

# A Física implícita e o funcionamento do tubo de queda livre

EDVCATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Rafael C. Toledo<sup>1,2</sup>, Plínio I. G. Tenório<sup>2</sup>, Michel F. L. de Araújo<sup>2</sup>, Irajá N. Bandeira<sup>2</sup>, Chen Y. An<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Latino-Americano de Ciências da Vida e da Natureza, Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA, Av. Tancredo Neves, 6731, Caixa Postal 2044 - CEP 85867-970, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Sensores e Materiais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Avenida dos Astronautas, 1758 - Jd. Granja, CEP 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil.

E-mail: toledo.rc@gmail.com

(Recibido el 3 de mayo de 2021, aceptado 9 de octubre de 2021)

## Resumo

A simulação de ambiente de microgravidade, em tubos de queda livre, vem se apresentando como uma excelente alternativa prática e econômica, quando comparada aos outros meios tradicionais de acesso desse ambiente, como foguetes suborbitais, ônibus e estações espaciais. Deste modo, experimentos em tubos apresentam-se como uma alternativa apropriada para estudos de microgravidade em ambiente terrestre. Mesmo com um aparato experimental específico, a física envolvida é de nível básico acessível até para estudantes de ensino médio. Neste trabalho, é descrito um tubo de queda livre, em particular um utilizado para solidificação de materiais, e a física envolvida no experimento.

**Palavras-chave:** Microgravidade, Tubo de queda livre, Solidificação.

## Abstract

The simulation of a microgravity environment, in a drop tube, has been presenting an excellent practical and economical alternative when compared to other means of access to this environment, such as, sounding rockets, space shuttles and space stations. Thus, experiments on drop tubes become essential in microgravity research. Even with a specific experimental apparatus, the physics involved is very accessible, from high school to graduate school. In this work, a drop tube is described, in particular one used for solidifying materials, and the physics involved in experiments on the equipment.

**Keywords:** Microgravity, Drop tube, Solidification.

## I. INTRODUÇÃO

O ambiente espacial oferece condições especiais, únicas, para o desenvolvimento de pesquisa e tecnologia, seja ela através do vácuo, radiação de alta energia proveniente do Sol, outras fontes cósmicas e da microgravidade [1, 2, 3, 4, 5], contribuindo para o estudo e o entendimento dos fenômenos físicos, químicos e biológicos, os quais, outrora, eram parcialmente entendidos [1, 4, 5]. A partir da Era Espacial, com a chegada do homem ao espaço, as pesquisas e experimentos em ambientes de microgravidade ganharam significativa notoriedade, possibilitando o melhor entendimento e aperfeiçoamento, na Terra, dos processos envolvidos [1, 2, 3, 4, 5, 6].

A microgravidade é considerada uma área de pesquisa estratégica, segundo o Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) [7], que traz diretrizes e as ações prioritárias que buscam desenvolver tecnologia crítica e pesquisa em microgravidade, formando e capacitando especialistas em atividades espaciais.

Há vários meios de acesso para ambientes de microgravidade, sendo o mais conhecido a Estação Espacial Internacional, ISS (*International Space Station*). Contudo, embarcar qualquer experimento na ISS requer alto investimento financeiro, dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de outros meios que possibilitem obtenção dessa condição peculiar, tais quais: tubos e torres de queda livre, voos parabólicos, foguetes suborbitais, balões de grande altitude e satélites de reentrada [1-5].

Em particular, o tubo de queda livre é uma construção vertical concebida para oferecer um estado de queda livre (ausência aparente da gravidade), durante curtos intervalos de tempo, que no entretanto, são suficientes para a realização de diversos tipos de experimentos [1, 4, 8]. Deste modo, por se tratar de uma opção simples e de baixo custo operacional, quando comparado outros meios para reproduzir este tipo de ambiente, os tubos são comumente empregados, principalmente em pesquisas preliminares de experimentos que serão realizados em veículos com maior tempo de microgravidade [1, 4, 8]. Assim, esse trabalho fornece uma visão da física implícita nos tubos de queda livre, em

particular, experimentos que envolvam solidificação de materiais.

## II. GRAVIDADE

Gravidade é umas das quatro interações fundamentais da natureza, juntamente com as interações eletromagnética, nuclear forte e fraca [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11]. Este tipo de interação é de natureza estritamente atrativa (visão newtoniana) e se manifesta, em maior magnitude, quando há interação entre corpos massivos, ou seja, corpos celestes, a exemplo de planetas, estrelas, buracos negros etc. Próximo à superfície da Terra, a gravidade provoca uma aceleração (de  $9.81 \text{ m/s}^2$ , em média) nos corpos em direção ao centro do planeta, colocando-os em uma situação de queda, atenuada pela resistência do ar. Entretanto, a partir de uma outra perspectiva sobre o mesmo tema, a Teoria da Relatividade Geral de Einstein (1915), prediz que esse fenômeno acontece em consequência da curvatura formada no espaço-tempo [1-5, 9-11].

Contudo, a gravidade foi interpretada, inicialmente, pelo físico inglês Isaac Newton, em 1665, como um fenômeno natural pelo qual os corpos que possuem matéria se atraem, sendo está a força responsável por prender objetos à superfície de planetas e, de acordo com as suas leis do movimento, é também responsável por manter objetos em órbita em torno uns dos outros [9, 10]. Na sua obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687), Newton publica a Lei da Gravitação Universal (Figura 1) a qual descreve que duas partículas quaisquer, do Universo, se atraem gravitacionalmente por meio de uma força que é diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separam, como mostra a Equação (1):

$$F_1 = F_2 = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (1)$$

onde  $F_1$  e  $F_2$  são as intensidades das forças de atração entre os corpos, medidas em Newton;  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$  é a constante gravitacional universal;  $m_1$  e  $m_2$  são as massas dos corpos que se atraem; e  $r$  é a distância entre o centro dos dois corpos, em unidades de acordo ao Sistema Internacional de Unidades [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11].

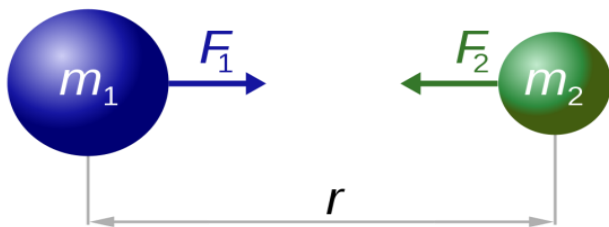


FIGURA 1. Atração entre dois corpos [9].

Já Albert Einstein, propõe em 1915 uma nova teoria, a qual versava também sobre a gravidade, chamada de Teoria da Relatividade Geral, que constitui um conjunto de hipóteses que complementa a Relatividade Especial e possui maior abrangência quando comparada a Lei da Gravitação Universal de Newton, fornecendo uma descrição unificada da gravidade como uma propriedade geométrica do espaço-tempo [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11]. Nesta teoria Einstein estabeleceu o princípio da equivalência, o qual versa sobre a impossibilidade de um observador distinguir, localmente, se está num campo gravitacional ou em movimento acelerado [1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11].

Um experimento mental, clássico, para entender o princípio da equivalência é se imaginar dentro do elevador de um edifício quando os cabos se rompem e ele despenca [1, 2, 4]. Durante a queda, o corpo sentirá uma sensação de flutuação dentro do elevador, caindo com a mesma aceleração do elevador, em direção ao solo. Depois imaginemos outro arranjo, em que o elevador está vagando através do espaço, longe de qualquer outro corpo celeste, como há “ausência” de gravidade, também flutuaremos. De fato, é como estar em queda livre. Imaginando agora que, nosso elevador espacial, há um foguete preso aos cabos, puxando-o para cima. Em razão da inércia, seremos puxados para o chão do elevador. Se o elevador é puxado para cima, seu corpo faz seu peso se projetar para baixo da mesma maneira que faria se você estivesse no elevador em repouso, sob a gravidade da Terra, ou seja, acelerar é como estar em repouso num campo gravitacional [1, 2, 4].

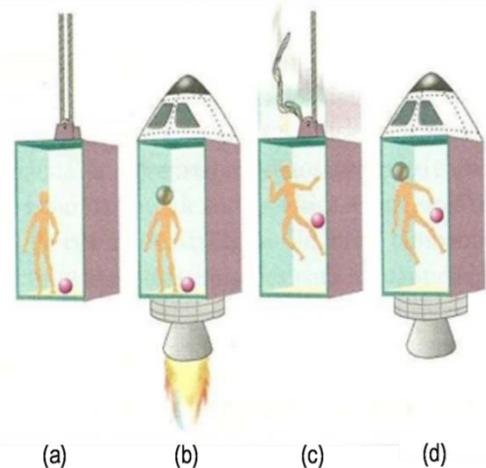


FIGURA 2. Representação do experimento mental do Princípio de Equivalência. Um observador dentro de um elevador não sabe dizer a diferença entre estar em um elevador estacionário na Terra (a) e estar acelerado por um foguete no espaço livre (b). Se o motor do foguete for desligado (d), a sensação será a mesma de estar no elevador em queda livre (c). Adaptado de [4].

### A. Microgravidade

Gravidade zero é o termo utilizado ao estado em que não há força gravitacional terrestre, porém, como a gravidade não pode ser simplesmente “desligada” não existe um meio de acesso a ambientes de gravidade zero [12, 13]. Dessa forma,

emprega-se o termo microgravidade a um estado em que a força gravitacional, é muito reduzida quando comparada a outras forças que definem fenômenos físicos (por exemplo, convecção e adesão superficial) [4, 13]. O prefixo micro vem da palavra grega mikrós, que significa pequeno. Em termos métricos o prefixo significa uma parte por milhão (0,000001) [4, 9, 10, 12].

Nos meios de obtenção conhecidos de ambiente de gravidade reduzida, estes baseiam-se no conceito de imponderabilidade (estado de aparente falta de gravidade, como em queda livre), assim entende-se por estado de microgravidade, o valor aparente da aceleração gravitacional no ambiente no qual serão conduzidos os experimentos dentro de valores que variam de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}g$  (onde  $g$  é a aceleração da gravidade da Terra), atribuindo-se o nível de melhor qualidade ao menor módulo desta aceleração [1-4].

Outro fator de interesse aos experimentos é a duração da microgravidade, ou seja, o intervalo de tempo em que se estabelecem as condições adequadas para a condução de um experimento dentro de um determinado ambiente de microgravidade [13]. A Figura 3 nos mostra os meios de obtenção do ambiente de microgravidade para alguns tipos de experimentos, levando em consideração o nível de microgravidade e a sua duração.

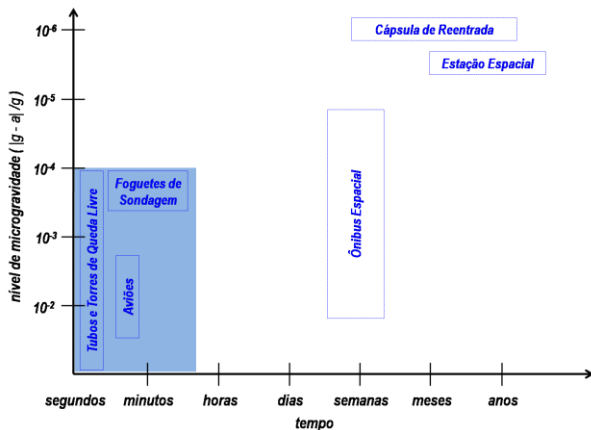


FIGURA 3. Nível de microgravidade vs. Tempo. Adaptado de [13].

Experimentos em ambiente de microgravidade visam entender como a gravidade influencia os fenômenos e os processos e vêm despertando grande interesse científico e tecnológico, tendo em vista o número crescente de países e empresas privadas que veem desenvolvendo tecnologia espacial, que motivados por desenvolvimentos no novo e vasto campo de pesquisas em microgravidade [5, 13], o qual tem propiciado novas descobertas em campos tão distintos como ciência dos materiais, física dos fluidos, biologia, biotecnologia, fisiologia humana, botânica, medicina, dentre outras [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Dentro dos campos atuais de interesse científico e tecnológico podemos citar: na biologia os experimentos como eletro fusão celular, crescimento de células, motilidade de células e experimentos botânicos; na físico-química experimentos em convecção de Marangoni, eletrólise, crescimento de cristais orgânicos, transformação de fases, reações químicas, capilaridade, combustão, dissolução, fusão, flutuação, difusão e outros fenômenos de transporte;

no processamento de materiais experimentos utilizando materiais sinterizados e ligas, dispersão de ligas, formação de espumas, fusão de vidro, soldas, difusão em líquidos, processamentos de líquidos sem utilização de recipientes, transição de fases, filmes finos, experimentos com coloides e crescimento de cristais; na fisiologia a descalcificação óssea acentuada, problemas cardiovasculares, e problemas no sistema neuro-auditivo; na farmacêutica a cristalização de novos fármacos, produção de colágeno, biosseparação (eletroforese e separação termodinâmica de fase), microencapsulação e estudo de culturas de células (biorreatores) [1,5, 6].

### III. TUBO DE QUEDA LIVRE

A Queda livre é um tipo de movimento caracterizado pelo abandono de um corpo, a partir de uma certa altura, o qual adquire uma aceleração, devida a atuação do campo gravitacional terrestre em direção ao centro da Terra. Neste tipo de movimento, quando ocorre no vácuo, pode ser desconsiderado o efeito da resistência do ar, por isso, o tempo de queda dos objetos não depende da sua massa ou de seu tamanho, mas somente da altura em que foram soltos e do módulo da aceleração da gravidade local [9, 10]. Assim, no experimento do tubo de queda livre, o tempo de uma amostra em queda livre, obedecerá à equação:

$$y(t) = y_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}, \quad (2)$$

onde:  $y(t)$  é a posição vertical da gotícula em função do tempo;  $y_0$  é a posição inicial;  $v_0$  é a velocidade inicial;  $a$  é a aceleração, que neste caso é a gravitacional  $g$ ; e  $t$  é o tempo. Se a gotícula iniciar a queda com:  $v_0 = 0$ ; e se a posição inicial for escolhida como ponto zero:  $y_0 = 0$ , e isolando o tempo, a equação será

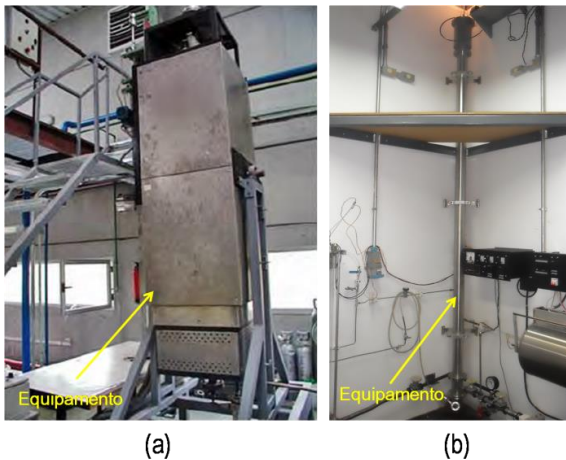
$$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}. \quad (3)$$

Os tubos de queda livre (Figura 4) são construções verticais que permitem a simulação da microgravidade, na Terra, através da queda livre de experimentos (amostras) de uma determinada altura, sendo uma alternativa de baixo custo, quando comparados com outros meios de se obter ambiente de microgravidade.

O equipamento é mantido em vácuo, ou sob uma atmosfera controlada, e apenas as amostras, que são os objetos de estudo, ficam sujeitas à queda livre, assim têm sido utilizados em estudos de combustão e, principalmente de solidificação rápida para diversos tipos de materiais por proporcionarem alguns segundos de microgravidade, sem necessidade de usar recipientes (moldes ou cadinhos) [12, 14, 15, 16].

Na área de solidificação, os tubos proporcionam pesquisas voltadas para o tipo de nucleação [17, 18, 19], super-resfriamento máximo em metais puros e ligas [20, 21, 22, 23], microestrutura característica em função do super-resfriamento [19, 24, 25], modificação da microestrutura

característica em ligas com baixo ponto de fusão [12, 14, 15, 26, 27], e transferência de calor em gotículas solidificadas em microgravidade [16, 28, 29].



**FIGURA 4.** (a) Tubo de queda livre do Instituto de Carboquímica/Espanha e (b) Tubo de queda livre do LABAS/INPE [12].

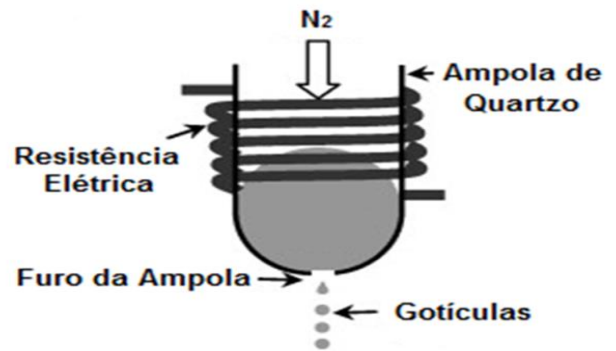
### A. Tubos para Experimentos de Solidificação

A técnica de tubo de queda livre é empregada para resfriar e solidificar pequenas gotas (gotículas) fundidas (derretidas), que caem sem recipiente (*containerless*) em um tubo que pode estar em vácuo ou preenchido com gases (tais como hélio, argônio, nitrogênio ou outros) para criar uma atmosfera controlada e facilitar o resfriamento das amostras por condução térmica [8]. Há dois tipos de tubos, curtos e longos, que influenciam no tipo de experimento que pode ser realizado. Em tubos de queda livre curtos (até 20 m de comprimento), o material fundido é disperso em um jato líquido (*spray*) que ocasiona muitas gotículas pequenas em quedas simultâneas. Enquanto, nos tubos de queda livre longos (superiores a 20 m de comprimento), gotas individuais de alguns milímetros são sub-resfriadas e solidificadas durante a queda livre [8].

Na técnica de tubo curto várias gramas do material em estudo (amostra) é fundido em uma ampola/cadinho que contém um pequeno furo na extremidade inferior. Ao injetar um gás inerte ao material sob pressão no topo da ampola, a amostra líquida é pressionada através do furo da ampola, formando um jato fino do material líquido que se dispersa em pequenas gotículas no tubo (Figura 5) [8]. As gotículas sub-resfriam e solidificam durante a queda livre sem recipientes em ambiente de microgravidade. Essa técnica é empregada para estudar os fenômenos de sub-resfriamento e nucleação [17, 30, 31], para investigar a evolução das microestruturas refinadas em grãos [32, 33] e para produzir materiais cristalinos metaestáveis e vidros metálicos [17, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Nos tubos de queda livre longos são processadas gotas individuais do material estudado, eles exploram o fato de que um corpo que cai livremente no vácuo experimenta gravidade zero, para estudar os efeitos da microgravidade na solidificação em laboratórios terrestres [8]. Como exemplo desses equipamentos temos o tubo de queda de 105 m no

NASA Marshall Space Flight Center, descrito por Rathz et al. [36] e um tubo de queda de 47 m no Centro de Pesquisa Nuclear em Grenoble [37]. Nesses equipamentos, o experimento é realizado em vácuo e gotículas com diâmetros de 1 a 5 mm são fundidas por um feixe de elétrons ou por levitação eletromagnética. A gota em queda é monitorada por fotodiodos (Si ou InSb) ao longo do comprimento do tubo, o que permite detectar a recaescência do material (elevação repentina da temperatura durante o resfriamento). O processamento de gotas sob alto vácuo [36] ou mesmo ultra-alto vácuo [37] reduz a oxidação da superfície das amostras fundidas como uma possível fonte de nucleação heterogênea. Por outro lado, apenas metais com alto ponto de fusão, como, por exemplo, metais refratários, podem ser processados, pois o resfriamento é apenas por radiação, o que é eficiente a altas temperaturas exclusivamente [8].



**FIGURA 5.** Esquema do funcionamento do tubo de queda livre [28].

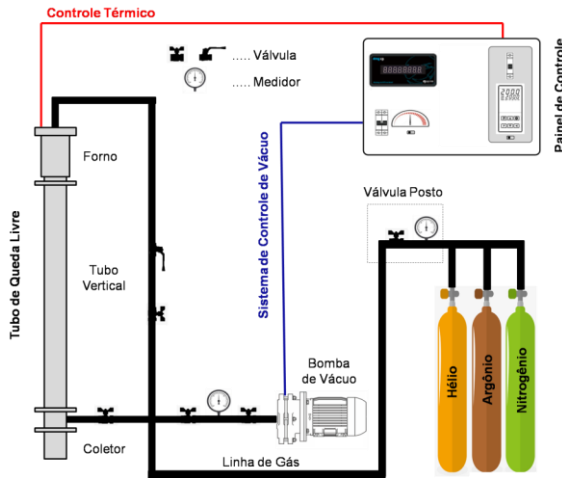
Os experimentos com tubo de queda livre são complementares aos experimentos de microgravidade e de levitação. Nas duas técnicas, as amostras são processadas sem recipiente. Embora os experimentos de levitação permitam medir toda a história de sub-resfriamento e solidificação, os tubos de gotas oferecem a possibilidade de análise estatística da nucleação e crescimento de cristais em função do tamanho das gotas e da taxa de resfriamento [8].

### B. Tubo de Queda Livre do LABAS/INPE

O tubo de queda livre do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LABAS) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Figura 4b), foi construído com o objetivo de ser uma facilidade permanente de pesquisa em microgravidade sob ambiente terrestre, para estudos de solidificação de ligas de materiais metálicos e semicondutores [12, 14, 15, 16, 26, 27, 28, 29].

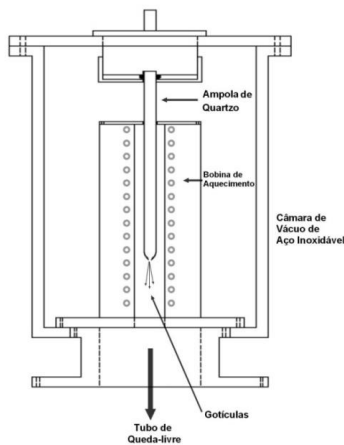
O tubo possui comprimento de 3,5 m e diâmetro de 80 mm, e proporciona um tempo de aproximadamente 0,85 s de queda livre. O equipamento é composto por um sistema de aquecimento (forno), um sistema de injeção de gás, um tubo vertical, um coletor de amostras e um sistema de vácuo, conforme mostra a Figura 6 [12].





**FIGURA 6.** Diagrama do sistema do tubo de queda livre do LABAS/INPE. Fonte: Autores.

O forno tubular de aço inoxidável possui 100 mm de comprimento e diâmetro externo de 50 mm com uma cavidade interna constituída por um tubo refratário em cerâmica (alumina) com 15 mm de diâmetro interno, onde ocorre o processamento do material, é acoplado ao interior de uma câmara de vácuo na parte superior do tubo de queda livre (Figura 7) [12].

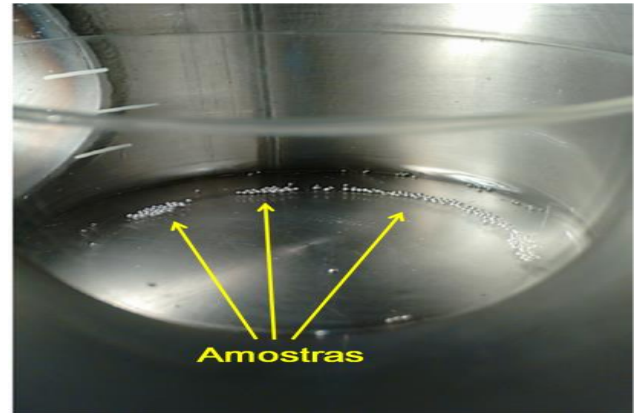


**FIGURA 7.** Diagrama do sistema do forno [14].

O sistema de aquecimento é proporcionado por uma resistência de níquel-cromo, de 28  $\Omega$ , encapsulada em tubos de quartzo, envolvendo o tubo cerâmico da cavidade interna, proporcionando temperaturas de até 1000°C. O sistema do forno é ligado em um módulo de potência (NOVUS - modelo SSR-4840) que é controlado por um controlador de temperatura (NOVUS - modelo N2000) [12].

O sistema de gás é alimentado por um gás inerte (nitrogênio, argônio ou hélio) ao material de estudo e é composto por um dispositivo para pulverizar as amostras (localizado na tampa da câmara de vácuo), na forma de gotículas, onde é presa uma ampola de quartzo contendo a carga, e de uma válvula de controle para a atmosfera interna do tubo. O sistema de vácuo é composto por uma bomba mecânica de alto vácuo EDWARDS modelo EDMS série 503367, que proporciona pressão da ordem de 5,0 Pa [12].

A ampola de quartzo que contém a carga tem aproximadamente 200 mm de comprimento, com diâmetro externo de 9 mm e 1 mm de espessura de parede, possui um orifício que pode variar de 200 a 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro para, sob pressão do gás, pulverizar o material fundido em formato esférico para a queda no tubo, as quais serão aparadas no coletor na extremidade inferior do tubo (Figura 8) [14, 26-29].



**FIGURA 8.** Amostras de BiSn eutético no coletor do tubo após a queda em microgravidade [16].

As condições do ambiente de microgravidade durante a queda livre proporcionam uma solidificação sem contato com o recipiente, favorecendo a formação de gotículas com uma geometria quase esférica por causa da sua tensão superficial, uma vez que a esfera possui a menor relação entre a sua área superficial e o seu volume. Quando uma gota é solidificada nestas condições, o líquido se resfria abaixo da sua temperatura de fusão de equilíbrio (super resfriamento) antes ocorrer a mudança de fase, assim as amostras obtidas apresentam um alto grau de super resfriamento, uma vez que a nucleação heterogênea é evitada devido à ausência das paredes do recipiente [12, 14, 15, 16]. Por ser uma solidificação rápida e, portanto, fora do equilíbrio, há formação de fases metaestáveis. Nesse ambiente, a convecção térmica não atua na amostra e os processos de transferência de calor se dão pelo arraste do gás durante a queda (condução) e por radiação [12, 14, 15, 16].

### C. Nível de Microgravidade

Tratando-se de um experimento de solidificação, muitas vezes esse se faz necessário ser realizado em um ambiente com atmosfera controlada, o que influencia no nível de microgravidade que o equipamento proporciona. Nessa situação a amostra (gotícula) que está caindo através da atmosfera está sujeito a três forças externas (Figura 9). A primeira força é a força gravitacional, expressa como o peso da amostra. A força peso ( $P$ ) igual à massa ( $m$ ) do objeto vezes a aceleração gravitacional ( $g$ ) que é de 9,81  $\text{m/s}^2$ , aproximadamente, na superfície da Terra. Se a amostra estivesse caindo no vácuo, essa seria a única força que atuaria na amostra. Mas na atmosfera, o movimento de um objeto em queda é oposto à resistência do fluido (gás inerte), ou arraste. A equação de arrasto nos diz que o arrasto ( $F_D$ ) é igual a um

coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) vezes a metade da densidade do fluido ( $\rho$ ) vezes a velocidade ( $v$ ) ao quadrado vezes a área da seção transversal do objeto em queda ( $A$ ) na qual o coeficiente de arrasto é baseado. A terceira força é o empuxo ( $F_E$ ), que é a força exercida por um fluido sobre um objeto mergulhado total ou parcialmente nele, esta é igual ao módulo do peso do fluido deslocado pela amostra. O empuxo ( $F_E$ ) é igual ao produto entre a aceleração gravitacional ( $g$ ), a densidade do fluido ( $\rho$ ), e o volume do fluido deslocado, que é igual ao volume da amostra ( $V$ ) [9, 10].

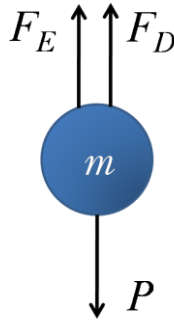


FIGURA 9. Objeto em queda [9].

O movimento de um objeto em queda pode ser descrito pela Segunda Lei do Movimento de Newton ( $F_R = ma$ ) [9, 10]. A força resultante ( $F_R$ ) na amostra é igual à diferença entre o peso, as forças de arrasto e o empuxo ( $F_R = P - F_D - F_E$ ), podemos fazer um pouco de álgebra e reescrever a aceleração da amostra ( $a$ ) em função dos termos das forças atuantes, assim temos:

$$a = g - \frac{\rho}{m} \left( \frac{v^2 AC_D}{2} + gV \right). \quad (4)$$

Quando as forças representadas no diagrama de forças apresentado na Figura 9 atingem o equilíbrio entre si ( $F_R = P - F_D - F_E = 0$ ), existe uma condição de não imponderabilidade, ou seja, o sistema não encontra-se em microgravidade, isso ocorrerá quando a soma do arrasto e do empuxo for igual ao peso, não há força externa líquida sobre o objeto e a aceleração se torna igual a zero. O objeto cairá a uma velocidade constante, conforme descrito pela Primeira Lei do Movimento de Newton. A velocidade constante é chamada de velocidade terminal ( $v_t$ ) [9, 10]. A velocidade terminal de qualquer corpo em queda vertical muda consideravelmente de acordo com sua massa, forma, densidade e com as propriedades do fluido ao qual está sob escoamento, como podemos ver na equação 5:

$$v_t = \sqrt{\frac{2g}{AC_D} \left( \frac{m}{\rho} - V \right)}. \quad (5)$$

Podemos utilizar a equação de Torricelli para descrever a cinemática do movimento, a qual permite calcular a velocidade final de um corpo em movimento retilíneo uniformemente variado, sem a necessidade de se conhecer o intervalo de tempo em que este permaneceu em movimento,  $v^2 = v_0^2 + 2a\Delta S$ , onde  $v$  e  $v_0$  representam as velocidades

final e inicial do corpo, respectivamente,  $\Delta S$  representa a distância percorrida (para a o tubo de queda livre sua altura,  $h$ ) e  $a$  representa a aceleração ( $a$  é aceleração da gravidade para o tubo) [9, 10]. Admitindo que  $v_0 = 0$  no experimento, podemos reescrever a equação 6:

$$a = g \cdot \left[ 1 - \frac{\rho}{m} (hAC_D + V) \right]. \quad (6)$$

Para determinar a ordem de grandeza do ambiente de microgravidade na qual as amostras (gotículas) estarão submetidas durante o experimento, utilizamos a relação:

$$a_\mu = \frac{|g-a|}{g}. \quad (7)$$

Considerando que as gotículas obtidas no tubo ( $h = 3,5 m$ ) tenham o formato de esferas ( $C_D = 0,47$ ) com o diâmetro de  $600 \mu m$  ( $A = 2,83 \cdot 10^{-7} m^2$  e  $V = 1,13 \cdot 10^{-10} m^3$ ) e massa de  $0,6 mg$ ; e que foi utilizado ar dentro do tubo, variando a pressão entre  $1,0$  a  $0,001 atm$ . Realizando os cálculos obtemos ambientes de microgravidade da ordem de  $10^{-1}$  a  $10^{-4}$  respectivamente, observa-se que quanto maior a atmosfera controlada criada no interior do tubo, menor é o nível de microgravidade obtido.

#### IV. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A possibilidade de se simular ambientes de microgravidade na superfície terrestre potencializa a realização de investigações de fenômenos físicos, químicos e biológicos, uma vez que o número de variáveis que podem prejudicar o experimento é menor (por exemplo, as condições meteorológicas nos lançamentos de foguetes suborbitais e satélites de reentrada), além disso, os custos dessas pesquisas são reduzidos quando comparados a outros meios que ofereçam ambientes de microgravidade.

Desde modo, a pesquisa em microgravidade vem crescendo no Brasil e tornou-se uma área de pesquisa estratégica, segundo o Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) [7]. O PNAE versa sobre um conjunto de iniciativas que envolve atividades planejadas ou em execução pela Agência Espacial Brasileira (AEB).

Apesar do tubo de queda livre parecer ser um equipamento complexo, a física envolvida no transcorrer do experimento é bastante simples, o que possibilita a implementação de atividades experimentais, com este equipamento, em qualquer nível de ensino que já tenha a disciplina de física em sua grade curricular. Possibilitando assim, aos estudantes a contextualização de fenômenos físicos e ao acesso a experimentos não tão acessíveis fora de um curso de graduação e/ou pós-graduação.

Assim, este tipo de trabalho tem a potencialidade interdisciplinar, já que poderá abordar uma série de conceitos de diferentes disciplinas em um único experimento, contribuindo não somente para a formação do estudante, mas também de professores, monitores e técnicos envolvidos. Como pôde ser visto, neste artigo, foi possível descrever de maneira simples a física envolvida em um meio de acesso a

microgravidade, tubo de queda livre, com o objetivo de facilitar a inserção desse tipo de conteúdo no ensino de física. Por outro lado, busca-se também difundir a linha de pesquisa em microgravidade de forma que esta possa atrair potenciais pesquisadores para essa área estratégica que ainda é pouco difundida nas universidades e centros de pesquisas no Brasil.

## REFERENCES

- [1] Hamacher, H., Fitton, B., Kingdon, J., *In Fluid sciences and materials science in space: a european perspective*, editado por: Walter, H. U. (Springer, Berlin, 1987).
- [2] ESA. Microgravity. 2015. *European Space Agency, Impress Education*, Disponível em: <<http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Microgravity/>>, acessado em jul. 2020.
- [3] Naumann, R. J., Herring, H. W., *Materials processing in space: early experiments* (NASA, Washington, 1980).
- [4] NASA, *Microgravity: a teacher's guide with activities in science, mathematics, and technology*. (National Aeronautics And Space Administration Headquarters, Washington, 1997), p. 178.
- [5] Seibert, G. *et al.*, *A World Without Gravity: Research in Space for Health and Industrial Processes*, editado por B. Fitton e B. Battrick (ESA Publications Division, Netherlands, 2001), p. 495.
- [6] Belingheri, M., M., *ESA bulletin 107.2001*. Disponível em: <[http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet107/bul107\\_4.pdf](http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet107/bul107_4.pdf)>, acessado em jul. 2020.
- [7] Agência Espacial Brasileira. *Programa Nacional de Atividades Espaciais - PNAE: 2012-2021*. (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Brasília, 2012), p. 36.
- [8] Herlach, D. M., Matson, D. M., *Solidification of Containerless Undercooled Melts* (Wiley-VCH, Weinheim, 2012), p. 578.
- [9] Alonso, M., Finn, E. J., *Física: um curso universitário* (Edgard Blucher, São Paulo, 1972), **1**, p. 512.
- [10] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Fundamentos de física: mecânica* (LCT, Rio de Janeiro, 2016), **1**, p. 372.
- [11] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica* (LCT, Rio de Janeiro, 2016), **2**, p. 324.
- [12] Toledo, R. C., *Estudo da solidificação de ligas metálicas eutéticas em ambiente de microgravidade*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2013.
- [13] Corrêa Junior, F. A., *Metodologia para mitigar a recorrência de falhas e problemas em projetos aeroespaciais: levantamento e análise de falhas observadas e estratégias de mitigação*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (2019).
- [14] Toledo, R. C., *Estudo da solidificação da liga metálica eutética BiInSn em ambiente de microgravidade utilizando tubo de queda livre, "drop tube"*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (2009).
- [15] Freitas, F. E., *Solidificação de ligas metálicas eutéticas de BiCd e BiSn em ambiente de microgravidade utilizando tubo de queda livre (drop tube)*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (2016).
- [16] Fumachi, E. F., *Desenvolvimento de um tubo de queda livre para o modelamento e otimização do processo de solidificação de ligas eutéticas de bismuto-estanho em ambiente de microgravidade*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (2017).
- [17] Drehman, J., Turnbull, D., *Scripta Metallurgica et Materialia* **15**, 543 (1981).
- [18] Rasmussen, D. H., Javed, K., Appleby, M., Witowski, R., *Materials Letters* **3**, 344 (1985).
- [19] Wang, N., Cao, C., Wei, B., *Advances in Space Research* **24**, 1257 (1999).
- [20] Turnbull, D., Cech, R. E., *Journal of Applied Physics* **21**, 804 (1950).
- [21] Perepezko, J. H., *Nucleation: rapid solidification*. Workshop, Foundry-Institute Aachen (1983).
- [22] Sahn, P. R., *Nucleation: rapid solidification* Workshop, Foundry-Institute Aachen (1983).
- [23] Hofmeister, W. H., Robinson, M. B., Bayuzick, R. J., *Applied Physics Letters* **49**, 1342 (1986).
- [24] Han, X. J., Wang, N., Wei, B., *Applied Physics Letters* **81**, 778 (2002).
- [25] Ge, L. L., Liu, R. P., Li, G., Ma, M. Z., Wang, W. K., *Materials Science and Engineering A* **385**, 128 (2004).
- [26] Toledo, R. C., Mattos, M., An, C. Y., Bandeira, I. N., *Materials Science Forum* **660**, 587 (2010).
- [27] Toledo, R. C., Freitas, F. E., An, C. Y., Bandeira, I. N., *Materials Science Forum* **727**, 1633 (2012).
- [28] Toledo, R. C., Travelho, J. S., An, C. Y., Bandeira, I. N., *Microgravity, Science and Technology* **26**, 119 (2014).
- [29] Fumachi, E. F., Toledo, R. C., Tenório, P. I. G.; An, C. Y.; Bandeira, I. N., *Microgravity, Science and Technology* **31**, 185 (2019).
- [30] Bayuzick, R. F., Hofmeister, W. H., Robinson, M. B., *In Undercooled Alloy Phases*, editado por Collings, E.W. and Koch, C.C. (Metallurgical Society, Warrendale, 1987).
- [31] Shong, D. S., Graves, J. A., Ujiie, Y.; Perepezko, J. H., *Materials Research Society Proceedings*, **87**, 17 (1987).
- [32] Elder, S. P., Abbaschian, G. J., *In Principles of Solidification and Materials Processing*, editado por Trivedi, R.; Sekhar, A., Mazumdar, J. (Oxford and IBH Publishing Co. Pvt Ltd., Delhi, 1990).
- [33] Cochrane, R. F., Herlach, D. M., Willnecker, R., in *Metastable Microstructures*, editado por Banerjee, D. e Jacobson, L.A., (Oxford and IBH Publishing Co. Pvt Ltd., New Delhi, 1993).
- [34] Gillessen, F., Herlach, D. M., *Materials Science and Engineering A* **97**, 147 (1988).
- [35] Cochrane, R. F., Evans, P. V., Greer, A. L., *Materials Science and Engineering A* **98**, 99 (1988).
- [36] Rathz, T. J., Robinson, M. B., Hofmeister, W. H., Bayuzick, R.J., *Review of Scientific Instruments* **61**, 3846 (1990).
- [37] Vinet, B., Cortella, L., Favier, J. J., Desre, P., *Applied Physics Letters* **58**, 97 (1991).