



MINISTÉRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÃO E COMUNICAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA CALIBRAR TERMÔMETRO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA**

Dianne Cristina Rodrigues

São José dos Campos - SP

2018



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# **PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA CALIBRAR TERMÔMETRO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/INPE/CNPq)**

**Dianne Cristina Rodrigues (ETEP, Bolsista PIBIC/CNPq)**

**E-mail: [dianne.rodrigues@lit.inpe.br](mailto:dianne.rodrigues@lit.inpe.br)**

**Dr. Ricardo Sutério (LIT/INPE, Orientador)**

**E-mail: [suterio@lit.inpe.br](mailto:suterio@lit.inpe.br)**

**Me. Alberto de Paula Silva (LIT/INPE, Coorientador)**

**E-mail: [alberto@lit.inpe.br](mailto:alberto@lit.inpe.br)**

## **COLABORADORES**

**Rodrigo dos Santos Nascimento (LIT/INPE)**

**Julho de 2018**

## RESUMO

Os métodos de medição de temperatura comuns medem temperatura com contato direto ao objeto que se pretende medir. Em processos críticos com temperaturas elevadas, objetos em movimento ou em processos em que é preciso ter o máximo de cuidado para não haver contaminação, se faz necessário o uso dos termômetros de radiação infravermelha (IV) e assim como todos os instrumentos de medição, os termômetros de radiação IV precisam ser calibrados, no entanto o procedimento para realizar a calibração é mais complexo do que para termômetros de contato. A indicação apresentada no display do termômetro, mesmo em um termômetro de IV perfeito, não corresponde à indicação do termômetro de referência, correções devem ser determinadas calculando as indicações previstas para um dispositivo ideal nas condições de calibração e então deve ser verificado o quão próximo as indicações reais estão das esperadas, ou seja, as correções obtidas devem ser aplicadas a temperatura de referência antes de compará-las com as indicações do instrumento em calibração. Com o intuito de atender a demanda do Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE, foi proposto a implantação de um método para calibrar termômetros de radiação infravermelha. Este trabalho apresenta as teorias pertinentes à termometria de radiação infravermelha, o método de calibração por cavidade de corpo negro utilizando um termômetro de contato como referência de acordo com a norma ASTM E2847-14, o desenvolvimento da cavidade de corpo negro, a avaliação experimental da cavidade de corpo negro e a análise dos testes realizados. Com a análise dos testes foi identificado a necessidade de alguns ajustes, como por exemplo, a alteração do posicionamento da cavidade de corpo negro no meio térmico. Contudo, os resultados obtidos comprovam que o método está apto e eficiente.

**Palavras-chave:** Termômetro de radiação infravermelha. Termômetro de IV. Calibração de termômetros de radiação infravermelha. Metrologia.

## ABSTRACT

The common temperature measurement methods measure temperature with direct contact with the object to be measured. However, in critical processes with high temperatures and in moving objects or in processes where great care must be taken to avoid contamination, it is necessary to use infrared (IR) thermometers and, like all measurement, the IR radiation thermometer needs to be calibrated, however the procedure for performing the calibration is more complex than for contact thermometers. The indication on the thermometer display, even on a perfect IR thermometer, does not correspond to the reference thermometer, corrections must be made by calculating the indications for an ideal device in the calibration conditions and then verifying how close Actual indications are as expected, the corrections obtained must be applied at the reference temperature before comparing them with the indications of the instrument in calibration. In order to meet the demand of the INPE Integration and Testing Laboratory (LIT), it was proposed the implementation of a method to calibrate infrared thermometers. This work presents the theories pertinent to infrared radiation thermometry, the black body cavity calibration method using a counting thermometer as reference, according to ASTM E2847-14, the development of the blackbody cavity, experimental evaluation of the blackbody cavity and the analysis of the tests performed. With the analysis of the tests it was identified the need for some adjustments, for example, the alteration of the positioning of the black body cavity in the thermal medium. However, the results obtained prove that the method is apt and efficient.

**Palavras-chave:** Infrared Thermometer. IR thermometer. Calibration of infrared thermometers. Metrology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Proporcionalidade entre o comprimento de onda e a frequência de um tipo de radiação.....	14
Figura 2.2 - Espectro eletromagnético.....	14
Figura 2.3 – Cavityde de um Corpo Negro.....	17
Figura 2.4 - Representação de um emissor e absorvedor de radiação perfeito. ....	17
Figura 2.5 - Corte de uma parede homogênea, ilustrando regime transitório e regime permanente.....	18
Figura 2.6 - Termômetro de radiação infravermelha.....	21
Figura 2.7 - Esquema de um termômetro de radiação IV medindo a temperatura de um objeto quente. ....	22
Figura 2.8 – Campo de visão de termômetros de IV.....	24
Figura 2.9 - Representação da cavityde de corpo negro. ....	26
Figura 3.1 – Sistema de Calibração.....	35
Figura 3.2 – Aparato experimental.....	36
Figura 3.3 – Corpo negro no ponto de gelo.....	37
Figura 4.1 – Esboço da cavityde de corpo negro.....	42
Figura 4.2 - Vista frontal da câmara térmica com a cavityde de corpo negro no centro da porta.....	43
Figura 4.3 - Cavityde de corpo negro com <i>primer</i> .....	43
Figura 4.4 - Pintura da cavityde de corpo negro e do corpo de prova.....	44
Figura 4.5 – Cavityde de corpo negro.....	45
Figura 4.6 – Sistema de calibração montado.....	45
Figura 4.7 – Corpo de prova e medição da emissividade do corpo negro.....	46
Figura 4.8 – Sensores na cavityde.....	47
Figura 4.9 - Teste 1 - cavityde montada na câmara conforme projeto e sensores posicionados na parte externa da cavityde.....	48
Figura 4.10 - Teste 2 - montagem da cavityde com os sensores no interior da câmara.....	48
Figura 4.11 – Montagem.....	49
Figura 4.12 - Teste 1 – cavityde montada conforme projeto.....	50
Figura 4.13 - Teste 2 - cavityde inserida na câmara e sensores na parte externa da cavityde.....	52
Figura 4.14 - Teste 3 – cavityde inserida na câmara e sensores no interior da cavityde.....	53
Figura 4.15 - sistema montado para teste com termômetro de IV.....	55
Figura 4.16 - Teste com termômetro de radiação IV.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Levantamento dos métodos de calibração. ....	34
Tabela 3.2: Estabilização da temperatura .....	39
Tabela 4.1 - Materiais para fabricação da cavidade de corpo negro. ....	40
Tabela 4.2 - Massa da cavidade de corpo negro.....	42
Tabela 4.3 – Resultado Teste 1.....	51
Tabela 4.4 – Resultado Teste 2.....	52
Tabela 4.5 - Resultado Teste 3. ....	53
Tabela 4.6 - Distância do termômetro até o alvo: 221 mm, teste 1.....	56
Tabela 4.7 – Dados coletados no teste 1.....	56
Tabela 4.8 – Resultado do teste de medição 1.....	56
Tabela 4.9 - Distância do termômetro até o alvo: 319,5 mm, teste 2.....	57
Tabela 4.10 – Dados coletados no teste 2.....	57
Tabela 4.11 – Resultados do teste de medição 2.....	57
Tabela 4.12 - Distância do termômetro até o alvo: 419,5 mm, teste 3.....	58
Tabela 4.13 – Dados coletados no teste 3.....	58
Tabela 4.14 – Resultado do teste de medição 3.....	58

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1. Objetivo .....	11
1.2. Justificativa.....	11
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>12</b>
2.1. Natureza da luz e Teoria da radiação .....	12
2.2. Radiação térmica .....	14
2.3. Corpos negros e emissividade .....	15
2.4. Transferência de calor .....	17
2.4.1. Condução, Convecção e Radiação.....	18
2.5. Caracterização do termômetro de radiação infravermelha (IV).....	20
2.5.1. Influências nas indicações dos termômetros de radiação IV .....	23
2.6. Calibração de termômetros de radiação infravermelha.....	25
2.6.1. Calibração por cavidade de corpo negro .....	25
2.6.2. Ponto de gelo .....	28
2.6.3. Análise de incerteza de medição .....	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
3.1. Sistema de calibração – Equipamentos e Materiais utilizados.....	35
3.2. Atividades preliminares.....	36
3.2.1. Preparação do Termômetro de Radiação Infravermelha .....	36
3.2.2. Verificação do ponto de gelo.....	36
3.2.3. Montagem do sistema e programação dos equipamentos .....	38
3.3. Execução da calibração .....	38
3.3.1. Temperatura do detetor.....	39
3.3.2. Aquisição de dados .....	39
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>40</b>
4.1. Cavidade de corpo negro desenvolvida.....	41
4.2. Avaliação Experimental .....	45
4.2.1. Medição da emissividade do corpo negro .....	45
4.2.2. Estudo da uniformidade e estabilidade térmica.....	47
4.2.3. Resultados do estudo da uniformidade e estabilidade térmica .....	49

4.2.4. Teste com termômetro de radiação infravermelha .....	54
4.2.5. Resultados de teste com termômetro de radiação infravermelha ....	56
4.3. Discussões .....	59
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>61</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>63</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os termômetros de radiação infravermelha (IV) são constituídos por uma óptica de entrada, um detector de radiação térmica e por uma eletrônica associada para acondicionamento de sinal. Medem temperatura sem contato, fornecendo o valor médio de temperatura de uma pequena área, dependente da resolução ótica do aparelho e da distância que a leitura será efetuada. Tais termômetros são utilizados em processos críticos com temperaturas elevadas, em objetos em movimento e em processos que não podem ter contaminação.

A calibração de termômetros de radiação IV pode ser realizada de duas formas, através de uma placa plana de corpo negro ou por uma cavidade de corpo negro. O método consiste em posicionar o termômetro de radiação IV de forma a medir a temperatura do corpo negro e a temperatura apresentada no termômetro é comparada com a temperatura indicada no termômetro de referência, o procedimento é mais complexo do que para termômetros de contato, efeitos sistemáticos presentes na medição de termômetros de IV devem ser considerados na calibração, desta forma correções devem ser aplicadas a temperatura de referência e então deve ser verificado o quão próximo as indicações reais estão das esperadas.

O Laboratório de Metrologia Física (MTF) do LIT/INPE realiza calibrações na área de Acústica, Vibração, Pressão, Temperatura e Umidade, atendendo o setor espacial brasileiro e as indústrias em geral. A fim de atender a demanda do LIT – Laboratório de Integração e Teste foi proposto o projeto e desenvolvimento de método para calibrar termômetros de radiação infravermelha.

O método será por cavidade de corpo negro utilizando um termômetro de contato como referência. A cavidade será posicionada em uma câmara térmica através de uma abertura na tampa da câmara, deste modo o termômetro de radiação IV a ser calibrado será alinhado a esta abertura por meio de um tripé e de um dispositivo de alinhamento e então o termômetro de IV medirá a temperatura da cavidade de corpo negro. O resultado apresentado no display do termômetro de IV será comparado com o termômetro de referência posicionado na cavidade de corpo negro.

Neste trabalho será apresentada uma revisão teórica dos assuntos pertinentes a calibração de termômetros de radiação IV no capítulo 2; o método adotado e os

materiais e equipamentos utilizados no capítulo 3; o desenvolvimento da cavidade de corpo negro, a avaliação experimental, bem como os resultados obtidos no capítulo 4 e por fim a conclusão que se obteve no capítulo 5.

### **1.1 Objetivo**

Implantar um método para calibrar termômetro de radiação infravermelha no ponto de 0 °C e na faixa de 50 °C a 250 °C no Laboratório de Metrologia Física do INPE/LIT, seguindo as orientações da norma ASTM E2847 com o objetivo de atender a demanda das atividades dos programas espaciais brasileiro e também para o atendimento das indústrias em geral.

### **1.2 Justificativa**

O Laboratório de Integração e Testes (LIT) realiza testes e ensaios em diversos seguimentos, dentre estes, testes utilizando termômetro de radiação infravermelha no qual deve ser calibrado. Com isso o termômetro de IV era encaminhado para um laboratório externo para realização da calibração, passando por processos burocráticos no setor de compras, exigindo tempo, pois com o termômetro de IV em calibração era utilizado um termômetro de contato e com isto o teste executado se tornava mais trabalhoso.

Com a implantação do método para calibrar termômetros de radiação IV, será possível atender a demanda do LIT, bem como das atividades dos programas espaciais brasileiro e das indústrias em geral.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é descrito uma breve fundamentação teórica dos assuntos pertinentes a natureza da luz, radiação térmica, emissividade e corpos negros, transferência de calor, caracterização dos termômetros de radiação infravermelha e o método de calibração de termômetros de radiação infravermelha.

### 2.1 Natureza da Luz e Teoria da radiação

Segundo Sears e Zemansky (1962) até o século XVII acreditava-se que a luz consistia em uma corrente de partículas emitidas por fontes luminosas que se deslocava em linha reta atravessando materiais transparentes, se refletindo em materiais opacos e estimulando a visão ao penetrar nos olhos.

Christian Huygens, em 1670, começou a desenvolver a ideia de que a luz poderia ser um movimento ondulatório, apresentando a teoria ondulatória, defendeu a ideia de que as leis da reflexão e da refração, bem como o fenômeno da dupla refração eram explicadas pela teoria ondulatória, no entanto não obteve aceitação.

Em 1827 a partir das experiências de Thomas Young e Augustin Fresnel sobre interferência e as medidas da velocidade da luz em líquidos por Leon Foucault, comprovou-se a existência de fenômenos óticos em que só é possível sendo a luz uma perturbação ondulatória. As experiências de Young permitiram a medida dos comprimentos das ondas luminosas e Fresnel demonstrou que a propagação retilínea da luz, bem como os fenômenos de difração observados por Grimaldi podiam ser explicados por meio de ondas de pequeno comprimento.

Em 1873 James Clerk Maxwell propôs ser a luz uma radiação de natureza eletromagnética, mostrou que um circuito elétrico oscilante poderia propagar ondas eletromagnéticas, demonstrando a possibilidade de calcular, por medidas elétricas e magnéticas, a velocidade de propagação das ondas, sendo estas muito próximas de  $3 \times 10^8$  m/seg. (SEARS; ZEMANSKY, 1962).

Após a descoberta de Maxwell, Heinrich Hertz comprovou experimentalmente que empregando um circuito oscilante de pequenas dimensões seria possível produzir micro ondas, de origem eletromagnética, mostrou que elas possuíam todas as

propriedades das ondas luminosas, podiam ser refletidas, refratadas, polarizadas e convergidas no foco de uma lente.

O fenômeno fotoelétrico, ou seja, a emissão de elétrons por um condutor quando sobre ele incide luz; e o efeito Compton, isto é, ao analisar o movimento de um fóton e de um elétron, antes e depois da colisão entre eles, constatou-se que eles se comportavam como corpos materiais, possuindo energia cinética e quantidade de movimento que são conservadas na colisão. Tais fenômenos não puderam ser explicados pela teoria eletromagnética, sendo assim, os fenômenos de propagação da luz são mais bem explicados pela teoria ondulatória e a interação da luz com a matéria nos processos de emissão e absorção é mais bem explicado pelo fenômeno corpuscular.

Maxwell identificou também outros tipos de radiação no espectro eletromagnético além da luz visível, para ele o espectro de luz visível seria apenas uma parcela visível de um contínuo espectro de radiações invisíveis de maior amplitude. Ele observou que a radiação eletromagnética é o resultado da oscilação de um campo elétrico numa direção perpendicular a um campo magnético, se propagando no espaço físico em forma de ondas (NETO, 2004).

O comprimento de onda é representado pela letra grega lambda ( $\lambda$ ) e corresponde à distância entre duas cristas consecutivas. Em comprimentos de ondas de 0,0004 mm a 0,00075 mm encontra-se a luz visível. O número de oscilações por unidade de tempo é a frequência da radiação ( $f$ ) e é medida em Hz (hertz ou ciclos por segundo).

A importância do valor em que a radiação eletromagnética se propaga com a velocidade da luz reside no fato de estabelecer a relação de proporcionalidade entre o comprimento de onda e a frequência de um tipo de radiação, conforme determinado pela equação (1) e demonstrado na Figura 2.1, abaixo:

$$c = \frac{f}{\lambda} \quad (1)$$

Em que:

$c$  = velocidade da luz (m/s)

$f$  = frequência da radiação (em Hz)

$\lambda$  = comprimento de onda (m)

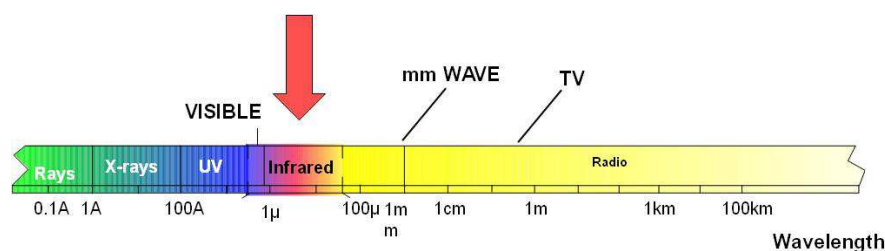
Figura 2.1 - Proporcionalidade entre o comprimento de onda e a frequência de um tipo de radiação

Radiação	Faixa de frequência (HZ)	Faixa de comprimento de onda (m)	Cor
<b>Raios gama</b>	$3 \times 10^{19}$ a $3 \times 10^{23}$	$1,0 \times 10^{-15}$ a $1,0 \times 10^{-11}$	Invisível
<b>Raios X</b>	$3 \times 10^{16}$ a $3 \times 10^{18}$	$1,0 \times 10^{-11}$ a $1 \times 10^{-8}$	Invisível
<b>Ultravioleta</b>	$7,5 \times 10^{14}$ a $3 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{-8}$ a $4,0 \times 10^{-7}$	Invisível
<b>Visível</b>	$7,0 \times 10^{14}$ a $7,5 \times 10^{14}$	$4,0 \times 10^{-7}$ a $5,0 \times 10^{-7}$	Violeta
	$6,5 \times 10^{14}$ a $7,0 \times 10^{14}$	$5,0 \times 10^{-7}$ a $5,5 \times 10^{-7}$	Azul
	$6,0 \times 10^{14}$ a $6,5 \times 10^{14}$	$5,5 \times 10^{-7}$ a $5,8 \times 10^{-7}$	Anil
	$5,5 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{14}$	$5,8 \times 10^{-7}$ a $6,2 \times 10^{-7}$	verde
	$5,0 \times 10^{14}$ a $5,5 \times 10^{14}$	$6,2 \times 10^{-7}$ a $6,5 \times 10^{-7}$	Amarelo
	$4,5 \times 10^{14}$ a $5,0 \times 10^{14}$	$6,5 \times 10^{-7}$ a $6,7 \times 10^{-7}$	Laranja
	$4,0 \times 10^{14}$ a $4,5 \times 10^{14}$	$6,7 \times 10^{-7}$ a $7,0 \times 10^{-7}$	Vermelho
<b>Infravermelho</b>	$3,0 \times 10^{11}$ a $4,0 \times 10^{14}$	$7,0 \times 10^{-7}$ a $1,0 \times 10^{-0}$	Invisível
<b>Microondas</b>	$3,0 \times 10^8$ a $3,0 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{-4}$ a $1,0 \times 10^0$	Invisível
<b>Ondas de rádio e TV</b>	$3,0 \times 10^3$ a $3,0 \times 10^8$	$1,0 \times 10^0$ a $1,0 \times 10^5$	Invisível

Fonte: (NETO, 2004)

A radiação infravermelha está na faixa de 0,7 a 100 ( $\mu\text{m}$ ) e foi descoberta em 1800 pelo astrônomo Sir William Herschel que buscava descobrir materiais que servissem como filtros para a absorção do sol. Herschel, com um termômetro mediu o aquecimento produzido pela incidência de cada uma das cores do espectro e identificou que o maior nível de aquecimento se dava em uma faixa escura invisível, situada abaixo da luz vermelha, denominada – infravermelho (NETO, 2004).

Figura 2.2 - Espectro eletromagnético



Fonte: Fluke

## 2.2 Radiação térmica

A radiação térmica consiste na radiação emitida por um corpo devido a sua temperatura, todo corpo emite este tipo de radiação para o meio e dela absorve. Por dependerem diretamente da temperatura em que o corpo se encontra, são chamadas de radiações térmicas. Por exemplo, é possível sentir a emissão de um ferro elétrico ligado, mas não é possível enxergar as ondas por ele emitidas, pois em baixas temperaturas a

maior taxa de emissão está na faixa do infravermelho, aumentando a temperatura gradativamente, começa a emitir luz visível, como a luz vermelha, passando para a luz amarela, a verde, a azul e, em altas temperaturas, a luz branca, chegando à região do ultravioleta do espectro eletromagnético.

Outro exemplo em que é constada a radiação térmica é ao se aproximar de uma brasa incandescente, mesmo se o ar ao redor estiver frio, percebe-se um aquecimento na pele, a maior parte do calor que atinge a pele não se propaga por convecção no ar e sim sob a forma de radiação eletromagnética (MEDEIROS, 2010).

Quando um corpo é aquecido, tem-se radiação. Em equilíbrio a luz emitida varia ao longo de todo o espectro de frequências, com uma distribuição espectral que depende tanto da frequência como do comprimento de onda e da temperatura. Pode-se definir a potência emissiva como a energia emitida no comprimento de onda por unidade de área ou unidade de tempo (GASIOROWICZ, 2010).

Se um corpo está mais quente que sua vizinhança a emissão de radiação térmica vai predominar sobre a absorção, e se ele estiver mais frio, a absorção vai predominar. Quando um corpo está em equilíbrio térmico com sua vizinhança, a emissão é igual à absorção.

A razão do poder emissivo para a absorvidade, definida como a fração da radiação incidente de comprimento de onda que é absorvida pelo corpo, é o mesmo para todos os corpos. Considerando duas placas paralelas (emissoras e absorventes) em condição de equilíbrio, a energia emitida é igual a energia absorvida e as proporções são as mesmas para as duas placas. Para um corpo negro definido como uma superfície que absorve totalmente toda a radiação que incide sobre ele, a função é universal.

A segunda lei da termodinâmica exige que a radiação em uma cavidade seja homogênea e isotrópica, isto é, que o fluxo seja o mesmo em todos os pontos e independente da direção (GASIOROWICZ, 2010).

### **2.3 Corpos negros e emissividade**

O corpo negro consiste em um objeto capaz de absorver toda radiação que incide sobre ele em qualquer comprimento de onda e assim como qualquer objeto, o corpo negro também emite energia por radiação na forma de ondas eletromagnéticas. Para Kirchhoff uma aproximação experimental de corpo negro é uma cavidade com um

pequeno orifício sendo aquecida a uma temperatura uniforme e qualquer radiação que entra na cavidade é refletida e absorvida nas paredes (TAKAHASHI, 2000).

O parâmetro que determina a capacidade de emissão em um corpo negro é a emissividade ( $\varepsilon$ ). Em corpos comuns, uma parte da radiação total incidente é absorvida ( $\varepsilon$ ) por conservação de energia, o restante é refletida ( $\rho$ ) na superfície e transmitida ( $\tau$ ) através do corpo, conforme demonstrado abaixo pelas equações (MOITA; SILVA; CANHOTO, 2000).

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Corpo negro:  $\varepsilon = 1, \rho = \tau = 0$

Espelho perfeito:  $\rho = 1, \varepsilon = \tau = 0$

Corpo transparente:  $\tau = 1, \varepsilon = \rho = 0$

Na termografia as superfícies são opacas ao infravermelho,  $\tau = 0$ , a capacidade emissiva é constante (para T e  $\lambda$  considerados) e menor que 1, sendo assim:

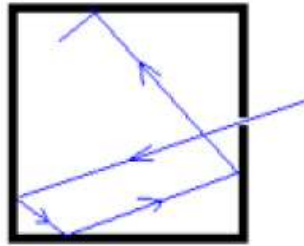
$$\text{Corpo cinzento: } \varepsilon + \rho = 1$$

A emissividade varia em função da composição química e da textura superficial do material, bem como da sua temperatura e do comprimento de onda da radiação emitida.

Quando um corpo negro é aquecido, suas propriedades o tornam uma fonte ideal de radiação térmica, justificando assim sua aplicação nos sistemas de medida de radiação térmica, como por exemplo, os medidores pontuais ou pirômetros de infravermelho, scanners de linha e câmaras termográficas (MEDEIROS, 2010).

Um corpo negro quase perfeito pode ser construído a partir de uma caixa completamente fechada produzida com um material condutor térmico e com um pequeno orifício, de forma que o interior forme uma cavidade que não receba luz do exterior (MEDEIROS, 2010).

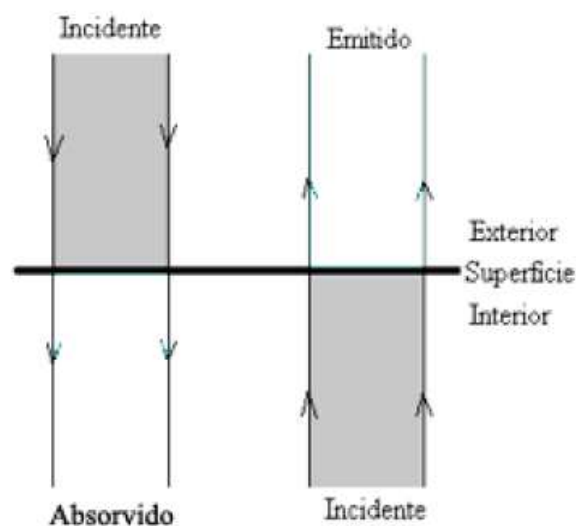
Figura 2.3 – Caverna de um Corpo Negro.



Fonte: (MEDEIROS, 2010)

A energia radiante incidente através da abertura é absorvida e emitida pelas paredes gerando múltiplas reflexões e somente uma mínima proporção se reflete através da abertura (MEDEIROS, 2010).

Figura 2.4 - Representação de um emissor e absorvedor de radiação perfeito.



Fonte: (MEDEIROS, 2010)

A caverna de corpo negro ideal deve se manter em equilíbrio térmico, ou seja, a uma temperatura estável e uniforme. A estabilidade térmica consiste na capacidade de um objeto manter a mesma temperatura ao longo do tempo. A uniformidade térmica constitui a capacidade de um objeto manter a mesma temperatura em diversos pontos do objeto num dado momento, ou seja, é a máxima diferença da temperatura obtida entre todos os sensores em um instante, após a estabilização térmica (MOREIRA, 2016).

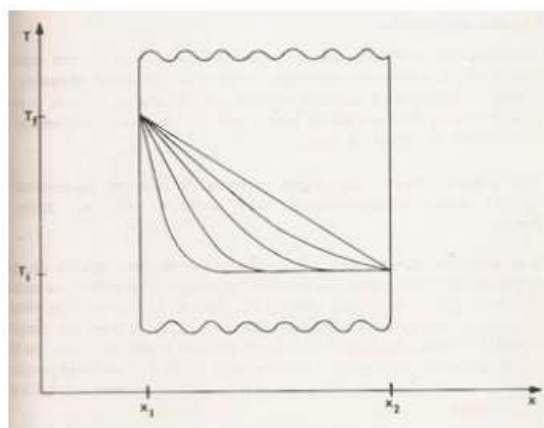


## 2.4 Transferência de calor

Quando há diferença de temperatura entre regiões ou quando dois corpos de diferentes temperaturas são colocados em contato ocorre uma transferência de energia, este processo é denominado transmissão de calor (ARAÚJO, 1978). Um material que permite facilmente a transferência de energia por diferença de temperatura é chamado de condutor térmico e o material que dificulta essa transmissão, é denominado isolante térmico (YOUNG & FREEDMAN, 2008).

Para melhor estudo do processo de transmissão de energia em forma de calor, suponhamos uma parede homogênea, no formato de um paralelepípedo, em que suas faces estejam isoladas termicamente, exceto duas paralelas e opostas (ARAÚJO, 1978).

Figura 2.5 - Corte de uma parede homogênea, ilustrando regime transitório e regime permanente



Fonte: Transmissão de calor, editora S.A 1978

Através deste exemplo, constatou-se dois regimes pelos quais ocorrem os modos de transferência de energia em forma de calor. Quando em um determinado ponto da parede ocorre alteração de sua temperatura com o passar do tempo, esta está em regime transitório. Já quando a temperatura de um determinado ponto da parede se conserva ao longo do tempo, diz-se que a parede está em regime estacionário ou permanente.

As definições de regime estacionário e regime transitório se dão em termos de fluxo de calor. Quando o fluxo de calor no interior da parede é constante, o regime é estacionário, ou seja, o fluxo que entra é igual ao fluxo que sai. Já no regime transitório ocorre uma variação de fluxo de calor nas diferentes secções da parede, logo o fluxo de entrada é diferente do fluxo de saída (ARAÚJO, 1978).

### 2.4.1 Condução, Convecção e Radiação

A transferência de calor se dá através de três modos distintos: condução, convecção e radiação.

A condução térmica é um processo de transporte de energia sem transporte de matéria, que ocorre principalmente nos estados sólidos, a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa um condutor chama-se fluxo de calor, definido numericamente a partir da equação abaixo (ROSALEM, 2015).

$$P = k \cdot A \cdot \frac{(T_Q - T_F)}{L} \quad (3)$$

Em que, considerando uma placa de determinado material condutor térmico:

A = área da placa;

L = largura da placa

T<sub>Q</sub> = Temperatura “quente”

T<sub>F</sub> = Temperatura “fria”

k = condutividade térmica do material

Quanto menor for a condutividade térmica de um material, maior será o valor de resistência térmica:

$$R = \frac{L}{k} \quad (4)$$

Um material com elevada resistência térmica (R) é um mau condutor térmico e um bom isolante térmico.

Segundo Young & Freedman (2008), no processo por condução, a transmissão de energia térmica se dá de uma região de temperatura mais elevada para uma região de menor temperatura, devido à interação entre as moléculas. Como os átomos da região mais quente possuem em média uma energia cinética maior do que a energia cinética dos átomos da região mais fria ocorrem colisões entre eles e parte da energia é transferida em forma de calor, sem apresentar deslocamento de massa.

Logo, a condutividade térmica determina a rapidez com que o calor flui através do material e varia de acordo com a temperatura. Os metais em geral são materiais com elevada condutividade térmica.

O processo de transferência de calor por convecção é através do transporte de matéria, devido a uma diferença de temperatura e densidade à ação da gravidade. Por exemplo, quando um fluido é aquecido o calor é transferido entre todo o fluido através da agitação das moléculas, em que a região mais quente transmite calor para a região mais fria. (KREITH,1977).

A radiação ocorre tanto em determinados meios materiais como no vácuo. Na radiação o processo de transmissão de energia ocorre por meio de ondas eletromagnéticas de um corpo a alta temperatura para um corpo de temperatura mais baixa, estando estes corpos separados no espaço, mesmo que haja vácuo entre eles, até atingirem o equilíbrio térmico. Essa forma de emissão de energia é comum a todos os objetos e a formação das ondas eletromagnéticas se deve à oscilação de cargas elétricas de átomos que os constituem (KNIGHT, 2009).

A taxa com que um objeto emite energia por meio da radiação térmica é definida por:

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4 \quad (5)$$

Em que:

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6696 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

$\varepsilon$  = emissividade da superfície do material

A = área do objeto

T = temperatura da área

## 2.5 Caracterização do termômetro de radiação infravermelha (IV)

A medição de temperatura está presente em qualquer tipo de atividade humana, seja rápida e grosseira como na culinária, na metalúrgica e no artesanato de cerâmica, ou em situações mais delicadas como no caso do Médico de Pádua Sanctorius que foi o primeiro a usar um termômetro para obter pequenas variações da temperatura do corpo humano para auxiliar nos diagnósticos médicos (EISBERG; LERNER, 1982).

Os primeiros termômetros de líquido em vidro foram desenvolvidos em 1720 por Daniel G. Fahrenheit que buscou criar um termômetro resistente, confiável e que reproduzisse os resultados por muito tempo. O termômetro de mercúrio desenvolvido na época e que é utilizado até os dias atuais foi uma solução satisfatória, abrangendo uma

larga faixa de aplicações. Seu funcionamento consiste num recipiente de vidro com mercúrio armazenado em um bulbo, à medida que a temperatura varia o mercúrio se expande e se contrai ligeiramente de uma forma reprodutível, através de um tubo capilar muito fino. Isto permite medir variações muito pequenas do volume do mercúrio e, portanto, pequenas variações de temperatura (EISBERG; LERNER, 1982).

Na atualidade há diversas formas de medir a temperatura de um meio, seja por termômetros de líquido em vidro ou por termorresistências, termopares e termômetros digitais em geral. O que todos os métodos de medição de temperatura citados tem em comum é o fato de medir a temperatura com contato direto com o objeto que se pretende medir. Entretanto, em processos críticos com temperaturas elevadas e em objetos em movimento ou em processos em que é necessário ter o máximo de cuidado para não haver contaminação, os termômetros de contato não viabiliza a medição da temperatura, fazendo-se necessário o uso dos termômetros de radiação infravermelha.

Os termômetros de radiação infravermelha (IV) são constituídos por uma óptica de entrada, um detector de radiação térmica e por uma eletrônica associada para acondicionamento de sinal. Medem temperatura sem contato, fornecendo o valor médio de temperatura de uma pequena área, dependente da resolução ótica do aparelho e da distância que a leitura será efetuada, a Figura 2.6 ilustra um termômetro IV.

Figura 2.6 - Termômetro de radiação infravermelha.

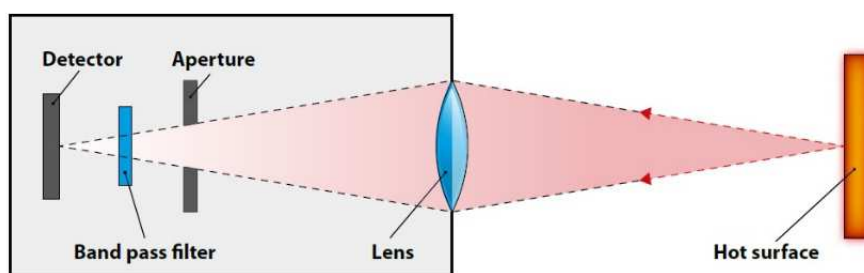


Fonte: *Happy Family Alike*

Tais termômetros de IV são utilizados em processos, manutenção de instalações e indústrias de alimentos, apresentando vantagens em casos em que os materiais do processo estão em movimento, em atmosferas perigosas ou que se deve evitar contaminação, não interferindo no processo e permitindo o estudo de regimes transitórios com um tempo de resposta rápido.

Através da medição da radiação em um intervalo de comprimento de onda fixo, um termômetro de IV determina a temperatura de um objeto a partir da intensidade do sinal medido na saída do seu detector de radiação, quanto maior o sinal, mais elevada será a temperatura, a Figura 2.7 ilustra o funcionamento de um termômetro IV (SAUNDERS, 2014).

Figura 2.7 - Esquema de um termômetro de radiação IV medindo a temperatura de um objeto quente.



Fonte: *Good Practice Guide* Nº 125.

Os modelos matemáticos descritos nos parágrafos seguintes são para termômetros de radiação IV a baixa temperatura que operam próximo a  $4 \mu\text{m}$  ou na faixa de  $8\text{-}14 (\mu\text{m})$ , adequados para medir temperaturas na faixa de  $-50$  a  $500 (^\circ\text{C})$ .

O sinal medido é a corrente ou a tensão na saída do detector do termômetro de IV, a relação entre o sinal do detector e a temperatura medida é dada pela função de resposta do termômetro IV, a qual é descrita na equação Sakuma-Hattori (6).

$$S T = \frac{C}{\exp \frac{c_2}{A.T+B} - 1} \quad (6)$$

Em que:

A, B, C são constantes relacionadas às propriedades do termômetro de radiação IV. A e B são calculadas através das equações (7) e (8) e  $C=1$ ;

$c_2$  é uma constante universal com valor de  $14387,752 \mu\text{m.K}$ ;

$T$  é a temperatura em Kelvin.

$$A = \lambda_0 \cdot \left( 1 - \frac{\Delta\lambda^2}{2\lambda_0^2} \right) \quad (7)$$

$$B = \frac{c_2 \cdot \Delta\lambda^2}{24 \cdot \lambda_0^2} \quad (8)$$

Em que:

$\lambda_0$  comprimento de onda central da faixa espectral que o termômetro de IV opera, fornecido pelo fabricante;

$\Delta\lambda$  = largura da faixa espectral de comprimento de onda que o termômetro de IV opera, fornecido pelo fabricante.

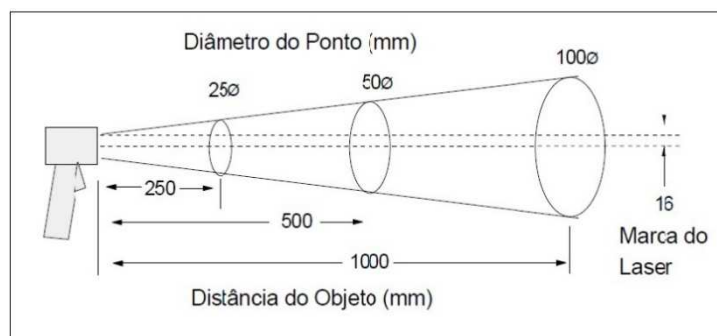
A conversão do sinal de medição para temperatura é representada pela equação (9) que é o inverso da equação Sakuma-Hattori (6).

$$T = \frac{c_2}{A \cdot \ln\left(\frac{C}{S} + 1\right)} - \frac{B}{A} \quad (9)$$

A relação entre o sinal do detector e a temperatura medida é processada eletronicamente no interior do termômetro IV e produz a indicação em graus Celsius no display. Embora estes cálculos estejam ocultos e não seja de grande interesse ao usuário, para a calibração do termômetro de IV é necessário o conhecimento desse processo de conversão.

Para a utilização correta do termômetro de IV, é importante verificar a especificação técnica do mesmo, se atentando ao intervalo de comprimento de onda e ao campo de visão. O campo de visão corresponde à relação entre a distância do termômetro de IV ao alvo e o diâmetro do alvo, por exemplo, um modelo de termômetro de radiação IV possui um campo de visão de 10:1, ou seja, para uma distância de 10 mm do alvo faz-se necessário um diâmetro de pelo menos 1 mm, conforme demonstrado na Figura 2.8 (SAUNDERS, 2014).

Figura 2.8 – Campo de visão de termômetros de IV



Fonte: Minipa

### 2.5.1 Influências nas indicações dos termômetros de radiação IV

Existem algumas influências relacionadas às indicações dos termômetros de radiação infravermelha e que devem ser observadas para a realização de uma medição correta e confiável, são elas: emissividade do alvo, emissividade instrumental, radiação refletida e detector de radiação, tais influências serão detalhadas nos próximos tópicos.

#### 2.5.1.1 Emissividade do alvo

A intensidade da radiação emitida por um objeto depende não só da sua temperatura, mas também de uma propriedade chamada emissividade. A emissividade corresponde à capacidade de um objeto emitir radiação e é avaliada entre 0 e 1, sendo que um material com emissividade igual a 1 (um) corresponde a um emissor perfeito, que é denominado como corpo negro e portanto emite 100 % da radiação, já um material com emissividade de 0,8 emite 80 % da radiação emitida por um corpo negro (SAUNDERS, 2014).

#### 2.5.1.2 Emissividade instrumental

Como a emissividade do alvo representa uma influência na indicação, alguns termômetros de IV possuem um ajuste de emissividade instrumental, que deve ser feito pelo usuário para o valor da emissividade da superfície do alvo que se pretende medir. Os termômetros com emissividade fixa possuem uma emissividade, aproximada, de 0,97 que representa a emissividade da maioria dos materiais (SAUNDERS, 2014).

### **2.5.1.3 Radiação refletida**

Em objetos que não são corpos negros parte da radiação que não é emitida é refletida. Em um objeto com 0,8 de emissividade apresenta uma refletividade de 0,2 que significa que 20 % da radiação é refletida. Essa radiação refletida será detectada pelo termômetro de IV e adicionada à radiação emitida pelo objeto alvo. Portanto, a indicação do termômetro de IV não depende apenas da temperatura do alvo, mas também da temperatura dos seus arredores. Quanto maior a emissividade de uma superfície, menor a refletividade e, portanto, menor o efeito dos arredores na indicação do termômetro (SAUNDERS, 2014).

### **2.5.1.4 Detector de radiação**

O sinal na saída do detector é a diferença entre a radiação que chega a partir do alvo e a radiação emitida pelo próprio detector. Os termômetros de IV de baixo custo utilizam detector não resfriados tipo termopilha. Se o alvo estiver abaixo de 200 °C, a radiação emitida pelo detector será uma fração significativa da radiação incidente e deve ser considerada (SAUNDERS, 2014).

## **2.6 Calibração de termômetros de radiação infravermelha**

A calibração de termômetros de radiação infravermelha (IV) pode ser realizada de duas formas, através de uma placa plana de corpo negro ou por uma cavidade de corpo negro. O método consiste em posicionar o termômetro de forma a medir a temperatura do corpo negro e a temperatura apresentada no termômetro de radiação IV é comparada com a temperatura indicada no termômetro de referência.

Devido aos efeitos sistemáticos presentes nas medições de termômetros de IV de baixa temperatura o procedimento para realizar a calibração é mais complexo do que para termômetros de contato ou termômetros de radiação de alta temperatura. Tais efeitos devem ser considerados no processo de calibração. A indicação apresentada no display do termômetro, mesmo em um termômetro de IV perfeito, não corresponde à indicação do termômetro de referência, correções devem ser determinadas calculando as indicações previstas para um dispositivo ideal nas condições de calibração e então deve ser verificado o quão próximo as indicações reais estão das esperadas, ou seja, as



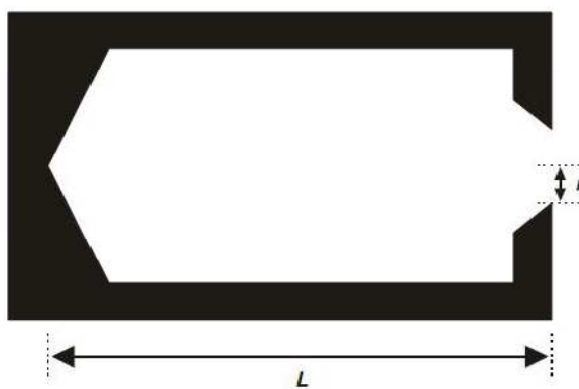
correções obtidas devem ser aplicadas a temperatura de referência antes de compará-las com as indicações do instrumento em calibração (SAUNDERS, 2014).

Para medição da temperatura de referência pode ser utilizado um termômetro de radiação infravermelha de referência ou um termômetro de contato. Nos tópicos seguintes será descrito apenas o método por uma cavidade de corpo negro, utilizando um termômetro de contato como referência.

### 2.6.1 Calibração por uma cavidade de corpo negro

Para a calibração de termômetros IV por uma cavidade de corpo negro é utilizado uma cavidade de comprimento  $L$  e uma abertura  $r$ , cujas paredes têm uma emissividade efetiva próxima de 1 (conforme Figura 2.19). A cavidade é aquecida em um meio térmico e após a estabilização da temperatura o termômetro de radiação IV mede a temperatura do corpo negro através da abertura da cavidade. O termômetro de contato padrão é inserido na cavidade para a medição da temperatura de referência. A calibração deve ser realizada em um laboratório com as condições ambientais controladas (SAUNDERS, 2014).

Figura 2.9 - Representação da cavidade de corpo negro.



Fonte: DOQ-CGCRE-054

O método consiste em calcular as indicações previstas para um dispositivo ideal nas condições de calibração e verificar quão próximas as indicações reais estão das esperadas. As equações para calcular as indicações esperadas estão descritas abaixo.

Com a equação (10) calcula-se o sinal medido da temperatura esperada do

termômetro de IV.

$$ST_{\text{exp}} = \frac{(\varepsilon_{bb} \cdot ST_{\text{ref}}) + ((1 - \varepsilon_{bb}) \cdot ST_{\text{amb}}) - ((1 - \varepsilon_{instr}) ST_d)}{\varepsilon_{instr}} \quad (10)$$

Em que:

$\varepsilon_{bb}$  = Emissividade efetiva da cavidade

$ST_{\text{ref}}$  = Sinal medido referente à temperatura de referência da cavidade

$ST_{\text{amb}}$  = Sinal medido referente à radiação ambiente que entra na cavidade a partir dos arredores

$ST_d$  = Sinal medido referente à temperatura do detetor

$\varepsilon_{instr}$  = Emissividade instrumental

A emissividade efetiva de uma cavidade ( $\varepsilon_{bb}$ ) é estimada através da equação (11), a partir do seu comprimento L, do raio de abertura r e da emissividade do material de que é fabricado ( $\varepsilon_s$ ).

$$\varepsilon_{bb} = 1 - (1 - \varepsilon_s) \cdot \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad (11)$$

Para determinar o sinal medido referente à temperatura (ST) utiliza-se a função de resposta do termômetro de radiação IV, equação (6) do item 2.5, que é a relação entre o sinal do detetor e a temperatura.

O sinal medido referente à temperatura do detetor ( $ST_d$ ) pode ser calculado através da equação (12), a partir de duas medições do mesmo alvo com um termômetro de radiação infravermelha com dois ajustes de emissividade diferentes.

$$ST_d = \frac{\varepsilon_{instr1} \cdot ST_{\text{med1}} - \varepsilon_{instr2} \cdot ST_{\text{med2}}}{\varepsilon_{instr1} - \varepsilon_{instr2}} \quad (12)$$

Em que:

**$ST_{\text{med1}}$  e  $ST_{\text{med2}}$ :** são os dois sinais de medição do termômetro de radiação infravermelha referente a  $\varepsilon_{instr1}$  e  $\varepsilon_{instr2}$  respectivamente.

**$\varepsilon_{instr1}$  e  $\varepsilon_{instr2}$ :** corresponde a emissividade instrumental ajustada. Para uma melhor exatidão o ajuste da  $\varepsilon_{instr1}$  e  $\varepsilon_{instr2}$  deve ser bem espaçado entre si.

Para termômetros de IV com emissividade instrumental fixa, a equação (10) deve ser substituída pela equação (13). Em que se considera-se que a temperatura do

detector é igual a temperatura ambiente (ASTM, 2014).

$$ST_{med} = ST_{ref} + \frac{(\varepsilon_{bb} - \varepsilon_{instr})}{\varepsilon_{instr}} [ST_{ref} - ST_{amb}] \quad (13)$$

A conversão do sinal de medição para temperatura pode ser representada pela equação (9) do item 2.5.

A conversão de temperatura em Graus Celsius para a escala Kelvin é dada pela equação (14):

$$T = t(^{\circ}C) + 273,15 \quad (14)$$

A diferença entre a indicação esperada, ( $T_{exp}$ ), e a indicação do termômetro de referência, ( $T_{ref}$ ), é a correção,  $\Delta T_{bb}$ , a ser adicionada à indicação do termômetro de referência para se obter a indicação esperada para o termômetro de IV.

$$\Delta T_{bb} = T_{exp} - T_{ref} \quad (15)$$

Por fim a diferença entre a indicação esperada para o termômetro de IV e a indicação real do termômetro de IV sob calibração será a correção a ser relatada no certificado de calibração.

## 2.6.2 Ponto de Gelo

A verificação no ponto de gelo é um método comumente utilizado para avaliar o funcionamento de termômetros que trabalham próximo a 0 °C. Uma súbita deriva no ponto de gelo é a primeira indicação de uma falha no instrumento (SAUNDERS, 2014).

Embora o gelo seja transparente nos comprimentos de onda visíveis, nos comprimentos de onda infravermelho gelo e água tornam-se opacos com uma emissividade de aproximadamente 0,96. O ponto de fusão do gelo, isto é, a fronteira entre as fases sólida e líquida é aproximadamente 0,0025 °C, para a faixa normal de pressão atmosférica.

O ponto de gelo foi o ponto de definição de muitas escalas de temperatura até o

desenvolvimento das células de ponto triplo da água (0,01 °C) que são mais precisas, porém o ponto de gelo ainda tem um papel importante na termometria devido a facilidade para se obter a temperatura de referência 0 °C com uma exatidão de  $\pm 0,1$  °C (SAUNDERS, 2014).

### 2.6.3 Análise de Incerteza de Medição

Em toda medição efetuada, existem erros de medições provindos de fatores externos, portanto um resultado de medição é composto de duas parcelas: o resultado base e a incerteza de medição. O resultado base é o valor que mais se aproxima do valor verdadeiro, é calculado a partir da média de varias indicações à qual pode ser aplicada uma correção. A incerteza decorre da ação combinada dos vários componentes de erros que agem sobre o processo de medição. O resultado só é completo quando acompanhado pela declaração de incerteza dessa estimativa (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

As contribuições de incertezas presentes na calibração de termômetros de radiação infravermelha serão descritas nos próximos capítulos, tais contribuições estão baseadas na norma ASTM E2847-14: *Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers*, na norma EA-4/02 e no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (ISO GUM), o nível de confiança é de 95,45 % ( $k = 2,00$ ).

#### 2.6.3.1 Fontes de incertezas na calibração de termômetros de radiação IV

As fontes de incerteza predominante em calibrações de termômetros de radiação infravermelha são: ( $X_1$ ) desvio padrão do termômetro digital de referência, ( $X_2$ ) resolução do termômetro digital de referência, ( $X_3$ ) certificado de calibração do termômetro digital de referência, ( $X_4$ ) deriva do termômetro digital de referência, ( $X_5$ ) especificação técnica do termômetro digital de referência, ( $X_6$ ) emissividade do corpo negro, ( $X_7$ ) temperatura refletida do ambiente, ( $X_8$ ) troca de calor da fonte ( $X_9$ ) uniformidade da cavidade de corpo negro, ( $X_{10}$ ) desvio padrão das leituras do objeto sob calibração, ( $X_{11}$ ) resolução do objeto sob calibração, ( $X_{12}$ ) repetibilidade, ( $X_{13}$ ) efeito do tamanho da fonte, ( $X_{14}$ ) absorção atmosférica.

No decorrer deste t3pico ser3o descritos tais contribui33es de incertezas.

**Desvio padr3o (x<sub>1 e 10</sub>):** o desvio padr3o de uma distribui33o 3 uma medida do seu grau de dispers3o, ou seja, em uma s3rie de medi33es o desvio padr3o corresponde a uma medida da incerteza da m3dia devido a efeitos aleat3rios e 3 dado por:

$$u(x_{1e10}) = \frac{s(x_{1e9})}{\sqrt{n}} \quad (16)$$

Em que:

$$s(x_{1e9}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (17)$$

$n$  = n3mero de medi33es

$x_i$  = valor da medi33o

$\bar{x}$  = m3dia dos valores medidos

**Resolu33o do objeto e do padr3o (X<sub>2 e 11</sub>):** uma fonte de incerteza de um instrumento digital 3 a resolu33o de seu dispositivo indicador, por exemplo, mesmo se as observa33es repetidas forem todas id3nticas, a incerteza de medi33o atribu3vel 3 repetibilidade n3o seria zero, pois h3 uma faixa de sinais de entrada no instrumento, varrendo um intervalo conhecido, que dariam a mesma indica33o. Tal incerteza 3 determinada por:

$$u(x_{2e11}) = \frac{x_2}{\sqrt{12}} \quad (18)$$

$X_2 e_{11}$  = resolu33o do objeto e/ou padr3o

**Certificado de calibra33o do term3metro digital de refer3ncia (X<sub>3</sub>):** corresponde 3 incerteza declarada no certificado de calibra33o do term3metro de refer3ncia e 3 estimada por:

$$u(x_3) = \frac{x_3}{2} \quad (19)$$

$X_3$  = incerteza declarada no certificado de calibração do termômetro digital de referência

**Emissividade do corpo negro ( $x_6$ ):** a incerteza provinda da emissividade do corpo negro é estimada pelas equações descritas abaixo, no qual se faz necessário o conhecimento da incerteza provinda da emissividade do corpo negro ( $U_{\epsilon_{bb}}$ ), tal incerteza é descrita na especificação técnica do fabricante. A incerteza estimada,  $U_{\epsilon}(T_{med})$ , é declarada em Kelvin.

$$U_{\epsilon}(T_{med}) = \frac{\frac{\partial S(T_{med})}{\partial \epsilon_{bb}}}{\frac{\partial S(T_{med})}{\partial T}} \cdot U(\epsilon_{bb}) \quad (20)$$

Em que:  $U_{\epsilon_{bb}}$  é a incerteza expandida da emissividade da superfície de corpo negro

E:

$$\frac{\partial S(T_{med})}{\partial \epsilon_{bb}} = \frac{1}{\epsilon_{instr}} \cdot [S(T_{ref}) - S(T_{amb})] \quad (21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial T} = [S(T_{ref})]^2 \cdot \frac{A \cdot c_2}{C(A \cdot T_{ref} + B)^2} \cdot \exp\left(\frac{c_2}{A \cdot T_{ref} + B}\right) \quad (22)$$

**Temperatura refletida do ambiente ( $X_7$ ):** equivale a influência da temperatura ambiente em relação a temperatura medida pelo corpo negro e é determinada por:

$$U_{Ref1}(T_{med}) = \frac{\partial S(T_{med})}{\partial S(T_{amb})} \cdot \frac{\frac{\partial S(T_{amb})}{\partial T}}{\frac{\partial S(T_{med})}{\partial T}} \cdot U(T_{amb}) \quad (23)$$

Em que:

$$\frac{\partial S(T_{med})}{\partial S(T_{amb})} = \frac{1 - \epsilon_{bb}}{\epsilon_{instr}} \quad (24)$$

Sendo  $U(T_{amb})$  é a incerteza declarada no certificado de calibração do equipamento utilizado para medir a temperatura ambiente.

**Troca de calor da fonte ( $x_8$ ):** corresponde a incerteza devido ao fluxo de calor entre a localização do sensor de referência e a superfície do corpo negro em que o termômetro de IV, sob calibração, medirá a temperatura.

**Uniformidade da cavidade de corpo negro ( $x_9$ ):** é determinada realizando uma análise de uniformidade da cavidade, avaliando a homogeneidade da temperatura na superfície da cavidade.

**Repetibilidade ( $x_{12}$ ):** é estabelecida avaliando o quanto o objeto é repetitivo, geralmente inicia-se e finaliza a calibração no ponto de gelo (0,01 °C), a diferença entre as correções do primeiro e do último ponto corresponde a fonte de incerteza.

**Efeito do tamanho da fonte ( $X_{13}$ ):** é causada devido a radiação medida a partir da fonte ou de seus arredores, os efeitos do tamanho da fonte são causados por dispersão óptica. Esta incerteza tende a ser maior em casos em que o diâmetro da fonte é menor do que o campo de visão do termômetro de IV.

**Absorção Atmosférica ( $X_{14}$ ):** a incerteza provinda da absorção atmosférica é tipicamente muito pequena, mas deve ser considerada. O cálculo descrito abaixo é baseado no documento *Bureau international des poids et mesures* (BIPM). Para medições realizadas a uma distância menor ou igual a 1 metro do alvo, considera-se uma incerteza expandida de 0,0006, que deve ser substituída na equação:

$$U(T) = \frac{U(S)}{\frac{\partial S}{\partial T}} \cdot S(T_{ref}) \quad (25)$$

Sendo  $U(s)$  igual a 0,0006 (incerteza expandida fornecida pela BIPM)

As contribuições de incerteza provindas da deriva do termômetro digital de referência ( $x_4$ ), especificação técnica do termômetro digital de referência ( $x_5$ ), emissividade do corpo negro ( $x_6$ ), temperatura refletida do ambiente ( $x_7$ ), troca de calor

da fonte ( $x_8$ ), uniformidade da cavidade de corpo negro ( $x_9$ ), repetibilidade ( $x_{12}$ ) e da absorção atmosférica ( $x_{14}$ ) são calculadas conforme a seguir:

$$u(x_i) = \frac{x_i}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

Sendo  $X_i$  a contribuição de incerteza.

Após calcular todas as contribuições de incerteza, calcula-se a **incerteza padrão combinada** que corresponde a combinação de todas as incertezas presentes na medição. Quando um resultado de uma medição é obtido por meio dos valores de outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva da soma de termos, estes constituem as variâncias ou covariâncias destas grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas, ou seja:

$$u_c = \sqrt{(u(x_1))^2 + (u(x_2))^2 + \dots + (u(x_n))^2} \quad (27)$$

O cálculo dos graus de liberdade efetivo é determinado através da equação de Welch Satterthwaite, isto é:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_i \left( \frac{u(x_i)}{v_i} \right)^4} \quad (28)$$

E por fim calcula-se a incerteza expandida ( $U$ ) que será declarada no certificado de calibração. A incerteza expandida é a grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Para calcular a incerteza expandida da calibração, utiliza-se o fator de abrangência “ $k$ ”, que é determinado para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %, correspondendo a 2,00 para um grau de liberdade efetivo superior a 1000 ou seja:

$$U = k \cdot u_c = 2,0 \cdot u_c \quad (29)$$



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de calibração do termômetro de radiação infravermelha (IV) consiste em posicionar o objeto de forma a medir a temperatura de um corpo negro, a temperatura apresentada no termômetro de radiação IV é comparada com a temperatura indicada no termômetro de referência. O corpo negro pode ser feito de duas formas, através de uma placa plana ou por uma cavidade e pode ser utilizado um termômetro de contato ou um termômetro de radiação IV como referência. Para determinar o método de calibração, realizou-se um levantamento, conforme descrito resumidamente na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Levantamento dos métodos de calibração.

Placa plana		Cavidade	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
	Radiação refletida é maior	Baixa refletividade	
Pode ser feita com um diâmetro grande o suficiente para calibrar termômetros com baixas proporções de diâmetro para comprimento (D:S)		Pode ser construída de diversas formas geométricas	Menor campo de visão
	Emissividade pode variar com o tempo	Emissividade próxima de 1	
		Maior uniformidade e estabilidade térmica	

Fonte: Autor

Foi avaliado o método que obtivesse a menor incerteza. Conforme descrito na Tabela 3.1, o método por uma cavidade de corpo negro tem como vantagem uma baixa refletividade, uma emissividade próxima de 1 e maior uniformidade e estabilidade térmica. Levando em conta que estes fatores são componentes de incerteza para calibração de termômetros de radiação IV, concluiu-se que a incerteza de medição será menor no método por uma cavidade de corpo negro.

Estabeleceu-se que para temperatura de referência será utilizado um termômetro de contato. Utilizando um termômetro de IV como referência, o mesmo deve ter a mesma faixa espectral do termômetro de IV sob calibração, diferenças na faixa espectral resulta em uma incerteza maior.

Desta forma, o método de calibração adotado pelo Laboratório de Metrologia Física do LIT/INPE será por uma cavidade de corpo negro utilizando um termômetro de contato como referência.

### 3.1 Sistema de calibração – Equipamentos e Materiais utilizados

O sistema de calibração consiste em: uma câmara térmica utilizada como meio térmico; uma cavidade de corpo negro; um termômetro digital com sensor termorresistivo (PT100), utilizado para medição da temperatura de referência da cavidade de corpo negro; um sistema de aquisição de dados através do Software Agilent BenchLink; um microcomputador com sistema operacional Windows 9x ou superior; Data Logger para monitoramento da temperatura ambiente; recipiente isolado para banho de gelo; água destilada; gelo triturado; um dispositivo e um tripé para alinhamento do termômetro infravermelho que será calibrado.

Figura 3.1 – Sistema de Calibração.



Fonte: Autor

Figura 3.2 – Aparato experimental.



Fonte: Autor

### 3.2 Atividades preliminares

Preliminar à calibração faz-se necessário a preparação do objeto a ser calibrado, a verificação no ponto de gelo, a montagem do sistema e a programação dos equipamentos.

#### 3.2.1 Preparação do Termômetro de Radiação Infravermelha

Verificar a especificação técnica do termômetro de IV a ser calibrado, analisando a faixa de operação, o campo de visão e a emissividade (se é fixa ou ajustável); conferir a carga das pilhas ou baterias; inspecionar visualmente se há danos que possam interferir no desempenho do termômetro; determinar os comprimentos de onda de mínimo e máximo para a faixa de comprimento de onda de operação do instrumento e então deve-se calcular os coeficientes A e B da função de resposta do termômetro (equações 7 e 8), estes cálculos serão realizados por uma planilha do Excel.

O termômetro de IV deve permanecer no laboratório num período mínimo de uma hora antes de iniciar a calibração, para atingir equilíbrio térmico com o ambiente do laboratório e por fim deve-se averiguar os pontos que serão calibrados.

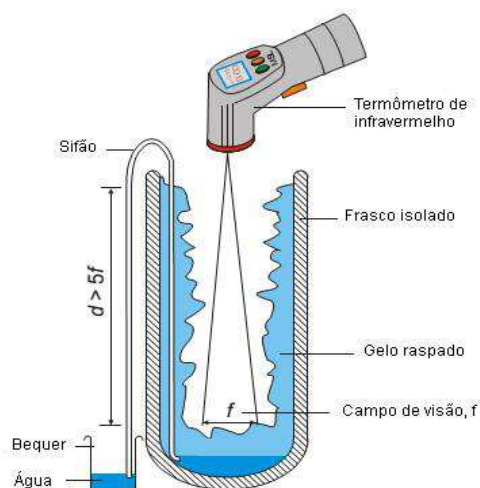
#### 3.2.2 Verificação no Ponto de gelo

Para preparar o ponto de gelo para termômetros de radiação infravermelha é necessário:

- Um recipiente isolado (dewar ou garrafa térmica) suficientemente profundo para que seja feito um furo no gelo com profundidade de aproximadamente cinco vezes o diâmetro do campo de visão do termômetro de IV. Deve haver uma profundidade extra de 50 mm a 100 mm, prevendo-se o acúmulo de gelo fundido.
- Gelo limpo triturado ou raspado obtido preferencialmente por água destilada ou deionizada;
- Aproximadamente 300 ml de água destilada;
- Um sifão para a remoção do excesso de água;

Coloque o gelo triturado no recipiente isolado e acrescente a água destilada, misture até o gelo obter uma aparência translúcida clara. Molde uma cavidade no gelo assegurando que a parte inferior da cavidade de gelo seja suficientemente larga para preencher todo o campo de visão do termômetro, as paredes da cavidade de gelo devem ser ásperas, de modo que a radiação se disperse aleatoriamente no interior da cavidade e para assegurar a uniformidade (conforme Figura 3.3). Insira o sifão no recipiente para permitir a remoção do excesso de água. Realizar no mínimo 10 leituras num intervalo aproximado de 30 segundos entre cada leitura.

Figura 3.3 – Corpo negro no ponto de gelo.



Fonte: DOQ-CGCRE-054

O Ponto de gelo deve ser realizado no início e no final da calibração, a fim de averiguar o comportamento do termômetro.

### 3.2.3 Montagem do sistema e programação dos equipamentos

Montar a cavidade de corpo negro na câmara térmica e posicionar o sensor termorresistivo na parte posterior da cavidade, fechar a câmara e programá-la para a temperatura que se deseja calibrar.

Configurar o Data Acquisition por meio do Software de aquisição de dados, programando para que a medição seja efetuada num intervalo de 30 segundos. Os Indicadores eletrônicos devem ser ligados pelo menos uma hora antes do início da calibração ou conforme recomendação do fabricante.

Com o auxílio do tripé realizar o alinhamento do termômetro de IV com a abertura frontal da câmara.

### 3.3 Execução da calibração

- Determinar a emissividade efetiva do corpo negro ( $\epsilon_{bb}$ ), por meio da equação (10);
- Ajustar a emissividade instrumental,  $\epsilon_{instr}$ , tão próxima quanto possível de  $\epsilon_{bb}$  (a menos que haja outra determinação), ou, se a emissividade instrumental for fixa, determinar o seu valor a partir da especificação do termômetro;
- Verificar e anotar a temperatura ambiente,  $T_{amb}$ ;
- Antes de iniciar o registro das medições deve-se determinar a temperatura do detetor ( $T_d$ ) do objeto em cada ponto a ser calibrado<sup>1</sup>. Se a emissividade instrumental for 1, o valor de  $T_d$  não é necessário.
- Iniciar e finalizar a calibração no ponto de gelo. Recomenda-se que os pontos intermediários sejam executados em ordem crescente de temperatura.
- Para cada ponto de calibração, ler o termômetro de referência,  $T_{ref}$  e calcular a indicação esperada para o termômetro de IV,  $T_{exp}$ , utilizando a equação (10) para termômetros de IV com emissividade ajustável ou a equação (13) para termômetros de IV com emissividade fixa. Comparar a indicação real no termômetro IV com o valor de  $T_{exp}$ . A diferença entre a temperatura esperada e a indicação real é a correção a ser relatada no certificado de calibração.

Nota<sup>1</sup>: Essa medição é realizada apenas em instrumentos com emissividade ajustável. Em termômetro de radiação infravermelha com emissividade fixa, considera-se a temperatura do detetor igual a temperatura ambiente, portando o termômetro IV não deve permanecer posicionado próximo a câmara térmica enquanto não estiver medindo a temperatura da cavidade, pois a temperatura da lateral da câmara térmica poderá interferir na temperatura do detetor do termômetro.

### 3.3.1 Temperatura do detetor

A temperatura do detetor deve ser deduzida em cada ponto a ser calibrado, após a estabilização da temperatura e seguindo os seguintes passos:

- Determinar os ajustes de emissividade que serão utilizados, recomenda-se valores espaçados entre si, como  $\varepsilon_{instr1} = 0,5$  e  $\varepsilon_{instr2} = 1$ ;
- Ajustar a emissividade instrumental 1 para realizar a primeira medição;
- Realizar a primeira medição da temperatura do alvo e registrar o dado;
- Ajustar a emissividade instrumental 2 para realizar a segunda medição;
- Realizar a segunda medição da temperatura do alvo e registrar o dado;

Substituindo tais dados na equação (9) é possível determinar a temperatura do detetor.

### 3.3.2 Aquisição de dados

A aquisição de dados deve ser realizada após o período de estabilização da temperatura. A temperatura da câmara é considerada estável, no mínimo 1 hora após atingir o valor programado, desde que os dados coletados pelo padrão atendam o seguinte critério:

Tabela 3.2: Estabilização da temperatura

Condição	Tempo Mínimo
Desvio padrão abaixo de 0,03 °C	15 min.

Fonte: Autor

Com a temperatura estável, realizar as medições do termômetro IV em intervalos iguais, realizar no mínimo dez medidas.

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

O desenvolvimento do projeto visa atender os requisitos da norma ASTM E2847-14: *Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers*. Para tal foram estudados os conceitos de cavidade de corpo negro, emissividade, condutividade térmica, avaliações de incertezas, bem como os métodos de calibração de termômetros de radiação infravermelha. Objetivou-se a fabricação de uma cavidade de corpo negro com elevada condutividade térmica, alta emissividade, com uniformidade e estabilidade térmica e com dimensões que atendam o campo de visão dos termômetros de radiação infravermelha (IV) que operam na faixa de 0 °C e de 50 °C a 250 °C.

Para definição do material da cavidade de corpo negro foi realizado uma pesquisa dos materiais disponíveis no INPE e analisou-se a condutividade térmica e o ponto de fusão, conforme ilustrado na Tabela 3.1.

Tabela 4.1 - Materiais para fabricação da cavidade de corpo negro.

Material	Especificação	Condutividade e térmica (kcal/h/m/°C)	Ponto de fusão (°C)	Fonte
Latão	Liga 260	20 °C: 104,39	955	<a href="http://www.qualinox.com.br/ficha-tecnica-latao.htm">http://www.qualinox.com.br/ficha-tecnica-latao.htm</a>
Alumínio	Liga 6351	25 °C: 158,39	555-650	<a href="http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf">http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf</a>
Alumínio	Liga 6061	25 °C: 133,19	580 – 650	<a href="http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6061.pdf">http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6061.pdf</a>
Alumínio	Liga 6063	25 °C: 172,79	600-650	<a href="http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf">http://www.alumicopper.com.br/pdf/aluminio/info-tec-alumi_aluminio_6351.pdf</a>
Aço inox	Tipo 304	100 °C: 13,75 150 °C: 18,05	1398,9	<a href="http://data.irestal.com/files/files/2012030204152715829.pdf">http://data.irestal.com/files/files/2012030204152715829.pdf</a>
Cobre	Liga 110	20°C: 336,2	1083	<a href="http://www.qualinox.com.br/ficha-tecnica-cobre.htm">http://www.qualinox.com.br/ficha-tecnica-cobre.htm</a>

Fonte: Autor

Após análise definiu-se que o material será o cobre devido à alta condutividade térmica. Apesar da disponibilidade dos materiais na instituição, fez-se necessário a reposição do material, portanto, posterior à definição do material realizou-se um

orçamento com fornecedores de metais.

Para obter uma emissividade próxima de 1 (um), definiu-se que o interior da cavidade será revestido com uma tinta preta de poliuretano (PU1), o poliuretano é um polímero formado por uma cadeia de unidades de uretano, que fornece proteção térmica superior e emissividade infravermelho ( $\epsilon$ ) de 0,89.

#### 4.1 Cavidade de corpo negro desenvolvida

Antecedente a elaboração do desenho da cavidade de corpo negro, foi feito um levantamento avaliando o campo de visão dos termômetros de IV que operam na faixa de 0 °C e de 50 a 250 (°C) e obedecendo o item 3.1.2.2 da norma ASTM E2847-14 determinou-se que a cavidade terá um campo de visão de 5:1 com as seguintes dimensões nominais:

- Comprimento total da peça: 200 mm
- Diâmetro externo: 38 mm
- Comprimento da cavidade de corpo negro: 150 mm
- Diâmetro da abertura da cavidade: 30 mm
- Comprimento da abertura em que o sensor termorresistivo de referência será posicionado: 49 mm
- Diâmetro da abertura em que o sensor termorresistivo de referência será posicionado: 7 mm
- O comprimento total da peça será 200 mm, sendo 150 mm de comprimento da cavidade, 49 mm de comprimento da abertura em que o sensor termorresistivo padrão será posicionado e 1 mm entre o fundo da cavidade e o fundo da abertura onde o sensor padrão será posicionado, com diâmetro externo de 38 mm.

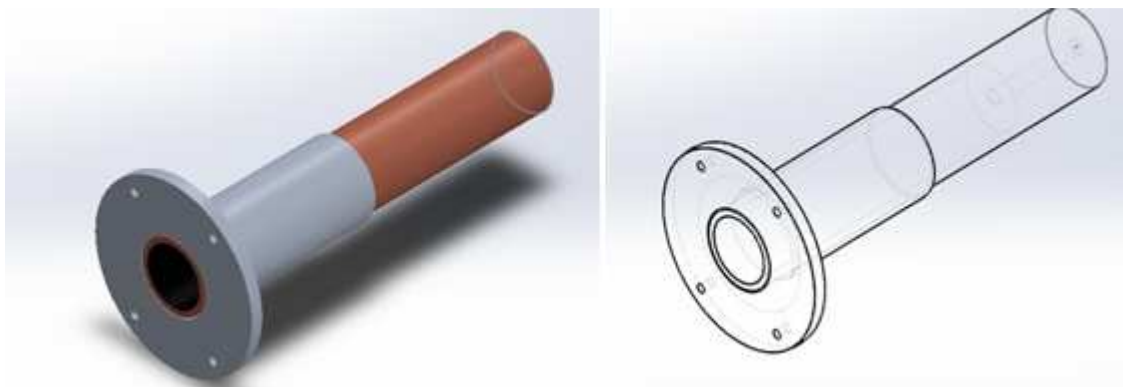
O sensor termorresistivo de referência será posicionado na parte posterior da cavidade, em uma abertura que permite que o sensor fique próximo a parede da cavidade onde o termômetro infravermelho medirá a temperatura.

Com as dimensões definidas, iniciou-se o desenho técnico através do *Software SolidWorks*, que possibilitou também a avaliação das propriedades de massa da peça. A cavidade será instalada próximo ao centro da câmara térmica, para fixação da cavidade na câmara térmica desenvolveu-se um suporte de alumínio. A Figura 2.1 ilustra o esboço da cavidade de corpo negro com o suporte para posicionamento da cavidade na



câmara térmica, o apêndice demonstra detalhadamente o desenho da cavidade de corpo negro e do suporte com as devidas dimensões.

Figura 4.1 – Esboço da cavidade de corpo negro.



Fonte: Autor

Para estabelecer o tipo de ajuste na montagem do suporte de alumínio na cavidade de corpo negro estudou-se a Norma NBR 6158: Sistema de tolerâncias e ajustes e definiu-se que o tipo de ajuste na montagem do suporte de alumínio na cavidade de corpo negro será de ajuste com interferência.

A estimativa da massa da peça foi determinada por meio da ferramenta de avaliação das propriedades de massa do *Software SolidWorks*, conforme apresentado na Tabela 4.2 - Massa da cavidade de corpo negro:

Tabela 4.2 - Massa da cavidade de corpo negro

Peça	Material	Massa (kg)
Cavidade	Cobre	1,276
Suporte	Alumínio	0,131
Cavidade com Suporte	Cobre + Alumínio	1,408

Fonte: Autor

Para o posicionamento da cavidade de corpo negro na câmara térmica estabeleceu-se que será feito um furo no centro da tampa da câmara térmica, conforme ilustrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Vista frontal da câmara térmica com a cavidade de corpo negro no centro da porta



Fonte: Autor

O alinhamento do termômetro infravermelho com a abertura da cavidade será realizado com o auxílio de um tripé.

Com a definição dos parâmetros pertinentes ao desenvolvimento do projeto, deu-se início a fabricação da cavidade de corpo negro e na furação da tampa da câmara térmica no Setor de Mecânica e Desenho (SMD) do INPE, foi confeccionado também um corpo de prova para que após a pintura seja realizado o teste de emissividade.

Subsequente a confecção da peça realizou-se a pintura da cavidade e do corpo de prova no setor de pintura do LIT/INPE. Preliminar a pintura foi aplicado um *primer* e aguardou-se 24 horas, conforme demonstrado na Figura 4.3 e então aplicou-se a tinta no interior da cavidade e no corpo de prova, ilustrado nas Figura 4.4, e aguardou-se 8 (oito) dias.

Figura 4.3 - Cavidade de corpo negro com *primer*.



Figura 4.4 - Pintura da cavidade de corpo negro e do corpo de prova



Fonte: Autor

Posteriormente, realizou-se a medição da cavidade de corpo negro com um paquímetro, as dimensões efetivas são:

- Comprimento total da peça: 200 mm
- Diâmetro externo: 38 mm
- Comprimento da cavidade de corpo negro: 150 mm
- Diâmetro da abertura da cavidade: 30 mm
- Comprimento da abertura em que o sensor termorresistivo de referência será posicionado: 49 mm
- Diâmetro da abertura em que o sensor termorresistivo de referência será posicionado: 7 mm.

As dimensões efetivas estão de acordo com as dimensões nominais. Conclui-se que a cavidade de corpo negro fabricada está em conformidade com o projetado no início do desenvolvimento. A Figura 4.5 ilustra a cavidade de corpo negro confeccionada e na Figura 4.6 o sistema montado com a cavidade de corpo negro inserida na câmara.

Figura 4.5 – Cavidade de corpo negro

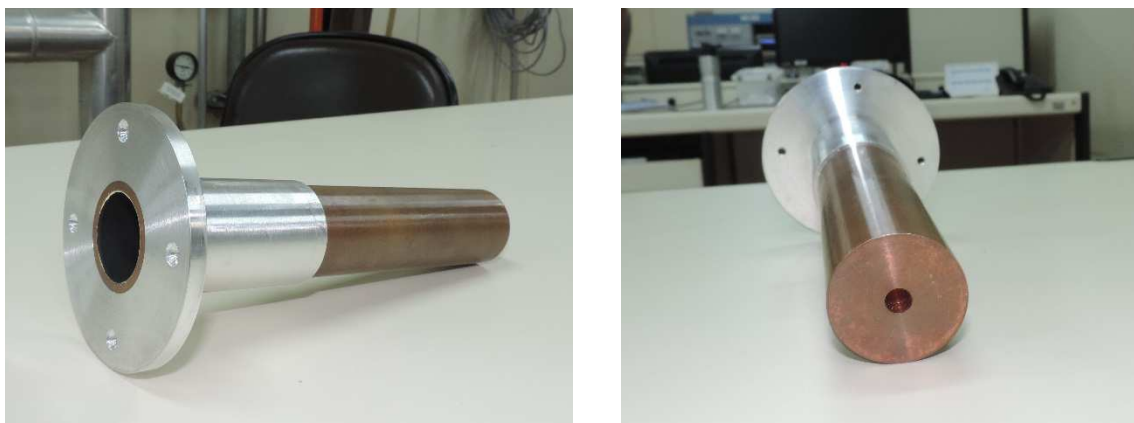


Figura 4.6 – Sistema de calibração montado



Fonte: Autor

## 4.2 Avaliação Experimental

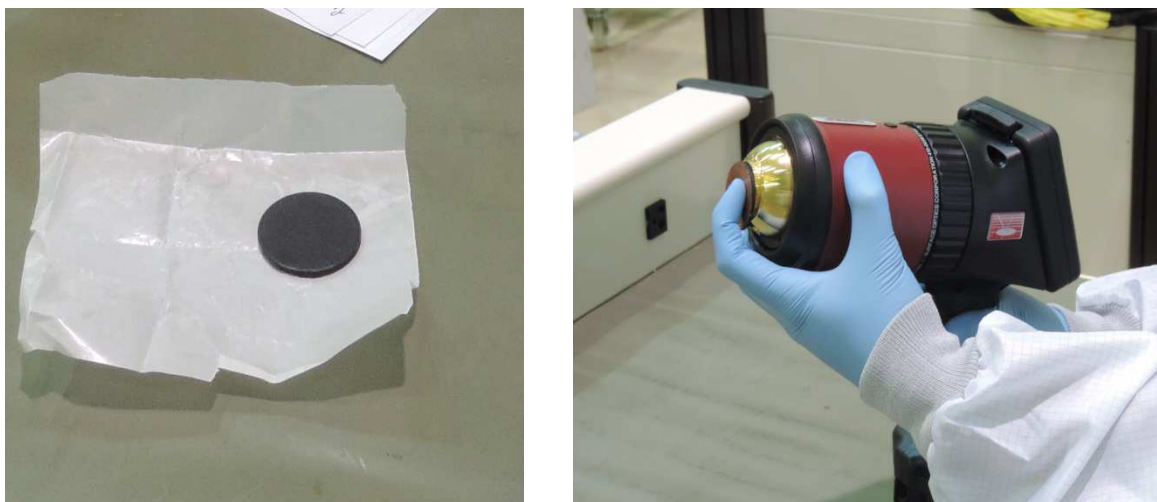
Com o intuito de avaliar a cavidade de corpo negro, verificou-se a emissividade da superfície, realizou-se um estudo da uniformidade e estabilidade térmica da cavidade desenvolvida e em paralelo foram feitas medições de temperatura do corpo negro utilizando um termômetro de radiação IV. Nos capítulos subsequentes serão apresentadas as avaliações realizadas.

### 4.2.1 Medição da emissividade do corpo negro

Preliminar ao estudo da uniformidade e estabilidade térmica foi feito a medição da emissividade da superfície da cavidade de corpo negro, para tal foi utilizado o corpo

de prova confeccionado. A emissividade da superfície foi medida no Laboratório de térmica do INPE/LIT por meio de um equipamento denominado como “*Surface Optics Corporation*”, a Figura 4.7 ilustra o corpo de prova e a medição da emissividade.

Figura 4.7 – Corpo de prova e medição da emissividade do corpo negro.



Fonte: Autor

Foram efetuadas três medições e obteve como resultado uma média de  $0,886 \pm 0,003$  de emissividade no infravermelho. Para calibração utiliza-se a emissividade efetiva, determinada pela equação (29), substituindo as dimensões da cavidade e a emissividade da superfície na equação (30) obteve uma emissividade efetiva de  $0,995 \pm 0,003$ .

$$\varepsilon_{bb} = 1 - (1 - 0,886) \cdot \left( \frac{30}{150} \right)^2 \quad (30)$$

$$\varepsilon_{bb} = 0,995 \pm 0,003 \quad (31)$$

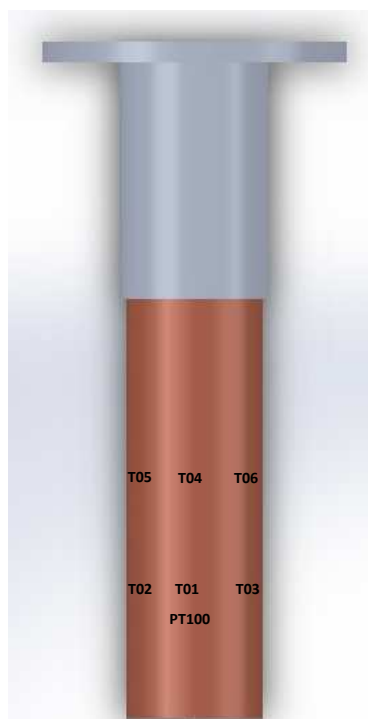
O resultado foi satisfatório tendo em vista que a emissividade efetiva obtida é próxima de 1.

#### 4.2.2 Estudo da uniformidade e estabilidade térmica

Para o estudo da uniformidade e estabilidade térmica foram utilizados sensores termopar tipo T e um sensor termorresistivo (PT100) posicionados na cavidade. A avaliação foi realizada na câmara térmica que será utilizada para calibração de termômetros de radiação infravermelha, todas as avaliações foram feitas com a câmara programada a 97,4 °C.

Os sensores foram colocados em toda extensão da cavidade, foram feitas três análises: (01) com a cavidade montada na câmara, conforme esboçado no desenvolvimento do projeto, com os sensores termopar na parte externa da cavidade e o sensor termorresistivo (PT100) no local em que foi projetado para o termômetro de referência; (02) com a cavidade inserida totalmente na câmara, com os sensores posicionados conforme análise 01; (03) com a cavidade inserida totalmente na câmara, com os sensores termopar posicionados na parte interna da cavidade e o sensor termorresistivo (PT100) no local em que foi projetado para o termômetro de referência. A Figura 4.8 ilustra a montagem dos sensores nas três análises, diferenciando apenas entre a parte externa e interna da cavidade.

Figura 4.8 – Sensores na cavidade



Fonte: Autor

Na montagem dos sensores na cavidade foram utilizados 9 sensores termopar tipo T, 3 no início, 3 no meio, 3 no fim da cavidade e 01 sensor termorresistivo (PT100) no local em que foi projetado para ser colocado o sensor de referência. Entretanto, para a análise considerou-se os sensores termopar que foram montados no meio e no final da cavidade e o sensor termorresistivo, totalizando 7 sensores.

O primeiro teste foi realizado com a cavidade montada na câmara térmica conforme o projeto e os sensores foram posicionados na parte externa da cavidade. A Figura 4.9 ilustra a montagem e os sensores na cavidade.

Figura 4.9 - Teste 1 - cavidade montada na câmara conforme projeto e sensores posicionados na parte externa da cavidade.



Fonte: Autor

O segundo teste foi realizado com a cavidade de corpo negro inserida totalmente na câmara, sendo montada sobre um suporte de alumínio e alinhada com a abertura da porta da câmara. Os sensores foram posicionados conforme a primeira análise, a Figura 4.10 ilustra a montagem da cavidade na câmara e os sensores posicionados na cavidade.

Figura 4.10 - Teste 2 - montagem da cavidade com os sensores no interior da câmara.



Fonte: Autor

O terceiro teste foi realizado com a cavidade inserida totalmente na câmara, com os sensores termopar posicionados na parte interna da cavidade e o sensor termorresistivo (PT100) no local em que foi projetado para o termômetro de referência. Para a montagem dos sensores no interior da cavidade utilizou-se um tubo de teflon, em que os sensores termopar foram posicionados no tubo, conforme foram posicionados na cavidade nas análises anteriores, e o tubo foi inserido na cavidade de corpo negro, através da abertura da porta da câmara. A Figura 4.11 ilustra a montagem.

Figura 4.11 – Montagem



Fonte: Autor

Após a montagem da cavidade de corpo negro na câmara térmica foi feito a programação do software de aquisição de dados dos sensores, os dados foram coletados num intervalo de 30 segundos entre cada medida. A aquisição de dados foi iniciada no mesmo instante em que a câmara térmica foi ligada, em todos os testes a câmara térmica foi programada a 97,4 °C.

#### 4.2.3 Resultados do estudo da uniformidade e estabilidade térmica

O estudo da uniformidade e estabilidade térmica da cavidade de corpo negro visou analisar o tempo que será necessário para a temperatura ficar estável e uniforme, averiguar quantitativamente e qualitativamente a uniformidade e estabilidade térmica, a diferença de temperatura entre a área que o termômetro de IV medirá a temperatura e o local em que o sensor termorresistivo de referência (PT100) será posicionado.

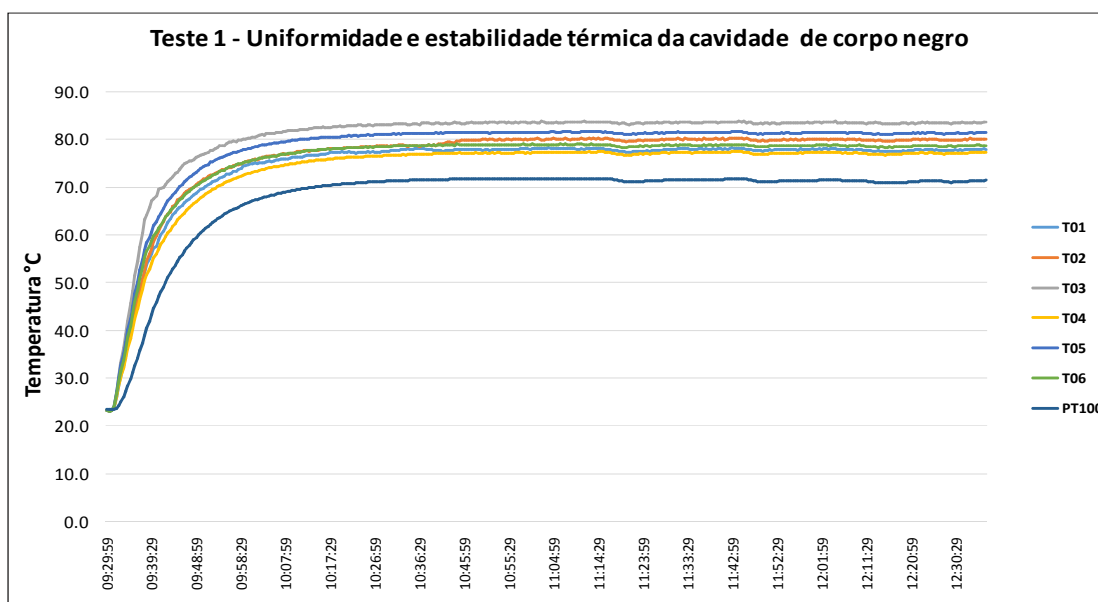
O período analisado foi de três horas, contando a partir do momento em que a



câmara foi ligada. Após este período os dados coletados foram salvos em uma planilha de Excel e então aplicou-se as correções referente à calibração dos sensores utilizados. Com os dados corrigidos, avaliou-se a uniformidade e estabilidade térmica.

O resultado obtido no teste (01) - cavidade montada na câmara térmica conforme projeto e sensores posicionados na parte externa da cavidade - a cavidade de corpo negro não atingiu a temperatura programada na câmara e não atingiu a uniformidade térmica esperada, apenas a estabilidade térmica foi satisfatória. O gráfico 4.12 demonstra os dados obtidos no teste.

Figura 4.12 - Teste 1 – cavidade montada conforme projeto.



Fonte: Autor

Conforme ilustrado no gráfico 4.12 a temperatura começou a estabilizar por volta das 10h17min., entretanto a temperatura na cavidade estava entre 70 °C e 80 °C, muito abaixo da temperatura programada na câmara (97,4 °C). A diferença entre os sensores termopar e o sensor termorresistivo de referência foi de aproximadamente 8 °C. Após visualizar os dados no gráfico foi calculado a estabilidade e uniformidade térmica.

A estabilidade térmica foi calculada a partir da subtração da máxima temperatura menos a mínima temperatura obtida num período de 15 minutos (30 medidas). O cálculo foi efetuado separadamente para cada sensor e foi avaliado o período em que a

temperatura obteve menor estabilidade, deste período foi considerado como resultado a máxima estabilidade térmica obtida entre todos os sensores. A Tabela 4.3 ilustra os resultados.

Tabela 4.3 – Resultado Teste 1.

<b>Resultado</b>			
<b>Início</b>	<b>Final</b>	<b>Uniformidade Térmica °C</b>	<b>Estabilidade Térmica °C</b>
10h45min	11h00min	11,97	0,38

Fonte: Autor

Para a análise da uniformidade térmica, foi avaliada a variação de temperatura entre todos os sensores posicionados na cavidade em cada instante do período em que a temperatura estava estável, conforme equação 31. Dos resultados obtidos considerou-se a máxima uniformidade térmica deste período.

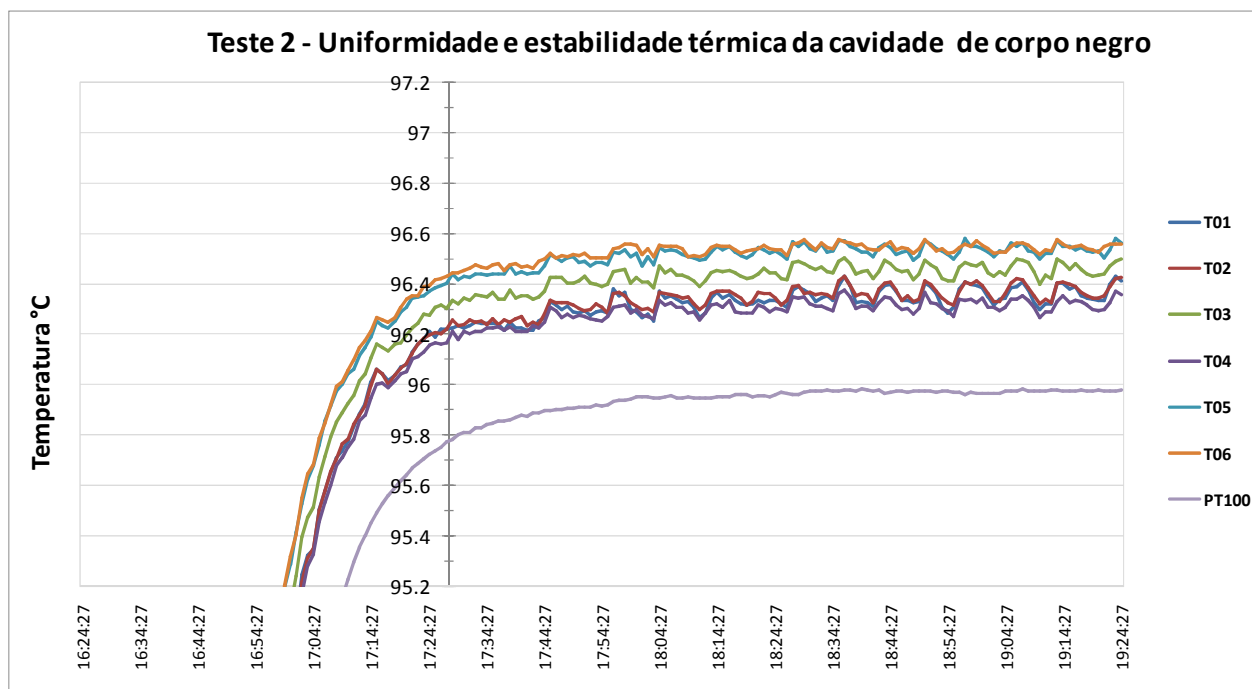
$$\text{Uniformidade} = \text{máxima } t \text{ } ^\circ\text{C} - \text{mínima } t \text{ } ^\circ\text{C} \quad (31)$$

Concluiu-se que a cavidade de corpo negro não atingiu a uniformidade térmica devido à transferência de calor entre o suporte de alumínio e a cavidade de corpo negro. Conforme detalhado no capítulo 4 a cavidade de corpo negro foi posicionada na câmara térmica por meio do suporte de alumínio desenvolvido, em que o suporte é parafusado na porta da câmara, ficando exposto a temperatura ambiente.

O alumínio é um condutor térmico, desta forma houve transferência de calor por condução, em que o fluxo de calor da temperatura ambiente transmitiu calor para o suporte de alumínio e este transmitiu calor à cavidade de corpo negro. Com isto optou-se em dar seguimento aos testes com a cavidade de corpo negro inserida totalmente na câmara (testes 2 e 3), de modo que a abertura da cavidade ficasse alinhada com a abertura da porta da câmara.

Os resultados obtidos no teste (02) - cavidade de corpo negro inserida totalmente na câmara com os sensores na parte externa da cavidade - foram satisfatórios. A temperatura atingiu a temperatura programada e obteve estabilidade e uniformidade térmica, o gráfico 02 ilustra o resultado.

Figura 4.13 - Teste 2 - cavidade inserida na câmara e sensores na parte externa da cavidade.



A temperatura começou a atingir a estabilidade térmica às 17h24min, uma hora após o início das medições. A Tabela 4.4 ilustra o resultado da uniformidade e estabilidade térmica.

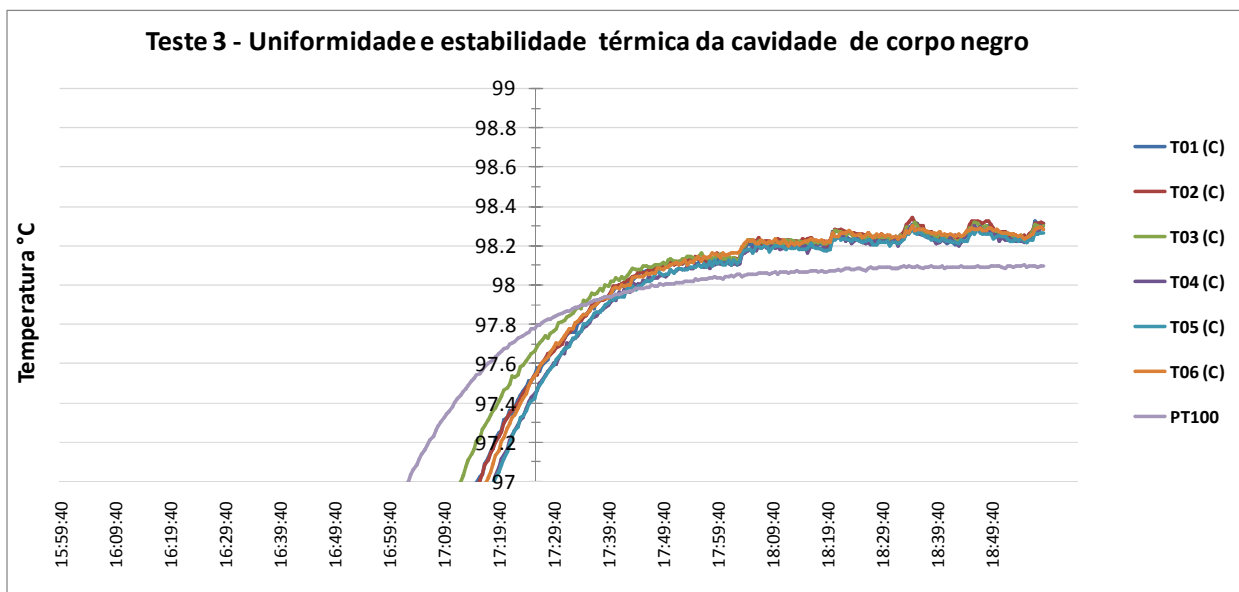
Tabela 4.4 – Resultado Teste 2.

Resultado			
Início	Final	Uniformidade Térmica °C	Estabilidade Térmica °C
17h57min	18h12min	0,622	0,117

Fonte: Autor

No teste (03) - cavidade inserida totalmente na câmara, com os sensores posicionados no interior da cavidade – o resultado também foi satisfatório. A cavidade atingiu a temperatura programada e obteve uniformidade e estabilidade térmica. O gráfico 4.14 ilustra os resultados obtidos.

Figura 4.14 - Teste 3 – cavidade inserida na câmara e sensores no interior da cavidade.



A temperatura começou a atingir a estabilidade térmica às 17h39min, aproximadamente duas horas após o início das medições, o gráfico demonstra que a temperatura na parte interna da cavidade de corpo negro é mais uniforme e estável do que na parte externa da cavidade, a Tabela 4.5 exhibe o resultado numericamente da uniformidade e estabilidade térmica.

Tabela 4.5 - Resultado Teste 3.

Resultado			
Início	Final	Uniformidade Térmica °C	Estabilidade Térmica °C
18h04min	18h19min	0,182	0,047

Fonte: Autores

O resultado do teste 3 comprova que a cavidade de corpo negro atingiu o objetivo proposto, em que se pretendia fabricar uma cavidade com uniformidade e estabilidade térmica e que atingisse a estabilidade térmica em um tempo viável.

A diferença de temperatura entre os sensores termopar e o sensor termorresistivo de referência (PT100) foi de aproximadamente 0,2 °C. Analisando o certificado de calibração dos sensores utilizados nos testes, constatou-se que a diferença de incerteza entre os sensores termopar e o sensor termorresistivo é de aproximadamente 0,13 °C, desta forma a diferença constada no teste está dentro do que se esperava.

Conforme demonstrado nos testes realizado, os resultados obtidos evidenciam a necessidade de alteração do posicionamento da cavidade de corpo negro na câmara térmica ou alteração do suporte de alumínio por um suporte fabricado com isolante térmico, pois alterando o material do suporte por um isolante térmico, este não transmitirá calor da temperatura ambiente para a cavidade de corpo negro.

#### **4.2.4 Teste com termômetro de radiação infravermelha**

Durante o teste 2 do estudo da uniformidade e estabilidade térmica realizou-se medições da temperatura da cavidade de corpo negro utilizando um termômetro de radiação IV, buscando avaliar a influência da distância entre o termômetro de IV e o alvo nas medições realizadas.

Foram feitos três testes, o primeiro com o termômetro a 221 mm do fundo da cavidade, o segundo com o termômetro a 319,5 mm do fundo da cavidade e o terceiro com o termômetro a 419,5 mm do fundo da cavidade. O procedimento adotado para o teste está em conformidade com o descrito no capítulo 3. Abaixo as especificações do termômetro de radiação IV utilizado:

Modelo: IR-16EXL3  
Marca: 3M  
Faixa de medição: -18 °C a 870 °C  
Resposta Espectral: 8 – 14  $\mu\text{m}$   
Campo de visão: 50:1  
Resolução: 1 °C  
Emissividade: Ajustável (0,1 a 1,0)

Foi utilizado um tripé para apoio do termômetro e um dispositivo para alinhamento do laser ao alvo, as Figuras 5.9 e 5.10 ilustram a montagem.

Figura 4.15 - sistema montado para teste com termômetro de IV.



Fonte: Autor

Figura 4.16 - Teste com termômetro de radiação IV.



Fonte: Autor

Foi utilizado um Data Logger devidamente calibrado para monitoramento da temperatura ambiente. Os cálculos pertinentes a calibração foram resolvidos por meio de uma planilha Excel desenvolvida com as devidas equações de medição. Os dados obtidos na medição da emissividade da superfície foram utilizados nos cálculos.

#### 4.2.5 Resultado do teste com termômetro de radiação infravermelha

Foram realizadas séries de 10 medições num intervalo de 30 segundos, as medições foram realizadas após 1 hora e 30 minutos da câmara térmica ser ligada. O procedimento adotado foi conforme o descrito no capítulo 3. Os resultados serão apresentados nas tabelas abaixo.

Serão apresentados os dados coletados nas medições e posteriormente os resultados obtidos pela planilha Excel, com as devidas correções e incertezas. Preliminar a cada teste, determinou-se a temperatura do detector.

**TESTE 1:** termômetro de IV posicionado a 1,5 mm da abertura da câmara.

Tabela 4.6 - Distância do termômetro até o alvo: 221 mm, teste 1.

Temperatura do detector				Resultado °C
<i>Emissividade instrumental (1)</i>	<i>Temperatura medida (1) (°C)</i>	<i>Emissividade instrumental (2)</i>	<i>Temperatura medida (2) (°C)</i>	
0,5	140	1	93	<b>28,1</b>

Fonte: Autor

Tabela 4.7 – Dados coletados no teste 1.

Teste 1 - Dados Coletados						
<i>Emissividade instrumental</i>	<i>Teste</i>	<i>Medida</i>	<i>Temperatura ambiente (°C)</i>	<i>Temperatura de referência (PT100 °C)</i>	<i>Temperatura do Objeto (°C)</i>	<i>Desvio Padrão</i>
0,99	1	1	23,3	96,64	93	0,02
	1	2		96,65	93	
	1	3		96,66	93	
	1	4		96,67	93	
	1	5		96,68	92	
	1	6		96,68	92	
	1	7		96,69	92	
	1	8		96,70	92	
	1	9		96,70	92	
	1	10		96,70	92	

Fonte: Autor

Tabela 4.8 – Resultado do teste de medição 1

Resultado				
<i>Temperatura de Referência</i> °C	<i>Temperatura Indicada</i> °C	<i>Correção</i> °C	<i>Incerteza Expandida da Calibração</i> °C	<i>Fator de Abrangência</i> <i>k</i>
97	92	5	6	2,00

Fonte: Autor

**TESTE 2:** termômetro de IV posicionado a 100 mm da abertura da câmara.

Tabela 4.9 - Distância do termômetro até o alvo: 319,5 mm, teste 2.

<b>Temperatura do detector</b>				<b>Resultado °C</b>
<i>Emissividade instrumental (1)</i>	<i>Temperatura medida (1) (°C)</i>	<i>Emissividade instrumental (2)</i>	<i>Temperatura medida (2) (°C)</i>	
0,5	142	1	92	<b>20,7</b>

Fonte: Autor

Tabela 4.10 – Dados coletados no teste 2.

<b>Teste 2 - Dados Coletados</b>						
<i>Emissividade instrumental</i>	<i>Teste</i>	<i>Medida</i>	<i>Temperatura ambiente (°C)</i>	<i>Temperatura de referência (PT100 °C)</i>	<i>Temperatura do Objeto (°C)</i>	<i>Desvio Padrão</i>
0,99	2	1	22,8	96,500	93	0,02
	2	2		96,550	93	
	2	3		96,550	93	
	2	4		96,540	93	
	2	5		96,550	93	
	2	6		96,550	93	
	2	7		96,550	93	
	2	8		96,550	93	
	2	9		96,550	93	
	2	10		96,540	93	

Fonte: Autor

Tabela 4.11 – Resultados do teste de medição 2.

<b>Resultado</b>				
<i>Temperatura de Referência °C</i>	<i>Temperatura Indicada °C</i>	<i>Correção °C</i>	<i>Incerteza Expandida da Calibração °C</i>	<i>Fator de Abrangência k</i>
97	93	4	3	2,00

Fonte: Autor



**TESTE 3:** termômetro de IV posicionado a 200 mm da abertura da câmara.

Tabela 4.12 - Distância do termômetro até o alvo: 419,5 mm, teste 3.

<b>Temperatura do detector</b>				<b>Resultado °C</b>
<i>Emissividade instrumental (1)</i>	<i>Temperatura medida (1) (°C)</i>	<i>Emissividade instrumental (2)</i>	<i>Temperatura medida (2) (°C)</i>	
0,5	141	1	92	<b>22,8</b>

Fonte: Autor

Tabela 4.13 – Dados coletados no teste 3.

<b>Teste 3 - Dados Coletados</b>						
<i>Emissividade instrumental</i>	<i>Teste</i>	<i>Medida</i>	<i>Temperatura ambiente (°C)</i>	<i>Temperatura de referência (PT100 °C)</i>	<i>Temperatura do Objeto (°C)</i>	<i>Desvio Padrão</i>
0,99	2	1	23	96,57	92	0,01
	2	2		96,55	92	
	2	3		96,55	92	
	2	4		96,54	92	
	2	5		96,55	92	
	2	6		96,55	92	
	2	7		96,54	92	
	2	8		96,55	92	
	2	9		96,54	92	
	2	10		96,54	92	

Fonte: Autor

Tabela 4.14 – Resultado do teste de medição 3

<b>Resultado</b>				
<i>Temperatura de Referência °C</i>	<i>Temperatura Indicada °C</i>	<i>Correção °C</i>	<i>Incerteza Expandida da Calibração °C</i>	<i>Fator de Abrangência k</i>
97	92	5	1	2,00

Fonte: Autor

As incertezas de medição foram determinadas conforme a norma ASTM E2847-14, utilizando também os dados obtidos nos testes de uniformidade e estabilidade térmica.

Concluiu-se que a distância do termômetro ao alvo interfere na temperatura do

detector, quanto mais próximo o termômetro IV estiver do alvo, maior será a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura do detector, logo a incerteza provinda da temperatura ambiente será maior. Isto comprova a necessidade de verificar o campo de visão do termômetro sob calibração e determinar corretamente a distância entre o termômetro e o alvo, tais cuidados devem ser tomados principalmente em casos de termômetros de IV com emissividade fixa, em que se assume que a temperatura do detector é igual a temperatura ambiente.

### **4.3 Discussões**

Com os testes realizados constatou-se que o melhor método é com a cavidade de corpo negro inserida totalmente na câmara e foi comprovado experimentalmente a importância de determinar corretamente a distância entre o termômetro de IV e o alvo. Conclui-se também que a verificação da uniformidade e estabilidade térmica deve ser realizada com os sensores posicionados na parte interna da cavidade.

Para obter uma incerteza de calibração menor, sugere-se que seja utilizado sensores termorresistivos na avaliação da uniformidade e estabilidade térmica, haja visto que estes são mais estáveis e possuem incerteza de medição inferior aos sensores termopar. Com as devidas alterações na montagem da cavidade de corpo negro na câmara térmica, o método estará apto para atender o objetivo proposto.

## 5 CONCLUSÃO

Finalizadas as etapas de metodologia, desenvolvimento, construção, montagem e avaliação experimental, este projeto apresentou as vantagens previstas ao possibilitar a implantação do método para calibrar termômetros de radiação infravermelha no ponto de 0 °C e de 50 °C a 250 °C. Apesar de alguns resultados não terem apresentado o grau de concordância esperado, esta evidenciado que, alterando o posicionamento da cavidade de corpo negro na câmara térmica, o método é capaz de realizar calibrações atendendo a norma ASTM E2847-14.

Os resultados atingidos nos testes realizados comprovam que a cavidade de corpo negro possui a emissividade necessária para realização da calibração, possui dimensões que possibilitam a calibração de termômetros de IV a baixa temperatura e é uniforme e estável, levando um tempo aceitável para atingir a estabilização térmica. O tempo para estabilização da temperatura é de grande relevância para o projeto, visto que o custo é determinado baseado no tempo necessário para realização da calibração.

Comprovou-se, portanto, que com o devido aperfeiçoamento o método está apto e eficiente para realizar calibrações de termômetros de radiação infravermelha. As sugestões para trabalhos futuros resultam da alteração do posicionamento da cavidade de corpo negro na câmara térmica e da realização de uma análise da uniformidade e estabilidade térmica utilizando sensores termorresistivos, a fim de obter uma incerteza ainda menor.

## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André Roberto. **Fundamentos de Metrologia científica e industrial**. Barueri-SP: Manole Ltda, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E2847 - 14**: Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers. United States, 2014. 17 p.

AMORIM, Edgard P. M.. **Radiação Térmica**. Joinville: Universidade do Estado de Santa Catarina - Udesc, 2011. 20 slides, color.

ARAÚJO, Celso. **Transmissão de Calor**. Livros técnicos e científicos editora S.A., 1978.

EISBERG, Robert M.; LERNER, Lawrence S. **Física: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Mcgraw-hill do Brasil, 1982. 580 p.

ELENO, Luiz T. F. **Radiação de corpo negro**. Lorena-SP: Universidade de São Paulo - USP, 2016. 20 p. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3797586/mod\\_resource/content/0/corponegro.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3797586/mod_resource/content/0/corponegro.pdf)>. Acesso em: 28 mar. 2018.

GASIOROWICZ, Stephen. Quantum physics . ilustrada. ed. [S.l.]: Wiley, 1974, [2 set. 2010]. 514 p.

KNIGHT, R. D. **Física: uma abordagem estratégica**. Vol.2. Porto Alegre, Bookman. 2009.

KREITH, Frank. **Princípios da Transmissão de Calor**. Tradução da 3a. ed. Americana. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.

LIEBMANN, Frank. **Radiation Thermometry Basics**: São Paulo: Fluke Calibration, 2011. 34 slides, color.

MEDEIROS, Wanderley Honorio de. **Primórdios da Física Quântica: Radiação de**

**Corpo Negro e Efeito Fotoelétrico.** 2010. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura Plena em Física, Departamento de Física-DEFIJI, Universidade Federal de Rondônia, Ji-paraná, 2010.

MOITA, Ana; SILVA, Luis; CANHOTO, Paulo. **Métodos Experimentais em Energia e Ambiente:** São Paulo: Instituto Superior Técnico, 2000. 32 slides, color.

MOREIRA, Lúcia Salgado. **Avaliação de Câmaras Térmicas.** Rio de Janeiro-rj: Inmetro, 2016. 28 slides, color. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/docs/P7\\_AvaliacaoCamarasTermicas\\_LuciaMoreira.pdf](http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/docs/P7_AvaliacaoCamarasTermicas_LuciaMoreira.pdf)>. Acesso em: 01 maio 2018.

NETO, Argemiro Pertence. **Curso: Inspeção de Equipamentos e Instalações Petrobras / UN-Rio:** Noções sobre termografia. Rio de Janeiro: Íntegra Integridade de Equipamentos, 2004. 14 p.

ROSALEM, Kauê. **Física: Termodinâmica.** São José dos Campos: Etep - Faculdades, 2015. 27 slides, color.

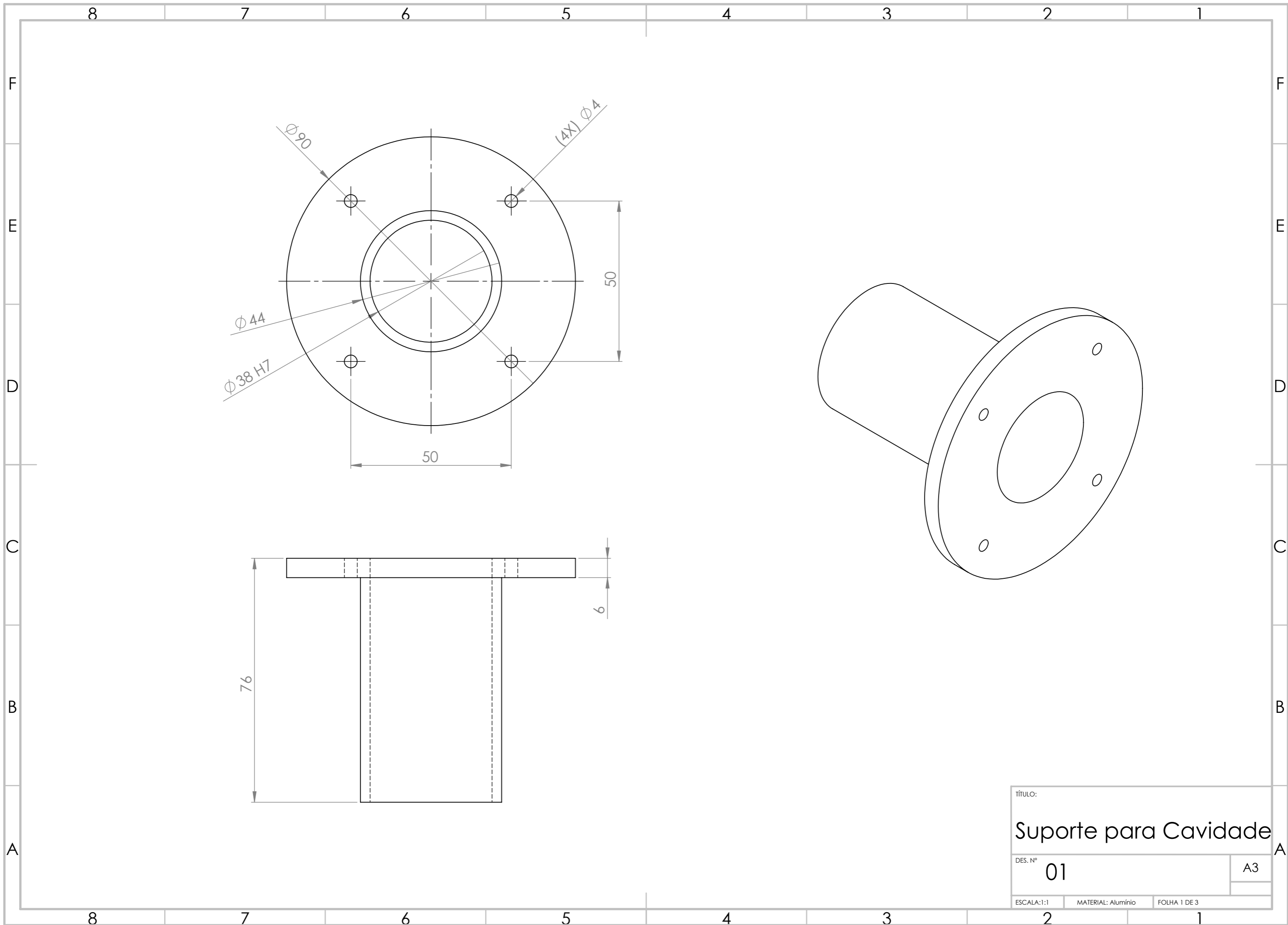
RUSBY, Richard. **Good Practice Guide N° 125:** Introduction to Temperature Measurement. The United Kingdom: Department For Business Innovation & Skills, 2016. 52 p.

SAUNDERS, Peter. **Orientações para a calibração de termômetros de infravermelho (Pirômetros):** Documento de caráter orientativo DOQ-CGCRE-054. Rio de Janeiro: INMETRO, 2014. 16 p.

SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark W.. **Ótica Física Atômica.** Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962. Tradução de: Carlos Campos de Oliveira.

TAKAHASHI, Eduardo Kojy. **Física Moderna.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 97 slides, color. Núcleo de Pesquisa em Tecnologias Cognitivas - NUTEC.

YOUNG & FREEDMAN. **Física II: Termodinâmica e Ondas.** 12ª ed. São Paulo. 2008.



8

7

6

5

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

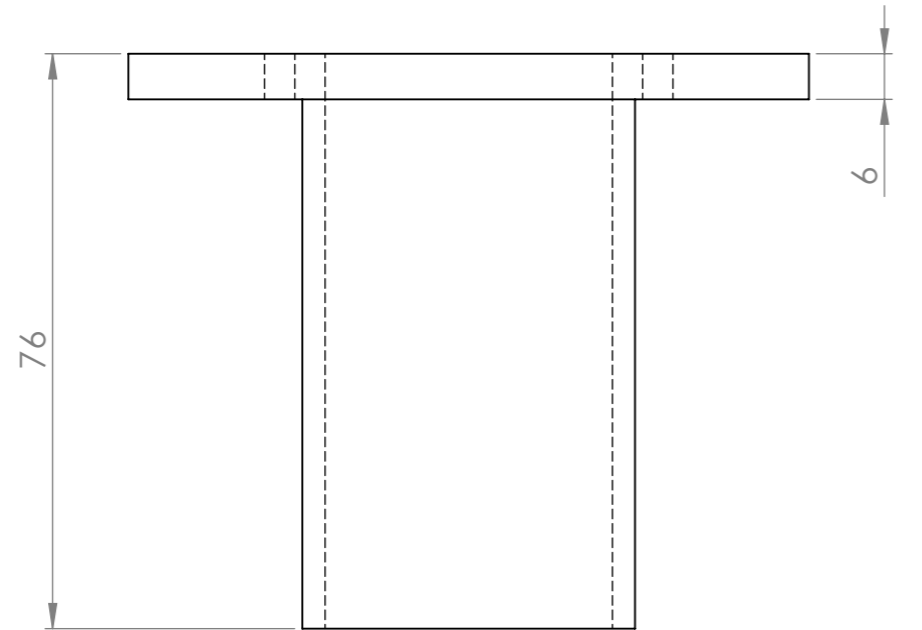
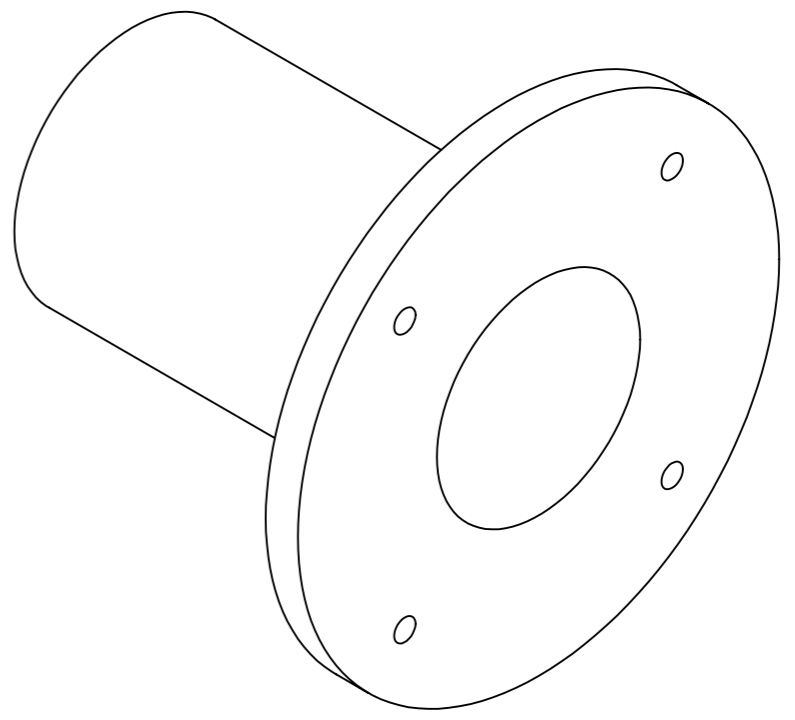
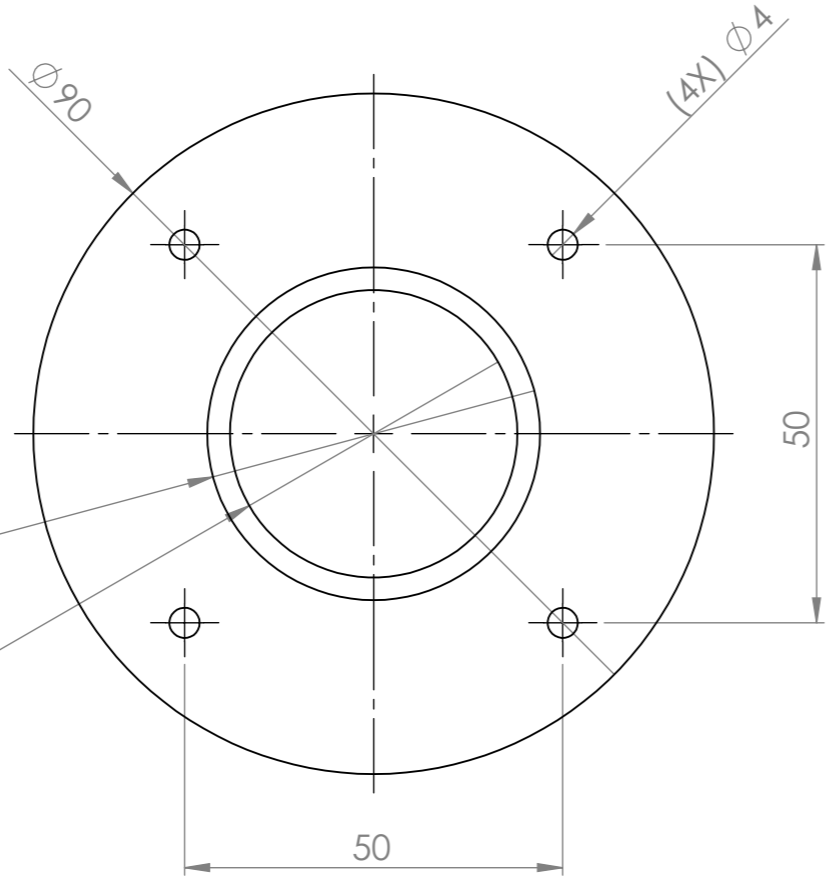
C

B

B

A

A



TÍTULO:		
Suporte para Cavidade		
DES. Nº	01	A3
ESCALA: 1:1	MATERIAL: Alumínio	FOLHA 1 DE 3

8

7

6

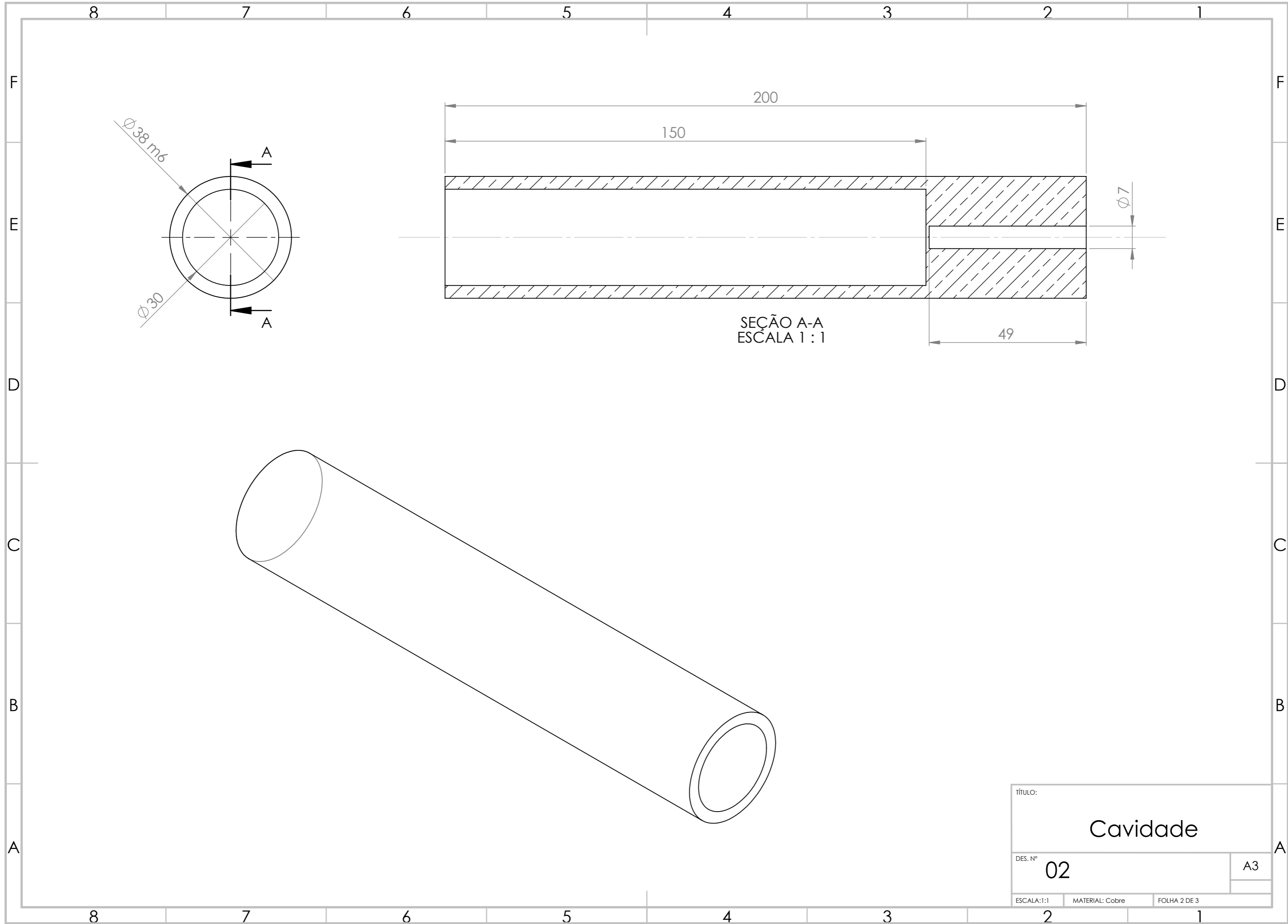
5

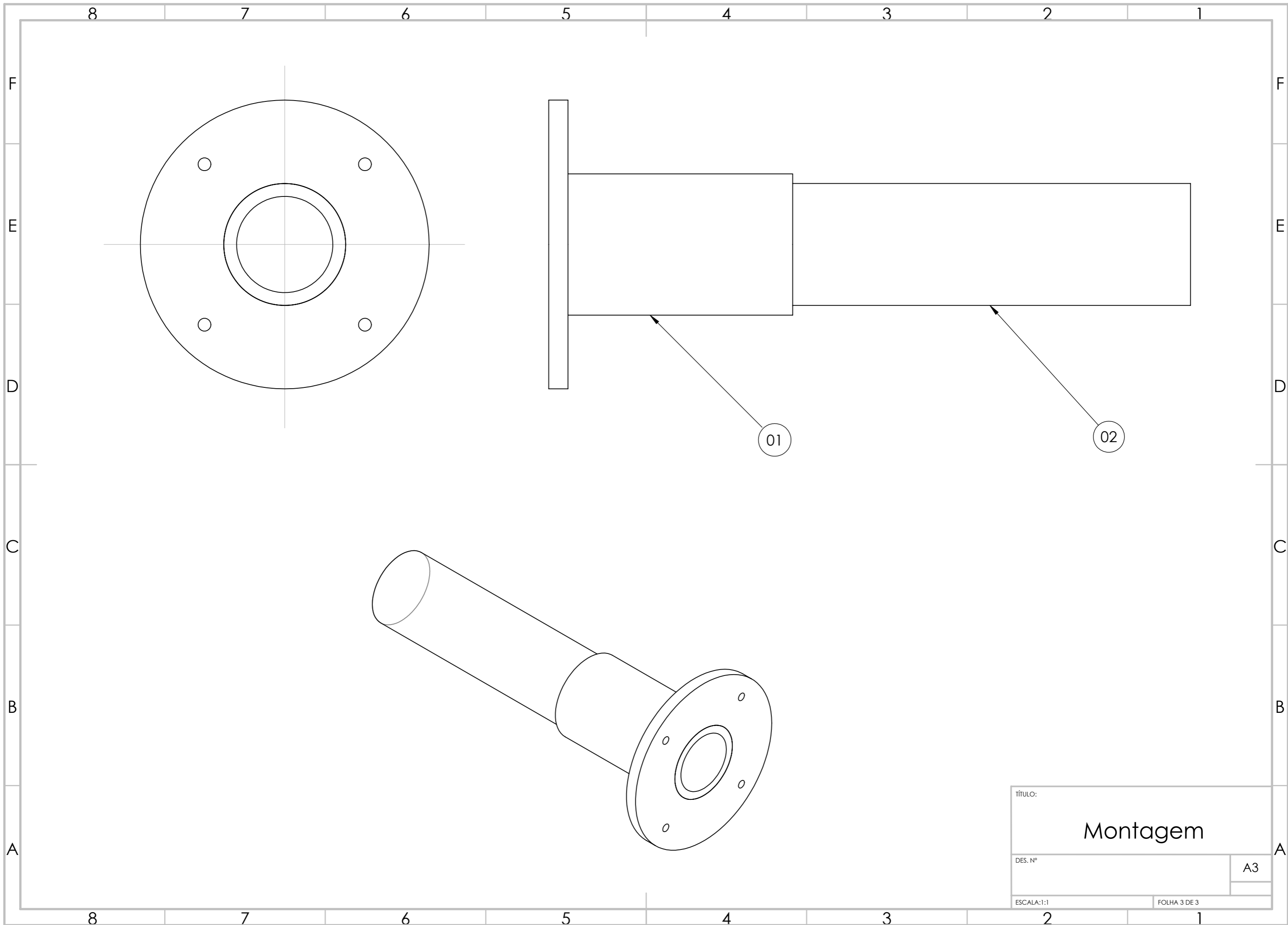
4

3

2

1





TÍTULO:	Montagem	
DES. Nº		
ESCALA:1:1	FOLHA 3 DE 3	A3