

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise Experimental da Condutividade Térmica de  
Metais e efeitos da Resistência Térmica de Contato**

Por  
Hilário José Gava Ramires  
Victor Soares Pessoa

PROJETO DE GRADUAÇÃO  
Dezembro de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise Experimental da Condutividade Térmica de  
Metais e efeitos da Resistência Térmica de Contato**

Por  
Hilário José Gava Ramires  
Victor Soares Pessoa

ORIENTADOR: Prof. Rogério Ramos  
EXAMINADOR: Prof. João Luiz Marcon Donatelli  
EXAMINADOR: Prof. Rogério Silveira de Queiroz

PROJETO DE GRADUAÇÃO  
Vitória, Dezembro de 2005

# DEDICATÓRIA

Dedicamos esse trabalho aos nossos pais, amigos e professores que, com certeza, contribuíram de forma grandiosa na nossa caminhada no decorrer do curso.

# AGRADECIMENTOS

No decorrer do projeto enfrentamos várias dificuldades e obstáculos que, graças ao nosso empenho, e a ajuda de vários amigos conseguimos transpor.

Agradecemos aos nossos pais, pelo apoio e ajuda durante o projeto.

Ao Prof. Rogério Ramos, que acreditou que seríamos capazes de concluir o trabalho da maneira esperada e planejada, nos dando total apoio e dedicação do seu tempo.

A empresa SEISA Serviços Industriais LTDA pela confecção de alguns corpos de prova utilizados em nossos experimentos.

Ao Paulo Cezar Ferro da Rosa, técnico do laboratório de metrologia da UFES, pelo apoio que nos deu quando precisávamos fazer algum ensaio, mesmo estando atarefado.

“Faça as coisas o mais simples que você puder, porém não se restrinja  
às mais simples”.

Albert Einstein

## RESUMO

O conhecimento preciso das propriedades termofísicas da matéria propicia a elaboração de projetos de equipamentos e processos de forma correta e otimizada. No caso específico da condutividade térmica de materiais sólidos, seu conhecimento conduz à otimização de equipamentos e processos no que se refere às questões energéticas, tais como avaliação das perdas de calor, projeto de isolamento térmico, avaliação de perfis de temperaturas, remoção de calor por condução, etc.

Com a medição da condutividade térmica dos metais utilizando o equipamento Cussons P-5687 disponível no Laboratório de Geração de Potência da UFES pode-se constatar que o equipamento é capaz realizar tal medição com boa precisão. A afirmação não é válida quando se analisa a condutividade de materiais de baixo coeficiente de condutividade térmica.

Para as realizações das medições os corpos de prova foram inseridos no equipamento e o fluxo de calor gerado na parte superior do equipamento atravessava o corpo de prova e era medido através de um calorímetro na base.

O cálculo da resistência térmica de contato mostrou a importância do uso da pasta térmica quando se quer aumentar a condutividade entre as interfaces dos materiais. O acabamento superficial das interfaces também varia significativamente o valor dessa resistência.

Por fim, com a caracterização dos resultados obtidos, pode-se sugerir vários trabalhos futuros, que vão desde a melhoria do equipamento de medição de condutividade térmica a fim de reduzir suas incertezas a um levantamento com maior precisão da resistência térmica de contato variando-se os fatores de influência direta no resultado.

# SUMÁRIO

<b>1) INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO</b> .....	13
2.1) Dados do Equipamento: .....	13
2.1.1) Dimensões: .....	13
2.1.2) Dados dos corpos de prova originais do equipamento: .....	13
2.1.3) Forma de medir Temperatura: .....	13
2.2) Descrição do Equipamento: .....	13
<b>3) DESCRIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	16
3.1) Materiais Utilizados .....	16
3.2) Descrição dos Corpos de Prova.....	16
3.3) Medição da Rugosidade dos Corpos de Prova .....	20
<b>4) AFERIÇÃO DOS TERMOPARES</b> .....	22
4.1) Metodologia .....	22
<b>5) CÁLCULO DA PRESSÃO DO EQUIPAMENTO SOBRE O CORPO DE PROVA</b> ..	23
5.1) Introdução .....	23
5.2) Etapa de Preparação e Medição .....	23
5.3) Estimativa da Constante Elástica da Mola .....	23
5.4) Procedimentos para o cálculo da Pressão de Contato .....	26
<b>6) VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO COM O CORPO DE PROVA DO FABRICANTE</b> .....	28
6.1) Objetivo .....	28
6.2) Etapas de Preparação.....	28
6.3) Etapas de Medição .....	29
6.4) Dados Coletados para o Experimento do Fabricante .....	29
6.4.1) Cálculo da taxa de calor transferida (Q), em J/s .....	30
6.4.2) Cálculo do coeficiente de condutividade térmica (K).....	31
6.4.3) Cálculo da Resistência Térmica de Contato.....	31
6.5) Análise dos resultados.....	31
<b>7) LEVANTAMENTO DOS DADOS</b> .....	32
7.1) Descrição dos experimentos.....	32
7.2) Experimentos.....	33
7.2.1) Experimentos I.1: Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova longo de Cobre. ....	33
7.2.1.1) Dados Coletados.....	34
7.2.2) Experimentos I.23C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica de Corpos de Prova de Cobre curtos e lisos com pasta térmica.35	
7.2.2.1) Dados Coletados.....	35
7.2.3) Experimentos I.23S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Cobre curto e liso sem pasta térmica. ....	37
7.2.3.1) Dados Coletados.....	37
7.2.4) Experimentos I.45C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Cobre curto e rugoso com pasta térmica. ....	38
7.2.4.1) Dados Coletados.....	38

7.2.5) Experimentos I.45S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Cobre curto e rugoso sem pasta térmica. ....	39
7.2.5.1) Dados Coletados.....	39
7.2.6) Experimentos II.1: Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Aço 1020.....	40
7.2.6.1) Dados Coletados.....	40
7.2.7) Experimentos II 23C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Aço 1020 curto e liso com pasta térmica. ....	41
7.2.7.1) Dados Coletados.....	41
7.2.8) Experimentos II 23S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Aço 1020 curto e liso sem pasta térmica. ....	43
7.2.8.1) Dados Coletados.....	43
7.2.9) Experimentos II 45C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o corpo de Prova de Aço 1020 curto e rugoso com pasta térmica. ....	44
7.2.9.1) Dados Coletados.....	44
7.2.10) Experimentos II 45S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o corpo de Prova de Aço 1020 curto e rugoso sem pasta térmica. ....	45
7.2.10.1) Dados Coletados.....	45
7.2.11) Experimentos III.1: do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Teflon®. ....	46
7.2.11.1) Dados Coletados.....	46
<b>8) ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	47
<b>9) TRABALHOS FUTUROS</b> .....	52
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	54
ANEXO I (Análise Química da Amostra).....	55
ANEXO II (Análise de Incertezas).....	58



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Esquema do equipamento Cussons P-5687.....	14
Figura 2 – Esquema de montagem.....	15
Figura 3 – Esquema dos Corpos de Prova Longos.....	17
Figura 4 – Esquema dos Corpos de Prova Curtos.....	17
Figura 5 – Fotos dos Corpos de Prova.....	18
Figura 6 – Fotos da Interface dos Corpos de Prova.....	20
Figura 7 – Esquema de Medição da constante elástica da mola.....	24
Figura 8 – Variação da força exercida sobre a mola e sua deformação .....	26
Figura 9 – Gráfico comparativo do experimento Manual X Realizado.....	30
Figura 10 – Cálculos do experimento de verificação Cobre e Aço Inox.....	30
Figura 11 – Cálculos do experimento I.1.....	34
Figura 12 – Cálculos da repetição do experimento I.1.....	35
Figura 13 – Cálculos do experimento I.23C.....	36
Figura 14 – Cálculos da repetição do experimento I.23C.....	36
Figura 15 – Cálculos do experimento I.23S.....	37
Figura 16 – Cálculos do experimento I.45C.....	38
Figura 17 – Cálculos do experimento I.45S.....	40
Figura 18 – Cálculos do experimento II.1.....	41
Figura 19 – Cálculos do experimento II.23C.....	42
Figura 20 – Cálculos da repetição do experimento II.23C.....	42
Figura 21 – Cálculos do experimento II.23S.....	43
Figura 22 – Cálculos do experimento II.45C.....	44
Figura 23 – Cálculos do experimento II.45S.....	45
Figura 24 – Cálculos do experimento III.1.....	46
Figura 25 – Gráfico Comparativo Gradientes de Temperatura do Cobre .....	48
Figura 26 – Gráfico Comparativo Gradientes de Temperatura do Aço.....	48
Figura 27 – Gráfico Comparativo Resistências de Contato.....	49
Figura 28 – Gráfico Comparativo Condutividade Térmica Referencia x Encontrado-Cobre..	50
Figura 29 – Gráfico Comparativo Condutividade Térmica Referencia x Encontrado-Aço....	50
Figura 30 – Gráfico Comparativo Condutividade Térmica Referencia x Encontrado-Teflon®.....	51

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de Condutividade Térmica para varias temperaturas.....	19
Tabela 2 – Valores de Condutividade térmica de referencia.....	19
Tabela 3 – Medições das Rugosidades.....	21
Tabela 4 – Cargas e deformações da mola.....	25
Tabela 5 – Cálculo da constante elástica média da mola.....	25
Tabela 6 – Cálculo da força do equipamento.....	27
Tabela 7 – Cálculo da pressão na interface de contato.....	27
Tabela 8 – Dados do experimento Cobre e aço Inox .....	29
Tabela 9 – Síntese dos códigos dos experimentos e respectivos corpos de prova.....	32
Tabela 10 – Código dos experimentos realizados.....	33
Tabela 11 – Dados do experimento I.1.....	34
Tabela 12 – Dados da repetição do experimento I.1 .....	34
Tabela 13 – Dados do experimento I.23C.....	35
Tabela 14 – Dados da repetição do experimento I.23C.....	36
Tabela 15 – Dados do experimento I.23S.....	37
Tabela 16 – Dados do experimento I.45C.....	38
Tabela 17 – Dados do experimento I.45S.....	39
Tabela 18 – Dados do experimento II.1.....	40
Tabela 19 – Dados do experimento II.23C .....	41
Tabela 20 – Dados da repetição do experimento II.23C.....	42
Tabela 21 – Dados do experimento II.23S.....	43
Tabela 22 – Dados do experimento II.45C.....	44
Tabela 23 – Dados do experimento II.45S.....	45
Tabela 24 – Dados do experimento III.1.....	46
Tabela 25 – Comparativo Q do cobre eletrolítico.....	49
Tabela 26 – Comparativo Q do Aço ABNT 1020.....	49

## 1) INTRODUÇÃO

O fluxo de calor por condução ocorre devido a colisões entre átomos e moléculas de uma substância e a subsequente transferência de energia cinética. Os átomos "quentes" colidem com os átomos "frios". Em tais colisões os átomos rápidos perdem alguma velocidade e os mais lentos ganham velocidade. Logo, os mais rápidos transferem alguma de sua energia para os mais lentos. Esta transferência de energia do lado quente para o lado frio é chamada de fluxo de calor por condução. Materiais diferentes transferem calor por condução com diferentes velocidades. Esta é uma medida da **condutividade térmica** [8].

Os materiais com condutividade térmica maior irão transferir maiores quantidades de calor por unidade de tempo - tais materiais, como cobre, são bons condutores térmicos. Ao contrário, materiais com pequenas condutividades térmicas irão transferir pequenas quantidades de calor por unidade de tempo - estes materiais, como o Teflon®, são condutores térmicos pobres [8].

Quando há ocorrência de sistemas compostos, ou seja, dois ou mais materiais em contato entre si, observa-se uma variação no coeficiente de condutividade térmica quando o mesmo é medido entre dois pontos separados pela interface de contato. Essa diferença deve-se a **resistência térmica de contato**. Essa resistência de contato se deve principalmente aos efeitos da rugosidade da superfície. Tal rugosidade diminui a área de contato real entre as interfaces, sendo os espaços formados preenchidos com ar atmosférico. Desse modo, a transferência de calor dar-se-á através da condução pela área de contato real e pela radiação e/ou condução através dos espaços. Como os interstícios estão preenchidos com ar, e o ar é um condutor térmico pobre, a condutividade térmica medida entre pontos separados por essa interface será menor devido a considerável queda de temperatura [8].

Essa resistência térmica de contato pode ser diminuída através do aumento da pressão entre as superfícies, redução da rugosidade ou através da inserção de um fluido interfacial de condutividade térmica elevada.

Neste trabalho foram calculados os coeficientes de condutividade térmica do Cobre Eletrolítico, do Aço ABNT 1020 e do Teflon®, utilizando o aparelho Cussons P-5687 do

Laboratório de Geração de Potência da Universidade Federal do Espírito Santo. O cálculo de tais coeficientes tem como objetivo a verificação da performance do aparelho na medição da condutividade térmica de metais e de materiais de baixa condutividade térmica.

Também foi calculado, através da realização dos experimentos, o valor da resistência térmica de contato dos metais, variando-se a rugosidade e na presença ou ausência do fluido interfacial.

## 2) DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

### 2.1) Dados do Equipamento:

Modelo: P5687 Thermal Conductivity Apparatus

Fabricante: Cussons Technology Ltd.

#### 2.1.1) Dimensões:

Altura: 750 mm

Largura: 500 mm

Profundidade: 250 mm

Massa: 26 kg

Fonte de Energia Requerida: 240V, 50/60 Hz, 1 fase, 2 Amperes.

#### 2.1.2) Dados dos corpos de prova originais do equipamento:

Tipos: Cobre, Alumínio, Aço 1020 , Aço Inoxidável.

Área Seção Transversal:  $4,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Comprimento (Cobre e Alumínio): 64 mm

Comprimento (Aço Inoxidável e Aço 1020): 38 mm

#### 2.1.3) Forma de medir Temperatura:

Mercúrio em vidro:  $5^\circ - 50^\circ \text{ C} \times 0,2^\circ \text{ C}$

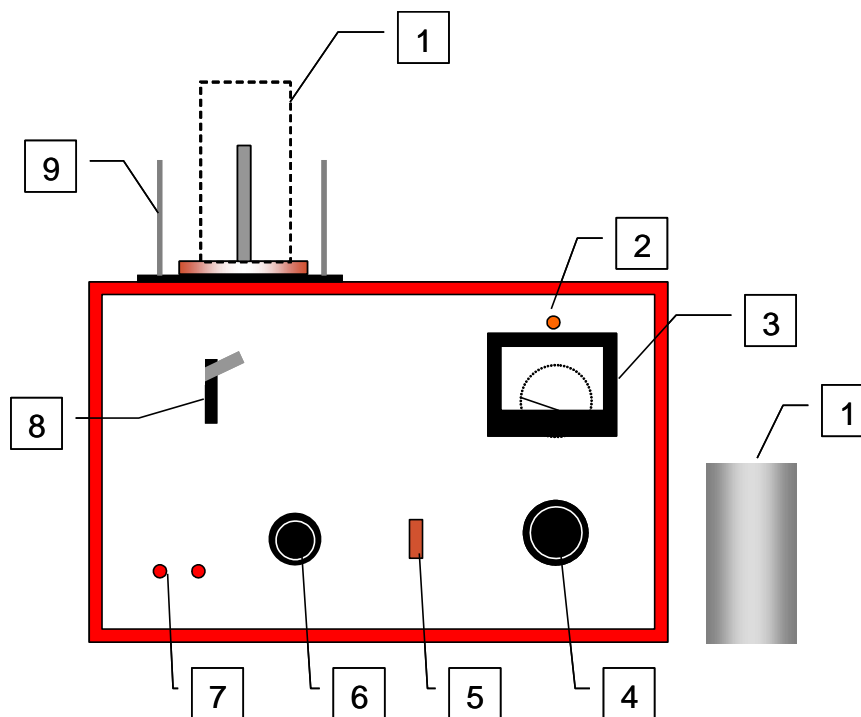
Termopares: NiCr / NiAl (Cromel/Alumel - tipo K)

### 2.2) Descrição do Equipamento:

Este equipamento foi desenvolvido com o objetivo de se determinar o coeficiente de condutividade térmica de materiais sólidos de elevada condutividade térmica. Conforme a figura 1, o equipamento consiste de um sistema de travamento do corpo de prova, uma fonte elétrica de geração de calor (resistência), um calorímetro à base de água, uma tampa a fim de se reduzir as perdas de calor para o ambiente e fornecimento constante de água. Uma chave seletora para termopares se encontra no painel frontal do equipamento e existem dois termômetros de mercúrio para a leitura das temperaturas de entrada e saída da água. Quatro

termopares estão montados no equipamento, e existe uma saída para ligação de um milivôlmetro a fim de que se possa fazer a leitura precisa das temperaturas.

São fornecidos junto com o equipamento quatro corpos de prova de metal: Dois corpos de prova longos (Cobre e Alumínio) e dois curtos (Aço Inoxidável e Aço 1020). As faces de todos os corpos de prova são polidas. Existem dois orifícios em cada corpo de prova para a inserção dos termopares.



- 1) Tampa de Isolamento
- 2) Alarme de queda de tensão
- 3) Amperímetro
- 4) Seletora de Corrente
- 5) Chave Lig. / Desl.
- 6) Seletora de termopar
- 7) Saídas para Multímetro
- 8) Chave para Travamento do Corpo de Prova
- 9) Termômetro de Mercúrio

Figura 1 – Esquema do equipamento Cussons P-5687

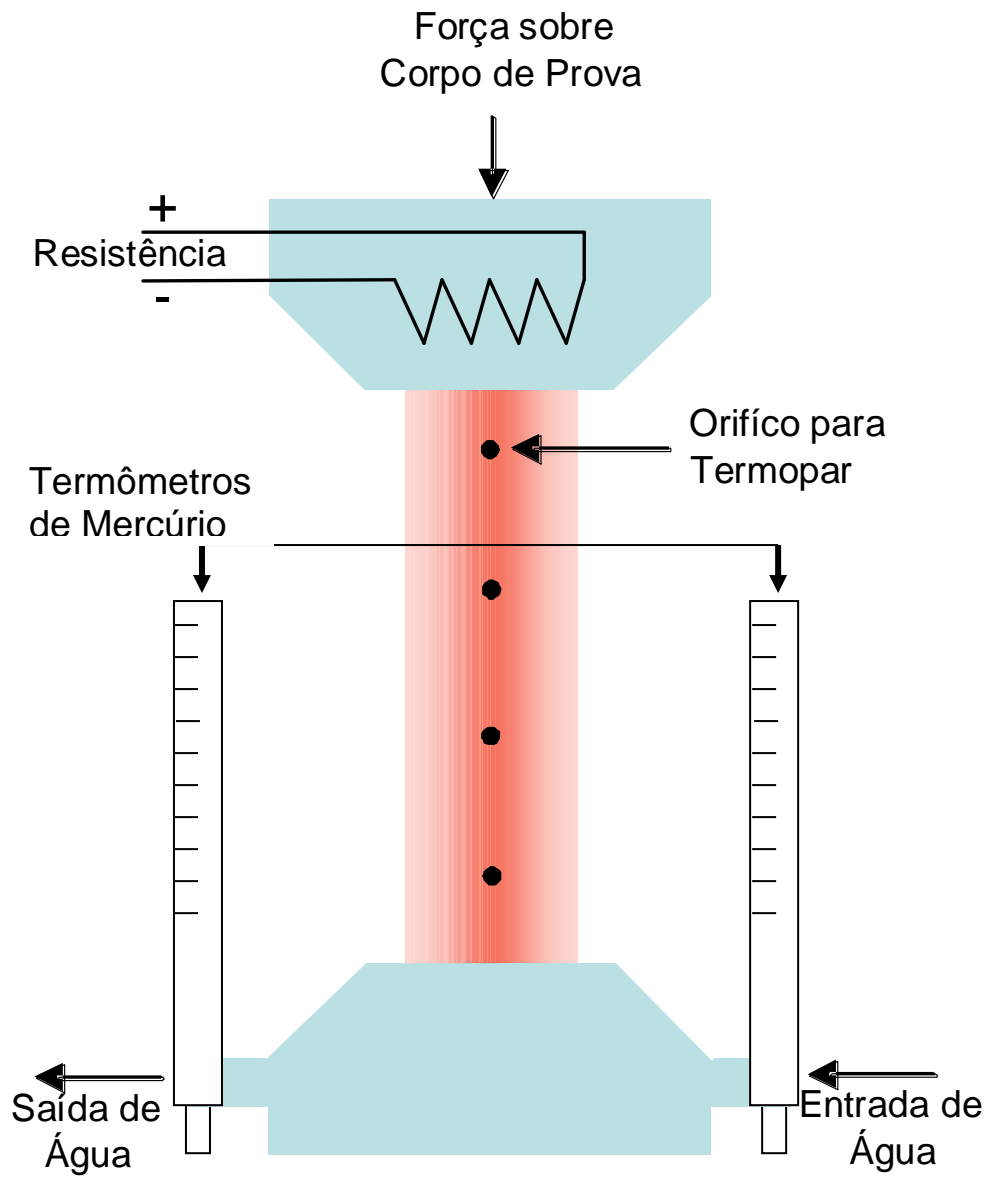


Figura 2 – Esquema de Montagem

### 3) DESCRIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.1) Materiais Utilizados

Os experimentos realizados no equipamento Cussons P –5687 no Laboratório de Geração de Potência da Universidade Federal do Espírito Santo foram feitos com materiais metálicos de fabricação nacional.

Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Cobre Eletrolítico – Corpos de Prova tipo I;
- Aço 1020 – Corpos de Prova tipo II;
- Teflon – Corpo de Prova tipo III;
- Aço Inoxidável .

#### 3.2) Descrição dos Corpos de Prova

Os experimentos foram realizados em três etapas distintas. A primeira etapa foi a análise dos corpos de prova do fabricante do equipamento. Um corpo de prova de Cobre e um de Aço Inoxidável para a confirmação da curva levantada no manual.

Dimensões do corpo de prova de Cobre:

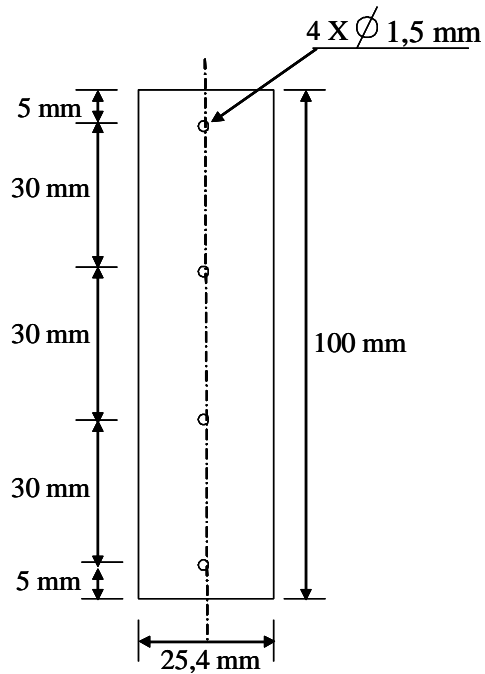
- Diâmetro: 25,0 mm
- Comprimento: 64 mm
- Espaçamento entre furos: 50 mm
- Profundidade dos furos: 12,7 mm

Dimensões do corpo de prova de Aço Inox:

- Diâmetro: 25,0 mm
- Comprimento: 38 mm
- Espaçamento entre furos: 25 mm
- Profundidade dos furos: 12,7 mm.



Vista Frontal



Vista Lateral

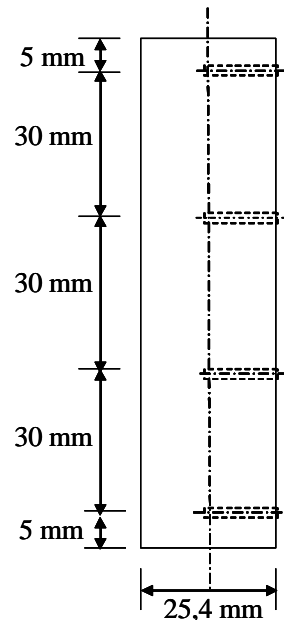
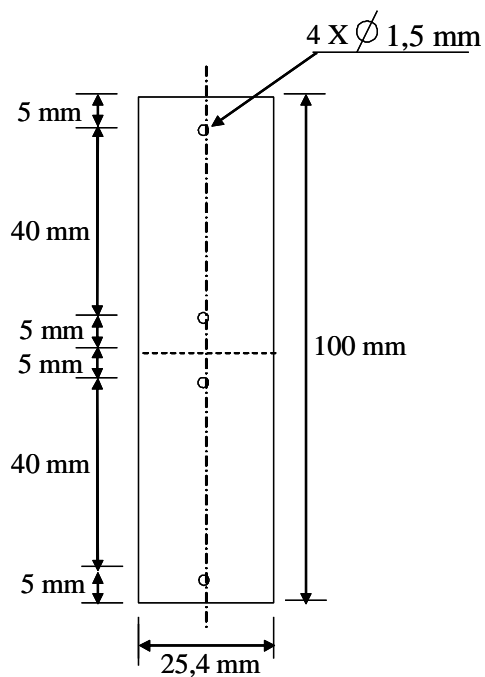


Figura 3 – Esquema dos Corpos de Prova Longos

Vista Frontal



Vista Lateral

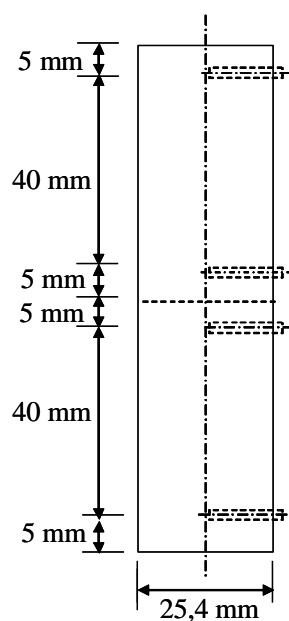
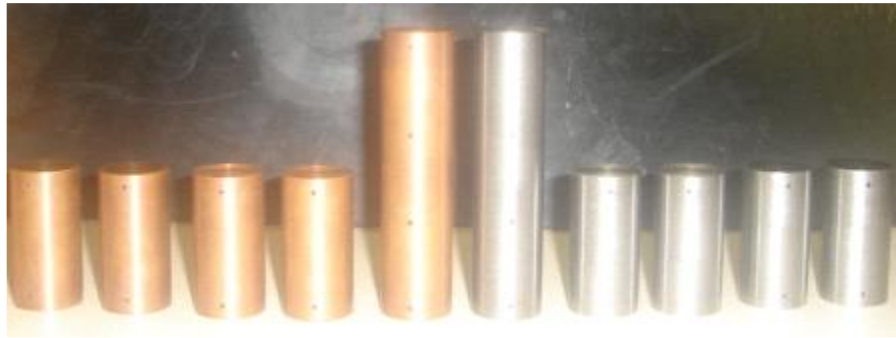


Figura 4 – Esquema dos Corpos de Prova Curtos



Corpos de Prova de Cobre

Corpos de Prova de Aço

Figura 5 – Foto dos Corpos de Prova

Num segundo momento foram feitas análises em corpos de prova de Cobre, Aço 1020 e Teflon, sem a presença de interface, para a posterior medição da condutividade térmica dos materiais e levantamento da curva de temperatura do equipamento.

Os corpos de prova longos tanto de Cobre quanto de Aço 1020 e Teflon tinham dimensões iguais.

As dimensões são as seguintes:

- Diâmetro do Corpo de Prova Longo: 25,4 mm
- Comprimento: 100 mm

Os corpos de prova tinham 4 furações cujo diâmetro era de 1,5 mm e com profundidade de 12,7 mm. A primeira furação distava da extremidade de apenas 5 mm. Os outros furos se distanciavam do primeiro e entre si de 30 mm (Figura 3).

Na terceira etapa foram realizados experimentos para posterior análise da resistência térmica de contato dos materiais e para diversos tipos de rugosidade das superfícies dos corpos de prova em contato, com e sem a presença de pasta térmica. Apenas os materiais Cobre e Aço 1020 curtos foram usados neste tipo de experimento.

Nesta etapa, os corpos de prova curtos tinham dimensões menores como descritas abaixo:

- Comprimento: 50 mm
- Diâmetro do Tarugo: 25,4 mm

Cada corpo de prova possui duas furações que distam entre si 40 mm e também com profundidade de 12,7 mm (Figura 4).

É sabido que o coeficiente de condutividade térmica dos materiais varia com a temperatura. Como nos experimentos os corpos de prova são submetidos a aumento de temperatura, uma média da temperatura de cada corpo de prova foi calculada para se encontrar o coeficiente de condutividade térmica do material naquela temperatura.

Na tabela 1 encontram-se os coeficientes de condutividade térmica do Cobre e do Aço 1020 para várias temperaturas[1], e na tabela 2 os coeficientes utilizados como referência[1] nos cálculos.

Tabela 1 – Valores de Condutividade Térmica para várias temperaturas

<b>Cobre Eletrolítico</b>					
Temperatura (° C)	0	20	100	200	300
K (W/m °C)	386	386	379	374	369

<b>Aço ABNT 1020</b>					
Temperatura (° C)	0	20	100	200	300
K (W/m °C)	55	54	52	48	45

Tabela 2 – Valores de Condutividade Térmica de referência

<b>Cobre Eletrolítico</b>			
		K (W/m°C)	Temp. Média (°C)
Liso	Com Pasta Térmica	381	72,5
	Sem Pasta Térmica	380,5	78,5
Rugoso	Com Pasta Térmica	380,9	73
	Sem Pasta Térmica	379,5	93
Longo	-	381	71,5

<b>Aço ABNT 1020</b>			
		K (W/m°C)	Temp. Média (°C)
Liso	Com Pasta Térmica	50,88	128
	Sem Pasta Térmica	50,66	133,5
Rugoso	Com Pasta Térmica	50,72	132
	Sem Pasta Térmica	50,5	137,5
Longo	-	50,94	126,5

Tabela 2 – (Continuação)

**Aço Inoxidável**

Condutividade Térmica (a 20 °C)	15 W / (m*K)
---------------------------------	--------------

**Teflon**

Condutividade Térmica (a 20 °C)	0,25 W / (m*K)
---------------------------------	----------------

## 3.3) Medição da Rugosidade dos Corpos de Prova

A medição da rugosidade da superfície dos Corpos de Prova Curtos de 50 mm de comprimento foi feita no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Espírito Santo.

O instrumento utilizado para medição do acabamento superficial foi o Surtronic 3+, do fabricante Taylor-Hobson.

Procedimento realizado para aferição das rugosidades:

- Em cada Corpo de Prova foram realizadas 3 medições de rugosidade e o valor final para a posterior análise será o valor médio das 3 medições.

Na figura 6 segue as fotos das interfaces dos corpos de prova.



Cobre Rugoso



Cobre Liso



Aço 1020 Rugoso



Aço 1020 Liso

Figura 6 – Foto das Interfaces dos Corpos de Prova

Tabela 3 – Medições das Rugosidades

<b>Rugosidade Média</b>	
<b>Tabela de Medição</b>	
<b>Ra ( <math>\mu\text{m}</math> )</b>	<b>Lc - Comprimento da Amostragem (mm)</b>
0 a 0,1	0,25
> 0,1 a 2,0	0,80
>2,0 a 10,0	2,50
> 10,0	8,00

**Dados Medidos**

Corpo de Prova	Leitura	Ra	Lc Correspondente
<b>Cobre liso (1)</b>	1	0,8	0,8
	2	0,6	
	3	0,2	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Cobre liso (2)</b>	1	0,6	0,8
	2	0,8	
	3	0,4	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Aço 1020 liso(1)</b>	1	0,2	0,8
	2	0,4	
	3	0,2	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Aço 1020 liso(2)</b>	1	0,2	0,8
	2	0,2	
	3	0,2	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Cobre rugoso (1)</b>	1	8	2,5
	2	9,8	
	3	8	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Cobre rugoso (2)</b>	1	8,14	2,5
	2	8,2	
	3	10,2	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Aço 1020 rugoso(1)</b>	1	21,2	2,5
	2	26,4	
	3	30,6	
			<b>Lc Correspondente</b>
<b>Aço 1020 rugoso(2)</b>	1	24,4	2,5
	2	24,2	
	3	31	
			<b>Lc Correspondente</b>

#### **4) AFERIÇÃO DOS TERMOPARES**

O equipamento possui quatro termopares tipo K que são inseridos nos corpos de prova a fim de se obter as temperaturas exatas nos pontos de inserção. Termopares descalibrados podem causar erros positivos ou negativos significativos para a medição.

##### 4.1) Metodologia

Para a aferição dos termopares foi utilizada a técnica de aferição absoluta ou por pontos fixos. A aferição Absoluta ou por Pontos Fixos baseia-se na verificação do sinal gerado por um termopar em vários pontos fixos de temperatura como pontos de solidificação, ebulição e pontos triplos de substâncias puras.

Para a realização da aferição coloca-se o sensor a ser aferido nestes pontos fixos e faz-se a leitura do sinal gerado com um multímetro. O sinal lido é comparado com o valor conhecido do ponto fixo, verificando-se qual é o erro ou desvio do sensor em relação ao ponto fixo.

Para tanto, foi utilizada a água como substância pura, e os pontos fixos escolhidos foram os de solidificação (0°C) e ebulição da água (100°C).

## 5) CÁLCULO DA PRESSÃO DO EQUIPAMENTO SOBRE O CORPO DE PROVA

### 5.1) Introdução

Sabe-se que a resistência térmica de contato varia diretamente com a pressão exercida sobre os corpos de prova, portanto é de suma importância o conhecimento da pressão a qual os corpos de prova estão submetidos.

A força que gera essa pressão é obtida através de um mecanismo do equipamento, que comprime mecanicamente os corpos de prova. A medição dessa força no equipamento é de difícil realização, pois não há espaço suficiente para montagem de um sistema que faria tal medição. Tendo em vista essa dificuldade, foi elaborado um sistema para medição dessa força que será descrito mais a diante.

### 5.2) Etapa de Preparação e Medição

Para a realização dos cálculos da pressão, foi utilizada uma mola, de constante elástica desconhecida *a priori*, que seria colocada entre os pontos de contato do equipamento para posterior medição de sua deformação.

Colocada-se a mola, a sua deformação foi medida através de um paquímetro.

- Dimensões da mola sem deformação: 55,30mm
- Dimensões da mola com deformação: 44,15mm

### 5.3) Estimativa da Constante Elástica da Mola

A análise da constante elástica da mola utilizada para a verificação da pressão do equipamento, foi realizada no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Espírito Santo.

A mola foi colocada em uma prensa manual e sob ela uma célula de carga para a medição do carregamento realizado sobre a respectiva mola.

O carregamento sofrido pela mola será medido através de uma tabela padrão de deformações da célula de carga e carregamento utilizado. Um valor qualquer de carga (em kg) terá uma deformação específica da célula de carga que será medida através de um relógio comparador, colocado próximo a célula de carga.

Foram realizadas quatro medições de deformações da mola para diferentes cargas padronizadas na tabela.

A deformação da mola foi medida através de uma régua graduada para cada carregamento, como mostra a figura 7:

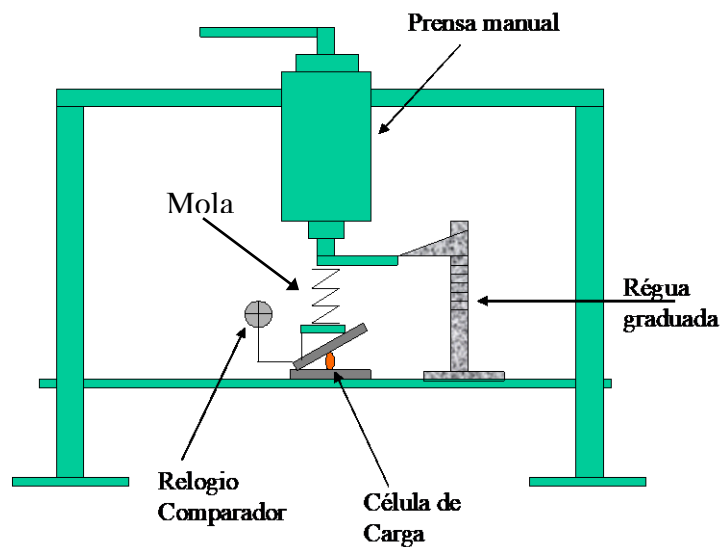


Figura 7 – Esquema de medição da constante elástica da mola



Tabela 4 – Cargas e Deformações da mola

<b>Carga (kg)</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>
<b>Leitura inicial (mm) Sem Deformação</b>	277,5	277,5	277,5	277,5
<b>Leitura final (mm) Com Deformação</b>	271,8	266,4	261,2	255,9
<b>Deformação Total (mm)</b>	5,7	11,1	16,3	21,6

O cálculo da Constante Elástica (K) foi realizado individualmente para cada carga e posteriormente foi feita uma média para a análise dos resultados.

O cálculo da constante K foi feito utilizando-se da Lei de Hooke:

$$F = K \times X$$

$$K = \frac{F}{X} \quad (4)$$

Sendo:

F: Força exercida sobre a mola (N)

X: Deformação da mola (m)

K: Constante elástica da mola (N / m)

Na tabela 5 estão colocados os resultados encontrados para a constante elástica da mola utilizada no experimento:

Tabela 5 – Cálculo da constante elástica média da mola

<b>Calculo do K</b>				
<b>Força (N)</b>	98,1	196,2	294,3	392,4
<b>Deformação (m)</b>	0,0057	0,0111	0,0163	0,0216
<b>K ( N/m )</b>	17210,53	17675,68	18055,21	18166,67
<b>K médio ( N/m )</b>	<b>17777,02</b>			

Foi feito um gráfico dos resultados para analisar a Constante elástica através da inclinação da curva linear e os resultados são mostrados na Figura 8:

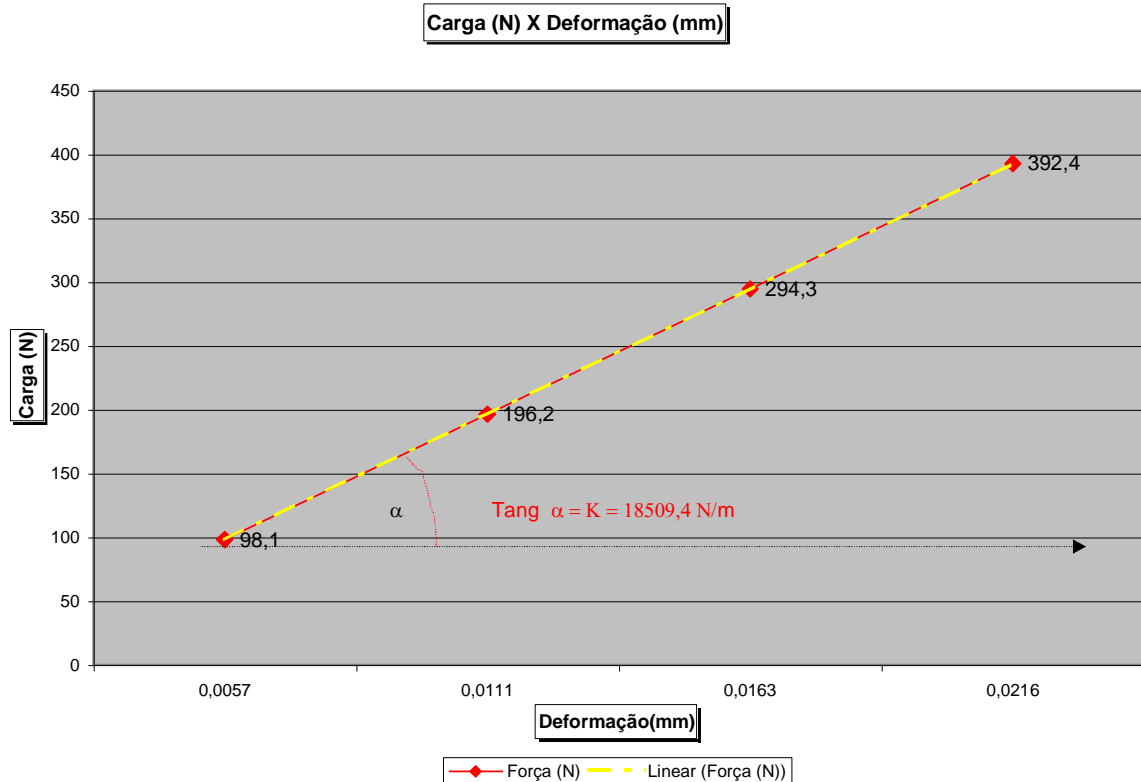


Figura 8 – Variação da força exercida sobre a mola e sua deformação

A linha tracejada em amarelo é a linha de tendência linear da curva original representada em vermelho. A constante elástica estimada neste caso é o coeficiente angular da reta de tendência.

#### 5.4) Procedimentos para o cálculo da Pressão de Contato

Com a constante elástica da mola definida, podemos estimar a força com que o equipamento exerce sobre os corpos de prova através da deformação sofrida pela mola quando colocado no equipamento.

Sendo conhecidas a Constante elástica ( $K$ ) e a deformação sofrida da mola, a força de contato entre os corpos de prova pode ser calculada utilizando a equação (4).

De onde podemos encontrar os seguintes resultados:

Tabela 6 – Cálculo da Força do equipamento

Cálculo de Força	
Constante Elástica (K) do gráfico (N/m)	18509,4
Deformação sofrida no equipamento (m)	0,01115
Força de contato (N)	206,379

A força de contato exercido pelo equipamento sobre os corpos de prova é equivalente a uma carga de 21,037 kg sobre a mola.

Com esses dados disponíveis, o calculo da pressão exercida sobre os corpos de prova pode ser calculado pela expressão:

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Sendo:

P: Pressão na interface de contato (N / m<sup>2</sup>);

F: Força exercida pelo equipamento (N);

A: Área da interface de contato (m<sup>2</sup>).

De onde podemos encontrar os seguintes resultados:

Tabela 7 – Cálculo da Pressão na interface de contato

Cálculo da Pressão	
Força de contato (N)	206,3798
Área de contato (m <sup>2</sup> )	0,00050669
Pressão Estimada (N/m <sup>2</sup> )	407307,7

## **6) VERIFICAÇÃO DO EQUIPAMENTO COM O CORPO DE PROVA DO FABRICANTE**

### 6.1) Objetivo

O fabricante sugere no manual um experimento padrão para a obtenção dos coeficientes de condutividade térmica do Cobre Eletrolítico e do Aço Inox. Esse experimento gera uma curva do gradiente de temperatura do sistema.

O experimento realizado neste item tem como objetivo o levantamento da curva do experimento padrão do fabricante e comparação com a fornecida no manual.

Neste experimento tem-se a inclusão de pasta térmica na interface de contato entre os corpos de prova de cobre (superior) e aço inox (inferior), sendo que o corpo de prova superior está em contato com a resistência geradora de calor e o corpo de prova inferior está em contato com o calorímetro da base.

### 6.2) Etapas de Preparação

Todos os experimentos realizados seguem um padrão nas etapas de preparação para sua realização. Essas etapas são idênticas para todos os experimentos. Os procedimentos que se diferem em cada experimento serão incluídos na sua descrição.

As etapas padrão são:

- Medição da tensão no local do experimento;
- Verificação da temperatura ambiente no local;
- Colocação de pasta térmica nas interfaces do corpo de prova em contato com a resistência geradora de calor e o calorímetro da base;
- Colocação de pasta térmica nos termopares e nos furos de inserção dos mesmos;
- Inserção dos termopares nos respectivos furos dos corpos de prova;
- Medição da vazão da água para os respectivos cálculos;
- Conexão do multímetro no conector de coleta de temperatura;
- Verificação das temperaturas iniciais de entrada e saída da água;

- Verificação das temperaturas iniciais de cada termopar;
- Ligação do equipamento;
- Ajuste da corrente para 0,4 Amperes;

### 6.3) Etapas de Medição

As temperaturas são lidas no início do experimento e depois em intervalos de 10 (dez) minutos. As medições só terminarão quando for atingido o regime permanente e as temperaturas não mais variarem. Através de uma chave seletora localizada na frente do equipamento (Figura 1), verifica-se as temperaturas nos diferentes termopares em qualquer intervalo de tempo. A verificação das temperaturas de entrada e saída da água são monitoradas neste mesmo intervalo de tempo nos termômetros de mercúrio.

A vazão da água no calorímetro é realizada da seguinte maneira: antes do início do experimento regula-se a vazão de água que sai do equipamento. Feito isto mede-se o tempo gasto pela água para se encher uma bureta graduada de 100ml e faz-se os devidos cálculos para se conhecer a vazão em m<sup>3</sup>/s. São feitas 3(três) leituras dos tempos e calcula-se um tempo médio utilizado para se fazer o cálculo final da vazão. Ao final dos experimentos, depois de atingido o regime o permanente a vazão é novamente medida, pois geralmente ela é alterada devido à formação de bolhas no interior da tubulação de saída.

### 6.4) Dados Coletados para o Experimento do Fabricante

Tabela 8 – Dados Experimento Cobre e Aço Inox

Cobre e Aço Inox										
Dados	Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)		
Temp. Ambiente (°C)	25,3	1	00:00	25	25	25	25	25,4	25,4	
Corrente (A)	0,4	2	00:10	109	104	89	41	25,5	26,3	
Tensão (V)	213	3	00:20	153	146	125	52	25,5	27	
Vazão (Kg/s)	2,697E-03	4	00:30	183	174	150	60	25,4	27,5	
		5	00:40	201	191	164	65	25,5	27,8	
		6	00:50	214	204	175	68	25,4	28	
		7	01:00	225	214	183	71	25,5	28,1	
		8	01:10	226	216	184	71	25,4	28,2	
		9	01:20	queda do sistema						
		10	01:30	225	214	183	71	25,4	28,2	

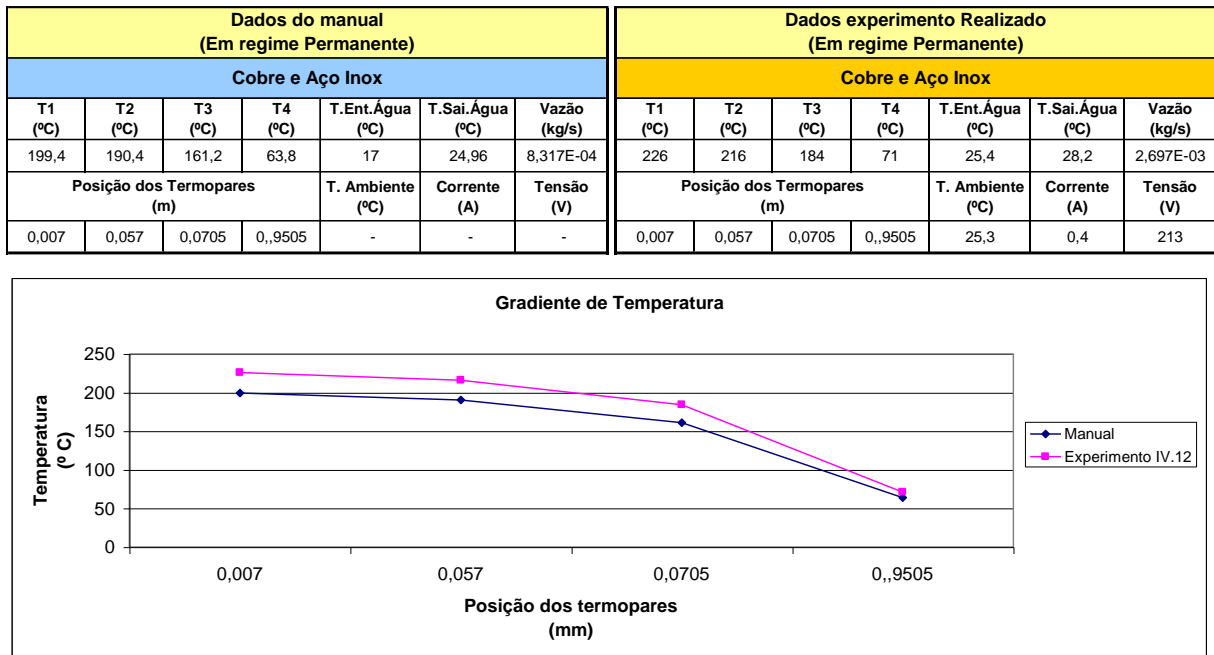


Figura 9 – Gráfico comparativo Experimento Manual X Realizado

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	25,4	31,57	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	28,2		292,89	-	14,38
Vazão (kg/s)	2,70E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m²)	4,90E-04	24,12	-	4,11	
Temp. Termopar 1 (°C) superior	225				
Temp. Termopar 2 (°C) superior	214				
Temp. Termopar 3 (°C) inferior	183				
Temp. Termopar 4 (°C) inferior	71				
Comprimento 1-2 (m)	0,05				
Comprimento 2-3 (m)	0,0135				
Comprimento 3-4 (m)	0,025				
Condutividade Térmica Ref. (Cobre) (W / m K)	386				
Condutividade Térmica Ref. (Aço Inox) (W / m K)	15				

Figura 10 – Cálculos do Experimento de verificação Cobre e Aço Inox

6.4.1) Cálculo da taxa de calor transferida (Q), em J/s

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (1), \text{ sendo}$$

m: vazão mássica de água que sai do calorímetro (kg/s);

c: calor específico da água (J / Kg K);

$\Delta T$ : Diferença entre as temperaturas de entrada e saída da água (°C)

#### 6.4.2) Cálculo do coeficiente de condutividade térmica (K)

$$Q = \frac{K \times A \times \Delta T}{L}, \text{ portanto}$$

$$\boxed{K = \frac{Q \times L}{A \times \Delta T}} \text{ (2), sendo}$$

K: Coeficiente de Condutividade Térmica (W/m°C)

Q: Taxa de calor transferido (J/s);

L: Comprimento do corpo de prova (m);

A: Área da seção transversal do corpo de prova (m<sup>2</sup>);

$\Delta T$ : Diferença entre as temperaturas dos pontos de medição (°C).

#### 6.4.3) Cálculo da Resistência Térmica de Contato

$$\boxed{R_{tc} = \frac{\Delta T}{Q}} \text{ (3), sendo}$$

R<sub>tc</sub>: Resistência térmica de contato (°C / W)

$\Delta T$ : Diferença entre as temperaturas dos pontos de medição (°C);

Q: Taxa de calor transferida (J/s).

#### 6.5) Análise dos resultados

Analisando-se o gráfico obtido (Figura 9), constata-se a similaridade entre a curva do manual do fabricante e a curva encontrada no experimento realizado no LAGEPOT.

Esta similaridade mostra que o equipamento reproduz de maneira satisfatória o experimento padrão do fabricante para o Aço Inox, com uma diferença de 4,1%, mesmo com alteração de alguns parâmetros como vazão e temperatura de entrada da água.

No entanto, quando se analisa o resultado obtido no cálculo do K (Figura 10), constata-se uma diferença de 24,12% entre o coeficiente de condutividade térmica do cobre da bibliografia [10] e o calculado no experimento. Essa diferença pode ser devido à perda de calor que ocorre no sistema, através do mau isolamento térmico da tampa de proteção do equipamento, que não é original, mas adaptada no Lagepot.

## 7) LEVANTAMENTO DOS DADOS

### 7.1) Descrição dos experimentos

Todos os dados recolhidos para a análise do projeto foram feitos no Laboratório de Geração de Potência da Universidade Federal do Espírito Santo (LAGEPOT).

Os experimentos foram realizados nos períodos matutino, vespertino e noturno.

Foram realizados 15 (quinze) experimentos no total, sendo que destes 15 (quinze), 3 (três) experimentos foram refeitos a fim de se constatar a repetibilidade dos resultados.

Segue abaixo a lista de códigos dos experimentos e respectivos corpos de prova

Tabela 9 – Síntese dos códigos dos experimentos e respectivos corpos de prova

<b>Material</b>	<b>Índice 1 (do material)</b>	<b>Comprimento e Acabamento</b>	<b>Índice 2 comprimento</b>	<b>Experimento</b>
Cobre	I	Longo	I.1	I.1
		Liso Curto	I.2	I.23C
		Liso Curto	I.3	I.23S
		Rugoso Curto	I.4	I.45C
		Rugoso Curto	I.5	I.45S
Aço 1020	II	Longo	II.1	II.1
		Liso Curto	II.2	II.23C
		Liso Curto	II.3	II.23S
		Rugoso Curto	II.4	II.45C
		Rugoso Curto	II.5	II.45S
Teflon®	III	Longo	III.1	III.1

C – Com pasta térmica nas interfaces de contato dos corpos de prova.

S – Sem pasta térmica nas interfaces de contato dos corpos de prova.

Abaixo segue a lista dos experimentos realizados. Os experimentos repetidos não foram incluídos na lista, sendo os mesmos mostrados na descrição do experimento em que ocorreram.



Tabela 10 – Códigos dos Experimentos Realizados

<b>Experimento</b>	<b>Descrição</b>
I.1	Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o cobre.
I.23C	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o cobre.
I.23S	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o cobre.
I.45C	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o cobre.
I.45S	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o cobre.
II.1	Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o aço 1020.
II.23C	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o aço 1020.
II.23S	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o aço 1020.
II.45C	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o aço 1020.
II.45S	Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o aço 1020.
III.1	Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Teflon®.

## 7.2) Experimentos

Os cálculos das variáveis Q e K nas diferentes posições entre os termopares (1 e 2, 2 e 3, 3 e 4) foram calculados após se atingir o regime permanente. A diferença percentual da grandeza Condutividade Térmica encontrada nos experimentos em comparação com a encontrada na literatura[1,2,] também é colocada. Nas figuras que apresentam os Dados, os termopares 1 e 2 estão no corpo de prova curto superior enquanto os termopares 3 e 4 estão no inferior.

### 7.2.1) Experimentos I.1: Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova longo de Cobre.

O objetivo deste experimento é a obtenção do coeficiente de condutividade térmica do corpo de prova longo **de Cobre** e a comparação desse valor com o valor referenciado nas literaturas[1,2], a fim de se analisar a precisão do equipamento.

## 7.2.1.1) Dados Coletados

Tabela 11 – Dados do Experimento I.1

Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saida (°C)
Temp. Ambiente (°C)	26,2	1	00:00	30	29	28	28	26,8	27,1
Corrente (A)	0,4	2	00:10	79	70	61	52	26,5	31
Tensão (V)	215	3	00:20	83	74	64	55	26,5	31,5
Vazão (Kg/s)	2,85E-03	4	00:30	84	74	65	56	26,2	31,5
		5	00:40						
		6	00:50						
		7	01:00						
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	26,2	63,15	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	31,5		373,91	415,46	415,46
Vazão (kg/s)	2,85E-03		Diferença com a referência (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181		1,86	-9,04	-9,04
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	84				
Temp. Termopar 2 (°C)	74				
Temp. Termopar 3 (°C)	65				
Temp. Termopar 4 (°C)	56				
Comprimento 1-2 (m)	0,03				
Comprimento 2-3 (m)	0,03				
Comprimento 3-4 (m)	0,03				
Condutividade Térmica Ref.	381				

Figura 11 – Cálculos do Experimento I.1

Tabela 12 – Dados da Repetição do Experimento I.1

Repetição Cobre Longo									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saida (°C)
Temp. Ambiente (°C)	27,2	1	00:00	26	26	26	26	27	27
Corrente (A)	0,4	2	00:10	71	63	57	50	26,5	30,2
Tensão (V)	218	3	00:20	80	71	64	55	26,5	31,5
Vazão (Kg/s)	2,62E-03	4	00:30	82	73	66	56	26,2	31,8
		5	00:40	83	74	67	57	26	32,6
		6	00:50	86	77	69	60	26	34
		7	01:00	86	76	67	57	25,8	32
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	25,8	67,92	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	32		402,11	446,79	402,11
Vazão (kg/s)	2,62E-03		Diferença com a Ref.(%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181		-5,54	-17,27	-5,54
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	86				
Temp. Termopar 2 (°C)	76				
Temp. Termopar 3 (°C)	67				
Temp. Termopar 4 (°C)	57				
Comprimento 1-2 (m)	0,03				
Comprimento 2-3 (m)	0,03				
Comprimento 3-4 (m)	0,03				
Condutividade Térmica Ref.	381				

Figura 12 – Cálculos da Repetição do Experimento I.1

7.2.2) Experimentos I.23C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica de Corpos de Prova de Cobre curtos e lisos com pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova lisos curtos de cobre com pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento, além das etapas padrão de preparação (item 6.2), tem-se a inclusão de pasta térmica na interface de contato entre os corpos de prova I.2 (superior) e I.3 (inferior). O experimento é feito com a utilização dos corpos de prova de Cobre Eletrolítico curtos lisos como demonstrado na tabela 9.

#### 7.2.2.1) Dados Coletados

Tabela 13 – Dados do Experimento I.23C

Cobre Liso Com Pasta Térmica									
Dados	Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)	
Temp. Ambiente (°C)	24,5	1	00:00	27	27	27	26	26,8	27
Corrente (A)	0,4	2	00:10	75	65	57	47	26,7	29,9
Tensão (V)	210	3	00:20	85	73	63	51	26,7	30,2
Vazão (Kg/s)	3,56E-03	4	00:30	89	76	66	53	26,2	30,5
		5	00:40	90	77	67	53	26,4	30,6
		6	00:50	91	78	67	54	26,5	30,8
		7	01:00	91	78	67	54	26,2	30,5
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	26,2	64,00	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	30,5		388,66	114,83	388,66
Vazão (kg/s)	3,56E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181		0,17	-2,01	69,86
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	91				
Temp. Termopar 2 (°C)	78				
Temp. Termopar 3 (°C)	67				
Temp. Termopar 4 (°C)	54				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	381				

Figura 13 – Cálculos do Experimento I.23C

Tabela 14 – Dados da Repetição do Experimento I.23C

Repetição Cobre Liso Com Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Água ent (°C)	T.Água saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	24,7	1	00:00	26	26	26	26	26,8	26,8
Corrente (A)	0,4	2	00:10	79	68	61	51	26	30,7
Tensão (V)	218	3	00:20	87	75	66	55	26	31,5
Vazão (Kg/s)	2,21E-03	4	00:30	90	77	69	57	26	32,4
		5	00:40	89	77	68	56	26	32,4
		6	00:50	89	77	68	56	26	32,4
		7	01:00						
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	26	59,14	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	32,4		389,03	129,68	389,03
Vazão (kg/s)	2,21E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a Ref.(%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181		0,15	-2,11	65,96
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	89				
Temp. Termopar 2 (°C)	77				
Temp. Termopar 3 (°C)	68				
Temp. Termopar 4 (°C)	56				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	381				

Figura 14 – Cálculos da Repetição do Experimento I.23C

7.2.3) Experimentos I.23S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Cobre curto e liso sem pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova lisos curtos de cobre sem pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento **não há** inclusão de pasta térmica na interface de contato dos corpos de prova. O corpo de prova I.2 (superior) e I.3 (inferior) são corpos de prova de Cobre Eletrolítico lisos conforme tabela 9.

#### 7.2.3.1) Dados Coletados

Tabela 15 – Dados do Experimento I.23S

Cobre Liso Sem Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Água ent (°C)	T.Água saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	25,8	1	00:00	28	28	27	27	27,6	27,7
Corrente (A)	0,4	2	00:10	80	71	55	47	27,2	30,2
Tensão (V)	210	3	00:20	93	82	62	51	27,2	31,5
Vazão (Kg/s)	3,99E-03	4	00:30	99	87	64	52	27,2	31
		5	00:40	101	89	66	54	27,1	30,8
		6	00:50	103	90	67	54	27	31
		7	01:00	103	91	67	54	27	31
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)		Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	27	59,60		Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saída. Água (°C)	31			392,11	49,01	361,95
Vazão (kg/s)	3,56E-03					
Calor Específico (J/kg K)	4181					
Área Sup. Contato (m²)	5,07E-04					
Temp. Termopar 1 (°C)	103					
Temp. Termopar 2 (°C)	91					
Temp. Termopar 3 (°C)	67					
Temp. Termopar 4 (°C)	54					
Comprimento 1-2 (m)	0,04					
Comprimento 2-3 (m)	0,01					
Comprimento 3-4 (m)	0,04					
Condutividade Térmica Ref.	380,5					
				Diferença com a referência (%)		
				-3,05	87,12	4,88

Figura 15 – Cálculos do Experimento I.23S

7.2.4) Experimentos I.45C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Cobre curto e rugoso com pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova rugosos curtos de cobre com pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento, além das etapas padrão de preparação (item 6.2), têm-se a inclusão de pasta térmica na interface de contato entre os corpos de prova I.4 (superior) e I.5 (inferior). Os corpos de prova em questão são de Cobre Eletrolítico curtos e rugosos como mostrado na tabela 9.

#### 7.2.4.1) Dados Coletados

Tabela 16 – Dados do Experimento I.45C

Cobre Rugoso Com Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T. Água ent (°C)	T. Água saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	27,2	1	00:00	27	27	26	26	27	27
Corrente (A)	0,4	2	00:10	79	69	57	48	27,2	30,5
Tensão (V)	216	3	00:20	89	77	63	51	27,5	31
Vazão (Kg/s)	3,70E-03	4	00:30	91	79	64	52	27,5	31,1
		5	00:40	93	80	65	53	27,5	31,2
		6	00:50	93	81	66	53	27,8	31,5
		7	01:00	93	81	66	53	27,8	31,5
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	27,8	57,18	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saída. Água (°C)	31,5		376,13	75,23	347,20
Vazão (kg/s)	3,70E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04		1,25	80,25	8,85
Temp. Termopar 1 (°C)	93				
Temp. Termopar 2 (°C)	81				
Temp. Termopar 3 (°C)	66				
Temp. Termopar 4 (°C)	53				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	380,9				

Figura 16 – Cálculos do Experimento I.45C

7.2.5) Experimentos I.45S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Cobre curto e rugoso sem pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova rugosos curtos de cobre sem pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento **não há** inclusão de pasta térmica na interface de contato dos corpos de prova. O corpo de prova I.4 (superior) e o I.5 (inferior) são corpos de prova de Cobre Eletrolítico curtos e rugosos conforme mostrado na tabela 9.

#### 7.2.5.1) Dados Coletados

Tabela 17 – Dados do Experimento I.45S

Cobre Rugoso Sem Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	28,4	1	00:00	27	27	26	26	27,3	27,3
Corrente (A)	0,4	2	00:10	95	87	52	45	27,2	30
Tensão (V)	216	3	00:20	113	103	60	51	27,2	31,2
Vazão (Kg/s)	2,32E-03	4	00:30	122	111	63	52	27,5	31,7
		5	00:40	125	115	65	55	27,5	32,2
		6	00:50	127	117	67	56	27,5	32,8
		7	01:00	129	118	68	57	27,5	33,2
		8	01:10	129	118	68	57	27,5	33,2
		9	01:20	129	118	68	57	27,5	33,2
		10	01:30	129	118	68	57	27,5	33,2

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	27,5	55,31	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	33,2		396,96	21,83	396,96
Vazão (kg/s)	2,32E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m²)	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	129				
Temp. Termopar 2 (°C)	118				
Temp. Termopar 3 (°C)	68				
Temp. Termopar 4 (°C)	57				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	379,5				
			-4,60	94,25	-4,60

Figura 17 – Cálculos do Experimento I.45S

7.2.6) Experimentos II.1: Cálculo do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Aço 1020.

O objetivo deste experimento é a obtenção do coeficiente de condutividade térmica do Aço 1020 longo e a comparação desse valor com o valor referenciado nas literaturas[1,2], a fim de se analisar a precisão do equipamento.

7.2.6.1) Dados Coletados

Tabela 18 – Dados do Experimento II.1

Aço Longo									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saida (°C)
Temp. Ambiente (°C)	25,2	1	00:00	30	29	27	26	26	26
Corrente (A)	0,4	2	00:10	136	100	71	41	26	28
Tensão (V)	215	3	00:20	176	131	91	49	25,8	29
Vazão (Kg/s)	2,55E-03	4	00:30	192	143	99	52	25,5	29,4
		5	00:40	198	147	102	53	25,5	29,5
		6	00:50	199	148	103	54	25,5	29,5
		7	01:00	199	148	103	54	25,5	29,5
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						



Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	25,5	42,65	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	29,5		49,51	56,11	51,53
Vazão (kg/s)	2,55E-03		Diferença com a referência (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181		2,81	-10,15	-1,16
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	199				
Temp. Termopar 2 (°C)	148				
Temp. Termopar 3 (°C)	103				
Temp. Termopar 4 (°C)	54				
Comprimento 1-2 (m)	0,03				
Comprimento 2-3 (m)	0,03				
Comprimento 3-4 (m)	0,03				
Condutividade Térmica Ref.	50,94				

Figura 18 – Cálculos do Experimento II.1

7.2.7) Experimentos II 23C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Aço 1020 curto e liso com pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova lisos curtos de aço 1020 com pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento, além das etapas padrão de preparação (item 6.2), tem-se a inclusão de pasta térmica na interface de contato entre os corpos de prova II.2 (superior) e II.3 (inferior). Os corpos de prova em questão são corpos de Aço 1020 Curtos e Lisos conforme mostrado na tabela 9.

#### 7.2.7.1) Dados Coletados

Tabela 19 – Dados do Experimento II.23C

Aço Liso Com Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	26,8	1	00:00	33	31	30	27	27,1	27,2
Corrente (A)	0,4	2	00:10	130	87	76	41	27,8	29,5
Tensão (V)	220	3	00:20	164	111	96	47	27,8	30,4
Vazão (Kg/s)	3,22E-03	4	00:30	183	124	107	51	27,8	31
		5	00:40	190	128	111	52	27,8	31
		6	00:50	195	132	114	53	27,6	31
		7	01:00	197	133	115	53	27,5	31
		8	01:10	200	135	117	53	27,1	30,5
		9	01:20	202	136	118	53	27	30,5
		10	01:30	203	137	118	53	27	30,5

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	27	47,11	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	30,5		56,34	48,93	57,21
Vazão (kg/s)	3,22E-03				
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	203				
Temp. Termopar 2 (°C)	137				
Temp. Termopar 3 (°C)	118				
Temp. Termopar 4 (°C)	53				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	50,88				
		Resistência Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
		0,40	-10,74	3,83	-12,44

Figura 19 – Cálculos do Experimento II.23C

Tabela 20 – Dados da Repetição do Experimento II.23C

Repetição Aço Liso Com Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	24	1	00:00	26	25	25	25	25,1	25,1
Corrente (A)	0,4	2	00:10	113	74	65	36	24,9	26,2
Tensão (V)	219	3	00:20	150	99	86	42	24,9	27
Vazão (Kg/s)	2,49E-03	4	00:30	170	113	97	46	24,8	27,9
		5	00:40	182	122	104	48	24,8	28,1
		6	00:50	191	127	109	50	25	28,7
		7	01:00	195	131	112	51	25	29
		8	01:10	199	133	114	51	25	29
		9	01:20	201	134	115	51	25	29
		10	01:30	202	135	116	52	25	29
		11	01:40	205	137	117	52	25	29,1

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	25	42,68	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saida. Água (°C)	29,1		49,55	42,12	51,84
Vazão (kg/s)	2,49E-03				
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04				
Temp. Termopar 1 (°C)	205				
Temp. Termopar 2 (°C)	137				
Temp. Termopar 3 (°C)	117				
Temp. Termopar 4 (°C)	52				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	50,88				
		Resistência Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
		0,47	2,61	17,22	-1,89

Figura 20 – Dados da Repetição do Experimento II.23C

7.2.8) Experimentos II 23S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Aço 1020 curto e liso sem pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova lisos curtos de aço 1020 sem pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento **não há** inclusão de pasta térmica na interface de contato dos corpos de prova. O corpo de prova II.2 (superior) e o II.3 (inferior) são corpos de prova de Aço 1020 lisos e curtos conforme mostrado na tabela 9.

#### 7.2.8.1) Dados Coletados

Tabela 21 – Dados do Experimento II.23S

Aço Liso Sem Pasta Térmica										
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)	
Temp. Ambiente (°C)	29,2	1	00:00	28	28	27	26	27,5	27,5	
Corrente (A)	0,4	2	00:10	130	92	66	37	27,9	29	
Tensão (V)	220	3	00:20	166	120	83	43	27,9	30	
Vazão (Kg/s)	2,62E-03	4	00:30	195	140	98	47	28	30,3	
		5	00:40	204	147	101	48	28	30,7	
		6	00:50	207	156	108	51	28	31	
		7	01:00	216	155	108	51	27,9	31,4	
		8	01:10	QUEDA DO SISTEMA						
		9	01:20							
		10	01:30							

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	27,9	38,43	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saída. Água (°C)	31,4		49,73	16,14	53,22
Vazão (kg/s)	2,63E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m²)	5,07E-04	1,22	1,83	68,15	-5,05
Temp. Termopar 1 (°C)	216				
Temp. Termopar 2 (°C)	155				
Temp. Termopar 3 (°C)	108				
Temp. Termopar 4 (°C)	51				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	50,66				

Figura 21 – Cálculos do Experimento II.23S

7.2.9) Experimentos II 45C: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o corpo de Prova de Aço 1020 curto e rugoso com pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova rugosos curtos de aço 1020 com pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento, além das etapas padrão de preparação (item 6.2), tem-se a inclusão de pasta térmica na interface de contato entre os corpos de prova II.4 (superior) e II.5 (inferior). Os corpos de prova são corpos de Aço 1020 curtos e rugosos como destacado na tabela 9.

#### 7.2.9.1) Dados Coletados

Tabela 22 – Dados do Experimento II.45C

Aço Rugoso Com Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T. Água ent (°C)	T. Água saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	26,6	1	00:00	30	29	28	27	27,5	27,5
Corrente (A)	0,4	2	00:10	116	81	64	37	27,9	29
Tensão (V)	215	3	00:20	152	106	82	43	28	30
Vazão (Kg/s)	2,56E-03	4	00:30	177	125	96	47	27,8	30,6
		5	00:40	191	135	103	49	27,7	31
		6	00:50	197	140	106	50	27,7	31
		7	01:00	203	144	109	51	27,8	31,2
		8	01:10	208	147	111	51	27,5	31,2
		9	01:20	212	150	113	52	27,2	31,2
		10	01:30	212	150	113	52	27,2	31,2

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	27,2	43,47	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saída. Água (°C)	31,2		55,34	23,18	56,25
Vazão (kg/s)	2,60E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m²)	5,07E-04	0,85	-9,12    54,29    -10,90		
Temp. Termopar 1 (°C)	212				
Temp. Termopar 2 (°C)	150				
Temp. Termopar 3 (°C)	113				
Temp. Termopar 4 (°C)	52				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	50,72				

Figura 22 – Cálculos do Experimento II.45C

7.2.10) Experimentos II 45S: Cálculo da Resistência Térmica de Contato e Coeficiente de Condutividade Térmica para o corpo de Prova de Aço 1020 curto e rugoso sem pasta térmica.

O objetivo deste experimento é calcular a resistência de contato na interface dos **corpos de prova rugosos curtos de aço 1020 sem pasta térmica** para posterior análise, além da comparação do coeficiente de condutividade térmica encontrado no experimento com o bibliográfico[1,2].

Neste experimento **não há** inclusão de pasta térmica na interface de contato dos corpos de prova. O corpo de prova II.4 (superior) e II.5 (inferior) são corpos de Aço 1020 curtos e rugosos, como mostra a tabela 9.

#### 7.2.10.1) Dados Coletados

Tabela 23 – Dados do Experimento II.45S

Aço Rugoso Sem Pasta Térmica									
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Água ent (°C)	T.Água saída (°C)
Temp. Ambiente (°C)	29	1	00:00	28	27	27	27	28,2	28,2
Corrente (A)	0,4	2	00:10	132	75	51	34	28,5	29,2
Tensão (V)	212	3	00:20	181	145	67	39	28,9	30,2
Vazão (Kg/s)	2,49E-03	4	00:30	208	173	77	42	29	31
		5	00:40	222	179	82	44	29	31,2
		6	00:50	230	185	84	45	29	31,5
		7	01:00						
		8	01:10						
		9	01:20						
		10	01:30						

Dados		Cálculo do Q (J/s)	Cálculo do K (W/mK)		
Temp. Ent. Água (°C)	29	26,08	Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
Temp. Saída. Água (°C)	31,5		45,75	5,10	52,79
Vazão (kg/s)	2,50E-03	Resistencia Térmica de Contato (°C/W)	Diferença com a referencia (%)		
Calor Específico (J/kg K)	4181				
Área Sup. Contato (m²)	5,07E-04	3,87	9,41   89,91   -4,53		
Temp. Termopar 1 (°C)	230				
Temp. Termopar 2 (°C)	185				
Temp. Termopar 3 (°C)	84				
Temp. Termopar 4 (°C)	45				
Comprimento 1-2 (m)	0,04				
Comprimento 2-3 (m)	0,01				
Comprimento 3-4 (m)	0,04				
Condutividade Térmica Ref.	50,5				

Figura 23 – Cálculos do Experimento II.45S

7.2.11) Experimentos III.1: do Coeficiente de Condutividade Térmica para o Corpo de Prova de Teflon®.

O objetivo deste experimento é a obtenção do coeficiente de condutividade térmica do Teflon (III.3) e a comparação desse valor com o valor referenciado nas literaturas[1,2], a fim de se analisar a precisão do equipamento.

7.2.11.1) Dados Coletados

Tabela 24 – Dados do Experimento III.1

Teflon										
Dados		Leitura	Hora	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T.Agua ent (°C)	T.Agua saída (°C)	
Temp. Ambiente (°C)	29,2	1	00:00	29	30	30	27	28,2	28,2	
Corrente (A)	0,4	2	00:10	117	33	30	27	28,2	28,2	
Tensão (V)	210	3	00:20	183	50	39	28	27,9	27,9	
Vazão (Kg/s)	2,38E-03	4	00:30	191	66	47	29	28	28,1	
		5	00:40	Queda do Sistema						
		6	00:50							
		7	01:00							
		8	01:10							
		9	01:20							
		10	01:30							

Dados	
Temp. Ent. Água (°C)	28
Temp. Saída. Água (°C)	28,1
Vazão (kg/s)	2,38E-03
Calor Específico (J/kg K)	4181
Área Sup. Contato (m <sup>2</sup> )	5,07E-04
Temp. Termopar 1 (°C)	191
Temp. Termopar 2 (°C)	66
Temp. Termopar 3 (°C)	47
Temp. Termopar 4 (°C)	29
Comprimento 1-2 (m)	0,03
Comprimento 2-3 (m)	0,03
Comprimento 3-4 (m)	0,03
Condutividade Térmica Teórica	0,25

Cálculo do Q (J/s)
1,00

Cálculo do K (W/mK)		
Diferença 1-2	Diferença 2-3	Diferença 3-4
0,47	3,10	3,27

Diferença com a referencia (%)		
-88,53	-1140,32	-1209,23

Figura 24 – Cálculos do Experimento III.1

## 8) ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos resultados encontrados nos diversos experimentos, pode-se chegar a algumas conclusões importantes a respeito da eficácia do equipamento juntamente com a importância que a resistência térmica de contato apresenta no gradiente de temperatura, com e sem a presença de fluido interfacial.

Analisando os dados obtidos no experimento envolvendo o corpo de prova de Teflon® pode-se constatar a ineficiência do aparelho na medição de materiais de baixa condutividade térmica. Essa ineficiência pode ser superada alterando-se a maneira pela qual o experimento é realizado, por exemplo, diminuindo-se o tamanho do corpo de prova de Teflon® e as distancias entre os termopares.

Quanto à medição do coeficiente de condutividade térmica do cobre e do aço 1020, pode-se constatar que o aparelho é eficaz quando se trata de materiais de boa condutividade térmica. As diferenças percentuais entre os coeficientes de condutividade térmica da bibliografia e os medidos nos experimentos podem ser encontradas nas tabelas do item 7 (Levantamento de Dados).

As incertezas envolvendo os valores de coeficientes encontrados no experimento não são tão significantes na análise dos resultados, pois sendo a incerteza de K baixa ( $\pm 0,68\%$ , anexo II), não causa grande alteração no valor do coeficiente encontrado. Durante a realização do experimento pode-se observar que as maiores fontes de erro estão em algumas variáveis do processo, como na medição da vazão e na perda de calor pela tampa de isolamento.

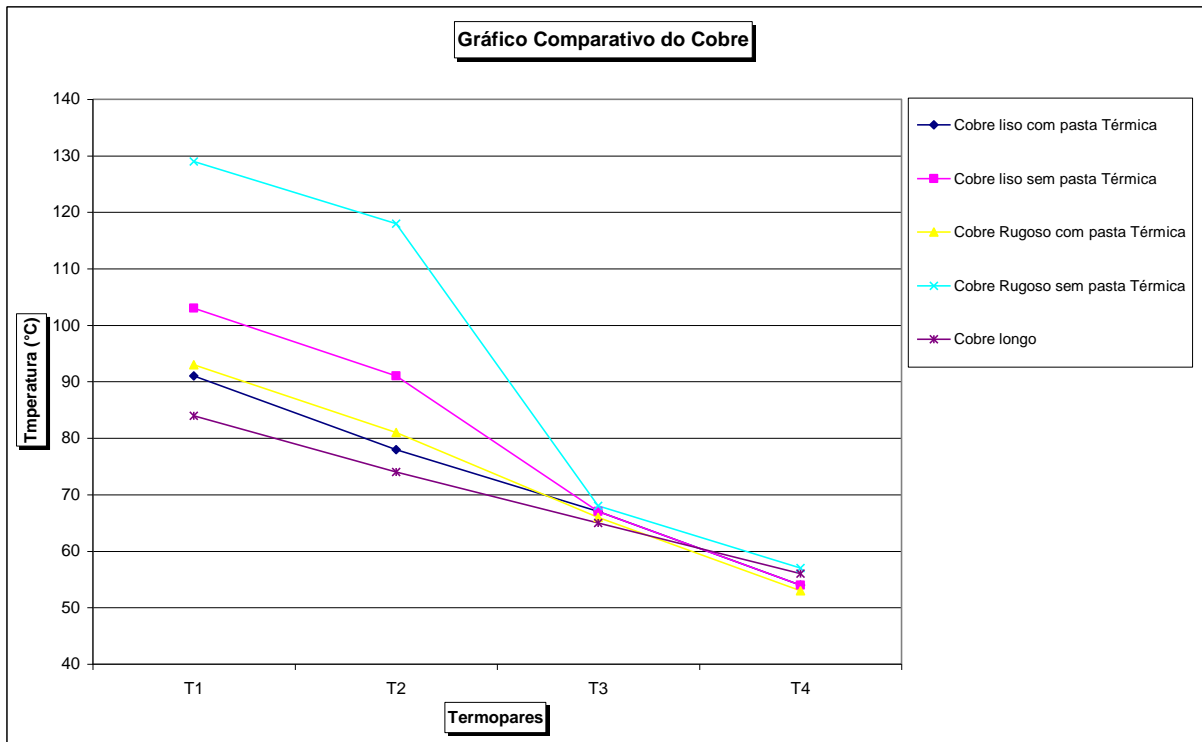


Figura 25 – Gráfico Comparativo Gradientes de Temperatura do Cobre

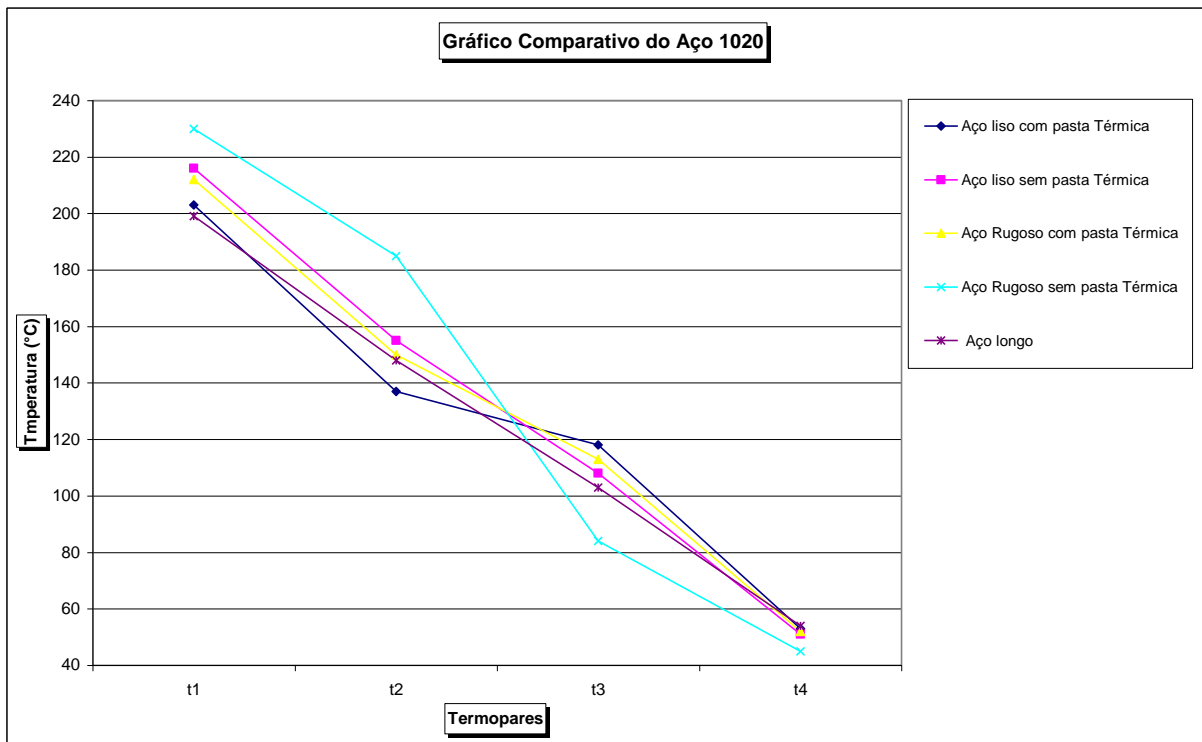


Figura 26– Gráfico Comparativo Gradientes de Temperatura do Aço



Portanto, sintetizando os resultados obtidos, tem-se as tabelas 25, 26, as figuras 27, 28, 29 e 30.

Tabela 25 – Comparativo Q do cobre eletrolítico

Material: Cobre Eletrolítico					
	C.P. Longo	C.P. Liso C/ Pasta Térmica	C.P. Liso S/ Pasta Térmica	C.P. Rugoso C/ Pasta Térmica	C.P. Rugoso S/ Pasta Térmica
Q (J/s)	67,92	64,00	59,60	57,18	55,31
Porcentagem Q Relação C.P. Longo	100,00%	94,23%	87,75%	84,19%	81,43%
Rugosidade Interface ( $\mu\text{m}$ )	-	0,56	0,56	8,72	8,72
Pressão (Pa)	407307,7				
Resistência Térmica de Contato ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	-	0,17	0,40	0,26	0,90

Tabela 26 – Comparativo Q do Aço ABNT 1020.

Material: Aço ABNT 1020					
	C.P. Longo	C.P. Liso C/ Pasta Térmica	C.P. Liso S/ Pasta Térmica	C.P. Rugoso C/ Pasta Térmica	C.P. Rugoso S/ Pasta Térmica
Q (J/s)	42,65	42,68	38,43	43,47	26,08
Porcentagem Q Relação C.P. Longo	100,00%	100,07%	90,11%	101,92%	61,15%
Rugosidade Interface ( $\mu\text{m}$ )	-	0,23	0,23	26,3	26,3
Pressão (Pa)	407307,7				
Resistência Térmica de Contato ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	-	0,40	1,22	0,85	3,87

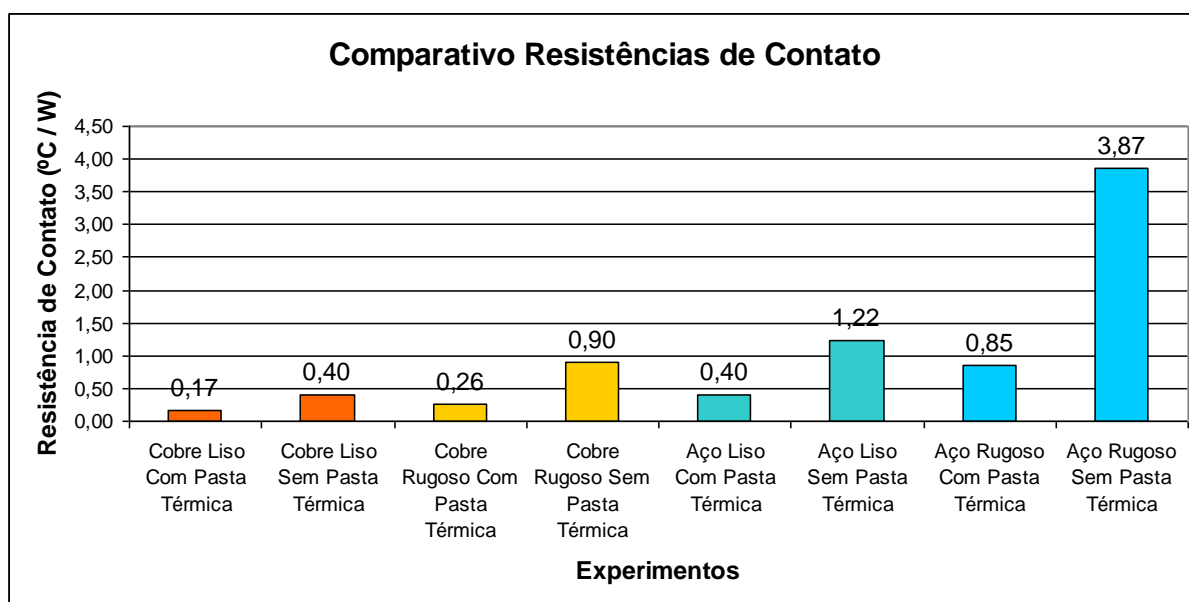


Figura 27 – Gráfico Comparativo das Resistências de Contato

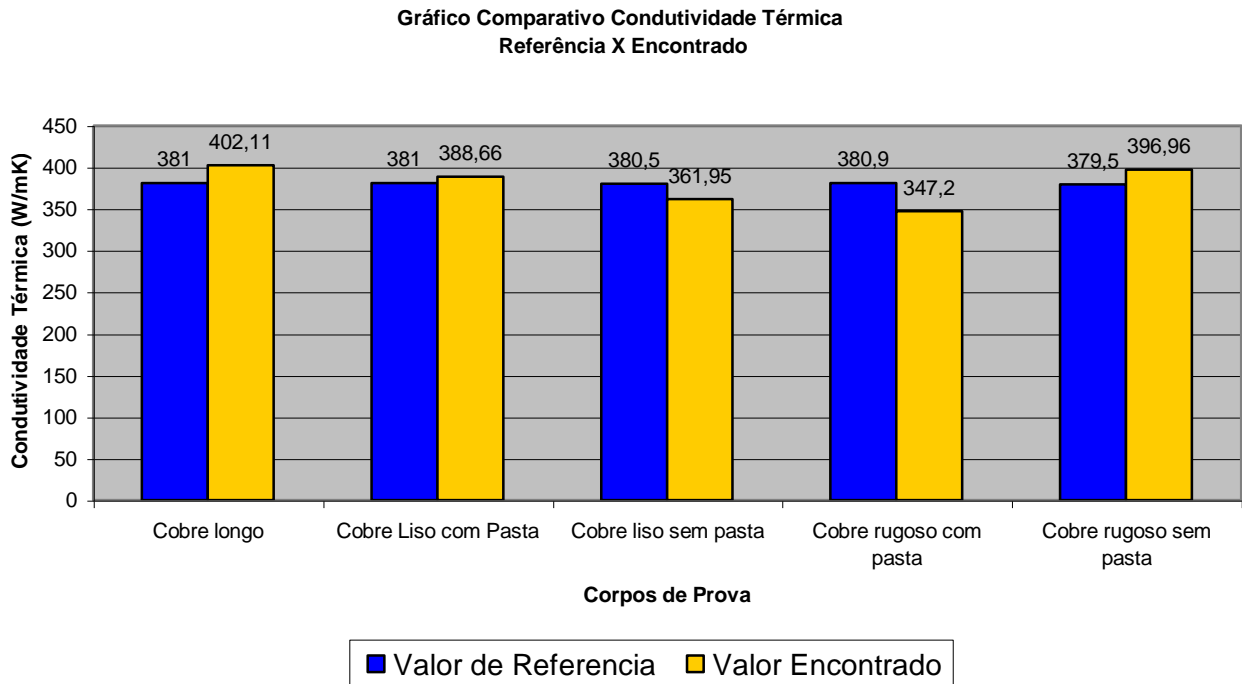


Figura 28 – Gráfico Comparativo Condutividade Térmica Referência X Encontrado (Cobre)

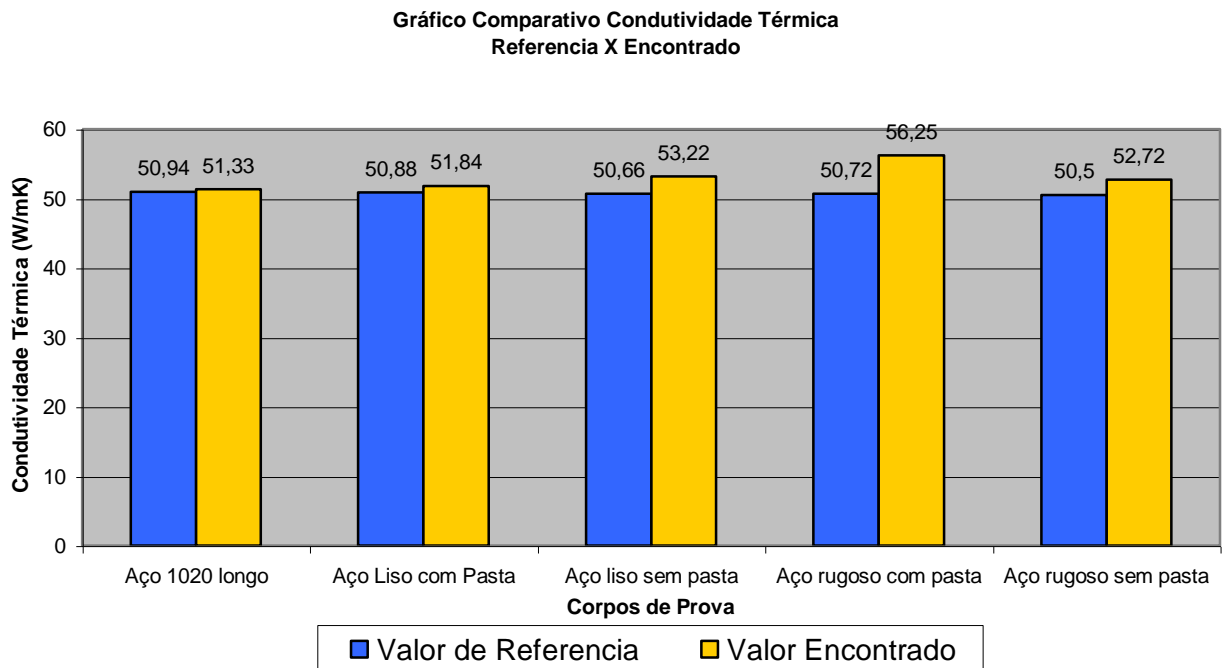


Figura 29 – Gráfico Comparativo Condutividade Térmica Referência X Encontrado (Aço)

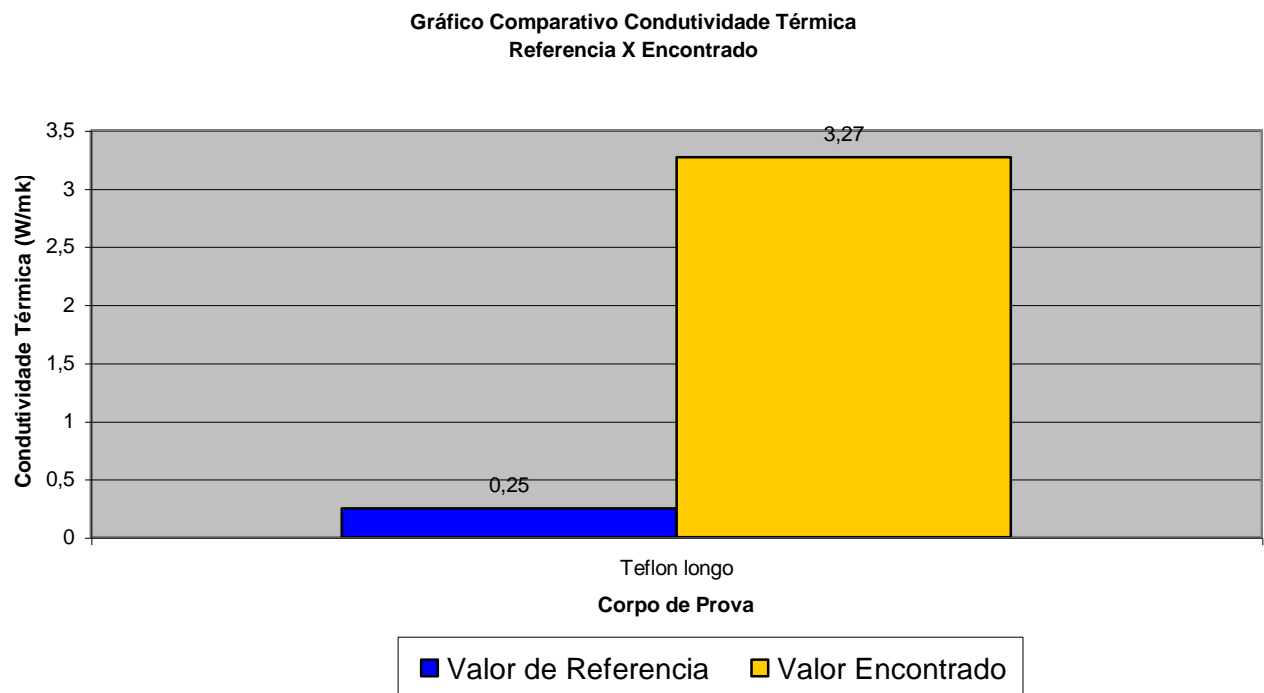


Figura 30 – Gráfico Comparativo Condutividade Térmica Referencia X Encontrado (Teflon®)

## 9) TRABALHOS FUTUROS

Com a análise das principais dificuldades enfrentadas e dos resultados obtidos, tem-se a certeza de que vários trabalhos podem ser desenvolvidos a fim de melhorar a eficiência do experimento e aprofundar o estudo do tema discutido e apresentado nesse projeto.

Uma das principais dificuldades na realização do experimento é a medição da vazão de água na saída do aparelho. Essa dificuldade acaba por gerar erros que causam alguns desvios nos resultados. Uma sugestão seria a melhoria desse sistema de medição. A inclusão de um rotâmetro e alguma técnica ou sistema que diminuísse a geração de bolhas no interior da tubulação de saída de água do equipamento e que garantisse a pressão constante de água do calorímetro seria ideal.

A análise dos resultados mostra o quão interessante são as conclusões acerca das resistências de contato. Um trabalho futuro pode ser baseado somente no cálculo das resistências de contato de vários metais ou no cálculo dessas resistências para um único metal, mas variando amplamente a rugosidade das faces em contato.

Outro ponto que pode vir a se tornar um trabalho futuro seria a análise da condutividade de materiais de baixo coeficiente de condutividade térmica. Foi feita uma tentativa de medição do coeficiente de condutividade térmica do Teflon®, porém os resultados mostraram a ineficiência do equipamento na realização da medição para um corpo de prova longo. Portanto o estudo estaria voltado em como tornar essa medição viável. Uma possibilidade seria criar um corpo de prova bem curto de Teflon®.

A análise da variação do efeito da pressão entre os corpos de prova também poderia se tornar um projeto futuro.

E por fim, a redução das incertezas pela melhoria do isolamento térmico da tampa do equipamento.

Portanto, listando os projetos futuros, temos as seguintes sugestões:

- Melhoria do sistema de medição de vazão;
- Resistência de contato de outros metais;

- Resistência de contato variando amplamente a rugosidade;
- Resistência de contato variando a pressão entre os corpos de prova;
- Análise da condutividade de materiais de baixa condutividade térmica com corpos de prova de dimensões apropriadas;
- Melhoria no isolamento da tampa.

## REFERÊNCIAS

- [1] INCROPERA, FRANK P.; WITT, DAVID P. DE . **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990
- [2] HOLMAN, J. P. **Transferência de Calor**, 3 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1983
- [3] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. **Manual para elaboração e normalização de dissertações e teses**, 3 ed. Rio de Janeiro
- [4] MANTELLI, MÁRCIA B.H.; MILANEZ, FERNANDO H. **Theoretical and experimental studies of a bi-metallic heat switch for space applications**, 2003
- [5] DUSEL, E.C.; ZHAO, C.L.; GRUJICIC, M. **The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packaging**, 2004
- [6] Em: <http://www.periodicos.capes.gov.br>
- [7] Em:  
[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010414282004000500014&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010414282004000500014&script=sci_arttext&tlng=pt)
- [8] Em: <http://gamesbrasil.uol.com.br/artigos.php?numero=30>
- [9] Em: <http://myspace.eng.br/eng/term/trmc2.asp>
- [10] G.CUSSONS Ltd. **P5687 Thermal Conductivity Apparatus**, 1974

## ANEXO I

Análise química da amostra:

Operator: nishida

Client: none

Job: Job 2005

Spectrum label: Cobre eletrolit Prof Rogerio pon

System resolution = 89 eV

Quantitative method: ZAF ( 3 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

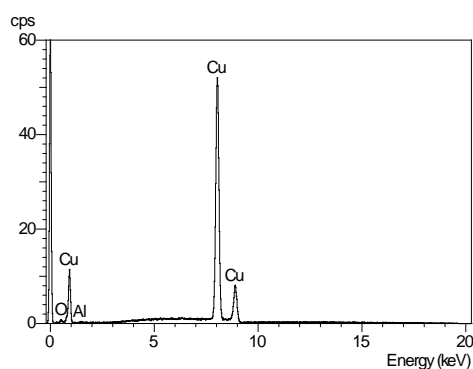
O K Quartz 01/12/93

Al K Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 23/11/93

Cu K Cu 01/12/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
O K	ED	0.55	2.13
Al K	ED	0.13	0.29
Cu K	ED	99.33	97.58
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma



SEMQuant results. Listed at 5:00:19 PM on 7/4/05

Operator: nishida

Client: none

Job: Job 2005

Spectrum label: Cobre eletr Pof Rogerio Ufes G



System resolution = 89 eV

Quantitative method: ZAF ( 1 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

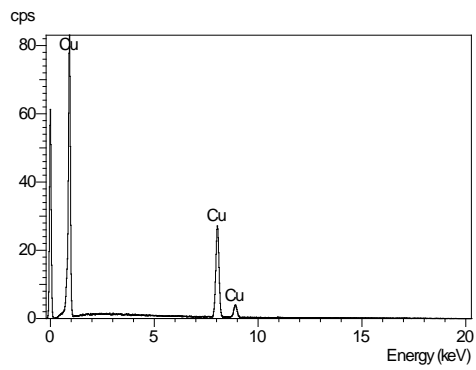
1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

Cu K Cu 01/12/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
Cu K	ED	100.00	100.00
Total		100.00	100.00

\* = <2 Sigma



## ANEXO II

## Análise de incertezas

Quando se mede uma grandeza, o seu valor é dado pelos algarismos lidos pelo operador na escala de medição e mais um algarismo avaliado a critério dele.

Esse algarismo duvidoso, de certa forma, está afetado de uma incerteza. Como geralmente não se sabe se o valor dessa incerteza é para mais ou para menos, adota-se um valor  $\pm\Delta$ . Esse valor trata-se da incerteza absoluta.

Quando pegamos o valor da incerteza absoluta de uma medida e dividimos pelo valor da própria medida temos o valor da incerteza relativa.

Analisando os dados obtidos através dos experimentos, constata-se que a maior incerteza se encontra na medida da temperatura dos termopares. As leituras no multímetro não contem casas decimais, o que gera uma incerteza de  $\pm 0,5$  °C.

Fazendo-se a análise da propagação das incertezas, que vai desde o primeiro cálculo, o cálculo do Q (eq. 1) até o cálculo da  $R_{tc}$  (eq. 3), temos que o valor das incertezas relativas percentuais para os dados calculados chegam à:

- Q:  $\pm 0,16\%$  (Taxa de calor transferido)
- K:  $\pm 0,68\%$  (Coeficiente de condutividade térmica)
- $R_{tc}$ : 25% (Resistência Térmica de Contato)

Nota-se um valor alto de incerteza relativa percentual para a resistência térmica de contato. Esse valor deve-se principalmente a incerteza da temperatura. Como temos uma diferença de temperatura as incertezas se somam, chegando a  $\pm 1$ °C. A incerteza dessa diferença somada a incerteza do Q é a responsável pelo alto valor da incerteza relativa percentual.