

## 1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos 50 anos, o interesse crescente em ciências dos materiais vem colocando a torre de queda livre (*drop tube* ou *drop tower*) como uma técnica importante no estudo da solidificação de materiais em ambiente de microgravidade<sup>[1,2]</sup>.

As torres de queda livre são aparatos experimentais que reproduzem o ambiente de microgravidade do espaço ( $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ g) por alguns segundos. No topo destas torres os metais ou ligas metálicas fundidas são pulverizadas na forma de gotículas milimétricas ou até mesmo micrométricas que se solidificam durante a queda<sup>[2-5]</sup>.

As expectativas com relação aos materiais solidificados no espaço e em torres de queda livre são tanto a compreensão da influência das leis da gravidade durante o processo de solidificação, como também a sintetização de novos materiais. Os objetivos tem sido a obtenção de materiais cristalinos ou amorfos com alta qualidade e dotados de propriedades especiais (mecânica, elétrica, magnética, supercondutoras, etc). Os programas espaciais da NASA e da Agência Espacial Européia (ESA) têm se empenhado na conscientização da comunidade científica sobre a importância da investigação nesta linha de pesquisa.

Como exemplo, o Marshall Space Flight Center (NASA) possui uma drop tube com 105 m de altura, 0,4 m de largura, no qual as partículas são submetidas a uma queda de aproximadamente 4,6 s em vácuo de  $5 \times 10^{-6}$  mbar<sup>[2,6-9]</sup>.

No Laboratório Associado de Sensores (LAS) e Materiais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) existe uma linha de pesquisa em solidificação de ligas em ambiente de microgravidade, junto a qual deverá ser desenvolvido este projeto.

## 2. JUSTIFICATIVAS DA PROPOSTA DO TEMA

A solidificação em ambiente de microgravidade é de grande importância no processamento de materiais tecnologicamente mais avançados. Atualmente inúmeros trabalhos vêm sendo feitos com o objetivo de revelar a evolução microestrutural de ligas binárias de semicondutores e metais solidificadas nestas condições<sup>[10]</sup>.

Diversos fatores contribuem para que os materiais solidificados em ambiente de microgravidade tenham uma microestrutura diferenciada<sup>[3-5, 10-12]</sup>:

- A ocorrência da supressão da convecção durante a solidificação. Para que o fenômeno de convecção ocorra é necessário que haja um gradiente de temperatura (diferença de temperatura entre dois pontos do fluido). A região do fluido que está próxima da região de maior temperatura se expandirá e, conseqüentemente, terá sua densidade diminuída; portanto, a região mais fria terá uma densidade maior em relação à região mais quente. Com a ação da força gravitacional terrestre a região mais densa será deslocada para baixo e forçará a menos densa para cima, provocando assim um fluxo convectivo térmico. O fluxo convectivo constitucional é causado pela diferença na composição química do fluido. No qual a diferença de densidade é provocada por diferença na concentração dos elementos químicos do material entre uma região e outra. Tanto o fluxo convectivo térmico quanto o fluxo convectivo constitucional prejudicam o crescimento de cristais maiores e mais homogêneos por dois motivos principais: i) a circulação no líquido reduz a camada de cristalização na interface sólido/líquido e b) o fluxo também conduz calor através do líquido reduzindo o gradiente térmico necessário para o crescimento do cristal.
- No resfriamento, a perda de calor ocorre apenas por radiação, enquanto que em ambiente de gravidade normal esta perda ocorre por convecção e radiação.
- A nucleação das partículas não sofre a influência do próprio peso e de tensões devido a fatores externos, sendo apenas afetada pela tensão da interface sólido/líquido.
- Os materiais de diferentes densidades se misturam de forma quimicamente homogênea.

- As amostras não são envolvidas por nenhum molde não sofrendo assim a influência de superfícies externas as quais induziriam a uma nucleação heterogênea, e outras mais.

Desta forma, os materiais solidificados em ambiente de microgravidade e em ambiente de gravidade normal apresentam diferenças microestruturais significativas com relação às fases cristalinas formadas, como: a proporção, a morfologia e topografia das fases.

As vantagens dos experimentos realizados em torres de queda livre com relação aos experimentos realizados no espaço são: a facilidade relativa, a maior liberdade operacional e o baixo custo <sup>[12]</sup>.

### 3. OBJETIVOS

Neste projeto estão sendo propostas os seguintes objetivos:

- 1) Construção de uma torre de queda livre de porte pequeno, com 3 m de altura e com 80 mm de diâmetro, que permita um tempo de queda de aproximadamente 0,8s. No interior desta torre será acoplado um forno para a fusão dos materiais com temperatura de até 1000°C. O sistema deverá ser operado em alto vácuo ou em atmosfera controlada., para a solidificação de metais, semicondutores e suas ligas e
- 2) Estudo comparativo das microestruturas e das composições químicas das fases formadas na liga semicondutora eutética de PbTe solidificada em ambiente de microgravidade e em condições de gravidade normal;

### 4. SOLIDIFICAÇÃO EM AMBIENTE DE MICROGRAVIDADE

#### 4.1. SUPER-RESFRIAMENTO

Na solidificação de materiais em ambiente de microgravidade dois fatores contribuem para que se desenvolva uma microestrutura mais homogênea: a ausência do molde favorecendo uma nucleação homogênea e a ausência de fluxos convectivos térmico e constitucional. Nestas condições, o metal ou a liga pode ser resfriado em uma temperatura abaixo do ponto de solidificação sem que a solidificação se inicie, conhecido como super-resfriamento. O super-resfriamento proporciona altas velocidades de solidificação que afetará significativamente as propriedades da microestrutura do sólido obtido <sup>[11,13-16]</sup>.

A Figura.1 mostra as possíveis curvas de resfriamento sob microgravidade ( $\mu g$ ) e gravidade normal (1g).

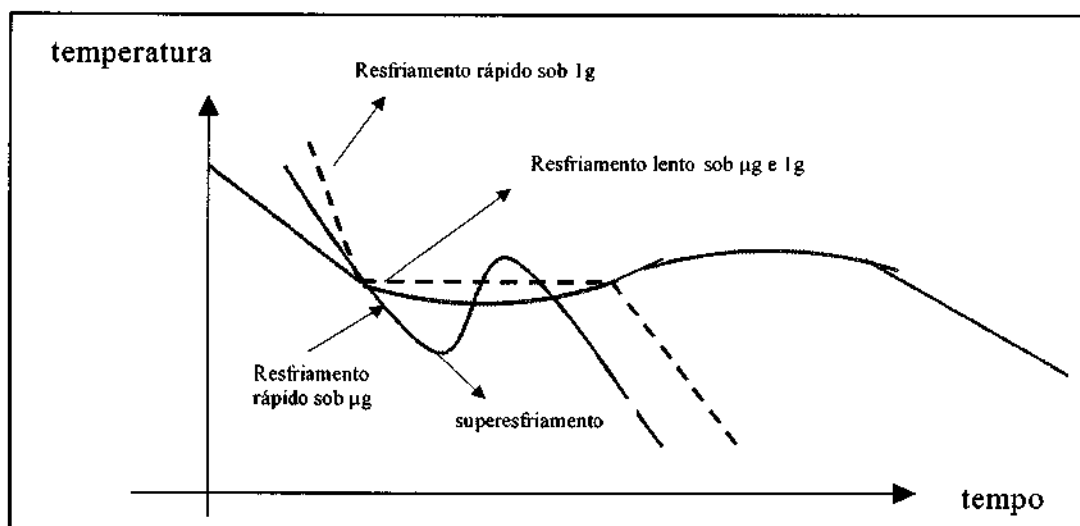


Figura.1 Curvas de resfriamento em condições de microgravidade e de gravidade normal<sup>[6]</sup>.

Assim o superesfriamento é facilmente obtido em situação de microgravidade porque um material mais homogêneo é obtido pela supressão da convecção. A fig. 1 mostra possíveis curvas de resfriamento sob  $\mu g$  e  $1g$ . O superesfriamento ocorre em baixas taxas de resfriamento tanto sob  $1g$  quanto  $\mu g$ . Já em altas taxas de resfriamento o superesfriamento ocorre sob  $\mu g$  por ter-se um material mais homogêneo, mas não ocorre sob  $1g$ .

## 4.2. EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA

Alguns tópicos amplamente visados no estudo do processamento de materiais à microgravidade são:

### 4.2.1. DESENVOLVIMENTO DA FASE DENDRÍTICA

O desenvolvimento dendrítico está relacionado com o fluxo convectivo. Diversos trabalhos mostram que o crescimento dendrítico é máximo quando as dendritas estão alinhadas com o vetor  $g$ . A evolução dos pontos dendríticos depende deste vetor e o crescimento das dendritas ocorre na direção do fluxo induzido pela gravidade. A maioria das teorias relacionadas ao crescimento dendrítico centra-se na determinação da velocidade de crescimento das dendritas e do raio de curvatura em função da diferença de temperatura de super-resfriamento. Na ausência de gravidade o crescimento de dendritas pode ser melhor compreendido <sup>[7,14]</sup>.

### 4.2.2. MICRO E MACRO-SEGREGAÇÃO

A segregação é a diferença ou falta de uniformidade na composição química da liga. A segregação pode ser classificada em duas categorias: a micro-segregação e a macro-segregação e também é influenciada pelo fluxo convectivo durante a solidificação em ambiente de microgravidade. Este fluxo interfere tanto na extensão quanto na natureza da segregação <sup>[7,14]</sup>.

### 4.2.3. SOLIDIFICAÇÃO EUTÉTICA

O crescimento eutético também é grandemente influenciado pelo fluxo convectivo no ambiente de microgravidade, que interfere na difusão bilateral das fases. As teorias atuais sobre o crescimento eutético, entretanto, considera apenas a difusividade entre uma fase e outra, ignorando o fluxo convectivo. Segundo Jackson e Hunt<sup>[9]</sup> a relação entre a velocidade de crescimento eutético ( $v$ ) e o espaçamento entre as fases ( $\lambda$ ) é dado por:

$$\lambda^2 v = \text{constante} \quad (1)$$

A influência do fluxo convectivo provoca desvios nesta relação, pois o fluxo gradiente de velocidade deve ser levado em consideração.

A relação (1) modificada é dada por:

$$\lambda_e^2 = \frac{(\lambda^2 V)}{(1 - (B \cdot G_U \lambda_e^2 / D))} \quad (2)$$

onde:  $G_U$  = fluxo gradiente de velocidade

$B$  = constante adimensional

$(\lambda^2 V)$  = constante de Jackson-Hunt

$D$  = coeficiente de difusão

Existem controvérsias a respeito da influência da microgravidade sobre o crescimento eutético no tocante ao aumento ou diminuição de  $\lambda$  <sup>[7,17]</sup>.

- **Crescimento monotético em sistemas imiscíveis:** Quando a liga monotética é solidificada em condições de gravidade normal ocorre uma rápida separação entre as fases distintas devido à sedimentação da fase mais densa. Com o desenvolvimento da ciência e da tecnologia espaciais muitas investigações têm sido feitas na tentativa de entender este processo, uma vez que o desenvolvimento destes materiais é de grande importância tecnológica. Em ambiente de microgravidade ocorre uma dispersão maior entre as fases, devido à suspensão das partículas. Isto é resultante da ausência ou da pequena intensidade da força gravitacional e do tamanho pequeno das partículas, o que é importante na investigação e preparação de ligas imiscíveis [5,7].

### 4.3. NUCLEAÇÃO HOMOGÊNEA E NUCLEAÇÃO HETEROGÊNEA

A solidificação dos metais inicia com o processo de nucleação, que consiste no surgimento de pequenos pontos sólidos que tendem a crescer pela adição continuada de novos átomos, formando os grãos ou cristais [6,7].

O processo de nucleação sofre a influência direta do super-resfriamento e da rápida solidificação em ambiente de microgravidade, sendo assim, de interesse para o estudo de processamento de novos materiais.

Existem duas formas de nucleação:

- **Nucleação Homogênea:** A nucleação homogênea ocorre sem que haja a contribuição energética de agentes estranhos ao sistema.
- **Nucleação Heterogênea:** É o surgimento da fase sólida com a contribuição energética de agentes estranhos ao sistema.

Na solidificação do material em condições de queda livre a atuação de agentes estranhos é minimizada, pois este material não está em contato com as superfícies externas de um molde. Estas condições favorecem a nucleação homogênea.

Quanto maior for o super-resfriamento ( $\Delta T$ ) sofrido pelo material maior será a estabilidade termodinâmica dos embriões permitindo o início ao processo de solidificação. Se a fase líquida estiver super-resfriada, a fase sólida ficará termodinamicamente mais estável pois possui energia livre ( $G$ ) menor que o da fase líquida, sendo a variação da energia livre ( $\Delta G$ ) o critério indicador de maior ou menor estabilidade termodinâmica do sistema.

A Figura.2 ilustra o comportamento termodinâmico do sistema para o caso de um metal puro.

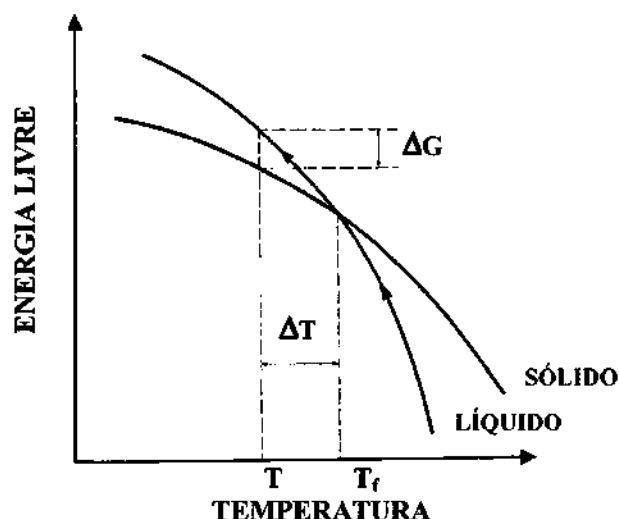


Figura.2 Diagrama de energia livre versus temperatura para um metal puro [13].

Nesta figura são mostrados os comportamentos das curvas de energia em função da temperatura livre para o líquido e o sólido. A temperatura  $T_f$  é a temperatura na qual as energias livres das duas fases são iguais. Acima desta temperatura a fase líquida é estável e abaixo o sólido é estável. Pode ser observado que quanto maior for o grau de super-resfriamento (inclinação da reta) maior será o valor de  $\Delta F$ , logo a tendência para a transformação de líquido em sólido será maior [15, 14, 18].

Existe um valor crítico do raio do embrião ( $r_c$ ) para que este estabilize e inicie o processo de solidificação caso contrário ele se dilui:

$$\begin{aligned} r < r_c &\rightarrow \text{embriões (diluem)} \\ r > r_c &\rightarrow \text{núcleos (crescem)} \end{aligned}$$

O valor de  $r_c$  é dado por:

$$r_c = \frac{2\lambda_{SL}T_f}{L_v\Delta T} \quad (3)$$

onde:  $\gamma_{SL}$  = tensão superficial ente as fases sólida e líquida (energia por unidade de superfície);  
 $T_f$  = temperatura de fusão;  
 $L_v$  = calor latente de fusão (energia por unidade de volume);  
 $\Delta T$  = variação de temperatura no super-resfriamento

O valor da energia livre crítica, energia a partir da qual o processo se inicia é dada por:

$$\Delta G_c = \frac{4\pi\gamma_{SL}r_c^2}{3} \quad (4)$$

A análise das Equações.3 e 4 mostra que o aumento do super-resfriamento induz a diminuição do raio crítico e da energia crítica, ou seja, a nucleação homogênea é estimulada.

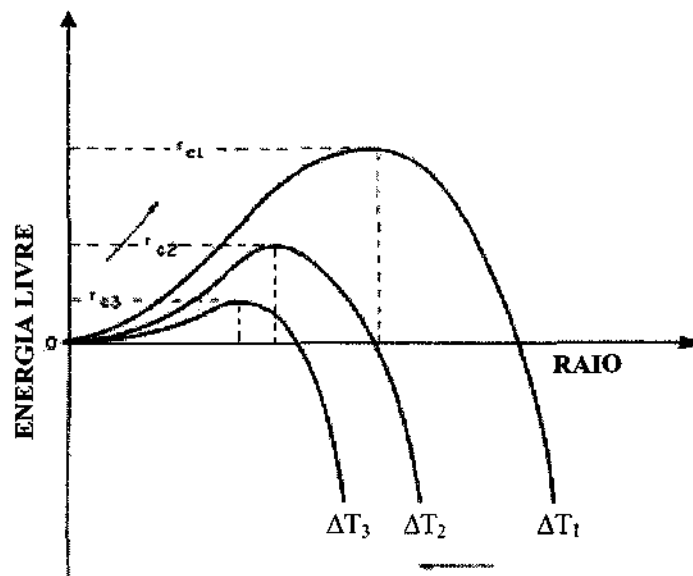


Figura.3 Influência do resfriamento térmico sobre a variação da energia livre na nucleação homogênea [17].

A nucleação homogênea é influenciada apenas pela tensão superficial sólido-líquido ( $\gamma_{SL}$ ), sendo o sólido o embrião e o líquido o metal ou liga fundida. A nucleação heterogênea é influenciada por agentes estranhos, como átomos de outros elementos químicos e as paredes do molde e é necessário considerar a tensão superficial sólido-substrato ( $\gamma_{ST}$ ) e a tensão líquido-substrato ( $\gamma_{LT}$ ).

Na Figura.4 são mostrados os três vetores de tensão superficial

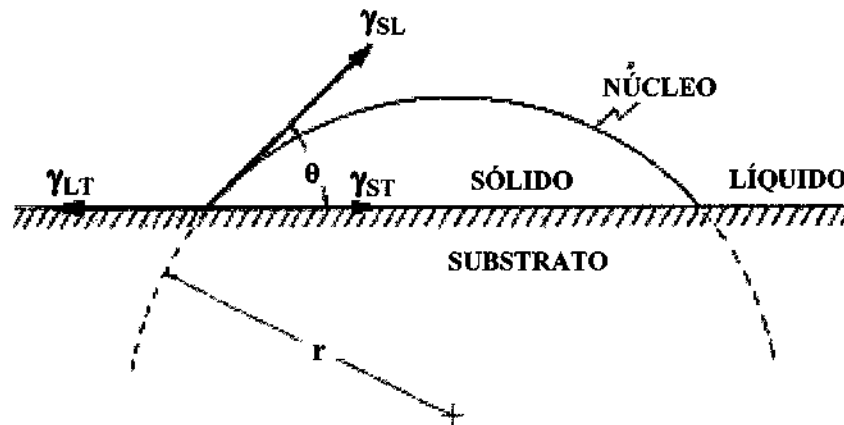


Figura.4 Representação de  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{ST}$ ,  $\gamma_{LT}$  e  $\theta$  (ângulo de contato) em um embrião <sup>[18]</sup>.

Na Figura.5 pode ser observado que quanto menor for o ângulo de molhamento ( $\theta$ ) maior deverá ser a interação entre o embrião e o substrato, resultando em uma maior contribuição energética do substrato para o processo de nucleação.

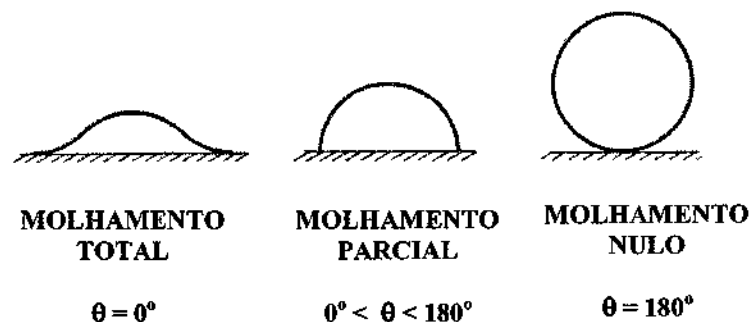


Figura.5 Representação das condições de molhamento do substrato pelo embrião <sup>[18]</sup>.

No equilíbrio, a relação entre as tensões superficiais é dada por:

$$\gamma_{LT} - \gamma_{ST} = \gamma_{SL} \cos \theta \quad (5)$$

Portanto, a energia crítica ( $\Delta F_c$ ) será dada por:

$$\Delta F_c = \left( \frac{4\pi\gamma_{sl}^3 T_f^2}{3L_v^2 \Delta T^2} \right) (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta) \quad (6)$$

Para  $\theta=180^\circ$ ,  $\Delta F_c$  tende para o valor de energia crítica, para o caso da nucleação homogênea. A nucleação homogênea é, portanto, o caso limite da nucleação heterogênea [6,13,18]

## 5. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1. MATERIAIS

Os materiais utilizados para a obtenção da liga semicondutora eutética ( $Pb_{(1-x)}Te_x$ ) serão Pb e Te. Trata-se de uma liga semicondutora que possui importantes aplicações tecnológicas para a fabricação de sensores e lasers de uso na região espectral do infravermelho termal [19]. O diagrama de equilíbrio de fases do sistema Pb-Te (Figura.6) mostra a composição eutética desta liga.

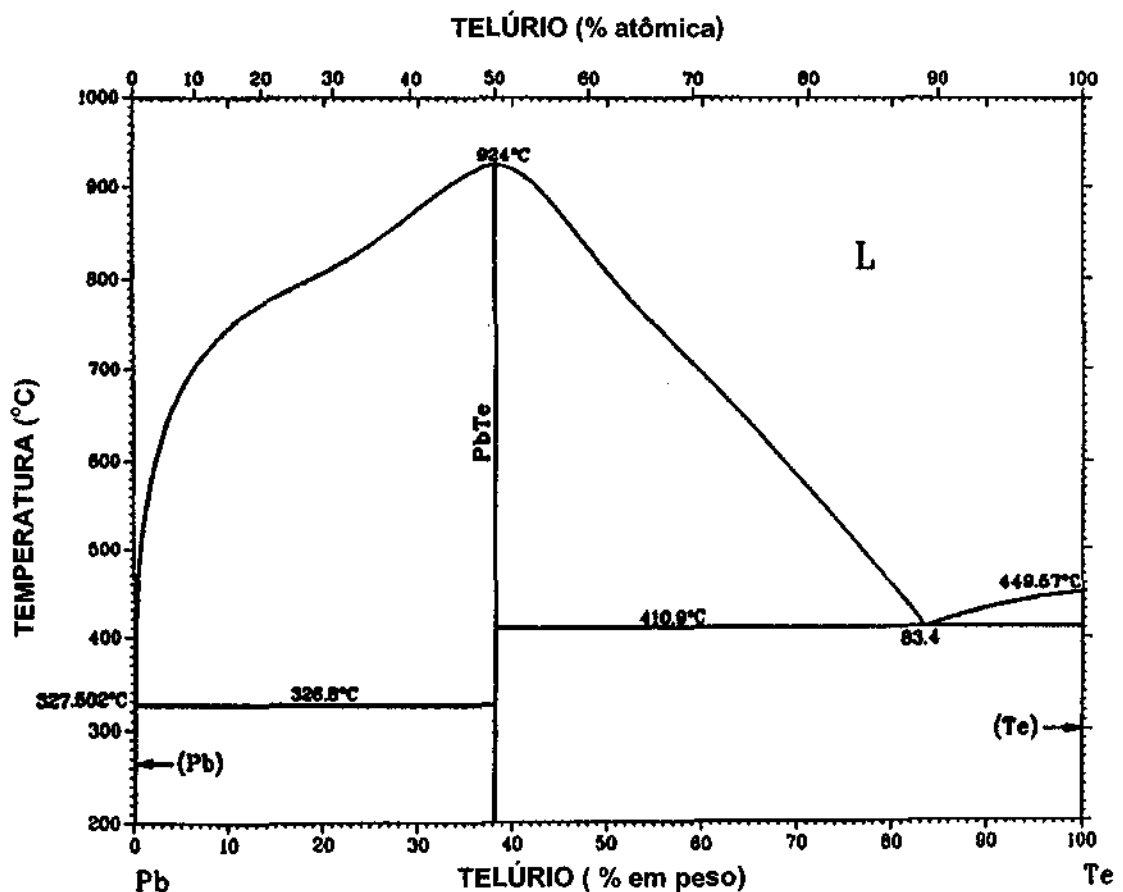


Figura.6 Diagrama de equilíbrio de fases do sistema Pb-Te [20].

Utilizando o diagrama de equilíbrio de fases pode ser determinada a composição eutética desta liga, que é dada por:

$$\frac{M_{Pb}(1-X)}{M_{Te}X} = \frac{m_{Pb}}{m_{Te}} \quad (7)$$

Sustituindo,  $M_{Pb}=207,19\text{g}$  e  $M_{Te}=127,60\text{g}$ , tem-se:

$$\frac{207,19(1-X)}{127,60X} = \frac{m_{Pb}}{m_{Te}} \quad (8)$$

A Equação.8 será utilizada para o cálculo da massa de Pb e Te em uma determinada composição ( X e (1-X)) escolhida.

Neste trabalho deverá ser utilizada a composição eutética onde  $X = 0,89$ . Desta forma, a fórmula química da composição eutética será dada por  $Pb_{0,11}Te_{0,89}$ .

## 5.2. CONSTRUÇÃO DA TORRE DE QUEDA LIVRE E DO FORNO DE FUSÃO

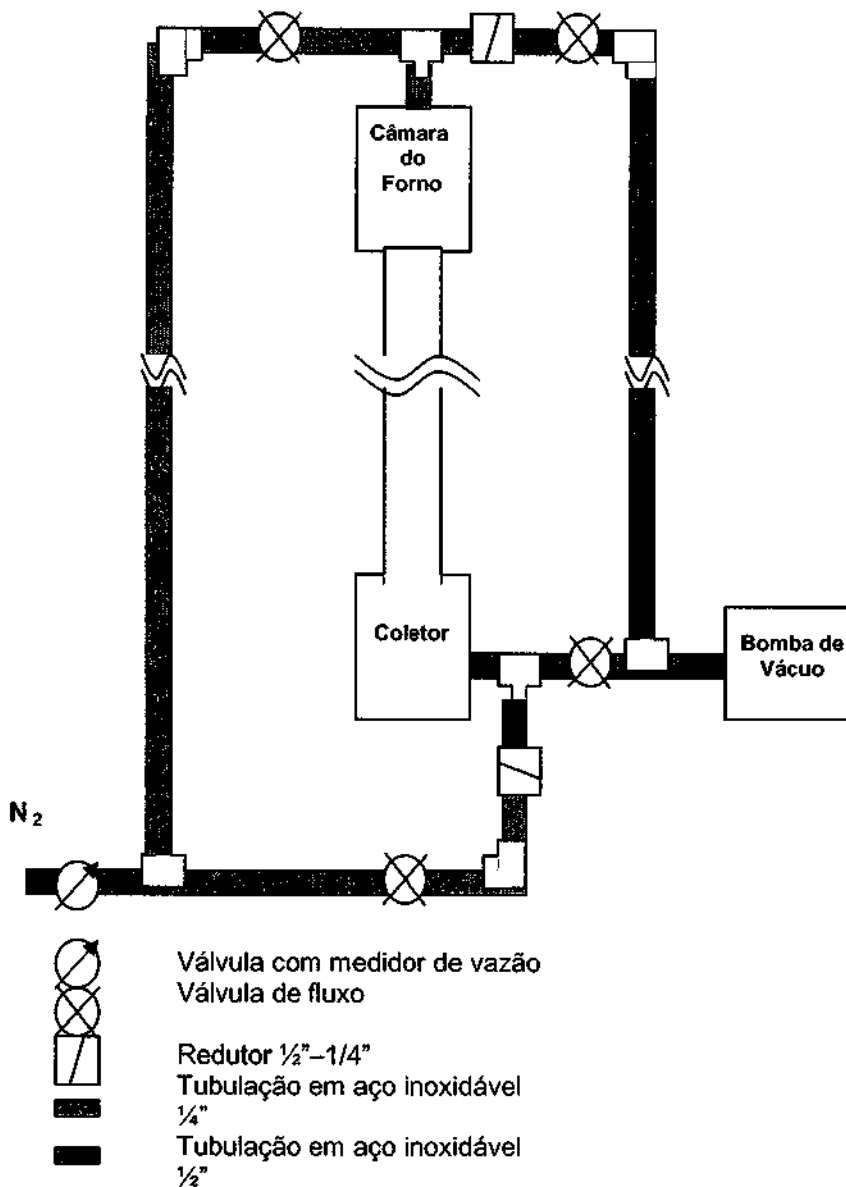


Figura.7 Diagrama esquemático do sistema completo.



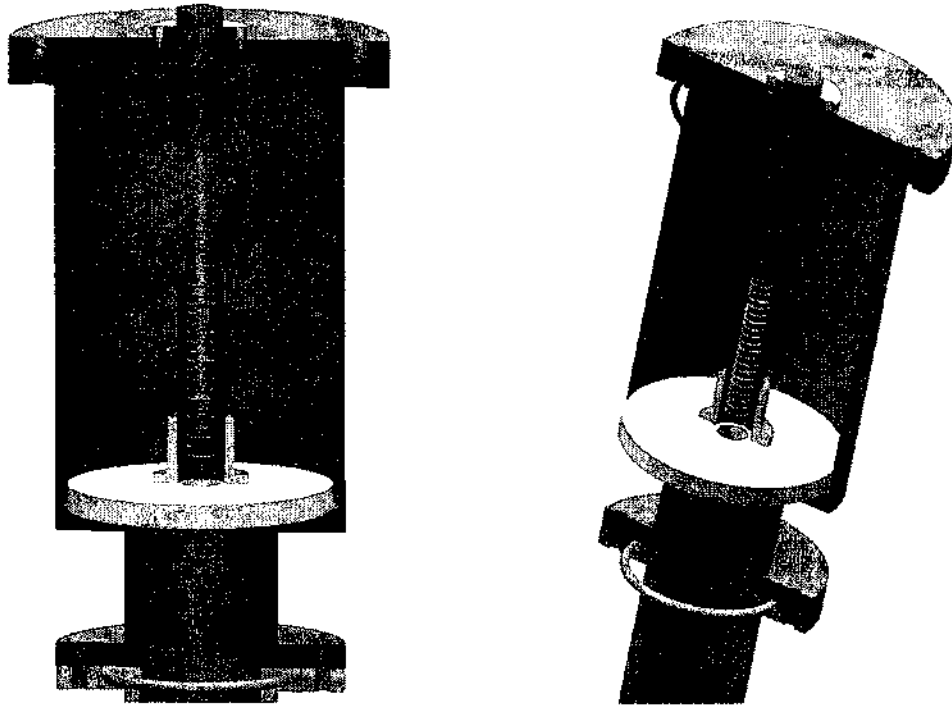


Figura.8 Representação esquemática em corte da vista 3D da câmara do forno e parte do tubo.

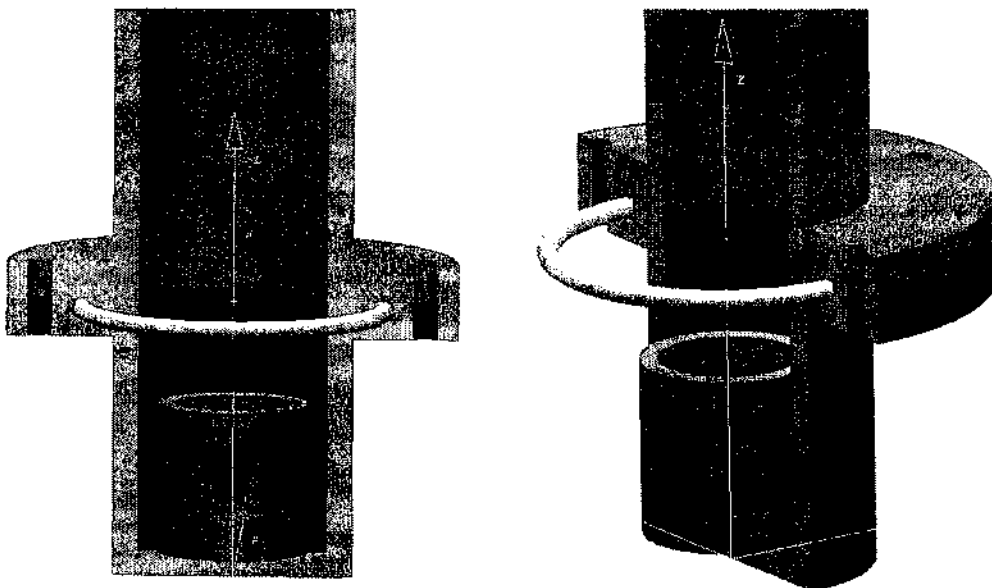


Figura.9 Representação esquemática em corte da vista 3D do coletor de partículas sólidas e de parte do tubo.



### 5.3. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA EUTÉTICA $Pb_{0,11}Te_{0,89}$

A preparação das ligas de PbTe dar-se-á em torno da composição eutética. As amostras serão solidificadas de duas maneiras: sob ambiente de gravidade normal e sob ação da microgravidade utilizando, para isto, o sistema projetado que deverá ser construído no LAS.

O procedimento experimental para a obtenção da liga de PbTe solidificada deverá ser realizado de acordo com as seguintes etapas:

- 1) Pedacos pequenos de Pb e de Te (na fase sólida) serão pesados e colocados em um tubo de ensaio, o qual será submetido a um vácuo, com o intuito de promover a retirada da camada de óxidos superficiais dos materiais;
- 2) Este tubo será colocado no forno do sistema onde será aquecido até a temperatura de fusão para este material em sua composição eutética;
- 3) Estando o material, então, na fase líquida será pulverizado em direção ao tubo, utilizando uma pressão exercida pelo gás nitrogênio injetado no sistema para este fim;
- 4) A solidificação da liga dar-se-á durante a queda livre na forma de partículas esféricas de aproximadamente 1mm de diâmetro, sendo então coletadas na parte inferior do sistema.

A caracterização da microestrutura, composição química e identificação das fases cristalinas das amostras solidificadas serão realizadas utilizando as seguintes técnicas disponíveis no LAS:

- 1) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV): para a análise da morfologia e topografia das amostras, como tamanho, forma e quantidade de grãos, contornos de grãos, espaçamento entre as fases, trincas;
- 2) Espectrometria por energia dispersiva de raios X (EDX): para a análise quantitativa os elementos químicos presentes nas fases e segregação dos componentes da liga pela técnica de escaneamento por linha.
- 3) Difração de raios X (DRX): para a identificação das fases cristalinas presentes;

Para todas estas caracterizações as partículas serão embutidas em cera de abelha, que posteriormente deverá ser cortado para revelar seções transversais das partículas da liga de PbTe. Esta superfície será adequadamente polida com abrasivos de alumina. As amostras cujas superfícies serão observadas por MEV deverão ser submetidas a um ataque químico específico.

A solidificação em condições de gravidade normal deverá resultar em um corpo sólido cujos procedimentos de preparação das amostras para as análises deverão ser os mesmos descritos acima.

### 6. EQUIPAMENTOS A SEREM UTILIZADOS NESTE PROJETO

- Torre de queda livre com forno acoplado a ser construído no LAS;
- Difrátômetro de raios X, da marca Philips, modelo PW 3710, com anodo de cobre com  $\lambda=1,54056$  e radiação  $K_{\alpha}$ , produzido na Holanda (LAS/CTEINPE) e
- Microscópio Eletrônico de Varredura + detector EDS, da marca JEOL, modelo JSM-5310, produzido no Japão (LAS/CTE/INPE).

### 7. RESULTADOS ESPERADOS

- Construção da torre de queda livre e estabelecimento dos parâmetros de operação
- Obtenção de amostras de PbTe solidificadas durante 0,8s de queda livre em diferentes temperaturas de resfriamento, caracterização de suas microestruturas e de fases cristalinas

presentes e comparação com microestruturas desta liga semicondutora eutética solidificada em condições normais

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MATISAK, B. P.; ZHAO, A.X.; NARAYANAM, R.; FRIPP, A. L. The microgravity environment: its prediction, measurement and importance to materials processing. *J. Crystal Growth*, 174(1997) p. 90-95
- [2] VINET, B.; CORTELLA, L.; FAVIER, J.J.; DESRE, P. *Highly Undercooled W and Re drops in a ultrahigh-vacuum drop tube* – *Appl. Phys. Lett.* 58 (1), 7 January 1991, p. 97-99.
- [3] PRAIZEY, J. P.; VINET, B.; BOST, J. *Experimental Drop Tube of the Metallurgy Department of Grenoble-* *Adv. Space Res.* Vol. 8. No. 12, pp. (12) 155-(12)161,1998
- [4] HAMILL, D. *Space processing of materials-* *Advanced Materials & Process/January 2001*, p. 71-74.
- [5] HAIPENG, W.; CHONGDE, C.; BINGBO, W. *Rapid monotectic solidification-* *Chinese Science Bulletin* Vol. 49 No. 3 February 2004, p. 220-224.
- [6] HERLACH, D. M. *Solidification from undercooled melts-* *Material Science and Engineering A* 226-228 (1997) 348-356.
- [7] CHATTOPADHYAY, K. *Trends and opportunities in basic research in microgravity materials processing-current Science*, Vol. 79, No. 3, 10 august 2000, p. 328-333.
- [8] LI, D.; SMITH, R. W. *Materials Processing Using the DLR and MSFC Drop Tubes and ZARM Drop Tower-* 207.162.96.17/science/space-science/paper-reports/spacebound 2000/papers/default.asp. 63k.
- [9] HOFMEISTER, W. H.; ROBINSON, M. B.; BAYUZICK, R. J. *Undercooling of pure metals in a containerless, microgravity environment* – *Appl. Phys. Lett.* 49 (20), 17 November 1986, p. 1342-1344.
- [10] GAO, J. R.; WEI, B. *Containerless Solidification of Undercooled Ag-Cu-Sb alloy Droplets under Microgravity Conditions-* *Materials Science Fórum* Vols. 329.330 (200) pp. 285-290.
- [11] OKUTANI, T.; MINAGAWA, H.; NAGAI, H.; NAKATA, Y.; TSURUE, T.; ORIHASHI, M.; GOTO, Y.; KAMADA, K. *Synthesis of High-Quality Crystalline Semiconductors with One-component and Binary-component by Unidirectional solidification in short-Time Microgravity Environment-* *Proc. Finst. Inst. Symposium on Microgravity. Research and Applications in physical sciences and biotechnology.* Sonnetto, Italy. 10-15 sept. 2000 ESA-454 Vol.II pp.691-697.
- [12] CROAT, T.K.; KELTON, K.F.; HOLLAND-MORIT, D.; RATHZ, T.J.; ROBINSON, M.B. *Containerless solidification Studies of the 1/1 Phase in Ti- (MN, CR, FE)- SI-O Alloys-* wuphys. wustl.ed/~tkc/Publications/pdf/croat-mrs98-tcso-eml.pdf
- [13] RATHZ, T.J.; ROBINSON, M. B.; HOFMEISTER W.H.; BAYUZICH, R.J. *The Marshall Space Flight Center Drop Tube Facility* – *Rev. Sci. Instrum.* 61(12), December 1990, p. 3846-3853
- [14] GARCIA, A. *Solidificação Fundamentos e Aplicações.* Editora da Unicamp, 2001, Campinas, S.P, Brasil, p. 243-265.
- [15] OHNO, A. *Solidificação dos Metais.* editora LTDA, São Paulo, S.P., Brasil, p. 25-52.
- [16] DHINDAW, B. K. *Solidification under microgravity.* Sādhnā, Vol. 26, Parts 1 & 2, Febury-April 2001, pp. 59-69.
- [17] GRUGEL, R. N. *A Solid case for processing microgravity* – *Aerospace America/July 2000*, p. 30-32.
- [18] CARAM, R. *I Escola de Verão em Crescimento de Cristais-* SBCC, IPEN 25 à 28 de fevereiro de 1997- S.P, p. 103-140.

- [19] FILHO, M. P. C.; DAVIES, G.J. *Solidificação e Fundição de Metais e suas ligas* – LTC/EDUSP, p. 11-22.
- [20] ASM Handbook. Phase Equilibrium Diagrams. 19<sup>th</sup> edition, American Society for Metals, E.U.A., 1986

## 9- CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

### ATIVIDADES

### TRIMESTRES

	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º
1. Atividades acadêmicas (disciplinas e Exame de Proposta de Dissertação)	xxx	xxx	xxx		xxx	xxx				
2. Revisão bibliográfica, preparação do Projeto de Dissertação e defesa				xxx	x	xxx	xxx	xxx	xxx	x
3. Construção do sistema tubo + forno							xxx	xx		
4. Solidificação das amostras								xx	xx	
5. Caracterização das amostras								xx	xxx	x
6. Redação e defesa da dissertação									xxx	xxx

Obs: x = 1 mês

Início: março/2003

Término: julho/2005



**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA ESPACIAIS  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SENSORES E  
MATERIAIS**

**PROJETO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**“CONSTRUÇÃO DE UMA TORRE DE QUEDA LIVRE (DROP TUBE)  
PARA ESTUDO DE SOLIDIFICAÇÃO DA LIGA SEMICONDUTORA  
PBTE EM AMBIENTE DE MICROGRAVIDADE”**

**Orientada: NÍVEA MARIA DE DEUS**

**Orientadores: Profa. Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono  
Prof. Dr. Chen Ying An**

**Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS  
Centro de Tecnologia Especiais – CTE**

**São José dos Campos**

**2004**

## CONTEÚDO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
2. JUSTIFICATIVAS DA PROPOSTA DO TEMA .....	1
3. OBJETIVOS .....	2
4. SOLIDIFICAÇÃO EM AMBIENTE DE MICROGRAVIDADE .....	2
4.1. SUPER-RESFRIAMENTO .....	2
4.2. EVOLUÇÃO DA MICROESTRUTURA .....	3
4.2.1. DESENVOLVIMENTO DA FASE DENDRÍTICA .....	3
4.2.2. MICRO E MACRO-SEGREGAÇÃO .....	3
4.2.3. SOLIDIFICAÇÃO EUTÉTICA .....	3
4.3. NUCLEAÇÃO HOMOGÊNEA E HETEROGÊNEA .....	4
5. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	7
5.1. MATERIAIS .....	7
5.2. CONSTRUÇÃO DA TORRE DE QUEDA LIVRE E DO FORNO DE FUSÃO ..	8
5.3. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA $Pb_{0,11}Te_{0,89}$ .....	11
6. EQUIPAMENTOS A SEREM UTILIZADOS .....	11
7. RESULTADOS ESPERADOS .....	11
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	12
9. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES .....	14