

## DESENVOLVIMENTO DE UM FORNO PARA SOLIDIFICAÇÃO DE MATERIAIS EM FOGUETES DE SONDAÇÃO

Rafael Cardoso Toledo<sup>a</sup>, Filipe Estevão de Freitas, Chen Ying An<sup>b</sup>, Manuel Francisco Ribeiro, Irajá Newton Bandeira, Cesar Boschetti

Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE, Laboratório Associado de Materiais e Sensores – LAS

Avenida dos Astronautas, 1758, 12245-970, São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>a</sup>rafael@las.inpe.br, <sup>b</sup>chen@las.inpe.br

**Resumo:** O Projeto Microgravidade, da Agência Espacial Brasileira (AEB), tem como um dos objetivos a viabilização de experimentos científicos e tecnológicos em ambiente de microgravidade, realizados durante o voo parabólico suborbital dos foguetes de sondagem. Este trabalho apresenta os resultados da Operação Maracati II, onde foi qualificado um forno de solidificação de materiais, projetado para experimentos em microgravidade com temperaturas de até 900°C.

**Palavras-chave:** forno de solidificação, foguete de sondagem, voo suborbital, microgravidade

### 1 Introdução

Nas últimas décadas, a realização de experimentos em microgravidade tem envolvido pesquisas em diversas áreas de estudo, tais como biotecnologia, combustão, fármacos, materiais e medicina. Em 1998, a Agência Espacial Brasileira (AEB) criou o Programa de Microgravidade, com objetivo de patrocinar uma seqüência regular de vôos suborbitais com foguetes de sondagem, e também da possibilidade de utilizar as facilidades a bordo da Estação Espacial Internacional (ISS), oferecendo à comunidade científica brasileira oportunidades de desenvolver projetos para ambientes de microgravidade (Corrêa, 2005; An, 2001; Bandeira, 2007b).

Os vôos suborbitais são realizados por foguetes de sondagem, os quais são lançados de modo que possam realizar trajetórias parabólicas, sendo que, o ambiente de microgravidade é alcançado durante um trecho envolvendo o apogeu desta trajetória antes de entrar novamente na atmosfera, obtendo acelerações da ordem de  $10^{-4}g$  durante quatro a sete minutos (Figura 1). A plataforma contendo a carga útil (experimentos) é recuperada no mar com auxílio de paraquedas.



**Figura 1 – (a) Esquema de um voo parabólico do VS-30; (b) Foguetes de sondagem brasileiros para microgravidade.**

A Figura 1 mostra uma missão típica do VS-30, e os foguetes de sondagem utilizados nos projetos espaciais brasileiros: VS-30, VS-30/ORION, VSB-30 e VS-40, desenvolvidos pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA). Os foguetes têm como característica comum o fato de serem bi-estágio à propulsão sólida não controlada, com exceção do VS-30 que é mono-estágio, e são estabilizados aerodinamicamente por empenas. Independentemente dos veículos espaciais, os experimentos de solidificação de materiais em microgravidade também podem ser realizados nos tubos de queda livre (*drop tubes*) (Toledo, 2009a; Toledo, 2010b; Toledo, 2010c), onde o baixo custo e a possibilidade de uso contínuo destes equipamentos compensam as pequenas dimensões das amostras obtidas (~1mm) e o curto tempo de duração dos experimentos (~1s).

## 2 Forno de solidificação

O objetivo do projeto foi de construir e qualificar um forno compacto de solidificação para experimentos em microgravidade utilizando foguetes de sondagem. O forno tem como finalidade fundir e solidificar ligas metálicas e semicondutoras com ponto de fusão até 900°C, permitindo um rápido resfriamento compatível com o tempo de exposição ao ambiente de microgravidade oferecidos durante os vôos, para tal, as amostras utilizadas foram limitadas a um diâmetro de até 10 mm e comprimento de 120 mm (Bandeira, 2002a).

O forno (Figura 2) foi controlado e aquecido no solo, através do cordão umbilical do foguete. Após o lançamento, a temperatura do forno foi mantida por inércia térmica e, no ponto desejado da trajetória em microgravidade, o deslocamento axial de sua resistência elétrica foi acionado por um sinal temporizador para que as amostras, que permanecem fixas, fiquem localizadas na região fria do forno, proporcionando um rápido resfriamento. As temperaturas das amostras foram monitoradas por telemetria e também registradas num *data-logger* acoplado dentro do módulo eletrônico.



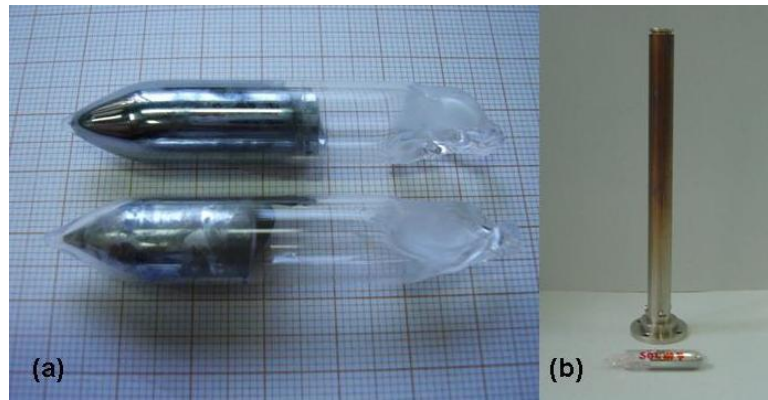
Figura 2 – Forno de solidificação com o módulo eletrônico e controlador de temperatura.

## 3 Operação Maracati II

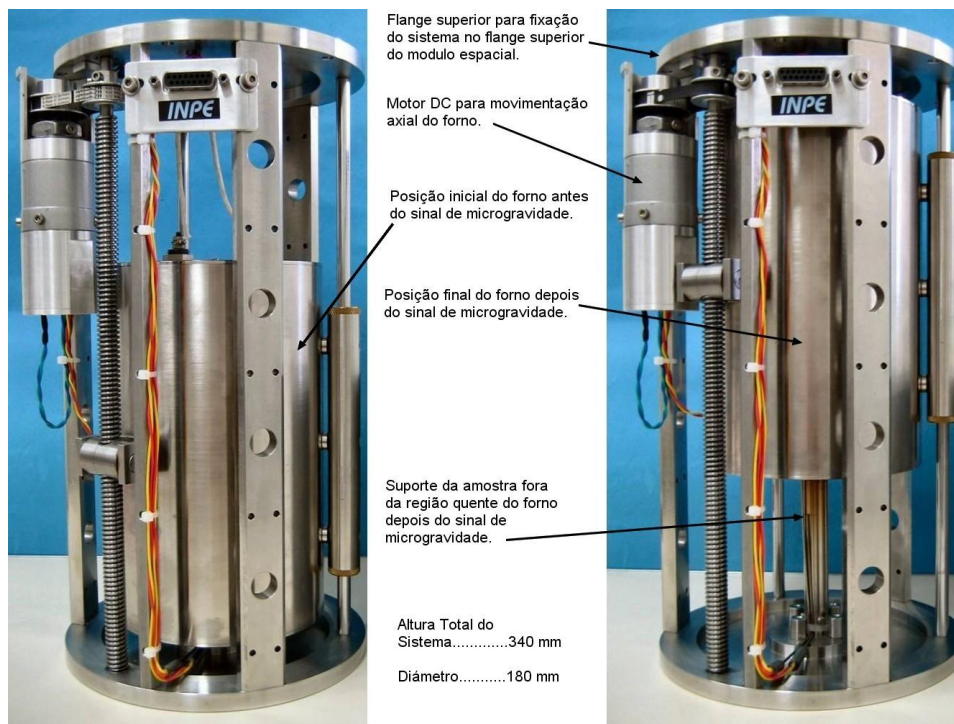
O 3º vôo suborbital do programa de microgravidade foi realizado em dezembro de 2010 e recebeu o nome de Operação Maracati II. Foi utilizado um foguete VSB-30, que continha dez experimentos de universidades e centros de pesquisa brasileiros. O vôo com apogeu de 242 km, teve a duração de 18 minutos, com 6 minutos em microgravidade. Um dos experimentos foi o Forno de Solidificação do Laboratório Associado de Materiais e Sensores (LAS/INPE) que foi projetado, construído e qualificado para vôos espaciais suborbitais (An, No prelo).

Neste vôo foram realizados experimentos de solidificação com duas ligas eutéticas: PbTe (10,9 Pb at.%) com ponto de fusão de 410°C e PbSn (26,1 Pb at.%) com ponto de fusão de 183°C. Cada uma das amostras (com massa de aproximadamente 13g) foi selada com uma pressão de 1 micro Torr, em ampola de quartzo de aproximadamente 65mm de comprimento e com os diâmetros externo e interno de 12 mm e 10 mm, respectivamente (Figura 3a). Para a proteção desta ampola contra choques e vibrações, foi utilizada uma porta amostras de aço inoxidável de 200 mm de comprimento e 14 mm de diâmetro interno, forrada internamente com manta de fibra de quartzo (Figura 3b). Esta cápsula é selada para que não haja vazamento da liga em caso de rachadura ou quebra das ampolas de quartzo.

O forno (Figura 4) foi ligado 30 minutos antes do lançamento e aquecido até 500°C. O sinal para seu deslocamento, para resfriamento das amostras, foi dado no instante que se iniciou a trajetória parabólica de microgravidade. O forno foi então transladado axialmente cerca de 80 mm com uma velocidade de aproximadamente 10 mm/s, permitindo o resfriamento e a subsequente solidificação das amostras em ambiente de microgravidade. A aquisição de dados durante o vôo se resumiu na medida da temperatura x tempo, por dois termopares fixados próximos das amostras, onde os sinais foram transmitidos por telemetria e também registrados por um *data-logger* do módulo eletrônico.



**Figura 3 – (a) Ampolas de quartzo contendo as ligas de PbSn e PbTe; (b) Porta amostras de aço para proteção das ampolas de quartzo.**



**Figura 4 – Forno de nas posições inicial e final durante o experimento.**

A Figura 5 mostra os ciclos térmicos das amostras, onde se observa que no exato instante do lançamento do foguete ocorre uma pequena queda de temperatura (indicada pela seta) por causa da desconexão do fio umbilical que alimenta o forno com a tensão da fonte DC.

Após o sinal de microgravidade, com a conseqüente movimentação do forno acionada pelo módulo eletrônico, as amostras são resfriadas bruscamente, dando início da fase de solidificação das ligas de PbSn e PbTe. O funcionamento do deslocamento do forno durante a microgravidade também pôde ser confirmado após o resgate da carga útil (Figura 6).

O nível de microgravidade da ordem de  $10^{-4}g$  existente dentro da plataforma suborbital (VSB-30) é suficiente para causar a predominância da convecção de Marangoni sobre as convecções de origem gravitacional e constitucional, possibilitando o estudo da influência da tensão superficial na solidificação das ligas de PbSn e PbTe.

As amostras resgatadas (Figura 7) serão fatiadas, polidas e analisadas por diversas técnicas de caracterização como medidas de densidade, difração de raios-x (XRD), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por energia dispersiva de raios-x (EDS) e calorimetria exploratória diferencial (DSC), e posteriormente serão comparadas com as ligas idênticas solidificadas em ambiente com gravidade. Esses resultados serão publicados futuramente.

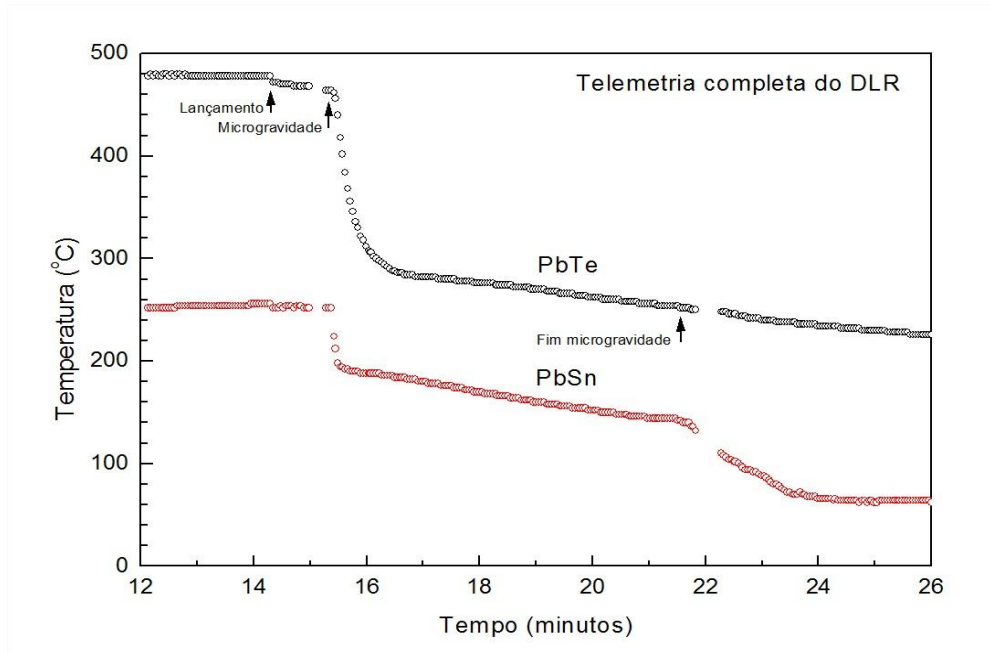


Figura 5 – Temperaturas dos termopares das amostras obtidos por telemetria.

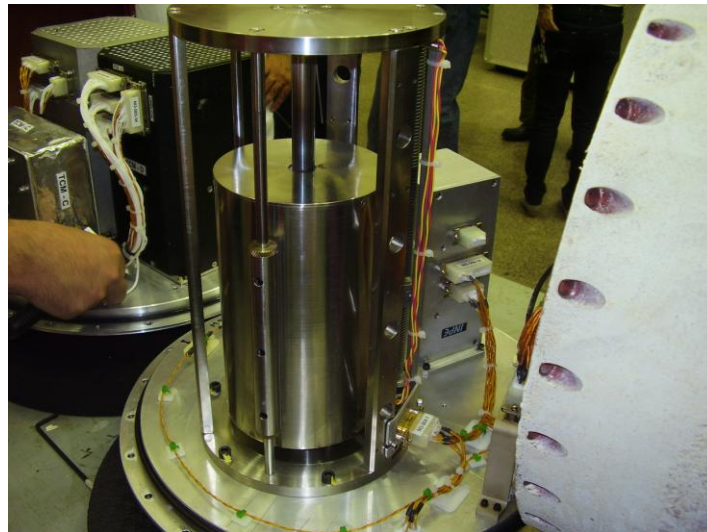


Figura 6 – Forno e a unidade de controle (ambos estão invertidos) após o resgate da carga útil.

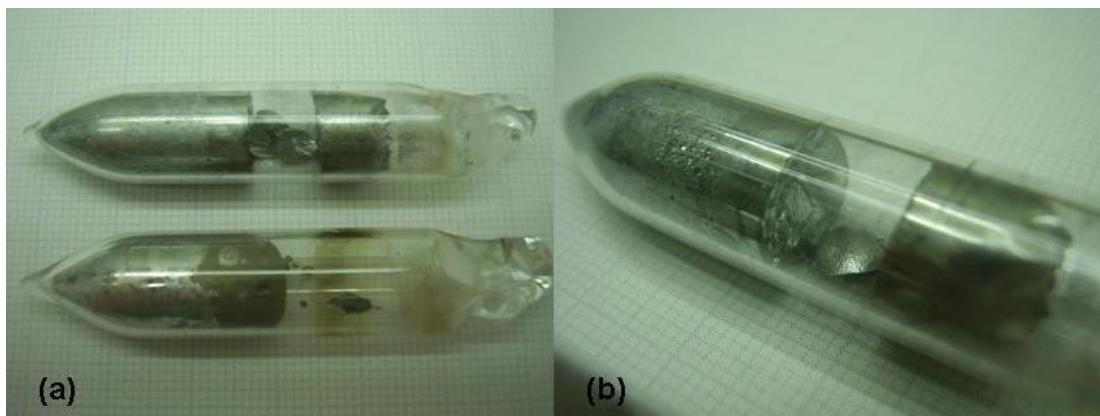


Figura 7 – (a) Amostras de PbTe (acima) e PbSn solidificadas em ambiente de microgravidade; (b) Detalhe da ampola com amostra de PbTe.

#### 4 Conclusão

O forno funcionou perfeitamente em todas as etapas do experimento, envolvendo desde o controle do ciclo térmico inicial, seguido de deslocamento mecânico juntamente com o registro das temperaturas via *data-logger* e recepção por telemetria, até a recuperação final das amostras solidificadas. Estes resultados qualificam o forno para realizar experimentos de solidificação em ambiente de microgravidade utilizando foguetes de sondagem.

#### Agradecimentos

Os autores são gratos à Agência Espacial Brasileira (AEB) pelo patrocínio do projeto. O primeiro autor também é grato ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

#### Referências bibliográficas

- An, C. Y.; Boschetti, C.; Ribeiro, M. F.; Toledo, R. C.; Freitas, F. E.; Bandeira, I. N. Performance of a Solidification Furnace Developed for Sounding Rockets. *Microgravity Science and Technology*. No prelo.
- An, C.Y.; Rapp, P.H.O.; Closs, H.; Abramof, E.; Motisuke, P.; Boschetti, C.; Ueta, A.Y.; Bandeira, I.N. Proposal for Lead-Tin-Telluride Crystal Growth by VMS Method in Microgravity at ISS. *Presented at the 51<sup>th</sup> International Astronautical Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, 2000. Publicação INPE-8145-PRE/3955, São José dos Campos, 2001.
- Bandeira, I. N.; An, C.Y.; Boschetti, C.; Ribeiro, M. F.; Ferreira, F. A.; Peixoto, J. C.; Silva, S.A. *Forno Multiusuário para Solidificação (FORMU-S)*. Publicação INPE-8398-PRP/224, São José dos Campos, 2002a. Disponível em: <[http://www.aeb.gov.br/download/microgravidade/Relatoriopag\\_61\\_74\\_Iraja.pdf](http://www.aeb.gov.br/download/microgravidade/Relatoriopag_61_74_Iraja.pdf)>. Acessado em: 21/mar./2011.
- Bandeira, I.N.; Bogossian, O.; Corrêa, F. Centenary Mission: First Brazilian Microgravity Experiments at ISS. *Microgravity Science and Technology*, XIX-5/6, 2007b.
- Corrêa, F., Mussi, R., Humann, M., Calderan L. and Bandeira, I.N. Brazilian Microgravity Program: Challenges and Perspectives. In: *ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, 17., 2005, Sandefjord, Norway. Proceedings... Sandefjord, Norway: [s.n], 2005.
- Toledo, R.C. *Estudo da solidificação da liga metálica eutética de BiInSn em ambiente de microgravidade utilizando tubo de queda livre, "drop tube"*. 2009. 115p. Dissertação (Mestrado em Materiais e Sensores) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009a.
- Toledo, R.C.; Freitas, F.E.; An, C.Y.; Bandeira, I.N. Microstructural characterization of bismuth-indium-tin alloy solidified under microgravity. In: *Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*, 1., 2010, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: [s.n], 2010b.
- Toledo, R.C.; Mattos, M.B.; An, C.Y.; Bandeira, I.N. Solidification of eutectic Bi<sub>32.5</sub>In<sub>51</sub>Sn<sub>16.5</sub> alloy under microgravity using a drop tube. *Material Science Forum*, Switzerland, v. 660-661, p. 587-592, 2010c. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.587