com mais precisão. As juntas soldadas são melhores para cargas de fadiga, cargas de impacto e vibrações severas. (Omer W. Blodgett, 1966). A fabricação das peças, montagem, e, o processo de soldagem da estrutura, serão feitas por empresas terceirizadas, com profissionais que já atuam no âmbito estrutural, com isso, reforçando a segurança e o melhor desempenho da mesma.

3.3.2 Vibrações

Um ponto de extrema importância para que o detector obtenha bons resultados, é a eliminação máxima possível das vibrações que podem ocorrer na estrutura, isto porque “o detector é sensível a uma faixa de frequências características de 3100 a 3300 Hz” (MELO, J. L., 2002). Com isso qualquer tipo de vibração que ocorra na estrutura, pode afetar o desempenho da captação das ondas e resultados obtidos, fazendo-se necessário um isolamento vibracional. Em geral, um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor). A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para energia potencial. Se o sistema for amortecido, certa quantidade de energia é dissipada em cada ciclo de vibração e deve ser substituída por uma fonte externa, se for preciso manter um regime permanente de vibração. (Rao, Singiresu S., 2008). Já existem estudos de isolamento vibracional para o detector, e, seguindo essa linha, sua estrutura deverá ter uma extensão desse isolamento, cuidando

para haver o mínimo de contato, ou nenhum, entre a estrutura externa (**figura 5**) e a estrutura interna que servirá de apoio para a câmara e a esfera do detector (**figura 6**).



Figura 5. Desenho Estrutura externa

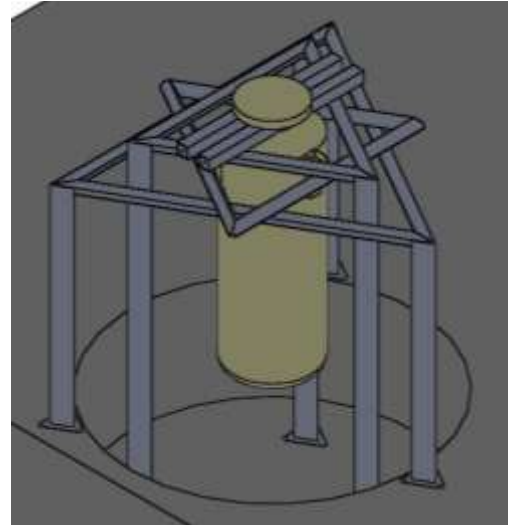


Figura 6. Desenho Estrutura interna

4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Todo o processo foi realizado no laboratório da Divisão de Astrofísica do INPE, utilizando os computadores do próprio laboratório. Equipamentos de medição como paquímetros, trena para efetuar medidas de alguns componentes do detector também foram utilizados. Entretanto, na maior parte do estudo, foi utilizado o SolidWorks, e, toda a metodologia de pesquisa, visando alcançar os objetivos citados neste relatório

4.1 Módulos utilizados no SolidWorks

- Modulo Part: foi feito o modelamento das peças faltantes que compõem a estrutura, como também os ajustes e modificações necessários.
- Módulo Assembly: montagem das peças formando subconjuntos e/ou conjunto de montagem final.
- Módulo Drawing: detalhamento de cotas, cortes, seções em 2D na folha, além das informações de manufatura contidas em cada peça desenhada.



5. RESULTADOS

Foi feito um estudo de todos os desenhos que fazem parte do projeto da estrutura e observou-se no decorrer dessa primeira etapa do projeto, algumas necessidades de ajustes de alguns desenhos, os quais necessitarão de algumas correções e modificações. Essas correções e modificações serão feitas e, algumas peças que não estavam catalogadas, que pertenciam a estrutura externa, deverão ser refeitas e armazenadas junto ao conjunto de montagem externa do desenho. Os resultados foram os esperados dentro do que era proposto, entretanto, devido a pandemia do Covid-19, o projeto foi um pouco prejudicado e, algumas partes do projeto, tiveram de ser realizadas remotamente, mas, em contínua comunicação entre os membros participantes do projeto, orientador e aluno. No momento, está sendo realizado a análise da estrutura através de cálculos analíticos e numéricos, visando chegar o mais rápido possível à fabricação a estrutura, dentro dos fatores de segurança que deve haver.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram abordadas as etapas do projeto do Cálculo Estrutural do Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg, o qual propõe-se a projetar, desenhar, calcular e fabricar (por uma empresa terceirizada), uma estrutura metálica que supra as necessidades de fixação do detector, de maneira que essa estrutura atenda também as normas de segurança e adeque-se ao ambiente do laboratório onde será montada. Este trabalho é de suma importância para a manutenção de pesquisas voltadas às ondas gravitacionais, visto que, a detecção das ondas gravitacionais, abre uma nova janela para os estudos na Astrofísica e fenômenos no espaço que até então não eram observáveis, e, o Brasil, possuindo um equipamento de alto nível, desenvolvido por grandes cientistas nacionais, detém grandes possibilidades de caminhar junto às pesquisas feitas nos EUA e em outros países de todo o mundo.



7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Odylio. Detecção de ondas gravitacionais abriu novo campo na astronomia, diz pesquisador do Inpe. **Ministério da Ciência, Tecnologia e Informações**, 2018. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/salaImprensa/noticias/arquivos/2018/07/Deteccao_de_ondas_gravitacionais_abriu_novo_campo_na_astronomia_diz_pesquisador_do_Inpe.html?searchRef=nobel&tipoBusca=expressaoExata>. Acesso em 24 jun. 2020.

BLODGETT, Omer W. Design of Welded Structures. 2ª Edição. Cleveland: The James F Lincoln Arc Welding Foundation, 1966.

C. F. DA SILVA COSTA; O. D. AGUIAR. Spherical gravitational wave detectors: MiniGRAIL and Mario Schenberg. *Journal of Physics: Conference Series*. São Paulo, v.484, p.1-2, 2014.

DOAÇÃO de detector de ondas gravitacionais paralisa projeto brasileiro. **Jornal da Usp**, 2016. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/universidade/doacao-de-detector-de-ondas-gravitacionais-paralisa-projeto-brasileiro/>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

J. C. N. DE ARAUJO; O. D. MIRANDA; O. D. AGUIAR. Gravitational wave background from Population III black hole formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. São José dos Campos, v.330, p.651–659, 2002.

JR, Willian D Callister. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MELO, J. L. Sistemas de isolamento vibracional e de acoplamento antena-transdutores para o protótipo de um detector de ondas gravitacionais. 2002. 199p. (Doutorado, Ciência Espacial/Astrofísica) – INPE, São José dos Campos, 2002.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

NOVO evento de ondas gravitacionais observado pelo LIGO-Virgo detecta o choque de dois objetos compactos de massas bem diferentes. **Inpe**, 2020. Disponível em: <http://www.das.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5479>. Acesso em: 25 jun. 2020.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. Estruturas Metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos. 2ª Edição. São Paulo: Blucher, 2005.

RAO, Singiresu. Mechanical Vibrations. 4ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SERGIO RICARDO FURTADO. Desenvolvimento de transdutores paramétricos de alta sensibilidade para o detector de ondas gravitacionais Mário Schenberg. 2009. 289p. (Doutorado, Ciência Espacial/Astrofísica) – INPE, São José dos Campos, 2009.