

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. Calibração do termovisor usando um corpo negro

Durante a calibração realizada no INMETRO, o termovisor foi apontado para o corpo negro. Correções para o fato de que a emissividade ser diferente de um são utilizadas. Para várias temperaturas do corpo negro,  $T_{\text{padrão}}$ , o valor correspondente medido pelo termovisor,  $T_{\text{Termovisor}}$ , é registrado. Um ajuste pelo método dos mínimos quadrados é feito,[11], [12] e [13], relacionando os dois valores, calculando-se inclusive o desvio médio quadrático do ajuste,  $u_{\text{ajuste}}$ , para as duas variáveis. A incerteza padronizada do padrão é  $u_{\text{padrão}}$ [13].

$$T_{\text{padrão}} = A + B.T_{\text{Termovisor}} \quad (22)$$

$$u_{\text{ajuste}} = \sqrt{\frac{1}{N-2} \cdot \sum_{i=1}^N (A + B.T_{\text{Termovisor},i} - T_{\text{padrão},i})^2} \quad (23)$$

A calibração do termovisor referenciado a um corpo negro é assim realizada. Entretanto, quando o termovisor é apontado para uma superfície não negra, o valor de uma temperatura efetiva  $T_{\text{termovisor,efet}}$  é lida, ajustando-se o termovisor para  $\varepsilon = 1$ . Este valor pode ser transformado para o valor verdadeiro  $T_{\text{efet}}$  através da Eq. (22). A relação entre a temperatura verdadeira da superfície,  $T_p$ , e a efetiva,  $T_{\text{efet}}$  é dada por [14]:

$$T_{\text{efet}} = \varepsilon^{1/4} T_p \quad (24)$$

No dispositivo desenvolvido pela PUC-Rio, a emissividade da superfície pode ser determinada, uma vez que a temperatura da superfície  $T_p$  é medida com os termopares.

#### 4.2. Dispositivo de teste na PUC-Rio

Foi projetado um dispositivo para calibração de um termovisor na PUC-Rio. O termovisor tem o ajuste da emissividade, que deve ser conhecida para que se consiga calibrar a indicação de temperatura pelo termovisor, que, segundo o fabricante, tem uma incerteza de  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (até  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ou  $2\%$  (acima de  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o que for maior.

Ele consta de um bloco cilíndrico de latão, com 110 mm de altura e 75 mm de diâmetro, imerso em um banho de temperatura controlada, tendo sua superfície superior pintada de preto e cerca de 3 mm acima da superfície do líquido. A Fig. (24) mostra a montagem com o termovisor.

A temperatura do banho foi medida seis vezes em cada ponto por um termômetro de platina padrão Rosemount 1925 e um multímetro HP34420-A, com incerteza máxima estimada de  $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A temperatura média da superfície do bloco cilíndrico foi medida com três (3) termopares tipo T, com multímetro HP34401-A e incerteza máxima estimada em  $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Furos radiais foram feitos abaixo da superfície, de modo que sua temperatura pudesse ser medida.

#### 4.3. Calibração de termopares do tipo T.

A calibração dos termopares do tipo T foi feita no Laboratório de Pressão e Temperatura (LPT) da PUC-Rio, acreditado pela Rede Brasileira de Calibração (RBC). A metodologia consiste em comparar o valor da força eletromotriz (f.e.m.) de cada um dos termopares tipo T com a temperatura do banho de temperatura controlada, medida por um termômetro padrão de resistência de platina (SPRT) do LPT da PUC-Rio, após a obtenção de sua estabilização. Seis (6) medições foram feitas, com intervalos de aproximadamente 5 minutos entre elas, para verificação da repetitividade de medição com os termopares. A junção de referência de cada termopar foi colocada no banho de gelo.[17]



Figura 24: Montagem do dispositivo para calibração do termovisor.

Os valores das f.e.m. dos termopares foram convertidos em °C,  $T_{ITS}$  pelas expressões da ITS-90. Um ajuste pelo método dos mínimos quadrados foi feito para relacionar estes valores, em °C, com os valores da temperatura verdadeira medida pelo SPRT ( $T_p$ ). O grau do polinômio foi escolhido de forma a minimizar o desvio médio quadrático do ajuste. A incerteza de medição levou em consideração a incerteza do padrão, a incerteza de leitura do termopar, a incerteza do ajuste e a uniformidade do banho de calibração. Este procedimento está descrito na documentação do LPT. A Tabela (17) apresenta os valores dos coeficientes de ajuste ( $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ ) e da incerteza de medição  $U$  (95,45 %).

$$T_p = C_1 + C_2 \cdot T_{ITS} + C_3 \cdot T_{ITS}^2 + C_4 \cdot T_{ITS}^3 + C_5 \cdot T_{ITS}^4 \quad (25)$$

Tabela 17: Coeficientes do ajuste e incerteza de medição dos termopares tipo T

Termopar	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$U$ (°C)
1	0,26082	0,99374	2,6977E-5	0	0	0,25
2	0,29289	0,98043	2,1821E-4	-7,6167E-7	0	0,15
3	-0,69686	1,05520	-1,4954E-3	1,4452E-5	-4,5206E-8	0,30

#### 4.4. Medição da emissividade da superfície

A medição da emissividade da superfície foi feita colocando-se o termovisor imediatamente acima da superfície, e medindo-se a temperatura da superfície da placa com os três (3) termopares. Um valor de emissividade igual a 1,00 foi ajustado para a medição efetiva de temperatura. O termovisor indica os valores máximo e mínimo na superfície, além do valor médio e a dispersão ( $2\sigma$ ).

A temperatura média da superfície ( $T_p$ ) é calculada como a média aritmética das temperaturas indicadas pelos termopares ( $T_1, T_2$  e  $T_3$ ), com incertezas expandidas (95,45%), respectivamente,  $U_1 = \pm 0,25$  °C,  $U_2 = \pm 0,15$  °C e  $U_3 = \pm 0,30$  °C. Sua incerteza,  $U_p$ , pode ser calculada pela Eq. (27).

$$T_p = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (26)$$

$$U_p = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}}{3} = 0,14 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (27)$$

Para minimização da incerteza, três (3) valores de temperatura são lidos pelo termovisor,  $T_{\text{Termovisor},1}$ ,  $T_{\text{Termovisor},2}$ ,  $T_{\text{Termovisor},3}$ , juntamente com as dispersões apresentadas pelo mesmo,  $u_{d,1}$ ,  $u_{d,2}$ ,  $u_{d,3}$ , respectivamente. O valor médio é dado por:

$$T_{\text{Termovisor,efet}} = \frac{T_{\text{Termovisor},1} + T_{\text{Termovisor},2} + T_{\text{Termovisor},3}}{3} \quad (28)$$

$$u_d = \frac{\sqrt{u_{d,1}^2 + u_{d,2}^2 + u_{d,3}^2}}{3} \quad (29)$$

Os valores efetivos corrigidos pela Eq. (22) podem ser escritos como:

$$T_{\text{efet}} = A + B \cdot T_{\text{Termovisor,efet}} \quad (30)$$

$$u_{\text{efet}} = \sqrt{u_{\text{ajuste}}^2 + (B \cdot u_d)^2 + u_{\text{padrão}}^2} \quad (31)$$

A emissividade pode então ser calculada pela Eq. (24), com sua incerteza obtida pela Eq. (32), vide anexo (A).

$$u_\varepsilon = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{\text{efet}}}{T_{\text{efet}}}\right)^2 + \left(\frac{u_p}{T_p}\right)^2} \quad (32)$$

A incerteza expandida (95,45%) pode ser calculada como, vide anexo (B):

$$U_\varepsilon = 2 \cdot u_\varepsilon \quad (33)$$

#### 4.5. Medição da temperatura com o termovisor

Na maioria das vezes a temperatura da superfície só pode ser medida uma única vez com o termovisor. Assim, a incerteza torna-se mais elevada. As Eq. (28) e (29) podem ser usadas com os valores

$$T_{\text{Termovisor,efet}} = T_{\text{Termovisor},1} \quad (34)$$

$$u_d = u_{d,1} \quad (35)$$

As Eq. (30) e (31) podem ser usadas para o cálculo de  $T_{\text{efet}}$  e  $u_{\text{efet}}$ . Finalmente, a Eq. (26) pode ser usada para o cálculo da temperatura da superfície  $T_p$ . Sua incerteza  $u_p$  pode ser calculada como:

$$u_p = T_p \cdot \sqrt{\left(\frac{u_\varepsilon}{4 \cdot \varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{efet}}}{T_{\text{efet}}}\right)^2} \quad (36)$$

#### 4.6. Medição independente da emissividade

Uma medição independente da emissividade foi feita para verificar os valores determinados pelo termovisor. A metodologia segue a teoria da transferência de calor por Radiação entre dois cilindros concêntricos de comprimento finito (147 mm), tendo vácuo na região anular [14]. O mesmo procedimento foi adotado em [15], porém com ar na região anular. Foi verificado que a incerteza na determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção natural na região anular era responsável pela incerteza elevada da emissividade.

O desenvolvimento teórico seguiu [14], considerando que as bases da região anular, Fig. (25), representada pelos índices “3” e “4”, estão isoladas do meio exterior, tendo áreas, respectivamente,  $A_3$  e  $A_4$ . Assim, estas superfícies são consideradas superfícies re-radiantes. A superfície externa do cilindro

interno  $A_1$  é pintada de preto, da mesma forma que a placa no banho de temperatura controlada usada para medir a emissividade com o termovisor, tem diâmetro de 21 mm, sendo representada pelo índice “1”. A superfície interna do cilindro externo  $A_2$  é pintada de preto, tem um diâmetro de 52 mm, sendo representada pelo índice “2”. Assim, as duas superfícies têm uma mesma emissividade  $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ . O comprimento dos cilindros é 147 mm. A Fig. (25) apresenta o sistema utilizado.

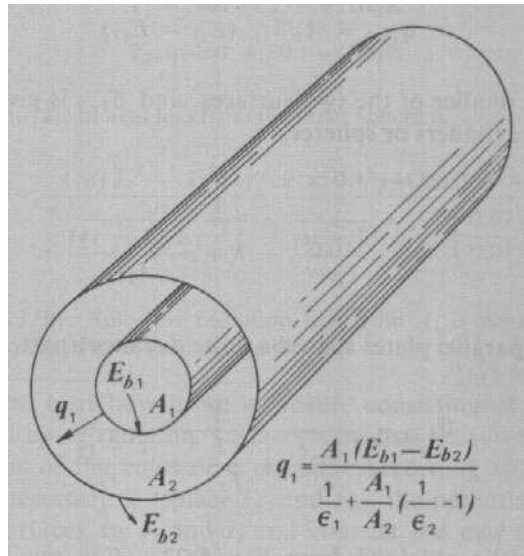


Figura 25: Transferência de calor por radiação entre dois cilindros infinitos concêntricos.

Na Fig. (25)  $E_b = \sigma.T^4$  é a potência emissiva do corpo negro, e  $\sigma = 5,6697E-08 \text{ W/m}^2.K^4$  é a constante de Stefan-Boltzman.

Quando os cilindros são finitos, a expressão da Fig. (25) deve ser modificada para [14] :

$$q_1 = \frac{A_1 \cdot (E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{A_1}{A_2} + R \cdot A_1} \quad (37)$$

onde:

$q_1$  é o calor transferido por radiação entre os dois cilindros.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{132}} + \frac{1}{R_{142}} \quad (38)$$

$$R_{12} = \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} \quad (39)$$

$$R_{132} = \frac{1}{A_1 \cdot F_{13}} + \frac{1}{A_2 \cdot F_{23}} \quad (40)$$

$$R_{142} = \frac{1}{A_1 \cdot F_{14}} + \frac{1}{A_2 \cdot F_{24}} \quad (41)$$

Onde  $F_{ij}$  é fator de forma, ou seja, fração da energia radiante que parte da superfície  $i$  e chega na superfície  $j$ . Estes fatores de forma podem ser determinados pela metodologia descrita em [16].

A Fig. (26) mostra o dispositivo experimental desenvolvido na PUC-Rio. O dispositivo é constituído de dois cilindros de latão soldados nas suas extremidades a duas bases de mesmo material de maneira que fossem posicionados concetricamente. Em uma das extremidades foi instalado um sistema para ser feito vácuo na região anular. Este sistema é composto de uma válvula de retenção, adaptadores para fixação de um tubo de polietileno com dois metros de comprimento e diâmetro igual à 1/8". Foram fixadas para cada base uma outra de Teflon com 10 mm de espessura.

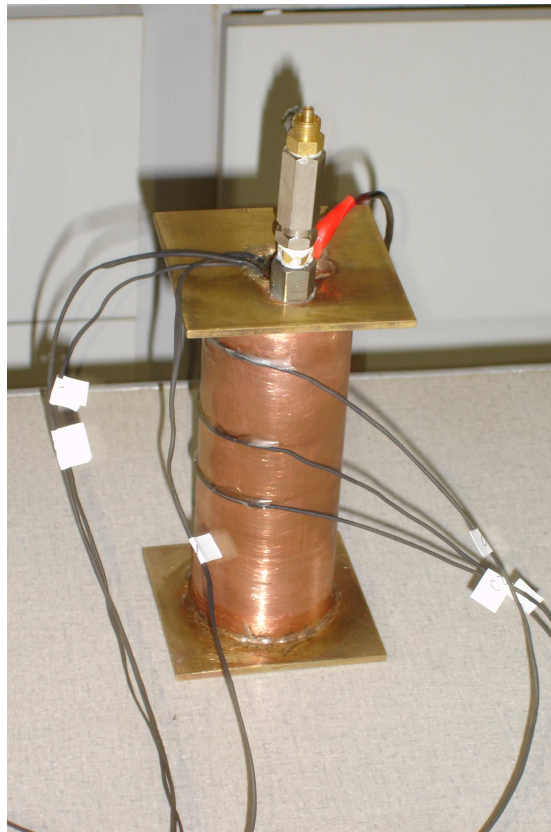


Figura 26: Dispositivo experimental para medição da Emissividade, PUC-Rio



Com o conjunto montado, foram instalados seis termopares do tipo “T” da marca Omega que mediram em canais independentes a temperatura. Eles estão dispostos da seguinte maneira, Fig. (28):

- Três na superfície interna, “1”, do tubo interno
- Três na superfície externa, “2”, do tubo externo

A intenção da instalação dos termopares é poder através da medição de temperaturas, obter o fluxo de energia térmica no espaço anular.

Termopar é um instrumento para medição de temperatura que se baseia na força eletromotriz gerada em um circuito aberto formado por dois materiais distintos e com junções em temperaturas diferentes. Essa força eletromotriz recebe o nome de voltagem Seebeck ( $E_s$ ). Essa voltagem varia de acordo com os materiais que formam o par e com a diferença de temperatura das junções através do coeficiente de Seebeck  $\alpha_{AB}$ , da seguinte forma:

$$dE_s = \alpha_{AB} dT \quad (42)$$

O coeficiente de Seebeck pode ser obtido através da calibração do termopar. Uma maneira de realizar esta calibração é conforme mostrado na Fig. (27). A figura mostra a ligação de dois termopares (TP1 e TP2) ligados a um banho termostático e de um terceiro termopar (REF) ligado a uma referência (banho de gelo).

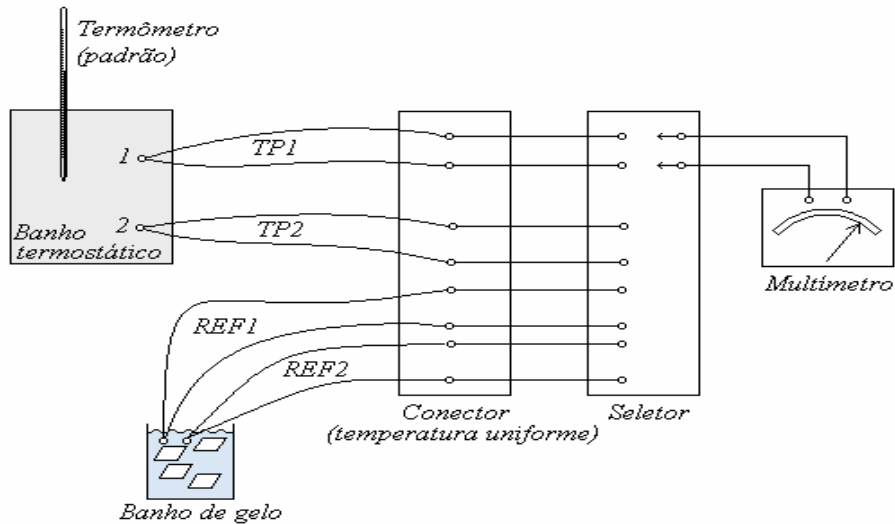


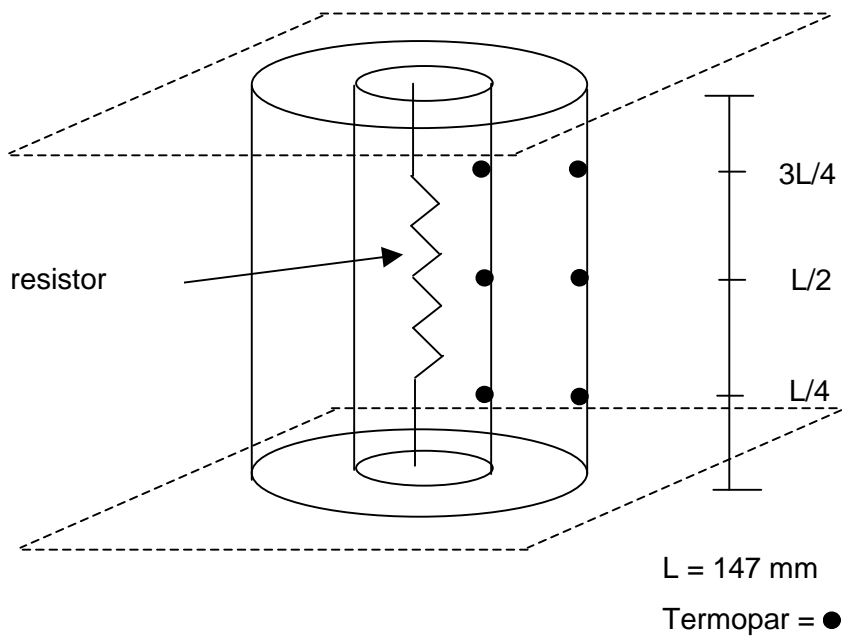
Figura 27 - Esquema de medição dos termopares

Para cada temperatura do banho termostático, pode-se medir a voltagem correspondente no termopar. Para isso, deve-se medir a voltagem entre o banho termostático e o conector (TP1 ou TP2) e subtrair dela a voltagem medida entre a referência e o conector (REF1 ou REF2). Variando-se a temperatura do banho, pode-se, então, traçar uma curva que relaciona temperatura do padrão com a voltagem no termopar. Esta curva pode ser aproximada por uma equação do tipo:

$$T = aE + b \quad (43)$$

onde E é a voltagem gerada no termopar quando submetido a uma diferença de temperatura T. O coeficiente "a" é o próprio coeficiente de Seebeck.

Uma resistência elétrica é colocada no interior do cilindro interno, aquecendo a sua superfície. A montagem busca garantir que toda energia dissipada na resistência por efeito Joule é transferida por radiação entre os dois cilindros e então para o meio ambiente, não havendo perdas significativas pelas suas bases.



**Figura 28 - Posição dos termopares tipo "T" nos cilindros**

Para que fossem feitas as medidas nos termopares utilizamos uma chave seletora de seis canais da marca Engpro, com o objetivo de selecionar um dos termopares a ser avaliado. Cada canal por sua vez, foi ligado a um multímetro digital da marca FLUKE, modelo 8050A, com resolução de 0,01 mV que foi utilizado para medir a tensão para cada um dos termopares.

Utilizamos também um banho de gelo como referência na temperatura de 0 °C para termos uma base eficiente de medições, desprezando influências das variações da temperatura ambiente.

Para as dimensões do dispositivo, a Tabela (18) apresenta os valores calculados das resistências e fatores de forma.

Tabela 18: Fatores de forma e resistências

Fatores de Forma				Resistências	
$F_{21}$	0,3742	$F_{11}$	0,0000	$R_{12}$	111,28
$F_{22}$	0,5096	$F_{12}$	0,9266	$R_{132}$	12497
$F_{23}$	0,0581	$F_{13}$	0,0367	$R_{142}$	3526,3
$F_{24}$	0,0581	$F_{14}$	0,0367	R	106,95
$F_{41}$	0,2003	$F_{31}$	0,2003	$RA_1$	1,0373
$F_{42}$	0,7847	$F_{32}$	0,7847		
$F_{43}$	0,0150	$F_{33}$	0,0000		

Para a medição da emissividade, o experimento foi conduzido, colocando-se uma resistência medida de  $3,18 \Omega$  dentro do cilindro interno, alimentada por uma fonte AC, totalizando  $6,09 \text{ W}$ . A resistência não variou com a temperatura na faixa em questão e dentro da incerteza de medição, isso foi verificado com o acompanhamento da tensão e corrente que o resistor estava submetido. Foi feito um vácuo de  $0,001 \text{ mbar}$  no espaço anular, e quando a estabilização foi atingida após 2 horas, as temperaturas das superfícies dos cilindros interno e externo foram medidas.