

## Determinação da aceleração para ensaios de solidificação na centrífuga do LAS/INPE

TENÓRIO, P. I. G. <sup>1</sup>, TOLEDO, R. C., AN, C. Y.

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil  
Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

plinio.tenorio@inpe.br

***Resumo.** Foi desenvolvida uma centrífuga no LAS/INPE para simular condições de acelerações maiores que a da gravidade da Terra durante o processo de solidificação de materiais, possibilitando o estudo dos efeitos dessas influências nas propriedades físicas e microestruturais do material. Este trabalho mostra o método utilizado para quantificar a aceleração na qual os experimentos estão submetidos.*

**Palavras-chave:** Solidificação; Centrífuga; Altas acelerações.

### 1. Introdução

A solidificação de metais e suas ligas dependem de uma variedade de mecanismos, que geralmente, são agrupados sob os termos genéricos de nucleação e crescimento, sendo ambos afetados, de forma direta ou indireta, pela gravidade [HAMACHER et al., 1987; HURLE et al., 1987; FAVIER et al., 1987; DHINDAW, 2001, TOLEDO, 2013]. Existem diversas técnicas/experimentos que proporcionam a variação da aceleração da gravidade durante a solidificação de materiais na superfície da Terra, como por exemplo, a utilização de torres ou tubos de queda livre para ambientes de microgravidade ou centrífugas para ambientes de macrogravidade.

As variações na aceleração e na convecção gerada pela centrífuga, são fatores que influenciam no processamento e na solidificação dos materiais e pode proporcionar a produção de materiais únicos que não podem ser obtidos pelos métodos convencionais de fundição e solidificação [REGEL e WILCOX, 1997].

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é obter uma expressão matemática que possibilite a determinação do número de g's (fator multiplicador da aceleração da gravidade terrestre ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )) nas amostras solidificadas a partir da velocidade angular ( $\bar{\omega}$ ) da centrífuga.

### 2. Centrífuga

Com o objetivo de se simular as rotações dos voos suborbitais do VSB-30 em laboratório e realizar ensaios de solidificação de materiais em macrogravidade foi desenvolvida e manufaturada uma centrífuga pelo grupo de pesquisadores do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) [An et al., 1997 e Tenório et al., 2015].

Nos ensaios de solidificação um forno é fixado por meio de uma dobradiça na extremidade do braço da centrífuga (Figura 1), com a rotação da centrífuga uma força centrípeta é adicionada ao balanço de forças presentes no sistema o que gera uma aceleração resultante maior que a aceleração da gravidade na amostra.

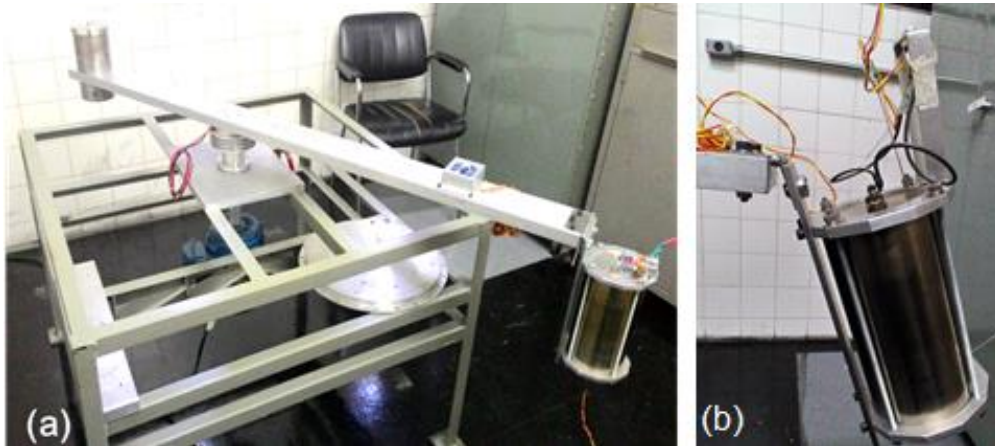


Figura 1. (a) Centrífuga para ensaios de solidificação; (b) esquema de fixação do forno.

### 3. Determinação do fator multiplicador da aceleração da gravidade terrestre

Nesse trabalho, para determinação do fator multiplicador da gravidade terrestre ( $n$ ) admite-se que: o forno é o referencial adotado; o forno é ponto de massa  $m$  localizado no em seu centro de gravidade (cg); a massa da amostra é desprezível; e todas as forças do sistema atuam no centro de gravidade do forno.

O problema proposto apresenta um referencial não inercial, ou seja, existe a presença de forças fictícias (força centrífuga) atuando no sistema, isto é, forças provenientes da aceleração do próprio referencial e não de forças físicas atuando no corpo. Assim, quando o forno for submetido a uma rotação uniforme constante, pode-se chamar a força inercial que atua nesse corpo de centrífuga ( $\vec{F}_c$ ), essa força possui o mesmo módulo e direção da força centrípeta, porém, tem sentido oposto [Nussenzveig 2002]. O balanço das forças atuando no forno (Figura 2) fornece:

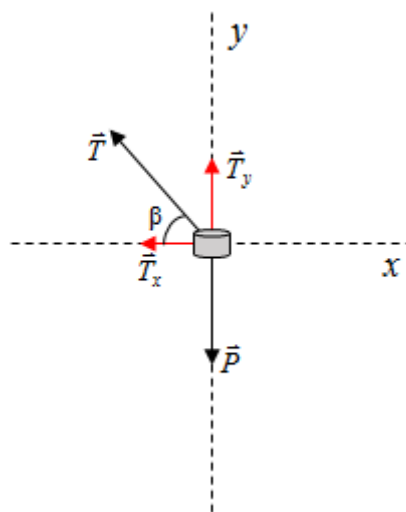


Figura 2. Diagrama de forças do sistema.

sendo que  $\vec{P}$  é o peso;  $\vec{T}$  é a tração;  $\vec{T}_y$  é a componente de  $\vec{T}$  no eixo y do plano cartesiano;  $\vec{T}_x$  é a componente de  $\vec{T}$  no eixo x do plano cartesiano; e  $\beta$  é o ângulo de inclinação do forno em relação ao braço. Estes termos também podem ser expressos como:

$$P = m_{forno} \cdot g$$

**Equação 1**

$$T_x = T \cdot \cos \beta$$

**Equação 2**

$$T_y = T \cdot \sin \beta$$

**Equação 3**

onde:  $m_{forno}$  é a massa do forno; e  $g$  é a aceleração da gravidade. A resultante das forças que atuam no eixo y do corpo é zero, deste modo:

$$\sum \vec{F}_y = 0$$

**Equação 4**

$$F_y = T_y - P = 0$$

**Equação 5**

logo  $T_y$  é igual a  $P$ , portanto:

$$T_y = m_{forno} \cdot g$$

**Equação 6**

A força resultante no eixo x,  $\vec{T}_x$ , será a própria força centrípeta ( $\vec{F}_c$ ), representada pela equação:

$$F_c = m_{forno} \cdot \omega^2 \cdot r$$

**Equação 7**

onde:  $\omega$  é a velocidade angular; e  $r$  é o raio de rotação. Assim:

$$T_x = m_{forno} \cdot \omega^2 \cdot r$$

**Equação 8**



com a aceleração centrípeta dada pela relação:

$$a_c = \omega^2 . r$$

**Equação 9**

Por fim, o fator multiplicador da gravidade terrestre é dado pela expressão:

$$n = \frac{a_c}{g}$$

**Equação 10**

O ângulo  $\beta$  pode ser obtido pelo quociente de  $\vec{T}_x$  e  $\vec{T}_y$ , ou seja,

$$tg(\beta) = T_y / T_x = g / (\omega^2 . r)$$

**Equação 11**

### 3. Resultados e Discussão

Através das Equações 9 e 10 é possível determinar o RPM necessário para gerar determinado  $n$  (Tabela 1 e Figura 3). Determinando assim a aceleração envolvida no processo de solidificação dos materiais.

**Tabela 1. RPM para cada fator multiplicador.**

$n$	$RPM$
1	0
2	45
3	55
4	64
5	71
6	78
7	84
8	90
9	95
10	100

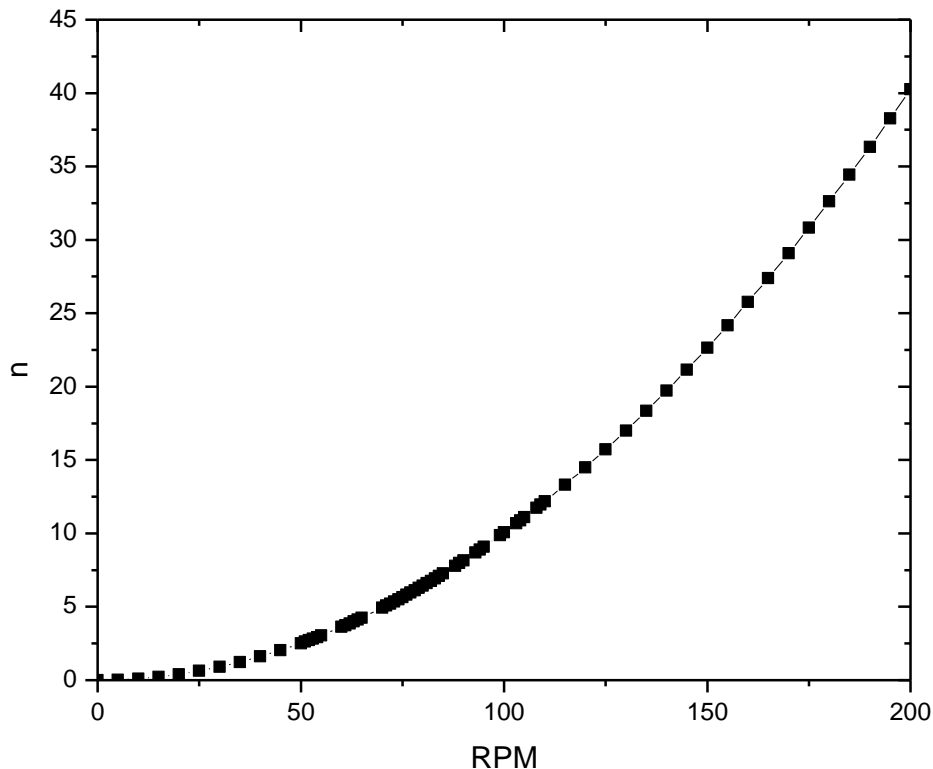


Figura 3. Fator multiplicador da gravidade ( $\bar{g}$ ) em função do RPM

#### 4. Conclusão

Esse trabalho desenvolveu um método algébrico para determinação do fator multiplicador da gravidade terrestre baseado nos princípios físicos envolvidos na utilização da centrífuga do LAS/INPE durante ensaios de solidificação.

A determinação desta variável é importante para o estudo de solidificação, por que, conhecendo-a podemos verificar quais influencias essa variação causa nos materiais. Além disso, este estudo auxiliará nas atividades do laboratório, uma vez que, escolhendo o fator multiplicador para o ensaio, dados como RPM,  $\omega$  e  $\beta$  serão fornecidos, facilitando o entendimento do experimento.

*Agradecimentos: Os autores são gratos a CAPES pelo suporte financeiro.*

#### Referências

An, C. Y.; Russo, L. C.; Ribeiro, M. F.; Bandeira, I. N. A Low Cost Centrifuge for Materials Processing in High Gravity. No: Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.

Tenório, P. I. G.; Toledo, R. C.; Freitas, F. E.; Fumachi, E. F.; Bandeira, I. N.; An, C. Y. Desenvolvimento de uma centrífuga para solidificação de ligas eutéticas em



- macrogravidade. No: VI Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, São José dos Campos/SP. Anais do VI Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais, 2015
- Nussenzveig, H. M. Curso de Física Básica. 4ª edição. São Paulo. Edgard Blücher. ISBN 58-212-0298-9. 2002.
- 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.
- Hurle, D. T. J.; Miuller, G.; Nitsche, 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.
- Dhindaw, B. K. Solidification under microgravity. *Sadhana*, v. 26, p. 59-69, 2001.
- 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.
- 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.
- Regel, L.L.; Wilcox, W.R. Centrifugal Materials Processing. New York: Plenum Press, 1997.