

DAMIAN LARSEN BOGO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO COMPACTO  
PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA BASEADO  
NO MÉTODO FLUXIMÉTRICO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Saulo Güths

Florianópolis  
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Larsen Bogo, Damian

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO COMPACTO PARA MEDIÇÃO  
DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA BASEADO NO MÉTODO FLUXIMÉTRICO /  
Damian Larsen Bogo ; orientador, Saulo Güths -  
Florianópolis, SC, 2014.

89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Condutividade Térmica. 3.  
Método Fluximétrico. 4. Incerteza de Medição. I. Güths,  
Saulo. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

DAMIAN LARSEN BOGO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO COMPACTO  
PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA BASEADO  
NO MÉTODO FLUXIMÉTRICO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 06 de outubro de 2014.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Saulo Güths, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Carlos Alberto Flesch, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, PhD.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Magalí e Alcides, e ao restante da família, pelo apoio durante mais esta etapa.

Ao meu orientador, Saulo Güths, pela ajuda, paciência e orientação incondicional no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos do LMPT, que de uma forma direta ou indireta me auxiliaram, em especial ao Leandro Manes pelo grande auxílio nas simulações.



“The greater our knowledge increases, the greater  
our ignorance unfolds”  
John F. Kennedy, 1962



## RESUMO

O objetivo dessa dissertação foi o desenvolvimento de um equipamento compacto para medição de condutividade térmica baseado no método fluximétrico, descrito pelas Normas ASTM C518 e ISO 8301. Para tornar o equipamento compacto, foram utilizados dispositivos de resfriamento termoelétrico e aquecedores planares para controle das temperaturas das placas, apresentando grande estabilidade e rapidez. Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica sobre os diversos métodos para medição de condutividade térmica, explicitando vantagens e desvantagens na utilização de cada um. Utilizando um software CFD, foram simulados parâmetros dimensionais, como a disposição dos módulos termoelétricos, a espessura da placa fria, o tamanho dos fluxímetros e a espessura dos isolamentos laterais. Depois de realizada as simulações foram descritos os passos da montagem do equipamento. Para finalizar, foi efetuada a calibração do equipamento a fim de definir as incertezas de medição. Os resultados obtidos atingiram o proposto que era uma incerteza de medição inferior a 5%.

Palavras-chaves: Condutividade térmica, método fluximétrico, incerteza de medição.



## **ABSTRACT**

This objective of this thesis was the development of a compact device for measurement of thermal conductivity based on heat flow meter method, this method is standardized by ASTM C518 and ISO 8301. To make an compact device, thermoelectric cooling and skin heaters were used to control the temperature of the plates, this control have been shown a great stability and speed. Initially, a literature review on the various methods for measuring thermal conductivity was made, explaining advantages and disadvantages to using each one. Using CFD software, dimensional parameters were simulated as the arrangement of thermoelectric modules, the thickness of the cold plate, the size of the flow meter and the thickness of the lateral insulations. After the simulations were described the steps of mounting equipment. Finally, were made the calibration of the equipment assembled and metrological analysis of the results in order to determine measurement uncertainties.

**Keywords:** Thermal conductivity, heat flow meter apparatus, measurement uncertainty.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplos de etiquetas de projeto e de edificação construída PBE Edifica para edificações residências. ....	2
Figura 2.1 – Exemplo do método Laser Flash. ....	5
Figura 2.2 - Transiente de temperatura adimensional. ....	7
Figura 2.3 – Sonda Disco Quente entre duas amostras. ....	9
Figura 2.4 - Sonda Disco Quente. ....	10
Figura 2.5 – Análise tridimensional sobre as amostras. ....	11
Figura 2.6 – Placa Quente Protegida, ABNT NBR 15220:4[21]. ....	14
Figura 2.7 – Arranjo geral Caixa Quente Protegida, Güths [26]. ....	15
Figura 2.8 – Método Fluximétrico ASTM – C518 [27] com um fluxímetro e uma amostra. ....	16
Figura 2.9 – Método Fluximétrico ASTM – C518 [27] com um fluxímetro e duas amostras. ....	17
Figura 2.10 – Método Fluximétrico ASTM – C518 [27] com dois fluxímetros e uma amostra. ....	17
Figura 2.11 – Distribuição das linhas de fluxo de calor. ....	18
Figura 2.12 – Layouts sugeridos pela norma ASTM – C518 [27] para circulação de fluido nas placas isotérmicas. ....	20
Figura 2.13 – Corte de um transdutor de fluxo de calor a gradiente transversal. ....	21
Figura 2.14 – Corte de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial. ....	21
Figura 2.15 – Vista aberta de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial. ....	22
Figura 2.16 – Foto de um fluxímetro a gradiente tangencial. ....	22
Figura 3.1 – Configuração placa fria com 4 módulos Peltier. ....	24
Figura 3.2 – Modelo utilizado na simulação. ....	24
Figura 3.3 – Malha utilizada na simulação. ....	25
Figura 3.4 – Variáveis da localização do módulo Peltier. ....	26
Figura 3.5 – Resultado das simulações para ponto ótimo do módulo Peltier. ....	27
Figura 3.6 – Diferença de temperatura na placa em função da espessura da placa fria. ....	29
Figura 3.7 - Erro na medição da condutividade em função da condutividade térmica da amostra e da dimensão do transdutor (dispositivo com 300 x 300mm). ....	30
Figura 3.8 – Detalhe ampliado do erro de medição da condutividade em função da condutividade térmica da amostra e da dimensão do transdutor (dispositivo com 300 x 300mm). ....	31
Figura 3.9 – Erro na medição do fluxo em função do tamanho do transdutor para diferentes coeficientes de troca (amostra com condutividade 0,01 WmK e espessura 30 mm). ....	33
Figura 3.10 – Erro na medição do fluxo em função do tamanho do transdutor para diferentes coeficientes de troca (amostra com condutividade 0,1 WmK e espessura 30 mm). ....	33

Figura 3.11 – Erro na medição do fluxo em função do tamanho do transdutor para diferentes coeficientes de troca (amostra com condutividade 1 WmK e espessura 30 mm). .....	34
Figura 3.12 – Influência da espessura da amostra no erro de medição para condutividades da amostra de 0,01 WmK (a), 0,1 WmK (b) 1 WmK (c) e diferentes coeficientes de troca. ....	35
Figura 3.13 Influência da espessura da amostra no erro de medição para condutividades da amostra para um coeficiente de troca igual a 5 Wm <sup>2</sup> K e diferentes condutividades da amostra. ....	35
Figura 4.1 – Disposição dos Módulos Peltier. ....	38
Figura 4.2 – Módulo Peltier. ....	38
Figura 4.3 – Trocador de calor utilizado. ....	38
Figura 4.4 – Vista inferior do projeto da placa fria. ....	39
Figura 4.5 – Vista inferior da placa fria montada. ....	40
Figura 4.6 – Resistência aquecedora utilizada na placa quente. ....	40
Figura 4.7 – Disposição do fluxímetro e dos termopares na face de contato com a amostra tanto para a placa quente quanto para a placa fria. ....	41
Figura 4.8 – Vista do corte vertical das placas quente e fria. ....	41
Figura 4.9 – Detalhes da confecção das placas próximo ao fluxímetro. ....	42
Figura 4.10 – Fluxograma para controle da descida da placa superior. ....	43
Figura 4.11 – Sistema montado para deslocamento da placa superior e medição da espessura da amostra. ....	44
Figura 4.12 – Motor de passo híbrido com atuador linear [43] utilizado. ....	44
Figura 4.15 - Fixação de um dos motores de passo na viga e seus extensômetros. ....	45
Figura 4.20 – Esquemático do ganho de corrente para os módulos Peltier. ....	48
Figura 4.21 - Tensão sobre as cargas com um pulso de 40 % .....	48
Figura 4.22 - Curva para levantamento dos parâmetros PID. ....	49
Figura 4.23 - Temperatura da placa fria controlada em 28°C. ....	50
Figura 4.24 – Foto do equipamento montado. ....	50
Figura 4.25 - Foto do FOX 314 da LaserComp. ....	51
Figura 4.26 – Controle dos motores de passo. ....	52
Figura 4.27 – Controle da temperatura das placas. ....	52
Figura 4.28 – Aquisição das tensões. ....	53
Figura 4.29 – Gravação. ....	53
Figura 5.1 – Espessura média para cada ensaio. ....	57
Figura 5.2 – Diferença de temperatura das placas para a amostra QM/43B. ....	59
Figura 5.3 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/43B. ....	59
Figura 5.4 – Constante de calibração $S$ e temperatura ambiente para cada ensaio utilizando a amostra QM/43B. ....	60
Figura 5.5 – Relação entre a constante de calibração $S$ e a temperatura ambiente para a amostra QM/43B. ....	61
Figura 5.6 - Valor da constante de calibração $S$ em função da condutividade térmica da amostra. ....	62





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferença de temperatura em função da espessura do alumínio.....	28
Tabela 2 – Tensões sobre as vigas. ....	55
Tabela 3 – Amostras padrão utilizadas. ....	58
Tabela 4 – Resultados de constante de calibração S para cada amostra.....	61
Tabela 5 – Incertezas da $L$ , $Eflux$ , $\Delta T$ e $Sflux$ para um intervalo de confiança de 95%.....	63
Tabela 6 – Valores das incertezas de medição para cada amostra utilizada.....	64
Tabela A 1 – Ensaios para calibração do sistema para medir a espessura da amostra.....	75
Tabela A 2 – Medições das temperaturas nos ensaios para a amostra QM/123a .....	76
Tabela A 3 – Medições das temperaturas nos ensaios para a amostra QM/43b .....	76
Tabela A 4 – Medições das temperaturas nos ensaios para a amostra QM/73b .....	77
Tabela A 5 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/123a.....	77
Tabela A 6 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/43b.....	78
Tabela A 7 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/73b.....	78
Tabela A 8 – Valores da condutância para a amostra QM/123a. ....	79
Tabela A 9 – Valores da condutância para a amostra QM/43b.....	79
Tabela A 10 – Valores da condutância para a amostra QM/73b.....	80



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – *American Society for Testing and Materials*.

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações.

GUM - *Guides to the expression of Uncertainty in Measurement*.

Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

ISO – *International Organization for Standardization*.

JCGM – *Joint Committee for Guides in Metrology*.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.

LMPT – Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas.

NIST – *National Institute of Standards and Technology*.

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

RAC – Requisitos de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência de Edificações.

RTQ-C – Requisitos Técnicos da Qualidade do nível de eficiência energética de edifícios Comerciais, de Serviços e Públicas.

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade do nível de eficiência energética de edificações Residenciais.



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Condutividade térmica	$[W/mK]$
$Q$	Potência	$[W]$
$L$	Espessura	$[m]$
$T$	Temperatura	$[K]$
$A$	Área	$[m^2]$
$A$	Difusividade térmica	$[m^2/s]$
$\delta$	Pulso de energia	$[J/m^2]$
$g$	Profundidade	$[m]$
$D$	Densidade	$[kg/m^3]$
$c$	Calor específico	$[J/kgK]$
$R$	Resistência elétrica	$[\Omega]$
$\Gamma$	Coefficiente de temperatura	$[K^{-1}]$
$\vartheta$	Constante de Euler	
$\Delta T$	Diferença de temperatura	$[K]$
$C$	Condutância térmica	$[W/m^2K]$



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Contextualização .....	1
1.2.	Objetivo do Trabalho .....	3
1.3.	Estrutura da Dissertação .....	4
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1.	Introdução.....	5
2.2.	Métodos de medição em regime transiente.....	5
2.2.1.	<i>Método Laser Flash</i> .....	5
2.2.2.	<i>Método Disco Quente</i> .....	9
2.2.3.	<i>Método Fio Quente</i> .....	12
2.3.	Métodos de medição em regime permanente .....	13
2.3.1.	<i>Método Placa Quente Protegida</i> .....	13
2.3.2.	<i>Método Caixa Quente Protegida</i> .....	14
2.3.3.	<i>Método Fluximétrico</i> .....	16
2.4.	Transdutor de fluxo de calor .....	20
<b>3.</b>	<b>SIMULAÇÕES .....</b>	<b>23</b>
3.1.	Introdução.....	23
3.2.	Análise do posicionamento dos módulos de resfriamento termoelétricos .....	23
3.3.	Espessura da placa inferior.....	27
3.4.	Tamanho do transdutor de fluxo de calor .....	29
3.5.	Análise da influência da espessura da amostra e do isolamento lateral .....	32
<b>4.</b>	<b>APARATO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>37</b>
4.1.	Introdução.....	37
4.2.	Montagem das placas fria e quente.....	37

4.3.	Sistema para ajuste da distância entre as placas e medição da espessura da amostra .....	43
4.4.	Aquisição da temperatura e fluxo de calor .....	46
4.5.	Controle da temperatura das placas .....	47
4.6.	Programa gerenciador .....	51
5.	<b>CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO .....</b>	<b>55</b>
5.1.	Introdução .....	55
5.2.	Ensaios .....	55
5.2.1.	<i>Medição da Espessura.....</i>	<i>55</i>
5.2.2.	<i>Aquisição das temperaturas e dos fluxos de calor .....</i>	<i>57</i>
5.3.	Cálculos para calibração .....	60
5.4.	Incerteza de medição .....	62
6.	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>65</b>
6.1.	Conclusões.....	65
6.2.	Trabalhos Futuros .....	66
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO A – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO EMITIDOS PELO NPL DAS AMOSTRAS DE FIBRA DE VIDRO, PERSPEX E POLIETILENO.....</b>	<b>81</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

Nos dias atuais uma das maiores preocupações da humanidade tem sido a exploração excessiva dos recursos naturais, causa de desequilíbrio no meio ambiente. Neste cenário, o uso racional de energia é de fundamental importância.

Do total da energia elétrica produzida no Brasil no ano de 2011, as edificações consumiram 46,7% (Lamberts [1]). Do total gasto com as edificações o consumo com a iluminação é responsável por 14%, condicionadores de ar 20%, aquecimento de água 24%, refrigeração 27% e o restante (15%) para usos finais. Lamberts [1] ainda afirma que projetos arquitetônicos adequados ao clima e utilizando fontes naturais para iluminação, aquecimento e resfriamento dos ambientes podem reduzir a demanda de energia esperada para os próximos anos. Segundo a Eletrobrás [2] projetos arquitetônicos adequados e corretamente executados podem gerar uma economia de até 50% no consumo de energia.

Com o objetivo de contribuir para a racionalização do uso de energia no Brasil, o Inmetro criou o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) em 1984 (Souza [3]). Atualmente o PBE é composto por 38 programas de avaliação da conformidade que contemplam desde a etiquetagem da linha branca até edificações (Inmetro [4]).

O PBE Edifica [5] é um programa desenvolvido com a parceria do Inmetro e da Eletrobrás/PROCEL Edifica, que tem como objetivo etiquetar edificações comerciais, de serviços e públicas além de edificações residenciais, tendo como critério o consumo de energia. Esse programa foi organizado pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), que é uma associação entre o LABEEE (ECV/UFSC) e o LMPT (EMC/UFSC).

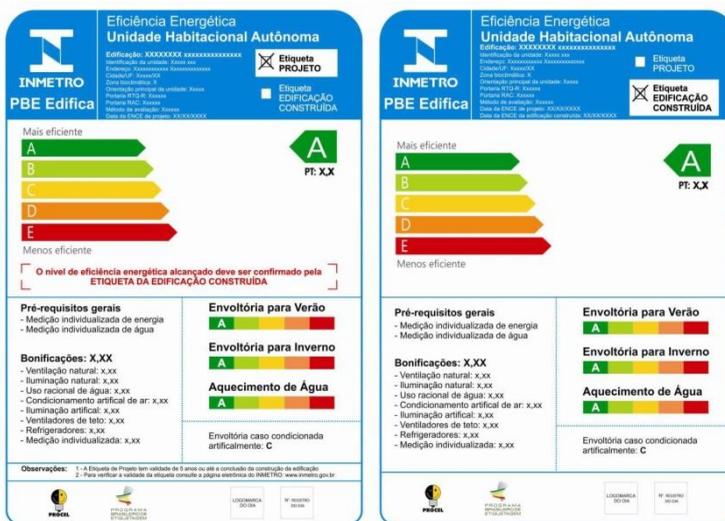
Nesse programa, o projeto da edificação é submetido a um Organismo de Inspeção (credenciado pelo Inmetro), que atribui uma etiqueta (de projeto) a partir dos Requisitos Técnicos da Qualidade do nível de eficiência energética de edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), ou a partir do Regulamento Técnico da Qualidade do nível de eficiência energética de edificações Residenciais (RTQ-R) e de requisitos complementares, como os Requisitos de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência de Edificações (RAC). Essa etiqueta avalia a eficiência energética da envoltória, do sistema de condicionamento de ar (se existente) e da iluminação. Outros sistemas,

como aquecimento solar de água, geração fotovoltaica, entre outros, são representados por bonificações.

Finalizada a construção, um Organismo de Inspeção realiza uma segunda análise com o objetivo de avaliar se a edificação seguiu as diretrizes do projeto e emite a etiqueta de edificação construída.

Na Figura 1.1 são mostrados dois exemplos de etiquetas PBE Edifica - a de projeto e a de edificação construída - ambas para edificações residenciais.

Figura 1.1 – Exemplos de etiquetas de projeto e de edificação construída PBE Edifica para edificações residenciais.



O processo de etiquetagem de edificações está apenas iniciando no Brasil. Está sendo sancionada a lei que obriga novos edifícios públicos a obter nível de eficiência A. Nas demais edificações ainda é facultativo, mas o plano governamental é torná-lo compulsório nos próximos anos, começando com edifícios comerciais e posteriormente residenciais.

Sendo assim, a necessidade de realizar medições das propriedades construtivas das edificações é de fundamental importância. Dentre estas propriedades a condutividade térmica é uma das mais relevantes, pois

ela sinaliza a barreira na transferência de calor entre o ambiente interno e externo.

Os elementos que constituem uma edificação são normalmente materiais não homogêneos, não isotrópicos e com propriedades térmicas dependentes da temperatura, o que dificulta a obtenção da condutividade térmica analisando somente as suas composições. Dada a não homogeneidade da maioria dos materiais construtivos, muitos métodos são descartados pelo fato de realizar medidas pontuais, como o método laser flash, disco quente, etc. Dos métodos disponíveis um dos mais utilizados é o método fluximétrico, por ser relativamente rápido (comparando-o com o método placa quente protegida) e confiável.

Os equipamentos de medição de condutividade baseados no método fluximétrico térmica disponíveis no mercado necessitam de um banho térmico para circulação de fluido a temperatura controlada, representando volume e custo adicional.

Verificasse uma demanda no mercado nacional por equipamentos de medição de condutividade térmica de baixo custo e incerteza inferior a 5% para atender a área de eficiência energética de edificações.

## **1.2. Objetivo do Trabalho**

O principal objetivo do trabalho é desenvolvimento de um equipamento compacto para efetuar medição da condutividade térmica de materiais construtivos de edificações utilizando o método fluximétrico, com uma incerteza inferior a 5%.

Tem-se como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica dos diversos métodos utilizados para medição de condutividade térmica;
- Quantificar, a partir de simulação computacional, a influência dos parâmetros dimensionais e de propriedades dos materiais na incerteza de medição;
- Desenvolver uma placa de aquisição de sinais de baixo custo, capaz de efetuar uma leitura confiável dos termopares e dos fluxímetros;
- Desenvolver um dispositivo compacto para controle das temperaturas das placas;
- Determinar a incerteza de medição do equipamento.

### 1.3. Estrutura da Dissertação

Este trabalho é dividido em 6 capítulos.

No capítulo 2 é efetuada uma revisão bibliográfica dos métodos utilizados para medição da condutividade térmica, descrevendo os dois tipos de medição: regime transiente e regime permanente. No final do capítulo é ainda apresentado o fluxímetro utilizado na montagem do equipamento.

No capítulo 3 são mostradas as simulações realizadas utilizando o programa ANSYS R14.5. Estas simulações têm como objetivo otimizar a montagem do equipamento e identificar o posicionamento ótimo dos módulos de resfriamento termoelétricos, a espessura mínima da placa fria, entre outros parâmetros.

O capítulo 4 aborda a montagem do equipamento baseando-se nos resultados das simulações do capítulo anterior. Além de implementar esses resultados, apresentará também as placas desenvolvidas para o controle de temperatura, controle dos motores de passo e aquisição de sinais dos termopares e fluxímetros.

No capítulo 5 são mostrados os procedimentos realizados para calibração do equipamento, como os ensaios realizados com as amostras padrões, a aquisição dos dados, os cálculos para calibração do equipamento e por fim a incerteza de medição.

Finalmente, no capítulo 6 são discutidas as conclusões do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

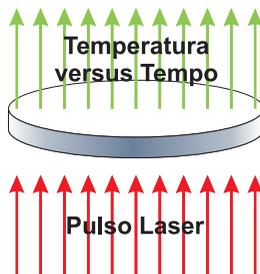
Os métodos para medição de condutividade térmica são basicamente divididos em dois grupos: regime transiente e regime permanente [6]. Nesta secção serão mostrados os métodos dos dois grupos, porém com um maior enfoque ao método fluximétrico, que é o método utilizado para o desenvolvimento da bancada de medição. No final do capítulo é mostrado ainda o fluxímetro utilizado.

### 2.2. Métodos de medição em regime transiente

#### 2.2.1. Método Laser Flash

Esse método é descrito pelas Normas Técnicas ASTM E1461 [7] e ISO 18755 [8], sendo possível determinar a condutividade térmica, difusividade térmica e o calor específico do material analisado. Neste método uma das faces da amostra, normalmente em forma de disco, é submetida a um pulso de energia de curta duração e de alta intensidade e na face oposta é medida a evolução da temperatura (normalmente com termômetro infravermelho), conforme Figura 2.1

Figura 2.1 – Exemplo do método Laser Flash.



Segundo Parker [9], se a distribuição inicial de temperatura de um material termicamente isolado com espessura uniforme  $L$  é  $T_{(x,0)}$ , a distribuição de temperatura em qualquer tempo posterior  $t$  é dada por

$$T_{(x,t)} = \frac{1}{L} \int_0^L T_{(x,0)} dx + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \int_0^L T_{(x,0)} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx \quad 2.1$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica. Se um pulso de energia  $\delta$  é instantaneamente e uniformemente absorvido por uma pequena profundidade  $g$  da face frontal  $x = 0$  em um sólido de espessura uniforme  $L$  termicamente protegido, a distribuição de temperatura neste instante é dada por

$$T_{(x,0)} = \delta / DCg \text{ para } 0 < x < g$$

e

$$T_{(x,0)} = 0 \text{ para } g < x < L$$

Com estas condições iniciais, a equação 2.1 pode ser reescrita como

$$T_{(x,t)} = \frac{\delta}{DcL} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \frac{\sin\left(\frac{n\pi g}{L}\right)}{\left(\frac{n\pi g}{L}\right)} \cdot \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{L^2}\right) \right]$$

2.2

onde  $D$  é a densidade e  $c$  é o calor específico. Nesta aplicação poucos termos serão necessários, já que a série converge rapidamente, e dado que  $g$  é um número pequeno para materiais opacos, temos que esta aproximação é válida  $\sin\left(\frac{n\pi g}{L}\right) \approx \frac{n\pi g}{L}$ . Sendo assim, na face oposta onde  $x = L$ , o comportamento da temperatura pode ser expresso por

$$T_{(L,t)} = \frac{\delta}{DcL} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp\left(\frac{-n^2\pi^2\alpha t}{L^2}\right) \right] \quad 2.3$$

Definindo os parâmetros adimensionais

$$V_{(L,t)} = T_{(L,t)} / T_M \quad 2.4$$

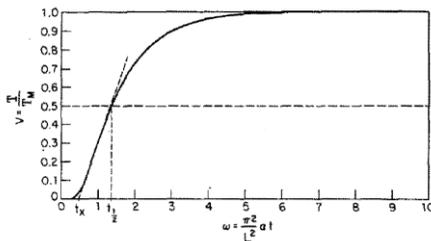
$$\omega = \pi^2\alpha t / L^2. \quad 2.5$$

Onde  $T_M$  representa a temperatura máxima na face oposta. Combinando as equações 2.3, 2.4, 2.5 se obtêm

$$V = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp(-n^2\omega) \quad 2.6$$

onde sua curva pode ser vista na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Transiente de temperatura adimensional.



A partir da equação e da Figura 2.2, Parker [9] deduziu duas relações importantes para determinar  $\alpha$ . Em uma delas, quando  $V$  é igual a 0.5,  $\omega$  é igual a 1.38, logo

$$\alpha = \left( 1.38L^2 / \pi^2 t_{\frac{1}{2}} \right)$$

2.7

onde  $t_{\frac{1}{2}}$  é o tempo necessário para que a face oposta alcance a temperatura máxima.

A outra relação pode ser obtida ao observar a extrapolação da porção linear da curva, onde esta intercepta o eixo tempo da Figura 2.2, neste ponto,  $\omega = 0.48$ , sendo assim, têm-se que

$$\alpha = \left( 0.48L^2 / \pi^2 t_x \right)$$

2.8

onde  $t_x$  é o ponto onde o eixo tempo é interceptado da curva temperatura versus tempo.

Para determinar a difusividade térmica do material não é necessário saber a quantidade de energia absorvida pela superfície frontal da amostra. Porém, para determinação do calor específico da amostra do material ou da condutividade térmica, é necessário saber esta quantidade de energia. O produto da densidade e a capacidade térmica do material são obtidos por

$$Dc = \delta / LT_M$$

2.9

e a condutividade térmica, assim sendo, é obtida através da seguinte relação

$$\lambda = \alpha Dc.$$

2.10

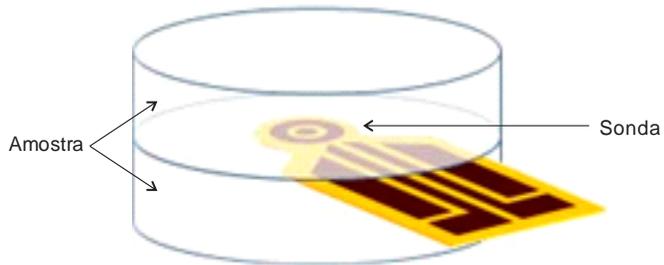
Dentre as possíveis dificuldades para determinação das características do material está a duração do pulso de energia (Heckman [10]), as perdas de calor através das bordas da amostra (Cape [11]), o paralelismo das faces, não homogeneidade do material, entre outras,

gerando muitas vezes uma grande incerteza na medição (Taylor [12]). Porém, como vantagem deste método, pode-se destacar o fato dos ensaios serem rápidos e utilizarem pequenas amostras.

### 2.2.2. Método Disco Quente

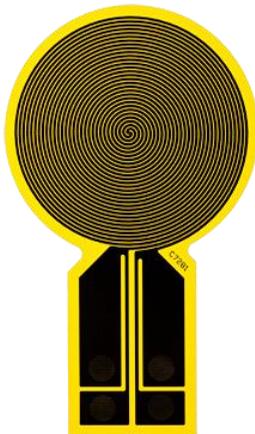
O método “disco quente”, assim como o método Laser Flash, é um método transiente. Neste método são medidos simultaneamente a difusividade térmica e a condutividade térmica e indiretamente o calor específico do material. Este método consiste em aplicar um pulso térmico no centro das amostras (de mesmo material) através de uma resistência elétrica e medir a evolução da temperatura no mesmo ponto. Na Figura 2.3 é mostrado um exemplo de uma sonda de medição entre duas amostras.

Figura 2.3 – Sonda Disco Quente entre duas amostras.



A sonda é usualmente construída em um formato de espiral a partir de um fino filme metálico (normalmente níquel) coberto nos dois lados por um material isolante (normalmente Kapton). Na Figura 2.4 é possível observar a sonda com maiores detalhes. Essa sonda é utilizada tanto como sensor de temperatura quanto como elemento aquecedor. A versão precursora deste método possuía uma sonda em formato retangular e foi utilizada para medição da condutividade térmica de líquidos transparentes, segundo He [13].

Figura 2.4 - Sonda Disco Quente.



O experimento é realizado através do registro da variação da resistência ôhmica e tensão sobre a sonda. Segundo Gustafsson [14] a dependência da resistência elétrica pelo tempo durante o transiente pode ser escrita conforme a equação 2.11

$$R_{(t)} = R_0 [1 + \gamma \Delta T_{(t)}] \quad 2.11$$

onde  $R_0$  é a resistência elétrica da sonda antes do transiente,  $\gamma$  é o coeficiente térmico da resistência elétrica e  $\Delta T_{(t)}$  é a variação da temperatura, sendo este o termo dependente do tempo. O método é baseado na análise do fluxo de calor nas amostras de forma tridimensional, como exemplifica a Figura 2.5, considerando que as amostras são grandes o suficiente para que as perdas laterais das amostras não influenciem no transiente.

A taxa de variação de temperatura  $\Delta T_{(t)}$  sobre a sonda depende de muitos fatores, como a potência dissipada, o formato da sonda e as condições térmicas ao redor da amostra. Para uma sonda com formato de disco, a variação de temperatura ( $\Delta T_{(t)}$ ) é dada pela equação 2.12

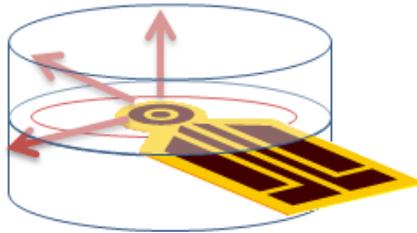
$$\Delta T_{(t)} = Q_o \left( \pi^{3/2} a \lambda \right)^{-1} D_{(\tau)} \quad 2.12$$

onde  $Q_o$  é a potência total dissipada,  $\lambda$  é a condutividade térmica,  $a$  é o raio do sensor e  $D_{(\tau)}$  é a expressão teórica da dependência da taxa de variação da temperatura padrão para a sonda tipo disco. Considerando  $m$  o número de anéis do disco,  $D_{(\tau)}$  é dado pela equação 2.13

$$D_{(\tau)} = [m(m+1)]^{-2} \int_0^{-\tau} d\sigma \sigma^{-2} \left[ \sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(\frac{-(l^2 + k^2)}{4m^2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2\sigma^2}\right) \right] \quad 2.13$$

Por conveniência, a taxa de variação de temperatura da sonda é definida em termos de uma variável adimensional  $\tau = \left(\alpha t / a^2\right)^{\frac{1}{2}}$ , sendo  $t$  o tempo de medição a partir do início do ensaio.

Figura 2.5 – Análise tridimensional sobre as amostras.



Com esta técnica é possível efetuar medições desde baixas temperaturas como,  $-220$  °C, até altas temperaturas, como  $1200$  °C. E, por se tratar de um método transiente, é bastante rápido: entre 2,5 s e 5 s, segundo He[13]. Dentre as dificuldades deste método pode-se listar o controle da potência a ser dissipada; a aquisição de temperatura (que além de ser rápida necessita ter grande exatidão); e a hipótese que o material recebe toda a potência dissipada pela resistência, o que não ocorre em materiais com baixa capacidade térmica (Gustafsson [14]).

### 2.2.3. Método Fio Quente

O método Fio Quente assemelha-se ao método Flash, com a diferença de que o elemento aquecedor é um fio, e o tipo de pulso é um degrau (Roder [15]).

Para determinação da condutividade térmica através deste método são feitas amostras cilíndricas onde no centro é inserida uma sonda na forma de fio que atuará tanto como elemento dissipador de potência quanto sensor de temperatura.

O modelo matemático, segundo Roder [15], aproxima a sonda como um elemento infinito inserido em uma amostra infinita, e pode se visto na equação 2.14,

$$T_{(t)} - T_{ref} = \Delta T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4Kt}{a^2c}\right) \quad 2.14$$

onde  $T_{(t)}$  é a temperatura do fio no tempo  $t$ ,  $T_{ref}$  é a temperatura inicial da amostra,  $Q$  é a potência dissipada,  $\lambda$  é a condutividade térmica,  $K$  é a difusividade térmica,  $a$  o raio do fio e  $\ln(c) = \vartheta$  sendo  $\vartheta$  a constante de Euler.

A relação dada pela equação 2.14 implica uma linha reta dada por  $\Delta T$  versus  $\ln(t)$ . Entretanto devido à resistência de contato entre amostra e sonda, capacidade térmica da sonda, e o fato da amostra não ser infinita, ocorrem desvios em relação ao modelo teórico. Esses desvios são visíveis no início e final do ensaio. Dessa forma a análise é realizada no intervalo em que a resposta é na forma de uma reta.

A grande vantagem deste método é a forma simples de montagem, logo, baixo custo. Outra vantagem é que a sonda utilizada para aquecer a amostra também é utilizada para medição da variação da temperatura, reduzindo as dimensões do sensor. Fernandes [17] destaca que esse método é apropriado para medir condutividade térmica de amostras porosas, onde o fenômeno de migração de umidade é presente. Como o ensaio é rápido, não ocorre migração de umidade devido a gradiente de temperatura.

Segundo Saito [16], uma das maiores dificuldades é manter a amostra com temperatura homogênea, condição facilmente obtida para pequenas amostras. Entretanto grandes amostras exigem um controle sofisticado resultando em custo elevado.

## 2.3. Métodos de medição em regime permanente

### 2.3.1. Método Placa Quente Protegida

Dentre os métodos utilizados para medição de condutividade térmica de materiais isolantes, este é um dos mais tradicionais e utilizados, juntamente com o fluximétrico. Este método foi desenvolvido com a finalidade de medir amostras homogêneas, planas e em regime permanente balizado pelas Normas Técnicas ASTM C177 [18], ISO 8302 [19], ABNT NBR 02:135.07-001/4 [20], ABNT NBR 15220:4 [21], entre outras.

O princípio de medição consiste em submeter a amostra a um fluxo de calor constante, medindo a diferença de temperatura entre as faces. Através da Lei de Fourier, determina-se a condutividade térmica da amostra ( $\lambda$ ).

$$\lambda = \frac{Q \times L}{A \times DT} \quad [W/mK]$$

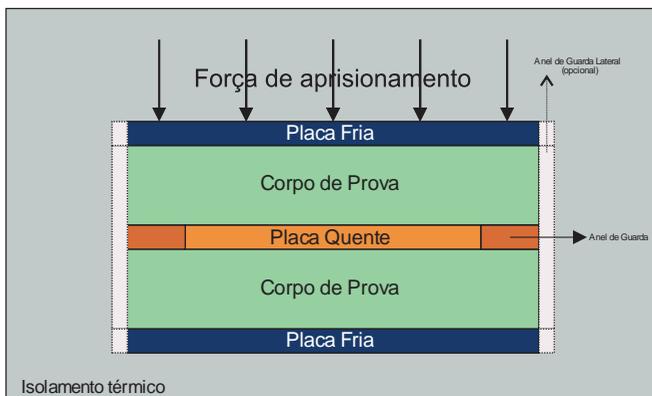
2.15

onde  $Q$  é a potência dissipada na placa quente;  $DT$  é a diferença de temperatura entre as faces da amostra;  $L$  é a espessura da amostra e  $A$  a área da amostra.

O fluxo de calor é gerado por uma resistência aquecedora disposta entre duas amostras idênticas. Para minimizar a fuga de calor lateral existe uma segunda resistência aquecedora circundando a primeira. Essa resistência é controlada de forma a manter o anel de guarda com a mesma temperatura da placa central, minimizando assim as fugas de calor pelas superfícies laterais. O sinal de controle é proveniente de termopares diferenciais dispostos entre a placa central e o anel de guarda. As placas frias, dispostas sobre as amostras, são mantidas a uma temperatura constante, normalmente por circulação de fluido com temperatura controlada.

Outra possível configuração é utilizar apenas uma amostra. Mas segundo Moura [22], o mais usual é a medição com duas amostras, já que a utilização de somente uma acarreta em uma maior incerteza de medição devido a dificuldade de se minimizar o fluxo dissipado no lado oposto à amostra. Na Figura 2.6, pode ser vista a configuração mais habitual do equipamento.

Figura 2.6 – Placa Quente Protegida, ABNT NBR 15220:4[21].



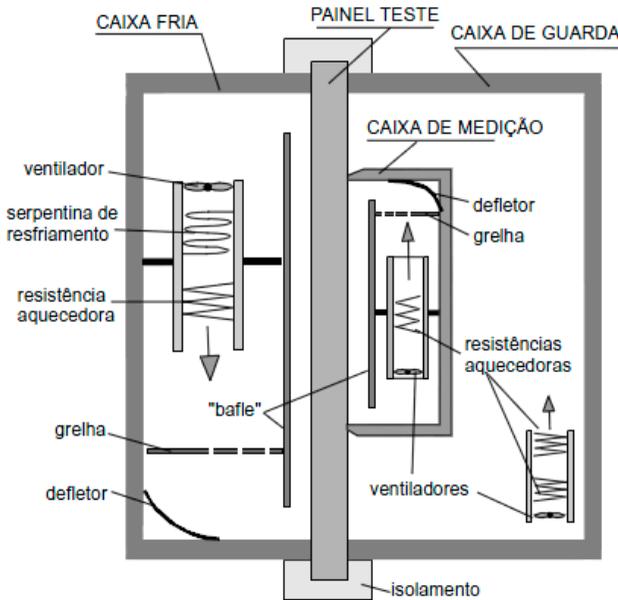
Uma das grandes vantagens de se utilizar este método é o fato de ser um método primário, ou seja, não são necessárias amostras para efetuar sua calibração. Porém, o longo tempo de cada ensaio, segundo Moura [22] em média 24 horas para uma amostra de alvenaria, inviabiliza muitas vezes sua aplicação nas indústrias e em laboratórios de medição.

### 2.3.2. Método Caixa Quente Protegida

Este método é utilizado para medição de condutividade térmica de amostras de grande porte como paredes, painéis, janelas, portas entre outros, não precisando, necessariamente, possuir propriedades uniformes. Essa técnica é descrita nas normas ASTM C236 [23], ISO 8990 [24] e ABNT NBR 6488 [25]. Na Figura 2.7, pode ser vista o esquema de montagem proposto por Güths [26].

Basicamente, a Caixa Quente Protegida possui duas câmaras, uma dita quente e outra fria, gerando uma diferença de temperatura na amostra. O fluxo de calor é determinado pela potência dissipada por resistências aquecedoras no lado quente. Para reduzir as perdas, uma segunda região aquecida envolve a primeira, com potência controlada de forma que tenham a mesma temperatura, sendo a origem do nome “protegida”.

Figura 2.7 – Arranjo geral Caixa Quente Protegida, Güths [26].



Sobre as paredes do painel de teste são colocados sensores de temperatura uniformemente distribuídos visando determinar a temperatura média das faces. Conhecendo estes valores em regime permanente, é possível determinar a condutividade térmica média da amostra através da equação 2.16,

$$\lambda = \frac{Q \times L}{A \times (T_{m_1} - T_{m_2})} \quad [W/mK]$$

2.16

onde  $Q$  é potência dissipada,  $L$  é a espessura da amostra,  $A$  a área da dissipação da potência  $Q$ ,  $T_{m_1}$  a temperatura média da face da caixa de medição e  $T_{m_2}$  a temperatura média da face da caixa fria.

O grande diferencial desse método é a possibilidade de efetuar medições de materiais não homogêneos. Outra característica é a possibilidade de medir a resistência térmica global, que envolve a

amostra mais as resistências térmicas superficiais. Essa característica é importante na área de caracterização de aberturas de edificações, pois possuem superfície irregular, e dessa forma é medido a resistência térmica global.

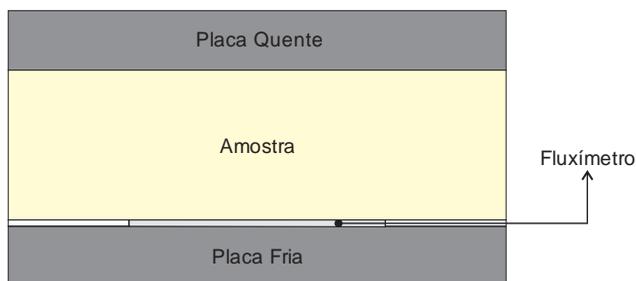
Como desvantagem desse método, pode-se citar o tamanho do dispositivo e o longo tempo para atingir o regime permanente (alguns dias).

### 2.3.3. Método Fluximétrico

O método fluximétrico é utilizado para medição de condutividade térmica e resistividade térmica de materiais em regime permanente, assim como o método placa quente protegida. Diferentemente do método placa quente protegida, este é um método secundário, sendo necessário uso o de amostras com condutividades previamente conhecidas para calibração do equipamento. Embora seja um método secundário, ele é amplamente utilizado pela rápida convergência. As normas técnicas ASTM C518 [27], ISO 8301[28] e ABNT NBR 15220:5 [29] descrevem esse método.

O dispositivo consiste em duas placas planas e paralelas, sendo uma chamada placa quente e outra placa fria, cujas temperaturas são normalmente controladas por circulação de fluido. As placas geram um fluxo de calor unidimensional na amostra, medido por transdutores que podem estar distribuídos conforme mostrado nas Figuras a seguir.

Figura 2.8 – Método Fluximétrico ASTM – C518 [27] com um fluxímetro e uma amostra

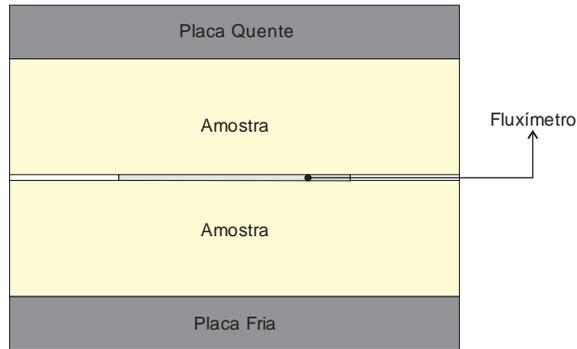


A Figura 2.8 mostra uma configuração que utiliza uma única amostra e um único fluxímetro sobre a placa quente. Nessa configuração

o método está mais susceptível a trocas de calor pelas superfícies laterais, induzindo a erro de medição segundo ASTM – C518 [27].

A Figura 2.9 mostra outra configuração, com duas amostras e um fluxímetro localizado entre as duas amostras.

Figura 2.9 – Método Fluximétrico ASTM – C518 [27] com um fluxímetro e duas amostras.



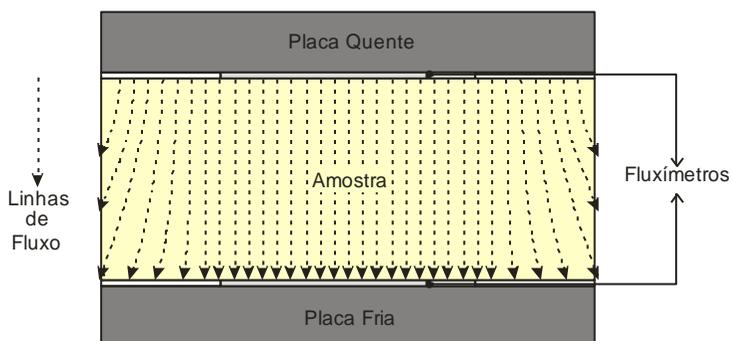
Essa configuração apresenta como desvantagem o fato de necessitar duas amostras, e ainda sendo bastante susceptível a trocas de calor laterais, induzindo a erro de medição. As normas ASTM C518 [27] e ISO 8301[28] apresentam uma terceira configuração, conforme visto na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Método Fluximétrico ASTM – C518 [27] com dois fluxímetros e uma amostra.



Nessa configuração é utilizado apenas uma única amostra e dois fluxímetros (um sobre a placa quente e outro sobre a placa fria) com áreas de medição menores que as placas. Essa configuração apresenta melhores resultados e maior facilidade de montagem para os ensaios, já que necessita somente de uma amostra e por possuir dois fluxímetros com áreas menores localizadas no centro dela (um em cada placa). Essa configuração diminui o erro de medição devido a trocas de calor nas laterais medindo o fluxo de calor no centro, onde sofre uma menor influência das trocas com o meio externo conforme a norma ASTM – C518 [27]. Segundo Güths [30] das três configurações esta é a que apresenta convergência mais rápida. Na Figura 2.11 pode-se observar esse fenômeno, onde é possível notar que as linhas de fluxo centrais sofrem um menor desvio.

Figura 2.11 – Distribuição das linhas de fluxo de calor.



A equação 2.17 explicita a condutividade térmica da amostra utilizando a configuração com dois fluxímetros e uma amostra,

$$\lambda = \left[ \frac{(S_Q E_Q + S_F E_F)}{2} \right] \times \left[ \frac{L}{(T_Q - T_F)} \right] \quad [W/mK]$$

2.17

onde,  $S$  é a constante de calibração do transdutor de fluxo de calor,  $E$  é a tensão de saída do transdutor de fluxo de calor,  $L$  é a espessura da amostra e  $T$  é a temperatura nas superfícies da amostra.

Segundo a norma ASTM – C518 [27] é possível obter uma incerteza de medição de  $\pm 2\%$  quando a temperatura média do ensaio estiver próxima à temperatura ambiente (diferença de  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ), e dentro do intervalo de  $10\text{ }^\circ\text{C}$  e  $40\text{ }^\circ\text{C}$ . Em todos os casos, a incerteza de medição nunca será menor que a incerteza das amostras utilizadas para calibração do equipamento.

A norma ASTM – C518 [27] cita, como auxílio na construção de um aparato para medição de fluxo de calor, alguns requisitos a fim de se obter a incerteza desejada. Dentre os requisitos está a emissividade, o paralelismo e a planeza das placas, o gradiente de temperatura nas placas, entre outros.

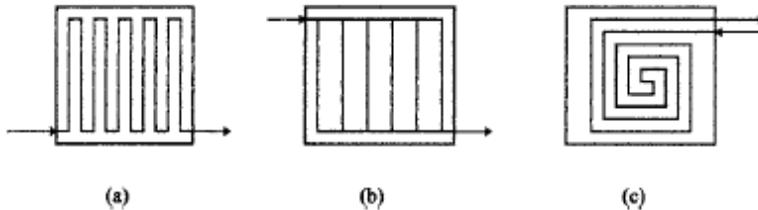
No que diz respeito da emissividade global das placas e dos fluxímetros, a norma exige que estas sejam maiores que 0,8 na faixa de temperatura de operação.

As placas deverão possuir rigidez suficiente para manter sua planeza e paralelismo. O equipamento deverá garantir que estas condições sejam inferiores a 0,02% da máxima medida linear das placas. É importante manter o paralelismo das placas pois em muitos equipamentos a espessura da amostra é medida indiretamente através da distância entre elas. Além do mais, o paralelismo constante entre as placas garante uma maior repetitividade, já que a superfície de contato não muda. Porém, existem casos em que as amostras rígidas não são paralelas, nestes casos, a norma permite o uso, entre a placa e amostra, de uma fina folha homogênea, maleável e com condutividade térmica maior que a amostra, a fim de garantir um bom contato térmico.

As superfícies das placas que entram em contato com a amostra precisam estar instrumentadas com sensores de temperatura de precisão, como termopares, termistores, entre outros. A norma não leva em consideração a quantidade mínima ou máxima de sensores de temperatura que deverá possuir a placa: o importante é garantir uma boa exatidão.

Em relação ao máximo gradiente de temperatura na placa, a norma ASTM – C518 [27] não faz menção, porém, a norma ISO – 8301 [28] fixa um limite. Ela determina que não possa haver uma diferença de temperatura maior que 1% na placa em relação a qual a amostra é submetida. A homogeneidade de temperatura nas placas é alcançada pela circulação de fluido a temperatura controlada. Na Figura 2.12 são mostrados os layouts da circulação de fluido nas placas isotérmicas sugeridos pela norma ASTM – C518 [27].

Figura 2.12 – Layouts sugeridos pela norma ASTM – C518 [27] para circulação de fluido nas placas isotérmicas

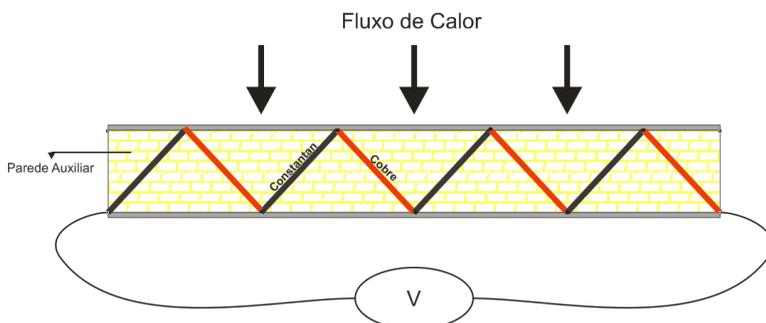


A configuração “c”, do tipo dupla espiral, é aquela que possibilita uma melhor homogeneidade de temperatura.

#### 2.4. Transdutor de fluxo de calor

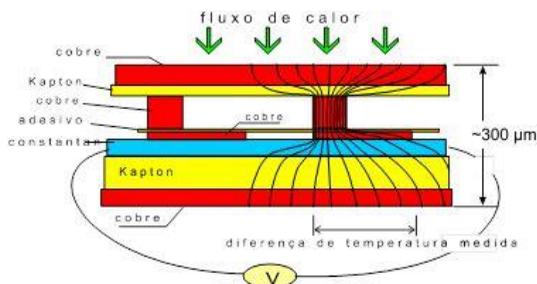
Todo fluxímetro comporta uma parede auxiliar. Os transdutores de fluxo de calor tradicionais (dito a *gradiente transversal*) são constituídos de uma parede auxiliar que gera um gradiente de temperatura proporcional ao fluxo térmico que atravessa a parede. A medida desse gradiente é normalmente realizada por termopares dispostos entre as superfícies isoterma que delimitam a parede auxiliar, conforme pode se visto na Figura 2.13. A construção da rede termoeétrica pode ser simplificada através da utilização do depósito eletrolítico de uma camada de cobre sobre um fio de Constantan, de modo a eliminar o problema da fabricação de um grande número de junções termoeétricas soldadas. Mas o transdutor continua com uma grande espessura, que é fonte de erro de medição.

Figura 2.13 – Corte de um transdutor de fluxo de calor a gradiente transversal.



O presente trabalho utiliza outro tipo de transdutor, dito a *gradiente tangencial*, que determina o fluxo de calor através da medida de um gradiente de temperatura em um plano tangente ao plano de medida do fluxo (Güths [31]). Uma assimetria física desvia as linhas de fluxo, gerando uma diferença de temperatura sobre a termopilha planar. O desvio das linhas de fluxo é causado pelo contato pontual entre a superfície isoterma superior e a parede auxiliar, segundo o esquema mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Corte de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial.



As diferenças de temperaturas são medidas por termopares planares a eletrodos depositados ligados em série. Cada um dos termopares converte a diferença de temperatura em uma força eletromotriz (f.e.m.). A f.e.m produzida é diretamente proporcional ao número de termoelementos distribuídos sobre a superfície útil do sensor.

A Figura 2.15 mostra as partes do fluxímetro aberto e a Figura 2.16 uma foto de um fluxímetro já pronto.

Figura 2.15 – Vista aberta de um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial.

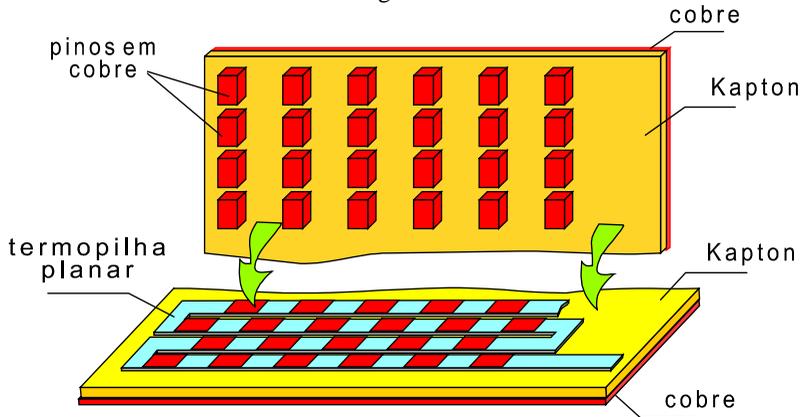


Figura 2.16 – Foto de um fluxímetro a gradiente tangencial.



Para fabricação dos fluxímetros faz-se a utilização de técnicas de fotogravura, o que facilita sua produção e permite grandes superfícies de medição além de alta sensibilidade.

### 3. SIMULAÇÕES

#### 3.1. Introdução

Nesta seção serão abordadas as simulações que foram realizadas a fim de otimizar a montagem do aparato de medição de condutividade térmica de materiais isolantes utilizando método fluximétrico com dois transdutores de fluxo de calor e uma amostra. As simulações, utilizando o programa ANSYS R14.5 [35], tiveram como objetivo quantificar a influência dos parâmetros dimensionais e de propriedades dos materiais na incerteza de medição.

Dentre os detalhes que foram simulados, estão: posição de módulos de resfriamento termoelétricos na placa fria, espessura da placa a ser utilizada, tamanho de transdutor de fluxo de calor, análise da influência da espessura da amostra e do isolamento lateral.

#### 3.2. Análise do posicionamento dos módulos de resfriamento termoelétricos

Visando a construção de um aparato mais compacto, é analisada a possibilidade de substituição do banho termostaticado frio por um sistema de resfriamento termoelétrico (chamado módulo Peltier<sup>1</sup> [36]) fixado diretamente sobre a placa fria.

Como essas pastilhas termoelétricas possuem uma dimensão comercial praticamente única (40 x 40 mm), o resfriamento é concentrado, podendo provocar gradientes de temperatura na placa fria, causando erros de medição. Nessa análise será avaliada a melhor configuração para a instalação de 04 pastilhas de 40 x 40 mm, dispostas sobre uma placa de 300 x 300 mm (a placa fria) conforme esquematizado na Figura 3.1.

Para facilitar a simulação e diminuir a necessidade computacional, reduziu-se o modelo de estudo para 1/4 do modelo original, utilizando o recurso de simetria. Na Figura 3.2 é mostrado o modelo utilizado nesta simulação.

---

<sup>1</sup> Os módulos Peltier produzem uma diferença de temperatura em duas junções de dois condutores (ou semicondutores) diferentes quando percorridos por uma corrente elétrica. Este efeito é o oposto do efeito Seebeck, que ocorre nos termopares.

Figura 3.1 – Configuração placa fria com 4 módulos Peltier.

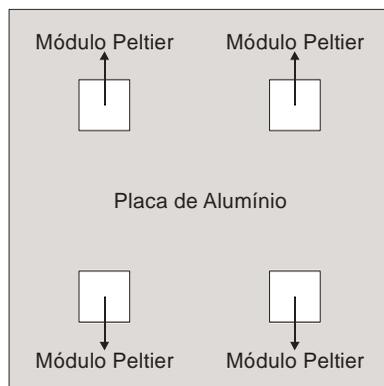
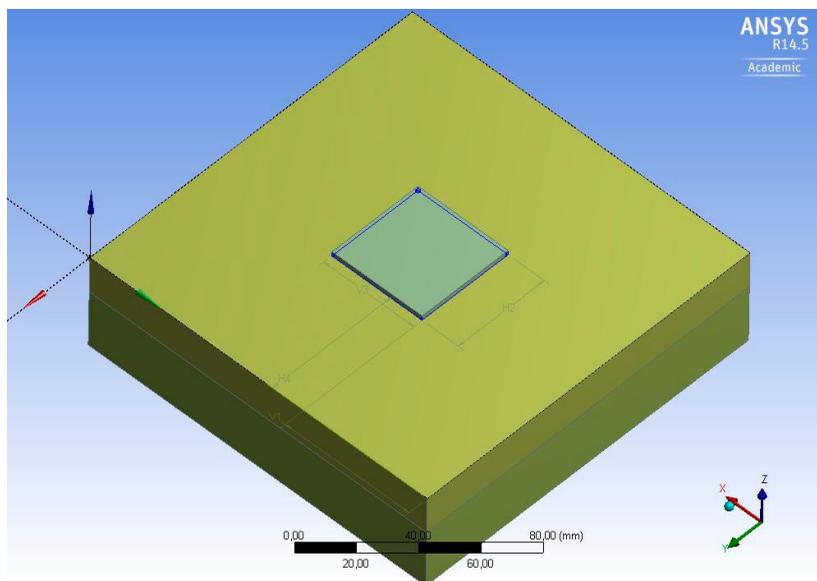
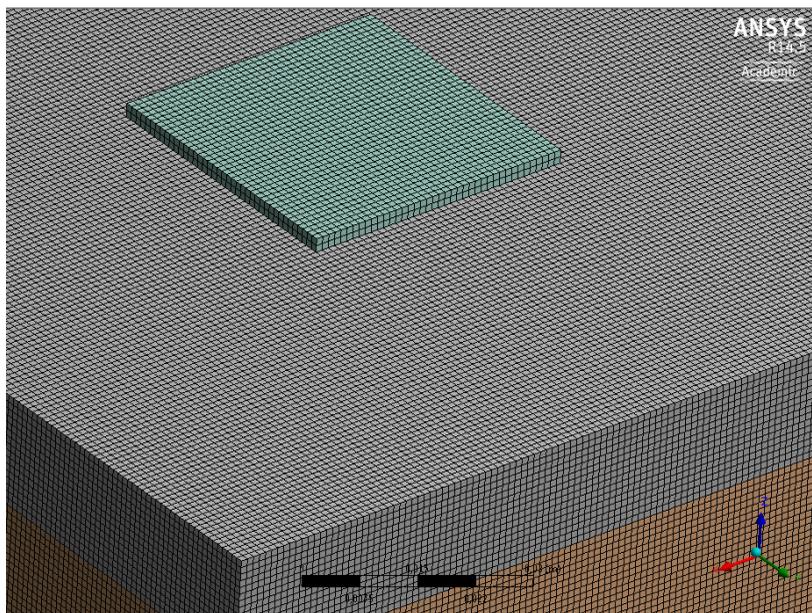


Figura 3.2 – Modelo utilizado na simulação.



A malha utilizada na simulação foi do tipo hexaédrica com elementos de 1 mm de aresta. Apesar de elementos tão pequenos acabarem exigindo maior poder computacional, decidiu-se colocar a mesma em toda a geometria para não haver erros na hora da parametrização, garantindo assim uma malha uniforme de mesmo tamanho em todas as simulações. Isso é muito útil quando se parametriza uma simulação, pois oferece uma maior confiança de ter uma malha adequada em todos os casos, visto que não é possível visualizar a malha para cada nova variação quando se faz uso do DOE<sup>2</sup> [37]. O modelo com a malha utilizada pode ser observada na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Malha utilizada na simulação.



---

<sup>2</sup> DOE vem da palavra inglesa *Design Of Experiment*. Esta é uma ferramenta do ANSYS que permite efetuar uma série de simulações tendo como base o mesmo modelo, porém com variáveis alterando em um intervalo pré-determinado.

Na Figura 3.4, são mostradas as variáveis utilizadas na simulação. Como citado,  $L1$  e  $L2$  foram considerados constantes e iguais a 40 mm, que é a dimensão do módulo Peltier. A simulação foi realizada variando a posição do módulo sobre a placa, ou seja, nas dimensões “a” e “b”. O resultado de interesse em cada simulação é a maior diferença de temperatura encontrada na placa (a fim de obedecer ao requisito das normas).

Após simulações iniciais foi observado que as menores diferenças de temperatura na placa foram encontradas quando o módulo Peltier era deslocado sobre uma linha diagonal, ou seja,  $a = b$  (conforme linha tracejada mostrada na Figura 3.4).

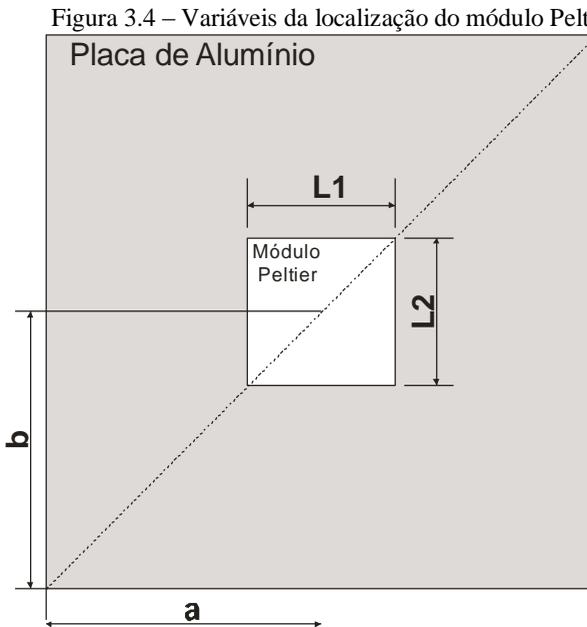
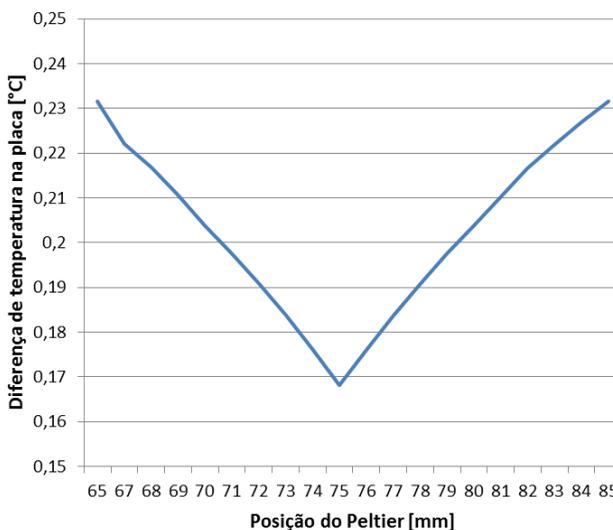


Figura 3.5 – Resultado das simulações para ponto ótimo do módulo Peltier.



A análise indica que a melhor posição do módulo Peltier (menor diferença de temperatura) é no centro da placa, ou seja, em  $a = b = 75$  mm, conforme mostrado na Figura 3.5.

### 3.3. Espessura da placa inferior

A espessura da placa a ser utilizada na placa fria é de extrema importância para que se obedeça ao requisito de máximo gradiente de temperatura na placa. Conforme a norma ISO – 8301 [28], não pode haver diferença maior que 1 % na temperatura da placa em relação à diferença de temperatura à qual a amostra é submetida. Entretanto, como o objetivo é construir um equipamento mais compacto, foi buscado avaliar qual a mínima espessura em que ainda é possível cumprir o requisito da norma.

Simulou-se a placa fria em alumínio em virtude de esta apresentar alta condutividade térmica, 273 W/mK a uma temperatura de 27 °C, (Haynes [34]). Outro ponto que corroborou com sua utilização é seu

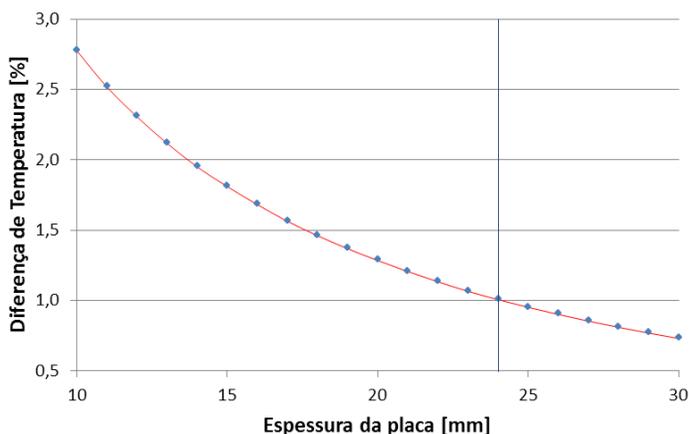
baixo custo, comparado com outros materiais que apresentam alta condutividade, além de ser um metal leve, que facilita seu manuseio.

Nessa simulação foi utilizada a configuração de 04 módulos Peltier localizados no ponto otimizado do item anterior, ou seja, no centro da diagonal de cada quartil da placa de 300 mm x 300 mm. Foi ainda considerado o pior caso, onde se tem uma amostra com condutividade de 3 W/mK e espessura de 25 mm, que gera o maior gradiente o qual a placa será submetida.

Tabela 1 – Diferença de temperatura em função da espessura do alumínio.

Espessura do Alumínio [mm]	Diferença de Temperatura [%]
10	2,78
11	2,52
12	2,31
13	2,12
14	1,95
15	1,81
16	1,68
17	1,56
18	1,46
19	1,37
20	1,29
21	1,21
22	1,13
23	1,07
24	1,01
25	0,95
26	0,90
27	0,85
28	0,81
29	0,77
30	0,73

Figura 3.6 – Diferença de temperatura na placa em função da espessura da placa fria.



O resultado da simulação para verificação da espessura mínima da placa de alumínio pode ser vista Tabela 1 e na Figura 3.6. Dado que a norma ISO 8301 estabelece um gradiente máximo de 1%, o resultado da simulação indica que a espessura da placa de alumínio, para esse caso, deve ser superior a 24 mm.

### 3.4. Tamanho do transdutor de fluxo de calor

O fluxo de calor na amostra sofre desvio devido à fuga de calor lateral, conforme mostrado na seção 2.2.3, gerando um erro de medição<sup>3</sup> da condutividade térmica.

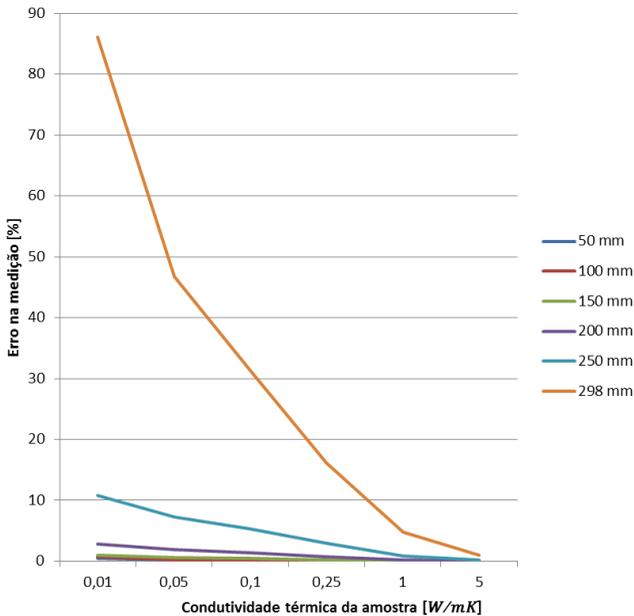
Para reduzir esse efeito existe a possibilidade de reduzir a área de medição do transdutor (medindo apenas na região central). As normas ASTM – C518 [27] e ISO – 8301 [28] não especificam essa área, somente informam que deve ser menor que a área da placa para redução dos erros em virtude das trocas laterais da amostra. Porém a área de medição não pode ser muito pequena, pois a intensidade do sinal do transdutor está diretamente relacionada à ela, além do fato de que uma

<sup>3</sup> É considerado erro de medição, a diferença entre a condutividade térmica da amostra e a condutividade térmica obtida utilizando o fluxo de calor que atravessa a área sensível do fluxímetro.

medição pontual está mais suscetível a erros pela possível não homogeneidade da amostra.

Nessa simulação é considerada que a amostra é submetida a uma diferença de temperatura de 20 K, onde a temperatura da placa fria é igual a 288 K, a temperatura da placa quente igual a 308 K e a temperatura externa ( $T_{inf}$ ) igual a 298 K. Foram realizadas simulações variando a condutividade e o tamanho da área de medição do fluxímetro, considerando uma amostra de 150 mm de espessura, sujeita à uma troca de  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  (convecção natural), em um dispositivo com 300 x 300 mm.

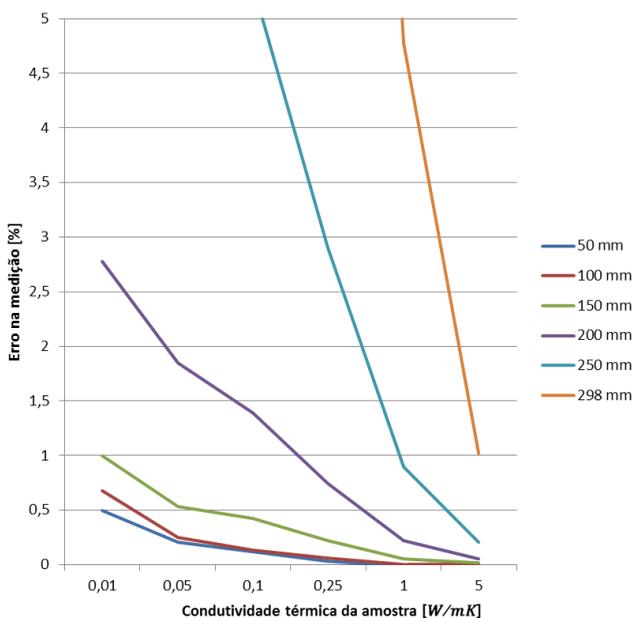
Figura 3.7 - Erro na medição da condutividade em função da condutividade térmica da amostra e da dimensão do transdutor (dispositivo com 300 x 300mm).



Conforme pode ser observado na Figura 3.7, quanto maior o tamanho do transdutor maior será o erro de medição em virtude das fugas laterais. Outro detalhe interessante é que quanto maior a condutividade térmica da amostra, menor é o erro de medição. Cabe salientar que nessa análise não foi considerada a resistência de contato

da amostra, que pode representar um erro significativo nas amostras com alta condutividade, segundo Brzesinski [32], [33]. A Figura 3.8 mostra os mesmos resultados, mas de forma ampliada para possibilitar uma melhor observação do efeito na região de interesse.

Figura 3.8 – Detalhe ampliado do erro de medição da condutividade em função da condutividade térmica da amostra e da dimensão do transdutor (dispositivo com 300 x 300mm).



Verifica-se que mesmo para amostras bastante isolantes (condutividade em torno de 0,03 W/mK), pode-se empregar transdutores de até 100 mm sem que o erro ultrapasse 0,5%.

### 3.5. Análise da influência da espessura da amostra e do isolamento lateral

A espessura da amostra e o isolamento lateral são de fundamental importância para atingir os requisitos de incerteza da medição, conforme pode ser observado nas Normas Técnicas.

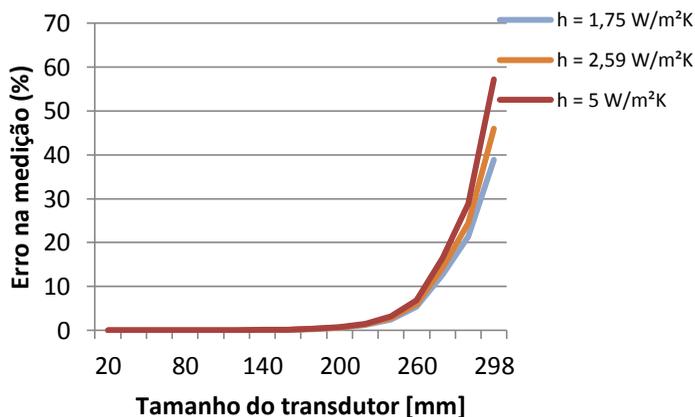
A espessura combinada da amostra ou amostras, do transdutor de fluxo de calor e qualquer material de amortecimento, que no total é igual à distância entre a placa fria e a placa quente deve ser restrita a fim de limitar o efeito de borda na medição. Esse efeito de borda é diretamente relacionado pelo isolamento lateral e temperatura ambiente, sendo assim o requisito de incerteza deve ser atingido considerando ambos. (ASTM – C518 [27], p. 6, tradução nossa).

Para analisar tal influência, foram realizadas diversas simulações a fim de identificar o efeito da espessura da amostra e do isolamento lateral na incerteza de medição.

A amostra pode não estar isolada lateralmente, e, assim, sua superfície trocar calor com o ambiente por convecção natural (e radiação em ondas longas, implícito no coeficiente de convecção). Quando é aplicado um isolamento, aumenta-se a resistência térmica, resultando em um coeficiente global de transferência de calor menor. Sendo assim, nessa análise foi considerado um coeficiente de troca de  $5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  para o caso em que a amostra sem isolamento,  $2,59 \text{ W/m}^2\text{K}$  para quando aplicado um isolamento de poliestireno expandido com espessura de 50 mm, e  $1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$  quando aplicado um isolamento de poliestireno expandido com espessura de 100 mm.

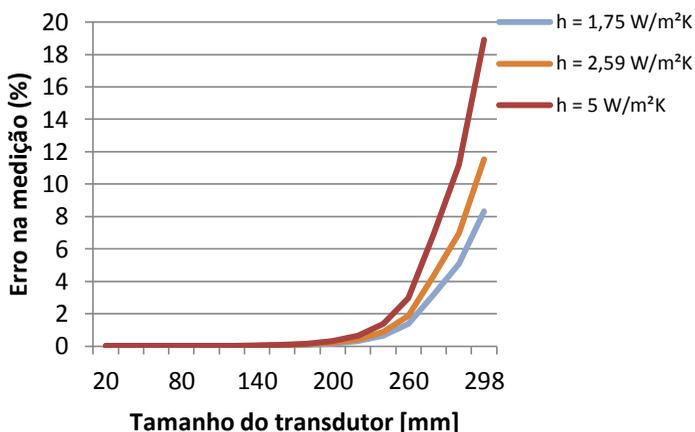
As simulações foram feitas e mostradas na Figura 3.9, Figura 3.10 e Figura 3.11 considerando um condutímetro com dimensões 300 mm x 300 mm e fluxímetros variando de 10 mm x 10 mm até 298 mm x 298 mm. Foram consideradas amostras com condutividade de 0,01 W/mK, 0,1 W/mK, 1 W/mK e espessura de 30 mm.

Figura 3.9 – Erro na medição do fluxo em função do tamanho do transdutor para diferentes coeficientes de troca (amostra com condutividade 0,01 W/mK e espessura 30 mm).



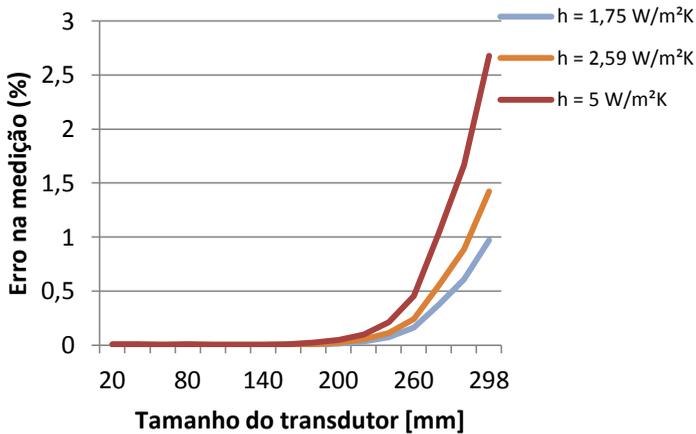
Conforme pode ser observado na Figura 3.9 existe uma diminuição no erro ao se utilizar um isolamento lateral. Quando a área de medição do fluxímetro é igual à área das placas o erro é aproximadamente igual a 57%, reduzindo para aproximadamente 49% e 39% com o uso de um isolamento de 50 mm e 100 mm respectivamente.

Figura 3.10 – Erro na medição do fluxo em função do tamanho do transdutor para diferentes coeficientes de troca (amostra com condutividade 0,1 W/mK e espessura 30 mm).



Nas Figura 3.10 e Figura 3.11 é observado o mesmo comportamento quanto à utilização de isolamento lateral. É possível observar, conforme já discutido em 3.4, que quanto maior a condutividade da amostra, menor será o erro da medição.

Figura 3.11 – Erro na medição do fluxo em função do tamanho do transdutor para diferentes coeficientes de troca (amostra com condutividade  $1 \text{ W/mK}$  e espessura  $30 \text{ mm}$ ).



Para avaliar a influência da espessura da amostra na medição, foram realizadas simulações utilizando transdutores com dimensões de  $298 \times 298 \text{ mm}$  (ou seja, muito próximo do tamanho da placa e da amostra) que é o caso onde a medição sofre maior influência do meio externo. Estas simulações são mostradas nas Figura 3.12(a), Figura 3.12(b) e Figura 3.12(c), para amostras com condutividades iguais a  $0,01 \text{ W/mK}$ ,  $0,1 \text{ W/mK}$  e  $1 \text{ W/mK}$  respectivamente. Cada figura ainda apresenta três curvas: uma para um coeficiente de troca de  $1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ , uma para um coeficiente de troca de  $2,59 \text{ W/m}^2\text{K}$  e uma para um coeficiente de troca de  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Na Figura 3.13 foi fixado o coeficiente de troca em  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$  e mostrado o comportamento para diferentes condutividades da amostra.

Figura 3.12 – Influência da espessura da amostra no erro de medição para condutividades da amostra de 0,01 W/mK (a), 0,1 W/mK (b) e 1 W/mK (c) e diferentes coeficientes de troca.

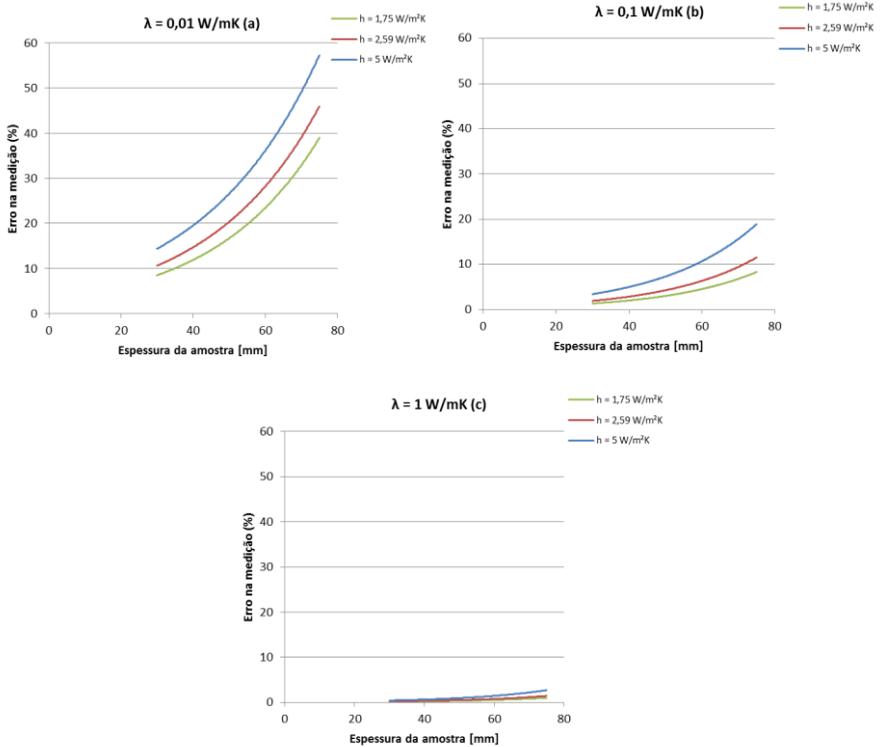
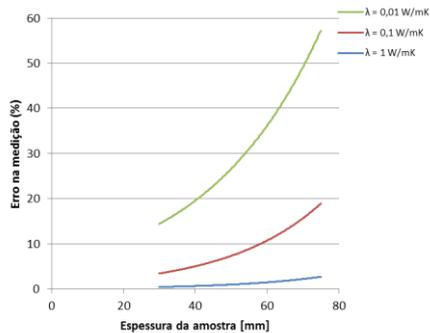


Figura 3.13 Influência da espessura da amostra no erro de medição para condutividades da amostra para um coeficiente de troca igual a 5 W/m²K e diferentes condutividades da amostra.



Nota-se pela Figura 3.13 uma relação direta entre o erro de medição, a espessura da amostra e sua condutividade. Quanto maior a espessura da amostra para uma mesma condutividade maior será o erro na medição, assim como para uma mesma espessura de amostra quanto maior sua condutividade menor será o erro de medição.

## 4. APARATO EXPERIMENTAL

### 4.1. Introdução

Após a realização das simulações necessárias para a montagem do condutivímetro foi possível identificar os requisitos mínimos necessários. Baseando-se nesses requisitos foi iniciada a fabricação do equipamento, discriminada nesta secção, procurando seguir a ordem cronológica.

### 4.2. Montagem das placas fria e quente

As maiores preocupações quanto a montagem do aparato experimental foram a espessura da placa fria e o tamanho dos transdutores de fluxo de calor. Tais parâmetros foram simulados e podem ser observados nas secções 3.3e 3.4. Tendo como base os resultados das simulações e a disponibilidade no mercado optou-se por utilizar placas de alumínio com espessura de  $25,4\text{ mm}$  e fluxímetros com dimensões de  $50\text{ mm}$  por  $50\text{ mm}$  e espessura máxima de  $300$  micrometros.

O controle da temperatura na placa fria foi realizado com o uso de módulos de resfriamento termoelétrico do tipo Peltier. No total foram utilizados quatro módulos Peltier, cada um com consumo máximo de  $91,2\text{ W}$  (potência máxima de resfriamento  $50\text{ W}$ , segundo Hebei [38]). Cada módulo Peltier tem área de contato com a placa de alumínio de  $40\text{ mm}$  por  $40\text{ mm}$ . Na Figura 4.1 é mostrada a disposição dos módulos Peltier na placa inferior e na Figura 4.2 um módulo Peltier similar ao utilizado na montagem.

Figura 4.1 – Disposição dos Módulos Peltier.

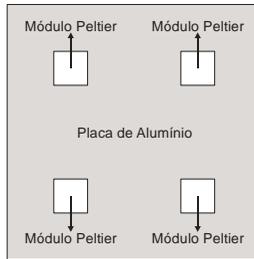
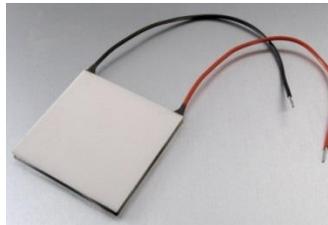


Figura 4.2 – Módulo Peltier.



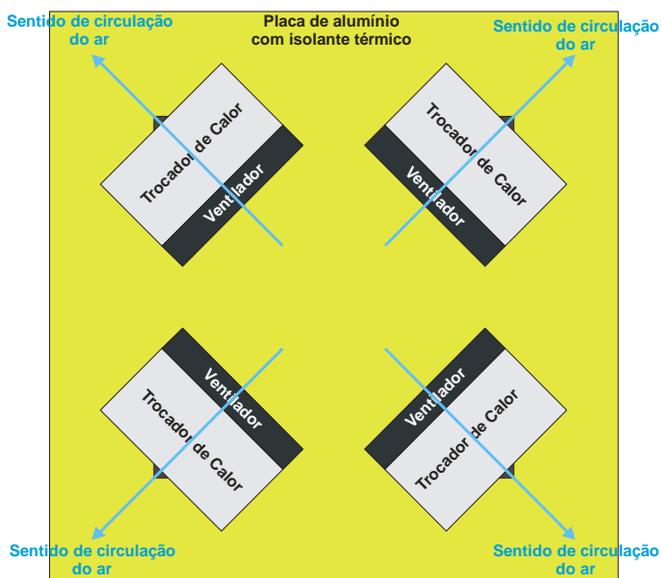
Os módulos Peltier necessitam de dissipadores de calor nas faces opostas as que ficam em contato com a placa de alumínio. Após diversos ensaios práticos de alguns modelos de dissipadores de calor encontrados no mercado optou-se por utilizar o dissipador que é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Trocador de calor utilizado.



Utilizaram-se ao todo quatro trocadores de calor, um para cada módulo Peltier. Estes trocadores foram dispostos de forma a todos ficarem susceptíveis às mesmas temperaturas de entrada de ar, uma vez que estas influenciam diretamente na temperatura da placa fria. A disposição pode ser vista na Figura 4.4 (projeto) e Figura 4.5 (montada).

Figura 4.4 – Vista inferior do projeto da placa fria.



Já o controle de temperatura da placa quente é feita através de três aquecedores planares dispostos sobre a placa, cada aquecedor tem uma resistência de  $7 \Omega$ . Esses aquecedores estão ligados em paralelo e que quando alimentados com uma tensão de  $12 \text{ V}$  resultam em uma potência total aproximada de  $61,7 \text{ W}$ . Na Figura 4.6 é mostrada uma das resistências aquecedoras utilizadas.

Figura 4.5 – Vista inferior da placa fria montada.

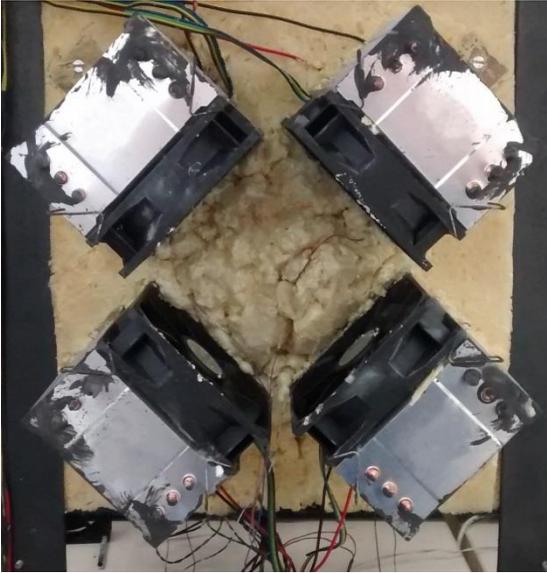
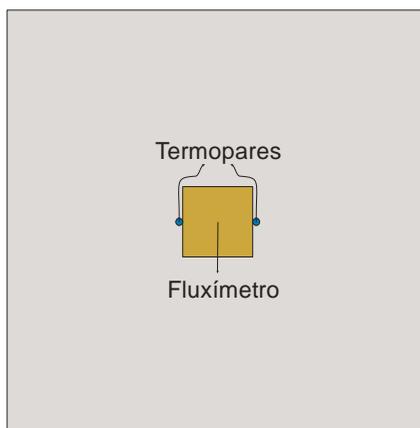


Figura 4.6 – Resistência aquecedora utilizada na placa quente.



A temperatura das placas foi medida por dois termopares tipo T, posicionados um em cada lado do fluxímetro. Suas juntas de referência foram instaladas em um mesmo invólucro e medidas por um termistor NTC de  $30\text{ k}\Omega$ . Na Figura 4.7 pode ser observada a disposição do fluxímetro e dos termopares. Esta disposição é a mesma utilizada tanto para a placa fria quanto para a placa quente.

Figura 4.7 – Disposição do fluxímetro e dos termopares na face de contato com a amostra tanto para a placa quente quanto para a placa fria.



As placas podem ser observadas em um corte vertical na Figura 4.8. A Figura 4.9 é uma vista detalhada próximo ao fluxímetro.

Figura 4.8 – Vista do corte vertical das placas quente e fria.

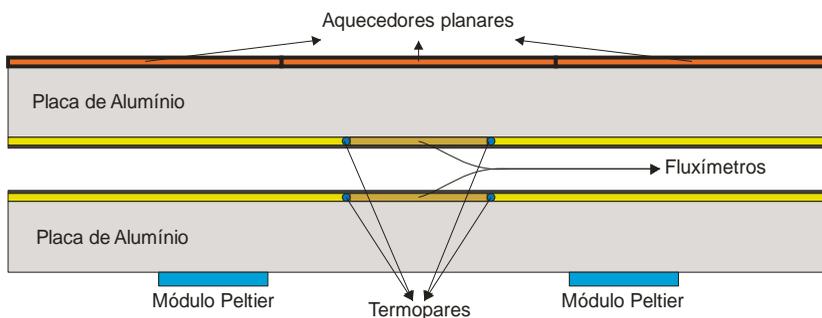
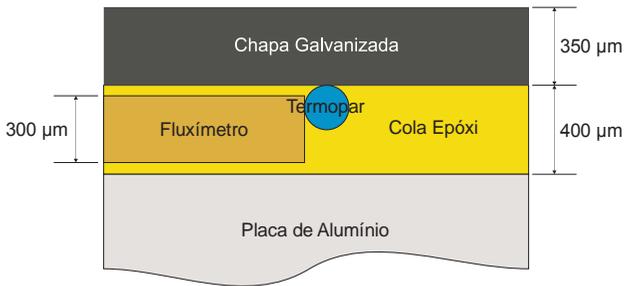


Figura 4.9 – Detalhes da confecção das placas próximo ao fluxímetro.



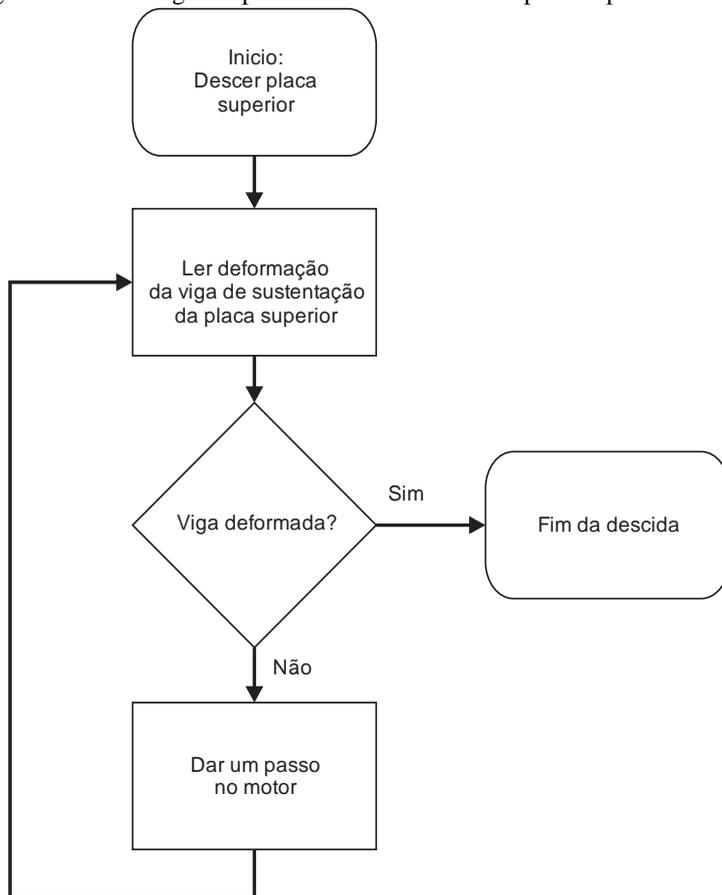
Como pode observado na Figura 4.9, foi utilizada uma cola do tipo epóxi para colagem dos fluxímetros, termopares e uma chapa galvanizada. Optou-se pela utilização deste tipo de cola o fato dela possuir boa fluidez, permitindo uma distribuição homogênea, e também por possuir uma condutividade térmica muito próxima à do fluxímetro (ambos aproximadamente igual a  $0,9 \text{ W/mK}$ ) evitando um desvio das linhas de fluxo de calor, o que causaria um erro de medição.

Observa-se também a utilização de uma chapa galvanizada sob o fluxímetro, termopar e cola. Foi utilizada esta chapa para garantir uma maior planeza na face de contato da placa com a amostra.

### 4.3. Sistema para ajuste da distância entre as placas e medição da espessura da amostra

O ajuste da distância entre as placas está diretamente ligada a medição da espessura da amostra, conforme fluxograma mostrado na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Fluxograma para controle da descida da placa superior.



Foram utilizados quatro motores de passo (Hughes [39]), do tipo híbrido, que agem como atuadores lineares para movimentar a placa superior, e quatro vigas engastadas na estrutura metálica do condutímetro como suporte dos motores. Cada viga foi instrumentada

com quatro extensômetros, modelo PA-06-250BA-350L [40], configurados como ponte completa, Hoffmann [41]. O sistema montado em um dos quatro motores pode ser observado na Figura 4.11.

Figura 4.11 – Sistema montado para deslocamento da placa superior e medição da espessura da amostra.

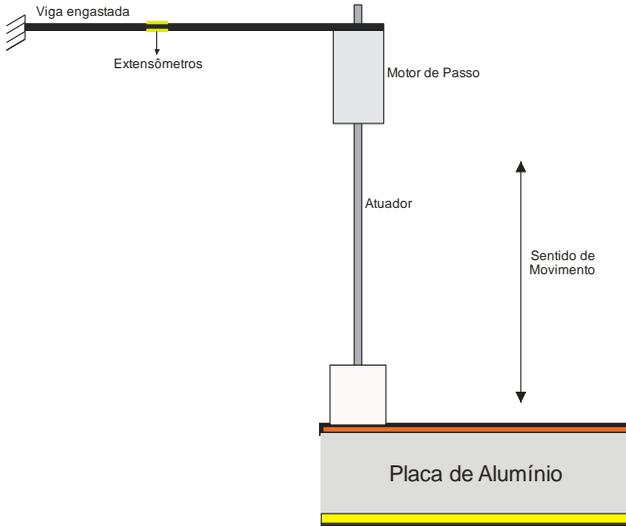


Figura 4.12 – Motor de passo híbrido com atuador linear [43] utilizado.



Os estatores dos motores de passo foram fixados nas vigas engastadas e as extremidades dos rotores na placa quente. Os motores foram posicionados nas extremidades da placa quente de forma que permitissem uma leve inclinação da placa caso as faces da amostra não

fossem completamente paralelas. Na Figura 4.12 é mostrado o motor de passo [43] utilizado para o deslocamento da placa. Este motor possui passo de 0,01 mm, é unipolar, e tem uma tensão de alimentação de 5,6 V e corrente de 0,75A (o valor da corrente é por bobina).

Quando os motores estiverem acionados, a placa superior irá se movimentar. Caso este movimento encontre uma resistência a viga irá sofrer uma leve deformação, juntamente com os extensômetros, equivalente à força que o motor fará para continuar o seu movimento. Com o objetivo de medir esta deformação foram montados amplificadores de instrumentação, Graeme [42], conectados aos extensômetros de cada viga.

Os extensômetros estão ligados em formato de ponte completa.. A tensão de saída do amplificador de instrumentação é lida por um dos oito conversores analógico/digital (ADC) da placa de aquisição de sinais utilizada.

Na Figura 4.13 é mostrado um dos motores fixados na viga de sustentação da placa superior e dois dos quatro extensômetros.

Figura 4.13 - Fixação de um dos motores de passo na viga e seus extensômetros.



A placa de aquisição utilizada na montagem do condutivímetro foi desenvolvida no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) no ano de 2004 sendo utilizada principalmente para efetuar aquisição de sensores de umidade relativa e temperatura. Tem como principal componente o microcontrolador ATmega16 [45].

Além de possuir ADC, a placa possui diversas saídas digitais que podem ser programadas de acordo com o objetivo do usuário. Utilizando as saídas digitais, foi desenvolvido um programa para controle dos motores de passo em seu microcontrolador além de uma placa. A placa desenvolvida utiliza o circuito integrado SN754410 que é responsável por dar o ganho de corrente (*driver*) necessário para atuação dos motores de passo, uma vez que a corrente máxima de saída de cada porta do microcontrolador utilizado é 100 mA .

#### **4.4. Aquisição da temperatura e fluxo de calor**

Os sensores utilizados para medição de temperatura nas placas foram termopares tipo T, dois em cada placa e em série, e para medição do fluxo de calor foram utilizados transdutores de fluxo de a gradiente tangencial. Tanto os fluxímetros quanto os termopares são pouco sensíveis, o que torna impossível a aquisição dos seus sinais pelos ADC da placa de aquisição de sinais utilizada sem uma pré-amplificação (o conversor tem apenas 12 bits e resolução de 4,88 mV). Outra opção para aquisição destes sinais é a elaboração de um circuito com esta função em específico. Optou-se, assim, pela elaboração de uma placa utilizando o conversor ADS1248 [54].

O ADS1248 é um ADC integrado de 24 bits comumente utilizado na medição de temperatura com termopares, termistores e termorresistores; sensores de pressão e diversos processos de controle que exigem grande exatidão. Ele possui quatro entradas diferenciais, um amplificador de ganho programável (PGA) de alta impedância, ADC delta-sigma de terceira ordem com filtro digital ajustável e uma interface de programação serial SPI.

Para comunicação do ADS1248 com o ATmega16 da placa de aquisição de sinais utilizou-se a interface SPI, sendo necessário escrever o protocolo de comunicação entre ambos, além de novas rotinas de comunicação entre o ATmega16 e o microcomputador.

#### 4.5. Controle da temperatura das placas

Para se obter as temperaturas desejadas nas placas foram utilizados módulos Peltier na placa fria e aquecedores planares na placa quente, ambos com controles PID Åström [46] (proporcional, integral e derivativo).

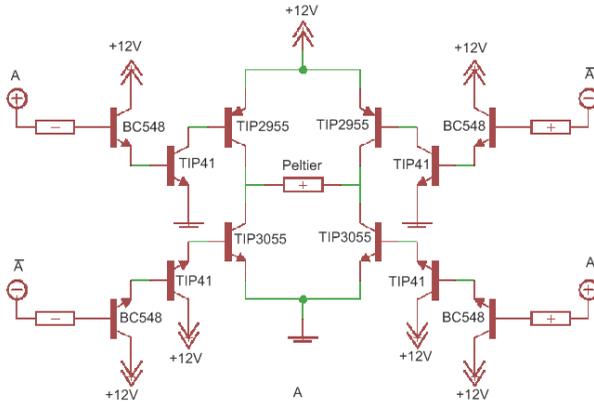
O cálculo dos parâmetros PIDs é feito através de um programa de computador (este programa será apresentado na seção 4.6) e seu valor de saída é enviado para um circuito desenvolvido exclusivamente para atuar como PWM (*Pulse Width Modulation*). Embora a placa de aquisição de sinais pudesse ser utilizada como PWM, seus períodos teriam que ser demasiadamente longos e estariam susceptíveis a perturbações oriundas da comunicação com o computador, já que esta efetua a leitura dos sensores de temperatura e fluxo de calor.

Para elaboração da placa utilizou-se o microcontrolador ATtyne2313 [47], que assim como com o ADS1248 utiliza para comunicação o protocolo SPI, o que facilitou a elaboração de rotinas para este se comunicar com a placa de aquisição de sinais..

O software gerenciador no microcomputador, após efetuar o cálculo de saída do PID, envia para o ATtyne2313 o valor de saída decodificado em um palavra de 16 bits. Dessa forma conseguiram-se passos inferiores a 0,002 % em um período de 65,535 ms, facilitando a estabilidade da temperatura das placas utilizando o controlador PID.

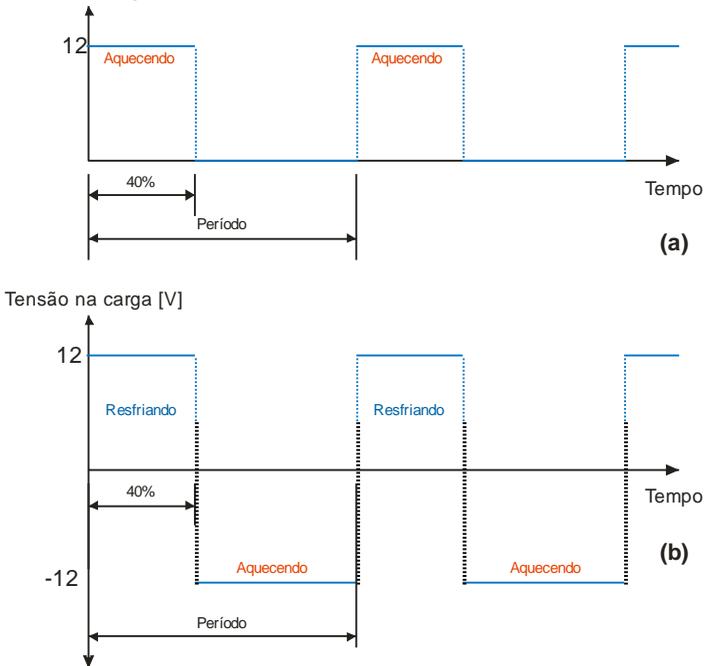
Entretanto, como o microcontrolador ATtyne2313 não possui corrente nas suas saídas digitais suficiente para atuar sobre os módulos Peltier e aquecedores planares, foi necessário a utilização de circuitos intermediários para efetuar estes ganhos de corrente. Os circuitos intermediários elaborados são diferentes para cada caso, sendo que ambos utilizam modelos como os transistores Darlington [48] a fim de proporcionar um grande ganho em corrente. Enquanto o circuito para o aquecedor planar apresenta uma simples cadeia de transistores, os módulos Peltier tiveram um acionamento que permite a inversão do seu funcionamento (hora resfriando a placa fria, hora aquecendo-a). São utilizados no primeiro estágio de ganho de corrente os transistores BC548 [49], no segundo estágio o TIP41 [50] e no último estágio os transistores TIP3055 [51] e TIP2955 [52]. Na Figura 4.14 é mostrado os o circuito de ganho de corrente para o módulo Peltier.

Figura 4.14 – Esquemático do ganho de corrente para os módulos Peltier.



Na Figura 4.15 são mostradas as tensões sobre as cargas, sendo no caso (a) sobre o aquecedor planar e no caso (b) sobre os módulos Peltier, ambas simulando um pulso que equivale a 40 % do período.

Figura 4.15 - Tensão sobre as cargas com um pulso de 40 % .



É possível observar na Figura 4.15 (b) que a tensão sobre os módulos Peltier sofre inversão ao longo de cada ciclo, o que resulta na inversão do seu funcionamento. Essa forma de atuação permitiu uma convergência mais rápida para a temperatura desejada na placa fria, evitando uma região “morta” na inflexão entre acionamento para resfriamento e acionamento para aquecimento caso fosse utilizado um conversor digital analógico. Outra opção seria acionar em cada período somente o resfriamento ou o aquecimento, porém ensaios prévios mostraram uma grande demora para convergência e maior instabilidade.

A curva utilizada no levantamento dos parâmetros PID pode ser vista na Figura 4.16, onde foi aplicado um degrau no sistema, e o controle de temperatura utilizando tais parâmetros na Figura 4.17.

Figura 4.16 - Curva para levantamento dos parâmetros PID.

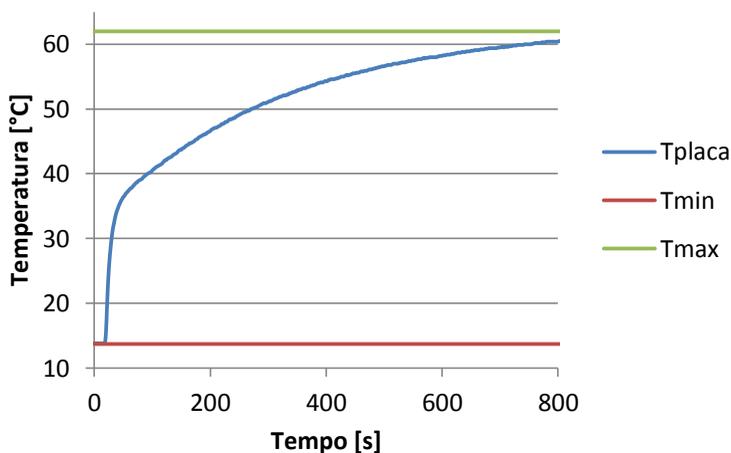
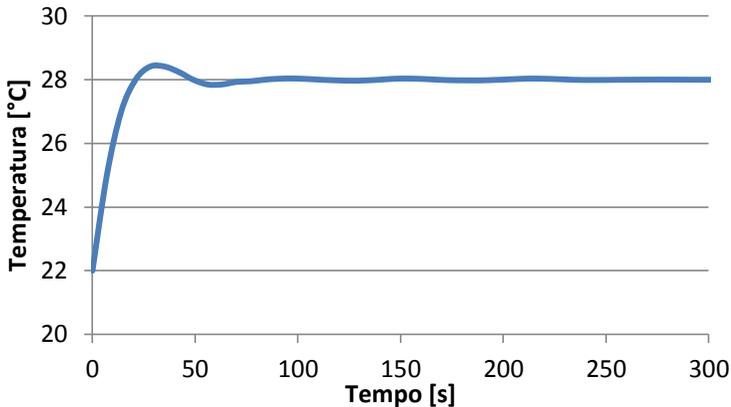


Figura 4.17 - Temperatura da placa fria controlada em 28°C.



Os parâmetros PID foram calculados utilizando o método Ziegler Nichols em malha aberta, descritos por Åström [53]. É possível observar na Figura 4.17 que no ensaio para analisar o comportamento do sistema houve uma rápida convergência para a temperatura desejada (28°C), sendo que o tempo necessário foi de aproximadamente 100 segundos.

Na Figura 4.18 é mostrado o equipamento montado e na Figura 4.19 o equipamento FOX 314 da LaserComp adquirido pelo LMPT.

Figura 4.18 – Foto do equipamento montado.



Figura 4.19 - Foto do FOX 314 da LaserComp.



Os bons resultados na estabilização da temperatura fria mostraram a viabilidade do sistema sem o uso de um banho termostaticado. Na Figura 4.19 é possível observar um equipamento que necessita o uso deste, o que aumenta o tamanho total do equipamento assim como seu custo final.

#### **4.6. Programa gerenciador**

O programa gerenciador do condutivímetro foi elaborado com a finalidade de efetuar a calibração do equipamento. A fim de facilitar a calibração, este foi dividido em quatro abas, onde a primeira aba é responsável pelo controle dos motores de passo (Figura 4.20), a segunda aba pelo controle da temperatura das placas (Figura 4.21), a terceira aba para aquisição das tensões (Figura 4.22) e a quarta e última aba para gravação dos dados (Figura 4.23).

Figura 4.20 – Controle dos motores de passo.

Conduktivmetro Mestrado 3.0

21/08/2014 - 11:57:06

Controle Motor de Passo | Controle PID Placas | Aquisição Fluxos | Gravação

Subir     Descer   

Número de Passos Motor 1:     Tensão Ponte de Wheatstone 1:   
 Número de Passos Motor 2:     Tensão Ponte de Wheatstone 2:   
 Número de Passos Motor 3:     Tensão Ponte de Wheatstone 3:   
 Número de Passos Motor 4:     Tensão Ponte de Wheatstone 4:

Na aba responsável pelo controle do motor de passo é possível ligar/desligar os motores além de efetuar a leitura das tensões de saída dos amplificadores de instrumentação que medem a deformação das barras de sustentação dos motores e o número de passos dado por cada motor de passo.

Para o controle da temperatura das placas, na segunda aba, o programa permite alterar os parâmetros de controle PID de cada placa a fim de se conseguir os melhores parâmetros, assim como os *setpoint* de temperatura. Além dos ajustes, mostra em tempo real a temperatura lida em cada placa e os valores de saída dos controladores.

Figura 4.21 – Controle da temperatura das placas.

Conduktivmetro Mestrado 3.0

21/08/2014 - 11:57:36

Controle Motor de Passo | Controle PID Placas | Aquisição Fluxos | Gravação

**Placa Superior**  
 P\_Gain:   
 I\_Gain:   
 D\_Gain:   
 Setpoint:

**Placa Inferior**  
 P\_Gain:   
 I\_Gain:   
 D\_Gain:   
 Setpoint:

Temperatura:     PID saída:   
 Temperatura:     PID saída:

Figura 4.22 – Aquisição das tensões.

Condutivimetro Mestrado 3.0

21/08/2014 - 11:59:10

Controle Motor de Passo | Controle PID Placas | **Aquisição Fluxos** | Gravação

Placa Superior

Tensão Fluxo: 0

Tensão Temperatura: 0

Placa Inferior:

Tensão Fluxo: 0

Tensão Temperatura: 0

Tensão T\_Ref: 0

Sair

Conforme pode ser visto na Figura 4.22, a aba das aquisições das tensões mostra os valores lidos em tensão das temperaturas e dos fluxímetros.

Figura 4.23 – Gravação.

Condutivimetro Mestrado 3.0

21/08/2014 - 11:58:14

Controle Motor de Passo | Controle PID Placas | Aquisição Fluxos | **Gravação**

Nome do arquivo: ensaido .bt

Gravar

Sair

A última aba é responsável pela gravação dos dados, onde o usuário seleciona quando deseja que esta comece assim como o seu nome. Os arquivos gerados são no formato “txt” e registram após cada leitura efetuada a data, a tensão do termistor de referência dos termopares, as tensões dos fluxímetros e termopares, os *setpoints* de temperatura e a saída dos controladores.

## 5. CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

### 5.1. Introdução

Neste capítulo serão abordados os procedimentos adotados para calibração e validação do equipamento montado, sendo este dividido em três partes. A primeira parte tratará do procedimento adotado para realização dos ensaios com as amostras padrão, a segunda abordará os cálculos para calibração e a terceira, e última parte, a incerteza de medição do equipamento.

### 5.2. Ensaios

#### 5.2.1. Medição da Espessura

Visando agilizar o processo de medição de condutividade, foi implementado um sistema de medição de espessura diretamente sobre as placas. Como serão ensaiadas não apenas amostras rígidas, mas também amostras deformáveis, tornou-se necessário incorporar um dispositivo de medição da pressão mecânica. Dessa forma foram utilizados motores de passo (movimentando a placa quente) sustentados por 04 vigas monitoradas por extensômetros. Os sinais dos extensômetros indicam a pressão sobre a amostra e também são utilizado para indicar o zero, ou seja, quando as placas são encostadas.

O procedimento consiste em efetuar a medição da tensão resultado da deformação das vigas de sustentação dos motores de passo com a placa quente estando suspensa, e em seguida com as placas encostadas (motores de passo forçados até o travamento). Os valores de tensão obtidos podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Tensões sobre cada viga.

Viga	Tensão - Placa quente suspensa [V]	Tensão Placas Encostadas [V]	Diferença de Tensão [V]	Tensão Limite Adotada[V]
1	1,642	1,573	0,069	1,578
2	0,723	0,650	0,073	0,657
3	1,070	0,992	0,078	1,000
4	0,522	0,449	0,073	0,456

Para evitar perda de informação dos passos enviados aos motores, foram adotados como deformações máximas das vigas 90% da tensão medida quando estas estavam submetidas a maior força que os motores podiam fornecer. Os valores mínimos de tensão adotada estão indicados na coluna 5 da Tabela 2. Cada motor de passo é desligado no momento em que a deformação limite da sua respectiva viga for atingida.

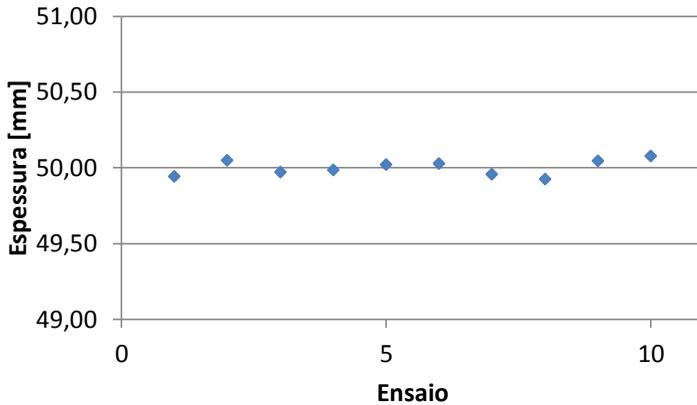
Após arbitrado a pressão a qual a placa quente sujeitará a amostra, foram realizados os ensaios para calibração da medição da espessura da mesma, seguindo os passos abaixo:

- zeragem;
- subida da placa quente;
- posicionamento da amostra;
- descida da placa quente.

Para efetuar a zeragem do equipamento a placa quente é pressionada sobre a placa fria, sem nenhuma amostra, até os motores de passo serem desligados. Após realizada a zeragem, a placa quente é levantada pelos motores de passo a fim de se obter uma abertura de 120 *mm*. Cada passo do motor equivale a um deslocamento de 0,01 *mm*. A amostra é então posicionada e a placa quente é descida até pressionar a amostra com a pressão pré-determinada, provocando o desligamento dos motores.

O valor da espessura média da amostra é resultado da média aritmética obtida pelos quatro motores. No total foram realizados 10 ensaios, que estão representados na Figura 5.1. O valor obtido em cada ensaio pode ser visto no Apêndice A. A incerteza resultante dos ensaios foi de 0,09 *mm* para um nível de confiança de 95%.

Figura 5.1 – Espessura média para cada ensaio.



Os ensaios foram realizados utilizando a amostra QM/43B, que possui uma espessura de 50 mm.

### 5.2.2. Aquisição das temperaturas e dos fluxos de calor

Conforme já mostrado no capítulo 2.3.3, a condutividade térmica é obtida a partir da equação 5.1

$$\lambda = \left[ \frac{(S_Q E_Q + S_F E_F)}{2} \right] \times \left[ \frac{L}{(T_Q - T_F)} \right] \quad [W/mK]$$

5.1

onde  $S$  é a constante de calibração do transdutor de fluxo de calor,  $E$  é a tensão de saída do transdutor de fluxo de calor,  $L$  é a espessura da amostra e  $T$  é a temperatura nas superfícies da amostra.

Segundo a norma ASTM C518 - 10 [27], no caso de dois fluxímetros similares é possível utilizar a soma da tensão de saída destes e calibrar o equipamento com uma única constante de calibração para os fluxímetros, utilizando a equação 5.2

$$S_{flux} = C \times \left[ \frac{(T_Q - T_F)}{(E_Q + E_F)} \right] \quad [W/m^2V] \quad 5.2$$

onde  $C$  é a condutância da amostra utilizada. Simplificando a equação 5.1, chega-se à equação 5.3:

$$\lambda = S_{flux} E_{flux} \times \left[ \frac{L}{(T_Q - T_F)} \right] \quad [W/mK] \quad 5.3$$

onde 4,

$$E_{flux} = E_Q + E_F \quad 5.4$$

Para facilitar a nomenclatura  $T_Q - T_F$  passará a ser chamado de  $\Delta T$ . Conforme pode ser observado na equação 5.2, para a calibração dos fluxímetros serão necessários os valores de  $\Delta T$  das quais a amostra estará sujeita e as tensões de saída dos fluxímetros.

Para calibração dos fluxímetros foram utilizadas 3 amostras padrão, e realizados 10 ensaios com cada amostra, submetidas a uma diferença de temperatura de 15 K. As amostras padrão utilizadas são mostradas na Tabela 3, amostras estas calibradas pelo National Physical Laboratory.

Tabela 3 – Amostras padrão utilizadas.

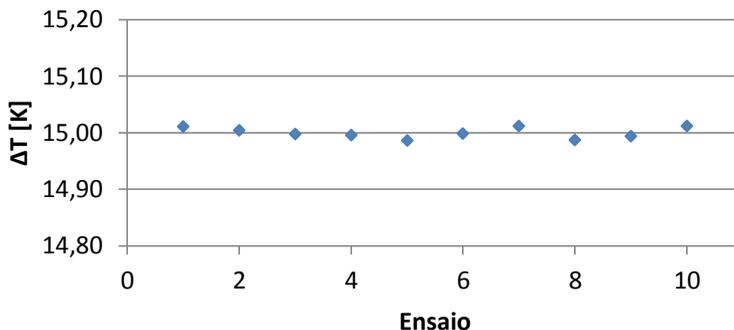
<b>Amostra</b>	<b>Condutividade a 25°C [W/mK]</b>	<b>Material</b>
QM/123a	0,0336	Fibra de Vidro
QM/43b	0,190	Perspex
QM/73b	0,423	Polietileno

Durante os ensaios foram efetuadas as medições das tensões dos termopares e do termistor da junta de referência para se obter a temperatura das placas. Para o cálculo da temperatura da junta de referência (a qual é medida com um termistor) foi utilizado um

<sup>4</sup> Segundo a norma ASTM C518 - 10 [27], no item 6.6.4.1, é citada a equação 5.2, porém a equação para o cálculo da condutividade precisar ser adaptada conforme as equações 5.3 e 5.4. A norma não faz nenhuma menção a esse detalhe no item 8.5.

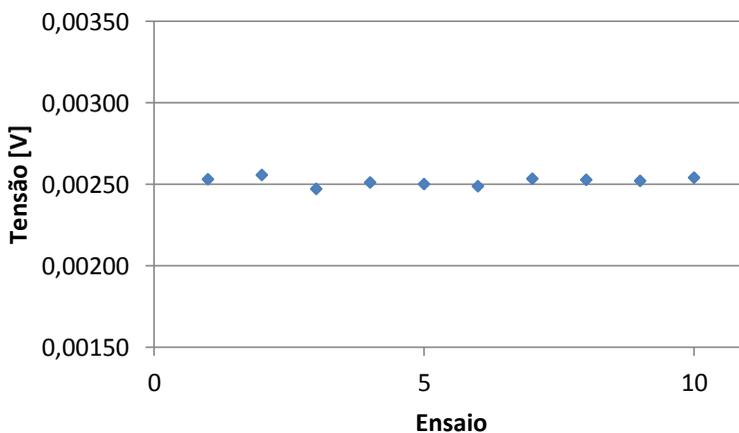
polinômio resultante da sua calibração em um banho termostatizado. Para o cálculo das temperaturas das placas (termopares tipo T) utilizou-se uma curva padrão fornecida pela empresa Omega Co. [55]. Os resultados das medições de temperatura dos ensaios para a amostra padrão QM/43B estão representados na Figura 5.2, apresentando uma incerteza  $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$  para um nível de confiança de 95%.

Figura 5.2 – Diferença de temperatura das placas para a amostra QM/43B.



Os resultados completos dos ensaios para obtenção do  $\Delta T$  estão no Apêndice A. Durante os mesmos ensaios também foram realizadas as medições das tensões de saída dos fluxímetros, mostradas na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/43B.



Os valores das tensões são mostrados no Apêndice A.

### 5.3. Cálculos para calibração

Após a realização das aquisições das temperaturas das placas e das tensões dos fluxímetros, utilizou-se a equação 5.2 a fim de se obter a constante  $S$  da calibração dos fluxímetros.

As condutâncias foram obtidas utilizando os polinômios para o cálculo da condutividade térmica das amostras (Esses polinômios são apresentados nos certificados de calibração no Anexo A).

Na Figura 5.4 são mostrados os resultados obtidos da constante  $S$  para a amostra QM/43B. No Apêndice A pode ser vistos todos os valores para o cálculo da constante  $S$ .

Analisando a Figura 5.4 é possível observar uma pequena variação da constante de calibração  $S$ , e comparando-a com a temperatura ambiente foi observada uma relação direta entre suas variações, conforme pode ser vista na Figura 5.5.

Figura 5.4 – Constante de calibração  $S$  e temperatura ambiente para cada ensaio utilizando a amostra QM/43B.

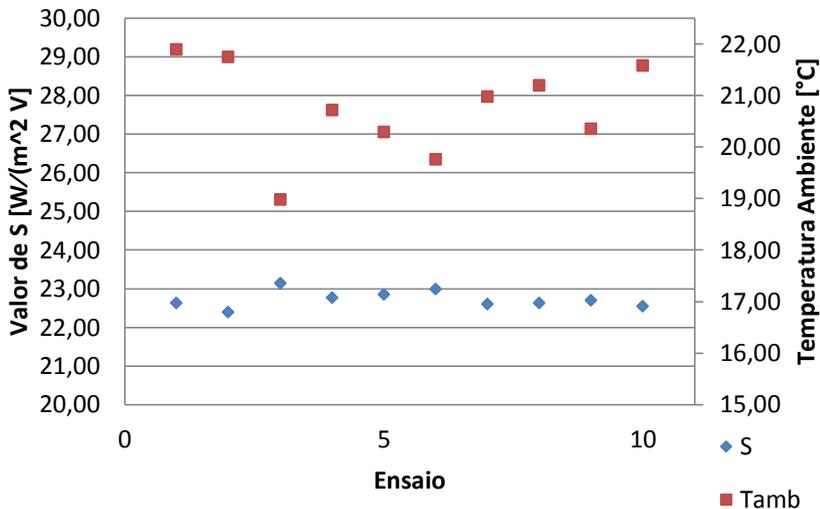
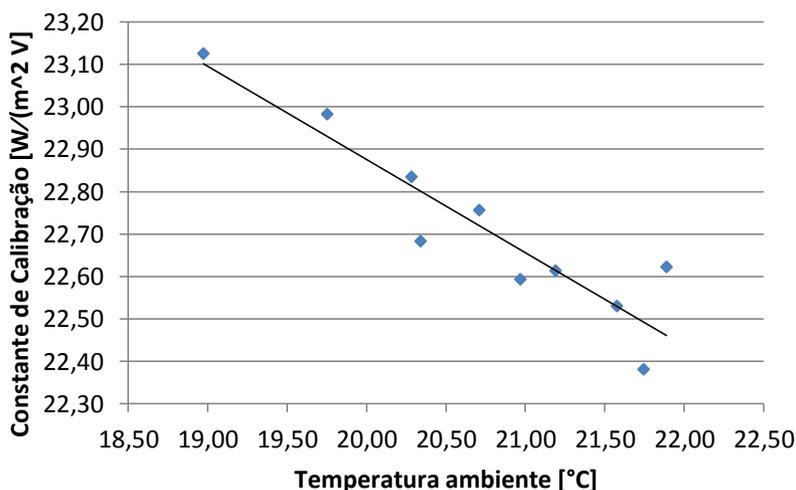


Figura 5.5 – Relação entre a constante de calibração  $S$  e a temperatura ambiente para a amostra QM/43B.



A relação observada é justificada pelas fugas laterais da amostra. Sendo assim, é de extrema importância que o ambiente de calibração do equipamento tenha uma temperatura controlada e que esta temperatura seja a mais próxima possível da qual o equipamento será utilizado.

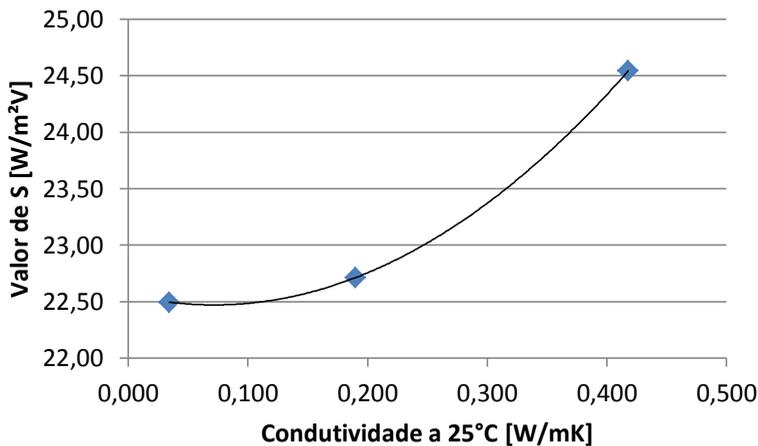
As constantes  $S$  das amostras podem ser observadas na Tabela 4

Tabela 4 – Resultados de constante de calibração  $S$  para cada amostra.

Amostra	$S$ [W/m <sup>2</sup> V]	Incerteza das constantes [%]	Condutividade a 25°C [W/mK]
QM/123a	22,50	2,9	0,034
QM/43b	22,71	2,7	0,190
QM/73b	24,54	2,7	0,418

Nota-se uma tendência da constante de calibração  $S$  aumentar com a condutividade da amostra. Figura 5.6 mostra com maior evidência.

Figura 5.6 - Valor da constante de calibração S em função da condutividade térmica da amostra.



Esse comportamento mostrado era esperado, uma vez que quanto maior for o valor da condutividade da amostra maior será a influência da resistência de contato na calibração (Brzezinski [32], [33]).

#### 5.4. Incerteza de medição

Utilizando o método de propagação de incertezas na equação 5.3, GUM [56], pode-se definir a incerteza de medição do equipamento por

$$u_{\lambda}^2 = \left[ u_{S_{flux}} \left( E_{flux} \frac{L}{\Delta T} \right) \right]^2 + \left[ u_{E_{flux}} \left( S_{flux} \frac{L}{\Delta T} \right) \right]^2 + \left[ u_L \left( S_{flux} E_{flux} \frac{1}{\Delta T} \right) \right]^2 + \left[ u_{\Delta T} \left( -S_{flux} E_{flux} \frac{L}{\Delta T^2} \right) \right]^2$$

5.5

onde  $u_{\lambda}$ ,  $u_{S_{flux}}$ ,  $u_{E_{flux}}$ ,  $u_L$  e  $u_{\Delta T}$  são respectivamente as incertezas da condutividade, da constante de calibração dos fluxímetros, da tensão de saída dos fluxímetros, da espessura da amostra e da diferença de temperatura a qual a amostra será submetida.

Foram utilizados os cálculos de incerteza tipo A, GUM [56] e Bell [57], para a medição da espessura da amostra ( $L$ ) e para a soma das tensões de saída dos fluxímetros ( $E_{flux}$ ). Já para o cálculo da incerteza da diferença de temperatura entre as placas quente e fria ( $\Delta T$ ) foi usada a incerteza da curva de calibração dada por Omega Co. [55] e a incerteza do sistema de aquisição de sinais desenvolvido. Os resultados das incertezas podem ser observados na Tabela 5.

Para o cálculo de incerteza da constante de calibração dos fluxímetros foi utilizada a equação 5.6

$$u_{S_{flux}}^2 = \left[ u_c \left( \frac{\Delta T}{E_{flux}} \right) \right]^2 + \left[ u_{\Delta T} \left( \frac{C}{E_{flux}} \right) \right]^2 + \left[ u_{E_{flux}} \left( -C \frac{\Delta T}{E_{flux}^2} \right) \right]^2$$

5.6

onde  $u_c$ , é a incerteza da condutância térmica da amostra utilizada, incerteza essa dada pelo certificado de calibração que pode ser visto no Anexo A. O valor resultante da incerteza da constante de calibração dos fluxímetros pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 – Incertezas da  $L$ ,  $E_{flux}$ ,  $\Delta T$  e  $S_{flux}$  para um intervalo de confiança de 95%.

Variável	Incerteza [%]
$U_L$	0,19
$U_{E_{flux}}$	1,7
$U_{\Delta T}$	0,12
$U_{S_{flux}}$	2,7

Fazendo uso da equação 5.5 foi obtida uma incerteza final de 3,2% para  $\lambda$  com um intervalo de confiança de 95%.

Os valores de incerteza obtidos com os ensaios de calibração podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das incertezas de medição para cada amostra utilizada.

Amostra	Incerteza [%]
QM/123a	3,6
QM/43b	3,2
QM/73b	3,2

Os resultados das incertezas de medição ficaram abaixo do máximo proposto, que era de 5%, significando que foi atingido o objetivo do trabalho.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1. Conclusões

Nesta dissertação foi abordado o desenvolvimento e montagem de um equipamento compacto para medição de condutividade térmica de materiais construtivos com uma incerteza inferior a 5%, o qual se obteve êxito.

Inicialmente foram apresentados diversos métodos utilizados para obtenção da condutividade térmica, abordando suas características e ressaltando vantagens e desvantagens de cada um. Dentre os métodos apresentados, o fluximétrico, utilizado neste trabalho, recebeu um maior enfoque, onde foram abordados detalhes construtivos e normatização existente.

Posteriormente foram efetuadas simulações que tinham como objetivo mensurar detalhes necessários para a construção do equipamento, como posição dos módulos de resfriamento termoeletrico, espessura mínima da placa de fria, tamanho dos fluxímetros utilizados, influência dos isolamentos laterais e espessura da amostra. Tais simulações foram de fundamental importância para o desenvolvimento correto do equipamento.

Depois de realizada as simulações foi possível iniciar a montagem do equipamento. Foram mostrados os detalhes da montagem das placas fria e quente do equipamento, o sistema de medição da espessura da amostra, o sistema de medição para leitura dos fluxímetros e termopares. Foi apresentado ainda um sistema de controle da temperatura das placas, utilizando módulos termoeletricos (Peltier), detalhando os circuitos desenvolvidos e o software gerenciador do dispositivo.

Os resultados obtidos no controle de temperatura da placa fria utilizando os módulos Peltier apresentaram boa estabilidade e rápida convergência. Desta forma mostrou-se viável o seu uso, dispensando assim o uso do banho termostatizado frio, o que reduziu em muito o tamanho e custo do equipamento.

Para calibração do dispositivo foram utilizadas amostras padrão. Foram calibrados o sistema de medição da espessura da amostra, o sistema de medição da temperatura das placas fria e quente e o sistema de medição dos fluxímetros, seguindo a norma ASTM C51. Por fim, utilizando o teorema de propagação de incertezas foram levantadas as incertezas das medições.

Comparando as incertezas de medição com o proposto no início do trabalho, pode-se concluir que o objetivo principal foi atingido, ou seja, obter uma incerteza de medição inferior a 5%. Foi obtido uma incerteza de 3,6% para a amostra com condutividade igual a 0,0336 W/mK, 3,2% para a amostra com condutividade igual a 0,190 W/mK e 3,2% para a amostra com condutividade igual a 0,423 W/mK.

## 6.2. Trabalhos Futuros

O dispositivo pode ainda ser aperfeiçoado e ter sua incerteza diminuída consideravelmente. Dentre as possibilidades de estudo está a análise de influência da temperatura ambiente nos ensaios, elaborar um isolamento lateral ativo, desenvolver um condutímetro com fluxo reversível, analisar o efeito da resistência de contato em amostras com alta condutividade e calibrar o sistema de medição de espessura para conhecer a pressão a qual a amostra está submetida.

Conforme foi observado nos ensaios, existe uma correlação direta da constante de calibração dos fluxímetros com a temperatura ambiente. Das grandezas calibradas a constante dos fluxímetros foi a que apresentou maior incerteza. Dessa forma é importante uma análise mais detalhada da influência da temperatura ambiente nos ensaios.

Como alternativa para melhorar o desempenho do isolamento lateral é interessante estudar a possibilidade de implementar um isolamento ativo no equipamento.

O desenvolvimento de um condutímetro com fluxo reversível é de grande importância para análise de isolamentos em ambientes mais frios, onde as residências perdem calor pelas coberturas o ambiente externo. Dessa forma é recomendado efetuar o controle de temperatura por módulos termoeletrônicos nas duas placas, possibilitando gerar fluxo de calor nas duas direções (ascendente e descendente)

Conforme observado na calibração do equipamento, a resistência de contato apresenta grande influência na constante do fluxímetro quando são medidas amostras com grande condutividade térmica. Esse estudo poderia utilizar amostras com alta condutividade e acabamentos superficiais diferenciados para avaliar o efeito da resistência de contato. Assim será possível inclusive ampliar a faixa de medição do equipamento.

O sistema utilizado para medição da espessura da amostra permite uma calibração da deformação máxima a qual a viga poderá sofrer. Essa característica possibilita ajustar qual será a máxima força a

qual a placa superior irá imprimir sobre a amostra. No caso de amostras que sofrem deformações quando pressionadas é de fundamental importância conhecer quais as forças estas estarão submetidas.



## REFERÊNCIAS

- [1] **Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F.O.R.** Eficiência Energética na Arquitetura . 3 ed., 2013.
- [2] **Eletrobras/Procel Edifica, Inmetro, CB3E.** Introdução ao Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações. Rio de Janeiro, 2013.
- [3] **Souza, A., Guerra, J.C.C., Kruger, E.L.** Os programas brasileiros em eficiência energética como agentes de reposicionamento do setor elétrico. 1 ed. Revista Tecnologia e Sociedade, 2011.
- [4] **Inmetro.** Folder PBE. Disponível em <[http://www2.inmetro.gov.br/pbe/pdf/folder\\_pbe.pdf](http://www2.inmetro.gov.br/pbe/pdf/folder_pbe.pdf)> Acessado em 03/09/2014.
- [5] **PBE Edifica.** O que é PBE Edifica? Disponível em <<http://www.pbeedifica.com.br/conhecendo-pbe-edifica>> Acessado em 02/09/2014.
- [6] **Dinwiddie, Ralph.** Thermal Conductivity 26/Thermal Expansion 14. Lancaster, Pennsylvania United States of America: DEStch Publications, 2005.
- [7] **ASTM.** Designation E1461 - 13: Standart Test Method for Diffusivity by the Flash Method. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [8] **ISO.** Designation 18755:2005: Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramis) – Determination of thermal diffusivity of monolithic ceramics by laser flash method. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization, 1995.
- [9] **Parker, W.J., Jenkins, R.J., Butler, C.P., and Abbott, G.L.** A Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat

Capacity, and Thermal Conductivity. Journal of Applied Physics, 32 (9), 1961. p. 1679 – 1684.

- [10] **Heckman, R. C.** Finite pulse-time and heat-loss effects in pulse thermal diffusivity measurements. Albuquerque, New Mexico, United States of America: Sandi Laboratories, 1972.
- [11] **Cape, J.A., Lehman, G.W.** Temperatura and Finite Pulse-Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity. Journal of Applied Physics, 34 (7), 1963. p. 1909 – 1913.
- [12] **Taylor, R.E.** Critical evaluation of flash method for measuring thermal diffusivity. Rev. Int. Htes Temp. Refract. 12, 1975. p. 141 – 146.
- [13] **He, Y.** Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor. Part 1. Theoretical considerations. Thermochimica Acta, 2005. p. 122 – 129.
- [14] **Gustafsson, Silas E.** Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. Department of Physics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1990.
- [15] **Roder, Hans M. A.** Transient Hot Wire Thermal Conductivity Apparatus for Fluids. Journal of Research of the National Bureau of Standards, No.5, September-October 1981. v. 86.
- [16] **Saito, Yoshitoshi; Kanematsu, Kinji; Matsui, Taijiro.** Measurement of Thermal Conductivity of Magnesite Brick with Straight Brick Specimens by Hot Wire Method. The Japan Institute of Metals, Materials Transactions, 2009. v. 50, p. 2623 – 2630.
- [17] **Fernandes, C.P.** Estudo dos processos de condensação e migração de umidade em meios porosos consolidados. Análise experimental de uma argamassa de cal e cimento. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.

- [18]**ASTM**. Designation C177 - 10: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [19]**ISO**. Designation 8301:1991(E): Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization, 1991.
- [20]**ABNT**. Projeto de Norma 02:135.07-001/4: Desempenho Térmico de Edificações Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- [21]**ABNT**. NBR 15220: Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.
- [22]**Moura, L.M.** Desenvolvimento de um protótipo de placa quente protegida. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- [23]**ASTM**. Designation C236 - 10: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties By Means of The Guarded Hot Box. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [24]**ISO**. Designation 8990:1991(E): Thermal insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization, 1991.
- [25]**ABNT**. NBR 6488: Componentes de construção – Determinação da condutância e transmitância térmica – Método caixa quente protegida. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980.

- [26] **Güths, S.** Desenvolvimento e avaliação de um dispositivo caixa quente protegida. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [27] **ASTM.** Designation C518 - 10: Standart Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: American Society for Testing and Materials, 2010.
- [28] **ISO.** Designation 8301:1991(E): Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization, 1991.
- [29] **ABNT.** NBR 15220: Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico: 2003.
- [30] **Güths, S.** Um método transiente para medição de propriedades térmicas. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1990.
- [31] **Güths, S.** Anémomètre à Effet Peltier et Fluxmètre Thermique Conception et Réalisation Application à L'Etude de La Convection Naturelle. Univesité d'Artois, 1994.
- [32] **Brzezinski, Andrzej; Tleoubaev, Akhan.** Effects of Interface Resistance on Measurements of Thermal Conductivity of Composites and Polymers. Saugus, Massachusetts, United States of America: LaserComp Inc., 2002.
- [33] **Brzezinski, Andrzej; Tleoubaev, Akhan.** Errors of the Heat Flow Meter Method Caused by Thermal Contact Resistance. Birmingham, Alabama, United States of America: Thermal Conductivity 29 / Thermal Expansion 17 Conference, 2007.
- [34] **Haynes, W. M.** CRC Handbook of Chemistry and Physics: A Ready-Reference Book of Chemical and Physical. 93 ed. Boca Raton: CRC Press, 2012-2013. Capítulo: 12. , p. 209.

- [35]**ANSYS**. ANSYS R14.5 Release Highlights. Disponível em <<http://www.ansys.com/Products/ANSYS+14.5+Release+Highlights>> Acessado em 03/09/2014.
- [36]**DiSalvo, Francis J.** Thermoelectric Cooling and Power Generation. Washington, District of Columbia, United States of America: Science, 30 July 1999. v. 285, p. 703 – 706.
- [37]**ANSYS**. Design Exploration. Release 12.1, November 2009.
- [38]**Hebei I.T.** Datasheet: TEC1-12706. Rev 2.03, 2006.
- [39]**Hughes, Austin**. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. Third Edition. Burlington, Massachusetts, United States of America: Elsevier Ltd., 2006.
- [40]**Excel Sensores**. Site: < <http://www.excelsensor.com.br/>>.
- [41]**Hoffmann, Karl**. Applying the Wheatstone Bridge Circuit. Darmstadt, Alemanha: HBM, 2005.
- [42]**Graeme, Jerald G.** Applications of operational amplifiers: Third Generation Techniques. Tokio, Japan: Mcgraw-Hill, Ltd., 1973.
- [43]**OSM Technology**. Datasheet: 11LS16-0754N-180. Rev. A, 2012.
- [44]**Texas Instruments**. Datasheet: SN754410 Quadruple Half – H Driver. Rev. November 1995.
- [45]**Atmel Corporation**. Datasheet: ATmega16A. Rev. 1864B, 2007/2009.
- [46]**Åström, Karl Johan**. PID Control - Control System Design. Department of Mechanical and Environmental Engineering, University of California, 2002.
- [47]**Atmel Corporation**. Datasheet: ATtyne2313. Rev. 2543I, 2004/2006.

- [48]**Hodges, David A.** Darlington's Contributions to Transistor Circuit Design. IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications, Vol 46, 1999.
- [49]**Fairchild Semiconductor.** Datasheet: BC548 - ABC. Rev. B, 1997.
- [50]**Fairchild Semiconductor.** Datasheet: TIP41 Series. Rev. A, 2000.
- [51]**Bourns.** Datasheet: TIP3055 NPN - SILICON POWER TRANSISTOR. Revised September 2002.
- [52]**Bourns.** Datasheet: TIP2955 PNP - SILICON POWER TRANSISTOR. Revised September 2002.
- [53]**Åström, K. J.; Murray, R. M.** Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Version 2.11b, Princeton University Press, 28 September 2012.
- [54]**Texas Instruments.** Datasheet: 24-Bit Analog-to-Digital Converters for Temperature Sensors. Rev. SBAS264G, October 2011.
- [55]**Omega Engineering.** ITS-90 Thermocouple Direct and Inverse Polynomials. 2010.
- [56]**Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM).** Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Sevres, 2008.
- [57]**Bell, Stephanie.** Measurement Good Practice Guide: A beginners's Guide to Uncertainty of Measurement. Teddington, Middlesex, United Kingdom: National Physical Laboratory, March 2001.

**APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS**

Tabela A 1 – Ensaios para calibração do sistema para medir a espessura da amostra.

<b>Medição da Espessura (Amostra com 50 mm)</b>						
<b>Ensaio</b>	<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>	<b>Motor 3</b>	<b>Motor 4</b>	<b>Média</b>	<b>Espessura [mm]</b>
1	4988	5000	4998	4991	4994	49,9
2	5012	5010	5002	4995	5005	50,0
3	4998	4995	4996	4999	4997	50,0
4	5001	4991	4998	5004	4999	50,0
5	5002	4998	5008	5000	5002	50,0
6	4996	4999	5010	5005	5003	50,0
7	4999	4989	4995	4999	4996	50,0
8	4989	4993	4997	4990	4992	49,9
9	5003	5000	5004	5010	5004	50,0
10	5005	5003	5008	5015	5008	50,1

Tabela A 2 – Medições das temperaturas nos ensaios para a amostra QM/123A

Ensaio	Delta Temperatura [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
1	15,00	21,9
2	15,00	21,7
3	14,99	19,0
4	15,00	19,3
5	15,00	21,5
6	14,99	20,1
7	14,99	18,9
8	15,00	19,1
9	15,00	21,9
10	15,01	20,5

Tabela A 3 – Medições das temperaturas nos ensaios para a amostra QM/43b

Ensaio	Delta Temperatura [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
1	15,01	21,9
2	15,00	21,7
3	15,00	19,0
4	15,00	20,7
5	14,99	20,3
6	15,00	19,8
7	15,01	21,0
8	14,99	21,2
9	14,99	20,3
10	15,01	21,6

Tabela A 4 – Medições das temperaturas nos ensaios para a amostra QM/73b

Ensaio	Delta Temperatura [°C]	Temperatura Ambiente [°C]
1	15,00	21,9
2	15,02	21,7
3	15,01	19,0
4	15,09	20,7
5	15,01	21,8
6	15,04	20,2
7	15,00	19,0
8	15,02	21,2
9	14,98	21,9
10	15,04	19,9

Tabela A 5 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/123a.

Soma dos Fluxos Amostra QM/123a			
Ensaio	Tensão do Fluxímetro Fluxo Sup [mV]	Tensão do Fluxímetro Fluxo Inf [mV]	Soma Tensões [mV]
1	0,336	0,278	0,614
2	0,346	0,271	0,617
3	0,349	0,263	0,612
4	0,336	0,273	0,609
5	0,346	0,279	0,625
6	0,349	0,263	0,612
7	0,336	0,268	0,604
8	0,328	0,279	0,607
9	0,346	0,280	0,626
10	0,345	0,273	0,618

Tabela A 6 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/43b.

<b>Soma dos Fluxos Amostra QM/43b</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tensão do Fluxímetro Fluxo Sup [mV]</b>	<b>Tensão do Fluxímetro Fluxo Inf [mV]</b>	<b>Soma Tensões [mV]</b>
1	1,454	1,075	2,529
2	1,510	1,044	2,555
3	1,339	1,132	2,471
4	1,427	1,084	2,511
5	1,406	1,095	2,501
6	1,369	1,118	2,487
7	1,472	1,060	2,532
8	0,715	1,810	2,525
9	1,440	1,079	2,519
10	1,027	1,512	2,539

Tabela A 7 – Soma das tensões de saída dos fluxímetros para a amostra QM/73b.

<b>Soma dos Fluxos Amostra QM/73b</b>			
<b>Ensaio</b>	<b>Tensão do Fluxímetro Fluxo Sup [mV]</b>	<b>Tensão do Fluxímetro Fluxo Inf [mV]</b>	<b>Soma Tensões [mV]</b>
1	2,939	2,162	5,101
2	2,904	2,283	5,187
3	3,008	2,134	5,142
4	2,893	2,180	5,073
5	2,836	2,278	5,114
6	3,062	2,237	5,299
7	2,827	2,266	5,093
8	2,957	2,227	5,184
9	2,922	2,203	5,125
10	2,954	2,128	5,082

Tabela A 8 – Valores da condutância para a amostra QM/123a.

<b>Condutância da Amostra (2% de Incerteza) QM/123a</b>	
Ensaio	Valor [mW/K]
1	0,926
2	0,923
3	0,922
4	0,923
5	0,924
6	0,919
7	0,915
8	0,916
9	0,926
10	0,921

Tabela A 9 – Valores da condutância para a amostra QM/43b.

<b>Condutância da Amostra (2% de Incerteza) QM/43b</b>	
Ensaio	Valor [mW/K]
1	3,81
2	3,81
3	3,81
4	3,81
5	3,81
6	3,81
7	3,81
8	3,81
9	3,81
10	3,81

Tabela A 10 – Valores da condutância para a amostra QM/73b.

<b>Condutância da Amostra (2% de Incerteza) QM/73b</b>	
Ensaio	Valor [mW/K]
1	8,36
2	8,39
3	8,43
4	8,36
5	8,35
6	8,39
7	8,42
8	8,36
9	8,34
10	8,39

**ANEXO A – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO EMITIDOS  
PELO NPL DAS AMOSTRAS DE FIBRA DE VIDRO, PERSPEX  
E POLIETILENO.**

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Teddington Middlesex TW11 0LW England

Certificate of Calibration

THERMAL CONDUCTIVITY OF  
GLASS FIBRE BOARD



FOR : Dr R Lamberts  
Univ. de Federal de Santa Catarina  
Trindade  
Florianopolis  
Santa Catarina  
BRAZIL

DESCRIPTION : A pair of glass fibre board specimens measuring  
approximately 303 x 301 x 37 mm

IDENTIFICATION : Order No. OPB-5211  
Specimens labelled QM/123A and B

OBJECTIVE : To provide a transfer standard with certified  
thermal conductivity values over the range 0 °C to  
80 °C.

BASIS OF TEST : Guarded Hot-plate Method: BS 874:Section 2.1:1986  
and ISO 8302

REFERENCE 12321/90/022

PAGE 1 OF 3

DATE 21 January 1991

SIGNED  for Director

CHECKED 

*This Certificate may not be published except in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Director. It does not of itself inure to the subject of calibration any attributes beyond those shown by the data contained herein.*

## NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Continuation of Certificate

MEASUREMENTS

Two glass fibre board specimens of closely matching density were selected from the NPL stock and their thermal conductivity was measured at six temperatures using a precision guarded hot-plate apparatus conforming to BS874:Section 2.1:1986 and ISO 8302. In this apparatus eight pairs of thermocouples and a 20-junction differential thermocouple are used to monitor the temperature balance between the guard and metering sections of the heater plate. The plate surfaces have a total hemispherical emittance in excess of 0.9 and all the temperature sensors and electrical instruments used are calibrated with traceability to national standards. The thermal conductivity measurements were made at an imposed specimen thickness of 0.03761 m (density 149 kg/m<sup>3</sup>) and with a temperature difference between the hot and cold plates of about 18 K.

RESULTS

The results are shown in Table 1.

Table 1

Mean Test Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m.K)
-1.17	0.03132
16.54	0.03326
28.03	0.03447
36.80	0.03550
58.24	0.03769
75.52	0.03935

A least squares fit to these measured values gives the following expression for the thermal conductivity of the specimens as a function of temperature

$$\lambda = ( 0.03152 + 0.000105 \theta ) \text{ W/m.K}$$

where  $\theta$  is the temperature in degrees Celsius.

This expression which is in close agreement with previous expressions for samples from this stock, can be used to evaluate the thermal conductivity at any temperature between 0 °C and 80 °C within the uncertainty specified below.

REFERENCE 12321/90/022

PAGE 2 OF 3

CHECKED

*DLO*

ADM/17A/85

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Continuation of Certificate

For convenience, derived thermal conductivity values at 10 °C intervals are given in Table 2.

Table 2

Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m.K)
0	0.0315
10	0.0326
20	0.0336
30	0.0347
40	0.0357
50	0.0368
60	0.0378
70	0.0389
80	0.0399

UNCERTAINTIES

The total uncertainty in the thermal conductivity values is estimated to be within  $\pm 1.5\%$  at the 95% confidence level.

CAUTION

1. The specimens should be handled with care and kept in the case provided. To avoid the possibility of error due to moisture absorption it is recommended that the specimens should be conditioned for at least 24 hours in a well ventilated part of the test laboratory before use. In case of doubt the specimens may be oven-dried at 105 °C for several hours and then allowed to cool and reach equilibrium in the laboratory environment.
2. In the present calibration the specimens were measured under load in the apparatus at a mean density of 149 kg/m<sup>3</sup>. Although their thermal conductivity is not strongly dependent on density  $\Delta\lambda/\lambda < 0.15 \Delta\rho/\rho$ , excessive loading of the specimens in the apparatus should be avoided.

REFERENCE 12321/90/022  
CHECKED *DJA*

PAGE 3 OF 3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Teddington Middlesex TW11 0LW England

Certificate of Calibration



THERMAL CONDUCTIVITY OF A PAIR  
PERSPEX SPECIMENS

FOR : Dr R Lamberts  
Univ. de Federal de Santa Catarina  
Trindade  
Florianopolis  
Santa Catarina  
BRAZIL

DESCRIPTION : A pair of perspex specimens measuring approximately  
305 x 305 x 50 mm.

IDENTIFICATION : Order No. OPB-5211  
Specimens labelled QM/43A and B

OBJECTIVE : To provide a transfer standard with certified  
thermal conductivity values over the temperature  
range 10 °C to 70 °C.

BASIS OF TEST : Guarded hot-plate method: BS 874:Section 2.1:1986  
and ISO 8302.

REFERENCE 12321/90/024

PAGE 1 OF 3

DATE 21 January 1991

SIGNED

*M. Williams*  
for Director

CHECKED *D. DeLoren*

*This Certificate may not be published except in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Director. It does not of itself impute to the subject of calibration any attributes beyond those shown by the data contained herein.*

ADM/16/85

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Continuation of Certificate

MEASUREMENTS

An order was received for a pair of perspex specimens measuring approximately 305 x 305 x 50 mm having certified thermal conductivity values over the temperature range 10 °C to 70 °C. Suitable specimens from our stock of material were selected and their thermal conductivity was measured at six temperatures using a precision guarded hot plate conforming with BS74:Section 2.1:1986 and ISO 8302; all thermocouples and instruments used were calibrated with traceability to the UK national standards. The main surfaces of the specimens were flat to better than 0.15 mm. Temperatures on the specimen surfaces were measured by means of thermocouples with thermo-junctions rolled flat to 0.1 mm thick. These were taped to the surface with a thin smear of ZnO loaded grease beneath each junction to improve thermal contact. Interface sheets of 3 mm thick silicone foam rubber were used to provide uniform thermal contact between specimen and plate surfaces.

RESULTS

The results are shown in Table 1.

Table 1

Mean Test Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m.K)
5.80	0.1880
15.52	0.1895
30.13	0.1907
39.39	0.1925
50.64	0.1944
61.28	0.1959

A least squares fit to these measured values gives the following expression for the thermal conductivity of the specimens as a function of temperature

$$\lambda = (0.1870 + 0.000142 \theta) \text{ W/m.K}$$

where  $\theta$  is the temperature in degrees Celsius.

This expression can be used to evaluate the thermal conductivity at any temperature between 10 °C and 70 °C within the uncertainty specified below.

REFERENCE 12321/90/024  
CHECKED *Ded.*

PAGE 2 OF 3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Continuation of Certificate

For convenience, thermal conductivity values at 10 °C intervals derived from the expression are given in Table 2.

Table 2

Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m.K)
10	0.189
20	0.190
30	0.191
40	0.193
50	0.194
60	0.196
70	0.197

UNCERTAINTIES

The total uncertainty in the thermal conductivity values is estimated to be less than ±2% at the 95% confidence level.

CAUTION

1 The specimens should be handled with care and kept in the case provided. Suitable precautions should be taken to prevent surface abrasions and damage by chemical solvents.

2 To reduce the possibility of physical distortion the specimens should not be subjected to hot or cold plate temperatures outside the range -10 °C to +75 °C and the temperature drop across the faces of the specimen should be restricted to no more than 15 °C. The flatness of the specimen faces should be checked periodically.

REFERENCE 12321/90/024  
CHECKED *Deo.*

PAGE 3 OF 3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Teddington Middlesex TW11 0LW England

Certificate of Calibration

THERMAL CONDUCTIVITY OF A PAIR  
POLYTHENE SPECIMENS



FOR : Dr R Lamberts  
Univ. de Federal de Santa Catarina  
Trindade  
Florianopolis  
Santa Catarina  
BRAZIL

DESCRIPTION : A pair of polythene specimens measuring  
approximately 305 x 305 x 50 mm.

IDENTIFICATION : Order No. OPB-5211  
Specimens labelled QM/73A and B

OBJECTIVE : To provide a transfer standard with certified  
thermal conductivity values over the temperature  
range 10 °C to 45 °C.

BASIS OF TEST : Guarded hot-plate method: BS 874:Section 2.1:1986  
and ISO 8302.

REFERENCE 12321/90/021

PAGE 1 OF 3

DATE 21 January 1991

SIGNED

for Director

CHECKED *D. Shen*

*This Certificate may not be published except in full, unless permission for the publication of an approved extract has been obtained in writing from the Director. It does not of itself impute to the subject of calibration any attributes beyond those shown by the data contained herein.*

ADM/16/8

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Continuation of Certificate

MEASUREMENTS

An order was received for a pair of polythene specimens measuring approximately 305 x 305 x 50 mm having certified thermal conductivity values over the temperature range 10 °C to 45 °C. Suitable specimens from our stock of material were selected and heat treated at 82 °C for 8 days before their main surfaces were machined flat to better than 0.2 mm. Their thermal conductivity was measured at four temperatures using a precision guarded hot plate conforming with BS874:Section 2.1:1986 and ISO 8302; all thermocouples and instruments used were calibrated with traceability to the UK national standards. Temperatures on the specimen surfaces were measured by means of thermocouples with thermo-junctions rolled flat to 0.1 mm thick. These were taped to the surface with a thin smear of ZnO loaded grease beneath each junction to improve thermal contact. Interface sheets of 3 mm thick silicone foam rubber were used to provide uniform thermal contact between specimen and plate surfaces.

RESULTS

The results are shown in Table 1.

Table 1

Mean Test Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m.K)
9.33	0.4341
18.50	0.4247
28.42	0.4145
44.85	0.3982

A least squares fit to these measured values gives the following expression for the thermal conductivity of the specimens as a function of temperature

$$\lambda = (0.4434 - 0.001011 \theta) \text{ W/m.K}$$

where  $\theta$  is the temperature in degrees Celsius.

This expression can be used to evaluate the thermal conductivity at any temperature between 10 °C and 45 °C within the uncertainty specified below.

REFERENCE 12321/90/021  
CHECKED *DJL*

PAGE 2 OF 3

ADM17A 85

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY  
Continuation of Certificate

For convenience, thermal conductivity values at 5 °C intervals derived from the expression are given in Table 2.

Table 2

Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m.K)
10	0.433
15	0.428
20	0.423
25	0.418
30	0.413
35	0.408
40	0.403
45	0.398

UNCERTAINTIES

The total uncertainty in the thermal conductivity values is estimated to be less than ±2% at the 95% confidence level.

CAUTION

1 The specimens should be handled with care and kept in the case provided. Suitable precautions should be taken to prevent surface abrasions and damage by chemical solvents.

2 To reduce the possibility of physical distortion the specimens should not be subjected to hot or cold plate temperatures outside the range 0 °C to +60 °C and the temperature drop across the faces of the specimen should be restricted to no more than 15 °C. The flatness of the specimen faces should be checked periodically.

	Peso [kg]	Dens. [kg/m <sup>3</sup> ]
QM/73A	4,300	
QM/73B	4,315	

REFERENCE 12321/90/021  
CHECKED *DM*

PAGE 3 OF 3