



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



## **DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA PARA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS EUTÉTICAS EM MACROGRAVIDADE**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)**

**Plínio Ivo Gama Tenório (Fatec São José dos Campos, Bolsista  
PIBIC/CNPq)  
E-mail: [plinio.tenorio@fatec.sp.gov.br](mailto:plinio.tenorio@fatec.sp.gov.br)**

**Dr. Rafael Cardoso Toledo (LAS/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [rafael@las.inpe.br](mailto:rafael@las.inpe.br)**

**Dr. Chen Ying An (LAS/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [chen@las.inpe.br](mailto:chen@las.inpe.br)**

#### **COLABORADORES**

**Dr. Irajá Newton Bandeira (LAS/CTE/INPE)  
Me. Edson Fernando Fumachi (LAS/CTE/INPE)  
Eng. Filipe Estevão de Freitas (LAS/CTE/INPE)**

**Julho de 2015**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



## **DESENVOLVIMENTO DE UMA CENTRÍFUGA PARA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS EUTÉTICAS EM MACROGRAVIDADE**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)**

Plínio Ivo Gama Tenório (Fatec São José dos Campos, Bolsista  
PIBIC/CNPq)  
E-mail: [plinio.tenorio@fatec.sp.gov.br](mailto:plinio.tenorio@fatec.sp.gov.br)

Dr. Rafael Cardoso Toledo (LAS/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [rafael@las.inpe.br](mailto:rafael@las.inpe.br)

Dr. Chen Ying An (LAS/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [chen@las.inpe.br](mailto:chen@las.inpe.br)

#### **COLABORADORES**

Dr. Irajá Newton Bandeira (LAS/CTE/INPE)  
Me. Edson Fernando Fumachi (LAS/CTE/INPE)  
Eng. Filipe Estevão de Freitas (LAS/CTE/INPE)

Julho de 2015

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo projetar e manufaturar uma centrífuga capaz de simular as rotações dos voos suborbitais do VSB-30 (veículo suborbital) em laboratório e realizar ensaios de solidificação materiais em macrogravidade para o Laboratório Associado de Sensores e Materiais da Coordenadoria de Tecnologias Espaciais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/CTE/INPE). É de consenso na literatura, que a gravidade afeta de forma direta ou indireta a solidificação de metais e suas ligas, e que a centrífuga é um equipamento capaz de simular ambientes de macrogravidade. O VSB-30 atinge durante o voo ascendente cerca de 3 rps (revoluções por segundo). Dessa forma, buscou-se projetar uma centrífuga que fosse estruturalmente resistente, leve e com baixo custo para atender esse requisito. Além disso, a centrífuga foi também projetada para proporcionar ensaios de solidificação a altas acelerações, que tem como restrições o comprimento máximo do braço e a massa do forno. Adotando esses critérios, foi desenvolvido um pré-projeto estabelecendo o motor elétrico a ser utilizado e a distribuição das forças (cargas) na estrutura, assim foram desenvolvidos protótipos em ambiente CAD (*Computer Aided Design*) da estrutura metálica e se realizou simulações em elementos finitos para verificar se a deformação máxima seria aceitável. Desenvolveu-se também, um contato rotativo elétrico para atender aos experimentos. Com a etapa de projeto e modelagem em CAD concluídas a manufatura foi realizada, utilizando métodos convencionais como, soldagem de barras, usinagem e fresamento.

**Palavras-chave:** Centrífuga; Macrogravidade; Solidificação; Ligas Eutélicas.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	8
2. Fundamentação Teórica.....	11
2.1. Física da centrífuga na solidificação de materiais .....	11
2.2. Sistemas articulados planos .....	12
3. Projeto da Centrífuga.....	13
3.1. Conceitos Iniciais do Projeto .....	13
3.2. Motor .....	13
3.3. Inversor de Frequência.....	13
3.4. Estrutura Metálica .....	14
3.5. Contato Elétrico Rotativo .....	15
3.5.1. Anéis de Alumínio.....	15
3.5.2. Isolante .....	15
3.5.3. Montagem Interna.....	16
3.6. Eixo e rolamentos .....	16
3.7. Braço para simular as rotações do VSB-30 .....	17
4. Resultados e Discussões .....	18
4.1. Análise Estrutural .....	18
4.2. Estrutura Metálica .....	18
4.3. Contato Elétrico Rotativo .....	20
4.4. Centrífuga .....	20
5. Conclusão .....	22
6. Referências .....	23
APÊNDICE A .....	25
APÊNDICE B.....	27
APÊNDICE C.....	28

## LISTA DE FIGURAS

1 - Centrífuga do LAS/INPE. ....	9
2 – VSB-30. ....	10
3 – Forças na centrífuga.....	11
4 – Exemplo de configurações estável e instável de treliças. ....	12
5 – Motor W22 plus.....	14
6 - Inversor de Frequência CFW-08. ....	14
7 - a) Contato Elétrico Rotativo; b) Montagem do contato com o eixo. ....	15
8 - Anel de Alumínio em CAD.....	15
9 - Isolante em CAD.....	16
10 – Montagem Interna em CAD. ....	16
11 – Eixo em CAD. ....	16
12 - a) Rolamentos; b) rolamento de encosto. ....	17
13 - a) Vista inferior; b) vista superior do braço fixo.....	17
14 – Disco para simulação do voo suborbital.....	17
15 - Simulação no <i>SolidWorks</i> . ....	18
16 - Estrutura Metálica da Centrífuga em CAD.....	19
17 – Estrutura Metálica.....	19
18 – Detalhe da treliça. ....	19
19 – a) Material antes da fabricação; b) peças.....	20
20 - Contato Elétrico Rotativo.....	20
21 – Centrífuga. ....	21
22 – Centrífuga com o módulo de simulação de rotações. ....	21
A1 - Motor W22 plus 2D.....	26
B1 - Inversor de Frequência 2D. ....	27
C1 - Drop Tube do LAS/INPE. ....	29

## LISTA DE TABELAS

A1 - Dados do motor. ....	25
B1- Dados do Inversor de Frequência. ....	27

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C – graus Celsius

A – ampere

dB - decibéis

g – grama; aceleração da gravidade

HP – *horse power*

Hz – hertz

K – Kelvin

m- metros

s – segundo

RPM – rotação por minuto

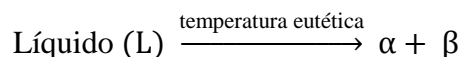
V – volt

## 1. Introdução

A metalurgia, ciência que lida com metais e suas ligas, constitui um dos domínios mais importante da produção de materiais. Praticada por vários milhares de anos, continua a ser um importante campo para investigações científicas.

A solidificação de metais e suas ligas depende de uma variedade de mecanismos, e estes são, geralmente, agrupados sob os termos genéricos de nucleação e crescimento, sendo que ambos são afetados de forma direta ou indireta pela gravidade. Até agora, a importância mais significativa para pesquisas em micro e macro gravidade na metalurgia foi a aceitação da gravidade como parâmetro independente na teoria solidificação. Segundo Kurz e Fisher (1992), até cerca da primeira metade do século XX a maior parte das teorias desenvolvidas para descrever os fenômenos da solidificação era baseada no pressuposto que não ocorria convecção (fenômeno associado diretamente à gravidade) durante o processo de solidificação, considerando a convecção desprezível e, portanto, não diretamente ligada ao processo, ou seja, os fenômenos da solidificação eram baseados em mecanismos de transporte puramente difusivos. A partir da década de 1970, a gravidade (convecção) vem aparecendo explicitamente em equações de teorias nas áreas de segregação, estabilidade morfológica, bem como nos crescimentos celulares e dendríticos e, assim, os experimentos em ambiente de microgravidade são um meio importante de validar essas teorias (HAMACHER et al., 1987; HURLE et al., 1987; FAVIER et al., 1987; DHINDAW, 2001, TOLEDO, 2013).

A análise de diversos diagramas de fases de sistemas binários revela, em grande parte, a ocorrência de uma transformação caracterizada pelo crescimento simultâneo de duas fases sólidas ( $\alpha$  e  $\beta$ ) a partir do líquido em ponto de fusão menor do que os apresentados pelos constituintes que compõem o sistema. Tal transformação é denominada eutética e ocorre em um ponto do diagrama de equilíbrio fases a uma temperatura e concentração específicas:



Este tipo de reação é uma reação invariante, porque se encontra em equilíbrio térmico, ou seja, a variação da energia livre de Gibbs é igual à zero, conseqüentemente o líquido e as soluções sólidas coexistem e estão em equilíbrio químico, e a temperatura permanece constante durante a transição de fase.

A solidificação de uma liga eutética binária envolve a nucleação e o crescimento de duas fases,  $\alpha$  e  $\beta$ , que se interferem mutuamente. A morfologia observada nessas ligas é decorrente da nucleação e do crescimento dessas fases. Portanto, os fatores que influenciam a nucleação e o crescimento (gradiente térmico na fase líquida; velocidade de crescimento das fases sólidas; presença de impurezas na liga) determinam as microestruturas resultantes e conseqüentemente afetam nas propriedades físicas da liga.

O uso de centrífugas para o processamento e fundição de materiais é uma prática antiga. Como por exemplo, as centrífugas de bancada e ultra centrífugas, a primeira por décadas é utilizada para separar partículas coloidais de líquidos, já a segunda na separação de moléculas pesadas de soluções, e ocasionalmente para o crescimento de cristais. A utilização de uma centrífuga é justificada porque a mesma pode proporcionar variações na aceleração e na convecção fatores que influencia no



processamento/solidificação dos materiais, o que pode resultar na produção de materiais únicos que não podem ser obtidos pelos métodos convencionais (gravidade terrestre)(REGEL, WILCOX 1997; FREITAS, 2011).

A utilização de centrífugas para o processamento de materiais utilizando a alta gravidade é realizado em poucos lugares (FRIEDRICH, MÜLLER 1997). Devido a isso (AN et al., 1997) desenvolveu para o Laboratório Associado de Sensores e Materiais da Coordenadoria de Tecnologias Espaciais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/CTE/INPE), uma pequena centrífuga para acelerações de até 10g atingindo temperaturas de superiores a 500°C e após algum tempo de utilização foi restaurada por (FREITAS, 2011).

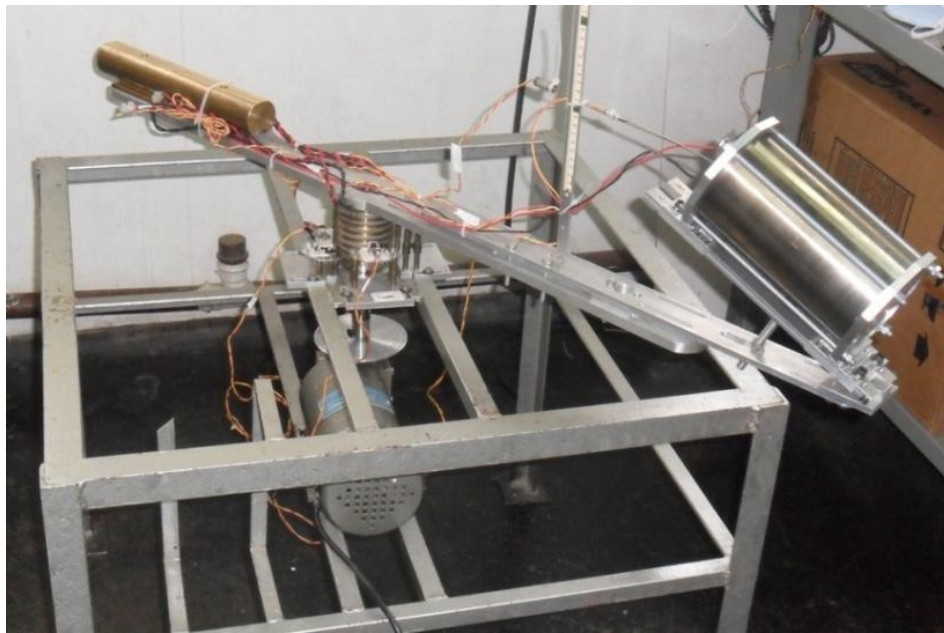


Figura 1 - Centrífuga do LAS/INPE.  
FONTE: FREITAS (2011)

A proposta de uma nova centrífuga para o LAS/INPE se deu após a atualização realizada por Freitas, onde se observou que a centrífuga existente não atendia mais as necessidades do laboratório, devido a sua capacidade de carga limitada e mau controle de velocidade.

Assim, este trabalho de Iniciação Científica tem como objetivo projetar e manufaturar uma nova centrífuga capaz de simular as rotações dos voos suborbitais do VSB-30 (Figura 2) em laboratório e realizar ensaios de solidificação materiais em macrogravidade.

O trabalho é apresentado com a seguinte estrutura: o capítulo 2 consiste num levantamento bibliográfico e apanhado teórico sobre centrífuga, sua utilização e conceitos importantes, além de, uma breve introdução sobre análise estrutural; no capítulo 3 é apresentado o projeto da centrífuga, desenhos e materiais que foram utilizados; no capítulo 4 são apresentados os resultados dos processos de fabricação e a montagem da centrífuga; e finalmente, no capítulo 5, as conclusões.

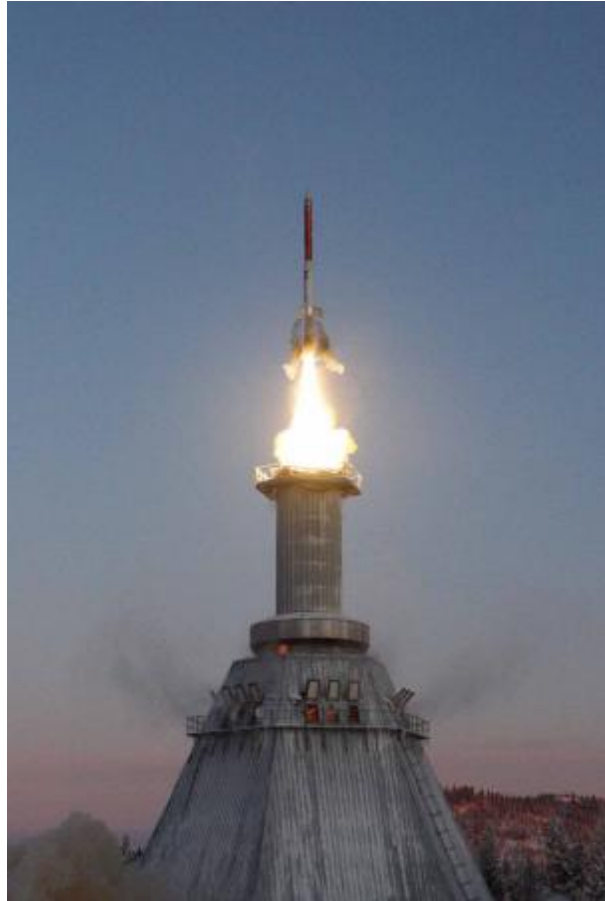


Figura 2–VSB-30.  
FONTE: IAE (2015)

## 2. Fundamentação Teórica

### 2.1. Física da centrífuga na solidificação de materiais

Quando um fluido está girando em uma centrífuga com uma determinada velocidade angular ( $\omega$ ), é gerada uma aceleração centrífuga e quando essa rotação ocorre na Terra a essa aceleração é somada a da gravidade ( $g$ ) (Figura 3), além disso, é incluída a aceleração de Coriolis, que como efeito causa uma deflexão no fluido e cria circulação (REGEL, WICOX 1997; DOMELEN 2015).

$$g_a = \omega^2 r$$

$$F_{coriolis} = -2m (\omega \times V_r)$$

Onde:  $r$  é a distancia do eixo de rotação;  $m$  é a massa em rotação;  $V_r$  é a velocidade rotacional.

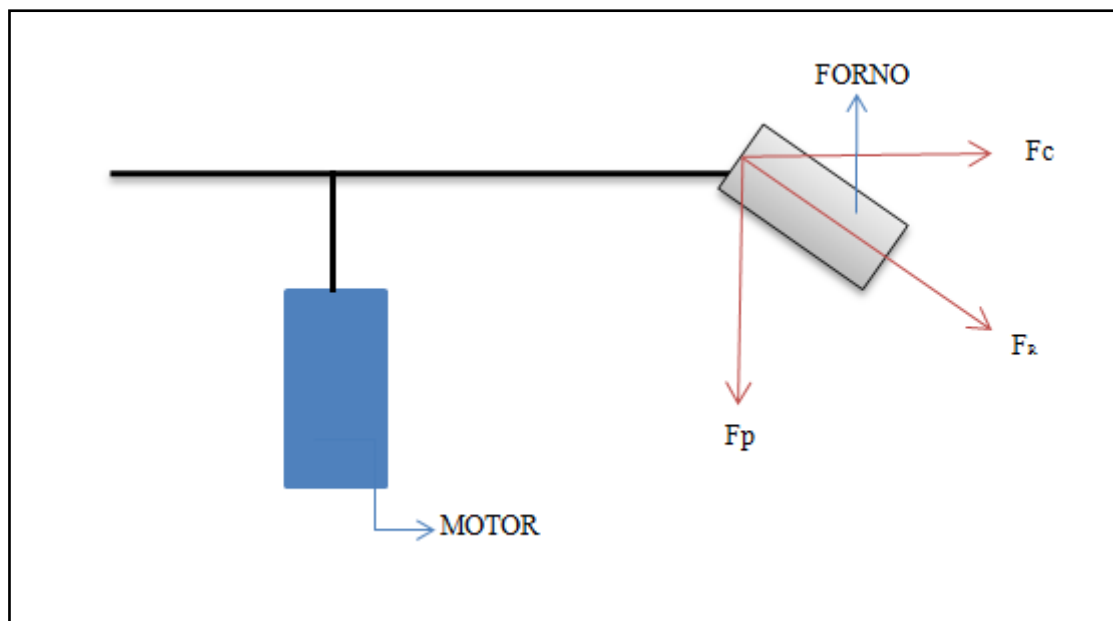


Figura 3 – Forças na centrífuga

Assim, quanto maior a aceleração resultante, em geral, maior convecção, maior sedimentação da segunda fase e aumento do peso do material. Tais alterações podem causar: modificação na transferência de calor e massa em todo o sistema; alterar a posição e a forma da interface sólido-líquido; colaborar a incorporação de impurezas no estresse térmico no sólido e na propagação de discordâncias e contornos e grão; sedimentação de partículas estranhas; alteração no tamanho de grão; diminuir a nucleação de novos cristais durante o crescimento (REGEL, WILCOX 1994; FREITAS 2011).

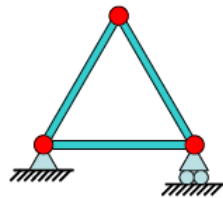
Para determinar qual o RPM necessário para causar uma aceleração resultante desejada para os ensaios com as ligas eutéticas, foi desenvolvido um algoritmo que parte do determinado princípio que  $a_c = F_g \cdot \cos(\tan^{-1}(1/a_c))$ , chegando assim na seguinte equação:

$$\text{RPM} = \frac{60 \cdot a_c \cdot 9,8}{4\pi^2 \cdot r}$$

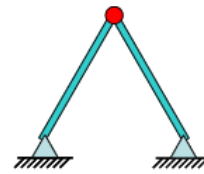
## 2.2.Sistemas articulados planos

O sistema articulado de planos, mais conhecido como treliça, é um sistema estável de barras rígidas coplanares ligadas entre si por extremidades rotuladas e com o exterior (Figura 4). Essa estabilidade é proveniente da inexistência de atrito nas extremidades das articulações e que as forças são aplicadas nos nós, devido a isso, as cargas só têm dois sentidos, o de compressão e o de tração, e quando tal carga é aplicada a estrutura é capaz de distribuir pelas barras (ROMÃO 2015).

*Configuração estável*



*Nota: esta estrutura de configuração estável pode ser desmontada em*



apoiado sobre



*Configuração instável*

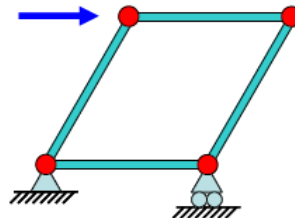
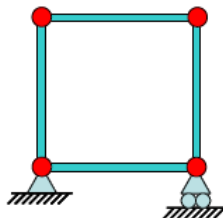


Figura 4—Exemplo de configurações estável e instável de treliças.  
FONTE: ROMÃO (2015)

Para um projeto deste tipo é necessário conhecer o quanto a estrutura suporta e atualmente existem diversas maneiras de simular o comportamento mediante a aplicação de cargas, dentre essas se encontra o método de Elementos Finitos, seu objetivo é determinar o estado de tensão e de deformação de geometrias sólidas. (AZEVEDO, 2003)

### **3. Projeto da Centrífuga**

#### **3.1. Conceitos Iniciais do Projeto**

A nova centrífuga deveria atender requisitos específicos, sendo assim, a primeira atividade foi elencar quais as necessidades do projeto. Inicialmente a demanda por um modelo novo se deu devido à capacidade de carga limitada e mau controle de velocidade da anterior. Porém, outros critérios também foram adicionados, são esses: ser estruturalmente resistente, leve, com baixo custo, dimensionado conforme o tamanho da sala em que iria ocupar e capaz de obter pelo menos 180 RPM (rotação do VSB-30).

Em reuniões iniciais ficou definido algumas especificações sobre os materiais utilizados e métodos de fabricação, além de esboços preliminares (croquis) do leiaute da nova centrífuga.

Sobre os materiais as escolhas feitas foram:

- a) Estrutura Metálica: cantoneira de 1,5” de aço ASTM A36;
- b) Contato Rotativo Elétrico: peças de Alumínio e PVC;
- c) Eixo: Aço 1045.

Sobre os métodos de fabricação:

- a) Estrutura Metálica: fresamento, corte das barras, soldagem e acabamento;
- b) Contato Rotativo Elétrico: usinagem;
- c) Eixo: usinagem.

Além das peças que seriam fabricadas no próprio INPE, o protótipo também deveria conter outros componentes como motor, rolamentos e cablagem elétrica.

#### **3.2. Motor**

O motor é um dos componentes mais importantes do protótipo, tanto para os ensaios de solidificação quanto estruturalmente. Sua influência na estrutura foi determinante para o leiaute final do projeto. Devido a necessidade de maiores rotações por minuto (RPM) e maior estabilidade nos experimentos o motor escolhido foi o W22 plus (Figura 5), outros fatores relevantes na escolha foram a potência e o número de pólos, que influência no torque do motor. No Apêndice A estão os dados e o desenho do motor.

#### **3.3. Inversor de Frequência**

O inversor de frequência tem a função de controlar a velocidade de motores trifásicos. O escolhido para o projeto foi o CFW-08 (Figura 6), que tem opções de controle vetorial (VVC: *voltage vector control*) ou V/F (escalar) (WEG, 2009). No Apêndice B estão os dados do inversor de frequência.



Figura 5 – Motor W22 plus.



Figura 6 - Inversor de Frequência CFW-08.  
FONTE: WEG (2015)

### 3.4.Estrutura Metálica

Com base na estrutura desenvolvida por An (1997) e restaurada por Freitas (2011), teve início o trabalho de projetar uma nova estrutura metálica para a centrífuga, com a mesma filosofia da primeira, ter baixo custo, porém, mais resistente que a anterior.

Alguns conceitos já haviam sido determinados, como:

- a) material: cantoneira de 1,5” de aço ASTM A36;
- b) altura: ~ 0,7 m;
- c) área superior: 1 m<sup>2</sup>.

Com isso, deu-se inicio a etapa de modelagem em ambiente CAD (*Computer Aided Design*).

### 3.5. Contato Elétrico Rotativo

Para captar dados do experimento foi construído um eixo rotativo com anéis de alumínio (Figura 7). Essa peça, em especial, foi uma adaptação do contato já criado por An (1997), tendo somente a dimensionado para o novo motor, eixo e braço.

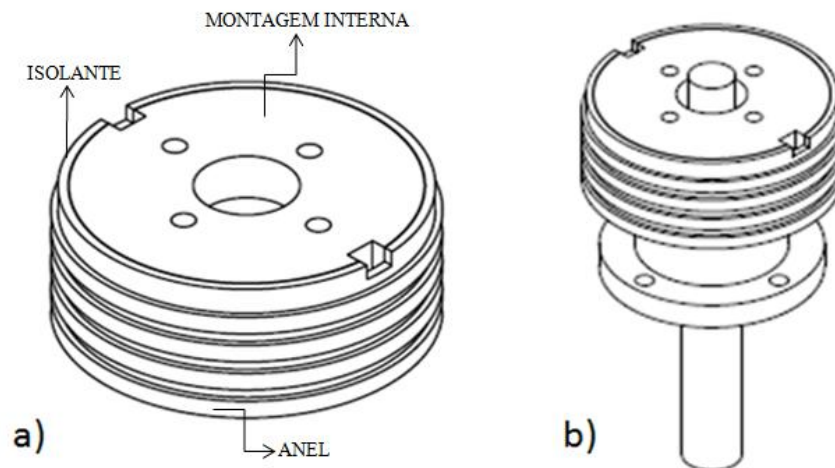


Figura 7 - a) Contato Elétrico Rotativo; b) Montagem do contato com o eixo.

#### 3.5.1. Anéis de Alumínio

Na montagem do contato elétrico rotativo tem quatro anéis de alumínio (Figura 8), sua função é transmitir o sinal para as torres de grafite.

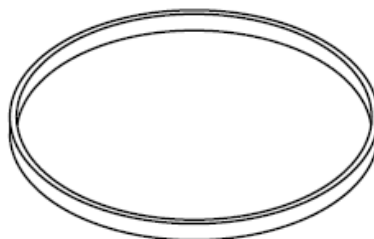


Figura 8 - Anel de Alumínio em CAD.

#### 3.5.2. Isolante

Entre os anéis e o centro da montagem, que são de alumínio, existe um material isolante, colocado ali para que não haja interferência no sinal. O isolante foi feito de PVC (Figura 9).

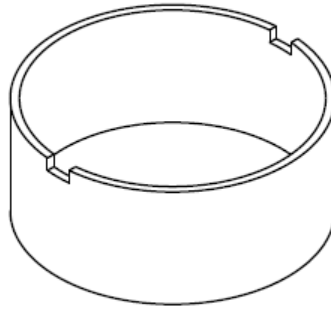


Figura 9 - Isolante em CAD.

### 3.5.3. Montagem Interna

Para que todo conjunto entre em rotação é necessário que uma peça seja fixada no eixo do motor. Essa montagem (Figura 10) é a que transmite o movimento do motor para o braço, nela também estão os rolamentos e o eixo.

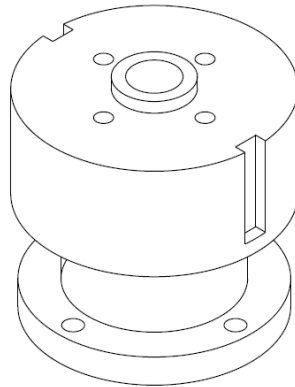


Figura 10 – Montagem Interna em CAD.

### 3.6.Eixo e rolamentos

Para transmitir as rotações do motor para o braço, houve a necessidade de projetar um eixo (Figura 11). No eixo foram postos três rolamentos, sendo um de encosto (Figura 12).

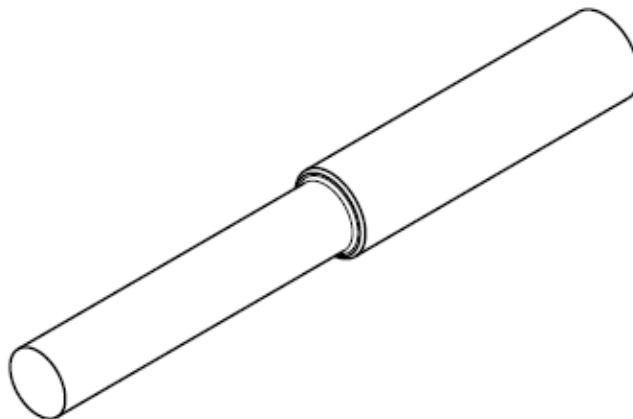


Figura 11– Eixo em CAD.



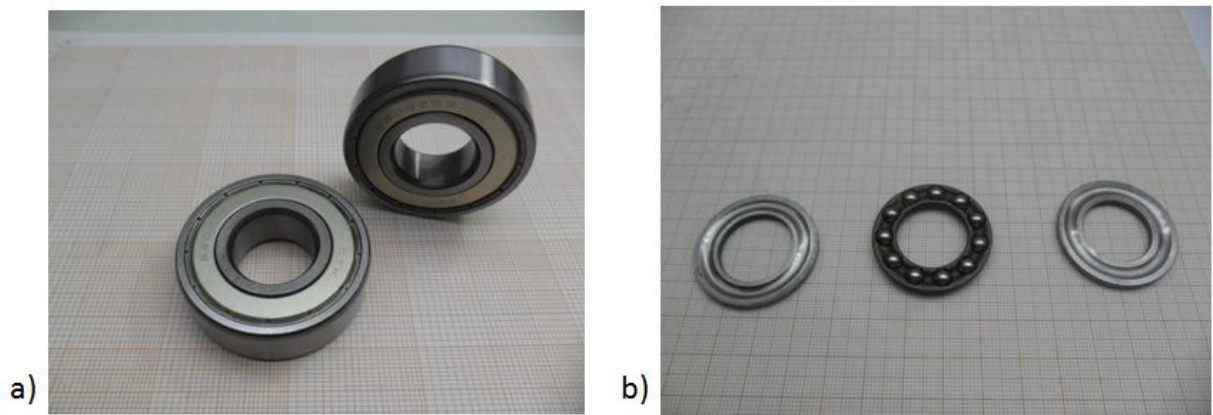


Figura 12 - a) Rolamentos; b) rolamento de encosto.

### 3.7. Braço para simular as rotações do VSB-30

Na junção forno/centrífuga, foi desenvolvido um braço menor (Figura 13), que será fixo e nele é que serão parafusados tanto o disco (Figura 14), no caso da simulação do voo suborbital, e o braço maior, para a realização dos ensaios solidificação em alta gravidade.

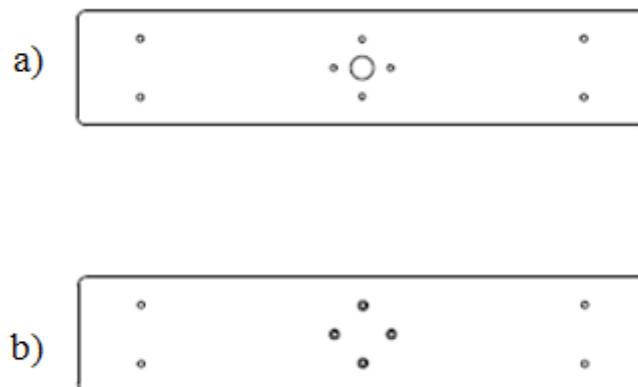


Figura 13 - a) Vista inferior; b) vista superior do braço fixo.

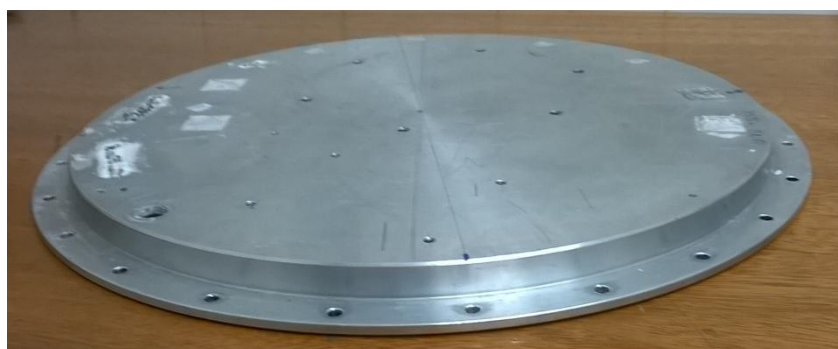
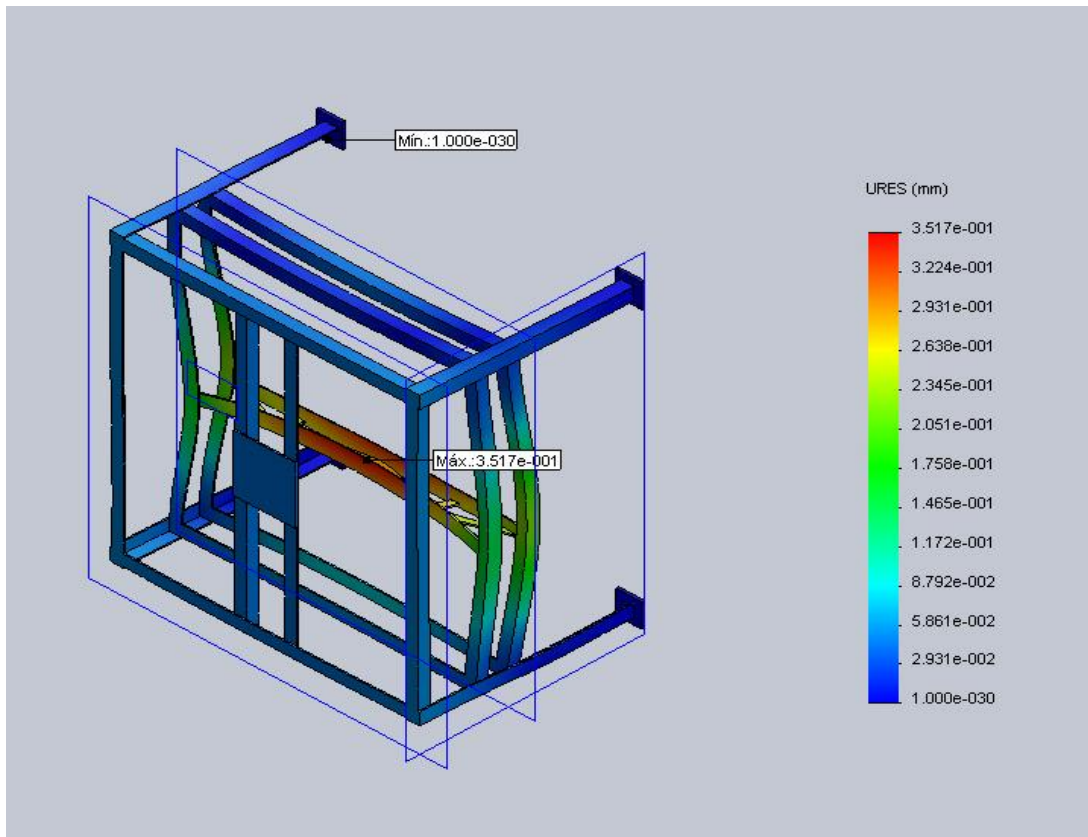


Figura 14 – Disco para simulação do voo suborbital.

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1. Análise Estrutural

Para comprovar a eficiência estrutural da estrutura metálica da centrífuga, realizou-se uma simulação de elementos finitos em *software* (Figura 15). Foi utilizada uma força de 600N, com fator de segurança (S) de 1,5.



Como representado na Figura 13, a deformação máxima será de  $3,517 \times 10^{-1}$  mm. Com isso a estrutura foi considerada resistente o suficiente para ser utilizada.

### 4.2. Estrutura Metálica

Dos modelos criados em ambiente CAD o selecionado para fabricação está presente na Figura 16. A estrutura foi construída no Serviço de Manufatura do INPE, e para a fabricação foram cortadas as cantoneiras de aço e soldadas, Figuras 17 e 18.

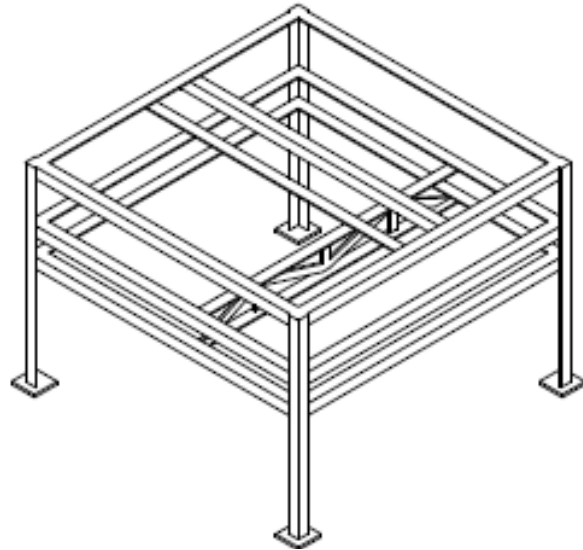


Figura 16 - Estrutura Metálica da Centrífuga em CAD.



Figura 17 – Estrutura Metálica.



Figura 18 – Detalhe da treliça.

### 4.3. Contato Elétrico Rotativo

O contato elétrico rotativo foi feito na própria oficina do LAS/INPE, e para sua fabricação, tarugos dos materiais foram usinados e a placa para a fixação da montagem foi fresnada (Figuras 19), com todas as peças prontas concluiu-se a montagem (Figura 20).

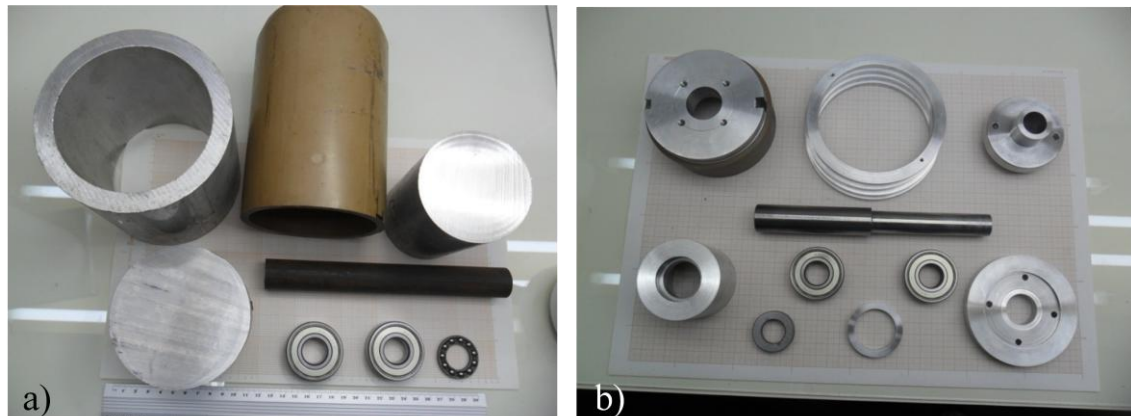


Figura 19 – a) Material antes da fabricação; b) peças.



Figura 20 - Contato Elétrico Rotativo.

### 4.4. Centrífuga

Com a união de todas as peças, estrutura e submontagens a etapa de construção da centrífuga estava concluída (Figura 21). Além disso, todo o sistema para a simulação das rotações do VSB-30 está concluído (Figura 22).



Figura 21– Centrífuga.



Figura 22– Centrífuga com o módulo de simulação de rotações.

## **5. Conclusão**

Através de um projeto detalhado e de métodos convencionais de fabricação foi possível fabricar uma nova centrífuga para o LAS/CTE/INPE.

A nova centrífuga é capaz de realizar dois tipos de ensaios: simulação das rotações e condições do VSB-30 em solo; e solidificação de materiais em alta gravidade. O módulo que permite a simulação do VSB-30 está concluído e os primeiros ensaios começarão a ser realizados. O módulo de solidificação se encontra em fase de planejamento.

## 6. Referências

- AN, C. Y.; RUSSO, L. C.; RIBEIRO, M. F.; BANDEIRA, I. N. A Low Cost Centrifuge for Materials Processing in High Gravity. In: Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.
- AZEVEDO, A. F. M. Método dos Elementos Finitos. 1º Edição. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2003.
- DHINDAW, B. K. Solidification under microgravity. *Sadhana*, v. 26, p. 59-69, 2001.
- DOMELLEN, D. J. V. Traduzido por SILVA, M. E. S.; SANTOS, B. V. Disponível em:  
[http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio\\_Emerson/flg0253/2014/aula7/Leitura\\_complementar\\_Forca\\_de\\_Coriolis.pdf](http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/flg0253/2014/aula7/Leitura_complementar_Forca_de_Coriolis.pdf). Acesso em: 06/07/2015.
- IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço. VSB -30. Disponível em:  
<http://www.iae.cta.br/site/page/view/pt.vsb30.html>. Acesso em: 13/07/2015.
- FAVIER, J. J.; HUNT, J. D.; SAHM, P. R. Metals and alloys. In: WALTER, H. U. (Ed.). Fluid sciences and materials science in space: a european perspective. Berlin, Germany: Springer, 1987. cap. XIV, p. 477-516.
- FREITAS, F. E. Utilização de uma centrífuga de baixo custo para estudo da influência da alta gravidade na solidificação da liga eutética PbSn. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2011.
- FRIEDRICH, J.; MÜLLER, G. Convection in crystal growth under high gravity on a centrifuge. In: Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.
- HAMACHER, H.; FITTON, B.; KINGDON, J. The environment of earth-orbiting systems. In: WALTER, H. U. (Ed.). Fluid sciences and materials science in space: A european perspective. Berlin, Germany: Springer, 1987. cap. I, p. 1-50.
- HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. 7ª edição. São Paulo. Person Pretince Hall, 2009.
- HURLE, D. T. J.; MIULLER, G.; NITSCHKE, R. Crystal growth from the melt. In: WALTER, H. U. (Ed.). Fluid sciences and materials science in space: A european perspective. Berlin, Germany: Springer, 1987. cap. X, p. 313-354.
- REGEL, L.L.; WILCOX, W.R. Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.
- REGEL, L.L.; WILCOX, W.R. Materials Processing in High Gravity. New York: Plenum Press, 1994.
- TOLEDO, R. C. Estudo da solidificação da liga metálica eutética BiInSn em ambiente de microgravidade utilizando tubo de queda livre, "drop tube". 115 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - INPE, São José dos Campos, 2009.

TOLEDO, R. C. Estudo da solidificação de ligas metálicas eutéticas em ambiente de microgravidade. 217 p. Tese (Tese de Doutorado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

WEG. Seleção de Motores Elétricos. Disponível em:

[http://ecatalog.weg.net/TEC\\_CAT/tech\\_motor\\_dat\\_web.asp](http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_motor_dat_web.asp). Acesso em: 29/06/2015.

WEG. Manual do Usuário, Inversor de Frequência CFW-08. 2009. 213 p.

WEG. Drives, Inversor de Frequência. Disponível em:

<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW08>. Acesso em: 30/06/2015.

XAVIER, R. Sistemas Articulado de Planos. Disponível em:

[http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/mec1/aulas\\_praticas/elementos\\_apoio/Sistemas%20articulados%20planos.pdf](http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/mec1/aulas_praticas/elementos_apoio/Sistemas%20articulados%20planos.pdf). Acesso em: 13/07/2015



## APÊNDICE A

W22 plus	
Carcaça	90S
Potência	1 HP
Frequência	60 Hz
Polos	6
Rotação nominal	1140
Escorregamento	5,00%
Tensão nominal	220/380 V
Corrente nominal	3,40/1,97 A
Corrente de partida	18,7/10,8 A
Ip/In	5,5
Corrente a vazio	2,53/1,46 A
Conjugado nominal	6,29 Nm
Conjugado de partida	240%
Conjugado máximo	260%
Categoria	---
Classe de isolamento	F
Elevação de temperatura	80 K
Tempo de rotor bloqueado	24 s (quente)
Fator de serviço	1,15
Regime de serviço	S1
Temperatura ambiente	(-20°C - +40°C)
Altitude	1000
Proteção	IP55
Massa aproximada	19 kg
Momento de inércia	0,00549 kgm <sup>2</sup>
Nível de ruído	49 dB(A)

Tabela A1 - Dados do motor.

FONTE: WEG (2015)

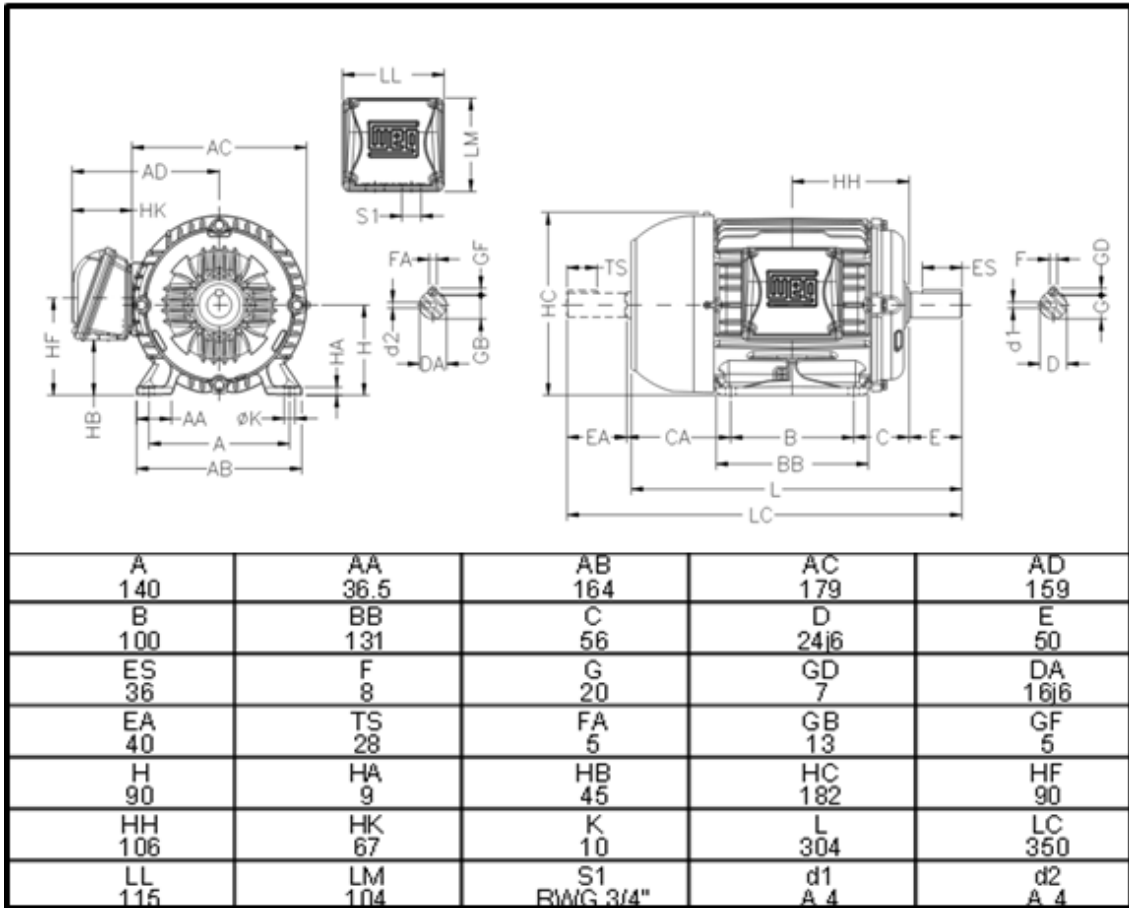


Figura A1 - Motor W22 plus 2D.  
 FONTE: Adaptado de WEG (2015)

## APÊNDICE B

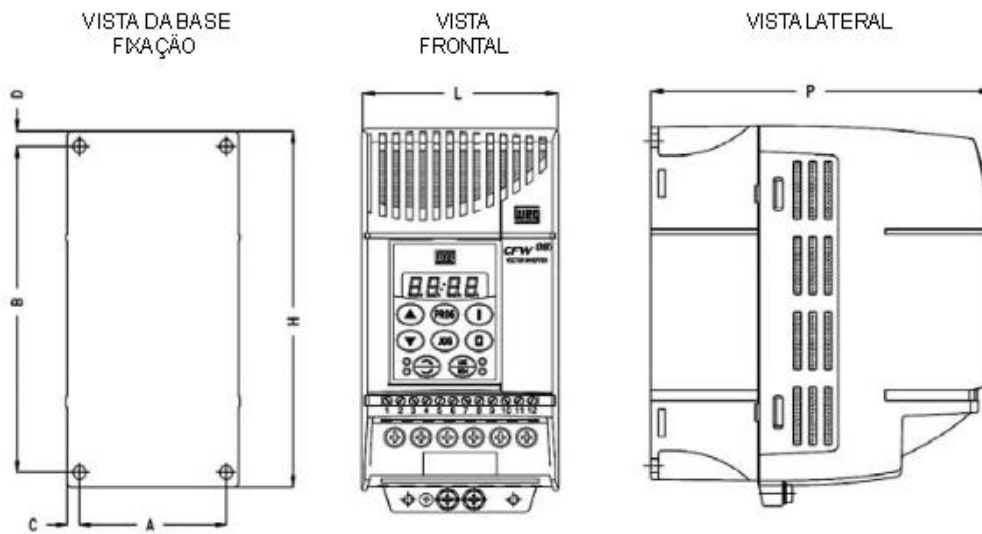


Figura B1 - Inversor de Frequência 2D.  
 FONTE: Adaptado de WEG (2009)

Inversor de Frequência CFW-08	
Corrente Nominal de Saída para 220 a 240 V	4,0 A
Número de fases de alimentação	Trifásico
Tensão de Alimentação	200 - 240 V

Tabela B1- Dados do Inversor de Frequência.  
 FONTE: WEG (2009)

## APÊNDICE C

### Atividades complementares

Familiarização do bolsista em técnicas de laboratório de microgravidade desenvolvidos pelo Grupo TECMAT/LAS - INPE. Atualização da pesquisa bibliográfica dos temas abordados no laboratório (solidificação de ligas eutéticas; ciências dos materiais; técnicas de solidificação; preparação de amostras; técnicas de análise microestrutural).

Durante o período de 10/2014 – 06/2015 foram realizadas as etapas descritas abaixo.

*a) Preparação da carga de BiCd eutético para ensaio no tubo de queda livre.*

A carga da liga eutética Bi<sub>60</sub>Cd<sub>40</sub> % em peso preparada anteriormente foi dividida em pedaços menores no laboratório. Devido o instrumento de corte utilizado já ter sido utilizado em outros materiais, foi realizada uma limpeza na carga para retirar possíveis contaminantes da mesma. A limpeza da carga consistiu em por os pedaços junto com água deionizada em um becker e depois no ultrassom, após esse procedimentos foram realizados enxágues com álcool e por fim colocado para secagem em uma estufa. Posteriormente, a carga foi retirada estufa e armazenada em um ambiente limpo (caixa fechada, com atmosfera de nitrogênio).

*b) Ensaios no tubo de queda livre do LAS/INPE.*

Foi utilizado o tubo de queda livre (*drop tube*) do LAS/INPE (TOLEDO, 2013), Figura C1, para processar as amostras da liga eutética Bi<sub>60</sub>Sn<sub>40</sub> % em peso. O tubo possui comprimento de 3,0 m e diâmetro de 80 mm, e proporciona um tempo de aproximadamente 1 s de queda livre. No interior do forno, foi utilizada uma ampola de quartzo de 9x7 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento com diâmetro do furo de aproximadamente 500 µm.

Para obtenção das amostras, uma carga de aproximadamente 1,0 g da liga foi colocada na ampola de quartzo a qual foi fixada no forno do *drop tube*. Após o tubo ser fechado, ele foi evacuado à pressão de 5,3 Pa ( $\approx 4.10^{-2}$  Torr) e depois preenchido com 53,3 kPa ( $\approx 400$  mmHg) de nitrogênio para auxiliar na dissipação térmica das gotículas do material ejetado. O forno foi ligado e, após a estabilização da temperatura ( $\approx 250$  °C), foi desligado, provocando uma queda da temperatura da amostra. Quando essa atingia temperaturas entre 144 - 148°C (temperaturas próximas à temperatura de fusão da liga) era liberado gás nitrogênio ( $P \approx 70$  kPa  $\approx 0,7$  bar) na extremidade superior da ampola de quartzo para provocar uma diferença de pressão que ocasionava a queda da carga, na forma de gotículas aproximadamente esféricas, no coletor do tubo.

Até o momento foram realizados treze ensaios no *drop tube* com a liga de BiCd.



Figura C1- *Drop Tube* do LAS/INPE.  
FONTE: TOLEDO (2009)