

## EXPERIMENTO 7

### CRIOSTATOS

#### Introdução

Um criostato de pesquisa é um recipiente de forma complexa feito para receber líquidos criogênicos como nitrogênio líquido e hélio líquido. Em criostatos de hélio, o nitrogênio serve para abaixar a temperatura do criostato até 77 K, que é a temperatura de sua ebulição, e ao mesmo tempo formar uma blindagem térmica para o recipiente interno de hélio líquido. O isolamento térmico desses líquidos do ambiente e entre si é feito usando-se um sistema de alto vácuo, que em geral permite alcançar pressões da ordem de  $10^{-6}$  torr, o que minimiza o transporte de calor via gás rarefeito. A transferência de calor por condução nas paredes do criostato é minimizada utilizando-se materiais de baixa condutividade térmica, que no nosso caso específico é aço inox 304. Devido ao exíguo espaço disponível entre paredes, não se usa superisolação entre as paredes, de modo que o mecanismo de transferência de calor por radiação é importante para este tipo de criostato. O objetivo desta experiência é familiarizar o aluno com um criostato de nitrogênio líquido e a realização de medidas da taxa de evaporação do nitrogênio.

#### Aparato experimental

O aparato que vamos usar (ver figuras anexas) consiste de um criostato de pesquisa óptico tipo Varitemp, com uma câmara de nitrogênio líquido, e outra de hélio líquido (LHe) ligada à câmara de amostra através de um capilar controlado por uma válvula agulha. Para este experimento apenas parte do sistema será utilizada como iniciação. Esse criostato está ligado a um sistema de alto vácuo, para o isolamento térmico das suas diversas câmaras. Apenas para informação, este sistema está ligado também a uma "árvore" de válvulas que o conecta à linha de recuperação de He. Essa árvore está também ligada a uma possante bomba mecânica, de alta vazão, que é usada para bombear o LHe, e a um manômetro em U de mercúrio, que permite medir a pressão de vapor do LHe em relação à pressão atmosférica. As válvulas estão dispostas de modo que se pode isolar a câmara de amostra do Varitemp da linha de recuperação de He e conectá-la à bomba mecânica, de modo a abaixar a pressão de vapor do LHe. Neste experimento usaremos apenas o sistema de vácuo e a câmara de nitrogênio.

#### Procedimento

1. Fazer vácuo nas cavidades internas do criostato (ver figura anexa). Para isto proceda da seguinte forma:
  - 1.1 ligue o sistema de vácuo que consiste de uma bomba mecânica e uma difusora. Descubra por si mesmo como operar o sistema de vácuo utilizando o roteiro geral apresentado na apostilha do curso.
  - 1.2 Faça vácuo no criostato
2. Introduzir nitrogênio líquido na câmara apropriada do criostato (a mais externa com abertura para o meio ambiente) enchendo-a completamente. **Coloque o nitrogênio lentamente** para evitar fadiga das soldas do criostato devido ao choque térmico.

3. Medir a taxa de evaporação do nitrogênio por cerca de 2 horas. Para isto utilize uma escala qualquer milimetrada, uma régua por exemplo.

---

## RELATÓRIO (seguir o modelo da página 5)

### Resumo

**I – Introdução** – destaque os objetivos e a motivação para o estudo deste experimento

**II – Descrição do procedimento** – descreva como o experimento foi realizado com informações de dados utilizados.

### III - Resultados

- a) Construir uma tabela e um gráfico do volume evaporado em função do tempo
- b) Utilizando o coeficiente angular da região para longos tempos determine a taxa de evaporação.
- c) Utilizando o dado acima determine a potência que é fornecida para o nitrogênio líquido.
- d) Faça uma estimativa teórica da taxa de evaporação e compare com as medidas experimentais. Explique as origens das diferenças obtidas. Justifique as aproximações usadas. Utilize as equações constantes da apostilha de criogenia. O criostato deve ser medido, de modo que se tenham todas as suas dimensões importantes para este cálculo.

### IV - Discussão

- a) Descreva as características básicas de um criostato.
- b) Descreva quais são as origens dos diversos fluxos de calor.
- c) Explique o comportamento da curva obtida no experimento desde o início até o final do período medido (cerca de 2 horas), indicando quais as fontes de condução de calor e porque a taxa não é constante e as razões para as diferenças encontradas entre o experimento e o cálculo teórico.
- d) Estimar qual seria a pressão residual que daria uma potência de transferência de calor, devido a condutividade térmica do gás, equivalente ao valor obtido experimentalmente.
- e) Apresente o funcionamento do ciclo *Stirling* e do ciclo *Collins* (ver M.D. Atrey, Thermodynamic analysis of Collins helium liquefaction cycle, *Cryogenics* 38 (1998) 1199–1206.

### V – Conclusão

### Referências

## APÊNDICE

### TRANSFERÊNCIA DE CALOR

#### **1) Transferência de calor por RADIAÇÃO entre duas placas paralelas.**

A equação (1) fornece a potência,  $dq/dt$  (taxa de transferência de calor por unidade de tempo) por radiação entre duas placas paralelas de mesmo material, de área A, nas temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  (para  $T_2 > T_1$ ).

$$P_{\text{radiação}} = dq/dt = \sigma A [\varepsilon / (2 - \varepsilon)] (T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

onde  $\varepsilon$  é a emissividade do material ( $\varepsilon_{\text{aço}}=0,048$ ) e  $\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  é constante de Stefan-Boltzman.

No caso de duas cascas cilíndricas com pouca diferença entre seus diâmetros, podemos usar esta equação de forma aproximada.

#### **2) Transferência de calor por condução em gases**

O mecanismo de transferência de calor em gases depende da pressão. Vamos dividir em duas partes: (a) gases rarefeitos, onde a distância entre as placas é da ordem do livre caminho médio e (b) gases em atmosfera onde a distância entre as placas é muito maior do que o livre caminho médio. No primeiro caso podemos estudar sistemas sob vácuo, enquanto no segundo caso, situações em atmosfera ambiente, por exemplo.

##### **(a) Transferência de calor por condução em gases rarefeitos (vácuo)**

Se a pressão do sistema é baixa, a potência de transferência de calor por condução gasosa,  $dq/dt$ , na pressão  $p$ , entre duas placas paralelas de mesmo material, de área A, nas temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  é dada pela expressão (2):

$$P_{\text{condução em gás rarefeito}} = dq/dt = C a_0 p A \Delta T \quad (\text{SI}) \quad (2)$$

onde  $C$  é uma constante,  $a_0$  é o coeficiente de acomodação e  $\Delta T = T_2 - T_1$  (para  $T_2 > T_1$ ) é a diferença de temperatura entre as placas. A constante  $C$  tem os valores 0,028; 0,059 e 0,016 (no SI) respectivamente para o hélio, hidrogênio e ar. O coeficiente de acomodação  $a_0$  depende do gás e do material das placas. Para ar entre placas de aço,  $a_0=0,33$  (no SI).

No caso de duas cascas cilíndricas com pouca diferença entre seus diâmetros, podemos usar esta equação (2) como aproximação.

##### **(b) Transferência de calor por condução em gases não rarefeitos**

Neste caso a equação é similar à condução em sólidos (ver item 3):

$$P_{\text{condução em atmosfera gasosa}} = k A \Delta T / z \quad (3)$$

onde  $k$  é condutividade térmica do gás ( $k_{\text{ar}} \sim k_{\text{N}_2}=0,026 \text{ W/m.K}$ ) e  $z$  é a distância entre as placas.

### 3) Transferência de calor por condução em sólido

O potência de transferência de calor ( $P=dq/dt$ ) através de uma barra retangular de um material sólido de comprimento  $z$  e área transversal  $A$ , entre as temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  é dada por (4):

$$P_{\text{condução em sólido}} = k A \Delta T/z \quad (4)$$

onde  $k$  = coeficiente de condutividade térmica do sólido ( $k_{\text{aço}} = 0,123 \text{ W/cm.K}$ ),  $\Delta T = T_2 - T_1$  (para  $T_2 > T_1$ ).

#### Dados de interesse:

Emissividade do aço inoxidável,  $\varepsilon_{\text{aço}} = 0,05$

Constante de Stefan-

Boltzman,  $\sigma = 5,7 \times 10^{-8}$

$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ Calor latente

do nitrogênio = 200

$\text{kJ/kg}$

Calor latente do hélio = 20,6  $\text{kJ/kg}$

Condutividade térmica

do aço,  $k_{\text{aço}} = 0,123$

$\text{W/cm.K}$ Condutividade

térmica,  $k_{\text{ar}} = k_{\text{N}_2} = 0,026$

$\text{W/m.K}$  Densidade do

nitrogênio = 0,81  $\text{g/cm}^3$

Densidade do hélio = 0,13  $\text{g/cm}^3$

Material do criostato = **aço 304** com **0,8 mm** de espessura.