

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE EQUIPAMENTO
DE PLACA QUENTE PROTEGIDA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS MAURO MOURA

Florianópolis, dezembro de 1993

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE EQUIPAMENTO
DE PLACA QUENTE PROTEGIDA**

LUÍS MAURO MOURA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA**

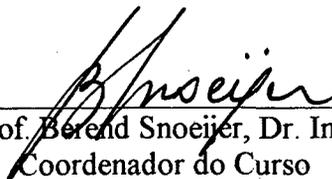
**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONHECIMENTO CIÊNCIAS
TÉRMICAS APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



Prof. Roberto Lamberts, Ph. D.
Orientador



Prof. Paulo Cesar Philippi, Dr. Ing.
Co-Orientador

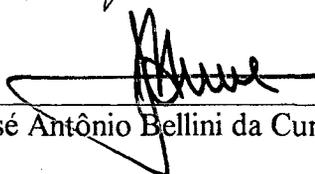


Prof. Berend Snoeijer, Dr. Ing.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA:



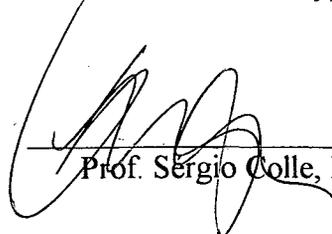
Prof. Roberto Lamberts, Ph. D.
Presidente



Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.



Prof. Paulo Cesar Philippi, Dr. Ing.



Prof. Sérgio Colle, D. Sc.

A minha esposa pelo amor

A meus pais pelo incentivo

A meu irmão pela amizade

AGRADECIMENTOS

Aos professores Roberto Lamberts e Paulo César Philippi, pela orientação, apoio e amizade.

Ao professor José Antônio Bellini da Cunha Neto, pela ajuda nos momentos finais deste trabalho e participação na banca examinadora.

Ao professor Sérgio Colle, pela sua participação na banca examinadora.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e a universidade pública brasileira, que possibilitaram a minha formação acadêmica.

Ao Ricardo Veríssimo que com extrema dedicação e competência me auxiliou na montagem do equipamento, a ele todo o meu agradecimento.

Ao Eng. Wilson Dutra Sampaio, da empresa Microquímica Ind. e Com., pela indispensável ajuda na implementação e realização das modificações no protótipo do sistema de aquisição e controle de sinais.

Ao Diego Rauber e Ricardo Veríssimo pela ajuda na elaboração das figuras deste trabalho.

Aos colegas do LMPT, de maneira especial Celso, Henor, Fábio e todos os demais pela agradável amizade.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XV
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2- CONCEITOS E FUNDAMENTOS EM TRANSMISSÃO	
DE CALOR.....	4
2.1 - Introdução.....	4
2.2 - Processos de Transferência de Calor.....	4
2.2.1 - Condução.....	4
2.2.1 - Equação da Difusão Térmica	5
2.2.2 - Convecção.....	6
2.2.3 - Radiação	7
2.2.4 - Transferência de Massa.....	8
2.3 - Propriedades Termofísicas dos Materiais	8
2.3.1 - Introdução.....	8
2.3.2 - A Condutividade Térmica	9
2.3.3 - A Difusividade Térmica	11
2.3.4 - O Calor Específico.....	11
CAPÍTULO 3- MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE	
MATERIAIS ISOLANTES.....	13
3.1 - Introdução.....	13
3.2 - Método da Placa Quente Protegida.....	16
3.3 - Método Utilizando Transdutores de Fluxo de Calor.....	18

3.4 - Método do Calorímetro a Água	19
3.5- Método do Disco-Quente	20
3.6 - Método do Tubo-Quente.....	20
3.7 - Método da Caixa-Quente.....	21
3.8 - Outros Métodos	22
CAPÍTULO 4- MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA.....	24
4.1 - Introdução	24
4.2 - Placa Quente Protegida	26
4.3 - Placa Fria	29
4.4 - Amostra	32
4.5 - Isolação do Equipamento e Condições do Laboratório	35
4.6 - Medição dos Parâmetros para o Cálculo da Condutividade	
Térmica	35
4.6.1 - Introdução	35
4.6.2 - Potência Elétrica	35
4.6.3 - Área.....	36
4.6.4 - Espessura.....	36
4.6.5 - Medição de Temperatura.....	37
4.7 - Contato Térmico entre Amostras e Placas	39
4.8 - Condição de Regime Permanente	40
4.9 - Análise de Erros.....	42
4.9.1 - Introdução	42
4.9.2 - Perdas Laterais do Fluxo de Calor (Q_l).....	43
4.9.3 - Perdas de Calor entre o Núcleo e o Anel de Guarda	50
4.9.4 - Heterogeneidades na Amostra.....	58
4.9.5 - Posicionamento dos Sensores de Temperatura.....	61
CAPÍTULO 5- EQUIPAMENTO DE PLACA QUENTE PROTEGIDA -	

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	63
5.1 - Introdução.....	63
5.2 - Placa Quente	67
5.3 - Placa Fria	70
5.4 - Sistema de Aquisição e Controle de Sinais.....	71
5.4.1 - Introdução.....	71
5.4.2 - Sistema para Interfacear Equipamentos MQ12/8 PC	73
5.4.3 - Módulo Condicionador de Sinais	75
5.4.3.1 - Condicionador para leitura de termopares.....	75
5.4.3.2 - Condicionador para leitura de termorresistências ..	77
5.4.3.3 - Condicionador para leitura de tensão contínua.....	79
5.4.3.4 - Condicionador para leitura de corrente contínua ...	79
5.4.3.5 - Condicionador para leitura de termofluxímetros.....	80
5.4.3.6 - Sistema controlador de potência AC	81
5.4.4 - Comentários e Alterações	84
5.5 - Sistema de Medição de Temperatura	89
5.6 - Condições do Laboratório	92

CAPÍTULO 6 - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

DE SINAIS	94
6.1 - Introdução	94
6.2 - Calibração dos sensores de temperatura	95
6.3 - Calibração dos sinais provenientes de termopares.....	96
6.4 - Calibração dos canais para leitura das termorresistências	101
6.5 - Calibração do módulo de leitura de tensão contínua	102
6.6 - Calibração do módulo de leitura de corrente contínua.....	103
6.7 - Caracterização das características metrológicas do sistema	
MQSAM-48 PID	104

	VIII
CAPÍTULO 7 - RESULTADOS	107
7.1 - Introdução	107
7.2 - Amostras utilizadas	107
7.3 - Procedimento experimental	109
7.3.1 - Condição de regime permanente	112
7.4 - Determinação da incerteza de medição do equipamento de placa quente protegida	117
7.4.1 - Determinação da influência do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda na medição da condutividade térmica	120
7.5 - Considerações finais	123
 CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	 126
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 130
 ANEXOS	 136
 I - Determinação da planicidade das placas	
I.1 - Planicidade da placa quente	137
I.2 - Planicidade da placa fria	140
II - Esquemas elétricos	
II.1 - Esquema elétrico da placa de aquisição MQSAM-48 PID	143
II.2 - Esquema elétrico da medição de corrente e tensão do módulo MQSAM-48 PID	146
III - Posicionamento dos termopares na superfície das amostras	147
IV - Calibrações do sistema de aquisição MQSAM-48 PID	
IV.1 - Coeficientes Angulares para a determinação da função transferência para os sinais de termopares	148

IV.2 - Coeficientes Lineares para a determinação da função transferência para os sinais de termopares	149
V - Certificados de calibração emitidos pelo NPL das amostras de perspex, nylon, polythene	150

LISTA DE FIGURAS

	pag.
Figura 2.1 - Campo térmico em uma parede plana com temperaturas T_1 e T_2 em suas superfícies	9
Figura 3.1 - Placa Quente Protegida - Montagem Simétrica	16
Figura 3.2 - Placa Quente Protegida - Montagem Assimétrica	17
Figura 3.3 - Formas de disposição de Termofluxímetros (Fonte: ASTM C518 [14])	19
Figura 3.4 - Método Calorimétrico.....	19
Figura 3.5 - Método Tubo-Quente (Fonte: Dynatech [15]).....	20
Figura 3.6 - Equipamento de caixa quente protegida	21
Figura 3.7 - Método "Cut-Bar" (Fonte: Leindenfrost [16]).....	22
Figura 3.8 - Método para determinação da condutividade térmica de materiais granulares ou na forma de pó (Fonte: Leindenfrost [16])	23
Figura 4.1 - Formas de instalação de termopares na placa quente (Fonte BS 874 [17]).....	28
Figura 4.2 - Formas de construção de placas frias (Fontes: BS 874 [17] e De Ponte e Di Filippo [23]).....	31
Figura 4.3 - Efeito da espessura na condutividade térmica aparente para isolantes de baixa densidade (Fonte: Dynatech [24]).....	34
Figura 4.4 - Mecanismos de transferência de calor em isolantes de baixa densidade (Fonte: Bankvall [25]).....	34
Figura 4.5 - Formas de medição com termopares - (a) e (b) individual,(c) diferencial	38
Figura 4.6 - Desvios ocorridos da condição de fluxo de calor unidimensional nas amostras.....	42
Figura 4.7 -Esquema do modelo utilizado para o cálculo da influência da temperatura ambiente	44

Figura 4.8 - Erro na medição da condutividade térmica ($\epsilon\lambda$), em função da temperatura ambiente (a), para uma relação $\lambda/\lambda_i=7.5$ e espessura do isolante lateral (ℓ_i) igual a 100mm	48
Figura 4.9 - Erro na medição da condutividade térmica ($\epsilon\lambda$), em função da temperatura ambiente (a), para uma relação $\lambda/\lambda_i=1.05$ e espessura do isolante lateral (ℓ_i) igual a 100mm.....	49
Figura 4.10 - Erro na medição da condutividade ($\epsilon\lambda$), em função da temperatura ambiente (a), para uma relação $\lambda/\lambda_i=1.05$ e sem isolamento lateral	50
Figura 4.11 - Gráfico do parâmetro de desbalanceamento c/ℓ versus a razão entre a espessura da folga e espessura da amostra d/L (Fonte: De Ponte e Di Filippo [23]).....	53
Figura 4.12 - Erro na medição da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e anel, gradiente térmico e espessura da amostra (Fonte: Troussart [29]).....	55
Figura 4.13 - Erro na medição da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo, gradiente térmico e pontes térmicas devido a termopares (Fonte: Troussart [29])	57
Figura 4.14 - Erro na medição da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e anel de guarda, folga e material da placa quente (Fonte: Troussart [29]).....	59
Figura 4.15 - Esquema do defeito plotado nos gráficos da Figura 4.16 (Fonte BS [19])	60
Figura 4.16 - Variação do parâmetro ϵt , associado a um defeito interfacial na placa quente com a condutividade térmica, λ , da amostra, em função da espessura da amostra, L e espessura da lâmina de	

contato, t. É demonstrado, utilizando um material incompressível (a) e (b), e uma lâmina de espuma de borracha de silicone, (c) e (d) (Fonte: BS [19]).....	61
Figura 4.17 - Influência da resistência de contato na determinação da condutividade térmica (Fonte: Tye e Spinney, segundo Philippi <i>et all</i> [06])	62
Figura 5.1 - Esquema do equipamento de placa quente protegida.....	65
Figura 5.2 - Fotografia do equipamento de placa quente protegida.....	66
Figura 5.3 - Fotografia do equipamento de placa quente protegida - Vista das placas e amostras	66
Figura 5.4 - Superfície externa da placa quente protegida.....	68
Figura 5.5 - Superfície interna da placa quente protegida.....	69
Figura 5.6 - Modo de fixação dos termopares nas superfícies das placas.....	69
Figura 5.7 - Placa fria	70
Figura 5.8 (a) - Tela gráfica do programa de aquisição de sinais - Valor da condutividade térmica.....	72
Figura 5.8 (b) -Tela gráfica do programa de aquisição de sinais - Medição de temperatura nos diversos pontos do equipamento	72
Figura 5.9 - Esquema do módulo de leitura de sinais analógicos.....	74
Figura 5.10 - Configuração de chaves multiplexadoras para instrumentação (Fonte: HP [38]).....	77
Figura 5.11 - Esquema da medição de resistência para os termorresistores	77
Figura 5.12 - Esquema de medição de corrente e tensão do módulo MQSAM-48 PID.....	80
Figura 5.13 - Forma de onda resultante obtida através de um gradador monofásico a TRIAC para uma situação de 30% de potência	82
Figura 5.14 - Fluxograma da subrotina de controle PID	83
Figura 5.15 - Valores para o desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda, δT (Barra de erros referente a 150 medições)	84

Figura 5.16- Estabilização da placa de aquisição MQSAM-48 PID para leitura de canais de termopares.....	85
Figura 5.17- Auto-aquecimento para medição de termorresistores utilizando o sistema MQSAM-48 PID	86
Figura 5.18- Auto-quecimento para medição de termorresistores utilizando o sistema MQSAM-48 PID	87
Figura 5.19- Esquema de medição inicial de corrente e tensão do módulo MQSAM-48 PID	88
Figura 5.20 Configuração sujeita à existência de tensão de modo comum.....	89
Figura 5.21- Configuração imune à existência de tensão de modo comum.....	89
Figura 5.22- Termopar achatado para leitura de temperatura superficial (aumento: 3x)	90
Figura 5.23- Modo de compensação de temperatura da junta de referência por software	92
Figura 5.24- Esquema do sistema de medição de temperatura	92
Figura 6.1 - Módulo divisor de tensão para calibração dos sinais de tensão	97
Figura 7.1 - Variação da temperatura média da amostra em condição de regime permanente (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 150 medições)	112
Figura 7.2 - Variação da temperatura da placa quente em condição de regime permanente (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 225 medições).....	113
Figura 7.3 - Variação da temperatura da placa fria em condição de regime permanente (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 225 medições).....	113
Figura 7.4 - Evolução térmica da temperatura as placas quente e frias Determinação da constante de tempo (Amostra: Polythene)	114

- Figura 7.5 - Evolução da medição da condutividade térmica até a obtenção do regime permanente (Amostra: Polythene) - Barra de erros referente ao desvio padrão de 150 medições 115
- Figura 7.6 - Variação do fluxo de calor causado pela flutuação da tensão da fonte estabilizada (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 150 medições) - Amostra: Nylon 116
- Figura 7.7 - Variação do valor medido de condutividade térmica causado pela flutuação da tensão da fonte estabilizada (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 150 medições) - Amostra: Nylon..... 116
- Figura 7.8 - Variação da condutividade térmica da amostra com o desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda 123
- Figura 7.9 - Temperaturas superficiais das amostras (TASQ - temperatura da superfície quente da amostra superior; TAIQ - temperatura da superfície quente da amostra inferior; TASF - temperatura da superfície fria da amostra superior; TAIF - temperatura da superfície fria da amostra inferior) - Amostra: Polythene..... 125

LISTA DE TABELAS

	pag.
Tabela 3.1 - Métodos para a determinação da condutividade térmica, BS874 [13].	15
Tabela 4.1 - Condições comuns às curvas da Figura 4.8.	48
Tabela 4.2 - Condições comuns às curvas da Figura 4.9.	49
Tabela 4.3 - Condições comuns às curvas da Figura 4.10.	50
Tabela 4.4 - Condições comuns às curvas da Figura 4.12.	54
Tabela 4.5 - Condições particulares a cada curva da Figura 4.12.	54
Tabela 4.6 - Condições comuns às curvas da Figura 4.13.	56
Tabela 4.7 - Condições particulares a cada curva da Figura 4.13.	56
Tabela 4.8 - Condições comuns às curvas da Figura 4.14.	58
Tabela 4.9 - Condições particulares a cada curva da Figura 4.14.	58
Tabela 5.1 - Ganho do amplificador que deve ser utilizado para cada faixa de tensão de trabalho.....	75
Tabela 6.1 - Função transferência para a medição de resistência.	101
Tabela 6.2 -Características metrológicas do sistema MQSAM-48 PID.	104
Tabela 7.1 - Determinação das espessuras das amostras.	109
Tabela 7.2 - Valores de condutividade térmica determinadas experimentalmente - Material: Perspex.	110
Tabela 7.3 - Valores de condutividade térmica determinadas experimentalmente - Material: Nylon.	110
Tabela 7.4 - Valores de condutividade térmica determinadas experimentalmente - Material: Polythene.	111

Tabela 7.5 - Incertezas de medição dos parâmetros utilizados para o cálculo da condutividade térmica.....	117
Tabela 7.6 - Valores de condutividade térmica determinados experimentalmente para a determinação do efeito do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda (Material: Nylon).....	122

RESUMO

O presente trabalho apresenta um equipamento para medição de condutividade térmica, através do método da Placa Quente Protegida. Este método é empregado para materiais isolantes, com uma condutividade térmica inferior a 2W/mK , utilizados principalmente na construção civil.

A determinação da condutividade térmica e propriedades relacionadas envolve a medição do gradiente de temperatura produzido em uma determinada espessura de amostra, submetida a uma densidade de fluxo de calor unidimensional e em regime permanente.

O equipamento construído com tecnologia nacional, através de um projeto FINEP-PADCT, obedece fundamentalmente às normas BS 874, ASTM C177-85, AFNOR NFX10-021 e ISO 8302. Dispõe ainda de um sistema de aquisição e controle de sinais, que efetua as etapas de aquisição, processamento e controle de sinais em tempo real, não sendo necessário a sua operação durante a execução do ensaio.

O sistema de medição e sensores utilizados foram individualmente calibrados, utilizando como sistema de referência um *Data Acquisition/Control Unit* HP3852S (Hewlett Packard). Para a calibração final do equipamento, utilizou-se amostras com certificado de calibração emitido pelo NPL (National Physical Laboratory, Inglaterra). Os valores de condutividade térmica para estas amostras, foram medidos de acordo com as normas BS 874 e ISO 8302. Os desvios máximos apresentados em relação às amostras foram de 5% para uma repetibilidade inferior a 2%.

Apresenta-se também uma análise de erros inerentes ao método experimental onde cada parâmetro utilizado para o cálculo da condutividade térmica é abordado individualmente. Determinou-se experimentalmente a influência do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda da placa quente no erro de medição.

ABSTRACT

This work describes an equipment based on the guarded hot plate method for measuring thermal conductivity. This method is used for measuring building materials with thermal conductivity less than 2W/m K .

The determination of the thermal conductivity by this method involves the measurement of the average temperature gradient through the thickness of the test specimens, when submitted to a known unidirectional heat-flux density under steady-state conditions.

The apparatus developed with brazilian instruments in a FINEP/PADCT project, comply to BS-874, ASTM C177-85, AFNOR NFX10-021 and ISO 8302.

It includes a data acquisition and control system operating in real time and fully automatic. The measuring system and sensors were individually calibrated to a Data Acquisition/Control Unit HP3852S. Transfer calibrated samples from NPL (National Physical Laboratory, London) were used to calibrated the thermal conductivity apparatus. The maximum deviation from the calibrated specimens was 5% for a repeability of 2%.

An error analysis is presented for each parameter involved in the thermal conductivity calculation. The measuring error caused by a temperature difference between the central metering section and guard ring was experimentally determined.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, com o advento da crise mundial de energia, houve um grande estímulo às pesquisas na área de conservação de energia, tanto em aplicações industriais quanto em residências. Como resultado, novos materiais foram desenvolvidos e geometrias otimizadas para a utilização como isolantes térmicos. Houve, também, um desenvolvimento dos métodos de medição das propriedades térmicas, sendo normalizados em diversos países. No Brasil, entretanto, nem sempre se utilizam isolantes térmicos adequados, uma vez que não se encontram valores precisos referentes as suas propriedades. De fato, pouco se conhece em relação às propriedades térmicas dos materiais utilizados em várias regiões brasileiras.

Um isolante térmico é usado tipicamente para limitar a transferência de calor entre dois ambientes que estão a temperaturas diferentes. A transferência de calor no isolante envolve combinações de processos como condução em sólidos e gases, e algumas vezes, convecção e radiação. Além disso, para materiais que apresentam conteúdo de umidade, a transferência de massa pode ocorrer. Do ponto de vista prático, na determinação das propriedades do isolante térmico, não se está interessado no efeito de cada um desses mecanismos, mas sim na razão empírica do processo de transferência de calor no material quando suas superfícies são mantidas a temperaturas diferentes.

Os métodos padrões adotados para a determinação das propriedades térmicas de materiais isolantes, tentam manter as condições de testes tão próximas das reais em que o isolante é utilizado quanto possível. Medições são usualmente feitas estabelecendo-se um regime de fluxo de calor unidimensional em uma placa plana de faces paralelas; ou em uma geometria cilíndrica, usada em isolantes de tubulações. Muitas vezes o equipamento possui grandes dimensões, principalmente para testes de componentes de construção, tais como seções de paredes e janelas.

Em regime permanente, a propriedade que define a capacidade isolante de um material é a condutividade térmica. Esta propriedade relaciona o fluxo de calor que atravessa um corpo

com a diferença de temperatura entre suas faces. Entretanto, em muitos casos, pode não ser possível definir parâmetros como, espessura, ou temperatura média da superfície da amostra. Nestes casos, ao invés da determinação da condutividade térmica, determina-se a condutância térmica ou a transmitância térmica.

Os valores de condutividade térmica de materiais sólidos variam de valores baixos, como os dos isolantes térmicos ($\approx 0.03 \text{ W/m K}$), até ordens de magnitude extremamente altas ($\approx 400 \text{ W/m K}$). Os valores altos de condutividade térmica são observados nos metais, especialmente os metais de alta condutividade elétrica. Por este fato, torna-se impossível o uso de somente um tipo de equipamento para a medição de condutividade térmica em materiais sólidos.

Para materiais isolantes o principal método utilizado para a medição da condutividade térmica é o método da placa quente protegida. É empregado, preferencialmente, para amostras sólidas, homogêneas e livres de migração de umidade. É um método simples baseado na transferência de calor entre duas placas a temperaturas diferentes, onde o material a ser medido é colocado entre elas. Dependendo do tipo de material a ser medido, da faixa de temperatura e estrutura, vários tipos e tamanhos de placa são utilizados, algumas formas são apresentadas no capítulo 3. Se contrapondo a aparente simplicidade deste método, um equipamento com uma baixa incerteza de medição é de construção complexa. Isto é feito através de comparações interlaboratoriais, com a medição de várias amostras. O maior inconveniente no equipamento de placa quente protegida é o tempo requerido para a obtenção do regime permanente. Entretanto, por ser um método de medição primário (não necessita calibração), ainda é considerado como padrão para a determinação da condutividade térmica de materiais isolantes.

Em muitos países este método foi normalizado e tornou-se o principal método de medição de condutividade térmica de materiais isolantes. Exemplos são as normas BS 874, ASTM C177-85, AFNOR NFX10-021 e ISO 8302. Algumas considerações a respeito das normas são citadas no capítulo 4. Faz-se também uma análise de erros existentes neste método de medição, representado principalmente pela dificuldade de se obter um fluxo de calor unidimensional.

No capítulo 5, descreve-se o equipamento de placa quente protegida construído com tecnologia nacional, através de um projeto FINEP-PADCT. Este equipamento, de uso do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas dos Materiais (LMPT - UFSC), possibilitará a implantação de um laboratório de referência para a medição de condutividade térmica no Brasil, bem como fornecerá dados para a validação dos métodos transientes de medição desenvolvidos neste laboratório.

O equipamento dispõe de um sistema de aquisição e controle de sinais com interface para micro computador, desenvolvido pela empresa Microquímica Ind. e Com., sob a forma de protótipo. O sistema de aquisição e controle de sinais e os sensores foram calibrados individualmente utilizando como sistema de referência um *Data Acquisition/Control Unit* HP3852S. O procedimento adotado e a incerteza de medição obtida são citados no capítulo 6.

O equipamento de placa quente protegida foi calibrado utilizando amostras com certificado de calibração emitidas pelo NPL (National Physical Laboratory, Inglaterra). As amostras, com valores de condutividade térmica de 0.18, 0.34 e 0.44 W/m K, são confeccionadas em perspex, nylon e polythene, respectivamente. Possuem uma incerteza de medição inferior a 2% no valor da condutividade térmica. As características do equipamento, procedimento de medição, resultados obtidos e uma análise de erros são expressos no capítulo 7. Analisa-se ainda a influência do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda da placa quente.

As considerações finais a respeito do equipamento de placa quente protegida, bem como os comentários finais serão apresentados no capítulo 8.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS E FUNDAMENTOS EM TRANSMISSÃO DE CALOR

2.1 - INTRODUÇÃO

A transferência de calor em materiais isolantes, envolve combinações de condução em sólidos e gases, e algumas vezes convecção e radiação. Além disso, em materiais porosos que possuem a capacidade de absorver umidade pode ocorrer transferência de massa.

As propriedades térmicas do meio afetam a forma de transferência de calor. São caracterizadas basicamente pela condutividade térmica, para processos em regime permanente. Já em regime transiente o calor específico e a difusividade térmica também contribuem para a evolução temporal do campo térmico do meio.

Os métodos para determinação da condutividade térmica de materiais isolantes, objeto desta dissertação de mestrado, baseia-se na utilização de um equipamento que mantenha as condições de contorno em uma amostra, necessárias para a solução da equação de Fourier. Esta equação é geralmente aplicada a uma geometria unidimensional, em regime permanente ou transiente.

Neste capítulo, apresenta-se os processos de transferência de calor que podem ocorrer em um material, bem como as propriedades térmicas que afetam a magnitude e a dinâmica do processo.

2.2 - PROCESSOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

2.2.1 - CONDUÇÃO

Fourier em 1822 descreveu este modo de transferência de calor. Definiu macroscopicamente a proporcionalidade entre o fluxo de calor, \dot{q} e o gradiente de temperatura.

$$\bar{q} = -\bar{\lambda} \cdot \bar{\nabla}T \quad (2.1)$$

Em um meio isotrópico, o tensor $\bar{\lambda}$ é reduzido a um escalar λ .

$$\bar{q} = -\lambda \bar{\nabla}T \quad (2.2)$$

O coeficiente de proporcionalidade λ é um termo positivo característico do meio, chamado condutividade térmica.

2.2.1.1 - Equação da Difusão Térmica

A partir da lei de Fourier (2.2) e do primeiro princípio da termodinâmica aplicado a um volume de controle [01], obtém-se a equação da difusão em regime transiente em um material homogêneo, isotrópico e sem fontes ou sorvedouros de calor.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \bar{\nabla}^2 T \quad (2.3)$$

onde ρ é a massa específica do meio e c é o calor específico do meio.

Os parâmetros $\lambda/\rho c$ podem ser agrupados em apenas uma variável:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [m^2/s] \quad (2.4)$$

onde a é a difusividade térmica do material.

A equação da difusão térmica é ainda chamada de equação de Fourier. Em coordenadas cartesianas o Laplaciano da equação (2.3) pode ser decomposto em três componentes:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

ou em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (2.6)$$

Em problemas onde o fluxo de calor se restringe somente a uma direção, a equação da difusão de calor pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.7)$$

A equação (2.7) representa a difusão térmica em um meio unidimensional, homogêneo, isotrópico e sem fontes ou sorvedouros de calor.

Em regime permanente, a partir da equação (2.7), obtém-se o campo de temperatura como sendo somente função da posição:

$$q = \frac{\lambda}{L} (T_2 - T_1) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.8)$$

onde L é a distância entre os pontos a temperatura T_2 e T_1 .

2.2.2 - CONVECCÃO

Nos sólidos, o transporte de calor é puramente condutivo. Nos fluidos uma parte do calor é transportado por convecção que é diretamente ligado a sua capacidade calorífica.

Quando o movimento do fluido se produz em virtude de uma diferença de densidade resultante de um gradiente de temperatura, a transferência de calor é dita por convecção natural ou livre. Ao contrário, quando o movimento resultante é devido ao movimento forçado do fluido (como em bombas ou ventiladores) a convecção de calor é dita forçada. Seja ela forçada ou natural, a convecção de calor amplifica de maneira muito importante a transferência de calor nos fluidos.

O fluxo de calor transmitido por unidade de tempo por convecção entre uma superfície e um fluido pode ser calculado pela relação definida em 1701 por Isaac Newton [02]:

$$q_c = \bar{h}_c \Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.9)$$

onde q_c é o calor transmitido por unidade de tempo por convecção, \bar{h}_c é o coeficiente médio de transmissão de calor por convecção e ΔT é a diferença de temperatura entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido.

2.2.3 - RADIAÇÃO

A radiação é um processo pelo qual o calor é transmitido através de ondas eletromagnéticas, entre corpos a diferentes temperaturas, quando tais corpos estão separados no espaço [02]. A energia transmitida dessa maneira é chamada de calor radiante.

O fluxo de calor radiante transmitido entre dois corpos com uma relação geométrica entre si é dado por:

$$q_r = \sigma \epsilon \mathcal{F}_{1-2} (T_2^4 - T_1^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.10)$$

onde q_r é o calor transmitido por radiação, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ϵ é a emissividade das duas superfícies, \mathcal{F}_{1-2} é o fator de forma entre as superfícies 1 e 2, T_1 é a temperatura absoluta do corpo 1 e T_2 é a temperatura absoluta do corpo 2.

2.2.4 - TRANSFERÊNCIA DE MASSA

A transferência de massa, é um processo que ocorre num meio poroso, em função da existência de gradientes térmicos e de umidade. Um meio poroso caracteriza-se por conter cavidades preenchidas por uma fase líquida e/ou gasosa, e uma matriz sólida.

A transferência de calor no meio poroso ocorre essencialmente por difusão térmica através do meio poroso e pelo movimento do líquido e vapor através dos poros. Pode ser representado pela equação (2.11) [03].

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \nabla \cdot [(\lambda + \rho_l h D_{TV}) \nabla T + \rho_l h D_{\theta V} \nabla \theta] \quad (2.11)$$

Onde λ é a condutividade térmica do meio, caso não existisse fluxo de vapor, C é a capacidade térmica do material, h é a entalpia de vaporização do líquido, D_{TV} é a difusividade do vapor devido ao gradiente de temperatura, $D_{\theta V}$ é a difusividade do vapor devido ao gradiente de umidade, ρ_l é a massa específica do líquido e θ é o conteúdo de umidade do meio.

O termo $(\lambda + \rho_l h D_{TV})$ representa a condutividade térmica aparente do meio poroso. Nesta condutividade estão incluídos as parcelas relativas à difusão térmica e ao transporte de energia pela migração do vapor.

2.3 - PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS MATERIAIS

2.3.1 - INTRODUÇÃO

A transferência de calor por condução em um material é função de três parâmetros característico do meio: a condutividade térmica λ , a difusividade térmica α e o calor específico c .

2.3.2 - A CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica representa a capacidade do material conduzir uma maior ou menor quantidade de calor. Esta relação é descrita pela lei de Fourier, equação (2.3).

Seja uma parede plana de espessura L , cujas dimensões transversais são muito maiores que a espessura. Submete-se uma de suas faces a temperatura T_1 e sobre a outra face uma temperatura T_2 .

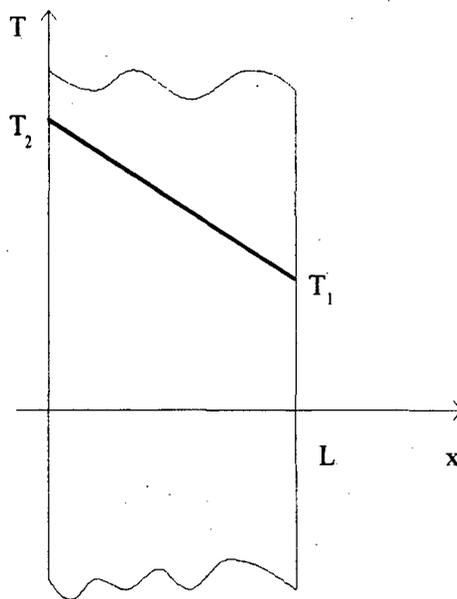


Figura 2.1 - Campo térmico em uma parede plana com temperaturas T_1 e T_2 em suas superfícies.

Nestas condições os planos de cada seção são isotérmicos e o meio pode ser considerado como unidimensional. Se T_1 e T_2 não variam no tempo, estabelece-se nesta parede um fluxo de calor constante. O vetor fluxo de calor é dirigido para a face mais fria da parede. Então a partir da equação de Fourier, equação (2.3), obtém-se a condutividade térmica:

$$\lambda = \frac{qL}{(T_2 - T_1)} \quad [\text{W/m K}] \quad (2.12)$$

Então, pode-se definir a condutividade térmica como [04]:

"A propriedade de um corpo homogêneo medida pela razão do fluxo de calor em regime permanente pelo gradiente de temperatura (diferença de temperatura por unidade de comprimento do caminho do fluxo de calor) na direção perpendicular à área."

Um corpo é considerado homogêneo quando o valor de sua condutividade térmica não é afetada pelas variações de espessuras ou áreas das amostras.

Pela definição de condutividade térmica dada acima, não se pode descrever esta propriedade em um material que apresente um modo de transferência de calor que não seja condução. É necessário que a razão do fluxo de calor pelo gradiente de temperatura no material sejam independentes da área, espessura e gradiente de temperatura.

Em materiais onde outros processos de transferência de calor ocorram, como convecção e radiação, o termo "condutividade térmica aparente" ou "condutividade térmica efetiva" são empregados. Neste caso, todas as condições de medição devem ser especificadas [05].

Em determinadas situações, quando a condutividade térmica não depende somente do material, mas também do tamanho, formato e condições da superfície da amostra. Aplica-se o termo condutância térmica [K], definida pela equação (2.13).

$$K = \frac{q}{(T_2 - T_1)} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.13)$$

Utiliza-se também os termos correlatos resistência térmica [r] e resistância térmica [R], definidos pelas equações (2.14).

$$r = \frac{1}{\lambda} \quad [\text{m K / W}]$$

$$R = \frac{1}{K} \quad [\text{m}^2\text{K / W}] \quad (2.14)$$

A presença de heterogeneidades no material alteram o fluxo de calor e a temperatura na sua superfície, desviando consideravelmente da condição isotérmica e causando erros na determinação do gradiente térmico na amostra. Exemplos são materiais que possibilitam a formação de "pontes de calor" entre sua superfície quente e fria, como materiais com elementos estruturais de reforço. Neste caso, é conveniente utilizar o conceito de transmitância térmica [U]. A transmitância térmica está associada à razão entre as temperaturas do ar adjacentes às faces externa e interna da amostra. Pode ser relacionada com a condutância térmica da amostra pela equação (2.15) [06].

$$\frac{1}{U} = \left(\frac{1}{h_{ci}} \right) + \left(\frac{1}{K} \right) + \left(\frac{1}{h_{ce}} \right) \quad [m^2K/W] \quad (2.15)$$

Onde h_{ci} e h_{ce} são, respectivamente, os coeficientes superficiais, interno e externo, de transmissão de calor entre o ar e as superfícies da amostra.

2.3.3 - A DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica, equação (2.4), de um material, caracteriza a rapidez com que uma perturbação térmica se propaga pelo meio.

Para um corpo semi-infinito uma perturbação térmica sobre sua face precisa de um certo tempo para provocar um efeito sensível a uma determinada profundidade L. Este atraso térmico na propagação do calor é proporcional ao quadrado da distância, L^2 , e inversamente proporcional à difusividade térmica do material, α .

2.3.4 - O CALOR ESPECÍFICO

Em regime transiente, a capacidade térmica, C [J/K], representa a quantidade de energia que um corpo armazena, para um determinado acréscimo de sua temperatura. A relação entre a energia armazenada e a variação de temperatura é dada pela 1ª Lei da Termodinâmica:

$$Q = C\Delta T \quad [\text{J}] \quad (2.16)$$

onde Q é a quantidade de calor absorvida por um corpo para alterar em ΔT sua temperatura média.

A capacidade térmica é uma propriedade extensiva de um material. A propriedade intensiva com ela relacionada é o calor específico, c .

$$c = \frac{C}{m} \quad [\text{J/kg K}] \quad (2.17)$$

onde m é a massa do material [kg].

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS ISOLANTES

3.1 - INTRODUÇÃO

A medição de condutividade térmica pode ser realizada em regime permanente, ou transiente. Métodos dinâmicos, são mais rápidos. Mas, entretanto, esta técnica de medição é muito difícil. O método em regime permanente pode ser modelado mais facilmente. Contudo, existem restrições quanto ao uso dos métodos em regime permanente quando há excessiva migração de umidade no material. É necessário várias horas para obtenção do regime permanente e durante este tempo a distribuição de umidade pode se alterar modificando o valor da condutividade térmica do meio. Uma forma de amenizar este efeito é reduzir o gradiente de temperatura na amostra, mas isto requer uma aprimoração da técnica de medição de temperatura.

Muitos métodos transientes podem, além de determinar a condutividade térmica, determinar a difusividade térmica e o calor específico do meio, exemplos são os métodos utilizados por Clarke e Kingston [07], Pratt e Ball [08], Guimarães [09], Güths [10] e Fernandes [11].

Os métodos padrões adotados para a determinação das propriedades térmicas de materiais isolantes tentam manter as condições de testes tão próximos quanto possível das situações em que se utiliza o isolante. Medições são usualmente realizadas estabelecendo-se um fluxo de calor unidimensional em uma placa plana de faces paralelas; ou uma geometria cilíndrica para isolantes de tubulações.

Segundo Bode [12], A. Berget foi um dos primeiros a utilizar o equipamento de Placa Quente Protegida para medição de condutividade térmica (de mercúrio) em 1888. Vieram logo após os trabalhos de E.R. Metz e A. Behe [Novo Aparato para a Determinação do Coeficiente

de Condutividade Térmica] e R. Biquard, [A Eficácia dos Diversos Meios Isolantes Térmicos de Frigoríficos: Ensaio sobre a Condutividade Calorífica] em 1910; e Poensgen em 1912.

Em muitos países o princípio da Placa Quente Protegida foi padronizado e tornou-se o principal método de medição de condutividade térmica de materiais isolantes.

Dependendo do tipo de material a ser medido, faixa de temperatura e estrutura, vários tipos e tamanhos de equipamentos são utilizados. A diferença essencial entre eles é a forma como se mede o fluxo de calor. A norma BS 874 [13] sugere faixas para a utilização de cada equipamento, Tabela.3.1.

Entretanto, em muitos casos, pode não ser possível definir alguns parâmetros como, espessura, ou temperatura média da superfície. Nestes casos, ao invés da determinação da condutividade térmica, determina-se a condutância térmica ou transmitância térmica. Utiliza-se, então, os métodos de caixa-quente que incluem os efeitos radiantes e convectivos na superfície da amostra.

Tabela 3.1 - Métodos para a determinação da Condutividade Térmica, BS 874 [13].

MÉTODO	FAIXA DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA [W/mK]	LARGURA OU DIÂMETRO MÍNIMO [mm]	ESPESSURA DA AMOSTRA [mm]	FAIXA DE TEMPERATURA [°C]
PLACA QUENTE PROTEGIDA	até 2.0	300	usualmente 25mm é o mínimo	-20 a 100
PLACA QUENTE SEM ANEL DE GUARDA	0.15 a 2.0	305	usualmente entre 25 a 50	-20 a 100
DISCO-QUENTE	0.15 a 2.0	75	usualmente até 25	a critério
TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR	até 0.15	300	25	-20 a 100
PLACA QUENTE PROTEGIDA PARA ALTAS TEMPERATURA	0.02 a 2.0	450	25 a 50	100 a 600
CALORÍMETRO A ÁGUA	até 1.5	350	40 a 50	400 a 1250
TUBO-QUENTE	até 1.0	***	***	até 1000

*** - a ser definido

3.2 - MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA (*Guarded Hot-Plate*)

Neste método a amostra, ou em muitos casos o par de amostras, são montadas com um bom contato térmico entre placas metálicas, mantidas a temperatura constante. A placa de aquecimento é denominada placa quente e as placas de refrigeração denominadas placas frias. Estabelece-se então um gradiente térmico nas amostras em regime permanente. Mede-se o fluxo de calor e a diferença de temperatura através das amostras. Sabendo-se a espessura das amostras, determina-se a condutividade térmica pela equação de Fourier.

A placa de aquecimento é circundada por um anel de guarda. A potência dissipada neste é controlada de forma a manter nula a diferença de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda. Com isso, considera-se que todo o calor gerado na área de medição, em regime permanente, passa através das amostras numa direção perpendicular a suas faces, com densidade constante. O fluxo de calor é determinado pela medição da potência dissipada no núcleo.

Há a possibilidade das placas serem construídas na forma circular ou quadrada, podendo ser montadas de forma a obter o fluxo de calor no sentido vertical ou horizontal. A forma circular é mais fácil de modelar, contudo a elaboração das amostras é mais complicada. Os resultados para medição de materiais com fluxo de calor horizontal ou vertical podem diferir, principalmente quando no material ocorre o transporte de calor por convecção.

A montagem do equipamento pode ser de duas formas:

i) Equipamento simétrico, com uma placa de aquecimento central, duas amostras e placas frias dispostas simetricamente, Figura 3.1.

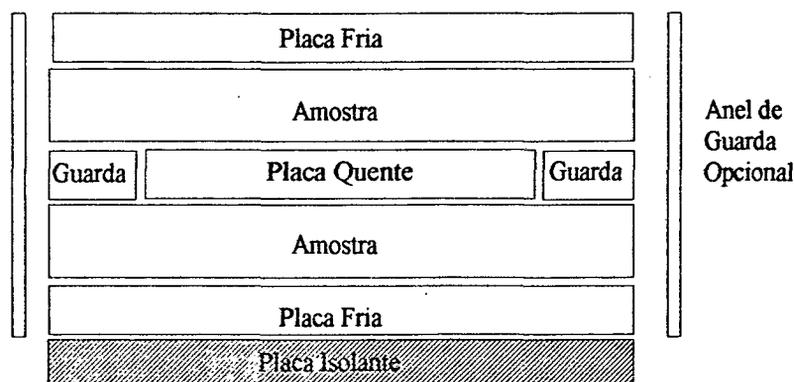


Figura 3.1 - Placa Quente Protegida - Montagem Simétrica.

ii) Equipamento assimétrico, composto por uma placa quente, uma amostra e uma placa fria. Dispõe ainda de outra placa aquecedora e fria e uma amostra auxiliar para o controle do fluxo de calor através de uma termopilha localizada entre as duas placas quentes, Figura 3.2.

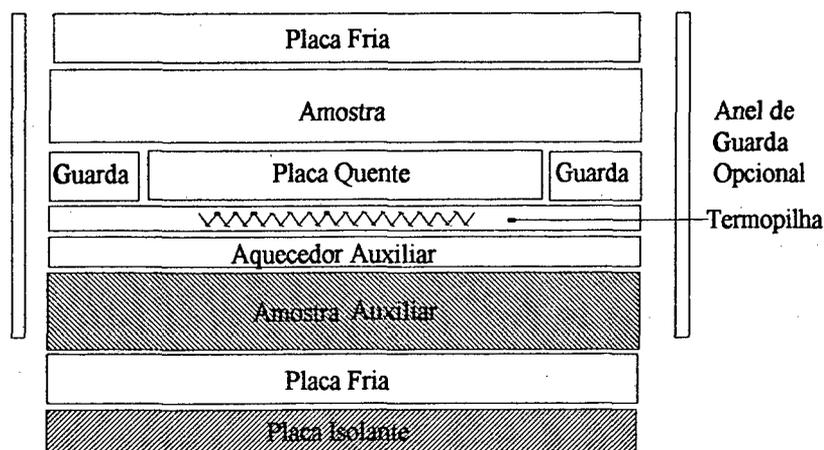


Figura 3.2 - Placa Quente Protegida - Montagem Assimétrica.

O método assimétrico é menos utilizado em razão da necessidade de um dispositivo de controle para minimizar o fluxo de calor na direção oposta à amostra. Entretanto sua grande vantagem é a utilização de uma única amostra, sendo que a auxiliar não precisa possuir as mesmas propriedades.

Afim de minimizar o fluxo de calor lateral, utiliza-se o equipamento inserido dentro de uma câmara de isolamento, além disso, há a possibilidade de se usar um anel de guarda opcional (ou secundário). Contudo para operações em condições ambientais estes componentes são frequentemente omitidos.

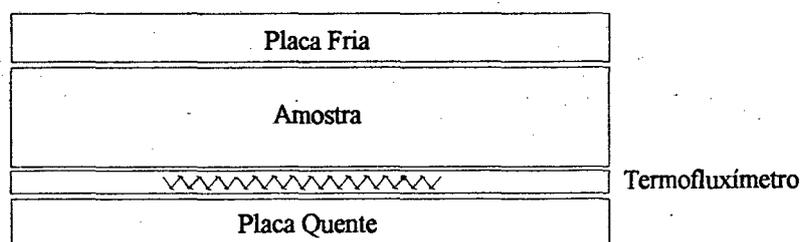
Pode-se também utilizar o método da Placa Quente sem o Anel de Guarda (*Unguarded Hot-Plate*). Neste método a área de medição compreende toda a placa de aquecimento, podendo ocorrer erros devido as perdas laterais nas amostras. Utiliza-se, neste caso, fatores de correção para a calibração do equipamento, empregando-se amostras com propriedades térmicas conhecidas.

3.3 - MÉTODO UTILIZANDO TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR (*Heat Flow Meter*)

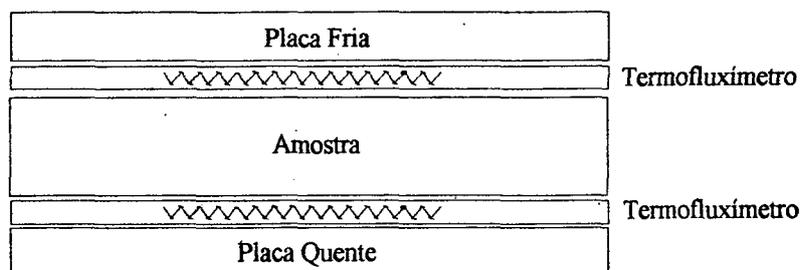
Este método é basicamente igual ao método da placa quente protegida, sendo a única diferença a forma de medição do fluxo de calor: através de termofluxímetros previamente calibrados.

É um método comparativo (ou secundário) de medição, já que são utilizadas amostras com propriedades térmicas conhecidas para a calibração do equipamento.

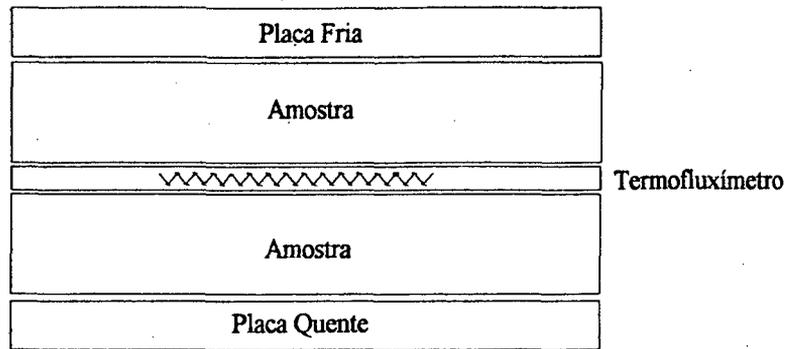
Os transdutores podem ser dispostos conforme a Figura 3.3. Onde a disposição (b) é a mais recomendada, pois as perdas laterais de calor são detectadas mais facilmente. Na configuração (c) problemas podem ocorrer se o transdutor é sensível a gradientes de temperatura ao longo de sua superfície, já que o transdutor não está em contato com uma superfície metálica e sim a superfície das amostras.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3 - Formas de disposição de Termofluxímetros (Fonte: ASTM C518 [14]).

3.4 - MÉTODO DO CALORÍMETRO A ÁGUA (*Water Calorimeter*)

Neste método a área de medição do fluxo de calor e o anel de guarda são posicionados na placa fria, Figura 3.4. Mede-se as temperaturas de entrada e de saída do fluido de refrigeração que circula pelo núcleo e com a capacidade térmica por unidade de volume, calcula-se o fluxo de calor através das amostras. Este método não requer calibração e é empregado para isolantes (refratários) em temperaturas elevadas (placa de aquecimento superior a 400°C).

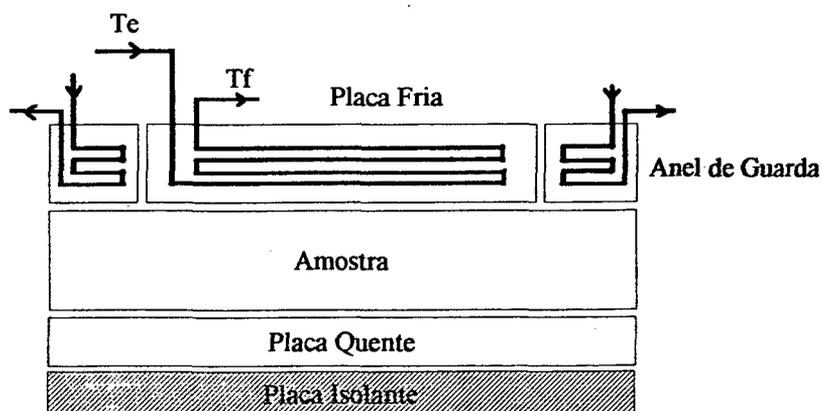


Figura 3.4 - Método Calorimétrico.

3.5 - MÉTODO DO DISCO-QUENTE (*Hot-Disc*)

Este método é empregado para a determinação da condutividade térmica de lâminas com espessuras entre 3 a 25mm, de materiais como plásticos sólidos e vidros, com diâmetros superiores a 75 mm. Quando as amostras são lâminas as perdas laterais são baixas, entretanto o equipamento sem o anel de guarda necessita ser calibrado com amostras com valores de condutividade térmica conhecidos.

3.6 - MÉTODO DO TUBO-QUENTE (*Hot-Pipe*)

Utiliza-se este método para materiais aplicados como isolantes de tubos, os quais têm geralmente a forma de cilindros anulares.

O equipamento de tubo-quente é composto de uma área central de aquecimento cilíndrica situada entre dois cilindros de guarda que são controlados de forma a assegurar um fluxo de calor radial através da seção de medição, Figura 3.5. O fluxo de calor é determinado através da medição da potência dissipada no cilindro central e mede-se as temperaturas da face interna e externa do isolante. Utilizando a equação de Fourier para coordenadas cilíndricas, determina-se a condutividade térmica.

Pode-se utilizar um cilindro de refrigeração como superfície fria na parte externa da amostra, ou considerar a atmosfera ambiente como sorvedouro de calor.

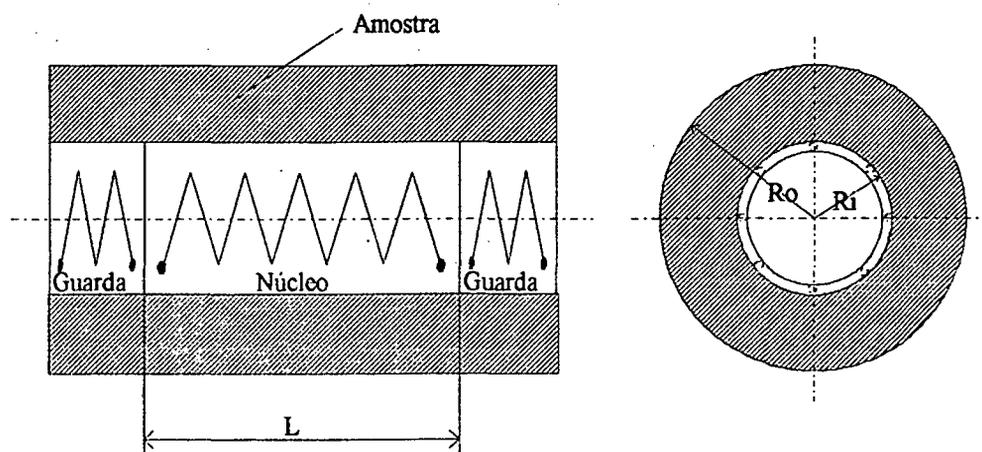


Figura 3.5 - Método Tubo-Quente (Fonte: Dynatech [15]).

3.7 - MÉTODO DA CAIXA-QUENTE (*Hot-Box*)

Utilizado para a medição das propriedades térmicas de elementos de edificações como paredes, tetos, janelas e pisos. Os componentes não precisam ter propriedades uniformes sobre toda a área de medição, diferenciando dos métodos que utilizam a placa quente, onde as superfícies devem ser completamente isotérmicas.

Compreende equipamentos de grande porte com área de medição não inferior a 1m x 1m, onde se utilizam uma câmara quente e uma fria (caixa de 5 lados) e em muitos casos uma câmara de proteção com finalidade análoga ao anel de guarda no método Placa Quente Protegida, Figura 3.6. Entre estas caixas são colocadas as amostra, e em regime permanente determina-se o fluxo de calor e o gradiente térmico através do elemento a ser medido. Determina-se então a transmitância térmica ou a condutância térmica da amostra. A transmitância térmica é definida de modo a considerar os efeitos convectivos e radiantes na superfície.

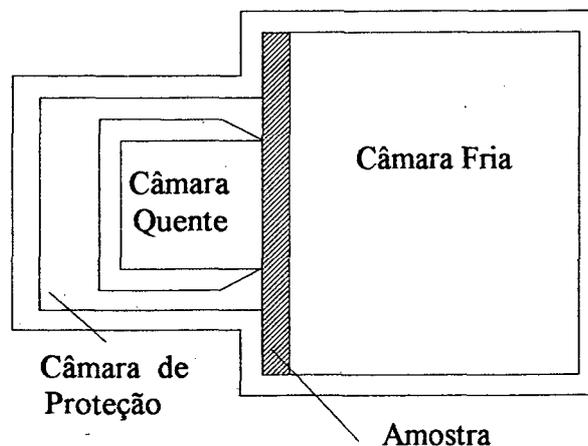


Figura 3.6 - Equipamento de Caixa Quente Protegida.

3.8 - OUTROS MÉTODOS

Alguns materiais são medidos somente na forma de pequenas amostras devido à dificuldade na obtenção de uma adequada uniformidade em sua composição. Neste caso utiliza-se o método "Cut-Bar" [16].

Nestas pequenas amostras, termopares presos a suas superfícies, podem causar distúrbios consideráveis no fluxo de calor, e por este motivo, a temperatura na superfície de contato deve ser estimada através de extrapolação, Figura 3.7. Contudo a resistência de contato entre as superfícies passa a ser o problema fundamental.

Determina-se o fluxo de calor longitudinal através da amostra medindo o gradiente de temperatura nos pontos com termopares, localizados nas barras de referência. O fluxo de calor radial é minimizado através de cilindros de guarda.

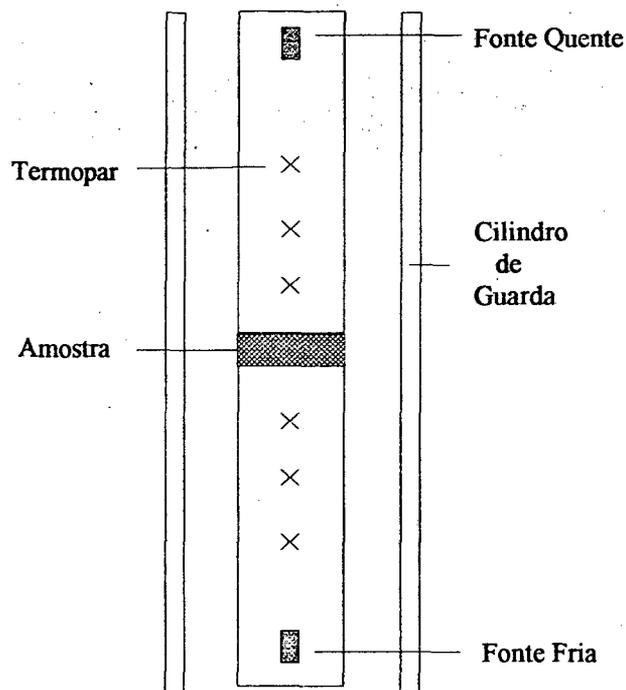


Figura 3.7 - Método "Cut-Bar" (Fonte: Leindenfrost [16]).

Outro equipamento, descrito por Bleck e Glaser, segundo Leindenfrost [16], é utilizado para materiais granulares ou em forma de pó. Consiste de uma esfera interna e outra externa imersas em um banho com temperatura uniforme, mantido através de elementos aquecedores ou líquido em mudança de fase. O material a ser testado é colocado entre as esferas, ficando completamente enclausurado. O fluxo de calor através da amostra pode ser gerado eletricamente na esfera interior, ou através de um líquido em mudança de fase, por método calorimétrico, Figura 3.8. Usa-se a taxa de mudança de fase para o cálculo do fluxo de calor.

A desvantagem deste método é que o material de enchimento pode sofrer variações de densidade, alterando a condição de fluxo unidimensional. Outro problema é a fuga de calor através do pescoço do balão, que não é facilmente estimável.

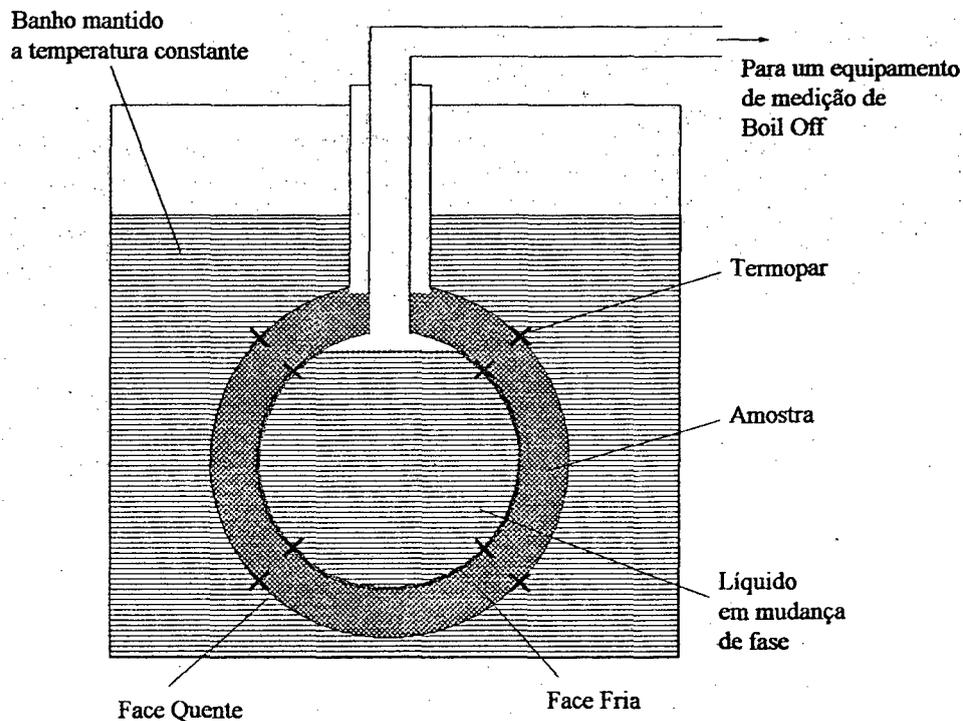


Figura 3.8 - Método para determinação da condutividade térmica de materiais granulares ou na forma de pó (Fonte: Leindenfrost [16]).

CAPÍTULO 4

MÉTODO DA PLACA QUENTE PROTEGIDA

4.1 - INTRODUÇÃO

O método da placa quente protegida é adequado para a determinação da condutividade térmica, em regime permanente, de materiais isolantes de baixa densidade, podendo estes serem sólidos, fibrosos, celulares ou granulares.

O método é normalizado em diversos países, exemplos são as normas:

- AFNOR NF X10-021 - Détermination de la Conductivité Thermique. Méthode de la Plaque Chaude Gardée Avec Echantillons Symétriques.
- ASTM C177 - Standard Test Method for Steady-State Heat-Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus, 1985.
- BSI BS874 - British Standard Methods for Determining Thermal Insulating Properties. Part 2, Section 2.1. Guarded Hot-Plate Method, 1986.
- DIN 52612 - Heat Insulating Test: Determination of the Thermal Conductivity with the Plate Testing Apparatus. Testing Method and Test Evaluation. Part 1: 1966.
- ISO 8302 - Thermal Insulation- Determination of Steady-State Area Thermal Resistance and Related Properties - Guarded Hot Plate Apparatus, 1987.

A norma BS [17,18], propõe a construção de um equipamento com determinadas dimensões e especificações de modo a garantir uma incerteza de medição inferior a 3% para valores de condutividade térmica até 0.15 W/mK, acima deste valor (até 2W/mK) a incerteza de medição aumenta para valores inferiores a 5%. Porém, para materiais com imperfeições na superfície a incerteza de medição aumenta consideravelmente. A norma BS [19] prevê um aumento da incerteza para o concreto para os seguintes limites:

- (a) concreto autoclavado aerado, tendo uma densidade inferior a 900kg/m^3 e condutividade térmica até 0.25W/m K..... ± 3 a $\pm 5\%$
- (b) concretos leves, com uma densidade entre 900 a 1500kg/m^3 e condutividade térmica de 0.2 a 0.6W/m K..... ± 5 a $\pm 7.5\%$
- (c) concretos com uma densidade entre 1500 a 1850kg/m^3 ± 7.5 a 15%
- (d) concretos densos, com uma densidade superior a 1850kg/m^3 ± 10 a $\pm 20\%$.

A repetibilidade da medição deve ser normalmente inferior a 1% e os instrumentos de medição utilizados necessitam ser calibrados em um laboratório padrão, ou quando não, demonstrar-se que os instrumentos são mais aceitáveis que os exigidos. Neste caso, determina-se a incerteza de medição do equipamento através de amostra padrões medidas por um laboratório de referência [18].

A norma ASTM [20], entretanto, permite uma larga variação quanto às dimensões e especificações de modo a satisfazer a problemas específicos de medição, sendo que a incerteza de medição para o equipamento deve ser calculada separadamente, conforme às necessidades de cada aplicação. Contudo, ela prevê que é possível a obtenção de uma incerteza de medição de $\pm 2\%$ para materiais de baixa densidade, com espessuras de 20 a 80mm, fluxo de calor numa faixa entre 2 a 20W/m^2 e um gradiente de temperatura de 25K. Para materiais de alta densidade e rígidos, a incerteza de medição pode subir para $\pm 5\%$.

Neste capítulo, apresenta-se os detalhes técnicos referentes às dimensões, construção e operação do equipamento de placa quente protegida, através das normas citadas. Faz-se

também uma análise de erros existentes neste método de medição, representado principalmente pela dificuldade de se obter um fluxo de calor unidimensional.

4.2 - PLACA QUENTE PROTEGIDA

É a unidade de aquecimento do sistema, divide-se em duas partes: a central ou núcleo e o anel de guarda ou proteção. Possui elementos aquecedores localizados entre duas placas de um metal de alta condutividade térmica (cobre ou alumínio). A placa quente deve ter uma alta condutividade térmica, comparada aos valores dos materiais medidos, para assegurar que as placas sejam suficientemente isotérmicas.

As resistências de aquecimento devem ser construídas de forma a obter um fluxo de calor homogêneo na amostra, devendo ser simetricamente centradas na direção axial da placa quente, obtendo-se temperaturas iguais em suas duas faces.

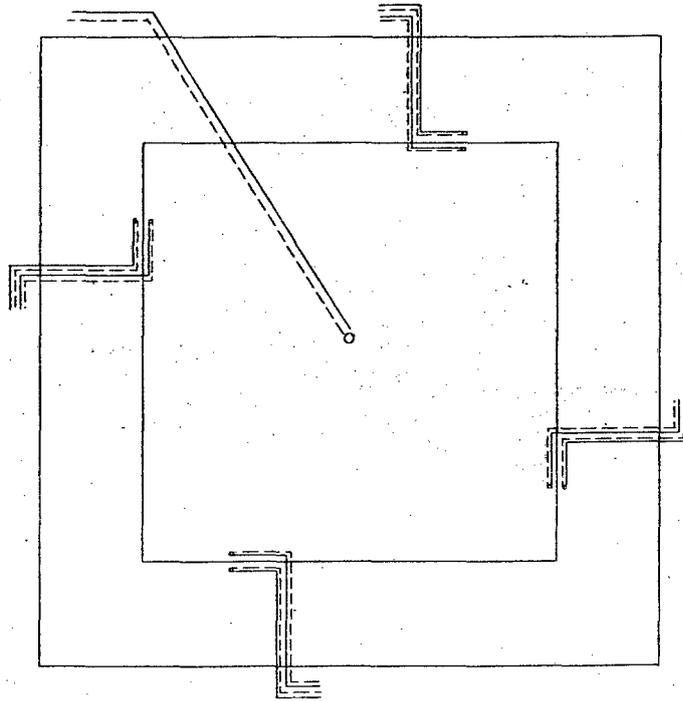
O anel de guarda limita o fluxo de calor lateral na área interna de medição. A eficiência do anel de guarda é determinada pela razão de suas dimensões radiais com relação às dimensões da área de medição e espessura da amostra.

A norma BS [17], sugere dimensões para a placa quente de 305mm, 500mm, 610mm ou 1m, de forma quadrada ou cilíndrica. A razão entre o núcleo e o anel de guarda deve ser 1:4 a 1:6, com uma folga entre o anel de guarda e o núcleo entre 1.5 a 2mm, 1.5 a 3mm, 2 a 4mm e 2 a 5mm, respectivamente.

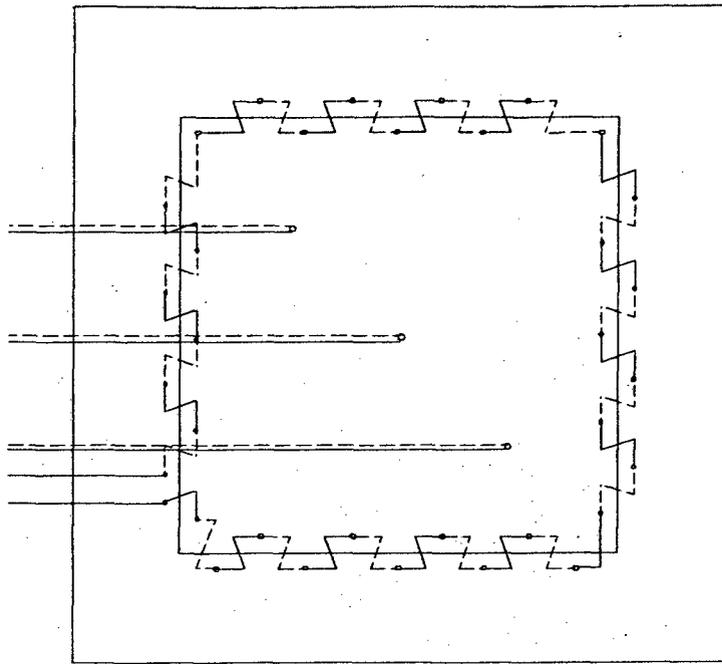
A folga entre o núcleo e o anel de guarda, deve possuir uma determinada espessura afim de minimizar as fugas de calor radiais. Desta forma, deve-se construir as junções de conexão entre o núcleo e o anel de guarda com materiais de alta resistência térmica e tão pequenos quanto possíveis.

Monitora-se o desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda através de sensores instalados em ambos os lados da placa. Utiliza-se frequentemente termopares de diâmetro pequeno, montados de forma individual ou como termopilhas, Figura 4.1; embora outros sensores, como termorresistores e termistores também sejam utilizados.

As normas BS[17] e ISO [21] recomendam que os termopares, dispostos na configuração individual, sejam posicionados a uma distância de $1/4$ do comprimento do lado do núcleo, em relação aos cantos, Figura 4.1. Esta posição é considerada a mais representativa para a medição da temperatura média do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda.



(a) Disposição com termopares individuais



(b) Disposição com termopares na forma de termopilha

Figura 4.1 - Formas de instalação de termopares na placa quente (Fonte BS 874 [17]).

Alguns detalhes construtivos na elaboração da placa quente necessitam ser levados em consideração [22]:

- a construção e reparo dos elementos aquecedores deve ser facilmente executável;
- a construção da placa quente empregando diferentes materiais pode causar problemas devido a suas diferentes dilatações térmicas, ocasionando deformações térmicas;
- ciclos térmicos repetidos podem ocasionar deformações térmicas permanentes na placa;
- a necessidade de uma integridade estrutural da placa faz necessário um número elevado de elementos fixadores entre o núcleo e o anel de guarda, resultando em uma condutância térmica elevada entre eles;
- a dificuldade em posicionar e instalar os termopares para a determinação da temperatura média da superfície;

- a condutividade térmica da placa quente deve ser alta para manter a condição de superfície isotérmica;
- a capacidade térmica da placa deve ser baixa para que sua temperatura possa variar rapidamente;
- o material deve ser capaz de aceitar e reter tratamentos superficiais, a fim de se poder controlar a emissividade.

A superfície da placa deve possuir uma variação de planicidade e paralelismo a menor possível. Desta maneira o contato com a superfície da amostra torna-se mais eficaz, reduzindo a formação de "bolsões de ar", que provocam variações na resistência térmica de contato entre as superfícies, modificando a condição isotérmica das faces.

A norma BS [18], para uma placa de dimensões 300x300mm, determina que a variação de planicidade seja inferior a 0.2mm.

As resistências de aquecimento devem ser isoladas eletricamente ($R > 1M\Omega$), evitando fugas de corrente [17].

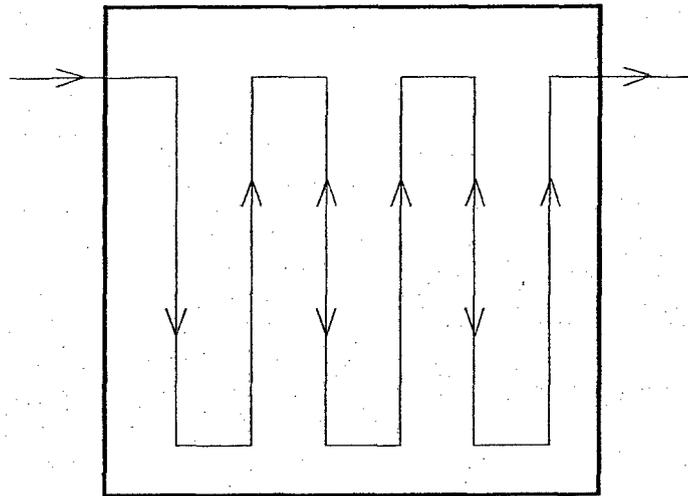
Quando o fluxo de calor através de um material é dependente da emissividade da placa, devido a amostra não ser completamente opaca, ocorrendo a transferência de calor por radiação, deve-se determinar a emissividade desta. Geralmente a emissividade é mantida superior a 0.8, ASTM [20] ou 0.9, BS [17].

4.3 - PLACA FRIA

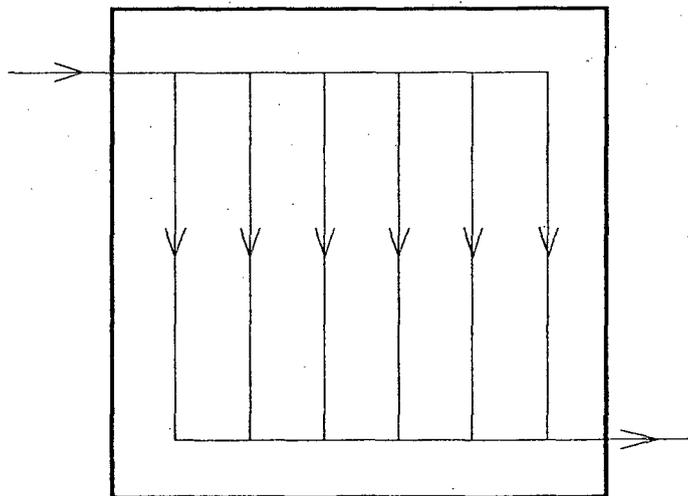
Estas unidades de refrigeração tem como objetivo retirar o calor gerado na unidade de aquecimento. Devem ser construídas com as mesmas dimensões, planicidade, paralelismo, condutividade térmica e emissividade da placa quente. São refrigeradas constantemente por um líquido com temperatura constante. Desta forma, a temperatura se mantém constante na sua superfície. A norma BS [17] recomenda que a circulação do líquido no interior da placa fria seja feito em forma de espiras, reduzindo os efeitos de gradiente térmico que possam ocorrer, Figura 4.2 (c).

Outros modos de construção são mostrados nas Figura 4.2 (a), (b) e (d). As formas (a) e (b) apresentam a formação de gradientes térmicos em sua superfície devido a maneira não balanceada do escoamento. A placa (d) é proposta por Brendeng e Frivik, segundo De Ponte e Di Filippo [23], mas é de fabricação difícil e de pouca superioridade, comparada à placa em forma de espira (c).

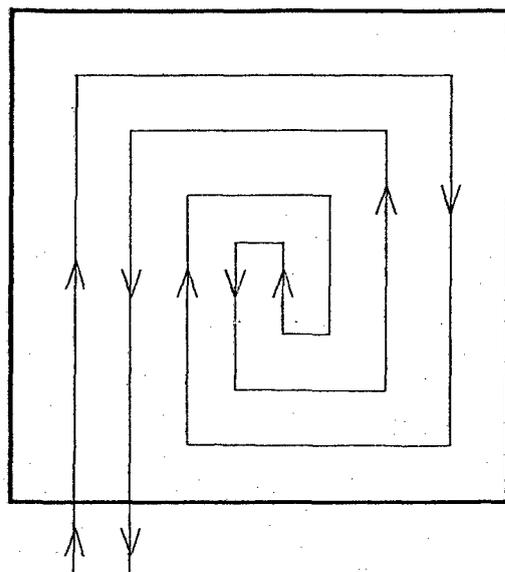
A norma BS [17] recomenda que a placa fria seja controlada por um banho termostático capaz de manter uma variação na placa inferior a $\pm 0.1K$.



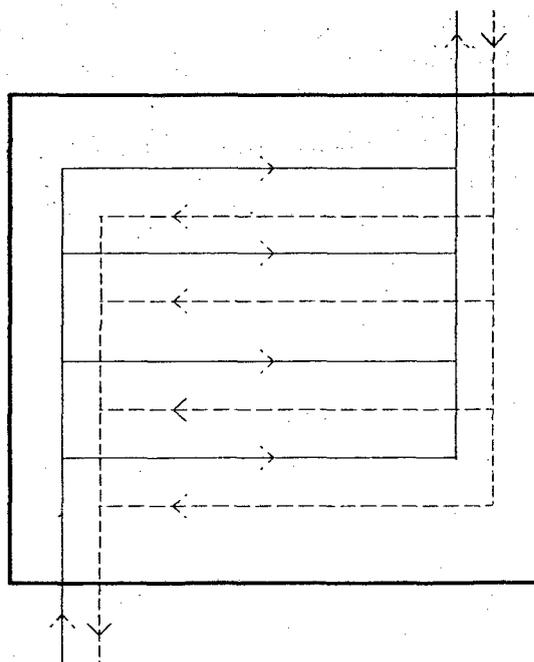
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2 - Formas de construção de placas frias (Fontes: BS 874 [17] e De Ponte e Di Filippo [23]).

4.4 - AMOSTRA

No método simétrico a amostra é composta de duas peças idênticas. A medição neste caso produz como resultado a média dos dois valores obtidos, que devem ser tão próximos quanto possível.

As dimensões laterais da amostra devem ser iguais às das placas frias e quente. A norma ASTM [20] recomenda que para manter as perdas laterais de calor abaixo de 0.5%, para um anel de guarda com largura igual a metade da dimensão linear do núcleo, é necessário um máximo de espessura da amostra igual a 1/3 da dimensão linear do núcleo. A norma BS [17] estabelece a espessura da amostra entre 25 a 50mm, onde 50mm é o mais utilizado. Contudo a espessura da amostra deve ser representativa para o material.

Materiais testados por este método podem ser divididos em três categorias [17]:

- i) material homogêneo e isotrópico, onde o calor é transportado somente por condução, como plásticos densos, borrachas e vidros;
- ii) material poroso termicamente homogêneo¹, onde o fluxo de calor é transmitido pelas partes sólidas e gasosa que constituem o material, por uma combinação de processos de transferência de calor, exemplos típicos são os materiais fibrosos, celulares e granulares;
- iii) material termicamente heterogêneo, como materiais isolantes misturados ou sobrepostos em camadas.

Materiais que possuam uma distribuição randômica de inclusões ou cavidades, cujas dimensões são relativamente pequenas em relação às dimensões da amostra são tratados como homogêneos, sendo que macroscopicamente não distorcem o fluxo de calor.

¹NOTA: Materiais termicamente homogêneos, neste contexto, são materiais, em que a condutividade térmica, para uma dada temperatura, não é afetada pelo gradiente de temperatura, espessura ou área das amostras [17].

Para materiais de alvenaria, como tijolos, concreto, argamassa de cal e cimento e concreto celular, a norma BS [17] estipula que a espessura da amostra seja no máximo cinco vezes o tamanho nominal do agregado ou poro.

Em amostras heterogêneas, o fluxo de calor pode variar consideravelmente através da amostra, desta maneira a temperatura na superfície da amostra pode se desviar em muito da condição isotérmica, causando erros na definição do gradiente térmico.

A medição de materiais anisotrópicos pode ocasionar erros significativos. Exemplos são materiais em camadas que possuam uma alta relação de condutividade térmica lateral pela axial. Para tais materiais a norma ASTM [20] sugere que seja criado uma folga de baixa condutividade térmica na amostra diretamente em linha com a folga da placa quente. Amostras cujos eixos de simetria não coincidam com o plano geométrico não são recomendáveis para medição por este método.

Amostras incompressíveis devem possuir suas faces planas e paralelas, sendo que pela norma BS [17] a variação de espessura não pode exceder a 2% da média e o desvio de planicidade não pode exceder a 0.2mm em toda a placa. Para materiais compressíveis, impõe-se a espessura pela utilização de separadores, ou se mede a espessura após a montagem do equipamento.

Para materiais que apresentam um conteúdo de umidade, deve-se medir a massa da amostra imediatamente antes e depois da realização do ensaio e então se determinar a variação do conteúdo de umidade. A norma BS [17] especifica que se a variação for superior a 0.2% em volume, é necessário fazer um ajuste, ou invalidar o ensaio.

Materiais testados que possuírem uma variação de sua condutividade térmica com a espessura devido a efeitos de radiação, tornam necessário a medição em diferentes espessuras. Este efeito é notado principalmente em isolantes de baixa densidade, onde a transferência de calor ocorre por uma combinação de condução, convecção e radiação pelas partes sólida e gasosa que compõem o material. Mostra-se resultados típicos nas Figuras 4.3 e 4.4.

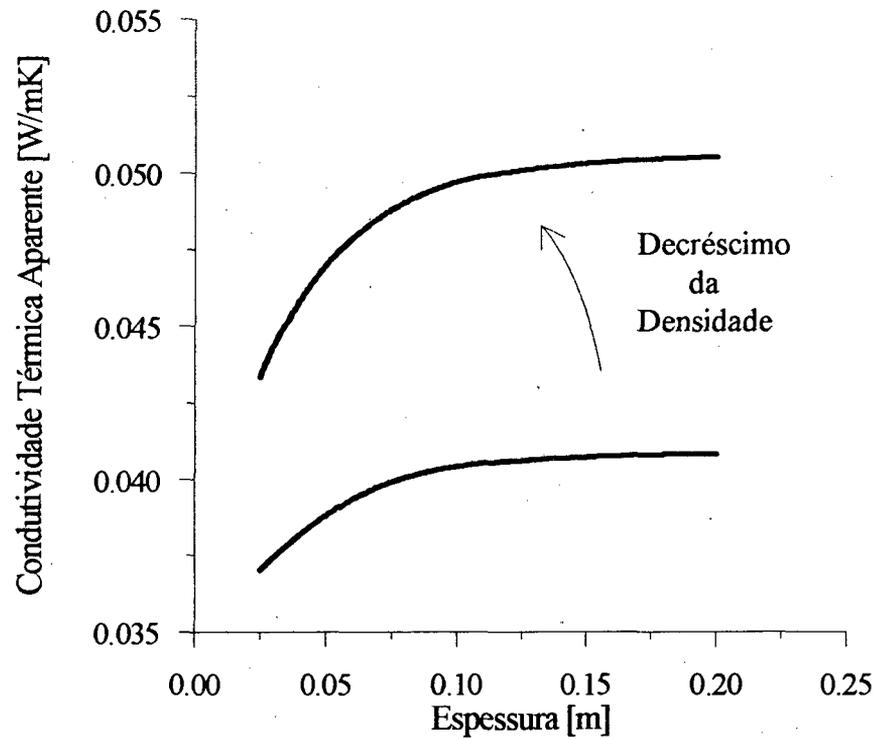


Figura 4.3 - Efeito da espessura na condutividade térmica aparente para isolantes de baixa densidade (Fonte: Dynatech [24]).

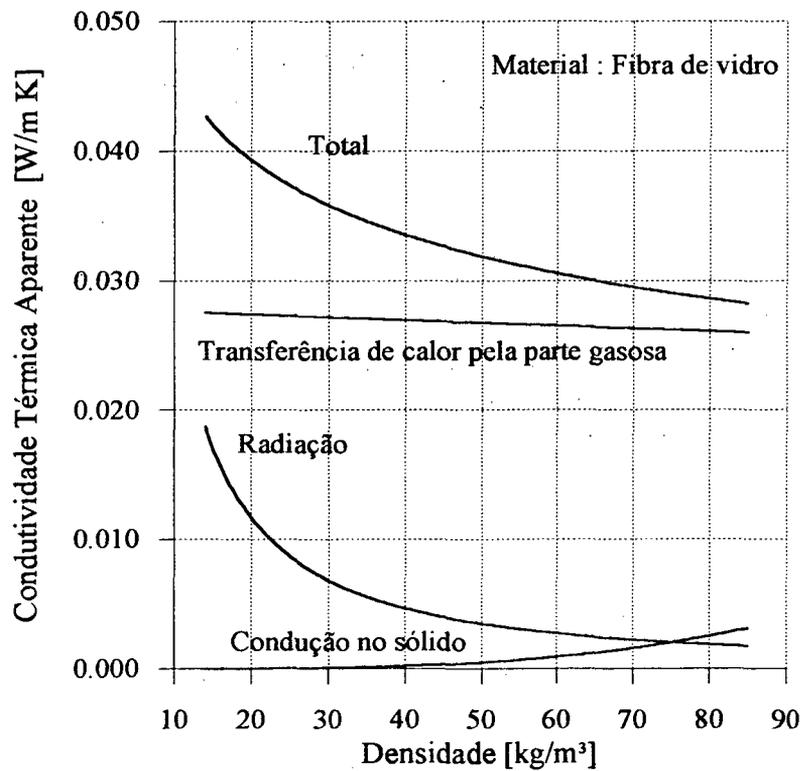


Figura 4.4 - Mecanismos de transferência de calor em isolantes de baixa densidade (Fonte: Bankvall [25]).

Para materiais porosos é tolerável uma variação de densidade de $\pm 5\%$ [26]. Além disso, a condutividade térmica das amostras de um material pode variar com o tempo devido à variação de sua composição.

4.5 - ISOLAÇÃO DO EQUIPAMENTO E CONDIÇÕES DO LABORATÓRIO

Segundo a norma BS [17] o equipamento deve ser isolado, lateralmente, com pelo menos 100mm de isolamento substituível (por exemplo: grãos de cortiça), dentro de uma caixa. É necessário que a caixa contenha um dessecante para prevenir a condensação, se a temperatura da placa fria for inferior à temperatura de orvalho do ar ambiente.

O ambiente do laboratório deve ser mantido a temperatura entre 18 e 23°C ($\pm 3K$) com uma umidade relativa mantida entre 25 a 65% [18]. Para materiais contendo umidade, as amostras devem ser condicionadas a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa [26].

4.6 - MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

4.6.1 - INTRODUÇÃO

Os parâmetros necessários para o cálculo da condutividade térmica são: potência elétrica, área do núcleo, gradiente de temperatura e espessura das amostras. Destes, somente a espessura das amostras é medido diretamente, os outros são calculados através de medições fundamentais ou então convertidos através de dispositivos elétricos.

4.6.2 - POTÊNCIA ELÉTRICA

O elemento aquecedor do núcleo da placa quente é normalmente alimentado por uma fonte de corrente contínua. A norma BS [17] determina que a fonte seja capaz de manter uma

variação inferior a 0.1% com uma incerteza de medição não excedendo a 0.25% durante a realização do ensaio.

Para o modo de montagem simétrico, somente a metade da potência gerada atravessa cada amostra. A potência é frequentemente determinada pela medição da tensão sobre a resistência, V , e da corrente, I é calculada pela equação (4.1).

$$Q = VI \quad \begin{array}{l} \text{TENSÃO} \\ \downarrow \\ \text{CORRENTE} \end{array} \quad \begin{array}{l} V \cdot A \\ \downarrow \\ [W] \end{array} \quad (4.1)$$

O ponto de medição de tensão deve ser localizado próximo à resistência de aquecimento, evitando erros devido à queda de tensão nos fios de alimentação. A corrente é normalmente determinada pela medição da queda de tensão sobre um resistor de precisão ligado em série no circuito de alimentação.

4.6.3 - ÁREA

A área (A) utilizada para o cálculo do fluxo corresponde a soma da área do núcleo A_n , mais a metade da área da folga entre o núcleo e o anel de guarda (A_g), equação (4.2).

$$A = A_n + \frac{A_g}{2} \quad [m^2] \quad (4.2)$$

4.6.4 - ESPESSURA

A norma BS [17] determina que a espessura para amostras incompressíveis deve ser obtida através de um micrômetro com uma incerteza de medição inferior a $\pm 0.025\text{mm}$, com medição em pelo menos oito pontos distintos. Para materiais compressíveis, impõe-se a espessura com a utilização de espessadores. Para materiais semi-compressíveis, recomenda-se medir a espessura após a montagem em quatro posições do perímetro não excedendo a 2% da variação média.

4.6.5 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

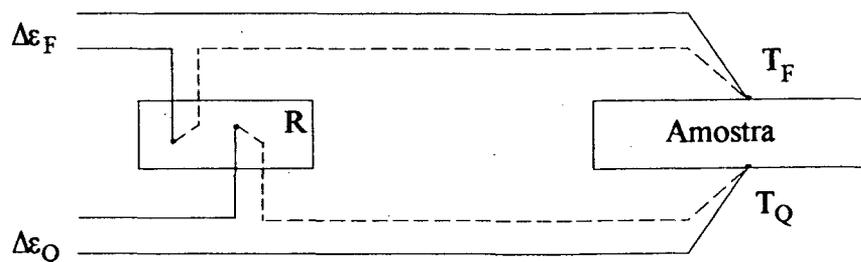
Temperaturas das superfícies das placas de aquecimento e refrigeração são freqüentemente medidas por termopares presos a estas. Sobretudo, em amostras rígidas, torna-se necessário o uso de termopares presos à superfície da amostra. Os termopares utilizados devem ser de diâmetro igual ou inferior a 0.2mm [17].

A norma ASTM [20] recomenda um mínimo de dois termopares em cada superfície de medição. Entretanto para materiais heterogêneos, há a necessidade de se aumentar o número destes, afim de se determinar variações térmicas e gradientes de temperatura que possam ocorrer.

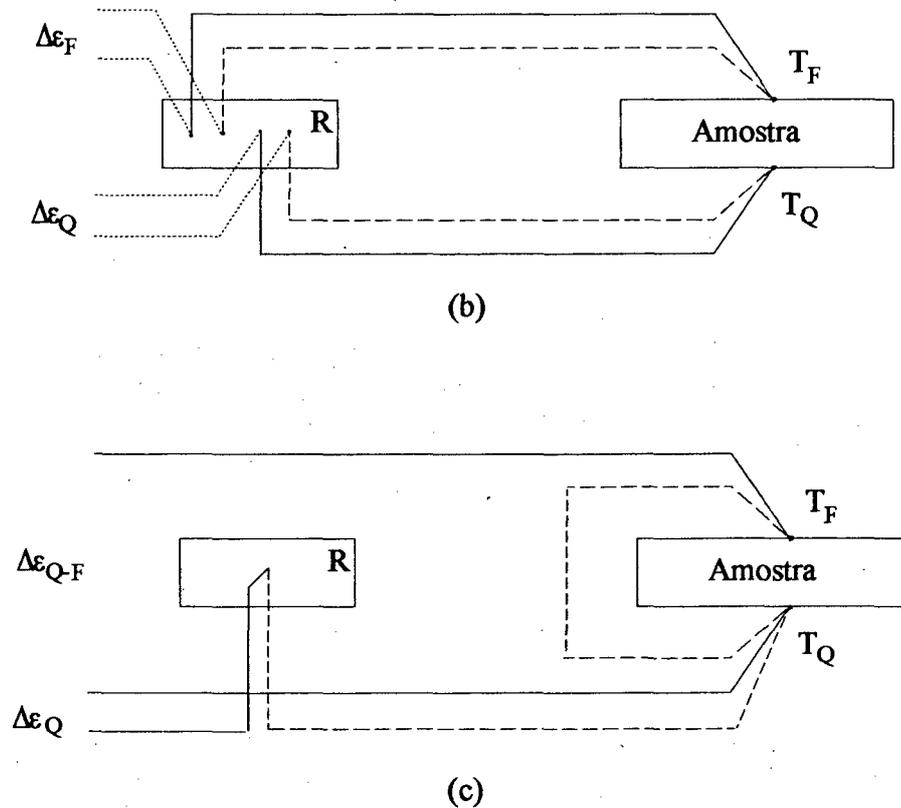
Para materiais de alta condutividade térmica ($\lambda > 0.15 \text{ W/m K}$) a norma BS [17,18] aconselha um mínimo de 4 termopares por face da amostra, separados de pelo menos 25mm; os termopares devem ser preferencialmente inseridos em pequenos rasgos feitos na superfície da amostra. Esta norma estipula também que as leituras individuais de temperatura, tanto nas placas, quanto nas amostras, não podem apresentar uma variação superior a $\pm 0.5 \text{ K}$ em relação à média da temperatura da superfície.

Amostras com condutividade térmica inferior a 0.15 W/m K , devem apresentar uma variação inferior a $\pm 0.15 \text{ K}$, em relação à temperatura média da face em questão. O gradiente térmico através das amostras deve se situar entre 15 e 20 K [17].

Sendo a diferença de temperatura entre as duas faces da amostra utilizada para a determinação do gradiente de temperatura, freqüentemente usa-se os sensores de temperatura conectados de forma diferencial, Figura 4.5. Desta maneira elimina-se erros causados pela existência de gradientes térmicos na junta de referência.



(a)



$\Delta\varepsilon_F$ - Tensão produzida pelo termopar devido a diferença de temperatura entre T_F e a temperatura de referência, R

$\Delta\varepsilon_Q$ - Tensão produzida pelo termopar devido a diferença de temperatura entre T_Q e a temperatura de referência, R

$\Delta\varepsilon_F$ - Tensão produzida pelo termopar devido a diferença de temperatura entre T_Q e T_F .

Figura 4.5 - Formas de medição com termopares - (a) e (b) individual, (c) diferencial.

Para a medição de temperatura da superfície do núcleo da placa quente a norma BS [17] sugere a colocação de três ou mais termopares. A diferença de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda deve ser medido pelo menos em quatro pontos distintos, individualmente ou diferencialmente, em cada face.

A medição da tensão dos termo-elementos deve ser através de um voltímetro de qualidade, com resolução igual ou menor a $\pm 1\mu\text{V}$. A fim de evitar a influência de tensões espúrias, recomenda-se uma resistência elétrica entre os sensores e a placa superior a $20\text{ M}\Omega$.

Para a medição de materiais de condutividade térmica inferior a 0.15W/m K a existência de fluxos radiais de calor entre o núcleo e o anel de guarda tem uma maior influência sobre o erro na condutividade térmica. Desta maneira, a utilização de termopares em forma de termopilha para medir o desbalanceamento de temperatura é mais eficaz, pois se consegue uma melhor amplificação do sinal [17].

É recomendável para materiais de alta condutividade térmica, que se faça um achatamento da junção dos termopares, com uma espessura inferior a 0.05mm . Deve-se utilizar também "pasta térmica" (ZnO) para melhorar o contato térmico [17].

4.7 -CONTATO TÉRMICO ENTRE AMOSTRAS E PLACAS

Para amostras semi-compressíveis, com uma condutividade térmica inferior a 0.15W/mK , a norma BS [17], sugere a colocação das amostra diretamente entre as placas de aquecimento e refrigeração. Deve-se utilizar uma pressão adicional entre 3kPa a 4kPa , o que equivale a uma massa de 30 a 40 Kg sobre uma placa de 305mm , para aumentar o contato térmico entre as superfícies. Reduz-se, desta maneira, a formação de "bolsões de ar", que provocariam uma alta resistência de contato.

Para amostra incompressíveis, com condutividade superior a 0.15W/m K , as normas BS [17] e ASTM [20], além da pressão adicional, recomendam inserir um material compressível, usualmente uma espuma de silicone de 3mm , entre as superfícies das amostras e das placas. Entretanto a espuma de silicone possui um condutividade térmica relativamente baixa (0.1W/mK), prejudicando a obtenção de uma superfície isotérmica na amostra.

4.8 - CONDICÃO DE REGIME PERMANENTE

O tempo necessário para a obtenção do regime permanente varia consideravelmente com as dimensões e características do equipamento, podendo levar de horas até dias para atingir este estado.

A norma BS [17] determina que o regime permanente só é obtido depois que três leituras realizadas, separadas por um intervalo não menor que 2 horas, indiquem que as variações de temperatura são somente randômicas, com uma variação na condutividade térmica inferior a 0.5%.

A norma ASTM [20] recomenda que o intervalo de tempo entre medições não sejam inferiores a 30 min ou à constante de tempo do sistema². Três medições devem ser realizadas e obtém-se o regime permanente quando as leituras não diferirem da média por uma incerteza não maior que a pretendida.

Para a norma AFNOR NF X10-021, segundo Philippi *et all* [06], o regime permanente é alcançado, quando as seguintes condições forem satisfeitas:

1. A diferença de temperatura entre o núcleo e anel de guarda, δT , não exceder a

$$\delta T < \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T}{L} \quad (4.3)$$

onde L é a espessura da amostra e ΔT é o gradiente térmico através da amostra.

2. A diferença de temperatura entre as faces da placa quente não ser superior a 1% do desvio médio da temperatura do ensaio,

$$T_{ns} - T_{ni} \leq \frac{\Delta T}{100} \quad (4.4)$$

²NOTA: A constante de tempo do sistema definida pela norma ASTM [20] representa o tempo necessário para a temperatura alcançar 37% da temperatura final, após se impor um impulso térmico no sistema.

onde T_{ns} e T_{ni} são as temperaturas medidas nas faces superior e inferior da placa quente, respectivamente.

3. As diferenças de temperatura ΔT_s e ΔT_i não devem diferir mais de 2% da diferença média,

$$\Delta T_s - \Delta T_i < \frac{(2 \cdot \Delta T)}{100} \quad (4.5)$$

4. Um mínimo de três medidas espaçadas de pelo menos 4 horas não podem produzir:

- Uma variação superior a 1% em torno do valor médio.
- Uma variação para o desvio médio, ΔT_m , maior que 1% em torno de seu valor médio.
- Uma variação de temperatura das placas frias superior a $\pm 0.1K$.

Em equipamentos onde o controle de potência dissipada sobre a resistência de aquecimento do anel de proteção é manual, torna-se difícil a estabilização entre a temperatura do anel de proteção e o núcleo. A norma BS [17], sugere que seja feito quatro medições, cada qual na condição de regime permanente, duas com a temperatura do anel de guarda levemente acima da do núcleo e duas com temperatura levemente abaixo, em uma faixa de aproximadamente $\pm 0.3K$. Plota-se um gráfico da condutividade térmica aparente contra o desbalanceamento de temperatura e determina-se o valor da condutividade térmica, por extrapolação, para um desbalanceamento nulo, supondo que a variação é linear.

Uma forma de reduzir o tempo necessário para a obtenção do regime permanente é operar a placa quente na condição de temperatura constante, inicialmente. Tendo a temperatura estabilizado, determina-se a potência média dissipada no núcleo. Chaveia-se então o sistema para o modo de operação com potência constante.

4.9 - ANÁLISE DE ERROS

4.9.1 - INTRODUÇÃO

A medição da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida requer a medição do fluxo de calor unidimensional na área central de medição em condição de regime permanente. Há necessidade da determinação da espessura e dos gradientes térmicos sobre as amostras. Desvios na medição destas grandezas resultam em erros na determinação da condutividade térmica. Os desvios da condição do fluxo de calor unidimensional são os mais difíceis de serem estimados, geralmente ocasionados por:

- diferenças na temperatura ambiente.
- desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda;
- heterogeneidades nas amostras;

Estes fatores provocam distorções nas linhas isotérmicas e de fluxo de calor nas amostras, modificando a hipótese de fluxo de calor unidimensional, as perdas resultantes são expressas na Figura 4.6.

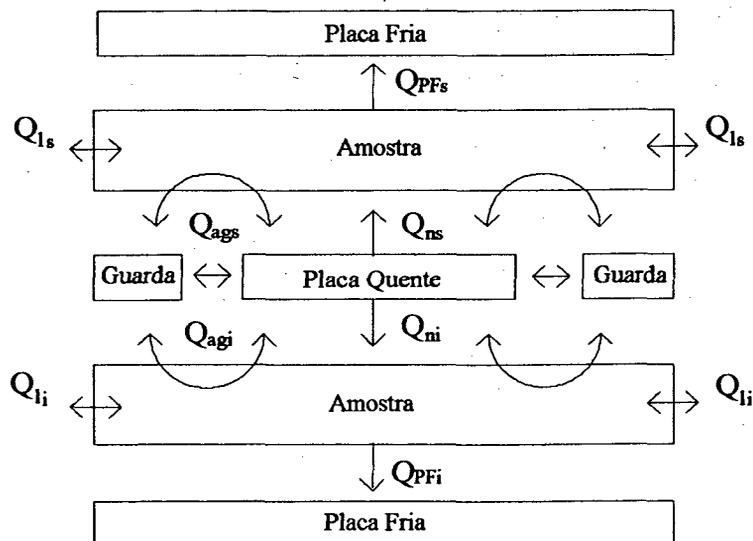


Figura 4.6 - Desvios ocorridos da condição de fluxo de calor unidimensional nas amostras.

As perdas laterais são representadas pela parcela Q_l e as perdas relativas ao desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda são representadas pelo termo Q_{ag} . Os sub-índices i e s denotam, respectivamente, inferior e superior, demonstrando que pode ocorrer diferenças entre o fluxo que passa através das amostras superior e inferior, alterando a condição de simetria.

4.9.2 - PERDAS LATERAIS DE CALOR (Q_l)

As perdas laterais de calor aparecem como um erro sistemático, se as condições de temperatura em volta do equipamento permanecerem constantes. Embora vários pesquisadores tenham investigado esta influência [23, 27, 28], as correções ainda não são utilizadas. Entretanto os resultados ajudam na definição de espessura de amostra, demonstrando que a temperatura ambiente (ou do anel de guarda secundário) para minimizar este erro é próxima à temperatura média das suas superfícies quente e fria. Quando há a disponibilidade do anel de guarda secundário pode-se determinar esta dependência experimentalmente.

Fez-se uma análise dos erros devido às perdas de calor pelas faces laterais que ocorrem em um equipamento de placa quente protegida utilizando uma configuração retangular, Figura 4.7. As seguintes hipóteses foram assumidas:

- as temperaturas nas superfícies do núcleo, do anel de guarda e das placas frias são mantidas constantes;
- o núcleo possui uma dimensão linear de $2\ell_1$ e o anel de guarda possui uma espessura de $(\ell_2 - \ell_1)$;
- a amostra possui condutividade térmica, λ , constante, homogênea e isotrópica;
- o fluxo de calor pelas faces laterais da amostra é proporcional à diferença de temperatura entre a face lateral e o ar. O coeficiente de convecção é constante;
- o campo de temperatura é bidimensional, negligenciando os efeitos de canto;
- a seção é suposta infinita na terceira dimensão;
- a temperatura do núcleo é igual a do anel de guarda, T_0 ;

- a folga entre o núcleo e o anel de guarda é desconsiderada;
- é utilizado um isolante lateral em contato com as amostras, de espessura ℓ_i e condutividade térmica λ_i . A outra face está exposta ao ambiente da sala, à temperatura T_a , com um coeficiente de convecção $h_c = 0.058 \text{ W/m}^2\text{K}$, valor utilizado por Troussart [29]. Adota-se um coeficiente de transmissão global, U_1 , definido pela equação (4.6), para a face lateral.

$$U_1 = \frac{L}{\frac{1}{h_c} + \frac{\ell_i}{\lambda_i}} \quad (4.6)$$

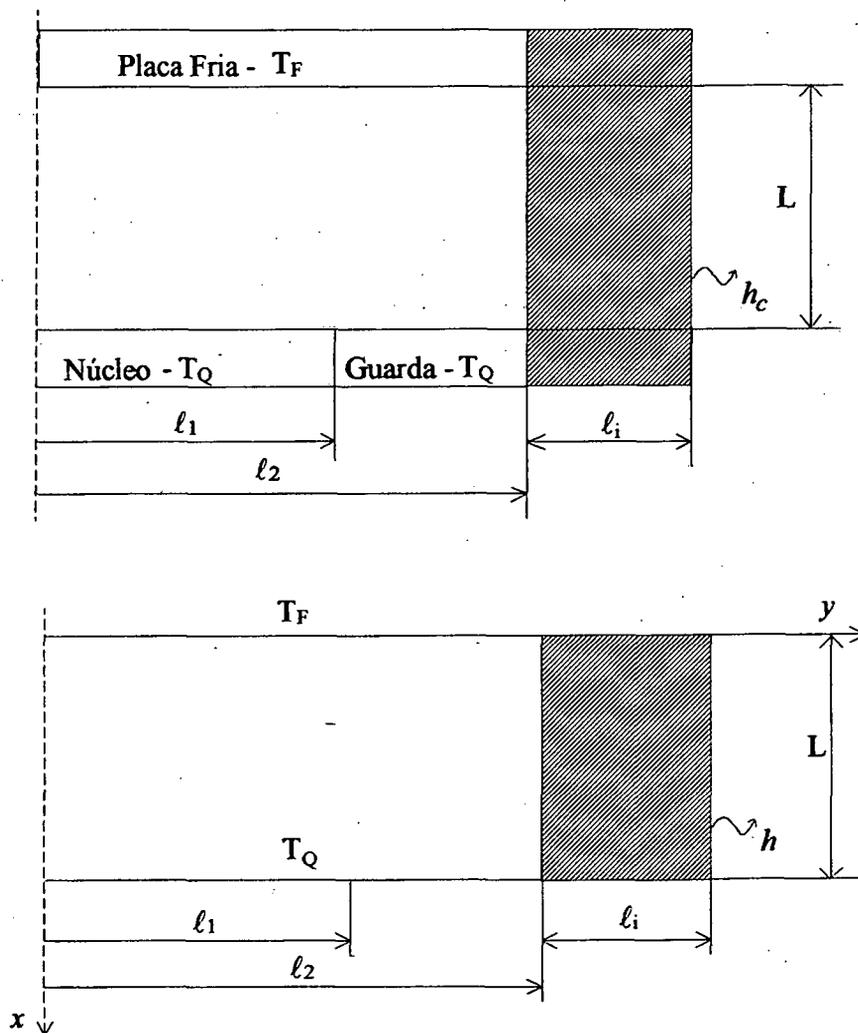


Figura 4.7 - Esquemas do modelo utilizado para o cálculo da influência da temperatura ambiente.

Usando a variável $\Theta = T - T_a$, o campo térmico é obtido através da solução da equação de Laplace,

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0 \quad (4.7)$$

sujeita às seguintes condições de contorno,

$$\Theta(0, y) = \Theta_F$$

$$\Theta(L, y) = \Theta_Q$$

(4.8)

$$\frac{\partial \Theta(x, 0)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial \Theta(x, \ell_2)}{\partial y} = U_1 \Theta$$

Resolvendo pelo método de separação de variáveis [30], obtém-se o seguinte campo de temperatura:

$$\begin{aligned} \Theta(x, y) = & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\Theta_Q \text{sen}(x_n)}{\left[x_n + \frac{1}{2} \text{sen}(2x_n) \right] \text{senh}\left(\frac{x_n}{\ell_2} L\right)} \text{senh}\left(\frac{x_n}{\ell_2} x\right) \cos\left(\frac{x_n}{\ell_2} y\right) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\Theta_F \text{sen}(x_n)}{\left[x_n + \frac{1}{2} \text{sen}(2x_n) \right] \left(1 - e^{-2\alpha_n L}\right)} \left(e^{\alpha_n x} - e^{\alpha_n (2L - x)} \right) \cos\left(\frac{x_n}{\ell_2} y\right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

onde $x_n = \alpha_n \ell_2$ e α_n são os autovalores obtidos pela solução da equação transcendental (4.10), sendo utilizados seis termos para a convergência da série [31, 32].

$$\alpha_n = \frac{U}{\lambda} \cotg(\alpha_n \ell_2) \quad (4.10)$$

define-se o erro na medição da condutividade térmica como a diferença entre o valor que seria determinado experimentalmente, $\lambda_{experimental}$ com o valor real, λ .

$$\varepsilon\lambda = \frac{\lambda_{experimental} - \lambda}{\lambda} \quad (4.11)$$

sendo a condutividade térmica, $\lambda_{experimental}$, obtida pela equação de Fourier,

$$\lambda_{experimental} = -\frac{q_{experimental} L}{(\Theta_Q - \Theta_F)} \quad (4.12)$$

o fluxo de calor experimental é calculado através da integração do fluxo na face quente da área do núcleo ,

$$q_{experimental} = -\frac{1}{\ell_1} \int_0^{\ell_1} \lambda \left. \frac{d\Theta}{dx} \right|_{x=L} dy \quad (4.13)$$

onde o termo $\left. \frac{d\Theta}{dx} \right|_{x=L}$ é expresso na equação (4.14).

$$\begin{aligned} \frac{d\Theta}{dx}\Big|_{x=L} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\Theta_Q \text{sen}(x_n)}{\left[x_n + \frac{1}{2} \text{sen}(2x_n)\right]} \frac{x_n}{\ell_2} \text{cotgh}\left(\frac{x_n L}{\ell_2}\right) \cos\left(\frac{x_n y}{\ell_2}\right) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\Theta_F \text{sen}(x_n)}{\left[x_n + \frac{1}{2} \text{sen}(2x_n)\right]} \frac{(2\alpha_n e^{\alpha_n L})}{(1 - e^{2\alpha_n L})} \cos\left(\frac{x_n y}{\ell_2}\right) \end{aligned} \quad (4.14)$$

o fluxo de calor é expresso por:

$$\begin{aligned} q_{\text{experimental}} &= -\frac{\lambda}{\ell_1} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\Theta_Q \text{sen}(x_n)}{\left[x_n + \frac{1}{2} \text{sen}(2x_n)\right]} \text{cotgh}\left(\frac{x_n L}{\ell_2}\right) \text{sen}\left(\frac{x_n \ell_1}{\ell_2}\right) \right. \\ &\left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\Theta_F \text{sen}(x_n)}{\left[x_n + \frac{1}{2} \text{sen}(2x_n)\right]} \frac{\alpha_n \ell_2}{x_n} \frac{e^{\alpha_n L}}{(1 - e^{2\alpha_n L})} \text{sen}\left(\frac{x_n \ell_1}{\ell_2}\right) \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

Calculou-se então o erro na medição da condutividade térmica em função da espessura da amostra, segundo às condições das Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3. A relação entre a temperatura ambiente e temperatura das placas foi adimensionalizada da seguinte maneira:

$$a = \frac{T_a - T_F}{T_Q - T_F} \quad (4.16)$$

Tabela 4.1 - Condições comuns às curvas da Figura 4.8.

condutividade térmica da amostra	0.3W/m K
largura do núcleo placa quente, $2\ell_1$	200mm
largura do anel de guarda	50mm
espessura da isolação lateral	100mm
condutividade térmica da isolação lateral	0.040W/m K
coeficiente de convecção natural	0.058W/m ² K
gradiente térmico na amostra	20K

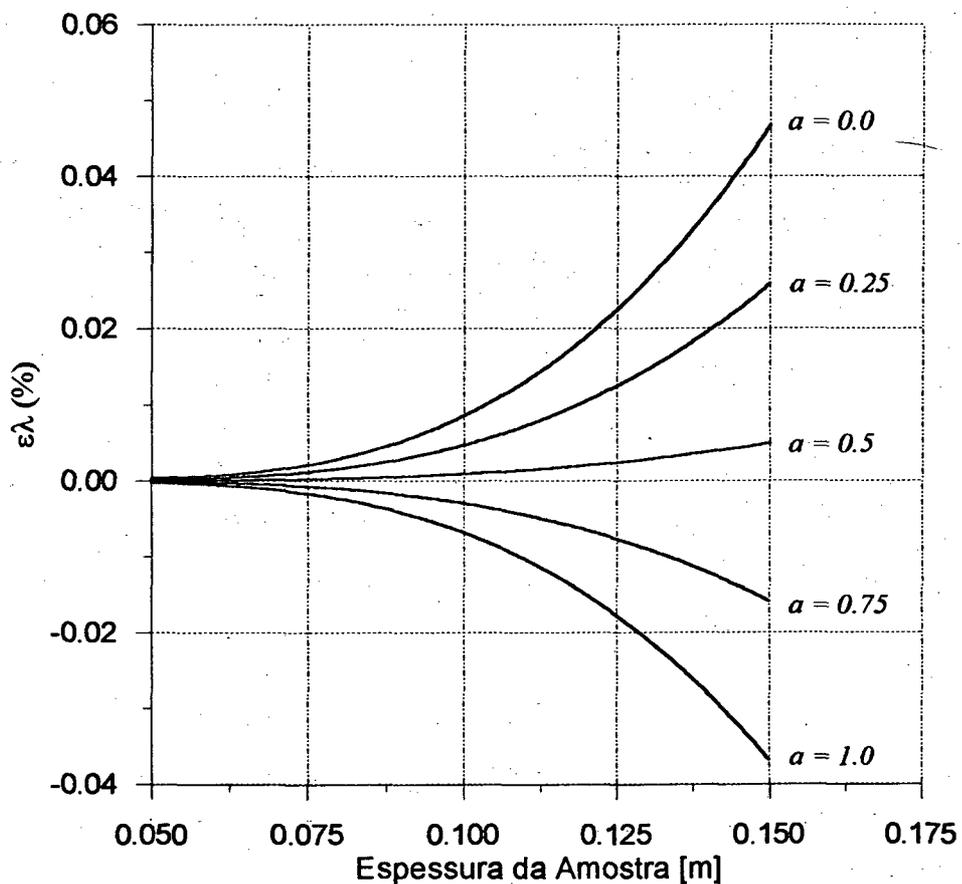


Figura 4.8 - Erro na medição da condutividade térmica ($\epsilon\lambda$), em função da temperatura ambiente (a), para uma relação $\lambda/\lambda_i=7.5$ e espessura do isolante lateral (ℓ_i) igual a 100mm.

Tabela 4.2 - Condições comuns às curvas da Figura 4.9.

condutividade térmica da amostra	0.042W/m K
largura do núcleo placa quente, $2\ell_1$	200mm
largura do anel de guarda	50mm
espessura da isolação lateral	100mm
condutividade térmica da isolação lateral	0.040W/m K
coeficiente de convecção natural	0.058W/m ² K
gradiente térmico na amostra	20K

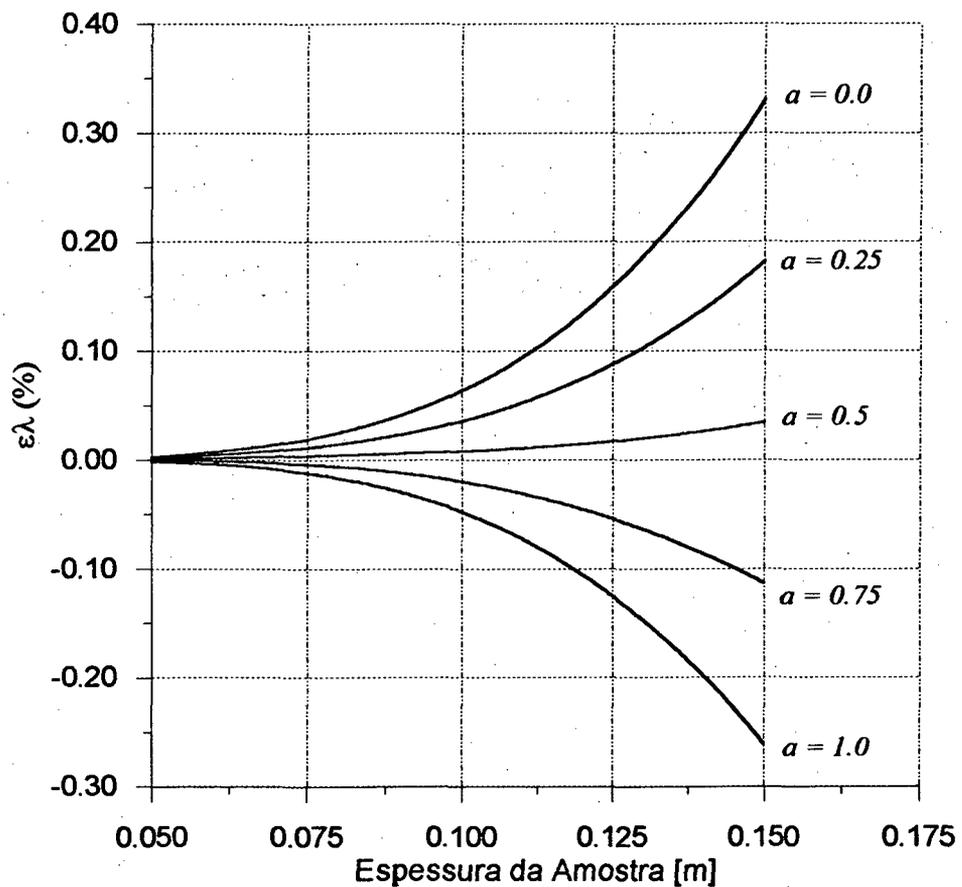


Figura 4.9 - Erro na medição da condutividade térmica ($\epsilon\lambda$), em função da temperatura ambiente (a), para uma relação $\lambda/\lambda_i=1.05$ e espessura do isolante lateral (ℓ_j) igual a 100mm.

Tabela 4.3 - Condições comuns às curvas da Figura 4.10.

condutividade térmica da amostra	0.042W/m K
largura do núcleo placa quente, $2\ell_1$	200mm
largura do anel de guarda	50mm
coeficiente de convecção natural	0.058W/m ² K
gradiente térmico na amostra	20K

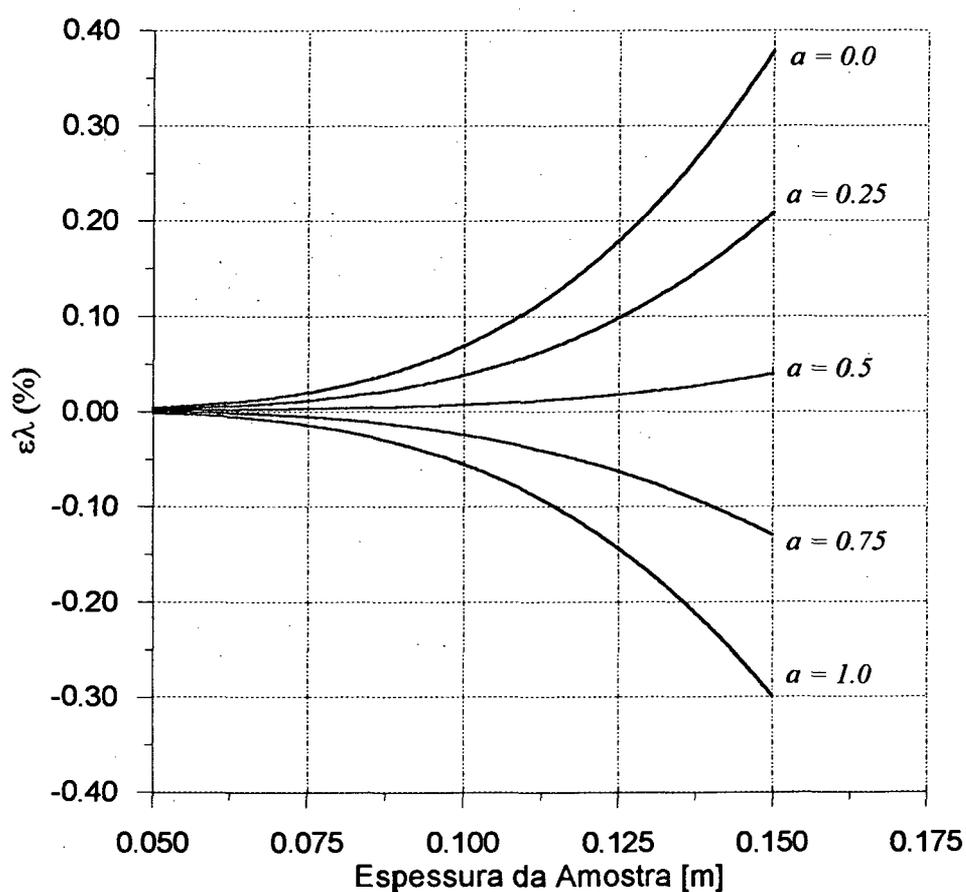


Figura 4.10 - Erro na medição da condutividade térmica ($\epsilon\lambda$), em função da temperatura ambiente (a), para uma relação $\lambda/\lambda_1=1.05$ e sem isolamento lateral.

Nota-se que o erro é mais significativo para amostras com uma condutividade térmica menor. Isto é devido, principalmente, ao aumento da relação condutividade térmica da amostra pela condutividade térmica do isolamento lateral utilizado (λ/λ_i), Figuras 4.8 e 4.9. Comparando as curvas das Figuras 4.9 e 4.10, nota-se a pouca variação do erro sem a utilização do isolamento lateral, ocasionado, fundamentalmente pela baixa relação λ/λ_i .

A primeira vista, espera-se que para que o erro devido às perdas laterais seja nulo, a temperatura ambiente seja a média das temperaturas das faces quentes e frias das amostras ($\alpha=0.5$). Mas, isto seria verdade se o fluxo de calor fosse medido na seção média da amostra ($x=L/2$). Em verdade, mede-se o fluxo de calor na placa quente e alguma parte é trocado com o ambiente, sendo o fluxo de calor determinado, maior que aquele que efetivamente atravessa a amostra. Então a temperatura ambiente deve ser um pouco superior à temperatura média para que o erro na condutividade térmica torne-se nulo.

Contudo, nota-se nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 que as perdas laterais de calor para o ambiente são mínimas para espessuras de amostras inferiores a 50mm, faixa utilizada no método da placa quente protegida.

4.9.3 - PERDAS DE CALOR ENTRE O NÚCLEO E O ANEL DE GUARDA

Este erro ocorre, principalmente, porque existe um número finito de locais ao longo da folga entre o núcleo e o anel de guarda em que o desbalanceamento de temperatura é medido. Posições impróprias destes sensores irão resultar em erros sistemáticos. Quando o desbalanceamento de temperatura é constante, o fluxo de calor, Q_{ag} , trocado entre o núcleo e o anel de guarda é definido por Woodside, segundo De Ponte e Di Filippo [23] como:

$$Q_{ag} = Q_o + c\lambda \quad [W/K] \quad (4.17)$$

O termo Q_o é a razão do fluxo de calor através da folga e depende das conexões elétricas e mecânicas e trocas de calor por condução e convecção, é função da forma de construção da placa, da forma de fixação do anel de guarda ao núcleo e do fluxo entre os

elementos sensores conectados entre o núcleo e o anel de guarda. A parcela $c\lambda$ é a razão do fluxo de calor entre o núcleo e o anel de guarda que é transportado através das amostras de condutividade térmica λ .

O termo Q_0 é uma quantidade típica da placa e é um termo praticamente constante. O parâmetro c depende das espessuras das amostras e da geometria da folga. O parâmetro c foi determinado por Woodside e Donaldson, segundo De Ponte e Di Filippo [23], com as seguintes simplificações:

- o campo de temperatura é bidimensional, negligenciando os efeitos de canto;
- a seção é assumida infinita na terceira dimensão;
- cada superfície é considerada isotérmica.

Estes autores obtiveram, então, o seguinte resultado em função da espessura da amostra, L , tamanho do núcleo, 2ℓ , e espessura da folga, d ; equação (4.18) e Figura 4.11.

$$\frac{c}{\ell} = \frac{16}{\pi} \ln \left\{ 4 / \left[1 - \exp(-2\pi d/L) \right] \right\} \quad (4.18)$$

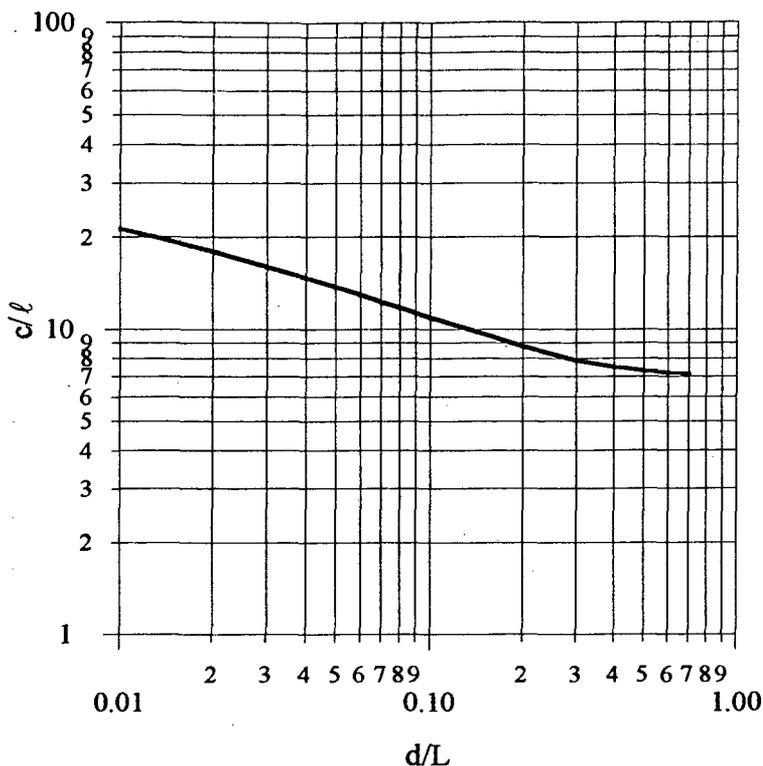


Figura 4.11 - Gráfico do parâmetro de desbalanceamento c/ℓ versus a razão entre a espessura da folga e espessura da amostra d/L (Fonte: De Ponte e Di Filippo [23]).

Também, pode-se expressar a sensibilidade do equipamento de placa quente protegida ao desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda, através de uma relação de proporcionalidade linear [20], representada pela equação (4.19).

$$\delta Q_{ag} = B \delta T \quad [W] \quad (4.19)$$

A constante de proporcionalidade B agrupa a influência do parâmetro Q_0 , da forma de construção da placa e espessura e condutividade térmica da amostra.

Troussart [29] simulou o desbalanceamento de temperatura para um equipamento de placa quente protegida de geometria circular. Através do método dos elementos finitos calculou o erro na medição da condutividade térmica, $\epsilon\lambda$, em função de parâmetros como, espessura de amostra, gradiente de temperatura, dimensões da folga entre o núcleo e o anel de guarda e tipo de material de que é feito a placa quente.

A Figura 4.12, mostra os resultados obtidos para uma configuração conforme as Tabelas 4.4 e 4.5, para uma amostra de fibra de vidro.

Tabela 4.4 - Condições comuns às curvas da Figura 4.12.

termopilha	não
condutividade térmica da amostra	0.042W/m K
raio do núcleo placa quente	150mm
largura do anel de guarda	30, 75, 150mm
material da placa quente	cobre ($\lambda=393\text{W/m K}$)
largura da isolamento lateral	150mm
condutividade térmica da isolamento lateral	0.035W/m K
temperatura ambiente	0°C
temperatura média	0°C
coeficiente de convecção natural	0.05815W/m ² K
folga entre núcleo e anel de guarda (ar)	2mm

Tabela 4.5 - Condições particulares a cada curva da Figura 4.12.

Curva	espessura de amostra [mm]	gradiente de temperatura [K]
A	100	5
B	100	20
C	5	20

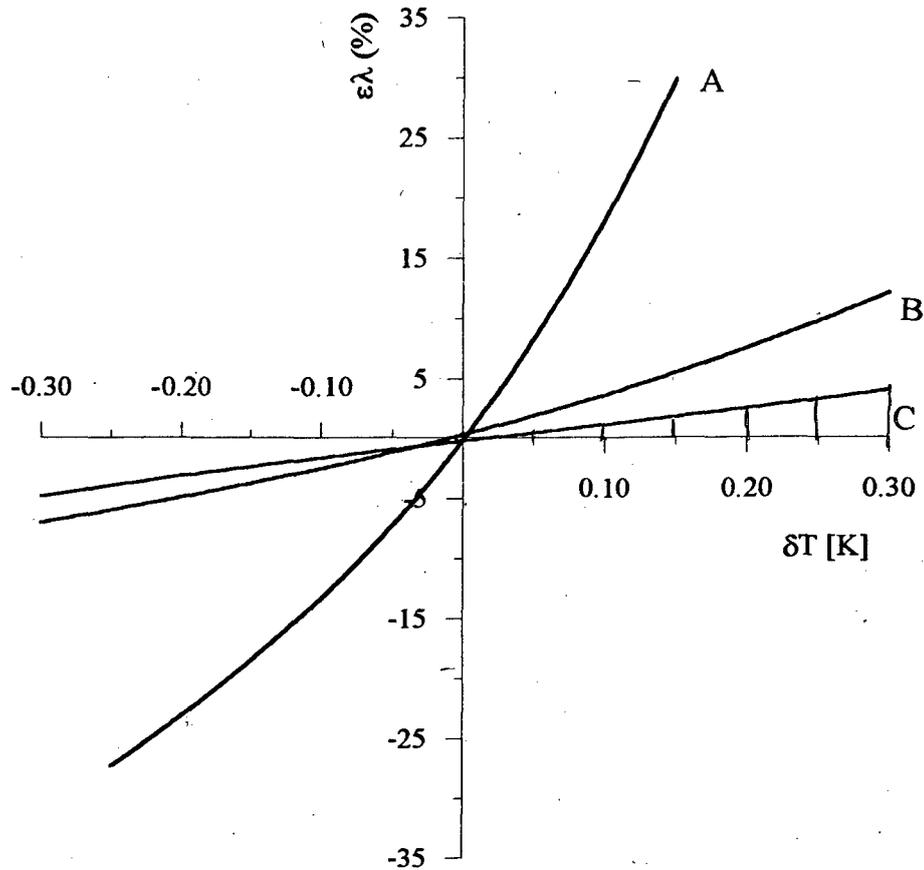


Figura 4.12 - Erro na medição da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e anel de guarda, gradiente térmico e espessura da amostra (Fonte: Troussart [29]).

A Figura 4.12 demonstra, principalmente, que quanto maior o gradiente térmico e menor a espessura de amostra, menor será o erro na medição da condutividade térmica devido ao desbalanceamento de temperatura. Troussart obteve pouca variação do erro na medição da condutividade térmica com o desbalanceamento de temperatura em função da espessura do anel de guarda. As curvas A, B e C representam os resultados quase coincidentes para as espessuras de anel de guarda de 30, 75 e 150mm, variando-se os outros parâmetros.

A Figura 4.13, mostra a influência das pontes térmicas entre o núcleo e o anel de guarda através dos termopares utilizados para medir o desbalanceamento de temperatura, conforme Tabela 4.6. A Tabela 4.7, mostra às condições particulares a cada curva.

Tabela 4.6 - Condições comuns às curvas da Figura 4.13.

termopilha	45 junções em cada lado da placa quente
condutividade térmica da amostra	0.042W/m K
raio do núcleo placa quente	150mm
largura do anel de guarda	150mm
material	cobre ($\lambda=393\text{W/m K}$)
espessura da amostra	150mm
largura da isolação lateral	50mm
condutividade térmica da isolação lateral	0.035W/m K
temperatura ambiente	0°C
temperatura média	0°C
coeficiente de convecção natural	0.05815W/m ² K
folga entre núcleo e anel de guarda (ar)	2mm

Tabela 4.7 - Condições particulares a cada curva da Figura 4.13.

Curva	gradiente de temperatura [K]	diâmetro do termopar [mm]	tipo de termopar
A	5	0.3	cobre/constantan
B	5	0.3	ferro/constantan
C	5	0.1	ferro/constantan
D	20	0.1	ferro/constantan

condutividade térmica do cobre =393W/m K

condutividade térmica do constantan =22W/m K

condutividade térmica do ferro =80W/m K

Nota-se, como esperado, um aumento do erro com o acréscimo da condutividade térmica do termopar (curvas A-B), um decréscimo do erro com a redução do diâmetro (curvas B-C) e o aumento do gradiente térmico na amostra (curvas C-D).

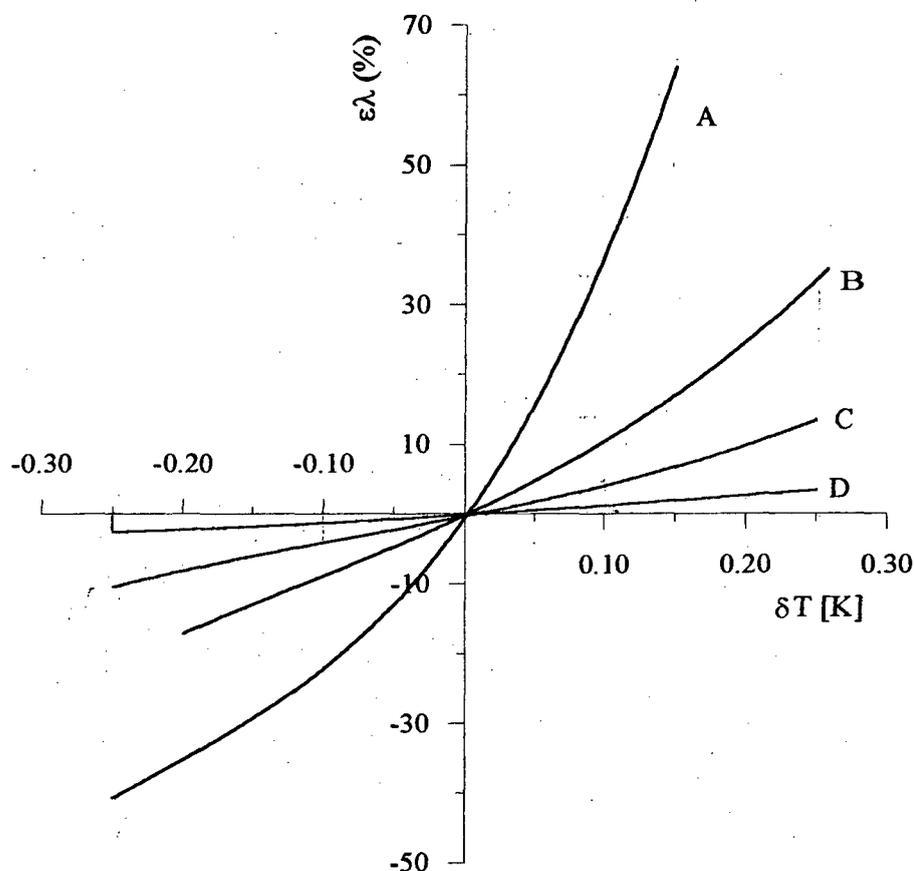


Figura 4.13 - Erro na medição da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo, gradiente térmico e pontes térmicas devido a termopares (Fonte: Troussart [29]).

A Figura 4.13 mostra o efeito do desbalanceamento de temperatura para duas larguras de folgas diferentes, para placas de cobre e alumínio. Demonstra-se que a melhor medição é realizada com uma folga mais larga, e que o efeito do desbalanceamento pouco a modifica, alterando-se as condutividades das placas. Para o mesmo erro, é mais econômico construir uma placa de alumínio que uma de cobre.

Tabela 4.8 - Condições comuns às curvas da Figura 4.14.

termopilha	45 junções em cada lado da placa quente ($\varnothing = 0.3\text{mm}$) cobre/constantan
condutividade térmica da amostra	0.042W/m K
raio do núcleo placa quente	250mm
largura do anel de guarda	50mm
espessura da amostra	50mm
largura da isolação lateral	150mm
condutividade térmica da isolação lateral	0.035W/m K
temperatura ambiente	0°C
temperatura média	0°C
coeficiente de convecção natural	0.05815W/m ² K

Tabela 4.9 - Condições particulares a cada curva da Figura 4.14.

Curva	material	folga [mm]
A	cobre	2
B	cobre	6
C	alumínio	2
D	alumínio	6

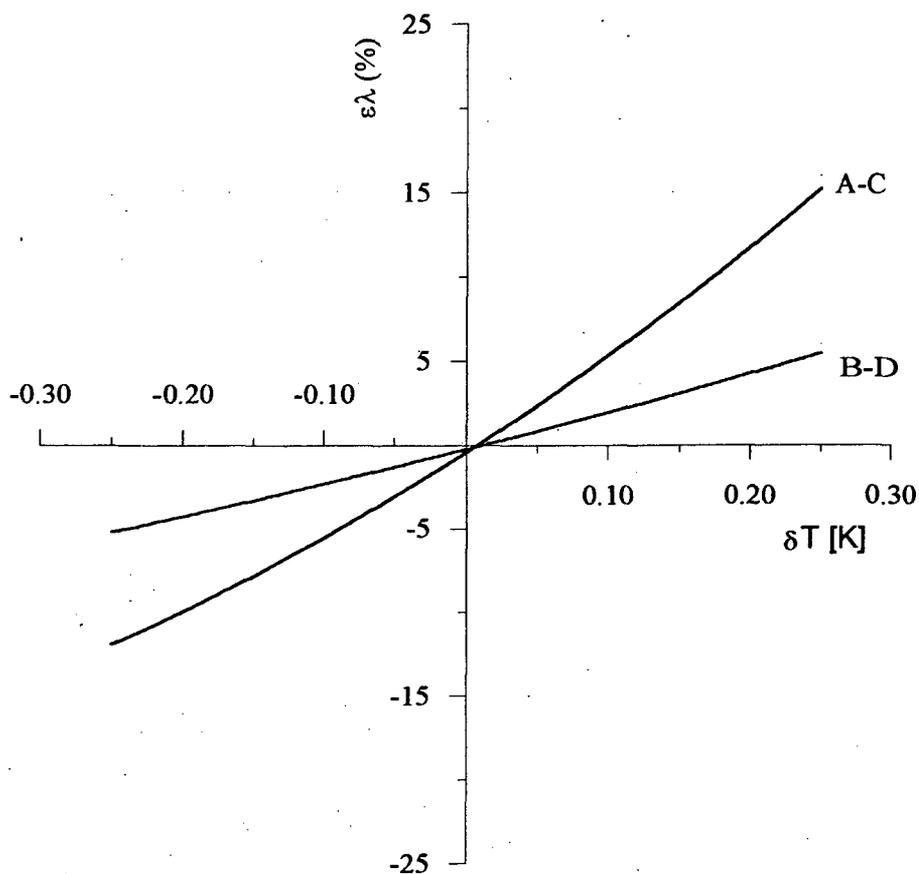


Figura 4.14 - Erro na medição da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e anel de guarda, folga e material da placa quente (Fonte: Troussart [29]).

Troussart sugere, que para a medição de isolantes térmicos com uma condutividade térmica inferior a 0.045W/mK para espessuras superiores a 25mm , deve-se usar no mínimo um gradiente térmico de 20K nas amostras e os termopares utilizados devem possuir um diâmetro inferior a 0.2mm .

4.9.4 - HETEROGENEIDADES NA AMOSTRA

Amostras heterogêneas podem apresentar gradientes térmicos nas suas superfícies, dependendo onde os sensores são instalados. Desde que a resistência de contato influi na

medição, é necessário que as faces das amostras sejam tão planas quanto possível, evitando-se a formação de bolsões de ar.

Quando há a presença de defeitos na superfície da amostra, podem ocorrer modificações no fluxo de calor. Esta perturbação depende de [19]:

- 1 - a resistência térmica efetiva do defeito;
- 2 - dimensões do defeito;
- 3 - do fluxo de calor requerido para se obter o gradiente térmico na amostra;
- 4 - a condutividade térmica e a espessura das lâminas de contato.

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram o efeito de um defeito de profundidade de 0,2mm e um diâmetro lateral efetivo de 150mm na superfície da placa quente, é plotado para diferentes valores de L e t, espessura da amostra e lâminas de contato, respectivamente. O erro é definido pela equação (4.20),

$$\epsilon t = \frac{\Theta_n - \Theta_f}{\Theta_n} \quad (4.20)$$

onde Θ_f é o gradiente de temperatura através da amostra em uma linha diretamente no centro do defeito (Q-Q') e Θ_n é o gradiente de temperatura em uma área não afetada, próxima ao defeito (R-R'), Figura 4.15.

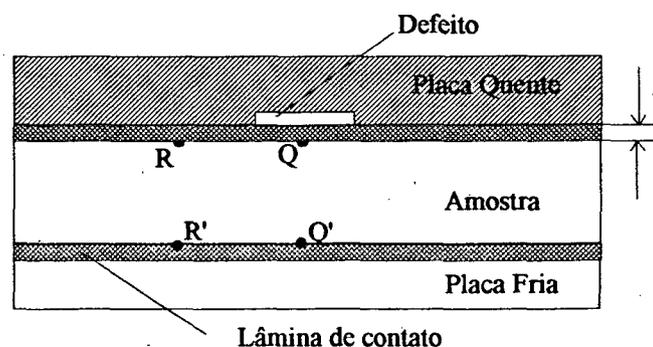
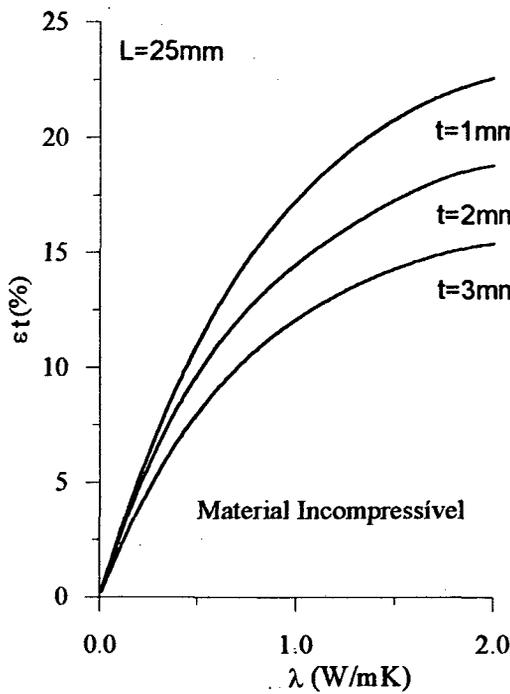
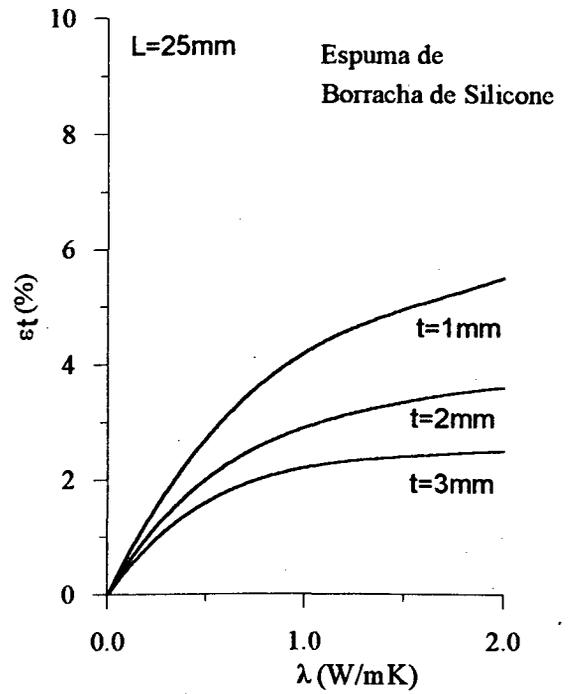


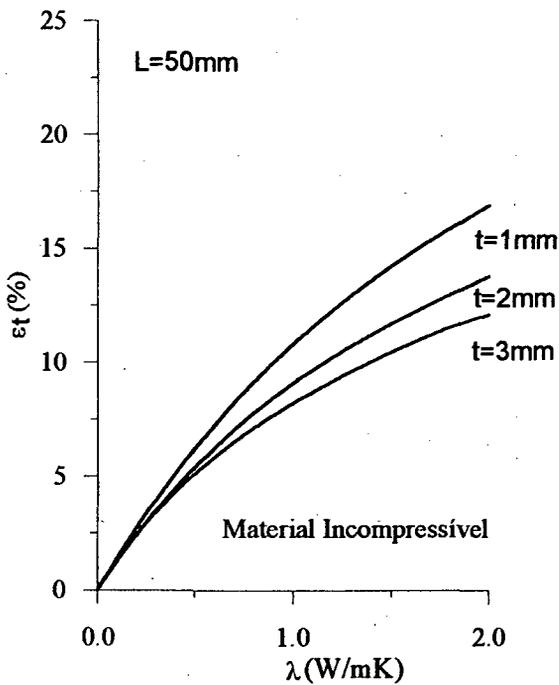
Figura 4.15 - Esquema do defeito plotado nos gráficos da Figura 4.16 (Fonte BS [19]).



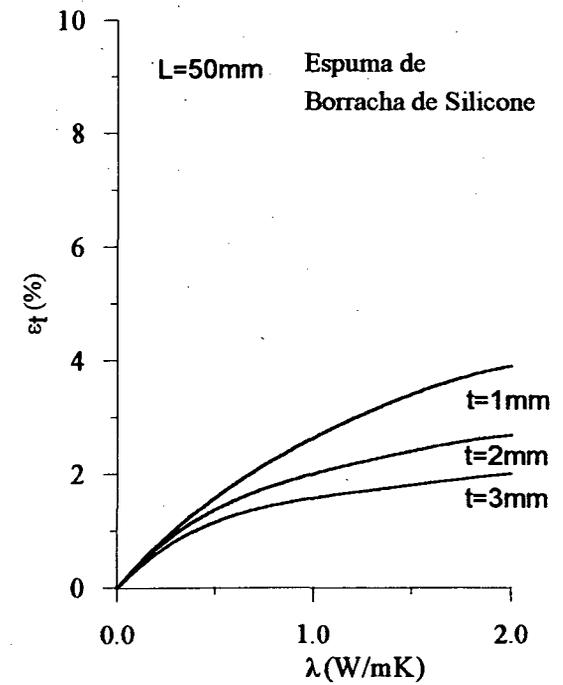
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura 4.16 - Variação do parâmetro ϵt , associado a um defeito interfacial na placa quente com a condutividade térmica, λ , da amostra, em função da espessura da amostra, L e espessura da lâmina de contato, t . É demonstrado, utilizando um material incompressível (a) e (b), e uma lâmina de espuma de borracha de silicone, (c) e (d) (Fonte: BS [19]).

Nota-se, através das Figuras 4.16 (a), (b), (c) e (d) a importância da utilização de uma lâmina compressível, como espuma de borracha de silicone, quando da existência de defeitos interfaciais na superfície de contato.

4.9.5 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES

Uma fonte de erros na medição de condutividade térmica pelo método da placa quente protegida é o posicionamento impróprio dos sensores. Se os sensores são, somente montados nas superfícies das placas quente e frias, a resistência de contato entre as placas e superfícies das amostras torna-se uma fonte significativa de erros. Tye e Spinney, segundo Philippi *et al* [06], demonstraram esta influência instalando, alternativamente, termopares sobre as placas, quente e frias, e sobre as superfícies das amostras de concreto seco, Figura 4.17. Nota-se que a medida que a condutividade térmica aumenta este erro torna-se mais significativo.

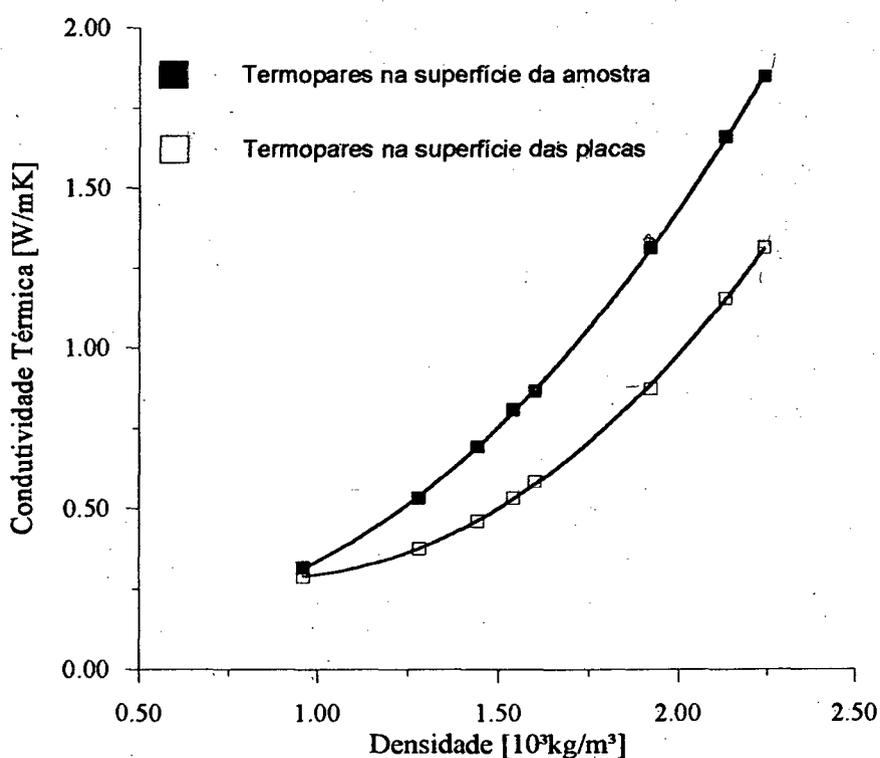


Figura 4.17 - Influência da resistência de contato na determinação da condutividade térmica (Fonte: Tye e Spinney, segundo Philippi *et al* [06]).

CAPÍTULO 5

EQUIPAMENTO DE PLACA QUENTE PROTEGIDA DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

5.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo descreve-se um protótipo de equipamento de placa quente protegida, utilizado para medição da condutividade térmica de materiais isolantes. O equipamento construído com tecnologia nacional, através de um projeto FINEP-PADCT, obedece fundamentalmente às normas BS874, ISO 8302, ASTM C177-85 e AFNOR NFX10-021.

As amostras devem ser construídas na forma de placas planas com dimensões de 300 x 300mm. A espessura, em geral 50mm, pode variar dependendo do material, conforme recomendações da norma BS [17].

O equipamento dispõe ainda de um sistema de aquisição e controle de sinais, desenvolvido na forma de protótipo, que efetua as etapas de aquisição, processamento e controle de sinais em tempo real, não sendo necessário sua operação durante a execução do ensaio.

O equipamento de placa quente protegida utilizado é construído de forma simétrica, sem a utilização do anel de guarda secundário (lateral), em virtude da realização de medições em temperaturas próximas à temperatura ambiente.

A Figura 5.1, mostra esquematicamente o equipamento. As amostras e as placas frias são dispostas simetricamente em relação à placa quente. As amostras de espessuras conhecidas são submetidas a uma densidade de fluxo de calor unidimensional e quando o experimento atinge o regime permanente, mede-se a diferença de temperatura entre as faces das amostras. A condutividade térmica é calculada pela equação de Fourier:

$$\lambda = \frac{QL}{2A\Delta T} \quad [\text{W/m K}] \quad (5.1)$$

onde λ é a condutividade térmica das amostras; Q é a potência elétrica [W] dissipada no núcleo da placa quente, L é a espessura [m] média das amostras; A é a área [m²] efetiva de geração do fluxo de calor, corresponde a área do núcleo da placa quente mais metade da área da folga entre o núcleo e o anel de guarda; e ΔT é a diferença de temperatura [K] entre as faces opostas das amostras.

A temperatura das placas frias é mantida constante através de um banho termostaticado, modelo MQBTZ99-20 da Microquímica. Possui uma faixa de operação entre -10 a 99°C e uma flutuação de temperatura inferior a $\pm 0.05\text{K}$ [33]. As placas são conectadas ao banho através de mangueiras isoladas termicamente, com uma ligação em paralelo. Observou-se diferenças nas temperaturas da placa superior e inferior de aproximadamente 0.1K. Isto é devido principalmente à diferença de altura entre as placas, que possibilita uma maior circulação de água na placa inferior.

A temperatura máxima de operação da placa quente é aproximadamente 50°C, sendo limitada pelo fim de escala do sistema de medição de temperatura (1000 μV em relação à referência).

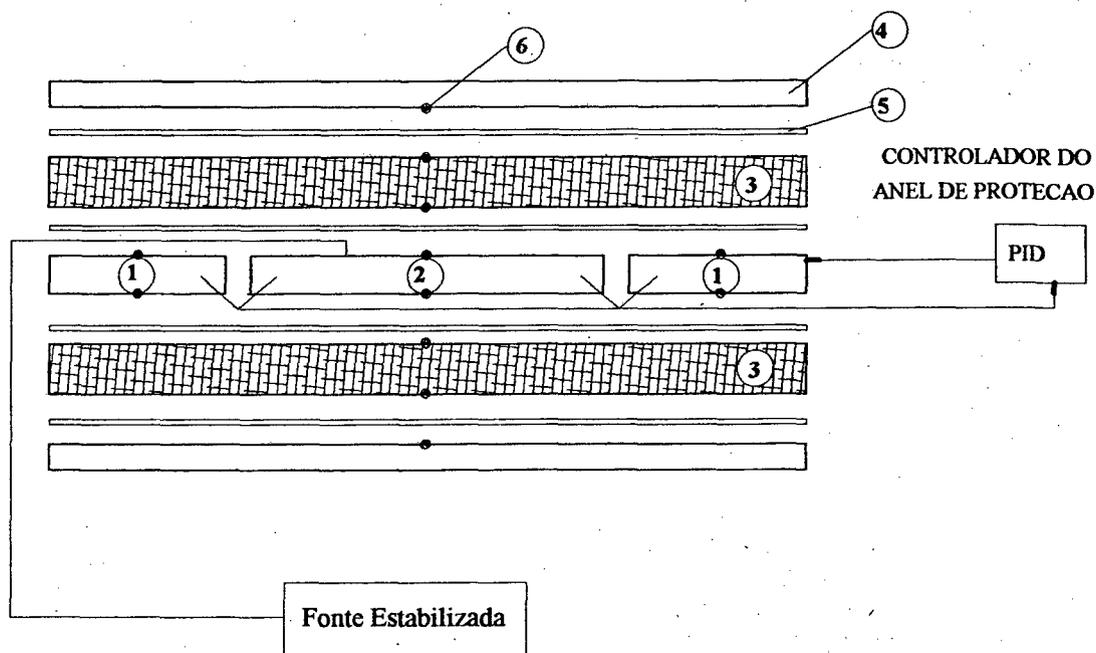
Utiliza-se uma fonte estabilizada de corrente contínua, marca DAWER FC-10002D [33], para a alimentação da resistência de aquecimento do núcleo da placa quente. Sobre esta resistência mede-se a corrente (I) e a tensão (V), para o cálculo da potência dissipada ($Q=VI$). A fonte estabilizada possui uma faixa de operação de 0 a 100V e/ou uma corrente de 0 a 2A. A variação máxima de tensão especificada é de $\pm 0.01\text{V}$, embora tenha-se observado variações próximas a $\pm 0.3\text{V}$.

Faz-se o controle de temperatura do anel de guarda através de um sistema PID, implementado por software e chaveado por um gradador tipo TRIAC.

Para evitar a formação de bolsões de ar entre as superfícies das placas e amostras utiliza-se lâminas de espuma de borracha de silicone (3 mm de espessura), de alta compressibilidade, entre estas. Além disso, distribui-se uma massa de 20kg (placa de aço) sobre a placa fria superior de maneira a se obter uma pressão uniforme em toda a superfície.

Nas Figuras 5.2 e 5.3, vê-se fotografias do equipamento de placa quente protegida.

As superfícies das placas não receberam tratamento especial para o controle da emissividade.



- 1- Anel de proteção
- 2- Placa de aquecimento, núcleo
- 3- Amostra
- 4- Placas de refrigeração
- 5- Espuma de silicone
- 6- Pontos com termopares

Figura 5.1 - Esquema do equipamento de placa quente protegida.

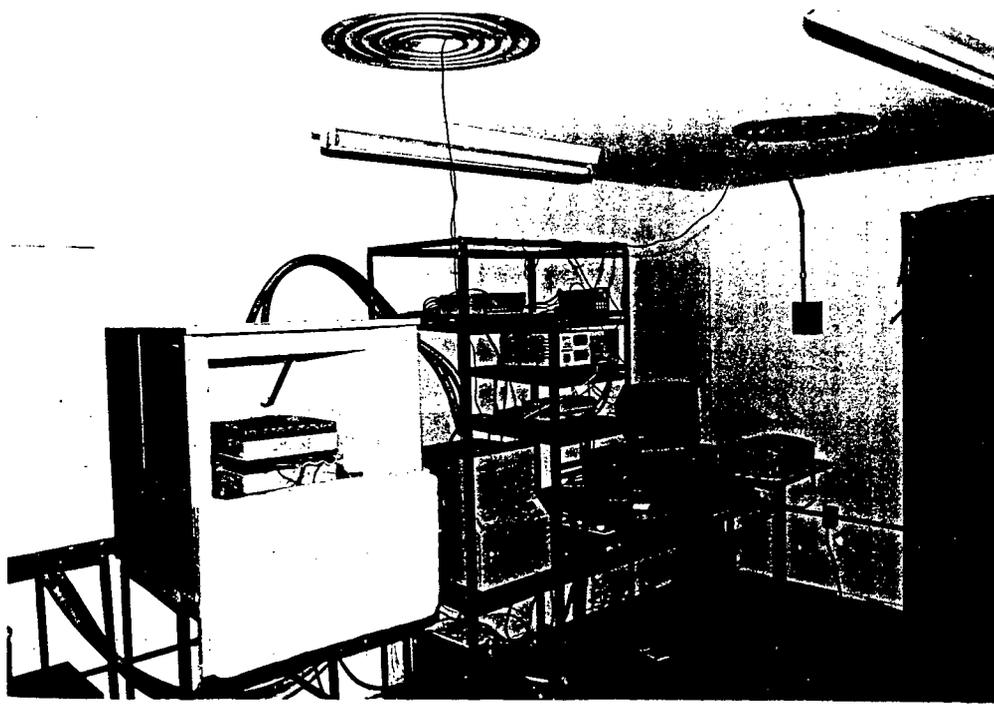


Figura 5.2 - Fotografia do equipamento de placa quente protegida.



Figura 5.3 - Fotografia do equipamento de placa quente protegida - Vista das placas e amostras.

5.2 - PLACA QUENTE

A placa aquecedora divide-se em duas partes, a central ou núcleo e o anel de guarda ou proteção. Confeccionadas na forma de duas placas idênticas em duralumínio com dimensões de 300x300x20mm. São montadas justapostas de modo a formar um conjunto simétrico. O núcleo possui dimensão de 200x200mm, sendo separado do anel de guarda por uma folga de 1.5mm. Dessa maneira o anel de guarda possui uma largura de 48,5mm, Figura 5.4.

O corte da folga é parcial, conservando quatro pontos de união, nos cantos, entre o núcleo e o anel de guarda. Todavia, este modo de união, através de contatos metálicos, possibilita a formação de pontes térmicas, aumentando a sensibilidade da placa quente ao desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda.

A face interna de cada placa, tanto no núcleo quanto no anel de guarda, possui ranhuras independentes, usinadas com dimensões de 2 x 2mm, Figura 5.5. Estas ranhuras servem de leito para a colocação de um fio de constantan, com diâmetro de 0.2mm, que é utilizado como elemento aquecedor, por efeito Joule. Usa-se constantan em função de pequena variação de sua resistência elétrica com a temperatura. A maneira como as ranhuras foram usinadas busca a geração de um fluxo de calor uniforme.

Previamente à colocação do fio de constantan, as ranhuras foram isoladas eletricamente usando-se uma tinta resistente a altas temperaturas (600°C) [35]. Muito embora o fio de constantan possua um revestimento isolante elétrico, quando da colocação nas ranhuras, ocorria freqüentemente a ruptura do revestimento em cantos, havendo o contato elétrico entre os fios e a placa. Para a fixação dos fios utilizou-se uma cola tipo Super Bonder. Obteve-se uma isolação entre os elementos aquecedores e as placas superior a 20MΩ. Contudo, com a utilização repetida da placa, sendo esta submetida a vários ciclos térmicos, alguns pontos do anel de guarda, apresentaram a ruptura do isolamento elétrico, necessitando constantes reparos. A solução adotada foi a utilização de uma lâmina de mica entre as duas placas, evitando o contato elétrico entre elas e os fios.

Obteve-se uma resistência elétrica para as resistências instaladas nas ranhuras do núcleo igual a 127Ω, e 155Ω para as resistências do anel de guarda, para cada placa. As resistências do

núcleo foram conectadas em paralelo resultando em uma resistência total de 63.5Ω , com uma potência dissipada máxima de $157W$ (equivalente a um fluxo de calor de $3925W/m^2$, no núcleo da placa) para a faixa de operação da fonte estabilizada. As resistências do anel de guarda foram conectadas em série obtendo-se uma resistência total de 310Ω , com uma potência dissipada máxima de $156W$.

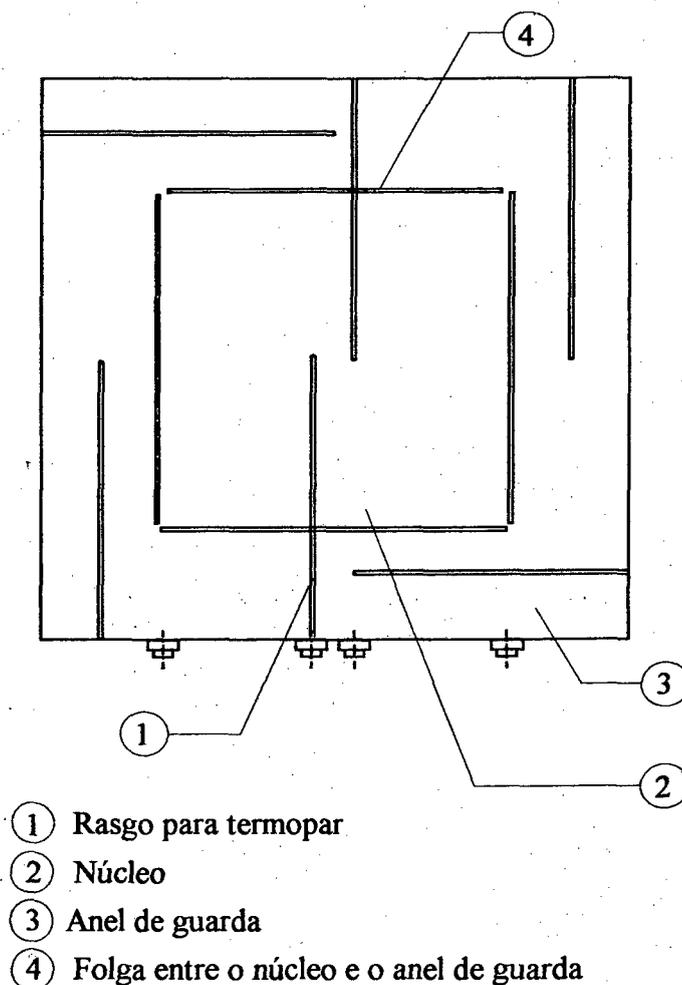


Figura 5.4 - Superfície externa da placa quente protegida.

Determinou-se o desvio máximo de planicidade para as superfícies externas da placa quente (as que ficam em contato com as amostras), através de uma máquina de medição por coordenadas marca ZEISS, segundo a norma ISO 1101, Anexo I.1. Determinou-se um desvio inferior a $0.09mm$ (a norma BS [17] limita o erro de planicidade em $0.2mm$).

Realiza-se medições de temperatura na superfície das placa através de termopares localizados em rasgos de 2 x 2mm, Figura 5.6. São instalados, em cada face, dois termopares no núcleo da placa quente, e quatro no anel de guarda. Os termopares são montados de modo a se obter um maior comprimento possível sobre a superfície da placa, minimizando o efeito aleta, que é comum em medição de temperatura com estes sensores [33]. A superfície interna do rasgo é pintado com verniz isolante elétrico, obtendo-se um isolamento elétrico, entre os termopares e a placa, superior a $20M\Omega$. O contato térmico é melhorado com o uso de pasta térmica (ZnO).

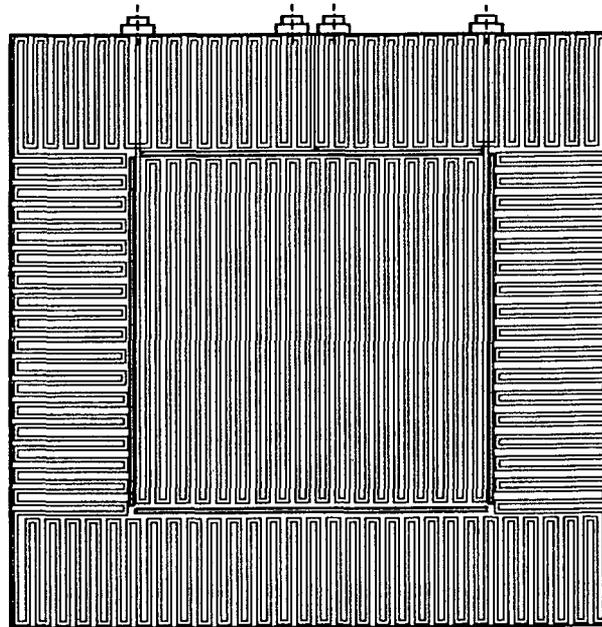


Figura 5.5 - Superfície interna da placa quente protegida.

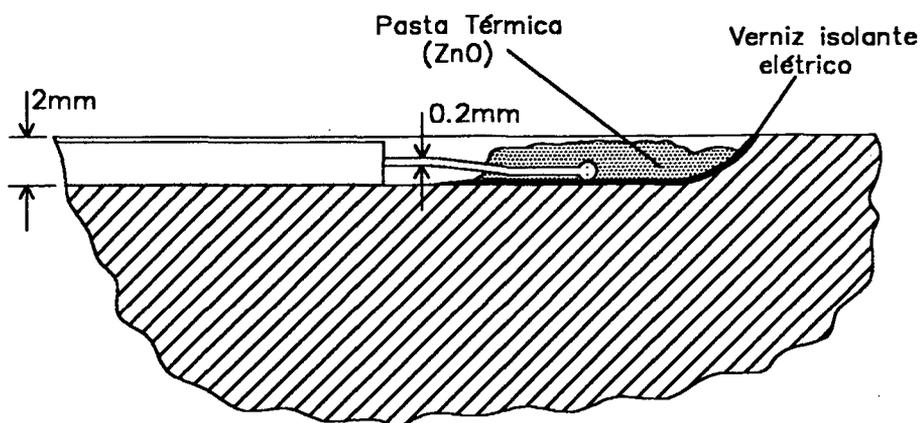
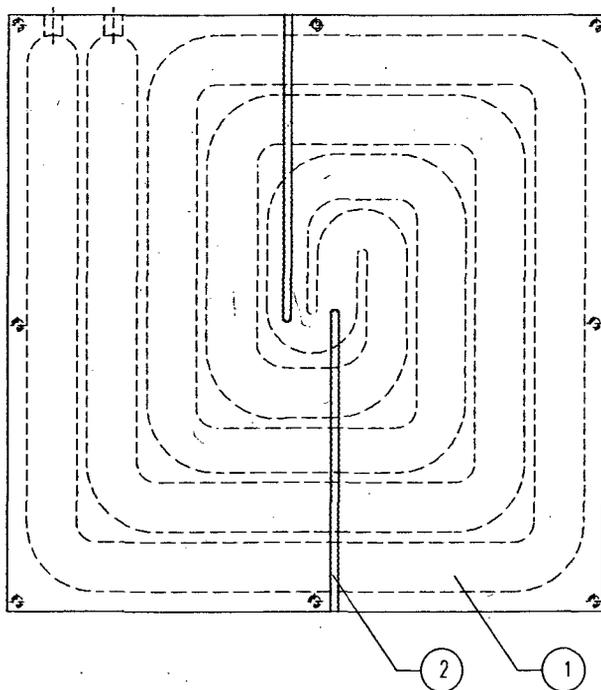


Figura 5.6 - Modo de fixação dos termopares nas superfícies das placas.

5.3 - PLACA FRIA

Sendo em número de duas, são confeccionadas também em duralumínio com dimensões de 300x300x33mm. Internamente, possuem rasgos usinados em forma de espiral duplo para a circulação de água com temperatura controlada por um banho termostático, Figura 5.7. Com este formato procura-se minimizar gradientes térmicos que possam existir nas superfícies das placas. A temperatura é medida por dois termopares localizados em rasgos, como na placa quente. O desvio máximo de planicidade medido é de 0.235mm, Anexo I.2; um pouco superior ao exigido pela norma BS [17].



- ① Rasgo para circulação do fluido
- ② Rasgo para termopares

Figura 5.7 - Placa fria.

5.4 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE DE SINAIS

5.4.1 - INTRODUÇÃO

O equipamento de placa quente protegida é monitorado por um sistema integrado de aquisição, processamento e controle de sinais em tempo real, o sistema de Aquisição Múltipla MQSAM-48 PID. Desenvolvido pela empresa Microquímica Indústria e Comércio, possui uma interface para microcomputador tipo "PC", a Interface Controladora de Processos MQ12/8 PC.

O sistema de Aquisição Múltipla MQSAM-48 PID efetua o condicionamento de 48 sinais distintos, compreendendo cinco diferentes naturezas, assim discriminados:

- 40 sinais provenientes de termopares tipo "T";
- 2 sinais provenientes de termorresistências tipo PT-100;
- 1 sinal de tensão contínua;
- 1 sinal de corrente contínua;
- 4 sinais provenientes de termofluxímetros.

Possui ainda uma saída de potência para controle através de um sistema PID implementado por *software* e chaveado por meio de um tiristor tipo TRIAC.

A aquisição de sinais, processamento e controle é automática, não sendo necessária à operação do equipamento durante a realização do ensaio. O *software* desenvolvido possui saídas gráficas em tempo real, possibilitando o acompanhamento da medição, detecção de erros e problemas que possam ocorrer. Nas Figuras 5.8 (a) e (b) demonstra-se algumas das telas gráficas disponíveis para o acompanhamento da medição.

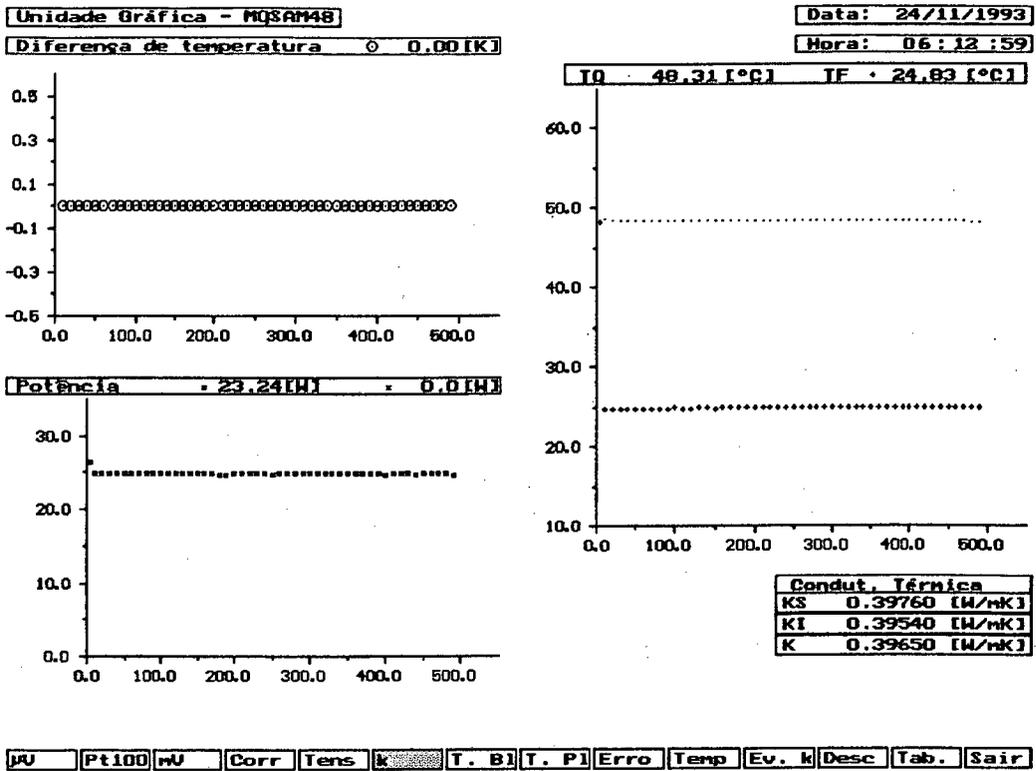


Figura 5.8 (a) - Tela gráfica do programa de aquisição de sinais - Valor da condutividade térmica.

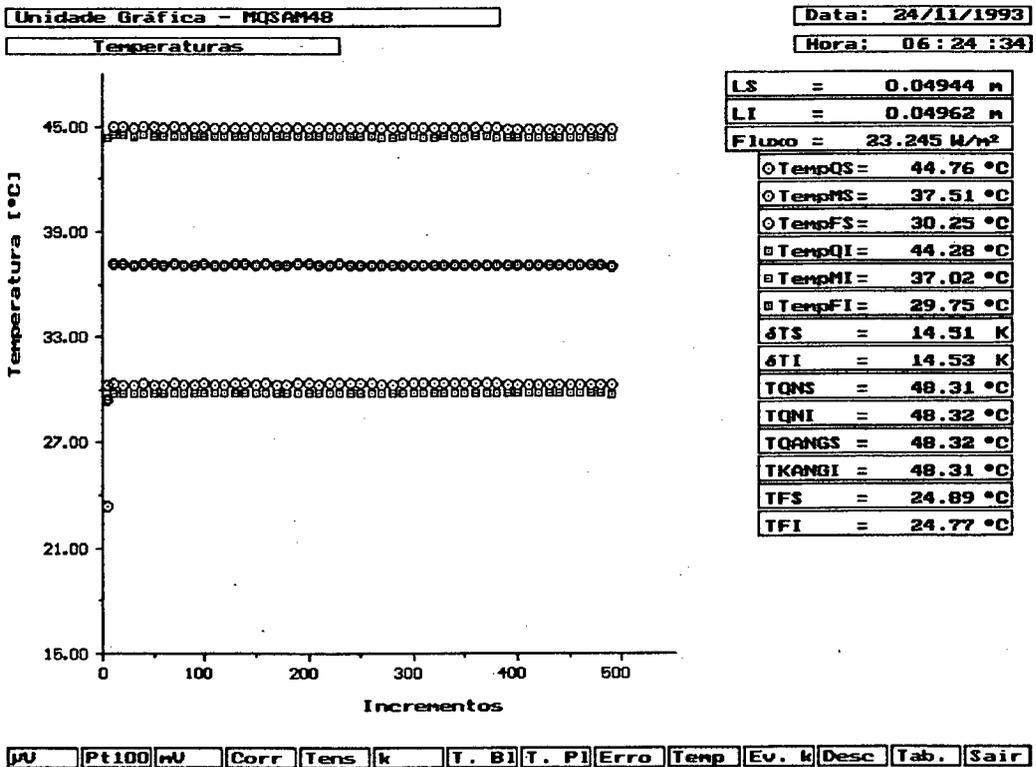


Figura 5.8 (b) - Tela gráfica do programa de aquisição de sinais - Medição de temperatura nos diversos pontos do equipamento.

Na tela da Figura 5.8 (a) é possível a visualização do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda da placa quente. Também é possível visualizar a potência dissipada nos elementos aquecedores, as temperaturas das placas e o valor de condutividade medido, tanto para amostra superior quanto a inferior. A saída gráfica da Figura 5.8 (b) permite a visualização dos valores de temperaturas medidos nas amostras e nas placas.

Fisicamente é subdividido em dois módulos: sistema para interfacear equipamentos analógicos MQ12/8 PC e o módulo condicionador de sinais.

5.4.2 - SISTEMA PARA INTERFACEAR EQUIPAMENTOS MQ 12/8 PC

É uma interface controladora de processos conectada internamente ao PC em um dos seus *slots*. Esta interface é composta por oito entradas analógicas multiplexadas, dotadas de um amplificador de ganho programável por *software* e conversor analógico-digital (conversor A/D) com resolução de 12 bits; uma saída analógica com atenuação programável por *software* e conversor digital-analógico (conversor D/A) de 12 bits; oito saídas digitais; oito entradas digitais; dois *timers* programáveis com saída controlada, além de acesso às linhas de requisição de interrupção do microcomputador [36].

O conversor A/D é o elemento no sistema que converte um sinal de tensão contínua proveniente de um sensor para uma palavra digital equivalente. O conversor A/D é especificado em bits. O número de bits define sua resolução, o menor intervalo de tensão que ele pode distinguir.

O conversor A/D utilizado na interface MQ12/8 PC (A674) é um conversor de 12 bits ($3\frac{1}{2}$ dígitos¹), que opera através de sucessivas aproximações [37] e realiza uma conversão em

¹ NOTA: O conversor A/D pode, além de ser expresso em bits, ser expresso em número de dígitos [38].

$$\text{Dígitos} = \log(2^{\text{bits}-1})$$

15 μ s. Pode distinguir 4096 incrementos de tensão, ou seja, para sua faixa de operação de 0 a 10V, sua resolução é $10V/4096 = 0.00244V$, Figura 5.9.

Para possibilitar a leitura de valores de tensões negativas, emprega-se um retificador comparador de sinais com duas saídas, localizado antes do amplificador de ganho programável. Uma saída é o sinal retificado e a outra é um bit, que se for igual a 1 representa que o sinal de entrada é negativo e se for 0 o sinal de entrada é positivo. Este bit pode ser considerado como o 13º bit do conversor A/D, deste modo sua faixa de operação torna-se de -10V a +10V. Contudo este retificador apresenta uma *zona morta* entre -0.001V a +0.003V, onde a leitura é nula.

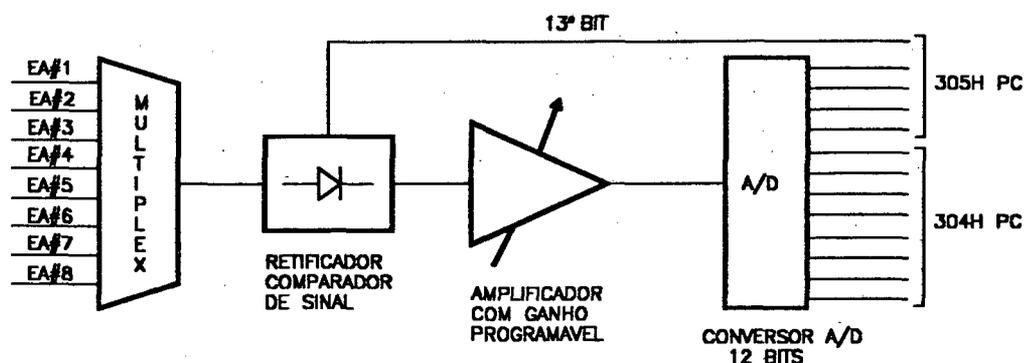


Figura 5.9 - Esquema do módulo de leitura de sinais analógicos.

O amplificador localizado na interface MQ 12/8 PC possui ganho programável, desta forma, obtém-se um melhor uso do conversor A/D para a faixa de tensão de trabalho aplicada às entradas analógicas. A tabela abaixo relaciona o ganho que deve ser utilizado para cada faixa de tensão de trabalho [36].

Tabela. 5.1 - Ganho do amplificador que deve ser utilizado para cada faixa de tensão de trabalho.

Bit da palavra	GANHO	Faixa de Tensão
#1	1	-10 a +10V
#2	2	-5 a +5V
#3	5	-2 a +2V
#4	10	-1 a +1V
#5	20	-0.5 a + 0.5V
#6	50	-0.2 a +0.2V
#7	100	-0.1 a +0.1V
#8	150	-0.067 a +0.067V

As oito saídas digitais são utilizadas para comandar as chaves multiplexadoras do módulo condicionador de sinais. Os dois *timers* atuam como disparadores do dispositivo de controle do tiristor localizado no módulo condicionador de sinais.

5.4.3 - MÓDULO CONDICIONADOR DE SINAIS

Localiza-se externamente ao microcomputador "PC", tem a função de fazer a conexão dos sensores, filtrar ruídos, multiplexar e amplificar o sinal analógico. Nele também se localiza o sistema de potência AC utilizado no sistema de controle do anel de guarda da placa quente protegida. Compõe-se de seis sub-sistemas básicos [39]:

5.4.3.1 - Condicionador para leitura de termopares

Este condicionador realiza a leitura de 40 sinais de tensão provenientes de termopares, processando-os de forma adequada para que possam ser lidos pela interface MQ12/8 PC. Este processamento compreende três etapas: pré-filtragem, multiplexação e amplificação.

Na etapa de filtragem, realizada individualmente para cada canal, o sinal é submetido a um filtro "RC" passa-baixa de primeira ordem, com frequência de corte em torno de 100 Hz. Desta forma, atenuam-se as componentes de ruído de alta frequência introduzidos pela medição remota. A seguir, os sinais filtrados dos 40 canais são multiplexados em tempo por chaves semicondutoras, tipo CMOS bidirecionais controladas através das saídas digitais #1..#6 da interface MQ12/8 PC, compartilhando um único amplificador, Anexo II.1. Uma vez multiplexado, o sinal resultante é aplicado à entrada de um amplificador de instrumentação com um ganho de 60dB (1000 vezes). Este sinal agora é lido pela entrada analógica #1 da interface MQ12/8 PC com ganho #4 (10 vezes) no amplificador programável. Desta forma a faixa de operação é de -1000 μV a +1000 μV , com uma resolução de 0.25 μV . Entretanto devido a presença do retificador na interface MQ12/8 PC, o sinal entre -1 μV a +3 μV é nulo. Como os termopares utilizados são do tipo "T", que apresentam uma sensibilidade da ordem de 40 $\mu\text{V}/\text{K}$, a faixa de operação resultante é entre -25K a +25K em relação à temperatura da junta de referência, com uma resolução de $\pm 0.006\text{K}$.

As chaves multiplexadoras estão dispostadas na configuração *single-ended*, minimizando o número de chaves necessárias, sendo o outro terminal de entrada diferencial do amplificador conectada ao ponto comum dos sinais analógicos (terra). Contudo a forma de multiplexação diferencial ou a três fios (*guarded*), são as mais adequadas em medições analógicas, reduzindo os efeitos de injeção de ruídos durante o chaveamento, Figura 5.10 [38].

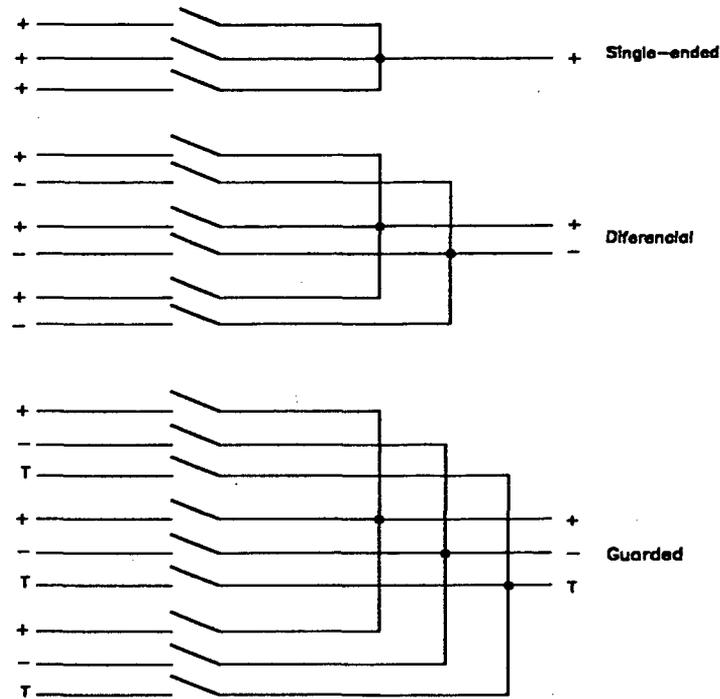


Figura 5.10 - Configuração de chaves multiplexadoras para instrumentação (Fonte: HP [38]).

5.4.3.2 - Condicionador para a leitura de termorresistências

Utilizado para a leitura de dois canais de termorresistores de platina tipo PT-100. As ligações são feitas a 4 fios de modo a minimizar a influência da resistência dos fios de conexão, Figura 5.11 e Anexo II.1.

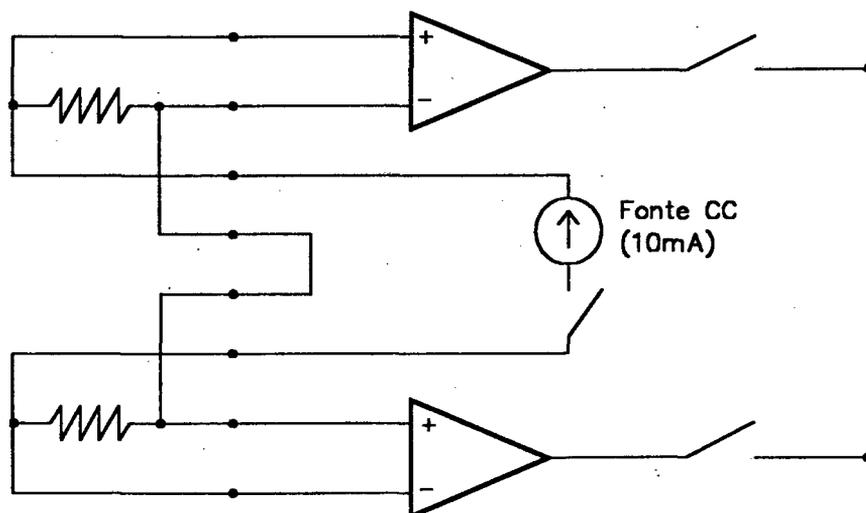


Figura 5.11 - Esquema da medição de resistência para os termorresistores.

Para a medição das resistências utiliza-se uma fonte de corrente constante de valor igual a 10 mA que passa através dos sensores. Esta corrente provoca uma queda de tensão sobre os terminais das termorresistências, que é medida por amplificadores diferenciais conectados aos seus terminais. Desta forma, pela proporcionalidade entre tensão e corrente definida pela lei de Ohm, determina-se o valor da resistência dos termorresistores.

Inicialmente, os amplificadores diferenciais conectados diretamente aos terminais das resistências, fornecem o valor absoluto da queda de tensão sobre as mesmas; a seguir esta tensão é aplicada a um somador (resistor variável com compensação térmica por semicondutor), que ajusta sua escala para variação linear entre 0 e 10V, em uma faixa de resistência entre 100 a 139 Ω (que para um termorresistor tipo PT-100, representa um intervalo de temperatura de 0 a 100°C). Finalmente, o sinal resultante é multiplicado por uma constante "G", através de um amplificador de ganho ajustável, que ajusta a inclinação da relação de transferência resistência x tensão, equação (5.2). Utiliza-se desta maneira toda a escala do conversor A/D, da interface MQ12/8 PC.

$$R = \frac{V}{GI} + 100 \quad [\Omega] \quad (5.2)$$

onde

V = tensão lida pela interface MQ12/8 PC;

I = corrente de referência (I=10mA);

G= ganho do amplificador ajustável (utilizado $G_0=25.64V/V$);

R = Resistência do sensor [Ω]

O sinal amplificado resultante de cada canal é multiplexado em tempo através das saídas digitais #1..#3. Então o sinal é lido pela interface MQ12/8 PC pela entrada analógica #2 com um ganho #2 para o amplificador programável.

Desta forma obtém-se uma faixa de leitura para as resistências de 100 a 119.5 Ω com uma resolução de leitura de $\pm 0.0048\Omega$. Correspondendo, para as termoresistências de platina tipo PT-100 ($\alpha = 0.0385\Omega/\Omega K$), a uma faixa de temperatura entre 0 a 50°C com uma resolução de $\pm 0.013K$.

Para minimizar erros sistemáticos na medição de temperatura causados pelo auto-aquecimento das termoresistências devido ao efeito Joule, a fonte de corrente contínua é acionada somente no instante de medição através da saída digital #8 da interface MQ12/8 PC. Faz-se o chaveamento da fonte de corrente 16.67ms antes da realização da leitura e desligando-a em seguida, permanecendo inativa até o próximo ciclo de aquisição.

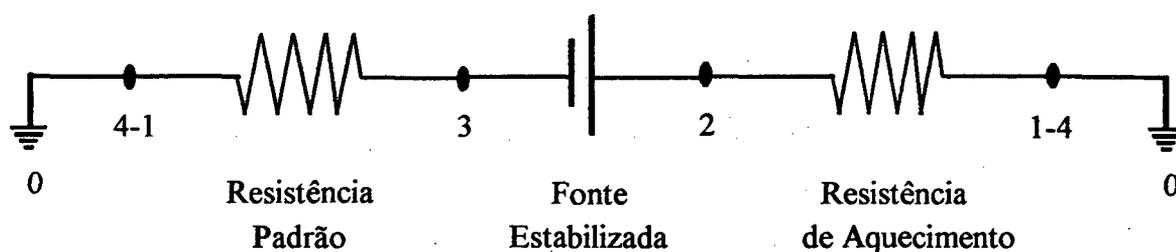
5.4.3.3 - Condicionador para medição de tensão contínua

Utilizado para a medição de tensão contínua aplicada à resistência de aquecimento do núcleo da placa quente protegida, afim de se determinar a potência dissipada sobre a mesma, Figura 5.12.

Este sistema é composto por um atenuador de precisão de relação 20:1, reduzindo o sinal de entrada de uma faixa de 0 a 100V para 0 a 5V. O sinal é lido pela entrada analógica #3 da interface MQ12/8 PC com ganho #2 (2 vezes) para o amplificador programável, resultando em uma resolução de leitura de $\pm 0,025V$.

5.4.3.4 - Condicionador para medição de Corrente Contínua

Este sistema realiza a medição de corrente contínua existente sobre a resistência de aquecimento da placa quente protegida. Consiste em uma resistência padrão de valor $0.2\Omega \pm 1\%$, ligada em série ao circuito de alimentação da resistência de aquecimento, Figura 5.12 e Anexos II.1 e II.2. Sobre esta mede-se a queda de tensão, e calcula-se a corrente pela lei Ohm.



V_{20} - Tensão sobre a resistência de aquecimento

V_{30} - Tensão sobre a resistência padrão

Figura 5.12 - Esquema de medição de corrente e tensão do módulo
MQSAM-48 PID.

A queda de tensão sobre a resistência padrão é lida através da entrada analógica #4 da interface MQ12/8 PC com um ganho #6 (50 vezes) para o amplificador programável, resultando numa faixa de corrente de 0 a 1A com uma resolução de leitura igual a $\pm 0.0002A$.

A resistência padrão possui dissipadores de calor, de modo a reduzir os efeitos de auto-aquecimento e conseqüente variação de sua resistência. Testou-se a variação da resistência para valores de corrente entre 0 e 1.5A, não sendo esta detectada dentro da incerteza de medição ($\pm 6m\Omega$) do sistema de aquisição HP3852S [40].

A fonte estabilizada opera com sua referência num nível de tensão V_3 acima de V_0 , isto é possível porque a fonte é isolada.

5.4.3.5 - Condicionador para leitura de termofluxímetros

Utilizados para a leitura de 4 sinais de termofluxímetros com faixa de operação entre -500 a +500mV. Estes canais são diretamente conectados às entradas analógicas #5, #6, #7 e #8 da interface MQ12/8 PC. Com um ganho #5 (20 vezes) para o amplificador programável, obtém-se uma resolução de leitura de $\pm 0.15mV$.

5.4.3.6 - Sistema Controlador de Potência AC

O sistema MQSAM-48 PID possui ainda uma saída de potência AC, utilizada para o controle de temperatura no anel de guarda da placa quente protegida. Um algoritmo PID implementado no microcomputador "PC" atua através de um gradador monofásico tipo TRIAC.

Assim a potência entregue ao sistema pode ser variada de 0 a 100% da carga máxima definida pelo valor da resistência do anel de guarda, equação (5.3).

$$P = \frac{V_{ef}^2}{R} \quad [W] \quad (5.3)$$

onde, R é o valor nominal da resistência [Ω] e V_{ef} é a tensão eficaz sobre a resistência ($0 \leq V_{ef} \leq 220V$).

O controlador permite a variação de potência, através do chaveamento de um tiristor tipo TRIAC. A tensão da rede de alimentação AC (60Hz) é chaveada a cada semi-ciclo em um ângulo que é proporcional à potência requerida. Por exemplo, para uma potência de 30%, deve-se utilizar um ângulo de disparo para o gradador de 109.6° para cada semi-ciclo de onda senoidal, resultando em uma componente de onda igual a Figura 5.13.

A relação potência x ângulo é obtida através da integração da onda senoidal, já que sua área representa a potência entregue ao sistema. O ângulo de disparo, para cada semi-ciclo, pode ser variado entre 0° e 180° com incrementos de 1° .

O sistema possui um Bloco de Sincronismo que determina os pontos de passagem por zero da tensão da rede de alimentação AC, que notifica ao sistema de controle que então faz o disparo de dois *timers* programáveis localizados na interface MQ12/8 PC. Um *timer* determina o atraso correspondente ao ângulo de disparo para os semi-ciclos positivos e o outro o ângulo para o semi-ciclo negativo.

Para o cálculo do ângulo de disparo utiliza-se um algoritmo PID, Figura 5.14, que determina inicialmente a potência necessária para minimizar o desbalanceamento de temperatura (ERRO) entre o núcleo da placa quente e o anel de guarda. A potência resultante é função de

uma parcela proporcional - P; uma parcela integral - I, que representa o erro acumulado; e outra parcela diferenciável - D, que corresponde a taxa de variação, do ERRO.

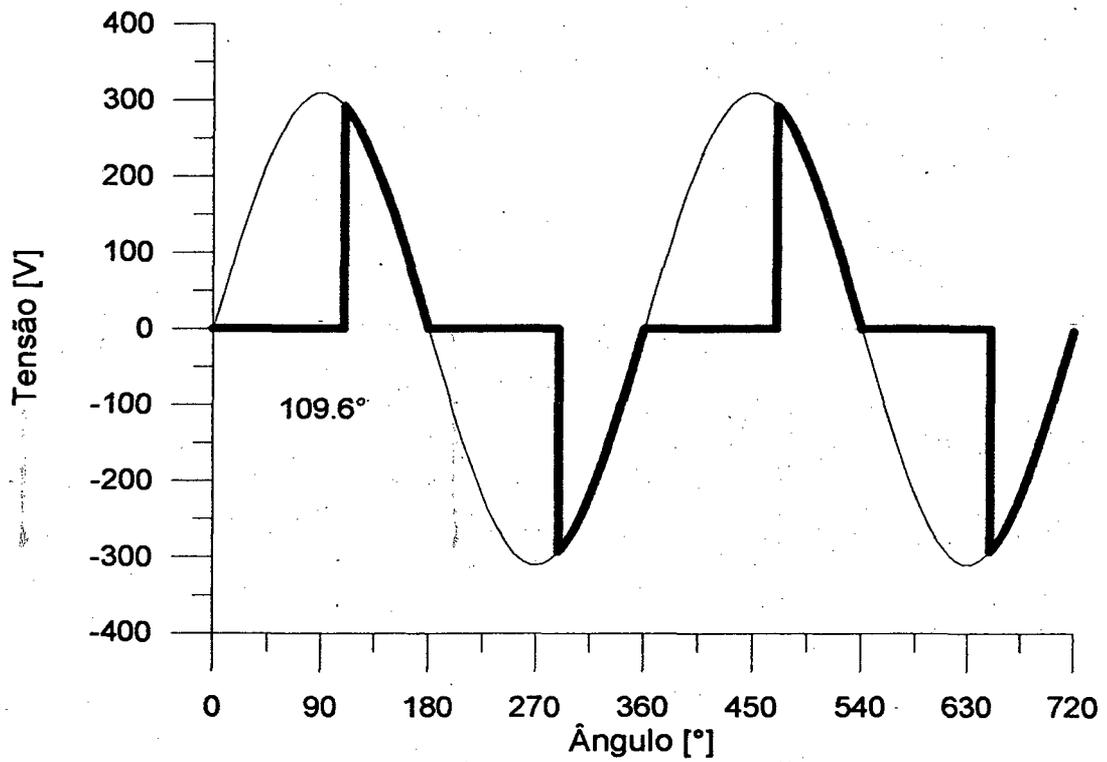


Figura 5.13 - Forma de onda resultante obtida através de um gradador monofásico a TRIAC para uma situação de 30% de potência.

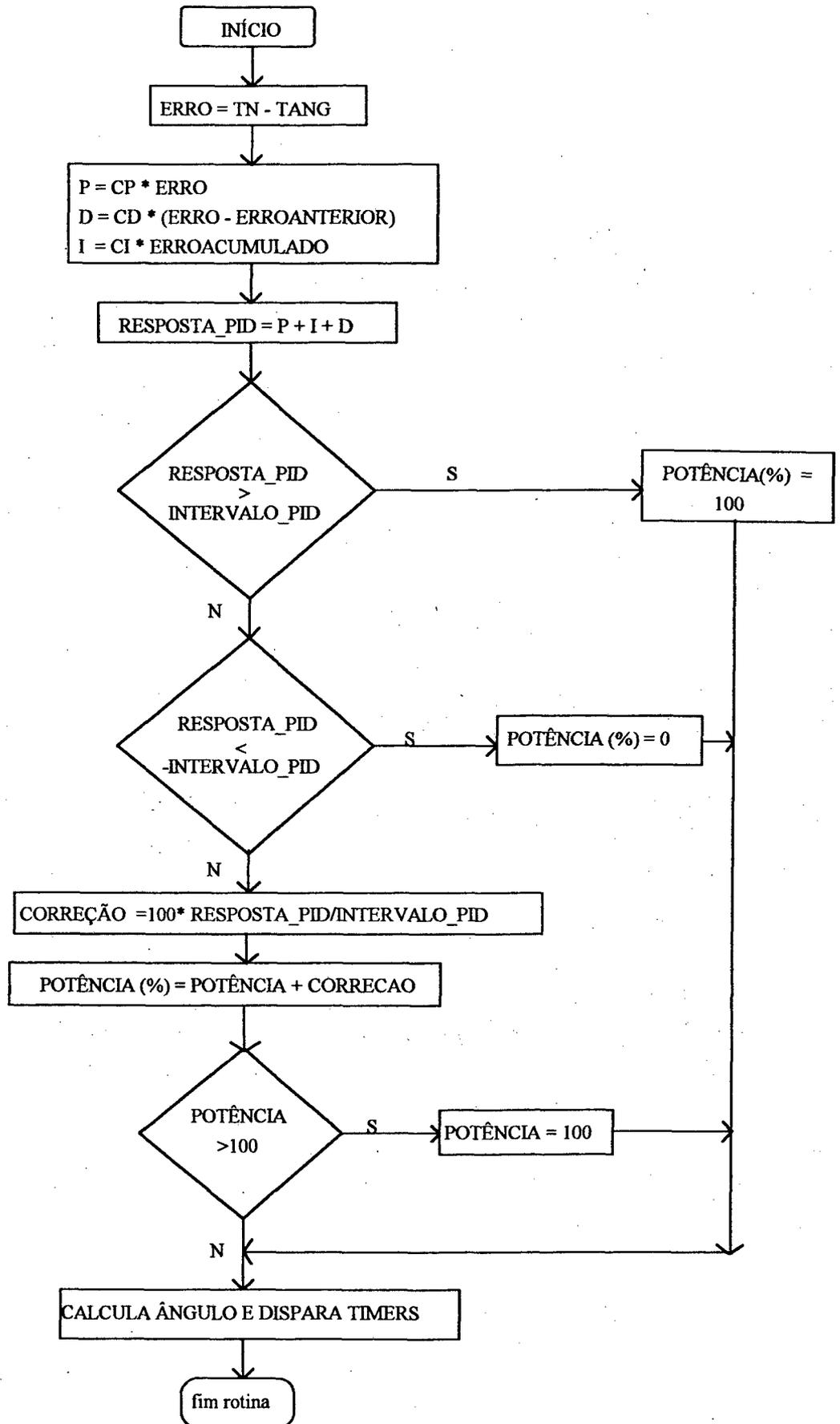


Figura 5.14 - Fluxograma da subrotina de controle PID.

Os coeficientes CP, CI, CD e o INTERVALO_PID foram ajustados experimentalmente, de forma a minimizar o erro (desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda). Conseguiu-se uma boa estabilidade, com variações inferiores a $\pm 0.03\text{K}$, Figura 5.15.

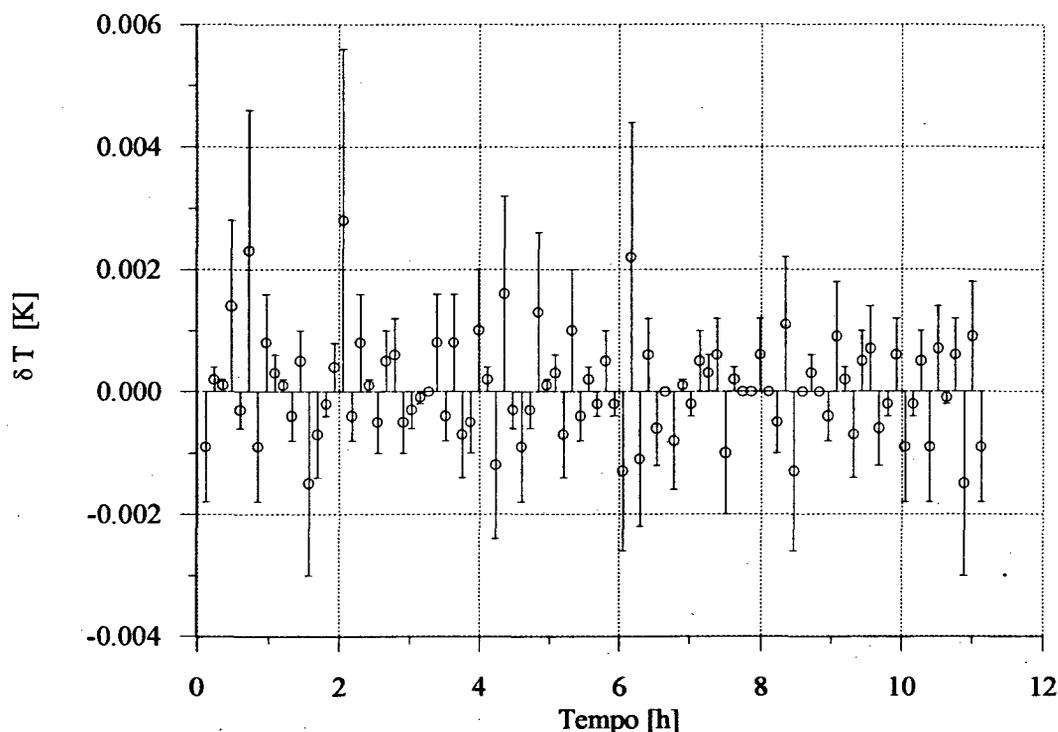


Figura 5.15 - Valores medidos para o desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de de guarda, δT (Barra de erros referente a 150 medições).

5.4.4 - COMENTÁRIOS E ALTERAÇÕES

O sistema de Aquisição e Controle MQSAM-48, em especial o módulo Condicionador de Sinal, foi desenvolvido em fase de protótipo para o Equipamento de Placa Quente Protegida. Problemas ocorridos exigiram alterações tanto em *hardware* quanto em *software*.

Inicialmente o sistema MQSAM-48 PID apresentou um elevado nível de ruído (superior a $20\mu\text{V}$), principalmente para a leitura do sinal de termopar. Para minimizar este efeito instalou-se filtros "RC", individuais, montados em uma placa de circuito impresso junto às conexões. Outra alteração foi o aumento da taxa de amostragem (300 leituras por canal). Com estas

modificações conseguiu-se uma dispersão da leitura na ordem de $2\mu\text{V}$. Contudo após a instalação dos filtros notou-se um aumento do tempo de estabilização dos canais de termopares, sendo necessário esperar um intervalo de tempo da ordem de 3 horas para a estabilização da leitura, Figura 5.16.

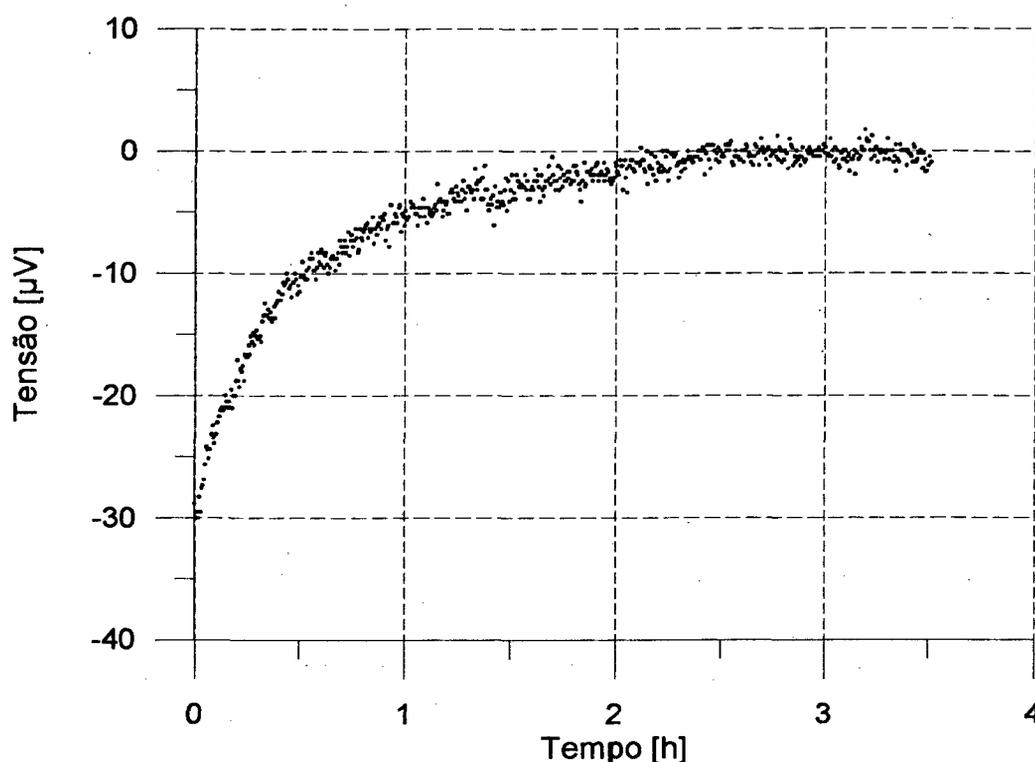


Figura 5.16 - Estabilização da placa de aquisição MQSAM-48 PID para leitura de canais de termopares.

Outro problema ocorrido é o auto-aquecimento das termorresistências na medição de temperatura. O sistema MQSAM-48 PID inicialmente utilizava uma fonte de corrente contínua (10mA), alimentando constantemente os termorresistores. Mas, por efeito Joule, os sensores apresentaram um aquecimento em torno de +3K (em ar, com convecção natural). Paralelamente, comparou-se com a leitura do mesmo sensor utilizando o Data Acquisition HP-3852S, o qual utiliza uma fonte chaveada no instante da medição com intensidade 1mA, Figura 5.17. Alterou-se então o sistema MQSAM-48 PID para que a fonte de corrente contínua fosse chaveada somente no período de medição das termorresistências (16.67ms antes), apresentando

agora um auto-aquecimento em torno de +0.1K, Figura 5.18. Finalmente, como os sensores são utilizados para a medição do bloco de referência, preencheu-se os furos do bloco com óleo mineral, não sendo mais visível a variação devido ao auto-aquecimento.

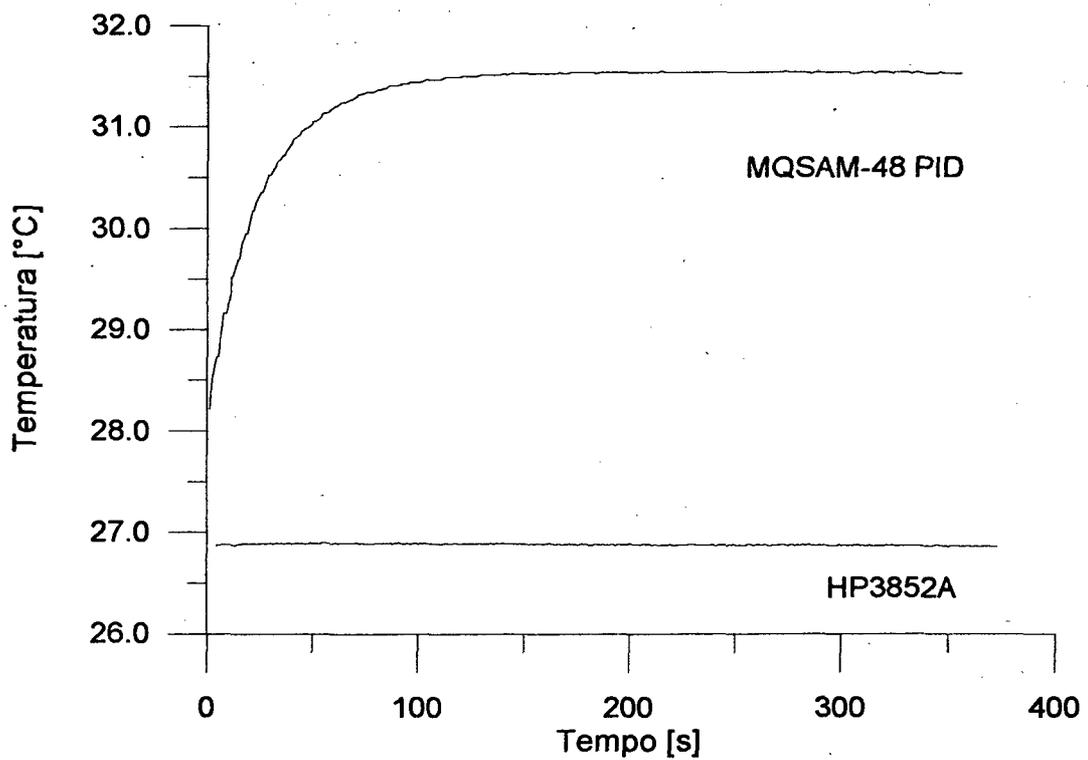


Figura 5.17 - Auto-aquecimento para medição de termorresistores utilizando o sistema MQSAM-48 PID:

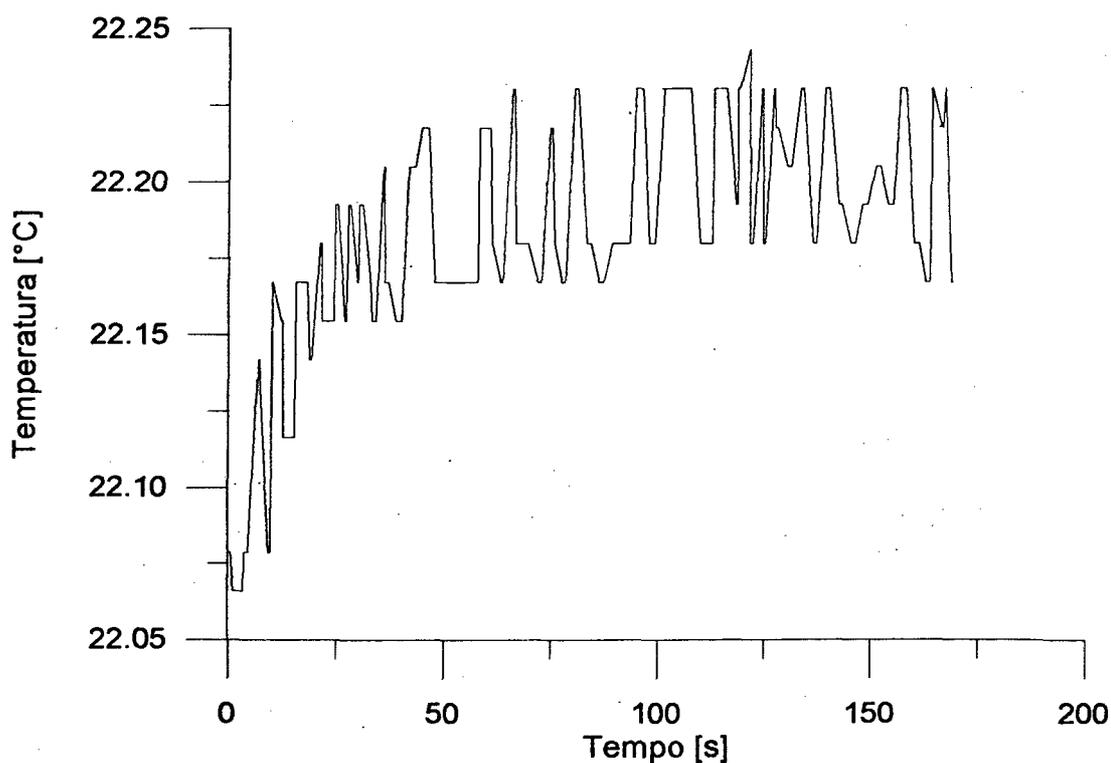
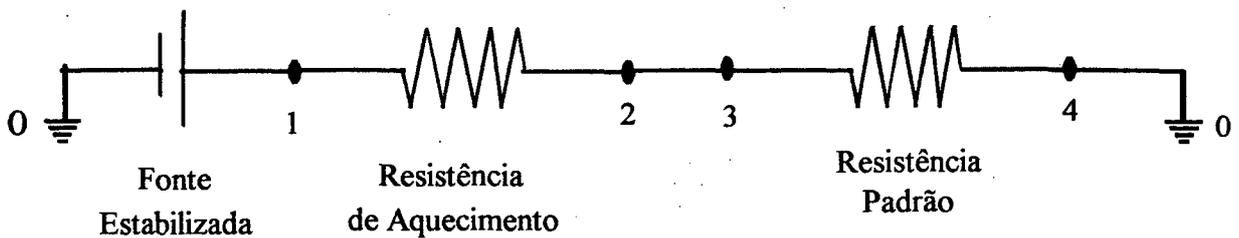


Figura 5.18 - Auto-aquecimento para medição de termorresistores utilizando o sistema MQSAM-48 PID.

Alterou-se também a forma de medição de tensão e corrente contínua sobre a resistência de aquecimento da placa quente. A configuração utilizada inicialmente, Figura 5.19, não eliminava a queda de tensão sobre os fios de alimentação da placa quente. Embora se utilize fios de bitola elevada (2.5mm^2), resultando numa queda de tensão relativamente pequena, optou-se pela alteração conforme a Figura 5.11. Desta maneira somente o fio de conexão entre o ponto 1-0 ainda afeta na medição da queda de tensão, eliminando também o efeito do resistor padrão.

O maior problema encontrado, na medição de temperatura com os termopares, foi a suscetibilidade do sistema à influência de tensões espúrias. A forma de medição utilizando chaves multiplexadoras na configuração *single-ended*, exige a obtenção de um sinal de terra estável e comum para todos. Desta forma não pode haver diferenças nos níveis de tensão entre diferentes pontos de conexão, que acarretariam em erros sistemáticos na medição de temperatura. Contudo devido a existência de correntes de fuga, provenientes das resistências da placa de aquecimento e do banho termostaticado, detectou-se uma circulação de corrente da

ordem de $30\mu\text{A}$, na linha do nível de terra. Esta corrente produz variações na leitura dos sinais da ordem de $\pm 0.1\text{K}$, mas de maneira desigual para os diferentes canais. Isto provoca erros principalmente na medição do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda da placa quente. A solução adotada foi a montagem de uma linha de terra independente para a placa de aquisição e o micro-PC.



V_{20} : Tensão sobre a resistência de aquecimento

V_{30} - Tensão sobre a resistência padrão

Figura 5.19 - Esquema de medição inicial de corrente e tensão do módulo MQSAM-48 PID.

O módulo para leitura de termopares demonstrou também uma tendência à influência de tensão de modo comum [38] caracterizada pela soma de uma tensão no circuito de medição (cabos e termopares) mudando o nível do sinal em relação à referência (terra), Figura 5.20. Esta variação provoca o surgimento de uma corrente para o terra (laço de terra) modificando o valor medido. Esta corrente não deveria influir na medição, já que se utiliza um amplificador de instrumentação do tipo diferencial, que tem como princípio amplificar a diferença de tensão imposta à sua entrada. Contudo, na prática, não se tem um amplificador diferencial ideal e sua saída é influenciada pela tensão de modo comum. Para minimizar este efeito deve-se fazer medições na configuração a três fios (*guarded*), Figura 5.21, conectando o terra próximo ao

sensor (junta quente, no caso de termopares). Desta forma, ocorrerá a formação de um caminho preferencial, desviando a corrente provocada pela tensão de modo comum (laço de terra).

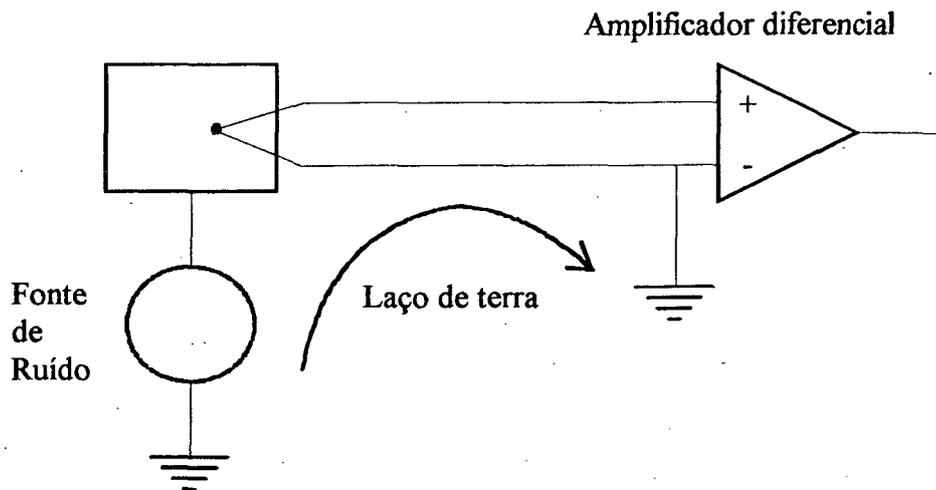


Figura 5.20 - Configuração sujeita à existência de tensão de modo comum.

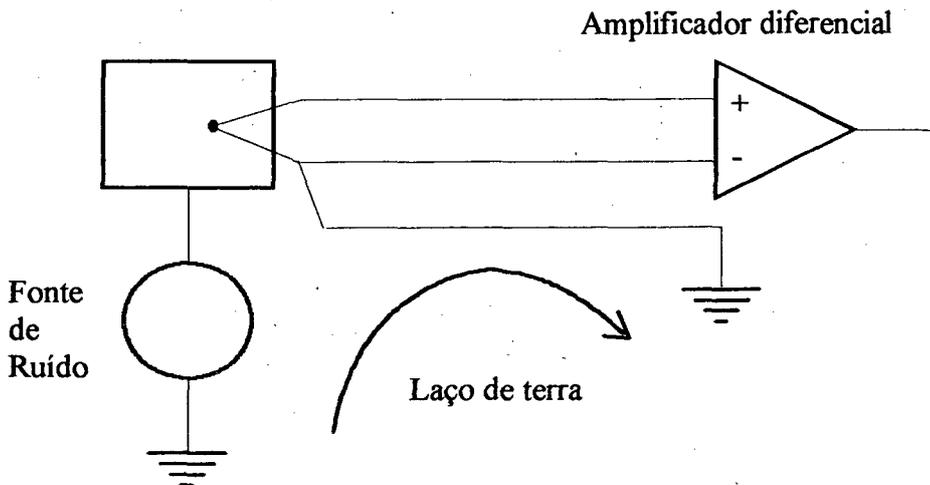


Figura 5.21 - Configuração imune à existência de tensão de modo comum.

5.5 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

A medição de temperatura no equipamento de placa quente protegida é realizada em 32 pontos diferentes, sendo dispostos da seguinte forma:

- 4 termopares no núcleo da placa quente
- 8 termopares no anel de guarda da placa quente
- 2 termopares em cada placa fria
- 4 termopares por face da amostra (16 no total).

Os termopares utilizados são do tipo T (cobre-constantan) de fabricação IMI-Scott, segundo norma BS1843, com isolamento em fibra de vidro e diâmetro igual a 0.2mm. Suas junções foram fundidas através de descargas elétricas. Os termopares localizados nas superfícies das amostras tiveram suas junções achatadas até uma espessura de aproximadamente 0.05mm. Este processo é feito através de rolos, com espessura da folga ajustável. Após este processo as junções, que são frágeis e quebradiças, são coladas em uma folha plástica para a obtenção de uma certa resistência mecânica, Figura 5.22. A espessura total resultante obtida é de 0.1mm.

São utilizados quatro termopares achatados por superfície da amostras, dispostos conforme mostra o Anexo III. Utiliza-se pasta térmica (ZnO), para aumentar o contato térmico entre este sensor e a superfície da amostra.

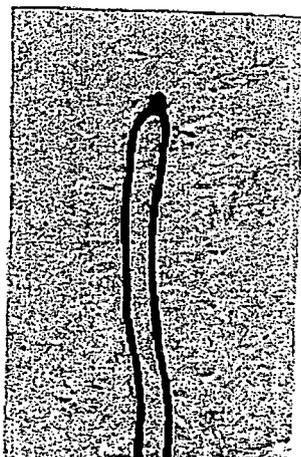


Figura 5.22 - Termopar achatado para leitura de temperatura superficial (aumento: 3x).

Como junta de referência para os termopares, utilizou-se um bloco isotérmico construído em aço, com dimensões de 170 x 170 x 80mm e 45 furos usinados com diâmetro de 7mm por 120mm de profundidade. Preencheu-se os furos com óleo para melhorar o contato térmico. O bloco é inserido dentro de uma caixa de madeira preenchido com placas de EPS de 40mm de espessura.

A temperatura do bloco de referência é determinada através de dois termorresistores, nele inseridos. Os termopares foram calibrados em relação ao ponto de fusão da água (0°C), obtendo-se uma curva de temperatura em função da tensão medida, definida pelo coeficiente de Seebeck do termopar, que pode ser expressa através de um polinômio, equação (5.5) [41 a 43].

$$T = a_0 + a_1 \epsilon_0 + a_2 \epsilon_0^2 + \dots + a_n \epsilon_0^n = f(\epsilon_0) \quad (5.4)$$

onde as constante a_0, a_1, \dots, a_n são características de cada termopar.

Como a temperatura do bloco de referência é diferente da temperatura de calibração, faz-se uma compensação por software, utilizando a temperatura determinada pelas termorresistências, equação (5.5).

$$T_Q = f(\Delta \epsilon_{Q-F} + f^{-1}(T_F)) \quad (5.5)$$

onde T_F é a temperatura do bloco de referência, medida pelo termorresistor, T_Q é a temperatura a ser medida e $\Delta \epsilon_{Q-F}$ é a tensão gerada pelo termopar, correspondente à diferença de temperatura entre T_Q e T_F , Figura 5.23.

Na Figura 5.24, vê-se um esquema da forma de medição de temperatura utilizando o bloco de referência, com o uso de termorresistores.

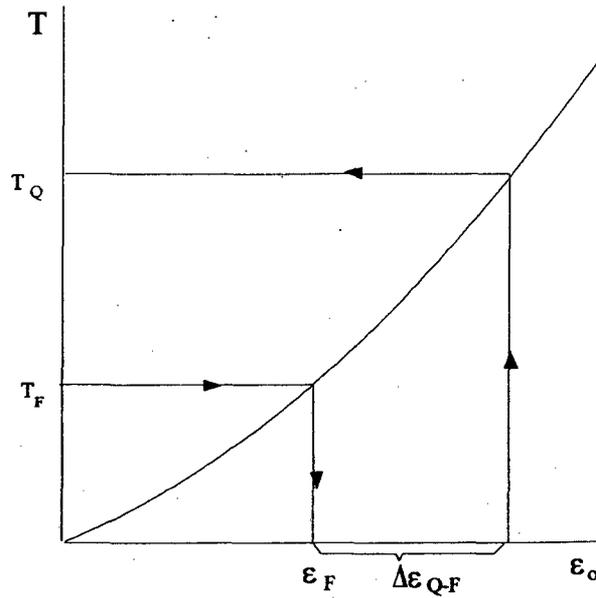


Figura 5.23 - Modo de compensação de temperatura da junta de referência por software.

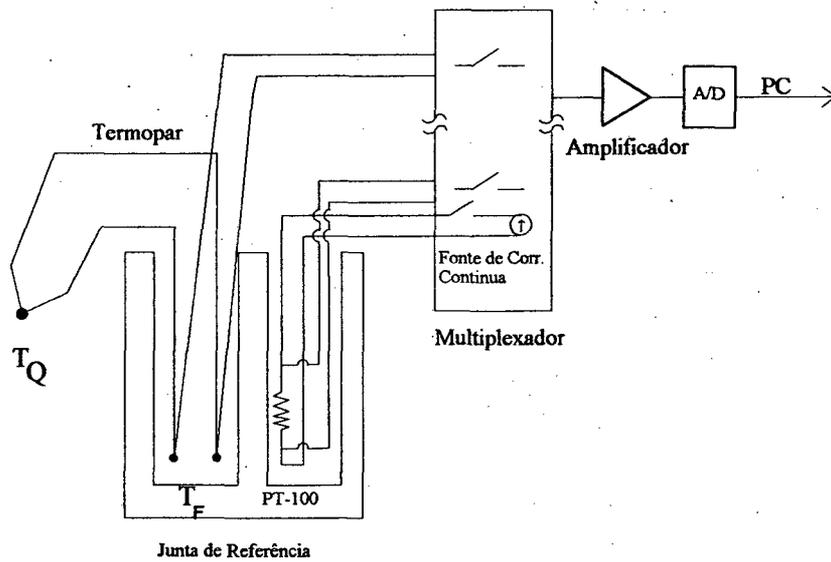


Figura 5.24- Esquema do sistema de medição de temperatura.

5.6 CONDIÇÕES DO LABORATÓRIO

O equipamento de placa quente protegida é instalado em uma sala com dimensões 4.5 x 3.0 x 2.6m. A sala possui um sistema de climatização, através da refrigeração do ar ambiente

por um aparelho de ar condicionado e aquecimento por resistências controladas por sistema PID independente, marca ECI. A temperatura da sala foi mantida em uma faixa de temperatura entre 21 a 23°C e umidade relativa entre 40 a 55%.

O condicionamento da temperatura da sala é essencial, sobretudo devido à necessidade de minimizar erros sistemáticos resultantes das características metrológicas da placa de aquisição de sinais.

Além disso, as amostras e placas de aquecimento e refrigeração são instaladas no interior de uma câmara isolada. Revestida internamente com placas de poliestireno expandido (EPS) com espessura de 50mm. O espaço vazio é preenchido com pequenas esferas de EPS com diâmetros entre 5 a 10mm.

CAPÍTULO 6

CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE DE SINAIS - E SENSORES

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se os métodos adotados para a calibração do sistema de aquisição e controle MQSAM-48 PID, descrito no capítulo anterior. O sistema de aquisição desenvolvido, em fase de protótipo, pela empresa Microquímica, foi elaborado de forma a atender às exigências das normas utilizadas no projeto do equipamento de placa quente protegida.

O sistema de aquisição e controle, como já descrito, faz o condicionamento de 48 sinais, compreendendo cinco diferentes naturezas: 40 sinais provenientes de termopares; 2 sinais provenientes de termorresistências tipo PT-100; 1 sinal de tensão contínua; 1 sinal de corrente contínua e 4 sinais provenientes de termofluxímetros. O sistema foi calibrado utilizando como referência um Data Acquisition HP3852S [38, 44 a 48].

O sistema HP3852S é um sistema modular e multifunções, possuindo módulos analógicos, digitais e outros módulos especiais. A configuração utilizada é composta por [49]:

- Unidade central de processamento (HP3852A), tem por funções principais: o gerenciamento da informação digital e analógica através do barramento; armazenamento de dados e subrotinas; tabelas e funções para conversão do sinal em temperatura para termistores, termorresistores e termopares; comunicação via interface digital GPIB com periféricos.
- Voltímetro Integrador Digital HP44701A, pode fazer medições de tensão/corrente alternada ou contínua, medições de resistência (dois ou a quatro fios), extensômetros de resistência e temperatura (termistor, termorresistor e termopar). Possui um conversor integrador A/D de 6½ dígitos (função do tempo de integração utilizado, máximo = 6½

dígitos), sendo as principais vantagens a baixa incerteza de medição, compensação da flutuação da leitura em torno do zero (auto-zero) e alta razão de rejeição de modo comum (120dB).

- Chave multiplexadora eletromagnética HP44705A, para medições de tensão e resistência (dois ou a quatro fios). Possui como qualidade o baixo nível de ruído gerado no chaveamento (inferior a $2\mu\text{V}$) e uma alta impedância de entrada (superior a $10^9\Omega$).

Todas as leituras realizadas com o HP3852S, fez-se na configuração de $6\frac{1}{2}$ dígitos e um tempo para estabilização das chaves eletromagnéticas de 0.1s (melhor configuração disponível) [40].

Optou-se para a calibração do sistema MQSAM-48 PID de maneira modular, onde a calibração dos sensores e módulos de medição são realizadas independentemente. Este formato é mais suscetível a fontes de erros, principalmente de natureza sistemática. Contudo, utiliza-se um elevado número de sensores que são frequentemente danificados, necessitando a reposição, e se a configuração modular não fosse utilizada seria necessária constantes calibrações. Outro ponto favorável nesta configuração é a possibilidade da avaliação de cada módulo separadamente, na tentativa de melhorar as características metrológicas deste.

Para o cálculo da dispersão da medição, utilizou-se o fator de Student para uma confiabilidade de 95%, assumindo que os erros são não correlacionados [50 e 51].

6.2 - CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

No equipamento de placa quente protegida, utiliza-se termorresistores e termopares como sensores de temperatura. Os termorresistores foram calibrados em um banho de água, utilizando termômetros de mercúrio com uma incerteza de medição inferior a $\pm 0.01\text{K}$, obtendo-se uma incerteza de medição de $\pm 0.05\text{K}$. [52].

Para a calibração dos termopares, utilizou-se os termorresistores como padrão. Usou-se como junta de referência uma mistura de água e gelo ($0.00\pm 0.01^\circ\text{C}$), elaborada conforme

recomendações da norma ASTM [41]. Como junta quente utilizou-se um banho termostático, marca Microquímica, com uma flutuação de temperatura de $\pm 0.01\text{K}$ [53], variou-se sua temperatura em incrementos de 5K entre uma faixa de 5 a 75°C.

Foram calibrados 32 termopares, obtendo-se, com uma incerteza de medição de $\pm 0.1\text{K}$, um polinômio do 2º grau, único para todos os termopares [54], equação (6.1).

$$y(x) = -0.0437 + 0.025860 x - 0.0000006667 x^2 \quad [\mu\text{V}] \quad (6.1)$$

A incerteza de medição considerada, neste caso, é o desvio máximo dos pontos em relação à curva de calibração.

Para alguns termopares, construídos para a reposição, fez-se a comparação do desvio da medição em relação ao polinômio da equação (6.1) em somente um ponto de temperatura. Em todos os termopares determinou-se um desvio inferior a $\pm 1\mu\text{V}$. Esta estabilidade é devido, principalmente, a utilização de sensores de somente um lote de fabricação.

6.3 - CALIBRAÇÃO DOS SINAIS PROVENIENTES DE TERMOPARES

O sistema de aquisição e controle MQSAM-48 PID dispõe de entrada para 40 termopares, com uma faixa de operação de -1000 a +1000 μV . Como visto no capítulo anterior, o sinal de tensão lido é amplificado com um ganho de 60dB (1000 vezes) através de um amplificador de instrumentação localizado no módulo condicionador de sinais. Este amplificador possui ajuste por hardware de seu coeficiente linear (*off-set*) e angular (*ganho*) através de potenciômetros. O ajuste do coeficiente linear é realizado curto-circuitando os bornes de leitura e regulando o potenciômetro até que o sinal lido seja nulo. O coeficiente angular é ajustado submetendo-o a um sinal confiável, com um pequeno nível de ruído. Utilizou-se um divisor de tensão (1000:1), implementado com resistores variáveis, Figura 6.1, alimentado por uma fonte de corrente contínua marca HP6217A.

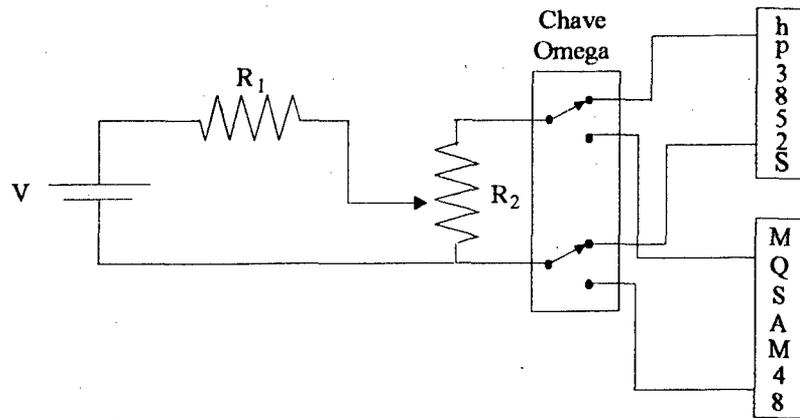


Figura 6.1 - Módulo divisor de tensão para calibração dos sinais de tensão.

O módulo divisor de tensão necessita possuir uma resistência Thevenin [55 a 58] baixa, pois senão ocorreriam erros causados pela associação com o sistema de aquisição (principalmente com o MQSAM-48 PID que possui uma impedância de entrada em torno de $200\text{K}\Omega$). A resistência Thevenin do módulo divisor de tensão elaborado é aproximadamente igual a R_2 (R_1 é 1000 vezes maior que R_2). A resistência R_2 é variável para valores entre 0 e 100Ω .

O sinal proveniente do circuito divisor de tensão é chaveado através de uma chave manual Omega, podendo-se ler pelos dois sistemas de aquisição. Notou-se uma dispersão da leitura inferior a $2\mu\text{V}$ na realização do chaveamento. Para minimizar este efeito, realizou-se leituras chaveando-se várias vezes.

Fez-se também o ajuste do ganho, em hardware, do sistema MQSAM-48 PID gerando-se uma tensão próxima ao fim de escala da faixa de leitura e lendo alternadamente com o HP3852S.

Para uma melhor avaliação do sistema, levantou-se a função transferência, em toda a faixa de operação, esta curva é ajustada por um polinômio e implementada por software. Inicialmente determinou-se o coeficiente angular para o amplificador. Como este é comum para todos os canais, determinou-se somente uma curva, tendo-se o cuidado de fazer esta avaliação em chaves multiplexadoras diferentes (as chaves multiplexadoras são dispostas em conjuntos de oito em oito termopares) procurando alguma influência nesta leitura, não sendo detectada.

Obeve-se uma curva linear, com um coeficiente de correlação 1.0000 [59]. Os coeficientes angulares determinados para nove canais estão listados no Anexo IV.1. O coeficiente angular médio (CA) é representado em (6.2).

$$CA = 1.079 \quad [\mu V/\mu V] \quad (6.2)$$

A incerteza de medição (IM) do sistema de aquisição HP3852S é composta pela incerteza do voltímetro integrador e a chaves multiplexadoras:

$$IM_{HP44701A} = \pm(6\mu V + 0.2\% \text{ da leitura} + 0.1\% \text{ da leitura}) \quad (6.3)$$

$$IM_{HP44705A} = \pm 2\mu V$$

onde $IM_{HP44701A}$ é a incerteza do voltímetro e $IM_{HP44705A}$ é a incerteza da chaves multiplexadoras.

Adotando o fim da escala como leitura ($1000\mu V$), obtém-se o erro na medição com o voltímetro HP44701A:

$$IM_{HP44701A} = \pm(6\mu V + 2\mu V + 1\mu V) = \pm 9\mu V \quad (6.4)$$

Calculando o erro do sistema de aquisição HP3852S, pela teoria da propagação de erros [50 e 51] e considerando a influência do chaveamento, para 10 leituras; onde n é o número de leituras:

$$(IM_{HP3852S})^2 = (IM_{HP44701A})^2 + \left(\frac{IM_{HP44705A}}{\sqrt{n}}\right)^2 \quad (6.5)$$

$$IM_{HP3852S} \cong \pm 9\mu V$$

A dispersão da leitura causado pela fonte estabilizada é inferior a $2\mu\text{V}$, a chave Omega possui a mesma dispersão, para minimizar esta influência fez-se 3 leituras ($m=3$). Obtendo-se então, como IM para a medição de tensão pelo sistema HP3852S, $IM_{\text{Referência}}$, pela teoria da propagação de erro:

$$(IM_{\text{Referência}})^2 = (IM_{\text{HP3852S}})^2 + \left(\frac{IM_{\text{chave}}}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{IM_{\text{HP6217A}}}{\sqrt{n}\sqrt{m}}\right)^2 \quad (6.6)$$

$$IM_{\text{Referência}} \cong \pm 9\mu\text{V}$$

Nota-se que a parcela significativa no cálculo da $IM_{\text{Referência}}$ é resultante do voltímetro HP44701A, caracterizado principalmente por um termo sistemático.

A incerteza na determinação do coeficiente angular pelo sistema MQSAM é composta pela média quadrática da incerteza da medição máxima obtida para todos os canais (canal #01) com a dispersão dos valores obtidos para os nove canais ($k=9$), Anexo IV.1, mais a IM referente a chave Omega e a fonte estabilizada HP6217A.

$$(IM_{\text{MQSAM}})^2 = (IM_{\text{canal}})^2 + \left(\frac{t_k \sigma_{\text{MQSAM}}}{\sqrt{k}}\right)^2 + \left(\frac{IM_{\text{chave}}}{\sqrt{m}}\right)^2 + \left(\frac{IM_{\text{HP6217A}}}{\sqrt{m}\sqrt{n}}\right)^2$$

$$(IM_{\text{MQSAM}})^2 = (6)^2 + (1.4)^2 + (1.15)^2 + (0.4)^2 \quad (6.7)$$

$$IM_{\text{MQSAM}} \cong \pm 6\mu\text{V}$$

A incerteza de medição do coeficiente angular, IM_{CA} , resultante é composta pela média quadrática da incerteza do sistema de referência com a incerteza do sistema MQSAM:

$$(IM_{\text{CA}})^2 = (IM_{\text{Referência}})^2 + (IM_{\text{MQSAM}})^2 \quad (6.8)$$

$$IM_{\text{CA}} \cong \pm 11\mu\text{V}$$

Obtendo-se então, como resultado da medição,

$$CA = 1.079 \pm 0.011 \quad [\mu\text{V}/\mu\text{V}] \quad (6.9)$$

O ajuste do coeficiente linear dos canais dos termopares, foi realizado utilizando o sistema HP3852S. Como o sistema MQSAM-48 PID possui uma *zona morta* em uma faixa de tensão entre -1 a $+3\mu\text{V}$, fez-se o levantamento do coeficiente linear em um nível mais elevado de tensão. Gerou-se novamente um sinal de tensão através do dispositivo da Figura 6.1 e determinou-se os desvios em relação ao sistema HP3852S para os 40 canais. Os valores encontrados são listados no Anexo IV.2. Calcula-se a IM utilizando a dispersão máxima encontrada (canal #36), para valores obtidos através de 4 conjuntos, n , de 10 leituras, m . Neste caso, considera-se somente a dispersão referente ao sistema de referência, não considerando a parcela sistemática:

$$\begin{aligned} (\text{IM}_{\text{CL}})^2 &= (\text{IM}_{\text{MQSAM}})^2 + \left(\frac{t_m \sigma_{\text{Referência}}}{\sqrt{n} \sqrt{m}} \right)^2 \\ (\text{IM}_{\text{CL}})^2 &= \sqrt{(3.6)^2 + \left(\frac{t_{10} \cdot 1.8}{\sqrt{10} \sqrt{4}} \right)^2} \\ \text{IM}_{\text{CL}} &\cong \pm 4\mu\text{V} \end{aligned} \quad (6.10)$$

onde $\sigma_{\text{Referência}}$ é a dispersão máxima observada no sistema HP3852S para um conjunto de 10 leituras.

Obtendo-se, como IM total para a medição de tensão, como a soma quadrática das incertezas do coeficiente angular e linear:

$$\begin{aligned} (\text{IM})^2 &= (\text{IM}_{\text{CA}})^2 + (\text{IM}_{\text{CL}})^2 \\ \text{IM} &= \sqrt{(11)^2 + (4)^2} \\ \text{IM} &\cong \pm 12\mu\text{V} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Nota-se, sobretudo, que a IM referente ao coeficiente angular é a mais significativa. Isto é devido ao fato de se considerar o erro sistemático na medição com o voltímetro HP44701A somente neste termo.

6.4 - CALIBRAÇÃO DOS CANAIS PARA LEITURA DAS TERMORRESISTÊNCIAS

Este condicionador possui ajuste por hardware do sinal através de um amplificador de ganho ajustável, G , equação (5.2), na forma de um potenciômetro variável localizado no módulo condicionador de sinais. Entretanto, determinou-se a função transferência deste módulo para compensação do sinal por software.

Utilizou-se os próprios sensores de temperatura para a obtenção da função de transferência. Os termorresistores foram calibrados com uma incerteza de medição inferior a $\pm 0.05K$, $IM_{Referência}$ [52]. Utilizou-se um banho termostaticado, marca Microquímica, com uma estabilidade de $\pm 0.01K$, para uma faixa de temperatura entre 5 e 45°C. Para a leitura do termorresistor de referência utilizou-se o sistema HP3852S e os outros dois termorresistores conectados aos canais de leitura da placa MQSAM-48 PID. Utilizando a função inversa da curva de calibração deste sensores pode-se determinar o valor da resistência lida para cada canal. Obteve-se as seguintes curvas para cada canal:

Tabela 6.1 - Função Transferência para a medição de resistência.

Canal	Função Transferência [Ω]	$\frac{\sigma_{FT}}{\sqrt{n}}$
#01	$y(x) = 8.2248 + 0.9327 x$	± 0.007
#02	$y(x) = -2.9377 + 1.0232 x$	± 0.008

A incerteza de medição resultante é correspondente a média quadrática referente ao desvio da função transferência, $\frac{\sigma_{FT}}{\sqrt{n}}$ e a incerteza de medição da referência, onde n é o número de pontos medidos ($n=10$).

$$IM^2 = \left(\frac{t_n \sigma_{FT}}{\sqrt{n}} \right)^2 + (IM_{Referência})^2$$

$$(IM)^2 = (0.006)^2 + (0.019)^2 \quad (6.12)$$

$$IM = \pm 0.02\Omega$$

Nota-se que a parcela mais significativa é devido a incerteza de medição da referência.

6.5 - CALIBRAÇÃO DO MÓDULO DE LEITURA DE TENSÃO CONTÍNUA

O módulo de leitura de tensão contínua é configurado para uma faixa de 0 a 100V. Fez-se a calibração utilizando a própria configuração de leitura de tensão no equipamento de placa quente protegida, Anexo II.1. O sinal de tensão é lido diretamente sobre as resistências de aquecimento do núcleo da placa quente. Alterou-se somente a forma de ligação das duas resistências, passando de paralelo para ligação em série, deste modo reduz-se a potência dissipada, evitando sobre-aquecimento na placa quente.

Para medição de tensão, pelos dois sistemas, utilizou-se uma chave Omega manual, localizada próxima ao terminal de leitura da placa MQSAM-48 PID.

Observou-se um desvio de linearidade para a função transferência deste módulo, desta forma obteve-se uma equação do segundo grau, equação (6.13)

$$y(x) = 0.055 + 1.0029 x - 0.000367 x^2 \quad [V] \quad (6.13)$$

A dispersão dos pontos em torno da curva estimada é de $\pm 0.1V$. A incerteza de medição do sistema de referência, para esta faixa de tensão, para uma leitura (100V) é:

$$IM_{HP44701A} = \pm(0.0007 + 0.008\% + 0.01\%) \quad [V]$$

$$IM_{HP44701A} = \pm(0.0007 + 0.008 + 0.01) \quad (6.14)$$

$$IM_{HP44701A} = \pm 0.02V$$

A incerteza de medição final, para o módulo de tensão então, é obtido pela média quadrática da incerteza de medição do voltímetro HP44701A com a dispersão da curva,

$$\begin{aligned} (IM)^2 &= (IM_{\text{curva}})^2 + (IM_{\text{HP44701A}})^2 \\ IM &= \sqrt{(0.02)^2 + (0.1)^2} \\ IM &\cong \pm 0.1V \end{aligned} \quad (6.15)$$

Nota-se que a incerteza de medição é praticamente somente dependente da dispersão da curva, sendo função, basicamente, da variação da fonte de tensão.

6.6 - CALIBRAÇÃO DO MÓDULO DE LEITURA DE CORRENTE CONTÍNUA

A determinação da corrente contínua aplicada à resistência do núcleo da placa quente é através da medição da queda de tensão sobre uma resistência padrão de $0.2\Omega \pm 1\%$. Determinou-se a função transferência deste módulo através da leitura da queda de tensão sobre a resistência pela sistema MQSAM-48 e pelo sistema de referência HP3852S, utilizando uma chave manual Omega. Mediu-se a queda de tensão no pontos 3-4, Anexo II.2. Para uma melhor correlação, obteve-se uma curva do segundo grau com dispersão inferior a $\pm 0.0009A$, equação (6.16),

$$y(x) = 1.30918 + 1.00497 x - 0.00444 x^2 \quad [A] \quad (6.16)$$

a incerteza de medição final é determinada pela média quadrática das incertezas do padrão com a dispersão da curva obtida, equação (6.17).

$$\begin{aligned} (IM)^2 &= (IM_{\text{padrão}})^2 + (IM_{\text{curva}})^2 \\ IM &= \sqrt{(0.01)^2 + (0.0009)^2} \\ IM &\cong \pm 0.01A \end{aligned} \quad (6.17)$$

Neste caso, a incerteza de medição é função da incerteza do resistor padrão (1%). Desta forma, é mais conveniente expressar a IM em valores percentuais para toda a faixa de operação, equação (6.18).

$$IM \cong \pm 1\% \text{ da leitura} \quad [A] \quad (6.18)$$

6.7 - CARACTERIZAÇÃO DAS CARATERÍSTICAS METROLÓGICAS DO SISTEMA MQSAM-48 PID

No capítulo anterior e neste, determinou-se as características metrológicas do sistema MQSAM-48 PID, os valores obtidos para cada módulo de medição são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Características Metrológicas do sistema MQSAM-48 PID.

Módulo de Medição	Faixa de Operação	Resolução	IM
Sinal de termopar	-1000 a +1000 μ V	$\pm 0.25\mu$ V	$\pm 12\mu$ V
Resistência	100 a 119,5 Ω	$\pm 0.0048\Omega$	$\pm 0.02\Omega$
Tensão	0 a 100V	± 0.025 V	± 0.1 V
Corrente	0 a 1A	± 0.0002 A	$\pm (1\% \text{ da leitura})$

A incerteza de medição de temperatura, com as termorresistências e termopares, é dependente, principalmente da incerteza da calibração do sistema MQSAM-48 PID e sensores.

Para o cálculo da incerteza de medição de temperatura, considera-se as incertezas na medição com o sistema de aquisição com os termopares e termorresistências, equação (6.19). Gradientes térmicos na junta de referência que possam existir, não são considerados neste cálculo, contudo procurou-se minimiza-los através dos cuidados citados no capítulo 5.4.

$$\begin{aligned}
 (IM)_{\phi}^2 &= (IM_{\text{termopar}})^2 + (IM_{\text{MQSAM-termopar}})^2 + (IM_{\text{PT-100}})^2 + (IM_{\text{MQSAM-PT100}})^2 \\
 (IM)_{\phi}^2 &= (0.1)^2 + (0.3)^2 + (0.05)^2 + (0.05)^2
 \end{aligned}
 \tag{6.19}$$

$$IM_{\phi} \cong \pm 0.3\text{K}$$

Nota-se que a incerteza de medição resultante é função, principalmente, da incerteza de medição de módulo de leitura do sinal de termopar do sistema MQSAM. Porém, esta incerteza determinada é para a medição de temperatura absoluta. Como no equipamento de placa quente protegida, deseja-se medir o gradiente térmico através da amostra (diferença de temperatura entre as faces quente e fria da amostra), pode-se eliminar as parcelas referentes aos erros sistemáticos na determinação da temperatura (considerando como hipótese que elas são constantes em toda a faixa de medição). Desta forma, a incerteza na leitura de tensão, para este caso, é composta pelas incertezas utilizadas na equação (6.11), exceto a parcela da equação (6.4), referente ao erro sistemático do voltímetro HP44701A. Então, a incerteza do coeficiente angular torna-se função, principalmente, da incerteza resultante do sistema MQSAM-48 PID, equação (6.7). O resultado é expresso na equação (6.20).

$$\begin{aligned}
 (IM_{\text{MQSAM}})^2 &= (IM_{\text{CA}})^2 + (IM_{\text{CL}})^2 \\
 (IM_{\text{MQSAM}})^2 &= (6)^2 + (4)^2 \\
 IM_{\text{MQSAM}} &\cong \pm 7\mu\text{V}
 \end{aligned}
 \tag{6.20}$$

A incerteza de medição final, para o cálculo do gradiente térmico, é obtido pela propagação do erro com a incerteza dos sensores, equação (6.21).

$$\begin{aligned} \left(\text{IM}_{\text{MQSAM}-\Delta T} \right)^2 &= \left(\text{IM}_{\text{Termopar}} \right)^2 + \left(\text{IM}_{\text{MQSAM}} \right)^2 \\ \left(\text{IM}_{\text{MQSAM}-\Delta T} \right)^2 &= (0.1)^2 + (0.18)^2 \\ \text{IM}_{\text{MQSAM}-\Delta T} &\cong \pm 0.2\text{K} \end{aligned} \quad (6.21)$$

A incerteza expressa na equação (6.21) é utilizada para o cálculo do erro da determinação do gradiente térmico através das amostras. A incerteza na definição de temperatura absoluta, usado para o cálculo da temperatura média de realização do ensaio, é expresso pela equação (6.19).

CAPÍTULO 7

RESULTADOS

7.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, descreve-se a calibração final do equipamento de placa quente protegida, utilizando amostras com certificado de calibração emitidos pelo NPL (National Physical Laboratory, Inglaterra) e incerteza de medição inferior a 2%. As amostras, com valores de condutividade térmica de 0.19, 0.34 e 0.44 W/m K, aproximadamente, são confeccionadas em perspex, nylon e polythene, respectivamente. Realizou-se medições em uma faixa de temperatura média entre 24 e 37°C e um gradiente térmico nas amostras inferior a 15K.

Apresenta-se também, os critérios adotados para validação do ensaio, caracterizado sobretudo pela obtenção do regime permanente.

Finalmente, faz-se uma análise sobre a incerteza de medição obtida pelo equipamento de placa quente protegida. A influência na medição da condutividade térmica do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda é determinado experimentalmente.

7.2 - AMOSTRAS UTILIZADAS

Utilizou-se três pares de amostras, com certificado de calibração emitidas pelo NPL [60 a 62]- Anexo V. Apresenta-se abaixo os valores de condutividade térmica a 20°C e as equações lineares determinadas pelo método dos mínimos quadrados para a variação da condutividade térmica com a temperatura média, $(\lambda(\phi))$, - válidas em uma faixa de temperatura, $\Delta\phi$.

1) Perspex:	$\lambda(\phi=20^{\circ}\text{C}) = 0.1898 \pm 0.004$	[W/m K]
	$\lambda(\phi) = (0.1870 + 0.000142\phi)$	[W/m K]
	$\Delta\phi = 10 \text{ a } 70^{\circ}\text{C}$	

2) Nylon:	$\lambda(\phi=20^{\circ}\text{C}) = 0.3420 \pm 0.007$	[W/m K]
	$\lambda(\phi) = (0.3440 - 9.93 \cdot 10^{-5} \phi)$	[W/m K]
	$\Delta\phi = 0$ a 40°C	
3) Polythene:	$\lambda(\phi=20^{\circ}\text{C}) = 0.4232 \pm 0.008$	[W/m K]
	$\lambda(\phi) = (0.4434 + 0.001011\phi)$	[W/m K]
	$\Delta\phi = 10$ a 45°C	

As amostras foram medidas pelo NPL utilizando o método da placa quente protegida conforme às normas BS874: Section 2.1:1986 e ISO 8302. O NPL determinou as temperaturas das superfícies através de termopares achatados com espessura de 0.1mm, com o uso de pasta térmica para aumentar o contato térmico. As amostras possuem, aproximadamente, dimensões de 305x305x50mm e suas superfícies foram usinadas com uma planicidade inferior a 0.2mm. É necessário impor um gradiente térmico inferior a 15K a todas as amostras, esta limitação tende a evitar problemas de deformações térmicas permanentes.

Determinou-se as espessuras das amostras utilizando um micrômetro marca TESA com uma incerteza de medição inferior a $\pm 0.01\text{mm}$, com uma faixa de operação de 24.5 a 50.5mm. Realizou-se medições a uma distância de aproximadamente 30mm das faces laterais, em pelo menos 24 pontos, Tabela 7.1.

As incertezas de medição relacionadas na Tabela 7.1 não levam em consideração os desvios de planicidade existentes nas superfícies das amostras. Desta forma, considera-se como incerteza de medição na espessura o desvio de planicidade, determinado pelo NPL (inferior a 0.2mm).

Tabela 7.1 - Determinação das espessuras das amostras.

Material	Amostra	\bar{L} [mm]	IM [mm]
Perspex	QM/43A	50.01	± 0.02
	QM/43B	50.06	± 0.02
Nylon	QM/100A	48.89	± 0.03
	QM/100B	48.93	± 0.02
Polythene	QM/73A	49.44	± 0.04
	QM/73B	49.62	± 0.03

7.3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Utilizou-se o equipamento de placa quente protegida descrito no capítulo 5 para medição das amostras padrões. Os valores medidos e os desvios em relação aos valores obtidos pelo NPL são listados nas Tabelas 7.2, 7.3 e 7.4 para as amostras de perspex, nylon e polythene, respectivamente. Realizou-se medições em uma faixa de temperatura média de 24 a 37°C. A temperatura média inferior é limitada pela mínima temperatura que a placa fria pode atingir sem condensação de água ($\approx 14^\circ\text{C}$). Esta limitação é devido ao fato de não se utilizar nenhum dessecante na câmara de isolamento. A temperatura média superior é limitada pela máxima temperatura que a placa quente pode alcançar ($\approx 48^\circ\text{C}$). Isto é provocado pela limitação de leitura de tensão pelos canais de termopares pelo sistema MQSAM-48 PID ($+1000\mu\text{V}$), - equivalente a uma diferença de temperatura de 26K em relação a temperatura da junta de referência.

Tabela 7.2 - Valores de condutividade térmica determinadas experimentalmente -
Material: Perspex.

n° do ensaio	Temperatura média [°C]	λ_{NPL} [W/m K]	λ [W/m K]	ϵ $\epsilon = 100 \frac{\lambda - \lambda_{NPL}}{\lambda_{NPL}}$ [%]
1	24.2	0.1904	0.1859	-2.4
2	28.9	0.1911	0.1871	-2.1
3	36.7	0.1922	0.1904	-0.9

Tabela 7.3 - Valores de condutividade térmica determinadas experimentalmente -
Material: Nylon.

n° do ensaio	Temperatura média [°C]	λ_{NPL} [W/m K]	λ [W/m K]	ϵ $\epsilon = 100 \frac{\lambda - \lambda_{NPL}}{\lambda_{NPL}}$ [%]
1	28.5	0.3412	0.3358	-1.6
2	32.2	0.3408	0.3421	+0.4
3	35.7	0.3405	0.3364	-1.2
4	37.0	0.3403	0.3358	-0.04

Tabela 7.4- Valores de condutividade térmica determinadas experimentalmente -
Material: Polythene.

n° do ensaio	Temperatura média [°C]	λ_{NPL} [W/m K]	λ [W/m K]	ε $\varepsilon = 100 \frac{\lambda - \lambda_{NPL}}{\lambda_{NPL}}$ [%]
1	27.2	0.4159	0.4125	-0.8
2	27.4	0.4157	0.3871	-4.5
3	33.0	0.4100	0.3997	-2.5
4	36.5	0.4065	0.4033	-0.8
5	36.8	0.4062	0.4071	+0.2
6	36.9	0.4061	0.3982	-2.0
7	36.9	0.4061	0.4013	-1.2
8	37.3	0.4057	0.3871	-4.6
9	37.4	0.4056	0.3969	-2.2

Realizou-se todos os ensaios utilizando uma espuma de borracha de silicone entre as interfaces amostras/placas. O gradiente médio imposto às amostras foi de aproximadamente 15K.

Validou-se o ensaio quando a diferença na leitura de tensão entre os canais de termopares localizados na placa quente fossem inferiores a $\pm 3\mu V$ ($\approx 0.08K$) e inferiores a $\pm 6\mu V$ ($\approx 0.15K$) nas amostras (utilizou-se quatro termopares por superfície).

O tempo de realização do ensaio é de aproximadamente de 20 a 30h, dependendo da capacidade térmica da amostra e do ajuste de potência inicial. Para diminuir o tempo necessário para a obtenção do regime permanente, opera-se inicialmente a placa quente com uma potência maior. Alcançando o gradiente térmico desejado, modifica-se a potência para um valor estimado, capaz de manter o gradiente térmico.

7.3.1 - CONDIÇÃO DE REGIME PERMANENTE

Adotou-se como condição de regime permanente quando:

- i) medições sucessivas, realizadas em um intervalo não inferior a 6h, não apresentassem um desvio superior a $\pm 0.5\%$ no valor da condutividade térmica, segundo recomendações das normas BS 874 [17] e ISO 8302 [21];
- ii) a temperatura média das amostras não variasse mais que $\pm 0.1\text{K}$ e a variação da temperatura da placa quente inferior a $\pm 0.15\text{K}$. Exemplos típicos são as Figuras 7.1, 7.2 e 7.3.

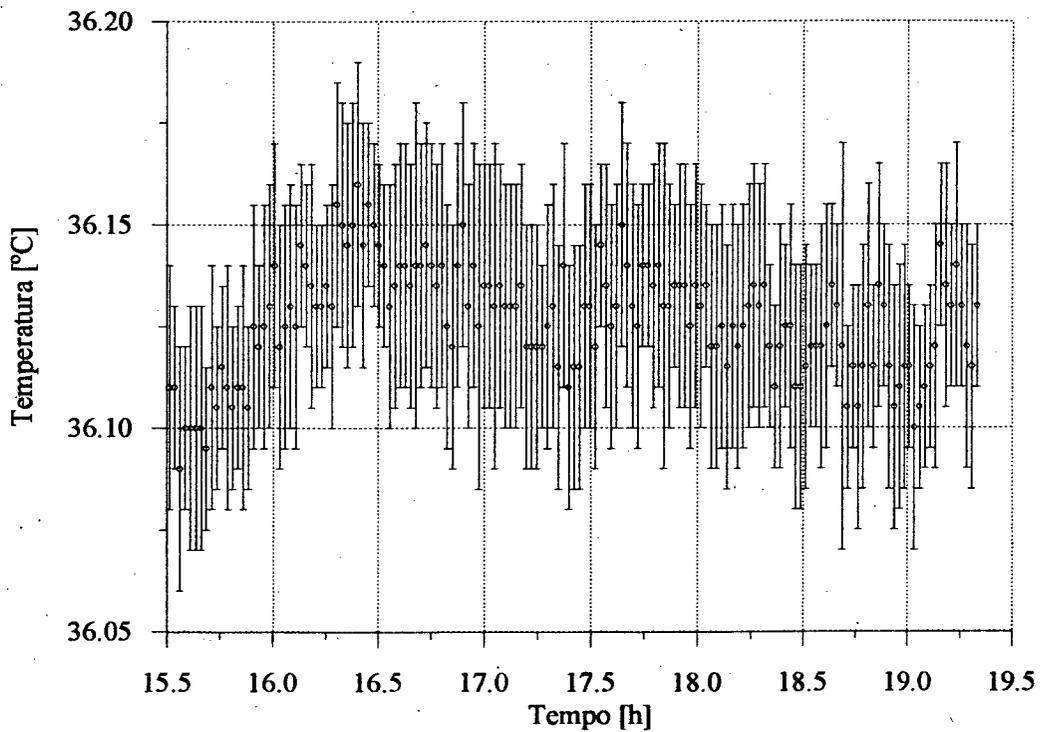


Figura 7.1 - Variação da temperatura média da amostra em condição de regime permanente (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 150 medições).

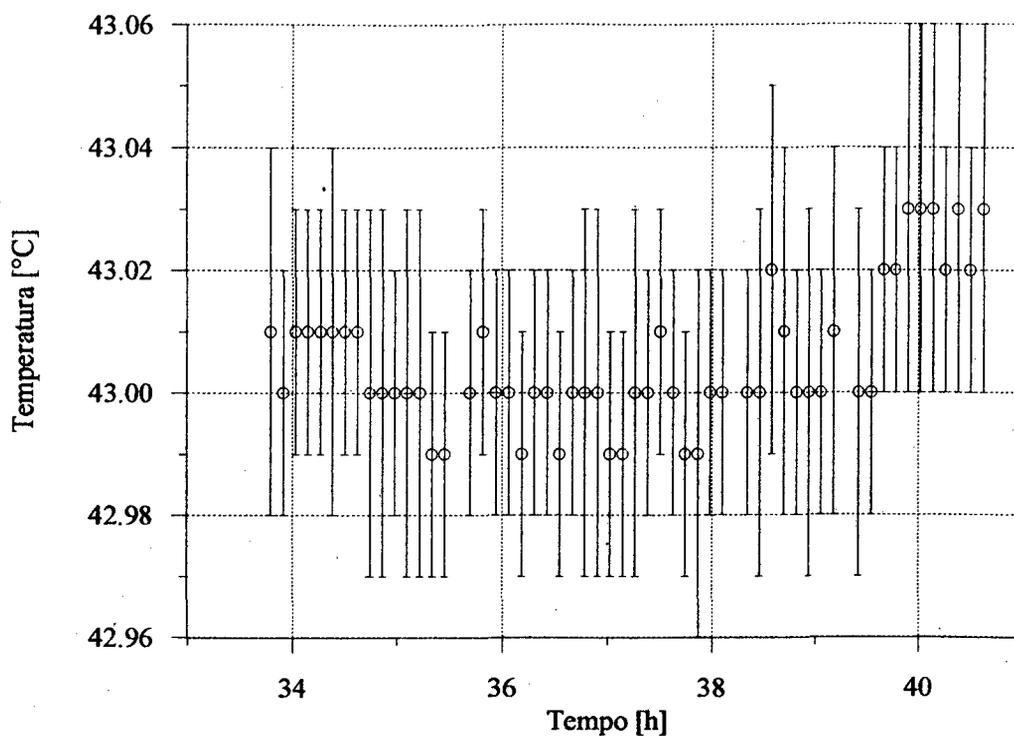


Figura 7.2 - Variação da temperatura da placa quente em condição de regime permanente (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 225 medições).

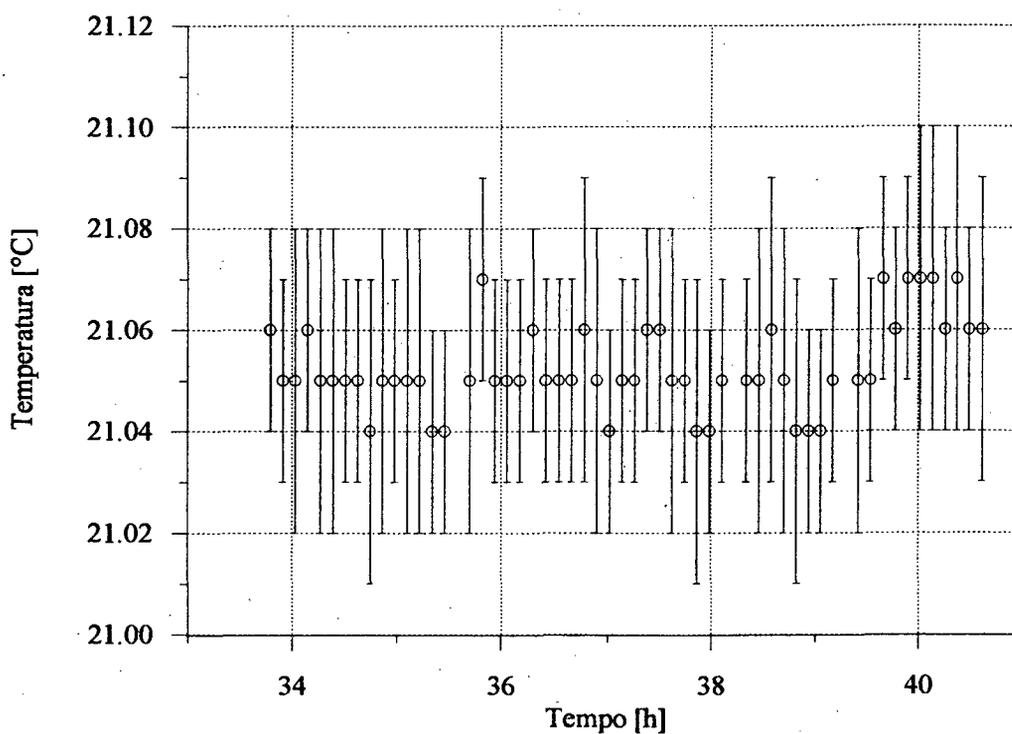


Figura 7.3 - Variação da temperatura da placa fria em condição de regime permanente (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 225 medições).

A recomendação da norma ASTM [20] de se realizar medições em um intervalo de tempo superior à constante de tempo do sistema não foi seguida. O equipamento de placa quente protegida apresentou uma evolução térmica extremamente lenta, Figuras 7.4 e 7.5, devido, sobretudo, a alta inércia térmica da placa quente. A constante de tempo térmica determinada é de aproximadamente 4h. Realizou-se este ensaio, partindo de um estado de temperatura uniforme na amostra ($\pm 0.5K$) e se impondo um fluxo de calor constante até a estabilização de temperatura (regime permanente).

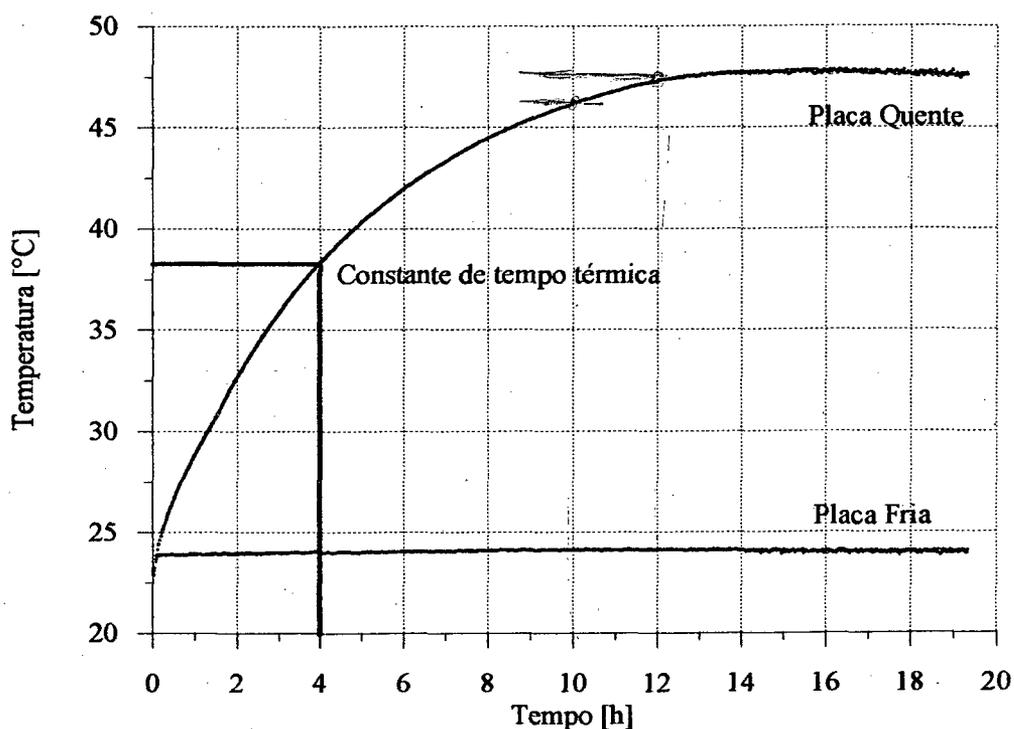


Figura 7.4 - Evolução térmica da temperatura das placas quente e frias -
Determinação da constante de tempo (Amostra: Polythene).

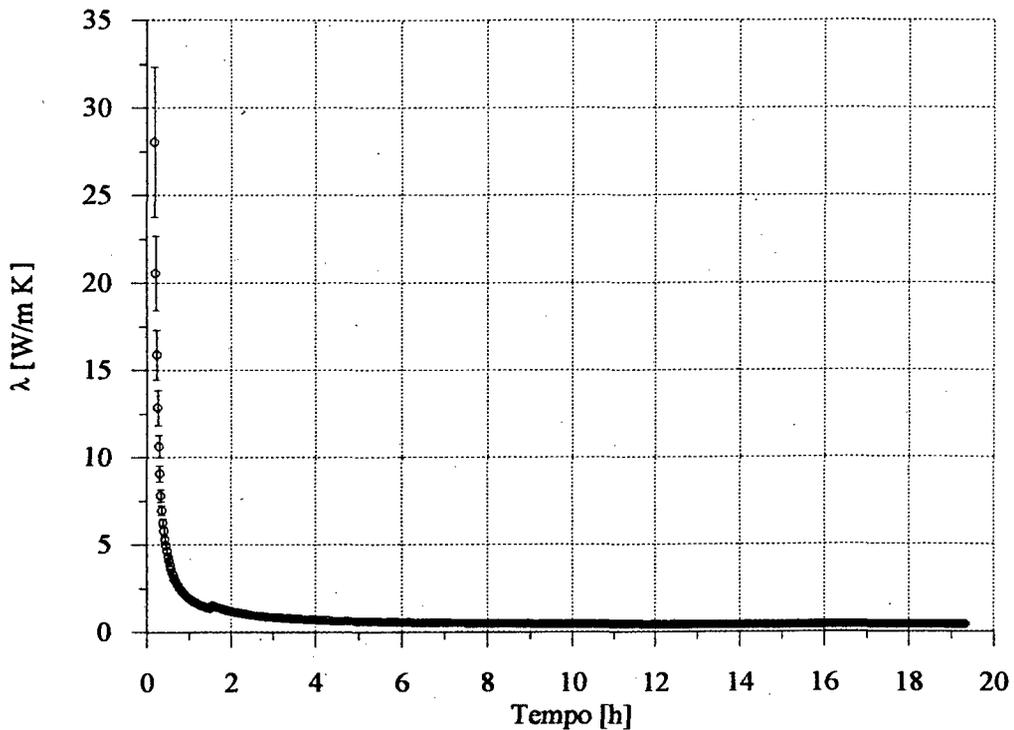


Figura 7.5 - Evolução da medição da condutividade térmica até a obtenção do regime permanente (Amostra: Polythene) - Barra de erros referente ao desvio padrão de 150 medições.

Observou-se, na maioria das medições, variações sistemáticas causadas sobretudo pela variação da potência fornecida pela fonte estabilizada, Figuras 7.6 e 7.7. Isto acarretou, muitas vezes, na necessidade de um tempo maior de realização do ensaio, para a obtenção do regime permanente. A variação do fluxo de calor da Figura 7.6 ainda é considerado como válido (variação inferior a $\pm 0.5\%$), entretanto a incerteza causada por esta oscilação torna-se mais significativa para a medição de baixos valores de condutividade térmica.

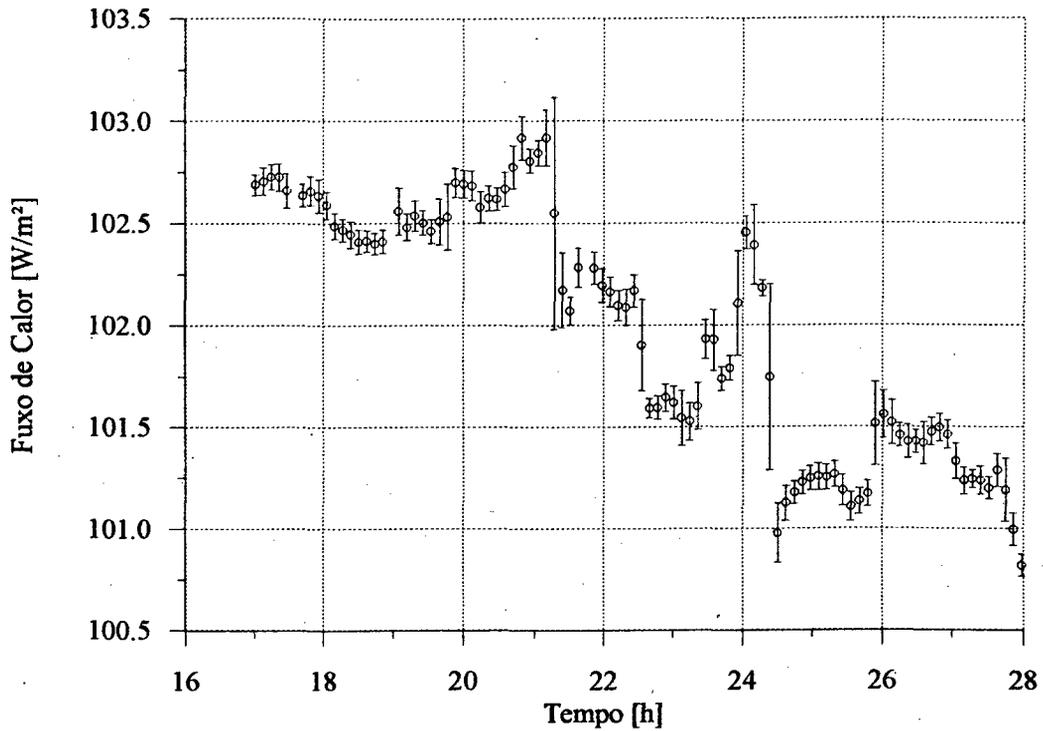


Figura 7.6 - Variação do fluxo de calor causado pela flutuação da tensão da fonte estabilizada (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 150 medições) - Amostra : Nylon.

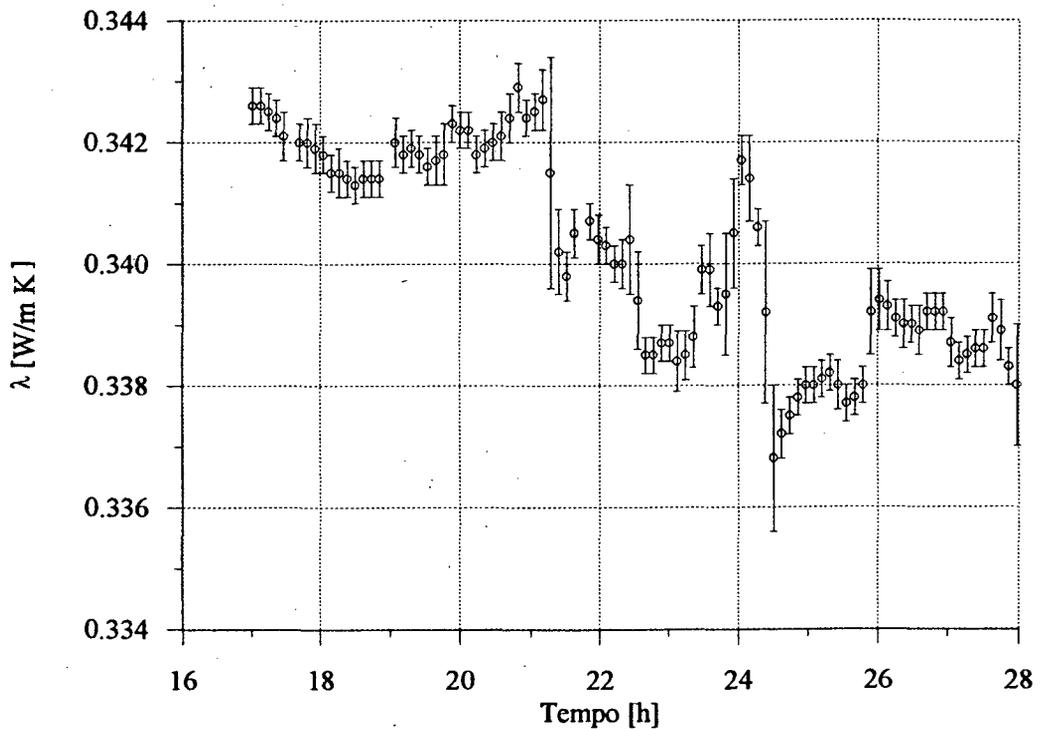


Figura 7.7 - Variação do valor medido de condutividade térmica causado pela flutuação da tensão da fonte estabilizada (a barra de erros é referente ao desvio padrão de 150 medições) - Amostra : Nylon.

7.4 - DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DO EQUIPAMENTO DE PLACA QUENTE PROTEGIDA

A medição da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida requer a medição do fluxo de calor unidimensional no núcleo da placa quente em condição de regime permanente. Há a necessidade da determinação da espessura e dos gradientes térmicos sobre as amostras. Erros causados pela incerteza de medição dos parâmetros para o cálculo da condutividade térmica podem ser estimados através de uma análise de erros sobre a equação de Fourier. Entretanto, desvios da condição de fluxo de calor unidimensional e regime permanente são mais difíceis de serem estimados. Geralmente, feito através de medições em amostras padrões, ou análise numérica.

As incertezas de medição, para os parâmetros do cálculo da condutividade térmica através da equação de Fourier, são listados na Tabela 7.5. Os dados referentes a medição com o sistema de aquisição são obtidos da Tabela 6.2.

Tabela 7.5 - Incertezas de medição dos parâmetros utilizados para o cálculo da condutividade térmica

Parâmetro (P)	P	$\frac{\delta P}{P}$
ΔT	15K	$\frac{0.2}{15} = 0.013$
A	199.6mm x 199.6mm	$\sqrt{2 \left(\frac{0.7}{199.6} \right)^2} = 0.005$
Q	20V x 0.31A	$\sqrt{\left(\frac{0.1}{20} \right)^2 + (0.01)^2} = 0.011$
L	50mm	$\frac{0.2}{50} = 0.0004$

Handwritten notes: K, m², W/m², m, P.W. PADRÃO, Ps. 103

A área utilizada para o cálculo da condutividade térmica corresponde à área do núcleo da placa quente mais a metade da área da folga entre o núcleo e o anel de guarda. Determinou-se as dimensões do núcleo através de um paquímetro Mitutoyo com incerteza de medição de $\pm 0.05\text{mm}$, obteve-se como dimensão linear média o comprimento de $198.8\pm 0.5\text{mm}$, o comprimento médio da folga é de $1.5\pm 0.3\text{mm}$.

Utilizando os valores da Tabela 7.5, calcula-se a incerteza de medição na condutividade térmica, com a teoria de propagação de erros aplicada a equação de Fourier, $\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_e$:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_e^2 &= \left(\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_\phi \\ \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_e^2 &= (0.013)^2 + (0.005)^2 + (0.011)^2 + (0.0004)^2 + (0.001011 \cdot 0.3)^2 \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_e^2 = (0.013)^2 + (0.005)^2 + (0.011)^2 + (0.0004)^2 + (0.0003)^2$$

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_e \cong \pm 0.018 //$$

A parcela $\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_\phi$ expressa a incerteza referente à variação da condutividade térmica com a temperatura média, IM_ϕ ($\approx \pm 0.3\text{K}$), equação 6.19. Calculou-se a incerteza da variação da condutividade térmica, considerando a medição com as amostras de polythene, caso mais crítico (coeficiente de variação da condutividade térmica com a temperatura igual a $+ 0.00101$ $[\text{W/m K}]/[\text{K}]$, [62]). Todavia, nota-se que esta parcela é pouco significativa na determinação da incerteza da condutividade térmica, $\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_e$.

Obtendo-se então, equação (7.1), um erro para a medição da condutividade térmica, em torno de 2%. Nota-se que as parcelas mais significativas no cálculo da incerteza de medição são os termos $\left(\frac{\delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)$ e $\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)$. A incerteza na determinação da potência elétrica é devido, principalmente, a incerteza na determinação da corrente elétrica (incerteza do resistor padrão = $\pm 1\%$).

As amostras padrões utilizadas possuem uma incerteza de medição de 2%, IM_{NPL} , no entanto existe a incerteza na determinação da temperatura média, IM_{ϕ} . A incerteza final no valor da condutividade térmica, $\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_p$ é expressa pela equação 7.2.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_p^2 &= (IM_{NPL})^2 + (IM_{\phi})^2 \\ \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_p^2 &= (0.02)^2 + (0.001011 \cdot 0.3)^2 \\ \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_p &\cong \pm 0.02 \end{aligned} \tag{7.2}$$

A incerteza de medição determinada na equação (7.1), é válida somente se as hipóteses adotadas para a equação de Fourier forem satisfeitas, isto é, que as medições sejam realizadas em regime permanente e fluxo de calor unidimensional. Para levar em consideração esses desvios, utilizou-se os valores medidos das amostras padrões, Tabelas 7.2, 7.3 e 7.4. Observa-se o desvio máximo para a amostra de polythene de -4.6% , E_s , (número do ensaio 8). A incerteza de medição final do equipamento de placa quente protegida é determinada pela soma quadrática das incertezas das amostras com o desvio máximo medido, E_s , equação (7.3).

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 &= (E_s)^2 + \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)_p^2 \\ \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 &= (0.046)^2 + (0.02)^2 \\ \left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right) &\cong \pm 0.05 \quad (5\%) \end{aligned} \tag{7.3}$$

A repetibilidade da medição é determinada a partir da Tabela 7.4, com a média dos valores medidos dos ensaios de n° 4 a 9 (mesma temperatura média). Realizou-se as medições para a determinação da repetibilidade executando todo o procedimento de montagem das amostras no equipamento de placa quente protegida. Desta forma, leva-se em consideração às variações de medição devido ao posicionamento dos termopares e contato térmico interfacial entre placas/amostras. Obteve-se uma repetibilidade inferior a 2% para uma confiabilidade de 95%.

7.4.1 - DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO DESBALANCEAMENTO DE TEMPERATURA ENTRE O NÚCLEO E O ANEL DE GUARDA NA MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Determinou-se experimentalmente a influência do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda, δT , na medição da condutividade térmica. Pode-se expressar esta sensibilidade através de uma relação linear, equação (4.18), onde a constante de proporcionalidade B é dependente da forma de construção e dimensões da placa quente e também, em um menor grau de influência, das propriedades térmicas da amostra. Utilizou-se o par de amostras de nylon para a determinação desta influência, é o material que possui o menor coeficiente de variação da condutividade térmica com a temperatura (visto que é difícil manter a

mesma temperatura média para todos os ensaios). Os valores obtidos, para vários valores de desbalanceamento, são relacionados na Tabela 7.6. e Figura 7.8. O desbalanceamento de temperatura, δT , é definido como a diferença de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda. O erro é calculado pela em relação a condutividade térmica medida para um desbalanceamento de temperatura nulo, $\lambda_{\delta T=0}$, (nº do ensaio 5), pela seguinte relação:

$$\text{Erro}[\%] = 100 \frac{\lambda - \lambda_{\delta T=0}}{\lambda_{\delta T=0}} \quad (7.4)$$

Nota-se uma grande sensibilidade ao desbalanceamento de temperatura, δT . Para um erro sistemático na ordem de 0.1K na determinação do desbalanceamento, pode-se atingir erros de aproximadamente 10%. Esta influência é causada sobretudo, pela elevada espessura da placa quente, conjugado ao fato de que os pontos de fixação entre o núcleo e o anel de guarda são metálicos. Desta forma, pequenos desbalanceamentos de temperatura podem causar um fluxo de calor elevado entre estes elementos aquecedores. Este erro torna-se mais significativo a medida em que o valor de condutividade térmica das amostras diminui. O fluxo de calor necessário para se obter o gradiente térmico desejado é menor, aumentando a influência do fluxo de calor lateral.

Tabela 7.6 - Valores de condutividade térmica determinados experimentalmente para a determinação do efeito do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda (material: Nylon)

n ^o do ensaio	δT [K]	Temperatura média [°C]	λ [W/m K]	Erro [%]
1	-0.450	33.3	0.2275	-33.5
2	-0.300	31.8	0.2552	-25.4
3	-0.150	32.7	0.2972	-13.12
4	-0.075	32.6	0.3132	-8.45
5	0.000	32.2	0.3421	0.0
6	+0.075	32.8	0.3512	+2.7
7	+0.150	31.81	0.3750	+9.6
8	+0.300	31.88	0.4209	+23.0
9	+0.450	32.31	0.4457	+30.3

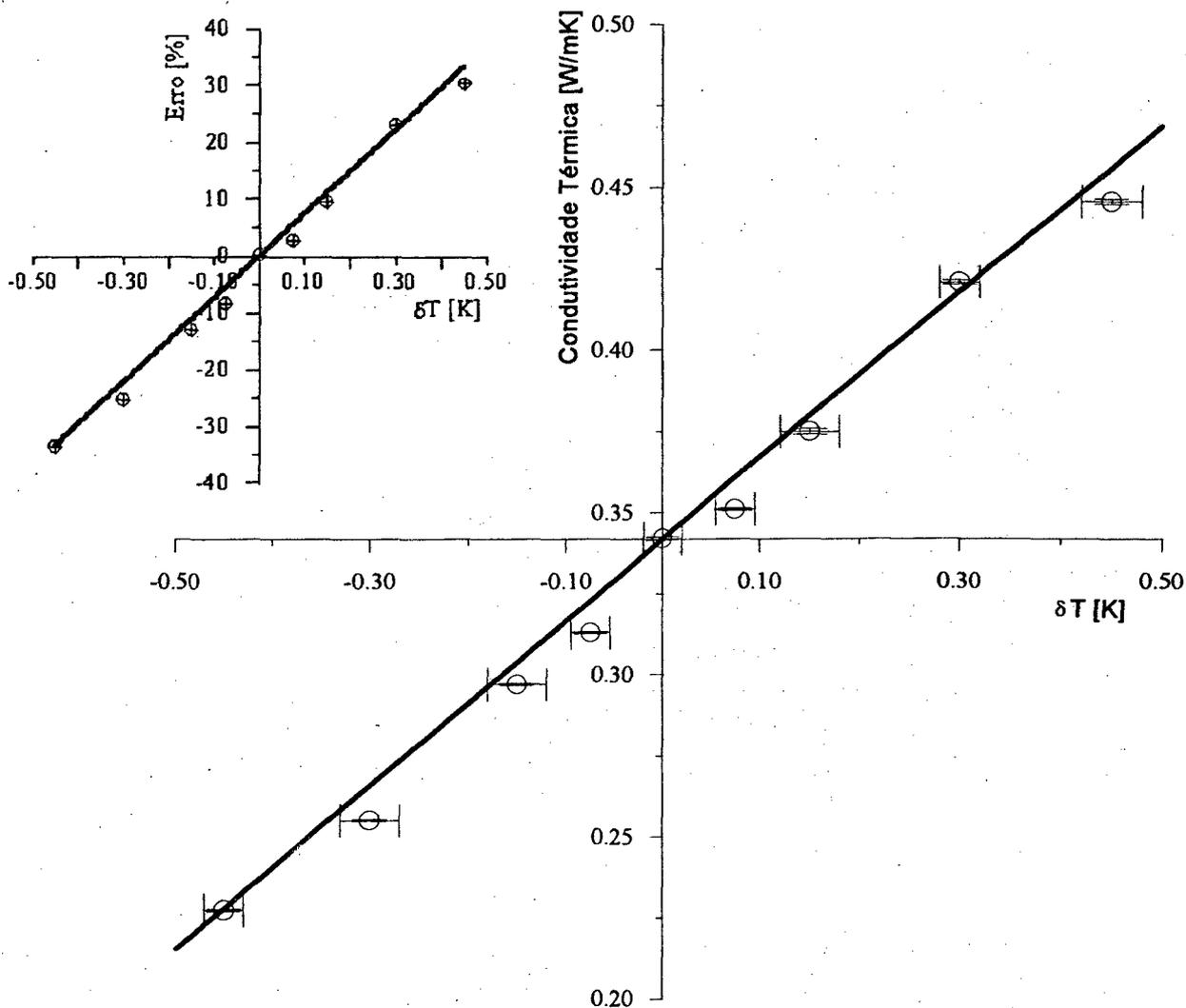


Figura 7.8 - Variação da condutividade térmica da amostra com o desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda.

7.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo da incerteza de medição e a repetibilidade da medição da condutividade térmica com o equipamento de placa quente protegida foi sobre-estimada. As primeiras

medições de condutividade térmica foram realizadas anteriormente a modificações feitas na placa de aquisição MQSAM-48 PID. Instalou-se uma linha de terra independente para a placa de aquisição, eliminando a influência de tensões espúrias causadas pelos outros equipamentos ligados à mesma linha. Notou-se que os valores medidos apresentaram uma melhor repetibilidade, não mais ocorrendo desvios da ordem de 4%, ficando próximos a 2%. Entretanto, não se eliminou estes resultados devido ao fato que realizou-se a maioria das medições nesta condição. Outro motivo também, é que mesmo nesta condição os resultados estão dentro da incerteza de medição pretendida (5%, conforme às normas BS874 [17], ASTM C177 [20] e ISO 8302 [21]). Entretanto a repetibilidade da medição ficou além da pretendida (obtida de 2%, sendo superior a recomendada pelas normas citadas acima, 1%). Este fato torna difícil o estudo de materiais que apresentam variações do valor da condutividade térmica em relação a algum parâmetro, como temperatura ou composição.

Observou-se um desvio entre as temperaturas medidas na amostra superior em relação a inferior, Figura 7.9. Este efeito é mais sensível a medida que a condutividade térmica da amostra aumenta. Isto é devido a dois motivos: *i*) Existe uma diferença do fluxo de água entre as placas frias superior e inferior; *ii*) a disposição em camadas de placas/amostras/espuma de borracha de silicone, na disposição horizontal, favorece a existência de resistências térmicas diferentes entre as interfaces de contato. As espumas de borracha de silicone localizadas mais abaixo, sofrem um achatamento maior. Esta diferença de resistências térmicas modificam a simetria do fluxo de calor.

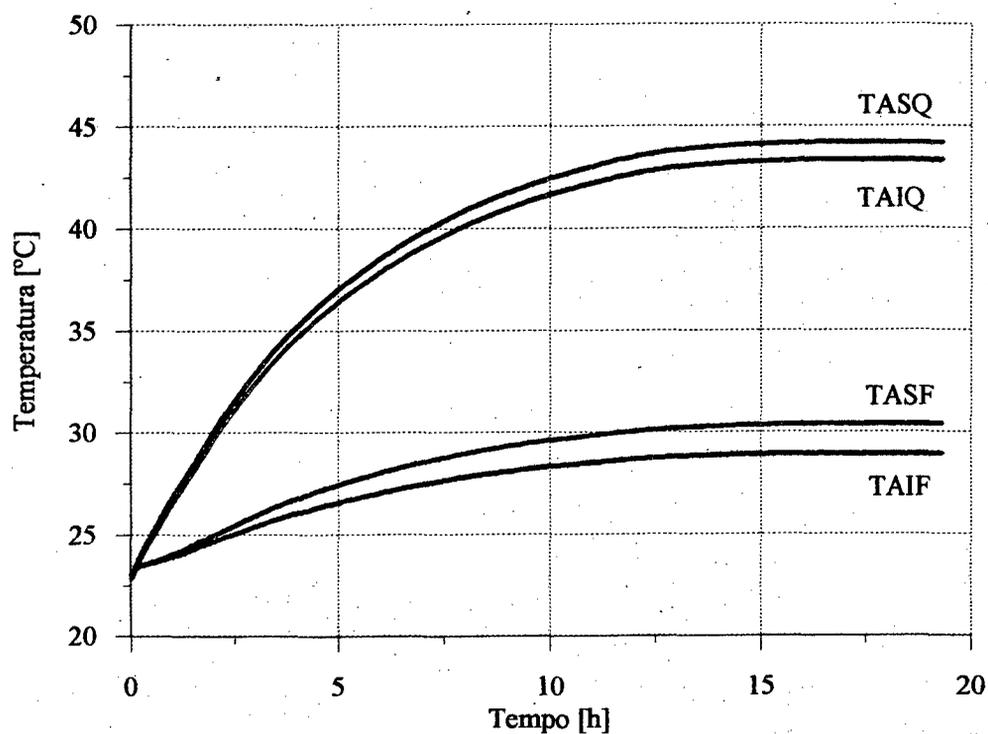


Figura 7.9 - Temperaturas superficiais das amostras (TASQ - temperatura da superfície quente da amostra superior; TAIQ - temperatura da superfície quente da amostra inferior; TASF - temperatura da superfície fria da amostra superior; TAIF - temperatura da superfície fria da amostra inferior) - Amostra: Polythene.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Realizou-se uma revisão bibliográfica apresentando os princípios e métodos para a medição da condutividade térmica de materiais isolantes. Estes métodos são baseados, principalmente, na medição do gradiente térmico através de uma amostra submetida a um fluxo de calor conhecido, em regime permanente. Aplicam-se a diversas geometrias, as mais típicas são na forma de placas ou cilindros.

Para a medição de materiais isolantes ($\lambda < 2 \text{ W/mK}$) sólidos, homogêneos e livres de umidade, o método mais adequado é o método da placa quente protegida. Para materiais com uma alta condutividade térmica, recomenda-se outros métodos em função dos erros aumentarem significativamente, principalmente na determinação da temperatura média de superfície.

Analisou-se o método da placa quente protegida através, principalmente, das normas ASTM C177 [20] e BS874 [17]. Como comentário, nota-se que a norma ASTM procura fazer recomendações para a construção do equipamento, entretanto a incerteza de medição deve ser calculada para cada equipamento. As normas BS874, e ISO 8302, entretanto, propõem a construção de um equipamento com especificações mais rígidas, de modo a se ter a incerteza de medição assegurada por norma. Todavia, o equipamento só pode ser considerado de referência se forem efetuadas medições interlaboratoriais com institutos de referência.

Apresentou-se uma análise da medição com o equipamento de placa quente protegida visando a determinação da incerteza de medição na obtenção da condutividade térmica. A incerteza de medição é função, principalmente, dos desvios das hipóteses adotadas para a equação de Fourier, isto é, da condição do fluxo de calor unidimensional e regime permanente; além dos parâmetros usados por esta equação - fluxo de calor, espessura da amostra e gradiente térmico. Os desvios da condição do fluxo de calor são os mais difíceis de serem estimados, geralmente são causados por: *i*) influência da temperatura ambiente; *ii*) desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda. Simulou-se analiticamente a influência da

temperatura ambiente e se observou que para amostras com espessuras inferiores a 50mm e para medições próximas a temperatura ambiente este erro é pouco significativo. Para demonstrar a influência do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda, utilizou-se os resultados numéricos obtidos por Troussart [29], para materiais isolantes com uma condutividade térmica inferior a 0.045W/m K. O autor demonstrou que para minimizar esses erros é necessário utilizar amostras com espessuras inferiores a 25mm e submetidas a gradientes térmicos maiores - $\approx 20\text{K}$ (limitado pelas deformações térmicas sofridas pelas amostras). Demonstrou também, que a sensibilidade do erro da condutividade térmica em função do desbalanceamento de temperatura aumenta com o número de pontes metálicas entre o núcleo e o anel de guarda.

Demonstrou-se também a necessidade de utilizar um material compressível na interface de contato amostra/placa, minimizando a resistência térmica causada pela formação de "bolsões de ar" resultantes de imperfeições superficiais.

Realizou-se a construção de um protótipo de equipamento de placa quente protegida - objeto desta dissertação - utilizando equipamentos de fabricação nacional. As maiores dificuldades encontradas foram no protótipo do sistema de aquisição de sinais MQSAM-48 PID.

Fêz-se várias modificações no sistema de aquisição e controle, a nível de software e hardware, para a obtenção da incerteza de medição desejada, tais como a instalação de filtros analógicos para a leitura dos sinais provenientes dos termopares e chaveamento da fonte de corrente dos sinais das termorresistências. No entanto, cita-se algumas modificações que implicariam na construção de um novo protótipo, com características metrológicas melhores. As principais seriam:

- Utilização de um conversor com uma resolução superior a $3^{1/2}$ dígitos (4096 incrementos), desta forma seria possível aumentar, principalmente a faixa de leitura de tensão pelos termopares (atual: $-1000\mu\text{V}$ a $+1000\mu\text{V}$) conseguindo manter a mesma resolução.

- Aumento da rejeição de modo comum e impedância de entrada do módulo de leitura dos canais de termopares. Isto implicaria em modificações das chaves multiplexadoras e do amplificador operacional.
- Modificação da forma de chaveamento dos sinais provenientes dos termopares, para a configuração diferencial ou a três fios (*guarded*), minimizando os efeitos de injeção de ruídos e "laços de terra".
- Uso de uma chave multiplexadora localizada anteriormente ao amplificador operacional. Esta chave teria como função o chaveamento para uma leitura de um sinal "nulo". O sinal de tensão lido representaria o erro de *off-set* da leitura, podendo ser compensada por software (auto-zero).

Observou-se também, a grande sensibilidade da placa quente ao desbalanceamento de temperatura. Isto é devido a sua forma de construção e suas dimensões. Pequenos desbalanceamentos de temperatura causam fluxos de calor significativos através dos elementos fixadores metálicos. Outro problema ocorrido na placa quente foi a constante ruptura da isolação elétrica dos elementos aquecedores, causando correntes de fuga. Sugere-se a construção de uma nova placa quente com espessura menor (inferior a 10mm - a atual possui 40mm) e com elementos fixadores não metálicos para o núcleo e o anel de guarda, por exemplo, baquelite. Os elementos aquecedores devem ser dispostos na placa quente de maneira a evitar o contato elétrico. Como solução, recomenda-se a utilização de elementos aquecedores de fabricação industrial (um exemplo é Watlow, USA), constituídos de uma lâmina de silicone que possui fios de resistência (isoladas eletricamente) dispostos de modo homogêneo, de maneira similar à disposição dos fios das resistências elétricas na placa quente atual. Seriam confeccionados um elemento aquecedor para o núcleo e outro, independente, para o anel de guarda.

Para a medição do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda, sugere-se a localização dos termopares na placa quente conforme a Figura 4.1 (a), posicionados a uma distância de 1/4 da dimensão lateral do núcleo em relação aos cantos (esta posição é recomendada pelas normas BS874 [20], ASTM C177 [17] e ISO 8302 [21]). Entretanto para a medição da condutividade térmica de materiais com valores abaixo de 0.15 W/m K, recomenda-

se a medição do desbalanceamento de temperatura com os termopares dispostos na forma diferencial.

Outra modificação possível é a utilização de dois banhos termostatizados para a refrigeração das placas frias, conectados de forma independentes. Desta maneira é possível reduzir o efeito da diferença de temperatura entre as placas frias superior e inferior. Outro modo, sugerido pela norma BS874 [20], é o uso de elementos aquecedores instalados nas placas frias, afim de minimizar a diferença de temperatura entre elas.

Obteve-se uma incerteza de medição para o equipamento de placa quente protegida estimada em 5% para uma faixa de condutividade térmica entre 0.18 e 0.44 W/m K e temperatura média entre 20 e 40°C, estando em conformidade com as normas BS874 [20], ASTM C177 [17] e ISO 8302 [21]. Todavia, espera-se que para a medição de materiais isolantes com valores de condutividade térmica inferiores a 0.15 W/m K, a incerteza de medição aumente consideravelmente. Isto é função, principalmente, da alta sensibilidade da placa quente a erros sistemáticos na medição do desbalanceamento de temperatura entre o núcleo e o anel de guarda. Para materiais com valores de condutividade térmica superiores a 0.45 W/m K, a incerteza de medição é causada, principalmente, pela assimetria do fluxo de calor entre a amostra superior e inferior, causados pela diferença de temperatura entre as placas frias superior e inferior e variações da resistência de contato entre placas/amostras/lâminas de silicone.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ARPACI, V.S. *Conduction Heat Transfer*. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1966.
- [02] KREITH, F. *Princípios da Transmissão de calor*. Editora Edgard Blücher Ltda. 1977.
- [03] FERREIRA, L.S.D. *Migração de Umidade Causada por Gradientes Térmicos entre Duas Fronteiras Impermeáveis Contendo um Meio Poroso Não Saturado*. Dissertação de Mestrado, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1987.
- [04] ASTM C168 - Definitions of Terms Relating to Thermal Insulating Material. *American Society for Testing and Material*. 1977.
- [05] ASTM SUBCOMMITTEE C16.30. "What Property Do We Measure?". *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulation*, ASTM STP 544, American Society for Testing and Materials, American Society for Testing and Materials, p.5-12, 1974.
- [06] PHILIPPI, P.C.; NICOLAU, V.P.; DA CUNHA NETO, J.A.B.; PERIN, M.G.; GÜTHS, S.; FERNANDES, C.P. *Procedimentos para a Determinação das Propriedades Térmica de Materiais e Elementos de Edificações*. Laboratório de Análise Térmica de Ambientes - SITERPA. Florianópolis, 1988.
- [07] CLARKE, L.N. & KINGSTON, R.S.T. Equipment for the Simultaneous Determination of Thermal Conductivity and Diffusivity of Insulating Materials Using a Variable-State Methods, *Australian Journal of Applied Science*. Volume 1, Melbourne, p.172-187, 1950.
- [08] PRATT, A.W. & BALL, J.M.E. Thermal Conductivity of Building Materials: Methods of Determination and Results. *J. Institution Heating and Ventilating Eng.*, p.201-226, 1956.
- [09] GUIMARÃES, G. *Estimação de Parâmetros no Domínio da Frequência para a Determinação Simultânea da Condutividade e Difusividade Térmica*. Tese de Doutorado, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- [10] GÜTHS, S. *Um Método Transiente para a Medição de Propriedades Térmicas*. Dissertação de Mestrado, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.

- [11] 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, Florianópolis, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.
- [12] BODE, K.-H. Thermal Conductivity Measurements With the Plate Apparatus: Influence of the Guard Ring Width on the Accuracy of Measurements. *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, American Society for Testing and Materials, p.29-48, 1985.
- [13] BSI BS874 - British Standard Methods for Determining Thermal Insulating Properties. Part 1. Introduction, definitions and principles of measurement, 1986. 14p.
- [14] ASTM C518 - Standard Test Method for Steady-State Heat-Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. *American Society for Testing and Materials*, p.151-163, 1985.
- [15] DYNATECH CO. Thermal Conductivity Measuring System for Pipe Insulations. *Dynatech R/D Company - Thermatest Department*. Cambridge, USA.
- [16] LEINDENFROST, W. Measurement of Thermophysical Properties. *Measurement in Heat Transfer*. MacGraw-Hill, p.485-522, 1976.
- [17] BSI BS874 - British Standard Methods for Determining Thermal Insulating Properties. Part 2, Section 2.1. Guarded Hot-Plate Method., 1986. 16p.
- [18] BRITISH CALIBRATION SERVICE. Supplementary Criteria for Laboratory Approval the Measurement of Thermal Conductivity by the Guarded and Plain Hot-Plate Methods. October 1980, 7p.
- [19] BRITISH CALIBRATION SERVICE. Uncertainties Associated With Imperfect Surfaces in Thermal Conductivity Measurements Using Standard Hot-Plate Equipment. October 1980, 8p.
- [20] ASTM C177 - Standard Test Method for Steady-State Heat-Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot Plate Apparatus. *American Society for Testing and Materials*, p.17-28, 1985.
- [21] ISO/DIS 8302 - Thermal Insulation - Determination of Steady-State Area Thermal Resistance and Related Properties - Guarded Hot Plate Apparatus. *International Organization for Standardization*. 1987.

- [22] HAHN, M.H.; ROBINSON, H.E.; FLYNN, D.R. Robinson Line-Heat-Source Guarded Hot Plate Apparatus. *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulation*, ASTM STP 544, American Society for Testing and Materials, p.167-192, 1974.
- [23] DE PONTE, F. & DI FILIPPO, P. Design Criteria for Guarded Hot Plate Apparatus. *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulation*, ASTM STP 544, American Society for Testing and Materials, p.97-117, 1974.
- [24] DYNATECH CO. R-Matic Instrument Measurements Thermal Resistance of Insulation Material at Full Thickness. *Dynatech R/D Company - Thermatest Department*. Cambridge, USA.
- [25] BANKVALL, C.G. Mechanisms of Heat Transfer in Permeable Insulation and Their Investigation in a Special Guarded Hot Plate. *Heat Transmission Measurements in Thermal Insulation*, ASTM STP 544, American Society for Testing and Materials, p.34-48, 1974.
- [26] BRITISH CALIBRATION SERVICE. Preparation of Thermal Conductivity Test Specimens from Masonry Materials. October 1980, 3p.
- [27] RENNEX, B. Summary of Error Analysis for the National Bureau of Standards 1016-mm Guarded Hot Plate and Considerations Regarding Systematic Error for the Heat Flow Meter Apparatus. *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, American Society for Testing and Materials, p.69-85, 1985.
- [28] EGUCHI, K. Error Analysis of Measuring Thermal Conductivity by Circular and One Side Heat Flow Type Guarded Hot Plate Apparatus. *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, American Society for Testing and Materials, p.49-68, 1985.
- [29] TROUSSART, L.R. Analysis of Errors in Guarded Hot Plate Measurements as Compiled by the Finite Element Method. *Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology*, ASTM STP 879, American Society for Testing and Materials, p.7-28, 1985.
- [30] PHILIPPI, P.C. Notas de Aula do Curso de Condução de Calor, *Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, UFSC, 1991.
- [31] CARSLAW, H.S. & JAEGER, J.G. *Conduction of Heat in Solids*. Clarendon, Oxford, Second Edition, 1959.
- [32] ÖZISIK, M.N. *Boundary Value Problems of Heat Conduction*. International Textbook Company, Pennsylvania, 1968.

- [33] SPARROW, E.M. Error Estimates in Temperature Measurements. *Measurement in Heat Transfer*. MacGraw-Hill, p.1-23, 1976.
- [34] DAWER, Manual de Operação, *Dawer do Brasil*, São Paulo.
- [35] LABORATÓRIO DE MEIOS POROSOS E PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE MATERIAIS. Desenvolvimento de um Protótipo para a Implantação de Métodos de Medição das Propriedades Térmicas de Materiais Utilizando o Princípio da Placa Quente Protegida. Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- [36] MICROQUÍMICA. Sistema para interfacear equipamentos analógicos MQ 12/8PC, Manual de Operação. *Microquímica Ind., Comércio e Representação Ltda*, Florianópolis.
- [37] MALVINO, A. *Microcomputadores e Microprocessadores*. McGraw-Hill, São Paulo. 1985.
- [38] HEWLETT PACKARD CO. The Fundamentals of Data Acquisition, *Hewlett Packard Co.*, USA, 1990.
- [39] MICROQUÍMICA. Sistema de Aquisição Múltipla MQSAM-48 PID, Manual de Operação. *Microquímica Ind., Comércio e Representação Ltda*, Florianópolis. 1993.
- [40] MOURA, L.M. & LAMBERTS, R. Manual Resumido para Utilização do HP 3852A em Conjunto com Técnicas de Programação. *Relatório Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais*, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.
- [41] ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION 470B. Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1981.
- [42] OMEGA ENGINEERING, INC., The Temperature Handbook. Omega Engineering, Inc. Stanford. 1991.
- [43] HEWLETT PACKARD CO. Application Note 290: Practical Temperature Measurements. *Hewlett Packard Co.* USA. Palo Alto, California, 1991.
- [44] HEWLETT PACKARD CO. HP 3852A Data Acquisition/Control Unit - Command Reference Manual. *Hewlett Packard Co.* USA. Volume 1 and 2, edition 2, 1987.

- [45] HEWLETT PACKARD CO. HP 3852A Data Acquisition/Control Unit - Plug-in Accessories - Configuration and Programming. *Hewlett Packard Co.* USA. Edition 1, 1986-1987.
- [46] HEWLETT PACKARD CO. HP 3852A Data Acquisition/Control Unit - Mainframe Configuration and Programming Manual. *Hewlett Packard Co.* USA. 1986.
- [47] HEWLETT PACKARD CO. HP 3852A Data Acquisition/Control Unit - Assembly Level Service Manual. *Hewlett Packard Co.* USA. 1988.
- [48] HEWLETT PACKARD CO. HP 3852A Data Acquisition/Control Unit - Getting Started Guide. *Hewlett Packard Co.* USA. Edition 1, 1987.
- [49] MOURA, L.M. Levantamento das Características de um Sistema de Medição de Temperatura com Termorresistores e Termistores. Trabalho de aula do curso de Sistema de Medição. *Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, UFSC, 1991.
- [50] TAYLOR, J.R. *An Introduction to Error Analysis. The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, University Science Books, 1982.
- [51] TAYLOR, J.L. *Fundamentals of Measurement Error*. NEFF Instrument Corporation. 1988.
- [52] BOABAID NETO, C. Calibração de Termorresistores Tipo PT-100, *Relatório Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais*, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.
- [53] MICROQUÍMICA. Banho Termostatizado Modelo MQBTZ99-20, Manual de Operação. *Microquímica Ind., Comércio e Representação Ltda*, Florianópolis. 1993.
- [54] MOURA, L.M. Calibração dos Sensores de Temperatura - Termopares Tipo T. *Relatório Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais*, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- [55] BENTLEY, J. *Principles of Measurement Systems*, Construction Press, 1983.
- [56] BOYLESTAD & NASHELSKY. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. Prentice Hall do Brasil, 1984.
- [57] DOEBELIN. *Measurement Systems - Application and Design*. McGraw-Hill, 1990.
- [58] FLESC, C.A. Apostila da disciplina Medição de Grandezas do Curso de Graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 1990.

- [59] MOURA, L.M. & PHILIPPI, P.C. Programa para Ajuste Polinomial de Curvas pelo Método dos Mínimos Quadrados - Programa Regressa. *Relatório Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais*, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.
- [60] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of Calibration. *Thermal Conductivity of a Pair of Nylon Specimens*. Reference 1231/90/023. England, 1991.
- [61] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of Calibration. *Thermal Conductivity of a Pair of Polythene Specimens*. Reference 1231/90/021. England, 1991.
- [62] NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of Calibration. *Thermal Conductivity of a Pair of Perplex Specimens*. Reference 1231/90/024. England, 1991.
- [63] MOURA, L.M.; LAMBERTS, R.; PHILIPPI, P.C.; SOUZA, R.V.C. Protótipo Nacional de Um Equipamento para Medição de Condutividade Térmica de Materiais de Construção. *II Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, Florianópolis, p. 139-143, 1993.
- [64] MOURA, L.M.; LAMBERTS, R.; PHILIPPI, P.C.; SOUZA, R.V.C. Medição de Condutividade Térmica de Materiais de Construção usando o Método da Placa Quente Protegida. *XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM*. Brasília, a ser editado, 1993.
- [65] MOURA, L.M.; GÜTHS, S.; NICOLAU, V.P. Medição de Condutividade Térmica de Materiais Sólidos: Métodos Transientes - Sonda Plana. *Relatório Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais*, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1989.
- [66] MOURA, L.M. & LAMBERTS, R. Protótipo de um Equipamento para a Determinação de Propriedades Térmicas - Método Placa Quente Protegida. Relatório parcial. *Relatório Interno do Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais*, Depto de Eng. Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.

ANEXOS

I - Determinação da planicidade das placas

I.1 - Planicidade da placa quente

PLANEZA

0.0234

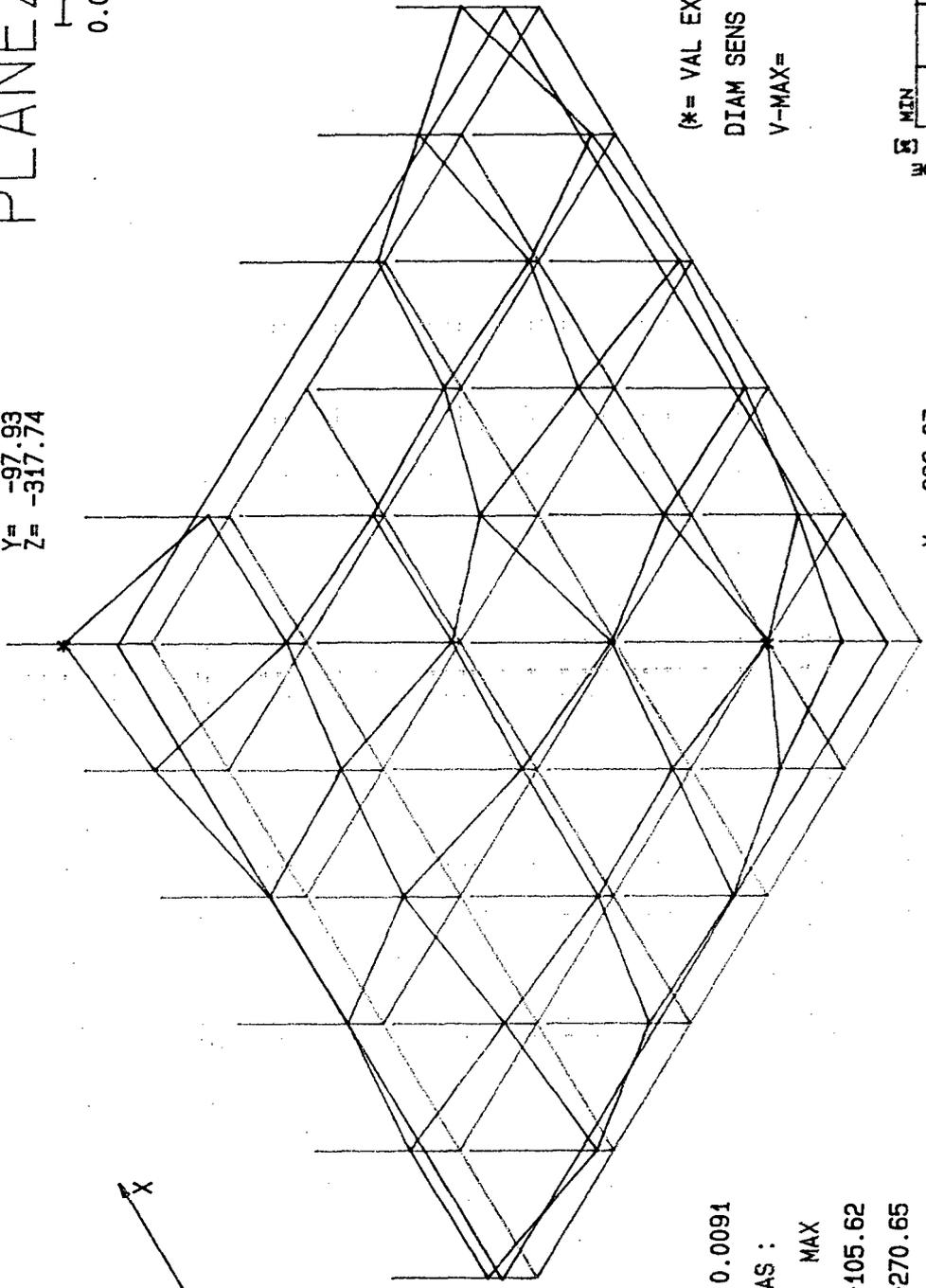
X= -16.09
Y= -97.93
Z= -317.74

X= -16.09
Y= -374.85
Z= -317.96

(* = VAL EXTREMO)
DIAM SENS D= 8.00
V-MAX= 0.00

DIAGRAMA DE FREQUENCIA

MIN	MAX
4	3
34	10
39	16
	18
	9

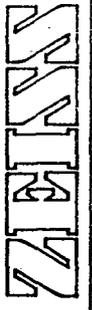


X= -293.27
Y= -97.93
Z= -317.86

X= -293.27
Y= -374.85
Z= -318.07

DISPERSAO= 0.0091
COORD EXTREMAS :
MIN MAX
X -66.11 -105.62
Y -149.72 -270.65
Z -317.82 -317.89

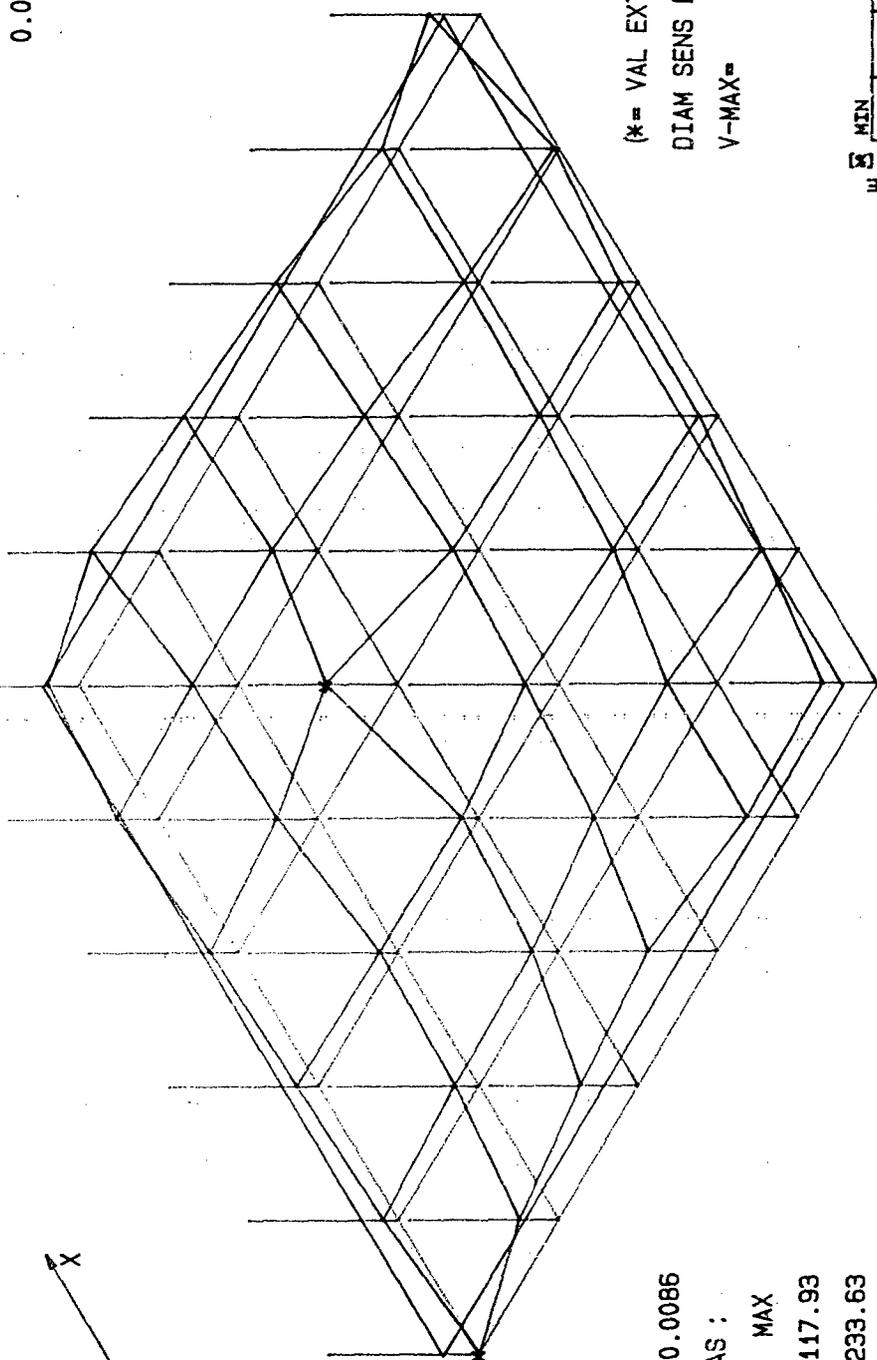
t= 0.0460	E:	END: 11	DEN:	N= 73	AMPLIACAO = 427	UFFE = 0.0460
VERIFICACAO DE FORMA E POSICAO ISO 1101						
OPERAD.: AH						
PECA No: NOME-P: BLOCO PADRAO 100 mm Y DESEN.: DATA : 21.08.1991						



PLANEZA

0.0234

X= -13.47
Y= -105.94
Z= -317.65



X= -291.37
Y= -105.94
Z= -317.78

X= -13.47
Y= -381.43
Z= -318.05

DISPERSAO= 0.0086

COORD EXTREMAS :

	MIN	MAX
X	-270.84	-117.93
Y	-106.02	-233.63
Z	-317.79	-317.81

(* = VAL EXTREMO)
DIAM SENS D= 8.00
V-MAX= 10.00

DIAGRAMA DE FREQUENCIA

MIN	MAX
57	1
41	0
	0
	1

t= 0.0876 E: 13 END: 13 DEN: N= 175 AMPLIACAO = 427

VERIFICACAO DE FORMA E POSICAO ISO 1101 OPERAD.: AH



PECA No: NOME-P: BLOCO PADRAO 100 mm Y DESEN.: DATA : 21.08.1991

I - Determinação da planicidade das placas

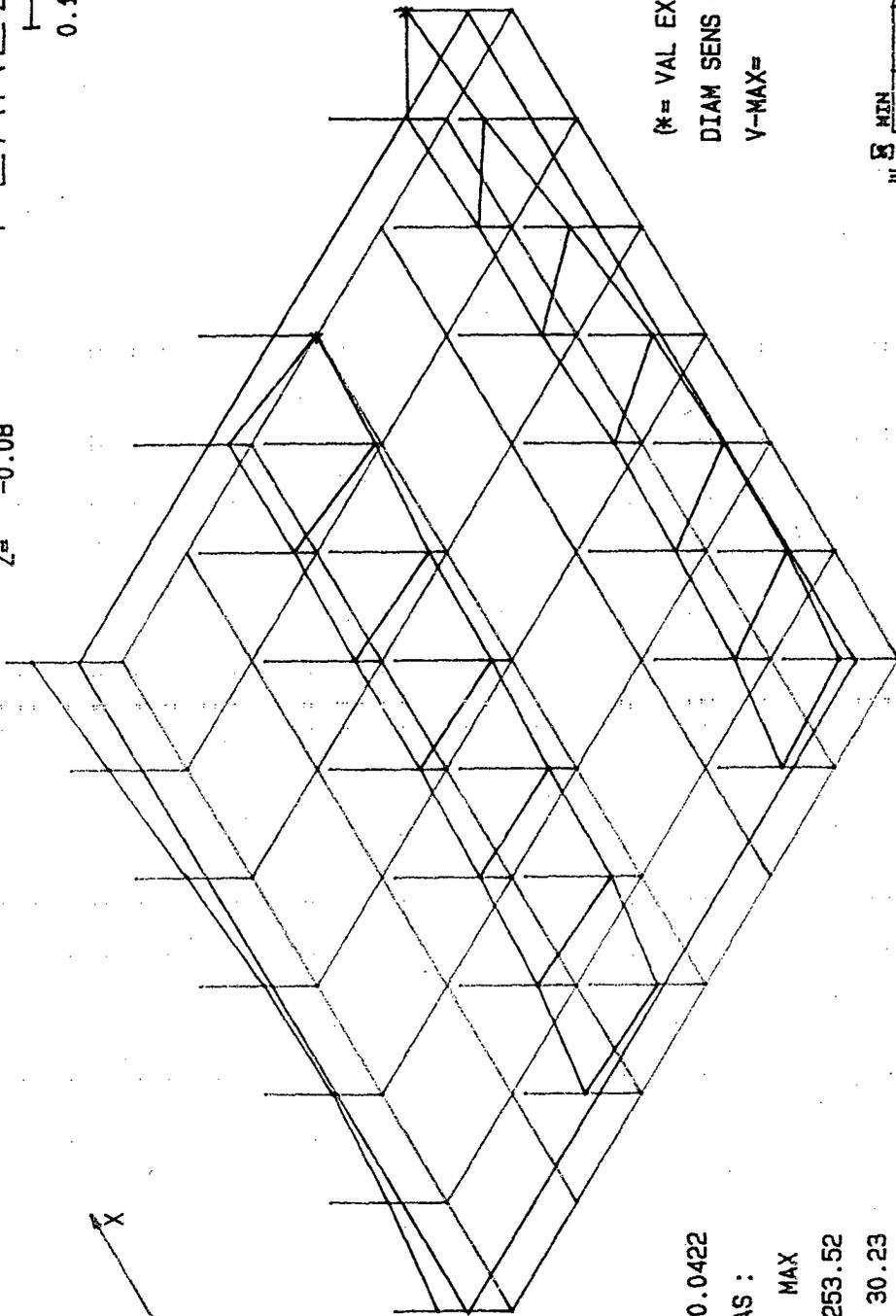
I.2 - Planicidade da placa fria

01-1

X= 290.82
Y= 285.16
Z= -0.08

PLANEZA

0.1333



X= 11.64
Y= 285.16
Z= 0.06

X= 290.82
Y= 29.34
Z= -0.14

DISPERSAO= 0.0422

COORD EXTREMAS :

	MIN	MAX
X	282.01	253.52
Y	149.38	30.23
Z	-0.19	0.01

(K= VAL EXTREMO)
DIAM SENS D= 8.00
V-MAX= 8.00

DIAGRAMA DE FREQUENCIA		MIN	MAX
B	42	26	14
		7	9

t= 0.2140 E:

END: 21 DEN: N= 140 AMPLIACAO = 75

VERIFICACAO DE FORMA E POSICAO ISO 1101

OPERAD.: EGV

PECA No: NOME-P: PAGUIMETRO DESEN.:

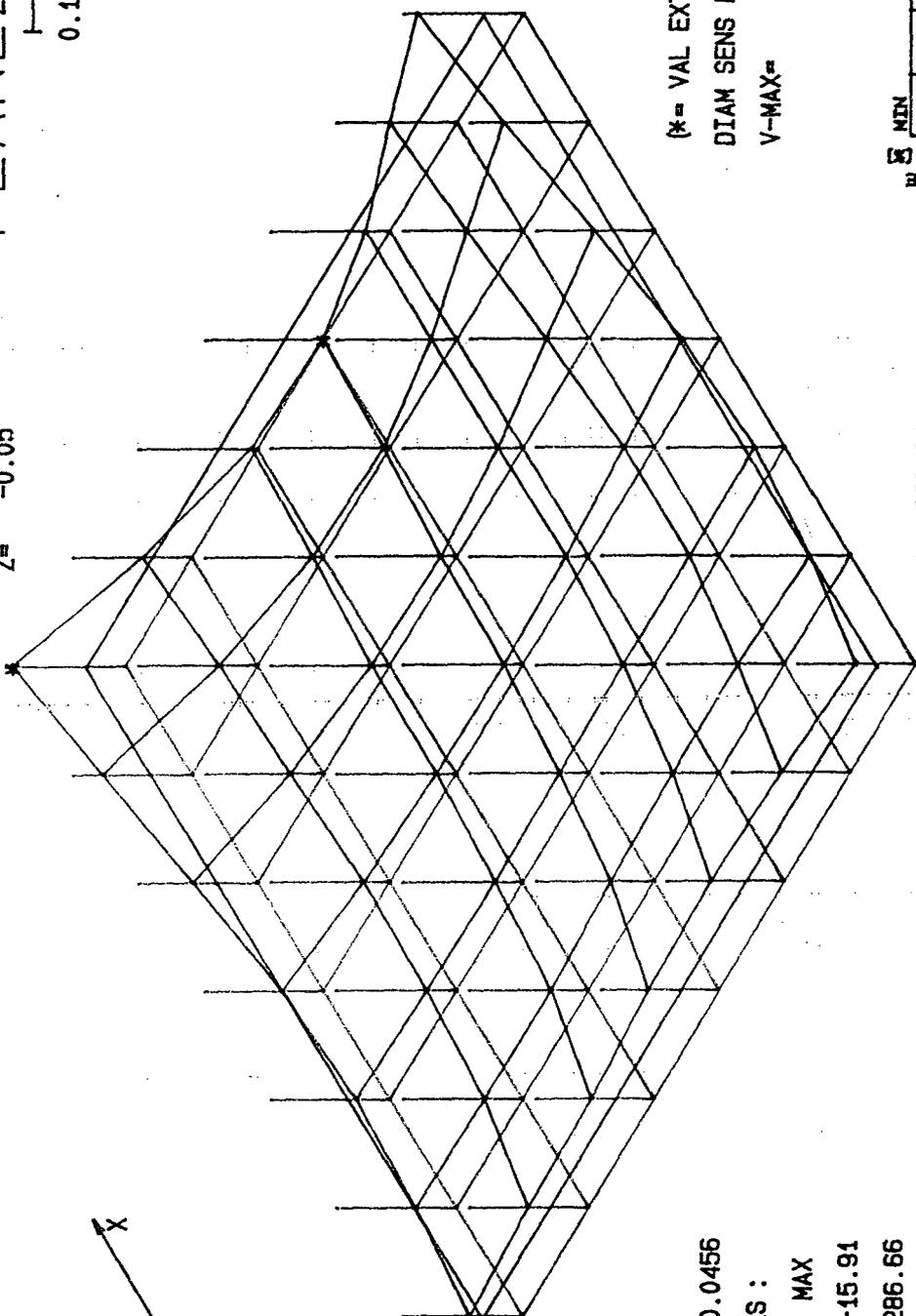
U= 0.2140

DATA : 03.09.1991

PLANEZA

X= -15.91
Y= 286.66
Z= -0.05

0.1471



X= -289.88
Y= 286.66
Z= 0.09

DISPERSAO= 0.0456
COORD EXTREMAS :
MIN MAX
X -25.90 -15.91
Y 147.84 286.66
Z -0.16 0.11

(X= VAL EXTREMO)
DIAM SENS D= 8.00
V-MAX= 8.00

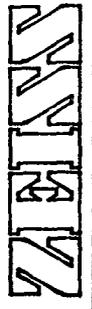
X= -15.91
Y= 24.41
Z= -0.12

X= -289.88
Y= 24.41
Z= 0.01

DIAGRAMA DE FREQUENCIA

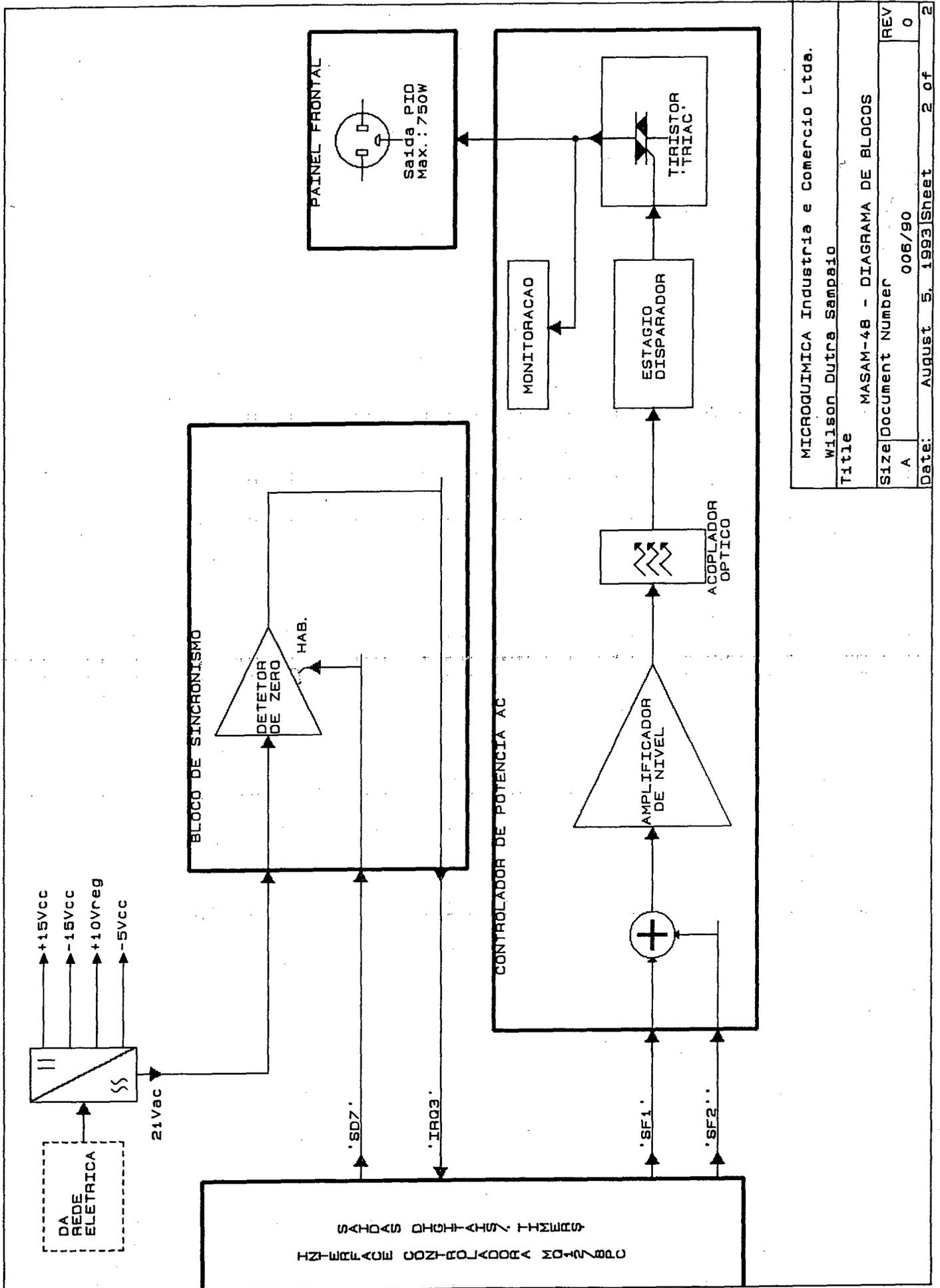
MIN	MAX
13	4
46	11
22	4

t= 0.2351	E	END: 11	DEN:	N= 189	AMPLIACAO = 68	USFE = 0.2351
VERIFICACAO DE FORMA E POSICAO ISO 1101						
PECA No:			NOME-P: PAGUIMETRO		DESEN: :	
					OPERAD.: EGV	
					DATA : 03.09.1991	



II - Esquemas Eléctricos

II.1 - Esquema Eléctrico da placa de aquisição MQSAM-48 PID



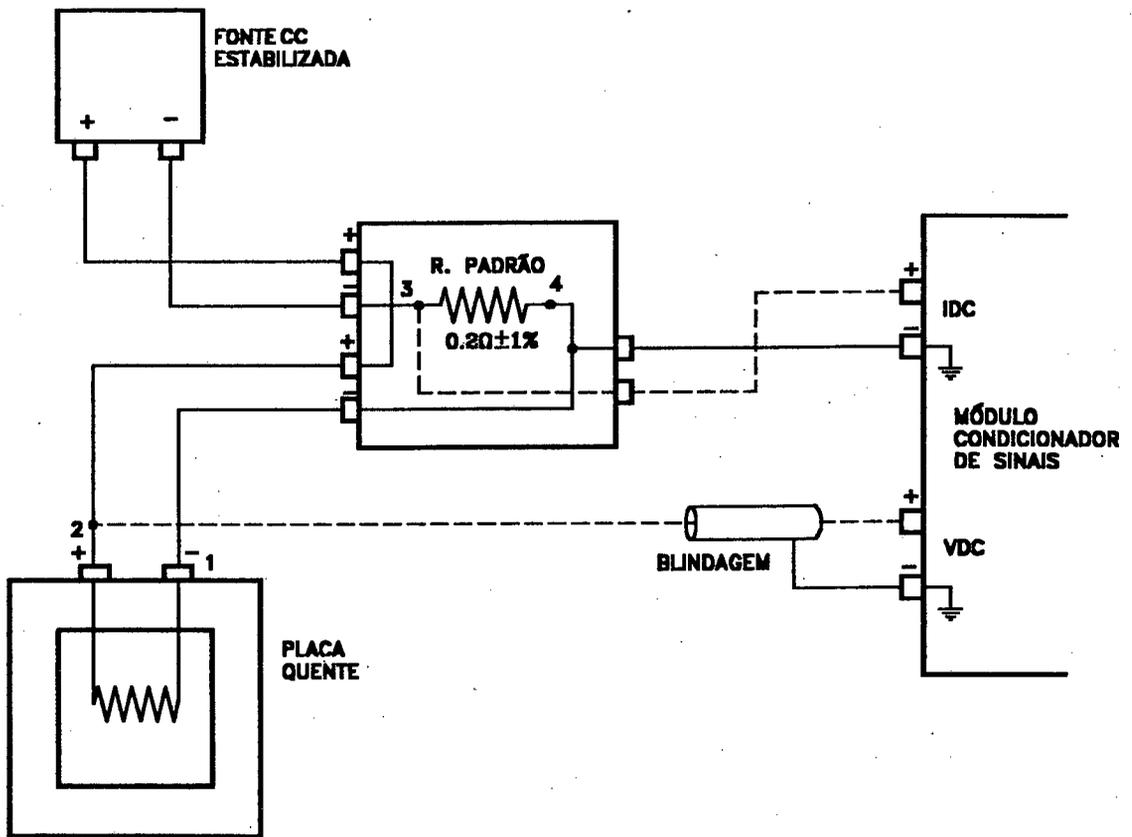
MICROQUIMICA Industria e Comercio Ltda.
Wilson Dutra Sampaio

Title MASAM-48 - DIAGRAMA DE BLOCOS

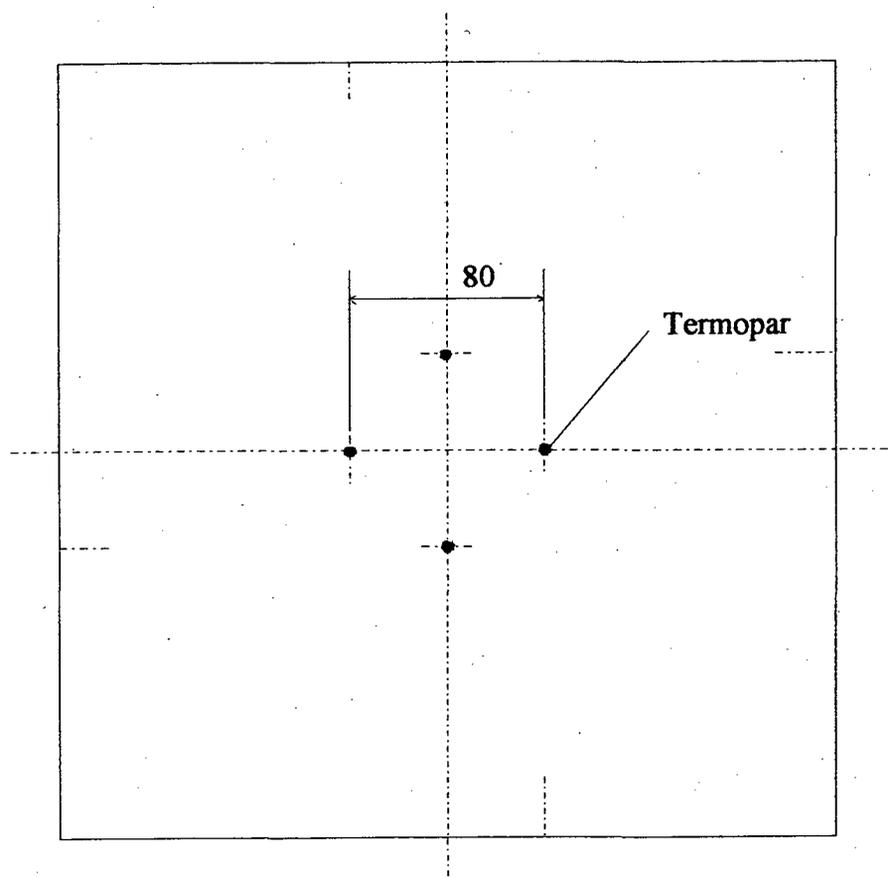
Size	Document Number	REV
A	006/90	0

II - Esquemas Elétricos

II.2 - Esquema Elétrico da medição de corrente e tensão do módulo MQSAM-48 PID



III - Posicionamento dos termopares na superfície das amostras



IV - Calibrações do sistema de aquisição MQSAM-48 PID

IV.1 - Coeficientes Angulares para a determinação da função transferência para os sinais de termopares

Canal	Coeficiente Angular [$\mu\text{V}/\mu\text{V}$]	IM [$\mu\text{V}/\mu\text{V}$]
#01	1.0818	± 0.006
#02	1.0800	± 0.004
#08	1.0773	± 0.004
#09	1.0798	± 0.004
#16	1.0779	± 0.004
#17	1.0798	± 0.004
#24	1.0781	± 0.004
#25	1.0781	± 0.003
#33	1.0783	± 0.004

Coeficiente angular médio = 1.079

Desvio Padrão (σ_{MQSAM}) = 0.0014

IM = Desvio máximo dos pontos em relação a curva determinada para cada canal

Anexo IV.2

Coeficientes Lineares para a determinação da função transferência
para os sinais de termopares

Canal	a_0	σ_4	σ_{10}	IMMQSAM
#1	6.08	1.37	1.0	1.8
#2	1.20	1.23	1.4	1.9
#3	-2.09	1.29	1.5	2.0
#4	2.43	0.87	2.2	2.1
#5	-5.25	0.62	1.8	1.7
#6	0.38	0.96	1.6	1.8
#7	-4.57	0.95	1.4	1.6
#8	-1.95	0.68	1.0	1.2
#9	-6.10	1.10	1.6	1.9
#10	-8.60	1.48	1.3	2.1
#11	-11.33	1.75	0.9	2.2
#12	-7.03	1.32	1.6	2.1
#13	-10.25	0.62	1.2	1.2
#14	-5.87	0.39	1.2	1.1
#15	-10.05	0.74	1.1	1.3
#16	-8.03	0.74	1.0	1.2
#17	-2.92	1.44	1.8	2.3
#18	-9.31	1.07	1.5	1.8
#19	-6.71	0.89	1.3	1.5
#20	-6.39	1.12	1.2	1.7

Canal	a_0	σ_4	σ_{10}	IMMQSAM
#21	-9.74	1.54	0.8	1.9
#22	-6.38	0.93	1.0	1.4
#23	-8.79	0.87	1.2	1.4
#24	-6.78	0.75	1.1	1.3
#25	0.03	1.51	1.5	2.2
#26	-1.63	1.18	1.6	1.9
#27	-3.79	1.34	1.5	2.0
#28	-0.27	1.19	1.2	1.7
#29	-4.76	1.10	1.5	1.8
#30	0.30	1.11	1.3	1.7
#31	-3.54	1.13	1.1	1.6
#32	-0.40	0.88	1.0	1.3
#33	4.29	0.87	1.4	1.6
#34	2.44	1.45	1.4	2.1
#35	2.09	1.75	1.6	2.5
#36	1.34	2.79	1.6	3.6
#37	0.59	1.34	1.2	1.9
#38	3.35	1.89	1.8	2.7
#39	2.05	2.05	1.3	2.7
#40	1.30	1.55	1.8	2.4

σ_4 = Desvio padrão da média de quatro medições;

σ_{10} = Desvio padrão máximo das medições pelo sistema MQSAM-48 PID
(10 leituras);

IMMQSAM = Média quadrática das incertezas calculada utilizando σ_4 e σ_{10} ;

$$IM_{MQSAM} = \sqrt{\left(\frac{t_4 \sigma_4}{\sqrt{4}}\right)^2 + \left(\frac{t_{10} \sigma_{10}}{\sqrt{10}}\right)^2}$$

**V - Certificados de calibração emitidos pelo NPL das amostras de
Perspex, Nylon e Polythene**

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

for Director

CHECKED *D. Salmon*

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.

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 BS874: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 θ 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

PAGE 2 OF 3

CHECKED

Drs.

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 *Des.*

PAGE 3 OF 3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Teddington Middlesex TW11 0LW England

Certificate of Calibration



THERMAL CONDUCTIVITY OF A PAIR
NYLON SPECIMENS

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

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

IDENTIFICATION : Order No. OPB-5211
Specimens labelled QM/100A and B

OBJECTIVE : To provide a transfer standard with certified
thermal conductivity values over the temperature
range 0 °C to 40 °C.

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

REFERENCE 12321/90/023

PAGE 1 OF 3

DATE 21 January 1991

SIGNED

Shilliam
for Director

CHECKED *D. Salmon*

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.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Continuation of Certificate

MEASUREMENTS

An order was received for a pair of nylon specimens measuring approximately 305 x 305 x 50 mm having certified thermal conductivity values over the temperature range 0 °C to 40 °C. Suitable specimens from our stock of material were selected and heat treated at 80 °C for 12 days before their main surfaces were machined flat to better than 0.2 mm. Their thermal conductivity was measured at six 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 fine wire thermocouples with thermo-junctions rolled flat to 0.1 mm thick. These were taped to the specimen 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)
2.68	0.3438
12.22	0.3426
18.18	0.3422
22.53	0.3418
26.70	0.3413
36.23	0.3404

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

$$\lambda = (0.3440 - 9.93 \cdot 10^{-5} \theta) \text{ W/m.K}$$

where θ is the temperature in degrees Celsius.

This expression can be used to evaluate the thermal conductivity at any temperature between 0 °C and 40 °C within the uncertainty specified below.

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)
0	0.344
5	0.344
10	0.343
15	0.342
20	0.342
25	0.342
30	0.341
35	0.340
40	0.340

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 +55 °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 12321/90/023

CHECKED

Des

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

A handwritten signature in cursive script, appearing to read 'M. Williams', written over a horizontal line.

for Director

CHECKED *D. Salma*

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.

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 θ 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.

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.

REFERENCE 12321/90/021
CHECKED *D.A.*

PAGE 3 OF 3