

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELIPE BAPTISTA NISHIDA**

**DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE CALOR COM  
MICRORANHURAS FABRICADAS POR ELETROEROSÃO A FIO**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2016**

FELIPE BAPTISTA NISHIDA

**DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE CALOR COM  
MICRORANHURAS FABRICADAS POR ELETROEROSÃO A FIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Área de Concentração: Térmicas e Fluido

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

Coorientador: Prof. Dr. Paulo H. D. dos Santos

PONTA GROSSA

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa  
n.10/16

N724 Nishida, Felipe Baptista

Desenvolvimento de tubos de calor com microranhuras fabricadas por  
eletroerosão a fio / Felipe Baptista Nishida. -- Ponta Grossa, 2016.  
139 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná. Ponta Grossa, 2016.

1. Tubos de calor. 2. Estrutura capilar. 3. Usinagem por eletroerosão. 4.  
Isolamento térmico. I. Alves, Thiago Antonini. II. Santos, Paulo Henrique Dias  
dos. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Título de Dissertação Nº **4/2016**

### **DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE CALOR COM MICRORANHURAS FABRICADAS POR ELETROEROSÃO A FIO**

Por

**Felipe Baptista Nishida**

Esta dissertação foi apresentada às **10 horas** de **26 de janeiro de 2016** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Térmica e Fluidos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

---

**Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos**  
(DEM-FE-IS/UNESP)

---

**Prof. Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos (DAMEC-CT/UTFPR) – Co-orientador**

---

**Prof. Dr. Angelo Marcelo Tuset**  
(DAMAT-PG/UTFPR)

---

**Prof. Dr. Thiago Antonini Alves (DAMEC-PG/UTFPR) - Orientador**



Visto do Coordenador:

---

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukaszewicz**  
Coordenador do PPGEM  
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

Dedico este Trabalho à minha esposa,  
Megan; aos meus pais, Sussumu e Tânia; aos  
meus irmãos, Mariana e Ricardo; e aos meus  
avós, Giácomo e Elza.

## AGRADECIMENTOS

Estes parágrafos não poderão expressar toda minha gratidão por aqueles aqui citados assim como não serão suficientes para atender todas as pessoas importantes que fizeram parte dessa etapa de minha vida.

Agradeço principalmente a Deus, que é a fonte de toda a vida;

Agradeço ao Professor Dr. Thiago Antonini Alves, pela orientação, respeito, exemplo de profissionalismo e amizade;

Agradeço ao Professor Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos, pela co-orientação e dedicação;

Agradeço aos Professores Drs. Ricardo Alan Verdú Ramos e Ângelo Marcelo Tusset por participar da banca examinadora deste Trabalho;

A todos os professores do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa (DAMEC/UTFPR/PG), pelo apoio;

À minha querida esposa e companheira Megan, pelo amor, carinho, paciência e incentivo;

Aos meus pais, aos meus irmãos, aos meus avós, à toda minha família e amigos, pela confiança e apoio;

À Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR/Campus Ponta Grossa, por custear, no mês de abril de 2015, o valor de R\$ 400,00 destinado à confecção das microranhuras dos três tubos utilizados.

À Capes por fazer esse Mestrado possível através da bolsa de auxílio financeiro.

O único tirano que aceito neste mundo é a  
pequena voz silenciosa que há dentro de mim.

Mahatma Gandhi

## RESUMO

NISHIDA, Felipe Baptista. **Desenvolvimento de Tubos de Calor com Microranhuras Fabricadas por Eletroerosão a Fio**. 2016. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

Neste trabalho, o processo de eletroerosão a fio (*wire electrical discharge machining* ou *wire-EDM*) foi utilizado como um método de fabricação alternativo para a confecção de microranhuras axiais em tubos de calor. Com isso, material foi retirado ao invés de ser adicionado ao invólucro do tubo de calor para a concepção da estrutura capilar, contribuindo para a redução de massa no dispositivo passivo de transferência de calor por mudança de fase. Uma modelagem baseada no projeto térmico e nos limites operacionais (limites capilar, de arrasto, viscoso, sônico e de ebulição) foi proposta para os tubos de calor com microranhuras axiais de geometria semicircular como estrutura capilar considerando diferentes definições disponíveis na literatura. Estes modelos, implementados no *software* EES<sup>TM</sup> (*Engineering Equation Solver<sup>TM</sup>*), foram utilizados como ferramenta para o projeto dos tubos de calor ranhurados propostos. Os tubos de calor foram produzidos a partir de um tubo reto de cobre com um diâmetro externo de 9,45 mm, um diâmetro interno de 6,20 mm e um comprimento total de 200 mm. O fluido de trabalho utilizado foi água deionizada e os tubos de calor foram carregados com uma razão de preenchimento de 60 % do volume do evaporador. O condensador foi resfriado por convecção forçada de ar, a seção adiabática foi isolada por uma fita de fibra de vidro e o evaporador foi aquecido utilizando um resistor elétrico em fita de liga de níquel-cromo e isolado do ambiente externo por um isolamento térmico aeronáutico. Os tubos de calor foram testados experimentalmente para inclinações de operação iguais a 0°, 45°, 90°, 225° e 270° com relação ao plano horizontal, sob cargas térmicas compreendidas entre 5 W e 50 W. Os resultados experimentais do desempenho térmico dos tubos de calor mostraram que as microranhuras axiais fabricadas pelo processo de eletroerosão a fio como estrutura capilar funcionaram com sucesso em todos os casos estudados. Além disso, na maioria dos casos estudados, o tubo de calor com microranhuras apresentou um melhor desempenho térmico quando comparado com um tubo de calor contendo tela metálica como estrutura capilar.

**Palavras-chave:** Tubo de calor, Estrutura capilar, Eletroerosão a fio, Desempenho térmico, Investigação experimental.



## ABSTRACT

NISHIDA, Felipe Baptista. **Development of Heat Pipes with Microgrooves Fabricated by Wire Electrical Discharge Machining**. 2016. 139 p. Dissertation (Masters in Mechanical Engineering) - Federal Technology University of Parana. Ponta Grossa, 2016.

In this Master's Dissertation an alternative fabrication method (wire electrical discharge machining, or wire-EDM) was used to manufacture axial microgrooves in heat pipes. This specific process allows one to remove material from the pipe's container, in order to conceive the capillary structure, contributing with the mass reduction of the passive two-phase heat transfer device. A model was proposed based on the thermal project and the operational limits (capillary, entrainment, viscous, sonic and boiling). A semicircular groove geometry was anticipated for heat pipes with axial grooves as wick structure, according to different theories available in the literature. These models were implemented in the software EES (Engineering Equation Solver) and were used as a tool for the project of the proposed heat pipes. The heat pipes were manufactured from a straight copper pipe with external diameter of 9.45 mm, inner diameter of 6.20 mm and total length of 200 mm. Water was the working fluid and the loading filling ratio was 60% of the evaporator volume. The condenser was cooled by air forced convection, the adiabatic section was insulated with fiberglass and the evaporator was heated by a stripe electrical resistor, made from a nickel-chrome alloy and it was insulated with aeronautic insulation. The heat pipes were experimentally tested in different positions, tilted with inclinations of 0°, 45°, 90°, 225° e 270° with the horizontal, under different heat loads varying from 5 W to 50 W. The experimental results showed that the axial grooves manufactured by the Wire-EDM process worked satisfactorily in all analyzed cases. In most of the cases, the heat pipe with grooves showed a better performance when compared with the heat pipe with metallic mesh.

**Keywords:** *Heat pipe, Capillary structure, Wire electrical discharge machining, Thermal performance, Experimental investigation.*

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Diagrama esquemático de um tubo de calor.....   | 22 |
| Figura 2 - Estruturas capilares de tubos de calor.....   | 33 |
| Figura 3 - Ilustração do equipamento e sistema de inspeção do filme de óleo. 1- plugue de borracha, 2 - barra flutuante, 3 - cavidade do óleo, 4 - corretor do molde, 5 - esferas rotativas, 6 - mandril flutuante, 7 - molde de redução ..... | 38 |
| Figura 4 - Imagens da sessão transversal das microranhuras .....   | 41 |
| Figura 5 - Imagem do mandril (a) e tubos de cobre com microranhuras axiais internas (b)....  | 42 |
| Figura 6 - Estrutura capilar fabricada.....  | 44 |
| Figura 7 - Resultados experimentais para os limites capilar e de ebulição .....  | 45 |
| Figura 8 - Geometria da superfície do evaporador .....   | 47 |
| Figura 9 - Superfície com microranhuras .....  | 49 |
| Figura 10 - Processo de fabricação da região porosa compósita.....   | 51 |
| Figura 11 - Diagrama esquemático do aparato de teste de elevação capilar .....   | 52 |
| Figura 12 - Tipos de microranhuras axiais usinadas em tubos de cobre .....   | 57 |
| Figura 13 - Diagrama esquemático das dimensões das microranhuras.....  | 58 |
| Figura 14 - Resistência térmica equivalente de um tubo de calor.....   | 61 |
| Figura 15 - Esquema de resistências térmicas simplificado .....  | 65 |
| Figura 16 - Variação da curvatura do menisco como função da posição inicial.....   | 67 |
| Figura 17 - Típica distribuição de pressão em um tubo de calor.....  | 68 |
| Figura 18 - Esquema ilustrativo para o diâmetro do vapor de microranhuras retangulares.....  | 71 |
| Figura 19 - Tubos com diferentes configurações geométricas de microranhuras .....  | 86 |
| Figura 20 - Microranhuras em detalhe .....   | 86 |
| Figura 21 - Posicionamento dos termopares no tubo de calor (em [mm]) .....   | 93 |
| Figura 22 - Inclinação do tubo de calor em relação à horizontal .....  | 97 |

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

|   |    |
|---|----|
| Fotografia 1 - Eletroerosão a fio.....  | 54 |
| Fotografia 2 - Processo de eletroerosão a fio no tubo de calor de cobre.....  | 86 |
| Fotografia 3 - Banho ultrassônico utilizado na limpeza do tubo de calor e seus componentes.....   | 87 |
| Fotografia 4 - Tubo, tampas e capilar.....  | 88 |
| Fotografia 5 - Tubo de cobre após a soldagem.....   | 88 |
| Fotografia 6 - Bomba de vácuo e tubo de calor.....  | 89 |
| Fotografia 7 - Estação de preenchimento dos tubos de calor .....  | 90 |
| Fotografia 8 - Clipagem e selagem do capilar de cobre .....   | 91 |
| Fotografia 9 - Bancada experimental para realização de testes.....  | 92 |
| Fotografia 10 - Tubo de calor com sistema de aquecimento .....  | 94 |
| Fotografia 11 - Tubo de calor com fita de fibra de vidro na seção adiabática e termopares fixados .....   | 94 |
| Fotografia 12 - Tubo de calor com sistema de aquecimento, termopares, fita de fibra de vidro na seção adiabática e isolamento térmico aeronáutico ..... | 94 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|   |     |
|---|-----|
| Gráfico 1 - Faixa de temperatura de operação para fluidos de trabalho comumente utilizados .....  | 36  |
| Gráfico 2 - Figura de Mérito para alguns fluidos de trabalho .....  | 37  |
| Gráfico 3 - Temperatura de operação em função do $q_{teórico}$ .....  | 80  |
| Gráfico 4 - Limite capilar em função da temperatura de operação .....   | 82  |
| Gráfico 5 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e sem inclinação (0 °).....  | 98  |
| Gráfico 6 - Distribuição de temperaturas de operação em regime <i>quasi</i> permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °) .....   | 99  |
| Gráfico 7 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 45 ° de inclinação .....   | 100 |
| Gráfico 8 - Distribuição de temperaturas de operação em regime <i>quasi</i> permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação .....   | 101 |
| Gráfico 9 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 90 ° de inclinação .....   | 102 |
| Gráfico 10 - Distribuição de temperaturas de operação em regime <i>quasi</i> permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação .....  | 103 |
| Gráfico 11 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 225 ° de inclinação .....   | 104 |
| Gráfico 12 - Distribuição de temperaturas de operação em regime <i>quasi</i> permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação ..... | 105 |
| Gráfico 13 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 270 ° de inclinação .....   | 106 |
| Gráfico 14 - Distribuição de temperaturas de operação em regime <i>quasi</i> permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 270 ° de inclinação ..... | 107 |
| Gráfico 15 - Temperatura de operação em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes inclinações .....  | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Gráfico 16 - Resistência térmica em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranuras do Tipo #1 para diferentes inclinações.....                 | 109 |
| Gráfico 17 - Temperatura de operação em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranuras do Tipo #2 para diferentes inclinações.....             | 113 |
| Gráfico 18 - Resistência térmica em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranuras do Tipo #2 para diferentes inclinações.....                 | 114 |
| Gráfico 19 - Temperatura de operação em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranuras do Tipo #3 para diferentes inclinações.....             | 117 |
| Gráfico 20 - Resistência térmica em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranuras do Tipo #3 para diferentes inclinações.....                 | 118 |
| Gráfico 21 - Comparação do comportamento térmicos entre os tubos de calor ranhurados e um tubo de calor contendo uma tela metálica como estrutura capilar..... | 122 |
| Gráfico 22 - Máxima potência dissipada ao tubo de calor em função da inclinação para diferentes estruturas capilares.....                                      | 123 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 - Resistências térmicas de um tubo de calor.....  | 63 |
| Quadro 2 - Condutividade térmica efetiva, $k_{eff}$ , para diferentes estruturas capilares.....  | 64 |
| Quadro 3 - Raio capilar efetivo, $r_{c,eff}$ , para diferentes estruturas capilares.....         | 70 |
| Quadro 4 - Diâmetro do vapor, $D_v$ , para diferentes estruturas capilares .....                 | 71 |
| Quadro 5 - Área transversal da estrutura capilar, $A_{mp}$ , para diferentes estruturas .....    | 72 |
| Quadro 6 - Permeabilidade, $K$ , para diferentes estruturas porosas .....                        | 72 |
| Quadro 7 - Expressões para o coeficiente de atrito do vapor, $F_v$ .....                         | 73 |
| Quadro 8 - Expressões para o coeficiente de arrasto do vapor, $f_v Re_v$ , e constante $C$ ..... | 75 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Superfícies do evaporador .....  | 47  |
| Tabela 2 - Dimensões das microranhuras em função do diâmetro do fio da eletroerosão .....   | 58  |
| Tabela 3 - Valores representativos das resistências térmicas .....  | 62  |
| Tabela 4 - Temperaturas de operação do projeto térmico dos três tubos de calor com microranhuras em função da potência dissipada, tubo de calor na horizontal (0 °) .....                             | 81  |
| Tabela 5 - Temperaturas de operação do limite capilar dos três tubos de calor com microranhuras em função da potência dissipada, tubo de calor na horizontal (0 °) .....                              | 83  |
| Tabela 6 - Características do tubo de calor.....  | 85  |
| Tabela 7 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °).....                     | 99  |
| Tabela 8 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação .....                    | 101 |
| Tabela 9 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação .....                    | 102 |
| Tabela 10 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação .....                  | 104 |
| Tabela 11 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 270 ° de inclinação .....                  | 106 |
| Tabela 12 - Temperatura de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em regime <i>quasi</i> permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C]) .....       | 109 |
| Tabela 13 - Resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em regime <i>quasi</i> permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C/W])..... | 110 |
| Tabela 14 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °).....                    | 111 |
| Tabela 15 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação .....                   | 111 |
| Tabela 16 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação .....                   | 111 |
| Tabela 17 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação .....                  | 112 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 18 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 270 ° de inclinação .....                  | 112 |
| Tabela 19 - Temperatura de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em regime <i>quasi</i> permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C]) .....       | 114 |
| Tabela 20 - Resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em regime <i>quasi</i> permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C/W])..... | 115 |
| Tabela 21 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °).....                    | 115 |
| Tabela 22 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação .....                   | 116 |
| Tabela 23 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação .....                   | 116 |
| Tabela 24 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação .....                  | 116 |
| Tabela 25 - Temperatura de operação em regime <i>quasi</i> permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 270 ° de inclinação .....                  | 117 |
| Tabela 26 - Temperatura de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 em regime <i>quasi</i> permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C]) .....       | 118 |
| Tabela 27 - Resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 em regime <i>quasi</i> permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C/W])..... | 119 |



## LISTA DE SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| Capes    | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| CNC      | Comando Numérico Computadorizado                            |
| CPU      | <i>Central Processing Unit</i>                              |
| EES      | <i>Engineering Equation Solver</i>                          |
| EDM      | <i>Electrical Discharge Machining</i>                       |
| EUA      | Estados Unidos da América                                   |
| Damec    | Departamento Acadêmico de Mecânica                          |
| LabCT    | Laboratório de Controle Térmico                             |
| Labtucal | Laboratório de Tubos de Calor                               |
| NASA     | <i>National Aeronautics and Space Administration</i>        |
| PCB      | <i>Printed Circuit Board</i>                                |
| PPGEM    | Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica            |
| UFSC     | Universidade Federal de Santa Catarina                      |
| URSS     | União das Repúblicas Socialistas Soviéticas                 |
| UTFPR    | Universidade Tecnológica Federal do Paraná                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| $A$       | Área  | $[m^2]$     |
| $C$       | Constante dependente do número de <i>Mach</i> | $[\ ]$      |
| $c_p$     | Calor específico à pressão constante          | $[J/kg.K]$  |
| $c_v$     | Calor específico ao volume constante          | $[J/kg.K]$  |
| $D$       | Diâmetro                                      | $[m]$       |
| $F$       | Coefficiente de atrito                        | $[Pa]$      |
| $f$       | Fator de atrito de <i>Darcy-Weisbach</i>      | $[\ ]$      |
| $g$       | Aceleração da gravidade                       | $[m/s^2]$   |
| $h$       | Coefficiente convectivo                       | $[W/m^2.K]$ |
| $h_{lv}$  | Calor latente de vaporização                  | $[J/kg]$    |
| $K$       | Permeabilidade da região porosa               | $[m^2]$     |
| $k$       | Condutividade térmica                         | $[W/m.K]$   |
| $L$       | Comprimento do tubo de calor                  | $[m]$       |
| $l$       | Comprimento                                   | $[m]$       |
| $M$       | Figura de mérito                              | $[W/m^2]$   |
| $\dot{m}$ | Vazão mássica                                 | $[kg/s]$    |
| $Ma$      | Número de <i>Mach</i>                         | $[\ ]$      |
| $N$       | Número de microranhuras                       | $[\ ]$      |
| $p$       | Pressão                                       | $[Pa]$      |
| $q$       | Taxa de transferência de calor                | $[W]$       |
| $r$       | Raio  | $[m]$       |
| $r_n$     | Raio das bolhas de vapor                      | $[m]$       |
| $R$       | Resistência                                   | $[1/K]$     |
| $R_g$     | Constante do gás                              | $[J/kg.K]$  |
| $Re$      | Número de <i>Reynolds</i>                     | $[\ ]$      |
| $T$       | Temperatura                                   | $[K]$       |
| $v$       | Velocidade                                    | $[m/s]$     |
| $w_f$     | Espessura da crista entre microranhuras       | $[m]$       |
| $y_c$     | Altura capilar do fluido                      | $[m]$       |
| $z$       | Dimensão relacionada ao espaçamento da tela   | $[m]$       |

## Letras Gregas

|          |                                 |                      |
|----------|---------------------------------|----------------------|
| $\alpha$ | Coeficiente de expansão linear  | [1/K]                |
| $\gamma$ | Razão de calores específicos    | [ ]                  |
| $\delta$ | Profundidade da microranhura    | [m]                  |
| $\theta$ | Ângulo de contato               | [ ° ]                |
| $\mu$    | Viscosidade dinâmica            | [Pa.s]               |
| $\rho$   | Massa específica                | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\sigma$ | Tensão superficial              | [N/m]                |
| $\phi$   | Diâmetro do fio de eletroerosão | [m]                  |
| $\psi$   | Ângulo do tubo com a horizontal | [ ° ]                |

## Subscritos

|              |                           |
|--------------|---------------------------|
| <i>a</i>     | Arrasto                   |
| <i>adiab</i> | Adiabático                |
| <i>b</i>     | Ebulição                  |
| <i>bc</i>    | Bombeamento capilar       |
| <i>cond</i>  | Condensador               |
| <i>c</i>     | Capilar                   |
| <i>eff</i>   | Efetivo                   |
| <i>evap</i>  | Evaporador                |
| <i>ext</i>   | Externo                   |
| <i>fr</i>    | Fluido de resfriamento    |
| <i>g</i>     | Gravitacional             |
| <i>h</i>     | Hidráulico                |
| <i>int</i>   | Interno                   |
| <i>l</i>     | Líquido                   |
| <i>m</i>     | Médio                     |
| <i>máx</i>   | Máximo                    |
| <i>o</i>     | Estagnação                |
| <i>p</i>     | Parede                    |
| <i>mf</i>    | Mudança de fase do fluido |
| <i>ref</i>   | Referência                |
| <i>s</i>     | Superficial               |
| <i>sat</i>   | Saturação                 |

|             |                    |
|-------------|--------------------|
| <i>so</i>   | Sônico             |
| <i>t</i>    | Total              |
| <i>v</i>    | Vapor              |
| <i>vis</i>  | Viscoso            |
| <i>mp</i>   | Meio poroso        |
| <i>wire</i> | Fio                |
| <i>II</i>   | Hidrostática axial |
| +           | Normal             |
| $\infty$    | Ambiente externo   |

### **Superescritos**

|   |          |
|---|----------|
| ' | Inercial |
| “ | Viscosa  |

## SUMÁRIO

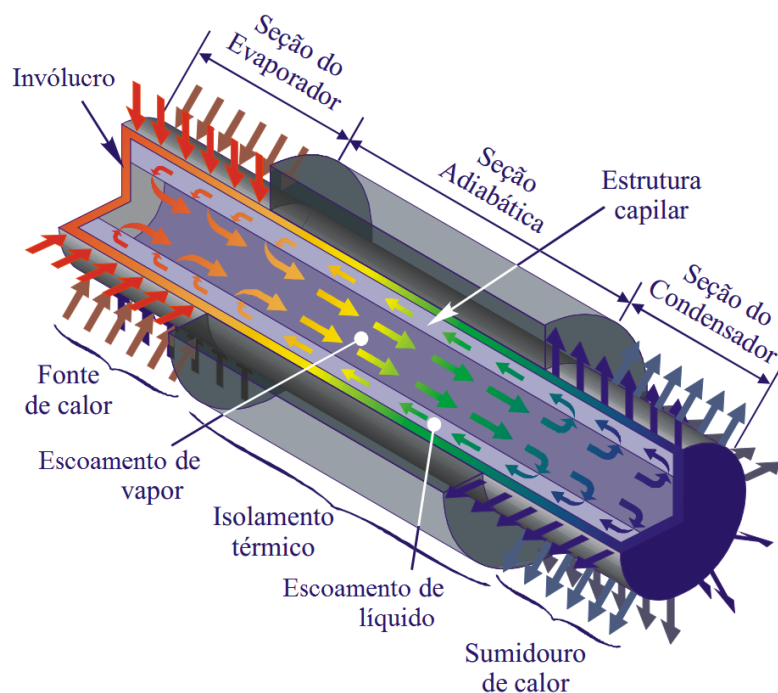
|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                   | <b>22</b> |
| 1.1      | MOTIVAÇÃO.....  | 23        |
| 1.2      | OBJETIVOS.....  | 26        |
| 1.2.1    | Objetivo Geral .....                                      | 26        |
| 1.2.2    | Objetivos Específicos .....                               | 26        |
| 1.3      | ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....                          | 26        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                         | <b>29</b> |
| 2.1      | HISTÓRIA DOS TUBOS DE CALOR.....                          | 29        |
| 2.2      | PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM TUBO DE CALOR .....          | 31        |
| 2.2.1    | Invólucro.....  | 32        |
| 2.2.2    | Estrutura Capilar.....                                    | 32        |
| 2.2.3    | Fluido de Trabalho .....                                  | 35        |
| 2.2.3.1  | Compatibilidade .....                                     | 36        |
| 2.2.3.2  | Figura de Mérito .....                                    | 37        |
| 2.3      | REVISÃO DA LITERATURA.....                                | 38        |
| 2.4      | ELETROEROSÃO A FIO .....                                  | 54        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                   | <b>57</b> |
| 3.1      | CARACTERÍSTICAS DAS MICRORANHURAS DOS TUBOS DE CALOR..... | 57        |
| 3.2      | PROJETO TÉRMICO .....                                     | 58        |
| 3.3      | LIMITES DE OPERAÇÃO .....                                 | 66        |
| 3.3.1    | Limite Capilar.....                                       | 67        |
| 3.3.1.1  | Chi (1976).....   | 68        |
| 3.3.1.2  | Peterson (1994).....                                      | 74        |
| 3.3.1.3  | Reay <i>et al.</i> (2014) .....                           | 76        |
| 3.4      | ANÁLISE TEÓRICA DOS TUBOS DE CALOR.....                   | 79        |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>                          | <b>84</b> |
| 4.1      | CONSTRUÇÃO DOS TUBOS DE CALOR COM MICRORANHURAS.....      | 84        |
| 4.1.1    | Características dos Tubos de Calor .....                  | 84        |
| 4.1.2    | Fabricação das Microranhuras Axiais .....                 | 85        |
| 4.1.3    | Limpeza do Tubo de Calor e Componentes .....              | 87        |
| 4.1.4    | Montagem.....   | 87        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.5    | Teste de Estanqueidade .....   | 88         |
| 4.1.6    | Procedimento de Vácuo.....   | 88         |
| 4.1.7    | Preenchimento dos Tubos de Calor com o Fluido de Trabalho .....              | 89         |
| 4.2      | TESTES EXPERIMENTAIS .....   | 92         |
| 4.2.1    | Aparato Experimental.....  | 92         |
| 4.2.2    | Procedimento Experimental .....  | 94         |
| 4.3      | ANÁLISE DE INCERTEZA .....   | 95         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO.....</b>                             | <b>96</b>  |
| 5.1      | TUBO DE CALOR COM MICRORANHURAS DO TIPO #1 .....                             | 98         |
| 5.2      | TUBO DE CALOR COM MICRORANHURAS DO TIPO #2 .....                             | 110        |
| 5.3      | TUBO DE CALOR COM MICRORANHURAS DO TIPO #3 .....                             | 115        |
| 5.4      | COMPARAÇÃO ENTRE TUBOS DE CALOR COM DIFERENTES ESTRUTURAS<br>CAPILARES ..... | 119        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                    | <b>124</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>125</b> |
|          | <b>CÁLCULO DOS DEMAIS LIMITES DE OPERAÇÃO .....</b>                          | <b>130</b> |
|          | <b>CÁLCULO DE INCERTEZAS.....</b>  | <b>140</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Tubos de calor são dispositivos passivos, baseados na transferência de calor por mudança de fase, capazes de transferir grandes quantidades de calor com uma pequena diferença de temperatura. Líquido saturado dentro do tubo evapora pela absorção de calor de uma fonte quente e vapor saturado condensa pela dissipação de calor para uma fonte fria.

O tubo de calor consiste de um tubo selado cujas superfícies internas são revestidas por uma estrutura capilar como mostrado na Figura 1. O tubo de calor tem a pressão interna parcialmente controlada, sendo inicialmente evacuado, preenchido com um fluido de trabalho para encharcar completamente a estrutura capilar e posteriormente selado. Quando um tubo de calor opera em um ciclo fechado de duas fases com líquido e vapor presentes, o fluido de trabalho permanece na condição de saturação, desde que a temperatura de operação esteja entre o ponto de congelamento e o ponto de estado crítico.



**Figura 1 - Diagrama esquemático de um tubo de calor**  
**Fonte: Mantelli (2009).**

Como ilustrado na Figura 1, os tubos de calor são compostos por três regiões distintas: o evaporador ou região de adição de calor, o condensador ou região de rejeição de calor e a seção adiabática. A pressão dentro de um tubo de calor é igual à pressão de saturação do fluido de trabalho na temperatura de operação. O calor que é aplicado à região do evaporador faz com

que o fluido de trabalho situado na estrutura capilar do evaporador entre em ebulição e aumente a pressão naquela região. A alta temperatura e a correspondente alta pressão nessa região resulta em um escoamento de vapor, através do centro do tubo, para a extremidade mais fria do tubo, região do condensador, onde libera seu calor latente de vaporização e condensa o fluido de trabalho. O líquido é absorvido pela estrutura capilar e bombeado de volta à região do evaporador por pressão capilar. Desta forma, um tubo de calor pode transportar calor continuamente do evaporador ao condensador desde que a pressão na estrutura capilar seja grande o suficiente para bombear o líquido condensado de volta à região do evaporador. A região adiabática pode ou não existir, e isso está diretamente relacionado com a aplicação do tubo de calor.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Tubos de calor são dispositivos passivos de transferência de calor de duas fases que se tornaram muito populares nas últimas décadas devido a sua eficiência e conveniência e passaram a ser utilizados em muitas aplicações comerciais (CHEN *et al.*, 2007).

A aplicação de tubos de calor pode ser observada em muitas áreas industriais como: a eletrônica, aeroespacial, telecomunicações, alimentícias, entre outras. Nas últimas décadas, muita atenção tem sido dada aos melhoramentos de tubos de calor; incluindo a aparência, otimização de projeto, miniaturização e redução de massa, buscando dissipar mais energia na forma de calor por unidade de área (fluxo térmico). Ainda, para um satélite de telecomunicação, mais de 100 tubos de calor são requeridos (HOA *et al.*, 2003).

Em projetos atuais de dispositivos eletrônicos, como CPU's, cartões gráficos, placas de vídeo, entre outros, é necessário diminuir o tamanho e dissipar muito mais calor gerado quando comparado aos produtos antecessores, dessa maneira os equipamentos atuais de resfriamento devem absorver mais calor e serem mais compactos (YANG *et al.*, 2012).

O contínuo aumento na potência de dissipação dos eletrônicos, juntamente a uma redução em suas dimensões, ocasionam condições severas de temperaturas que requerem soluções de resfriamento nestes componentes, portanto, há situações em que as necessidades de resfriamento não podem ser satisfeitas por técnicas convencionais, tais como simples aletas resfriadas a ar. A demanda por técnicas avançadas, a busca por melhoramentos e inovações tecnológicas em resfriamento de equipamentos eletrônicos tem sido elevada nas últimas duas



décadas, através de desenvolvimentos industriais e atividades de pesquisa acadêmica (NISHIDA, 2012).

Baseado nessas necessidades, pouca massa e alto desempenho se tornam os objetivos-chave para um projeto de tubo de calor atual, especialmente para aplicações na indústria de eletrônicos e aeroespacial. Nesse sentido, tubos de calor foram desenvolvidos visando uma transferência de calor mais eficiente, devido ao gradiente de temperatura ser pequeno no calor latente de vaporização. Eles são dispositivos de relativamente simples fabricação e, portanto, de custo reduzido quando a sua geometria é favorável. Contudo, à medida que suas dimensões são reduzidas, a complexidade de fabricação aumenta, resultando em um consequente aumento de seu custo (FAGHRI, 2014).

Um tubo de calor com ranhuras axiais tem parede mais delgada, menor massa e menor resistência ao calor quando comparado com um tubo de calor com tela metálica como estrutura capilar, porém é limitado por técnicas de fabricação convencionais como fresagem, brochamento ou mandrilagem. Uma estrutura capilar com poros pequenos, é difícil de se obter por tais métodos, por isso um tubo de calor com ranhuras axiais fabricado por meios convencionais tende a ter uma baixa pressão capilar, assim como menor capacidade de transferência de calor. Muitos pesquisadores aplicaram ideias de projetos de novas configurações e novos processos de fabricação para estruturas capilares, com o intuito de aumentar a força capilar e a capacidade de transferência de calor. Na atualidade, abordagens mais avançadas de fabricação estão sendo utilizadas, como o processo de eletroerosão de metais e ataque químico, tornando possíveis a confecção de ranhuras triangulares, trapezoidais, senoidais e retangulares. Neste contexto, a questão principal está na dificuldade em diminuir a dimensão da geometria de estruturas capilares, assim, novas técnicas de fabricação para ranhuras axiais em tubos de calor são de grande importância (WANG *et al.*, 2009).

O presente trabalho procura investigar um método de fabricação alternativo para a fabricação de microranhuras axiais em tubos de calor. O método estudado é a eletroerosão a fio (*Wire Electrical Discharge Machining* ou *Wire-EDM*), onde material é retirado ao invés de ser adicionado ao tubo para a concepção da estrutura capilar, o que contribui para redução de massa do dispositivo. A técnica permite que se fabrique microranhuras de formas complexas e a precisão deste método é muito alta, podendo a largura e a profundidade da microranhura serem quase tão pequenas quanto a dimensão do diâmetro do fio da eletroerosão.

A disponibilidade do processo é uma de suas maiores vantagens, pois qualquer equipamento de eletroerosão a fio está pronto para o procedimento, basta apenas o alinhamento inicial da peça a ser usinada com as coordenadas da máquina-ferramenta. Enquanto que, em

outros processos, com técnicas convencionais, é necessário a utilização de uma ferramenta especial para a confecção das microranhuras. Por exemplo, no caso de fresamento, é necessária a fabricação de uma fresa especial com um material muito resistente, pois as dimensões são desafiadoras, o que agrega um valor muito alto ao processo. Para a técnica de brochamento, a brocha a ser fabricada também pode agregar um valor muito alto, além do fato de que cada brocha será específica somente para uma dada configuração geométrica de microranhura.

O processo de eletroerosão a fio se torna viável para a fabricação de microranhuras axiais em um tubo de calor, quando o tubo a ser trabalhado está reto, ou seja, não empenado, e as microranhuras devem ter as dimensões mínimas iguais a do diâmetro do fio utilizado. Outra grande vantagem da técnica da eletroerosão a fio para a fabricação de microranhuras em tubos de calor, é a versatilidade do processo; não há uma geometria fixa que deve ser seguida, como é o caso dos métodos citados anteriormente. É um método excelente para protótipos na fase de projeto de um tubo de calor, pois permite testar diversas configurações geométricas das microranhuras, variando-se o espaçamento entre elas, largura, profundidade, formato, diâmetro interno do tubo, dentre outros parâmetros.

Esse processo de fabricação não visa a produção em larga escala, devido ao fato de que a máquina-ferramenta deve ser alinhada para cada tubo fabricado, mesmo que eles sejam idênticos. No entanto, o processo se torna muito econômico quando se trata da confecção de poucas unidades, onde a fabricação de um molde ou de ferramentas especiais não é viável, como por exemplo, no caso de uma única unidade de trocador de calor assistido por tubos de calor; no caso de tubos de calor com microranhuras de geometrias exóticas; ou ainda com um foco acadêmico, explorando diferentes geometrias de microranhuras e confrontando os dados experimentais com as teorias de projeto térmico e limites de tubos de calor já existentes na literatura. Portanto, uma estimativa da produção deve ser feita para que se analise a viabilidade dos processos disponíveis no mercado.

Devido aos motivos descritos e a escassez dos trabalhos relacionados ao processo de eletroerosão a fio em tubos de calor na revisão bibliográfica consultada, uma investigação experimental dos tubos de calor com microranhuras axiais fabricadas pelo novo processo será realizada e os resultados serão comparados com os resultados de um tubo de calor com tela metálica.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é o desenvolvimento de tubos de calor com microranuras axiais fabricadas através do processo de eletroerosão a fio.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- i) Projetar teoricamente os tubos de calor levando em consideração suas respectivas resistências térmicas e limites operacionais;
- ii) Construir e fabricar os tubos de calor com microranuras axiais pelo processo de eletroerosão a fio;
- iii) Testar experimentalmente o desempenho térmico dos tubos de calor construídos com diferentes inclinações e cargas térmicas considerando água como fluido de trabalho.
- iv) Comparar o desempenho térmico dos tubos de calor propostos com um tubo de calor com tela metálica como estrutura capilar.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A estrutura desta Dissertação de Mestrado foi subdividida em seis capítulos e dois apêndices. Neste capítulo inicial, são apresentados uma breve introdução, a motivação e os objetivos do Trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados a fundamentação teórica sobre tubos de calor, seus componentes, seu funcionamento, a revisão da literatura associada ao problema de tubos de calor ranhurados, para fornecer uma perspectiva mais ampla do que já foi considerado em estudos anteriores, e uma breve explicação do método de fabricação por eletroerosão a fio.

O Capítulo 3 apresenta a descrição do problema considerado, a modelagem matemática utilizada (projeto térmico e limites operacionais) e a análise teórica proveniente do projeto dos tubos de calor.

No Capítulo 4 são apresentados o processo de construção do tubo de calor, os aparatos e o procedimento utilizados na fase experimental.

No Capítulo 5 serão apresentadas a análise dos resultados experimentais para os tubos de calor com microranhuras e uma comparação entre os resultados experimentais dos tubos de calor com estruturas porosas (microranhuras e tela metálica).

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta a teoria dos limites de arrasto, viscoso, sônico e de ebulição e a adaptação das correlações desses limites, utilizados para verificação do projeto térmico.

O Apêndice B apresenta informações a respeito dos cálculos realizados para obtenção das incertezas experimentais.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo são apresentados um resumo da história dos tubos de calor desde sua invenção até a atualidade, uma breve explicação do funcionamento de um tubo de calor e seus componentes mais importantes e uma revisão dos trabalhos pertinentes ao tema do presente estudo. Por fim, será apresentada uma sucinta descrição do processo de eletroerosão a fio.

### 2.1 HISTÓRIA DOS TUBOS DE CALOR

Dos diversos tipos de sistemas que transportam energia na forma de calor, o tubo de calor é um dos mais eficientes conhecidos na atualidade. A vantagem de usar um tubo de calor ao invés de outro método convencional é que uma grande quantidade de calor pode ser transportada através de uma pequena área transversal por uma distância considerável sem nenhuma fonte de energia adicional para o sistema. Ainda, a simplicidade de projeto e fabricação, pequeno gradiente de temperatura entre as extremidades, e a capacidade de transportar altas taxas de energia na forma de calor a diferentes temperaturas, são todas características únicas de tubos de calor (FAGHRI, 2014).

O antecessor do tubo de calor, o tubo Perkins, foi introduzido pela família Perkins entre a metade do século XIX e XX, através de diversas patentes no Reino Unido. A maioria dos tubos Perkins não possuíam estrutura capilar, ou seja, eram movidos pela gravidade (termossifões), nos quais a transferência de calor era feita pela mudança de fase (calor latente de vaporização). O projeto do tubo Perkins mais próximo ao de um tubo de calor atual, foi patenteado por Jacob Perkins em 1836. Esse projeto era de um tubo fechado contendo uma pequena quantidade de água, operando como um ciclo de duas fases (FAGHRI, 1995).

Gaugler (1944) introduziu o conceito de tubo de calor na *General Motors Corporation* quando estava trabalhando com problemas de refrigeração e imaginou um dispositivo que poderia evaporar um líquido em um ponto acima da região onde a condensação ocorreria, sem a necessidade de trabalho adicional para elevar o líquido. O dispositivo consistia de um tubo selado no qual o líquido absorvia calor em uma região mais elevada, fazendo com que o mesmo evaporasse. O vapor então se moveria para baixo ao longo do tubo, onde se condensaria novamente e liberaria seu calor latente de vaporização. Feito isso, ele se moveria então para cima ao longo do tubo por pressão capilar para recomençar o processo. Para mover o líquido de

volta ao ponto mais alto, Gaugler sugeriu o uso de uma estrutura capilar de ferro sinterizado. No entanto, esta ideia não foi usada na General Motors para o problema de refrigeração.

Trefethen (1962) ressuscitou a ideia do tubo de calor em parceria com o programa espacial norte americano. Um desenvolvimento mais sério começou em 1964 quando o tubo de calor foi reinventado independentemente e um registro de patente foi feito por George Grover em *Los Alamos National Laboratory* no Novo México. Grover *et al.* (1964) e Grover (1966) construíram muitos protótipos de tubos de calor, o primeiro deles utilizava água como fluido de trabalho e, posteriormente, utilizaram sódio para operações a 800 °C. Grover e seus colaboradores também demonstraram a efetividade dos tubos de calor como um dispositivo de transferência de calor de alto desempenho e propuseram diversas aplicações para seu uso.

Grover (1966) utilizou o nome “*heat pipe*” pela primeira vez oficialmente em uma patente registrada por ele em nome da Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos da América (*U.S. Atomic Energy Commission*), e descreveu o dispositivo quase exatamente como Gaugler, afirmando: “com certas limitações na maneira de seu uso, o tubo de calor pode ser considerado como uma estrutura sinérgica de engenharia que é equivalente a um material que possui uma condutividade térmica muito maior a de qualquer metal conhecido”. No registro de patente, Grover (1966) fez uma análise teórica de tubos de calor muito limitada, mas apresentou resultados experimentais obtidos a partir de tubos de calor de aço inoxidável com tela como estrutura capilar, e sódio, prata e lítio como fluidos de trabalho.

O primeiro reconhecimento do tubo de calor como um dispositivo térmico confiável foi feito com a divulgação dos resultados teóricos preliminares e ferramentas de projeto relatados por Cotter (1965), na primeira publicação de análise de tubo de calor. Após essa publicação, pesquisas foram iniciadas no mundo todo. O Laboratório de Energia Atômica do Reino Unido (*United Kingdom Atomic Energy Laboratory*) em Harwell, começou a desenvolver experimentos com tubos de calor de sódio, para o uso como conversores de diodo termiônicos. Além disso, cientistas passaram a conduzir trabalhos similares no Centro de Pesquisa Nuclear Conjunta (*Joint Nuclear Research Center*) em Ispra, na Itália, que se tornou o centro de pesquisa mais ativo fora dos EUA. Logo após isso, outros países como Alemanha, França e a antiga URSS, iniciaram pesquisas e incentivos na área.

Devido à ação capilar, tubos de calor podem operar em campos microgravitacionais sem nenhuma força externa ou bombeamento. Por isso, a maioria dos primeiros esforços foram direcionados a aplicações espaciais. No entanto, devido ao alto custo da energia, especialmente no Japão e Europa, tubos de calor e termossifões começaram a atrair a atenção da comunidade industrial no sentido de sua significância em aplicações terrestres para economia de energia.

Nos últimos anos, todos os países desenvolvidos estão ativamente envolvidos em pesquisa, desenvolvimento e comercialização de tubos de calor (GOLDSTEIN *et al.*, 2010).

Na última década, ocorreu uma grande transformação relacionada à tecnologia de tubos de calor e suas aplicações, devido à necessidade demasiada de resfriamento de componentes eletrônicos e sistemas de energia, assim como a invenção de novos tubos de calor. Milhares de tubos de calor são fabricados por mês desde que todos os computadores *laptops* modernos utilizam a tecnologia de tubos de calor para resfriar os processadores. Os *smartphones* mais modernos também incorporam tubos de calor para seu controle térmico, como, por exemplo, o pioneiro, Medias X N-06 E da NEC™, seguido pelo Xperia Z2 e Xperia Z3 da Sony™, os Lumia 950 e 950 XL da Nokia™, e os Iphone 6 e 6s da Apple™ (VR-ZONE, 2013). Além disso, pesquisa e desenvolvimento para novos tubos de calor como: tubos de calor em *loop*, microtubos de calor, tubos de calor miniatura e tubos de calor pulsantes, evoluíram o suficiente para o uso em muitas aplicações.

Uma quantia significativa de pesquisa e desenvolvimento fundamentais e aplicados tem sido desenvolvida desde 1985 na área de tubos de calor e termossifões devido ao grande potencial de uso dessa tecnologia para diversas aplicações (FAGHRI, 2014). Há uma vasta literatura publicada: muitos livros, monografias, dissertações, teses e artigos científicos em periódicos indexados, assim como vários simpósios internacionais e conferências internacionais sobre tubos de calor. Ainda, há um grande número de publicações e relatórios relacionados a tubos de calor, datados nas quatro últimas décadas.

## 2.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM TUBO DE CALOR

Para que funcionem corretamente, os tubos de calor devem possuir três componentes principais: o invólucro, que pode ser feito de vidro, cerâmica ou metal; a estrutura capilar que pode ser feita de fibra de vidro corrugada, pós metálicos sinterizados, telas metálicas, ou ranhuras; e o fluido de trabalho, que pode variar de nitrogênio e hélio, para baixas temperaturas, até metais líquidos, como lítio, potássio ou sódio, para altas temperaturas. Cada um desses três componentes é igualmente importante e minuciosa atenção deve ser dada ao tipo de substância, às propriedades termofísicas e à compatibilidade química e mecânica (PETERSON, 1994).



### 2.2.1 Invólucro

O invólucro do tubo de calor deve proporcionar uma certa estabilidade estrutural, portanto o mesmo deve ser fabricado a partir de um material que seja compatível com o fluido de trabalho e com a estrutura capilar, sendo resistente o suficiente para conter a pressão associada às temperaturas de saturação e de operação. Adicionalmente, o invólucro deve apresentar uma condutividade térmica alta a ponto de permitir uma transferência de calor efetiva entre a região de vapor e o meio externo. Além disso, o material deve ser resistente à corrosão que o meio externo pode ocasionar e, também, ser maleável o suficiente para ser conformado no tamanho e forma desejados (SHABANY, 2010).

### 2.2.2 Estrutura Capilar

A estrutura capilar em um tubo de calor deve ser capaz de retornar o fluido condensado para a região do evaporador, sendo o mecanismo pelo qual o fluido de trabalho escoar do condensador ao evaporador. Segundo Shabany (2010), as três propriedades mais importantes de estruturas capilares utilizadas em tubos de calor são: o tamanho do raio dos poros, a permeabilidade e a condutividade térmica. O raio do poro deve ser pequeno, se uma grande diferença de pressão capilar é requerida para bombear o líquido do condensador ao evaporador ou em casos onde se necessita uma alta capacidade de transporte de calor. A permeabilidade é inversamente relacionada à resistência da região porosa para com o escoamento de líquido e deve ser alta para se obter uma baixa queda de pressão do líquido na estrutura capilar. Maiores valores de condutividade térmica resultam em menores quedas de temperatura através da estrutura capilar, o que é uma condição favorável no projeto de um tubo de calor.

O tamanho do raio dos poros, a permeabilidade e a condutividade térmica da estrutura capilar, são propriedades contraditórias na maioria dos projetos. Por exemplo, para a obtenção de um escoamento de líquido com baixa resistência no qual o mesmo possa fluir mais livremente do condensador ao evaporador, é necessária uma estrutura de poros mais abertos e de alta permeabilidade. No entanto, poros menores são necessários quando se deseja aumentar a pressão de bombeamento capilar, por isso um balanço entre tais propriedades deve ser feito para a obtenção de uma condição de projeto ótima do meio poroso ou, ainda, o desenvolvimento

de meios porosos não-homogêneos, feitos de diferentes materiais ou através de uma estrutura capilar composta (PETERSON, 1998).

Na Figura 2 podem ser observados seis diferentes configurações de estruturas capilares e suas respectivas características principais: a) tela metálica, b) metal sinterizado, c) ranhuras axiais, d) anéis abertos, e) artéria aberta e f) artéria integrada.







| Tipo de Meio Poroso   | Bombeamento Capilar | Condutividade Térmica | Permeabilidade | Comentários   |
|---|---------------------|-----------------------|----------------|---|
| <br>A. Tela Metálica       | Alto                | Alta                  | Média-Baixa    | Única ou Múltiplas Camadas de Telas de Fio                      |
| <br>B. Metal Sinterizado  | Alto                | Média                 | Média-Baixa    | Partículas Esféricas Empacotadas, Metal em Fibra ou em Pó       |
| <br>C. Ranhuras Axiais   | Baixo               | Alta                  | Média-Alta     | Ranhuras Retangular, Circular, Triangular ou Trapezoidal        |
| <br>D. Anéis Abertos     | Baixo               | Baixa                 | Alta           | Tela de Fio Espaçada da Parede do Tubo                          |
| <br>E. Artéria Aberta    | Baixo               | Alta                  | Alta           | Tela de Fio Conformada em Artéria e Cobertura da Parede do Tubo |
| <br>F. Artéria Integrada | Alto                | Alta                  | Média-Alta     | Material Homogêneo com Artérias                                 |

Figura 2 - Estruturas capilares de tubos de calor  
Fonte: Adaptado de Faghri (1995).

A tela metálica é o tipo de estrutura capilar mais simples e mais comumente utilizada, ela é conformada em um gabarito e inserida dentro do tubo de calor. Após o posicionamento, o gabarito é retirado e a tela se mantém tensionada e em contato com a parede interna do tubo.

Estruturas de metal sinterizado são feitas pelo empacotamento de pequenas partículas de metal entre a parede interna do tubo e o modelo na forma de pó. O conjunto é aquecido e as partículas de metal se sinterizam entre eles e na parede interna do tubo. O mandril-modelo é feito de um material especial para que seja removido facilmente após finalizado o processo.

Estruturas de ranhuras axiais são feitas através de extrusão, brochamento, fresamento, dentre outros, internamente ao tubo. Existem muitos tipos de ranhuras de seções transversais retangular, triangular, trapezoidal ou circular. O desempenho de ranhuras axiais é excelente, desde que a aplicação do tubo de calor não seja de uma significativa elevação contra gravidade, uma vez que o tamanho das ranhuras é grande comparado aos poros da tela metálica ou do metal sinterizado, e, conseqüentemente, a pressão capilar é relativamente pequena. No entanto, a permeabilidade e a condutividade térmica são muito altas. Uma desvantagem desse tipo de estrutura é a dificuldade de usinar as ranhuras em tubos de calor mais longos e/ou de menor diâmetro, o que também está relacionado com um custo muito alto.

A estrutura de anéis abertos é simplesmente uma única volta de tela metálica, afastada da parede interna do tubo por meio de calços (um ponto de solda, por exemplo). Isso permite um escoamento de retorno ininterrupto entre a tela e o tubo, o que aumenta de forma significativa a permeabilidade do meio, mantendo uma alta pressão capilar. No entanto, a condutividade térmica desse tipo de estrutura é muito baixa, devido à baixa condutividade da maioria dos fluidos de trabalho.

A estrutura de artéria aberta combina duas características; um pequeno raio de poro para prover pressão capilar e um grande raio de poro para prover permeabilidade. É feita através de uma tela metálica ou de metal sinterizado, da maneira usual, porém uma pequena passagem é deixada ao longo do comprimento do tubo.

A estrutura capilar de artéria integrada nada mais é do que uma estrutura capilar homogênea (tela metálica ou metal sinterizado) com artérias embutidas, tem o mesmo princípio de fornecer uma alta pressão capilar conciliada com uma alta permeabilidade para o livre retorno do fluido de trabalho.

Algumas soluções alternativas foram desenvolvidas ao longo dos anos no estudo de tubos de calor com estruturas compostas. Estas estruturas possuem um tamanho de poro maior no centro do tubo de calor para que haja uma redução da queda de pressão naquela região devido

às forças viscosas e poros menores perto da parede do tubo de calor para garantir o bombeamento de fluido necessário. Um exemplo desse tipo de estrutura é o caso de tubos de calor feitos com dois ou mais tipos de telas metálicas de diferentes tamanhos de malha, chamados de tubos de calor de dupla malha. Além destas soluções, novas configurações de tubos de calor, que separam o escoamento de líquido do escoamento de vapor, são empregadas visando reduzir as forças cisalhantes resultantes do contrafluxo entre líquido condensado e vapor.

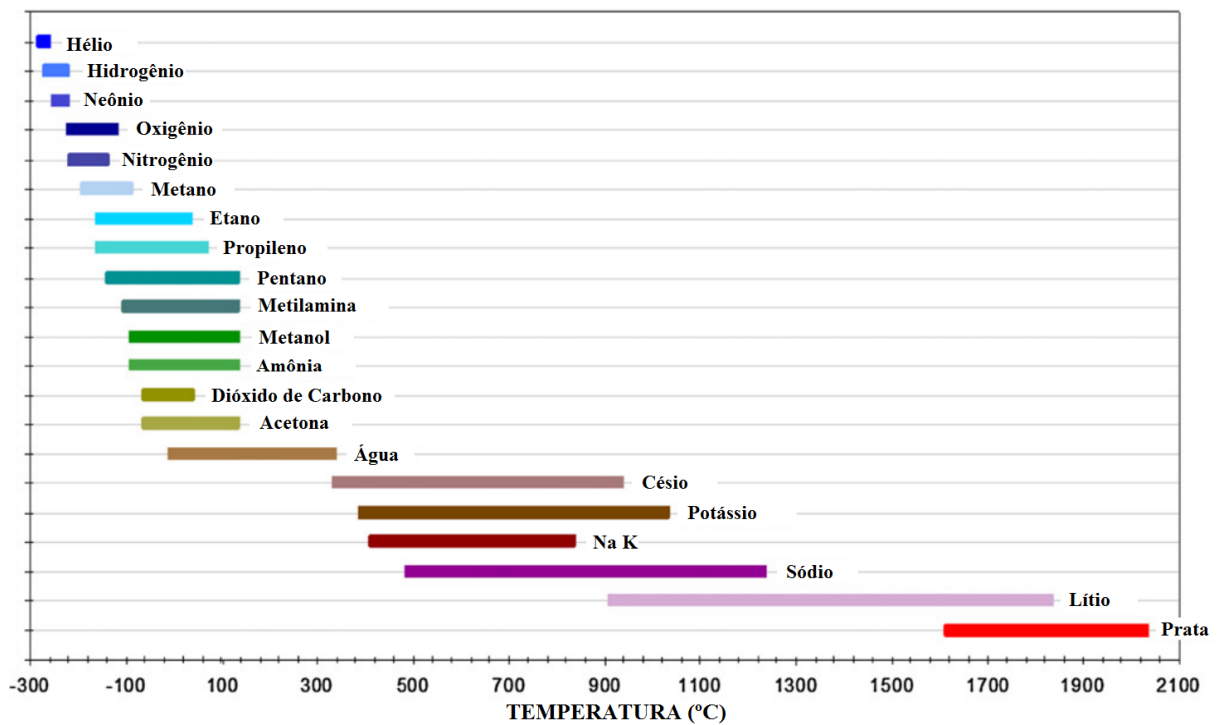
### 2.2.3 Fluido de Trabalho

Sendo a vaporização e a condensação do fluido contido em seu interior, a base da operação de um tubo de calor, a seleção de um fluido de trabalho adequado é um fator muito importante no projeto e na fabricação de tubos de calor. Atenção deve ser dada para que a faixa da temperatura de operação seja adequada à aplicação. As aplicações mais comuns envolvem o uso de tubos de calor com um fluido de trabalho que tem a temperatura de ebulição entre  $-25\text{ °C}$  e  $100\text{ °C}$ ; porém, tanto os tubos de calor criogênicos (operando na faixa de temperatura de  $-270\text{ °C}$  a  $-50\text{ °C}$ ) quanto os tubos de calor de metal líquido (operando na faixa de temperatura de  $450\text{ °C}$  a  $2.000\text{ °C}$ ), têm sido desenvolvidos e utilizados com sucesso. A maioria das aplicações em resfriamento de componentes eletrônicos, por exemplo, requerem a faixa de temperatura de  $25\text{ °C}$  a  $150\text{ °C}$ , tubos de calor com água são os mais comumente utilizados para tal aplicação (YANG *et al.*, 2012).

O Gráfico 1 mostra as faixas de temperaturas típicas para alguns fluidos de trabalho utilizados em tubos de calor. Por exemplo, nitrogênio é utilizável para uma faixa de temperatura de  $-230\text{ °C}$  a  $-150\text{ °C}$ ; prata é utilizada para a faixa de temperatura de  $1.600\text{ °C}$  a  $2.000\text{ °C}$ ; amônia é utilizada de  $-100\text{ °C}$  a  $150\text{ °C}$ , enquanto água é utilizada de  $0\text{ °C}$  a  $350\text{ °C}$ .

### 2.2.3.1 Compatibilidade

Além das propriedades termofísicas do fluido de trabalho, é necessário considerar outros fatores, tais como a compatibilidade de materiais e a molhabilidade do fluido de trabalho (PETERSON; PENG, 1993). Os materiais são selecionados de forma que sejam quimicamente compatíveis entre si e com o fluido de trabalho, pois reações químicas indesejáveis entre os materiais e a decomposição do fluido de trabalho podem acarretar a formação de gases não condensáveis ou problemas relacionados à corrosão. O efeito da formação de gases não condensáveis pode resultar na diminuição do desempenho do tubo de calor, podendo ocasionar a falha, pois o vapor não condensável se acumula no condensador que eventualmente estará entupido. Esse fenômeno tem fácil detecção devido à acentuada queda de temperatura na região do condensador e o surgimento de uma “ponta fria”.



**Gráfico 1 - Faixa de temperatura de operação para fluidos de trabalho comumente utilizados**  
 Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2012).

A maioria dos tubos de calor contendo água como fluido de trabalho são feitos de cobre, tubos de calor contendo prata são feitos de tungstênio e tubos de calor contendo amônia são feitos de alumínio ou de aço inoxidável (FAGHRI, 1995).

### 2.2.3.2 Figura de Mérito

Para o limite capilar, será mostrado que se a queda de pressão de vapor e a aceleração da gravidade puderem ser desprezadas, então as propriedades do fluido de trabalho que determinam o transporte de calor máximo podem ser combinadas para formar um parâmetro de comparação entre os fluidos de trabalho, conhecido como Figura de Mérito,  $M$ , e definido por Reay *et al.* (2014) como:

$$M = \frac{\rho_l \sigma h_{lv}}{\mu_l} \quad (2.1)$$

sendo que,  $\rho_l$  é massa específica do fluido de trabalho no estado líquido [ $kg/m^3$ ],  $\sigma$  é a tensão superficial do fluido de trabalho [ $N/m$ ],  $h_{lv}$  é o calor latente de vaporização do fluido de trabalho [ $J/kg$ ] e  $\mu_l$  é a viscosidade dinâmica do fluido de trabalho no estado líquido [ $Pa.s$ ].

O comportamento da Figura de Mérito,  $M$ , para alguns fluidos de trabalho em uma faixa de temperatura de  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  a  $150\text{ }^\circ\text{C}$  é mostrado no Gráfico 2.

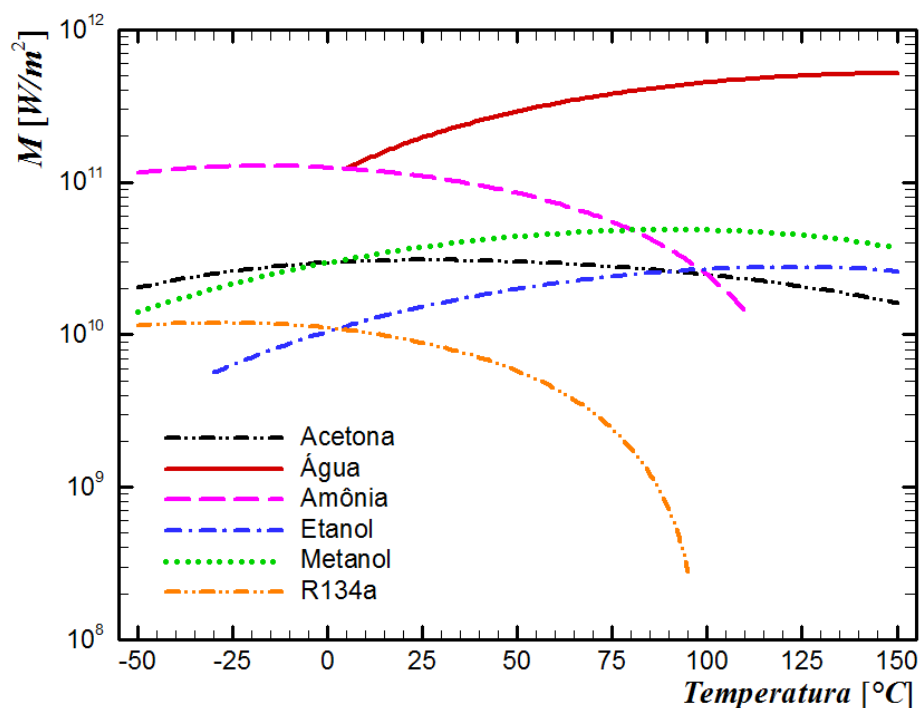
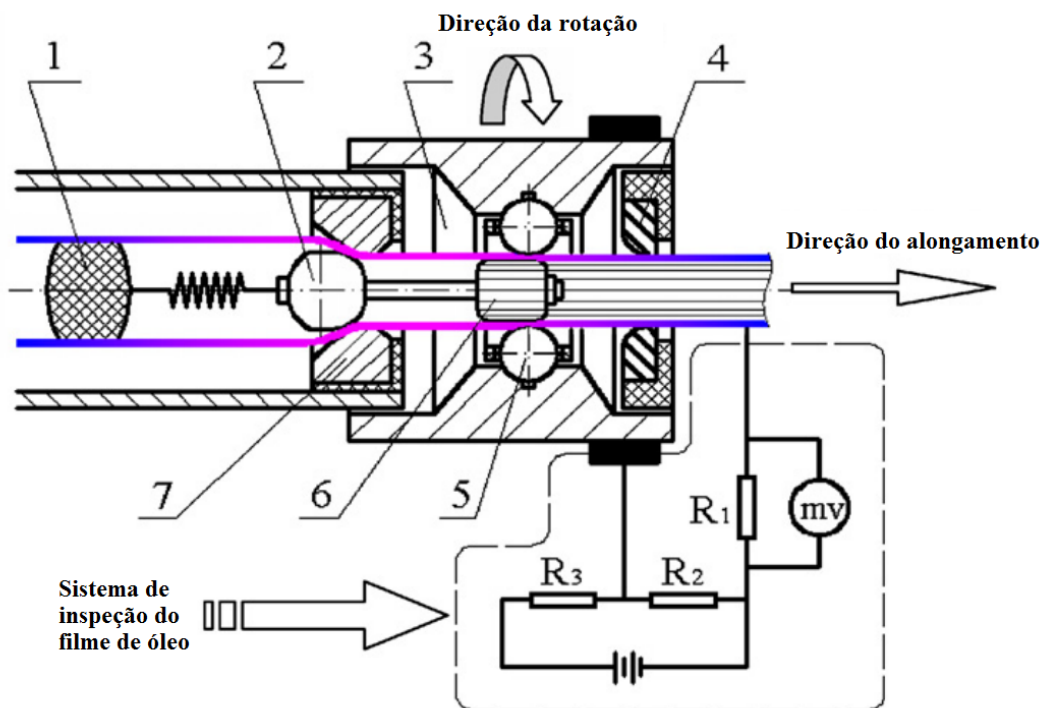


Gráfico 2 - Figura de Mérito para alguns fluidos de trabalho  
Fonte: Autoria própria.

Pode ser notado através do Gráfico 2, que dentre os fluidos de trabalho analisados, a água é o fluido de trabalho que proporcionará ao tubo de calor um maior potencial de transferência de calor para a faixa de temperatura entre 0 °C e 150 °C.

### 2.3 REVISÃO DA LITERATURA

Tang *et al.* (2006) apresentaram estudos experimentais de confecção de microranhuras no interior de tubos por conformação lubrificada rotativa de alta velocidade. Um mandril flutuante extruda as microranhuras na parede interna do tubo. Segundo os autores, a grande vantagem do processo lubrificado de alta velocidade de rotação é a baixa força requerida, portanto o método pode ser aplicado para tubos longos e delgados. O trabalho apresentou o mecanismo rotativo, a configuração geométrica do modelo da área rotativa, e os efeitos dos parâmetros de processo na qualidade da microranhura no interior dos tubos. Os experimentos foram feitos em uma máquina rotativa projetada e construída pelos próprios autores. A Figura 3 ilustra o dispositivo rotativo.



**Figura 3 - Ilustração do equipamento e sistema de inspeção do filme de óleo.**  
 1- plugue de borracha, 2 - barra flutuante, 3 - cavidade do óleo, 4 - corretor do molde,  
 5 - esferas rotativas, 6 - mandril flutuante, 7 - molde de redução  
 Fonte: Adaptado de Tang *et al.* (2006).

Quando o tubo de cobre era tracionado no sentido axial, as esferas giravam-no constantemente pela superfície externa; ao mesmo tempo, a pressão aumentava na cavidade especialmente projetada para a reciclagem de óleo e um filme de óleo de alta pressão era gerado a partir do aumento da velocidade de rotação das esferas. A alta pressão de óleo não só lubrificou as esferas rotativas e a parede do tubo eficientemente, mas também pressionava a superfície externa do tubo. O mandril flutuante extrudou a parede interna do tubo, e assim, as microranhuras foram formadas. Eles também utilizaram um método de resistência elétrica para identificar se o filme de óleo cobria toda a superfície de contato em rotação. Então, testando a resistência, o estado de lubrificação foi confirmado. Um modelo para descrever o processo de rotação foi desenvolvido.

Os parâmetros de processo foram analisados em relação à condição de total lubrificação dinâmica do filme de óleo, aos fatores que afetaram a profundidade da microranhura; a rugosidade da superfície externa do tubo; e a força de arrasto axial do procedimento. Eles analisaram a influência de cada um desses parâmetros na qualidade da conformação e, posteriormente, os otimizaram.

A condição de total lubrificação dinâmica do filme de óleo foi afetada principalmente pelo parâmetro: velocidade de rotação. O estado de lubrificação foi dividido em três estágios; lubrificação de contato, lubrificação mista e total lubrificação dinâmica do filme de óleo, que foi atingida na velocidade de 300 rps.

A profundidade da microranhura foi influenciada principalmente pela razão de espessura de parede e pela plasticidade do material. Com os demais parâmetros fixados, uma análise foi feita primeiramente entre a razão de espessura de parede e a profundidade da microranhura, e depois, entre o alongamento do material e a profundidade da microranhura. Na primeira, quando a razão passa de 1,16, seu efeito na profundidade diminui. Na segunda, quando o alongamento excede 50%, esse fator tem pouca influência na profundidade da microranhura.

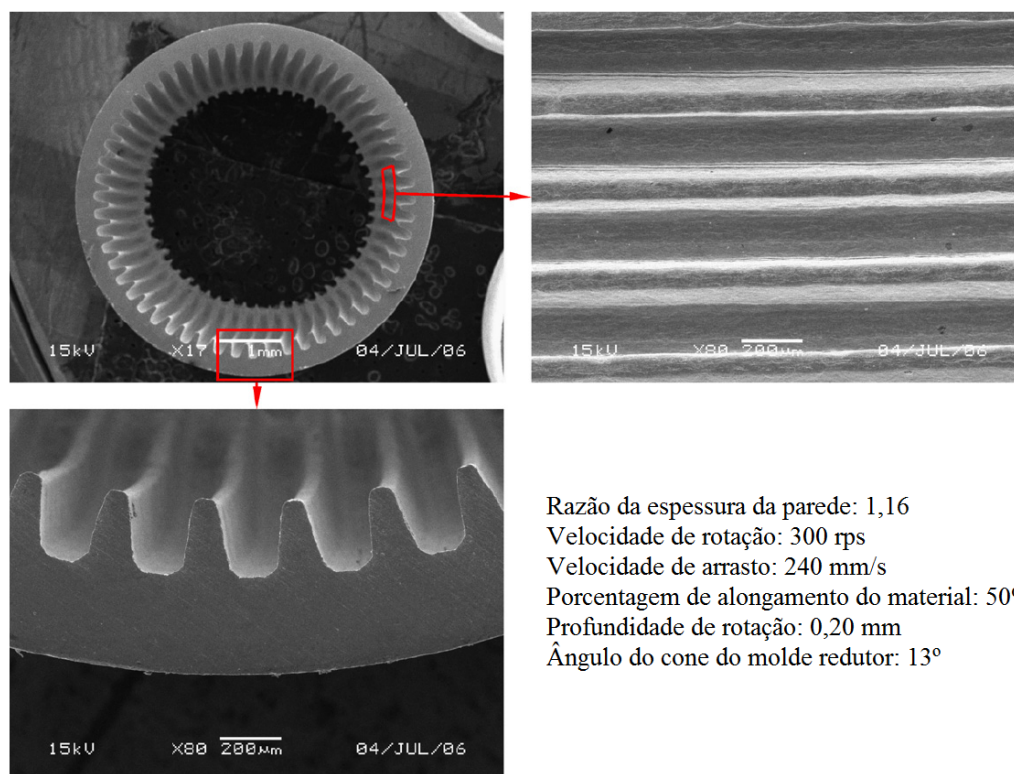
A rugosidade da superfície externa do tubo foi afetada pela razão de espessura de parede, plasticidade do material e viscosidade do lubrificante. Com os demais parâmetros novamente fixados, o valor da rugosidade da superfície é baixo se a razão de espessura estiver abaixo de 1,16, mas aumenta rapidamente quando a razão passa desse valor, e a qualidade da superfície decai, o que pode levar o tubo à quebra. Um aumento no alongamento é vantajoso para diminuir a rugosidade da microranhura, no entanto, quando exagerado, pode causar a quebra do tubo, pois a rugosidade externa aumenta muito quando o alongamento passa de 50%. Os autores constataram, a partir de resultados experimentais, que a rugosidade melhora



significativamente no caso do processo lubrificado quando comparado ao processo sem lubrificação. Com o aumento da velocidade de rotação, a rugosidade da superfície diminuiu. No estágio da lubrificação de contato, a rugosidade da superfície foi muito alta e decaiu muito pouco, mas no estágio de lubrificação mista, decaiu fortemente, e se mantém baixa até todo o estágio de total lubrificação dinâmica.

Além das análises dos parâmetros citados anteriormente, Tang *et al.* (2006) notaram que os resultados experimentais mostraram que a pressão dinâmica pode melhorar significativamente a estabilidade da rotação e a qualidade do acabamento da superfície; a espessura mínima do filme de óleo foi determinada conforme a velocidade de rotação e a viscosidade do óleo.

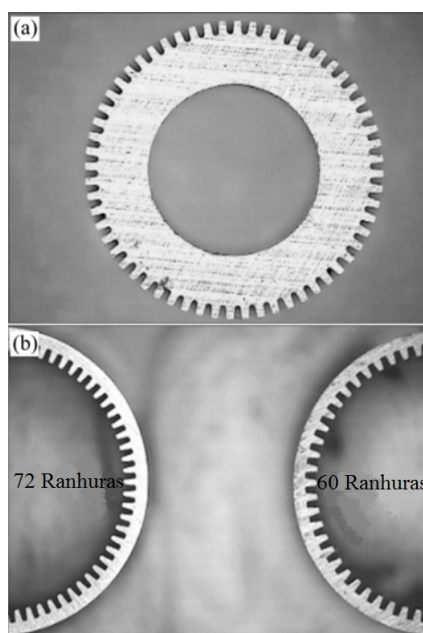
O melhoramento das condições de lubrificação dentro e fora do tubo, o preciso controle da profundidade de rotação e a otimização da estrutura do molde redutor e do mandril flutuante, são as principais medidas para assegurar a qualidade do tubo com microranhuras. Quando a razão da espessura de parede foi de 1,16, a velocidade de rotação de 300 rps, a velocidade de arrasto axial de 240 mm/s, o alongamento do material de 50%, a profundidade de rotação de 0,20 mm e o ângulo cone do molde redutor de 13°, as superfícies externa e interna do tubo tiveram um acabamento muito satisfatório. A Figura 4 mostra a seção transversal do tubo de calor com microranhuras finalizado.



**Figura 4 - Imagens da sessão transversal das microranhuradas**  
**Fonte: Adaptado de Tang *et al.* (2006).**

Portanto, Tang *et al.* (2006) concluíram que os principais fatores que afetaram a profundidade da microranhuira e a rugosidade da superfície foram: a razão de espessura da parede do tubo antes de conformado e depois de conformado, a plasticidade do material, a razão da velocidade de arrasto com a velocidade de rotação e o estado de lubrificação. A força axial do arrasto depende principalmente do atrito entre o mandril flutuante e a parede interna do tubo, do atrito entre o molde de redução e a superfície externa, e da resistência à deformação plástica na área do molde de redução e na área de rotação.

Li *et al.* (2008) utilizaram a mesma máquina rotativa de Tang *et al.* (2006) mostrada na Figura 3, porém confeccionaram um tubo de cobre com dimensões bem menores. O diâmetro externo do tubo tinha 7,0 mm e sua espessura de parede era de 0,6 mm. A seção transversal do mandril e dois tubos de cobre com microranhuradas internas axiais são mostrados na Figura 5.



**Figura 5 - Imagem do mandril (a) e tubos de cobre com microranhuras axiais internas (b)  
Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2008).**

Baseado nos experimentos, os fatores principais do processo incluem a geometria e a posição de trabalho do mandril, a profundidade de rotação, a velocidade de arrasto, a velocidade de rotação, o estado de lubrificação na área de contato e a temperatura de trabalho. Quanto ao mandril, os parâmetros geométricos e a posição de trabalho do mandril afetam a aparência e as configurações das microranhuras, o que, conseqüentemente afeta a capacidade de transferência de calor do tubo de calor.

Em relação aos parâmetros geométricos do mandril, as duas extremidades são arcadas e os dentes da extremidade frontal encontram o metal deformado primeiramente, auxiliando as forças de deformação, os momentos de torção e os impactos provenientes das esferas rotativas. Os dentes arcados têm a função de cortar e extrudar o material e a configuração dos dentes, controla os perfis das microranhuras.

Conforme a profundidade de rotação aumentava, a espessura da parede do tubo com microranhuras diminuía gradativamente. Com o aumento da velocidade de arrasto, a profundidade da microranhura se reduziu, porém, se esta velocidade atingisse um determinado valor, o tubo era facilmente quebrado. Se a velocidade de rotação planetária do corpo aumentasse, a força de arrasto e a rugosidade da superfície externa do tubo diminuían, e caso esta velocidade se mantivesse abaixo de 3000 rpm, o tubo de cobre era facilmente quebrado, a não ser que a velocidade de arrasto fosse muito baixa. Baseando-se nos experimentos da conformação das microranhuras, o filme de óleo dinâmico foi configurado na área de contato de rotação sob alta velocidade de rotação e condições de total preenchimento de óleo, o que

reduzia a resistência de arrasto e melhorava a qualidade da superfície do tubo durante a fabricação das microranhuras.

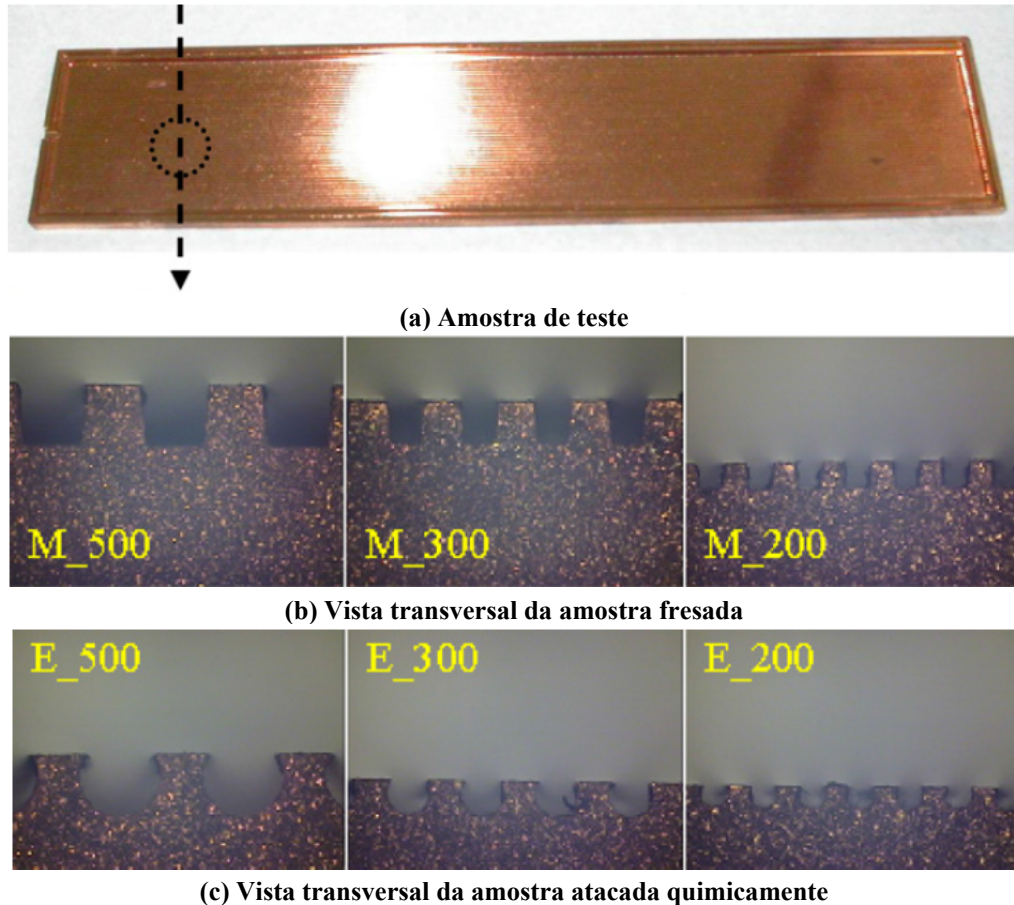
Os autores concluíram que o processo proposto é adequado para uma linha de fabricação industrial de tubos de calor de cobre ranhurados axialmente, o formato do mandril determinou o perfil geométrico das microranhuras e a posição do mandril afetou a profundidade e a trilha das microranhuras. Com o aumento da profundidade de rotação, a profundidade da microranhura aumentou e a espessura da parede diminuiu, o que fez com que o tubo se quebrasse facilmente. Quando a temperatura de trabalho foi menor do que 40 °C, não houve efeito significativo no processo, e quando foi maior do que 60 °C, o processo de rotação não pode ser continuado.

Chen *et al.* (2007) fabricaram microranhuras por dois processos diferentes: ataque químico e fresagem de precisão. Eles investigaram experimentalmente os limites capilar e de ebulição das microranhuras fabricadas, pois estes limites são frequentemente atingidos em operações comuns e ambos estão relacionados com a estrutura capilar. Água pura foi utilizada como fluido de trabalho. Diversas potências foram dissipadas à estrutura capilar para se mensurar o desempenho térmico através de medições de temperatura e visualização experimental. O estudo propôs um método simples para determinação dos limites de operação, do desempenho térmico e da seleção do processo de fabricação para o projeto da estrutura capilar.

Como mencionado, neste estudo, dois tipos de processos de fabricação, ataque químico e fresagem de precisão, foram desenvolvidos para confeccionar microranhuras como estrutura capilar em placas de cobre. O ataque químico utiliza a corrosão fotográfica, a qual inclui os seguintes passos: (1) revestimento foto resistente; (2) exposição à luz ultravioleta; (3) ataque com um ácido forte; e (4) remoção do revestimento foto resistente para fabricar as microranhuras. A fresagem de precisão utiliza uma fresadora controlada por uma máquina CNC para usinar as microranhuras.

A partir das fotografias mostradas na Figura 6, pode ser notado que as microranhuras da fresagem de precisão (denotadas pela letra M) são similares às microranhuras retangulares, enquanto as microranhuras do ataque químico (denotadas pela letra E) são praticamente microranhuras redondas ou cilíndricas devido à natureza anisotrópica do ataque químico em um metal homogêneo. O tamanho da amostra é 150 mm de comprimento, 30 mm de largura, 2 mm de espessura e a largura da microranhura teve a mesma largura da crista da microranhura

em todos os casos, esta dimensão foi chamada de “*Feature Size - FS*”; FS variou de 200  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$  tanto no processo de fresagem quanto no processo de ataque químico.



**Figura 6 - Estrutura capilar fabricada**  
**Fonte: Chen *et al.* (2007).**

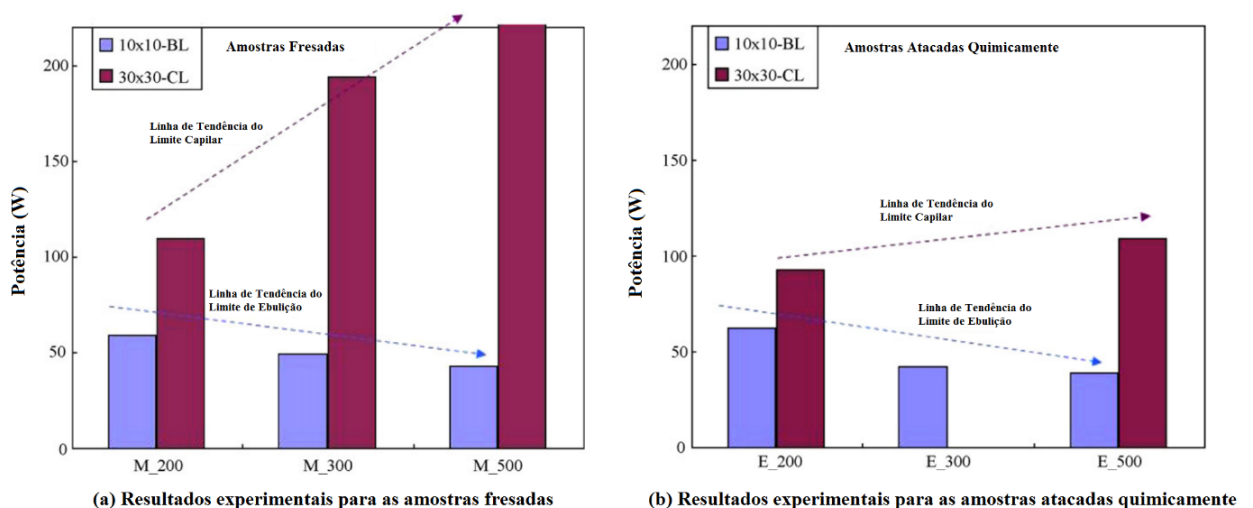
Um sistema de teste utilizado para monitorar as condições de escoamento e ebulição do fluido de trabalho incluem um microscópio, uma câmera digital, uma plataforma de teste, um gerador de potência, um sistema de aquisição de dados e um microcomputador. O aparato experimental contém um aquecedor, uma amostra, uma estação de preenchimento, um baquelite de isolamento, termopares do Tipo T e um reservatório.

Para observarem o que ocorre dentro de dispositivos de transferência de calor de duas fases quando os limites são alcançados, eles desenvolveram experimentos visuais de um tubo de calor ou câmara de vapor. Como pode ser observado na Figura 6 (a), os limites foram testados em uma câmara de vapor aberta através de termopares e observações pelo microscópio. Enquanto o calor era aplicado na estrutura capilar, os autores observavam, através de filmagens microscópicas, que a evaporação do fluido de trabalho ocorria em três passos: convecção natural, ebulição nucleada (limite de ebulição) e secagem do fluido de trabalho (limite capilar).

Eles desenvolveram testes experimentais com dois tipos de aquecedores para fornecer diferentes fluxos de calor às amostras: um aquecedor de 10 mm por 10 mm que gera menor potência, porém um alto fluxo de calor para identificar os limites de ebulição, e um aquecedor de 30 mm por 30 mm que gera uma maior potência para identificar os limites capilares.

As amostras com o mesmo FS, porém confeccionadas por diferentes processos, tiveram resultados parecidos para o limite de ebulição e bem diferente para o limite capilar. Os limites de ebulição para as amostras do mesmo tamanho: M\_500/E\_500 (com 500  $\mu\text{m}$ ), M\_300/E\_300 (com 300  $\mu\text{m}$ ) e M\_200/E\_200 (com 200  $\mu\text{m}$ ) são (43 W/39 W), (49 W/42 W) e (59 W/62 W), respectivamente. Os valores dos limites capilares das amostras fresadas são maiores do que aqueles das amostras atacadas quimicamente e variaram de 10 W a 100 W entre os dois processos. As microestruturas das amostras atacadas quimicamente podem ter resultado em forças capilares menores devido ao formato arredondado de microranhura.

Chen *et al.* (2007) concluíram que os dois processos resultaram não somente em diferentes formas de microranhuras, mas também em diferentes limites operacionais. Para tamanhos de microranhuras equivalentes, quando comparados os valores de limite de ebulição e de resistência térmica, não houve diferenças significativas entre as amostras fresadas e as atacadas quimicamente. Por outro lado, os limites capilares das amostras fresadas foram consideravelmente maiores do que o mesmo nas amostras atacadas quimicamente (Figura 7).



**Figura 7 - Resultados experimentais para os limites capilar e de ebulição**

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2007).

Eles verificaram os limites de ebulição e os limites capilares das amostras pelo método visual e por meio das temperaturas, e nos dois processos os limites convergiram satisfatoriamente. Após a comparação dos modelos teóricos simplificados, os testes experimentais se aproximam mais às linhas de tendência do que dos valores exatos calculados.

Com o aumento de FS, os limites de ebulição diminuíram e os limites capilares aumentaram. Quando calor foi cedido às amostras após atingir o limite capilar, a superfície do aquecedor e a resistência térmica aumentaram abruptamente.

Chang *et al.* (2008) investigaram experimentalmente o desempenho térmico de um sistema de resfriamento de câmara de vapor com microranhuras através do modelo da resistência térmica. Eles compararam três tipos de superfícies da câmara de vapor: plana sem microranhuras e plana com duas diferentes configurações geométricas de microranhuras fabricadas por ataque químico.

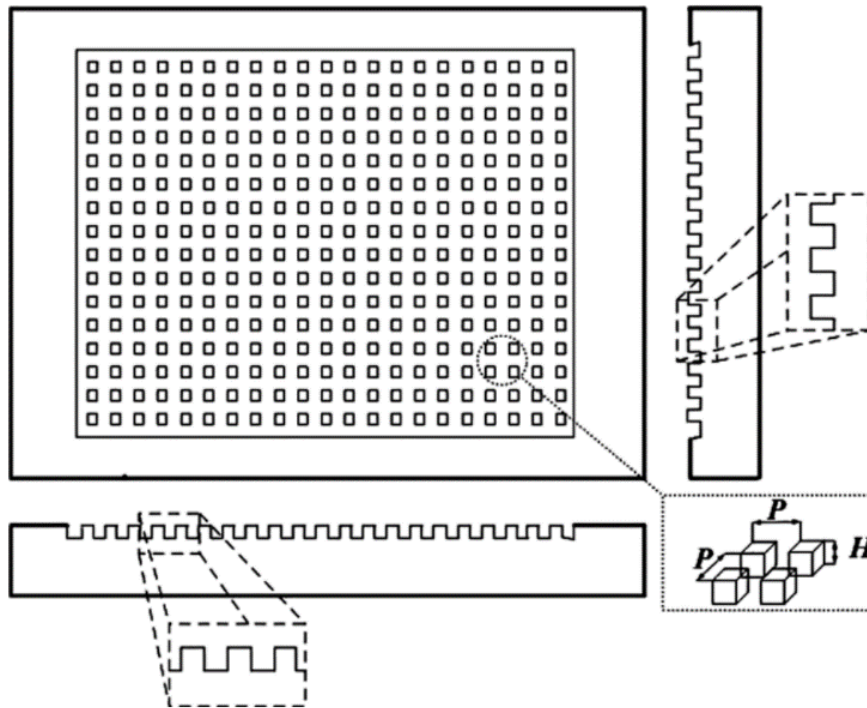
Três parâmetros que influenciaram o desempenho térmico do sistema de resfriamento foram: perfil da superfície do evaporador, razão de preenchimento de fluido de trabalho e potência dissipada. Para análise, o estudo desenvolveu um esquema de resistências térmicas para quantificar o desempenho térmico sob diferentes condições operacionais. Os experimentos foram desenvolvidos com uma potência dissipada variando na faixa de 60 W a 140 W com incremento de 20 W.

Água foi utilizada como fluido de trabalho, termopares foram utilizados para medir a temperatura do fluido de trabalho dentro do condensador. A câmara de vapor foi feita de cobre com dimensões de 100 x 80 x 15 mm e o volume interno do evaporador foi de 43.200 mm<sup>3</sup>. O condensador foi feito por dois tubos de cobre para atingir uma alta eficiência de aleta. Os diâmetros interno e externo foram de 5,15 mm e 6,35 mm, respectivamente. O condensador tinha 60 aletas de alumínio de comprimento total 88,8 mm, espessura de 0,3 mm e uma área de 50 mm<sup>2</sup>.

Os três tipos de superfícies são caracterizados pela Figura 8 e pela Tabela 1. A razão de preenchimento,  $RP$ , foi 20%, 30%, 40% e 50%, definida por:

$$RP = \frac{V_f}{V_{evap}} \times 100\% \quad (2.2)$$

sendo que,  $V_f$  é o volume de preenchimento do fluido de trabalho e  $V_{evap}$  é o volume interno do evaporador.



**Figura 8 - Geometria da superfície do evaporador**  
 Fonte: Adaptado de Chang *et al.* (2008).

**Tabela 1 - Superfícies do evaporador**

|                                | P [mm] | H [mm] |
|--------------------------------|--------|--------|
| Placa Plana                    | 0      | 0      |
| Superfície com Microranhura #1 | 0,6    | 0,2    |
| Superfície com Microranhura #2 | 1      | 0,2    |

Fonte: Adaptado de Chang *et al.* (2008).

Dentre todas as resistências analisadas, a resistência de evaporação e a resistência de condensação são as maiores responsáveis pela variação da resistência total. Dessa maneira, com as potências dissipadas de 60 W a 140 W, os autores compararam a resistência total com a razão de preenchimento ( $RP$ ) e notaram que com o aumento da potência dissipada,  $R_t$  decaiu de 0,84 °C/W para 0,73 °C/W com  $RP = 50\%$ , de 0,72 °C/W para 0,66 °C/W com  $RP = 40\%$ , de 0,69 °C/W para 0,66 °C/W com  $RP = 30\%$  e de 0,66 °C/W para 0,65 °C/W com  $RP = 20\%$ .

A resistência de evaporação para a placa plana e a superfície com Microranhura #1 decaiu com o aumento da potência dissipada para diferentes razões de preenchimento. A resistência de evaporação para a superfície com Microranhura #2 decaiu de 0,25 °C/W para 0,20 °C/W com a potência de 60 W até 100 W e, então, aumenta de 0,26 °C/W para 0,47 °C/W com a potência de 120 W até 140 W. Essa inversão é causada pela secagem do evaporador; isso ocorre devido a razão de preenchimento ser muito baixa, o líquido condensado não é capaz de

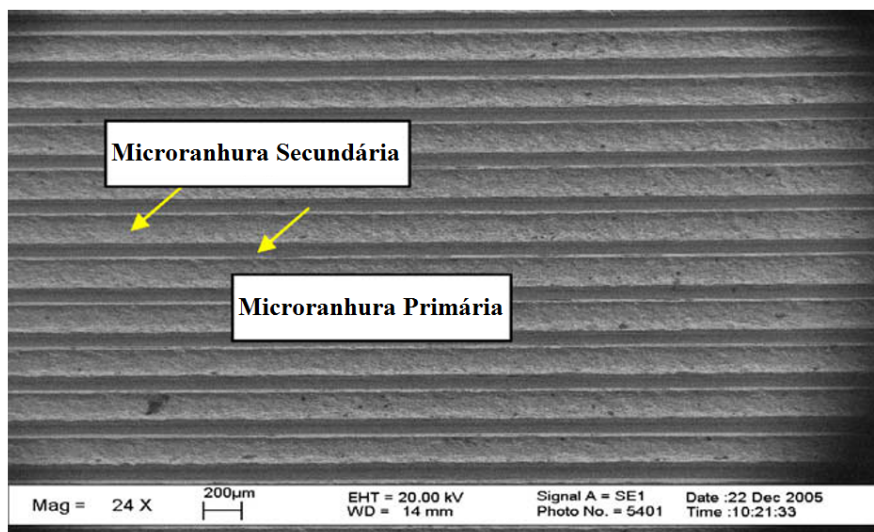


retornar com tamanha potência dissipada. A resistência de evaporação da superfície com Microranhura #2 atinge o menor valor de resistência dentre todas as outras superfícies, portanto, a superfície com Microranhura #2 é a estrutura mais eficiente para melhorar o desempenho da ebulição. A resistência de condensação aumenta com o aumento da potência dissipada e a superfície com Microranhura #2 apresentou o menor valor de resistência dentre todas as superfícies.

Através da análise de resistências térmicas, a resistência de evaporação e a resistência de condensação são os fatores que mais influenciam na resistência total do sistema de resfriamento. Os resultados mostraram que a estrutura da superfície do evaporador com microranhuras tem uma influência significativa no desempenho do sistema de resfriamento. A superfície com Microranhura #2 demonstrou o melhor desempenho dentre todas as geometrias de superfície do evaporador. O fenômeno de inundação ocorreu quando o sistema operou com uma baixa razão de preenchimento e com alta potência aplicada.

Wang *et al.* (2009) analisaram experimentalmente os parâmetros de fabricação do processo de brochamento externo para a confecção de microranhuras axiais em tubos de calor. Eles analisaram a velocidade e profundidade do processo e os relacionaram com a dimensão da geometria das microranhuras secundárias. A uma velocidade constante de processo de 177 mm/s, alguns experimentos foram conduzidos visando encontrar uma tendência entre a profundidade do processo e as dimensões das microranhuras secundárias. A uma profundidade constante de processo de 0,6 mm, a dependência das dimensões das microranhuras na velocidade do processo é também considerada. Um microscópio Leica Dmirm<sup>TM</sup> foi utilizado para medir as dimensões das microranhuras com uma resolução de 0,4  $\mu\text{m}$ .

Como mostrado na Figura 9, o tubo de calor fabricado pelo processo de brochamento consiste em dois tipos de microranhuras; principal e secundária, isso é um resultado das forças da ferramenta do processo de extrusão. Essa característica aprimora a dimensão das microranhuras assim como a capacidade de transferência de calor.



**Figura 9 - Superfície com microranhuras**  
**Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2009) e Tang *et al.* (2010).**

A partir dos experimentos, eles notaram que as dimensões da microranhura secundária variaram pouco com o aumento da velocidade do brochamento. Nesse caso, quando a profundidade foi 0,6 mm, a largura e altura da microranhura foram aproximadamente constantes; 2,57 mm e 0,53 mm, respectivamente.

Os limites capilar, de arrasto e de ebulição foram analisados devido a sua forte dependência com as dimensões geométricas do tubo de calor. Como havia dois tipos de microranhuras, e essas duas microranhuras podem ser tratadas como sendo conectadas em paralelo e transferindo calor independentemente, um maior limite de transferência de calor pode ser esperado para o tubo de calor fabricado pelo processo de brochamento. Um modelo matemático foi desenvolvido para calcular e comparar os limites baseados na teoria. Analisando os resultados desse modelo, todos os três limites considerados no estudo foram superiores para o tubo de calor fabricado pelo brochamento quando comparados com os limites do tubo de calor comercial fabricado tradicionalmente. Ainda para a faixa de temperatura de 70 °C até 120 °C, o limite de transferência de calor do novo tubo de calor é sempre determinado pelo seu limite de ebulição e foi sempre maior do que o tubo de calor tradicional.

Tang *et al.* (2010) investigaram experimentalmente o desempenho da transferência de calor de um tubo de calor com microranhuras confeccionadas através do processo de brochamento. O equipamento utilizado para a fabricação do tubo de calor foi o mesmo de Wang *et al.* (2009). Para os testes experimentais, um fio resistivo enrolado à seção do evaporador foi usado para simular a fonte de calor e uma fonte de potência foi utilizada para controlar a potência dissipada ao resistor elétrico. Na seção do condensador, um escoamento de água a 20 °C foi utilizado como sistema de resfriamento. Termopares foram utilizados para a

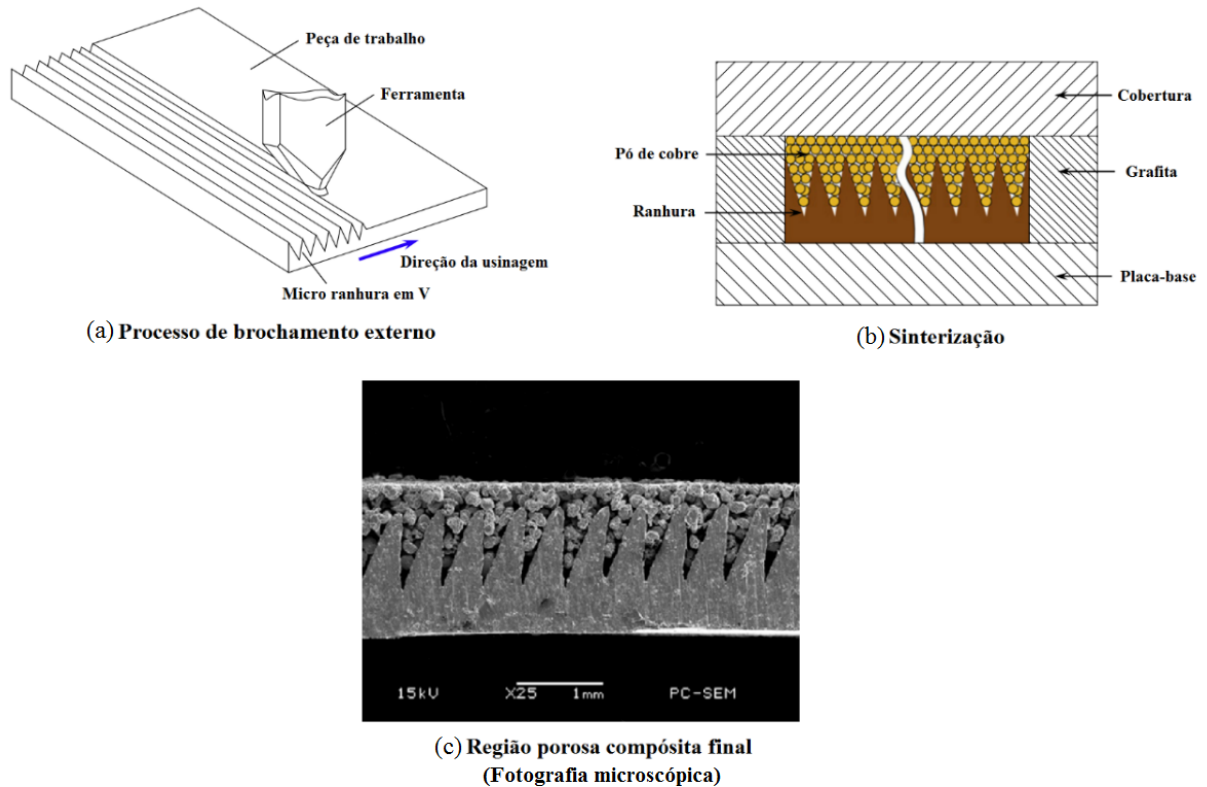
coleta das temperaturas e um isolamento térmico cobriu o tubo de calor para evitar a perda de calor. A temperatura de trabalho do tubo de calor (temperatura da seção adiabática) foi ajustada através da regulagem do escoamento de água e da fonte de potência.

A partir dos resultados experimentais, eles compararam a temperatura da seção adiabática e do evaporador com o tempo necessário para o tubo de calor operar em regime *quasi* permanente para diferentes temperaturas de operação. Eles notaram que a temperatura na seção adiabática leva mais tempo para se tornar constante e, quanto maior a temperatura de operação, mais tempo foi necessário. Quando a temperatura de operação era de 45 °C, 50 s foram necessários para que a temperatura da seção adiabática fosse constante, enquanto que a 70 °C, foram necessários aproximadamente 100 s.

Eles ainda compararam o limite de transferência de calor teórico entre o novo tubo de calor e um tubo de calor disponível no mercado. O limite de capilar foi sempre o limite dominante para ambos tubos. O desempenho térmico do tubo de calor fabricado pelo novo método foi sempre superior do que o tubo de calor convencional para a faixa de temperatura de 20 °C a 100 °C. A explicação disso se deve ao fato de que as microranhuras secundárias ocupam o vão entre as microranhuras primárias e, portanto, aumentam a força capilar resultante.

Finalmente, os autores concluíram que o limite de transferência de calor final do novo tubo de calor com microranhuras feitas pelo processo de brochamento é maior para diferentes temperaturas de operação, porque existem dois tipos de microranhuras que são tratadas como microranhuras paralelamente conectadas e ambas colaboram com a transferência de calor. Isso mostrou que o novo tubo de calor demonstra melhor desempenho do que o tubo de calor convencional testado.

Tang *et al.* (2013) estudaram diversas amostras de estruturas capilares compósitas fabricados sobre a superfície com microranhuras triangulares. Analisaram o efeito dos parâmetros de fabricação no desempenho capilar desses meios porosos compósitos feitos a partir de uma camada de pó de cobre sinterizado. O método de brochamento externo foi utilizado para a confecção das microranhuras triangulares em uma placa de cobre, que serve de base para a estrutura capilar compósita. Na Figura 10 é ilustrado o processo de fabricação da estrutura capilar compósita.



**Figura 10 - Processo de fabricação da região porosa composta**  
**Fonte: Adaptado de Tang *et al.* (2013).**

Eles investigaram os efeitos dos parâmetros de fabricação, incluindo profundidade e largura da microranhura, temperatura e tempo de sinterização e atenção foi dada ao desempenho capilar da estrutura composta com o propósito de um projeto de otimização.

As microranhas triangulares foram fabricadas em uma plaina adaptada com a ferramenta de aço W18Cr4V para a execução do brochamento. Em cinco das amostras fabricadas, a profundidade de brochamento variou de 0,4 mm a 0,8 mm com o mesmo espaçamento entre elas de 0,45 mm, e seis outras amostras tinham diferentes espaçamentos variando de 0,35 mm a 0,6 mm com a mesma profundidade de brochamento de 0,7 mm. Cada amostra tinha 10 mm de largura e 100 mm de comprimento.

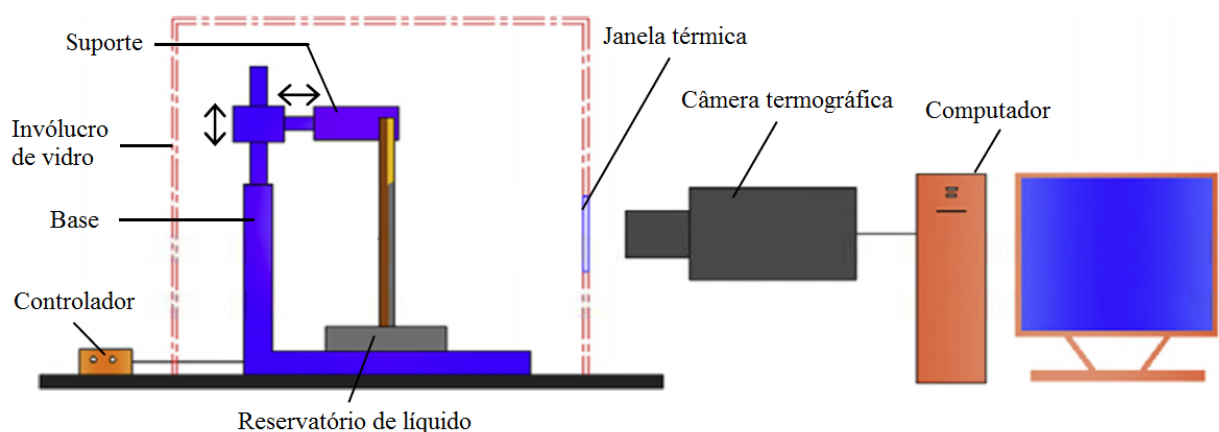
Com a profundidade do brochamento aumentando de 0,4 mm para 0,7 mm, a profundidade da microranhura aumentou de 0,6 mm para 0,85 mm. De maneira geral, a profundidade da microranhura foi sempre 0,15 mm maior do que a profundidade de brochamento. No entanto, para a profundidade de brochamento de 0,8 mm, a profundidade da microranhura foi um pouco menor. Conforme a profundidade da microranhura aumenta e atinge um ponto crítico, a ferramenta extruda as microranhas e corta as cristas ao mesmo tempo, dessa maneira, as microranhas ficam com um perfil inclinado e, conseqüentemente, elas se tornam muito mais estreitas. Um perfil similar foi notado para o espaçamento de

microranhura de 0,35 mm. Aumentando o espaçamento entre as microranhuras de 0,35 mm a 0,6 mm, a largura das microranhuras foi aproximadamente igual aos respectivos espaçamentos.

Após a usinagem das microranhuras, uma camada de pó de cobre foi sinterizada sobre elas. Para a otimização do processo de sinterização, quatro amostras foram sinterizadas a diferentes temperaturas (850 °C, 900 °C, 950 °C e 1.000 °C) com um tempo de sinterização de 60 minutos e três amostras foram sinterizadas por diferentes períodos (30, 60 e 90 minutos) a mesma temperatura de 950 °C.

Os experimentos de elevação capilar foram executados conforme a Figura 11, utilizando uma câmera termográfica. Etanol e acetona foram utilizados, dois fluidos de trabalho comuns em aplicações de tubos de calor. As amostras de estrutura capilar foram imersas verticalmente no reservatório de líquido e espontaneamente ele subiu pela estrutura devido à pressão capilar. O tempo de elevação capilar para cada teste foi de 120 segundos. A altura de elevação capilar foi extraída do *software* de processamento imagem da câmera termográfica.

Os resultados mostraram que as amostras com profundidade de brochamento de 0,6 mm e 0,7 mm tiveram a maior velocidade e elevação capilar. A permeabilidade capilar também foi maior do que as demais amostras. O desempenho capilar das estruturas compósitas aumentou com o aumento da profundidade de brochamento de 0,4 mm a 0,7 mm, mas diminuiu quando a profundidade atingiu 0,8 mm. Isso indicou que a profundidade de brochamento ótima é de 0,7 mm e corresponde a profundidade de microranhura de 0,85 mm.



**Figura 11 - Diagrama esquemático do aparato de teste de elevação capilar**  
**Fonte: Adaptado de Tang *et al.* (2013).**

Um aumento da profundidade de microranhura está relacionado com o consequente estreitamento da microranhura, isso ocasiona a formação de um menor raio de menisco, levando a uma maior pressão capilar. Porém, o atrito devido à dissipação de energia e a queda de pressão do escoamento líquido também aumenta com uma passagem mais estreita, levando a uma queda de permeabilidade, fazendo com que o fluxo capilar diminua. O máximo desempenho capilar em relação a diferentes profundidades de microranhura, ocorre quando o balanço entre a pressão capilar e o atrito atinge um valor ótimo, o que coincide com a situação onde a microranhura é somente suficiente para acomodar o menisco.

Os processos de elevação capilar de seis amostras com diferentes afastamentos entre microranhuras foram investigados. A amostra com afastamento entre microranhuras de 0,45 mm exibiu a maior velocidade e elevação capilar. A permeabilidade primeiramente aumentou com o aumento do afastamento entre microranhuras, atingindo um máximo no afastamento de 0,45 mm.

A análise do efeito da temperatura de sinterização no processo de elevação capilar revelou que para ambos os fluidos de trabalho testados, a temperatura de sinterização de 950 °C exibiu a maior velocidade e elevação capilar. Através da análise do efeito do tempo de sinterização nos processos de elevação capilar, eles notaram que, quanto mais longo o tempo de sinterização, mais desfavoráveis as amostras se tornam para a elevação capilar.

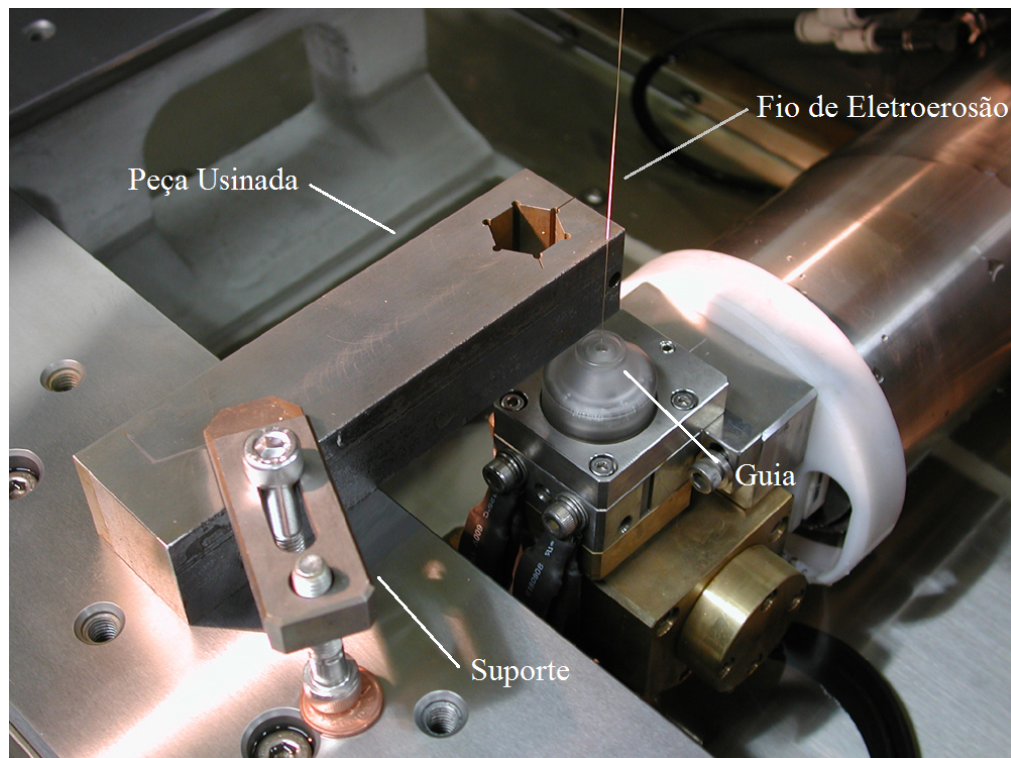
Portanto, os resultados dos testes mostraram que há uma geometria de microranhura ótima com profundidade de 0,85 mm e espaçamento de 0,45 mm e o processo de sinterização à 950 °C ao longo de 30 minutos foram os mais adequados para que se atingisse desempenho capilar máximo.

Diante do exposto, pôde ser notado que os trabalhos descritos têm em comum a questão da busca por novos métodos no processo de fabricação de microranhuras em tubos de calor, visando a otimização de sua operação; seja o aperfeiçoamento do tamanho dos poros para o aumento da força capilar, a redução de massa do dispositivo, a facilidade e custo de fabricação e/ou o tipo de aplicação. Neste contexto, no presente Trabalho, propõe-se a utilização do processo de eletroerosão a fio para a fabricação das microranhuras axiais nos tubos de calor, devido à escassez de trabalhos relacionados ao processo em tubos de calor ranhurados, de acordo com a revisão bibliográfica consultada.

## 2.4 ELETROEROSÃO A FIO

A eletroerosão a fio é uma das maiores inovações que afetou a indústria na área da usinagem. Esse processo trouxe grandes melhoras à indústria em termos de precisão, qualidade, produtividade e lucratividade. Seja cortando alumínio, aço, superligas ou carboneto de tungstênio, profissionais da área da fabricação descobriram que o processo é mais barato e de melhor qualidade devido às atuais máquinas de eletroerosão a fio de alta velocidade (BOBBILI *et al.*, 2015).

A eletroerosão a fio funciona por meio de um fio de eletrodo que passa através da peça (Fotografia 1). O fio é precisamente monitorado por um sistema de computador numericamente controlado (CNC). Como qualquer outra ferramenta de usinagem, a eletroerosão a fio remove material, porém com eletricidade por meio de erosão por centelha. Portanto, o material a ser trabalhado deve ser condutivo eletricamente. Rápidos pulsos elétricos de corrente contínua são gerados entre o fio eletrodo e a peça.



**Fotografia 1 - Eletroerosão a fio**  
**Fonte: Vancouver Wire EDM (2015).**

Quando uma alta voltagem é aplicada, o fluido ioniza, então uma centelha controlada precisamente abrasa uma pequena seção da peça, fazendo com que a mesma se funda e vaporize. Esses pulsos elétricos são repetidos milhares de vezes por segundo. O fluido de resfriamento pressurizado, fluido dielétrico, resfria o metal vaporizado e força as partículas, agora solidificadas, a saírem da região do corte. O fluido dielétrico passa através de um filtro que remove as partículas sólidas. Para manter a precisão da máquina, o fluido dielétrico escoo através de um banho ultratermostatizado para manter o líquido à temperatura constante (SOMMER, 2000).

Com a tecnologia da eletroerosão a fio, complexos cortes podem ser executados em metais difíceis de usinar, sem a necessidade do uso de fresagem de precisão de alto custo. Pelo motivo de que o processo pode ser controlado por CNC, é possível que um operador seja responsável pelo funcionamento de diversas máquinas (BOBBILI *et al.*, 2015).

Algumas máquinas cortam com a precisão de até +/- 0,0025 mm, produzindo acabamentos de superfície de 0,037  $\mu\text{m}$  ou menor. Peças grandes de 5.000 kg ou maior, também podem ser usinadas por este processo.





### 3 METODOLOGIA

No presente Capítulo, a metodologia utilizada para a realização desta Dissertação de Mestrado é apresentada. O projeto térmico e a teoria de limites operacionais são apresentados segundo três diferentes autores, Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014) para os tubos de calor com microranhuras axiais como estrutura capilar.

Uma das grandes contribuições desta Dissertação de Mestrado é o uso do processo de eletroerosão a fio na fabricação de microranhuras axiais em tubos de calor. Para tal, foi preciso adaptar a modelagem teórica do projeto térmico e dos limites operacionais existentes na literatura à nova microranhura de geometria semicircular, através da criação de um fator que representasse o diâmetro do fio utilizado no processo de eletroerosão.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DAS MICRORANHURAS DOS TUBOS DE CALOR

Três tipos de microranhuras foram usinadas a partir do processo de eletroerosão a fio em tubos de cobre, a Figura 12 ilustra os perfis dos tubos de calor fabricados. A Figura 13 ilustra um diagrama esquemático das configurações geométricas das microranhuras do tubo de calor e a Tabela 2 apresenta as dimensões e a quantidade destas microranhuras. Na nomenclatura utilizada neste trabalho,  $w$  representa a largura da microranhura [ $m$ ],  $w_f$  a espessura da crista da microranhura [ $m$ ],  $\delta$  a profundidade da microranhura [ $m$ ] e  $\phi$  o diâmetro do fio do processo de eletroerosão a fio, nesse caso,  $\phi = 0,025$  mm.

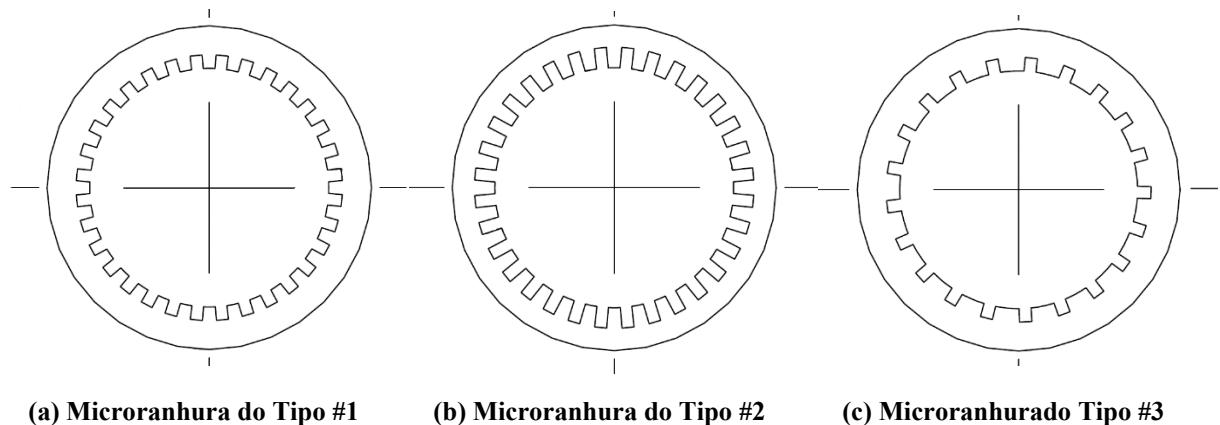
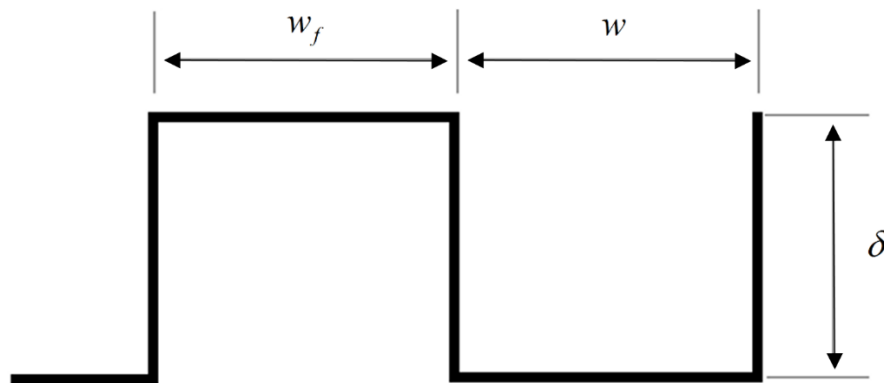


Figura 12 - Tipos de microranhuras axiais usinadas em tubos de cobre

Fonte: Autoria própria.



**Figura 13 - Diagrama esquemático das dimensões das microranhuras**  
**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 2 - Dimensões das microranhuras em função do diâmetro do fio da eletroerosão**

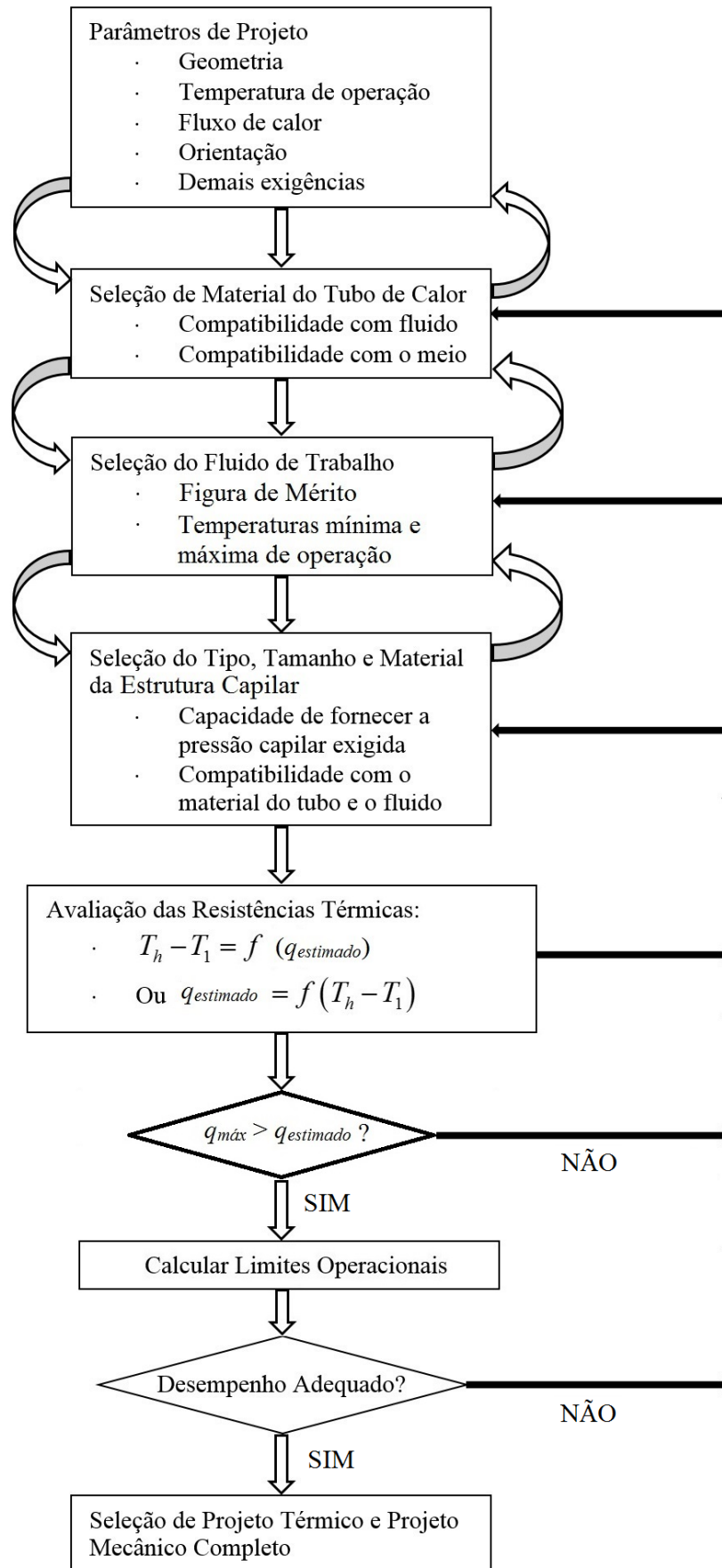
| Dimensão                                    | Microranhura do Tipo #1 | Microranhura do Tipo #2 | Microranhura do Tipo #3 |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Profundidade da Microranhura $\delta$       | $1,2\phi$ (0,030 mm)    | $1,9\phi$ (0,048 mm)    | $1,2\phi$ (0,030 mm)    |
| Largura da Microranhura $w$                 | $1,4\phi$ (0,035 mm)    | $1,4\phi$ (0,035 mm)    | $1,4\phi$ (0,035 mm)    |
| Largura da Crista entre Microranhuras $w_f$ | $1,4\phi$ (0,035 mm)    | $1,4\phi$ (0,035 mm)    | $2,8\phi$ (0,070 mm)    |
| Número de Microranhuras $N$                 | 32                      | 32                      | 21                      |

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 PROJETO TÉRMICO

Como em qualquer procedimento de projeto, muitas das decisões a serem tomadas estão correlacionadas entre si e o processo é iterativo. Por exemplo, a escolha de uma estrutura capilar e de um material do invólucro do tubo de calor, elimina muitos candidatos a fluido de trabalho, devido à incompatibilidade de materiais. O procedimento de projeto de um tubo de calor é resumido no Fluxograma 1.

Primeiramente, no projeto térmico de um tubo de calor, a geometria, a temperatura de operação e o fluxo de calor necessários devem ser levados em consideração conforme a aplicação. A orientação do dispositivo é outro fator importante, assim como será mostrado no Capítulo 5, e deve, também, ser considerada na fase de projeto. Quanto à seleção de material do invólucro do tubo de calor, os principais fatores considerados, são a compatibilidade do mesmo com o fluido de trabalho e com o ambiente externo.



**Fluxograma 1 - Fluxograma do projeto de um tubo de calor**  
 Fonte: Adaptado de Reay *et al.* (2014).

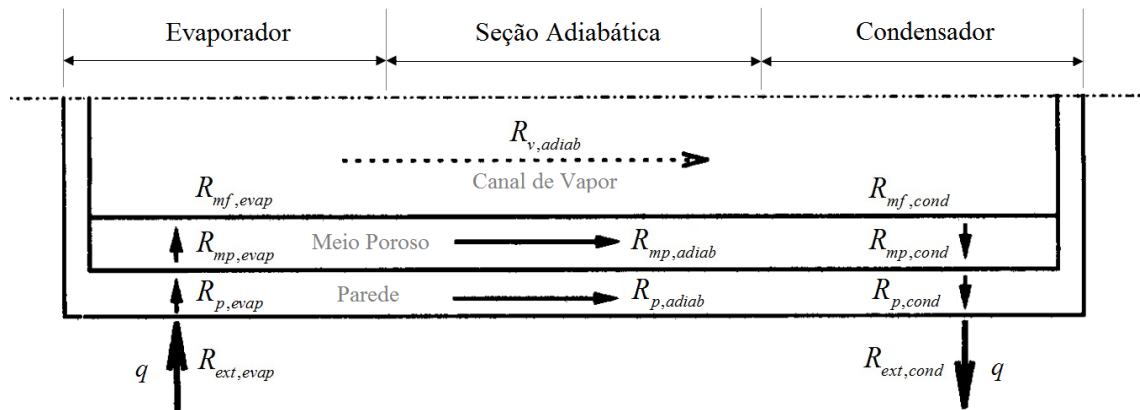
Para a seleção do fluido de trabalho, a Figura de Mérito pode ser utilizada e as temperaturas mínima e máxima de operação devem estar dentro da faixa de temperatura adequada de aplicação do fluido. O tipo de estrutura capilar é, também, um fator muito importante no projeto de um tubo de calor, pois é ela que determina a capacidade de fornecer a pressão capilar exigida. A compatibilidade entre a estrutura capilar, o fluido de trabalho e o invólucro deve ser verificada.

Uma vez que a geometria e os materiais forem selecionados, a avaliação do desempenho do tubo de calor pode ser feita através do método proveniente da analogia entre circuitos elétricos e térmicos. O método de resistências térmicas será utilizado juntamente com os modelos de limites de operação e quedas de pressão, pois assim como em outras aplicações em sistemas unidimensionais e em regime permanente na área de transferência de calor, esta analogia se mostrou uma poderosa ferramenta de projeto (BERGMAN *et al.*, 2014).

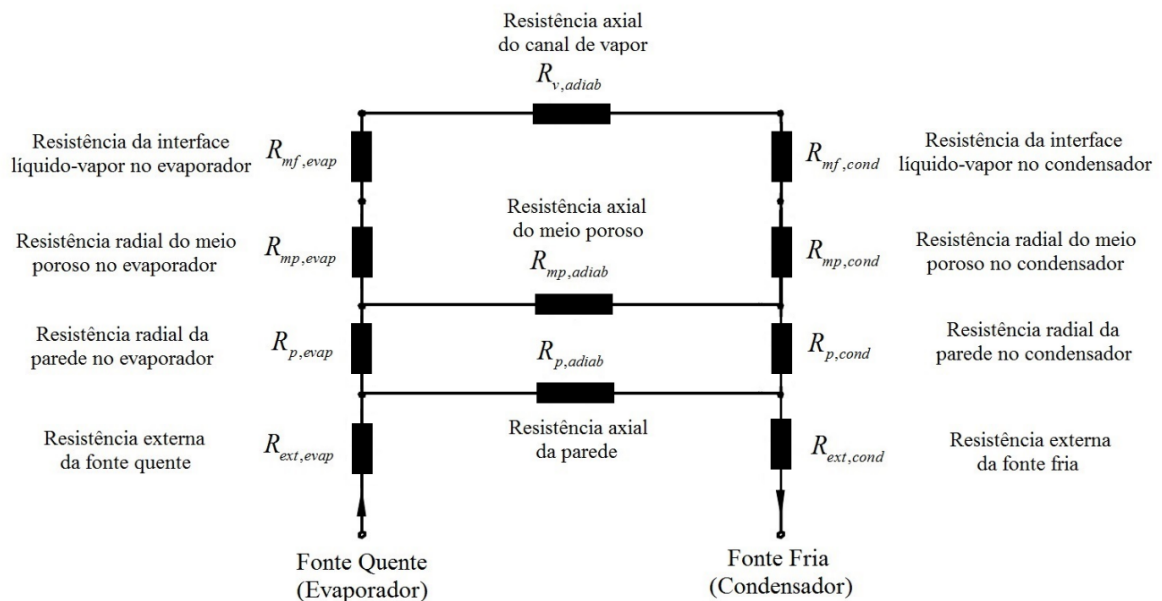
Feito isso, uma modelagem teórica é efetuada, conforme será mostrado a seguir, e uma taxa de transferência de calor é estimada ( $q_{estimada}$ ). Esta grandeza representa uma boa estimativa da quantidade de energia na forma de calor que o tubo de calor poderá transportar. Os limites operacionais são analisados, e, então, a taxa de transferência de calor máxima, ( $q_{máx}$ ) é determinada. Esta grandeza, nada mais é do que o limite de transferência de calor conforme a teoria dos limites operacionais. O menor dos limites operacionais determina o transporte máximo de calor do dispositivo. Feito isso, uma comparação é realizada para garantir que a  $q_{estimada}$  não exceda  $q_{máx}$ , prevenindo, assim, uma possível falha do dispositivo por transporte excessivo de calor. Finalmente, através de testes experimentais, o desempenho do tubo de calor é verificado ser adequado ou não. Caso negativo, todo o procedimento deve ser repetido.

Esta modelagem teórica é muito adequada para tubos de calor, por ser simples e razoavelmente precisa para a grande maioria das aplicações. A resistência térmica global de um tubo de calor representa a dificuldade que o dispositivo tem em transportar o calor. Quanto maior a resistência global, maior será a dificuldade do sistema em transportar calor. Além disso, essa modelagem permite que se determine a diferença de temperaturas associadas à transferência de energia na forma de calor (MANTELLI, 2009).

Para a obtenção da resistência térmica global é necessário construir um circuito térmico equivalente para o tubo de calor. A Figura 14 mostra o circuito térmico equivalente para um tubo de calor típico, com um meio poroso revestindo a parede interna do tubo. Este modelo será considerado no projeto térmico dos tubos de calor.



(a)



(b)

**Figura 14 - Resistência térmica equivalente de um tubo de calor**  
**Fonte: Adaptado de Zuo e Faghri (1998).**

Na análise do modelo, o calor proveniente da fonte quente passa primeiramente por uma resistência térmica externa ao evaporador ( $R_{ext,evap}$ ), normalmente associada à transferência de calor por convecção e/ou radiação térmica. Se houver contato (condução de calor) entre a fonte quente e o tubo de calor, uma resistência térmica de contato também é considerada entre a fonte e a parede do evaporador. Quando a energia na forma de calor alcança a parede do tubo na região do evaporador, ela pode seguir dois caminhos térmicos distintos: condução na direção axial ( $R_{p,adiab}$ ) e condução na direção radial ( $R_{p,evap}$ ) através do tubo. O calor que passa através do material do tubo (condução axial) vai diretamente para a região do condensador, passando pela seção adiabática, não atingindo o fluido de trabalho. Devido à geometria e à condutividade térmica do material do tubo, a parcela de calor que percorre este caminho normalmente é muito

pequena, sendo, na maioria das vezes, desprezada. O calor segue então o caminho radial e atinge a parede interna do tubo, passando para o meio poroso. A resistência térmica de contato entre a parede do tubo e o meio poroso é normalmente desprezada. Uma vez que o calor atinge o meio poroso, ele pode novamente percorrer dois caminhos térmicos diferentes: condução axial ( $R_{mp,adiab}$ ) e condução radial ( $R_{mp,evap}$ ) através do meio poroso. A condução de calor axial no meio poroso é fortemente dependente do material do mesmo, apesar de na maioria dos casos ser pequena. A condução de calor no sentido radial é sempre dominante, especialmente devido à geometria do meio poroso. Afim de simplificar o modelo, apesar da mudança de fase do fluido ocorrer ao longo de todo o meio poroso, a resistência térmica ( $R_{mf,evap}$ ) associada a este processo é representada somente na região de vapor do evaporador. Quando finalmente atinge a região do vapor, o calor é absorvido pelo mesmo e se desloca para a região do condensador, devido às quedas de pressão de vapor. A resistência ( $R_{v,adiab}$ ) de tal processo está representada no centro da região de vapor do tubo de calor, como mostrado na Figura 14. O vapor, ao atingir a região do condensador (passando pela região adiabática, quando houver) percorre um caminho inverso na direção da fonte fria, atravessando resistências térmicas de maneira análoga ao processo realizado na região do evaporador, ou seja, resistência de mudança de fase ( $R_{mf,cond}$ ) (condensação), resistência radial no meio poroso ( $R_{mp,cond}$ ), resistência radial no tubo ( $R_{p,cond}$ ) e resistência externa ao tubo ( $R_{ext,cond}$ ), referente à transferência de calor com a fonte fria.

É interessante conhecer a magnitude das resistências térmicas que ocorrem no tubo de calor. A Tabela 3, de Asselman & Green (1973), lista alguns valores aproximados para um tubo de calor com água como fluido de trabalho.

**Tabela 3 - Valores representativos das resistências térmicas**

| Resistência    | [°C.cm <sup>2</sup> /W] |
|----------------|-------------------------|
| $R_{ext,evap}$ | 10 <sup>3</sup> -10     |
| $R_{p,evap}$   | 10 <sup>-1</sup>        |
| $R_{mp,evap}$  | 10                      |
| $R_{mf,evap}$  | 10 <sup>-5</sup>        |
| $R_{v,adiab}$  | 10 <sup>-8</sup>        |
| $R_{mf,cond}$  | 10 <sup>-5</sup>        |
| $R_{mp,cond}$  | 10                      |
| $R_{p,cond}$   | 10 <sup>-1</sup>        |
| $R_{ext,cond}$ | 10 <sup>3</sup> -10     |

**Fonte: Adaptado de Asselman & Green (1973).**

O Quadro 1 apresenta a formulação matemática das resistências térmicas a serem utilizadas no projeto térmico de um tubo de calor.

| Resistência Térmica         | Evaporador  | Condensador   |
|-----------------------------|---|---|
| Parede - Ambiente Externo   | $R_{ext,evap} = \frac{1}{h_{ext,evap} A_{evap}} \quad (3.1)$                                      | $R_{ext,cond} = \frac{1}{h_{ext,cond} A_{cond}} \quad (3.2)$                                      |
| Condutiva na Parede do Tubo | $R_{p,evap} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2\pi l_{evap} k_p} \quad (3.3)$      | $R_{p,cond} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2\pi l_{cond} k_p} \quad (3.4)$      |
| Condutiva no Meio Poroso    | $R_{mp,evap} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2\pi l_{evap} k_{eff}} \quad (3.5)$ | $R_{mp,cond} = \frac{\ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right)}{2\pi l_{cond} k_{eff}} \quad (3.6)$ |
| Interface Líquido - Vapor   | $R_{mf,evap} = \frac{R_g T_v^2 (2\pi R_g T_v)^{1/2}}{h_{lv}^2 p_v A_{evap}} \quad (3.7)$          | $R_{mf,cond} = \frac{R_g T_v^2 (2\pi R_g T_v)^{1/2}}{h_{lv}^2 p_v A_{cond}} \quad (3.8)$          |
| Resistência Térmica         | Seção Adiabática  |   |
| Axial na Região do Vapor    | $R_{v,adiab} = R_g T_v^2 \frac{\Delta p_v}{h_{lv} p_v q} \quad (3.9)$                             |   |
| Axial na Meio Poroso        | $R_{mp,adiab} \approx 0 \quad (3.10)$   |   |
| Axial na Parede do Tubo     | $R_{p,adiab} = \frac{l_{evap} + l_{adiab} + l_{cond}}{A_{mp} k_{mp} + A_p k_p} \quad (3.11)$      |   |

**Quadro 1 - Resistências térmicas de um tubo de calor**

Fonte: Adaptado de Reay *et al.* (2014).

sendo que,  $h_{ext,evap}$  e  $h_{ext,cond}$  são os coeficientes convectivos de transferência de calor externamente ao evaporador e ao condensador, respectivamente. Os parâmetros  $k_{mp}$  e  $k_p$  são as condutividades térmicas [ $W/m.K$ ] do meio poroso e da parede do tubo, respectivamente,  $R_g$  é a constante do gás do fluido de trabalho [ $J/kg.K$ ],  $T_v$  é a temperatura do vapor (temperatura de operação) [ $K$ ],  $h_{lv}$  é o calor latente de vaporização do fluido de trabalho [ $J/kg$ ],  $p_v$  é a pressão de vapor (pressão de saturação do fluido de trabalho) [ $Pa$ ],  $A_{mp}$  e  $A_p$  são as áreas transversais [ $m^2$ ] do meio poroso e da parede do tubo de calor, respectivamente.

As áreas  $A_{cond}$  e  $A_{evap}$  [ $m^2$ ] são definidas conforme as Equações (3.12) e (3.13):

$$A_{cond} = \pi D_{ext} l_{cond} \quad (3.12)$$



$$A_{evap} = \pi D_{ext} l_{evap} \quad (3.13)$$

A condutividade térmica efetiva  $k_{eff}$  [ $W/m.K$ ] é definida conforme o Quadro 2.

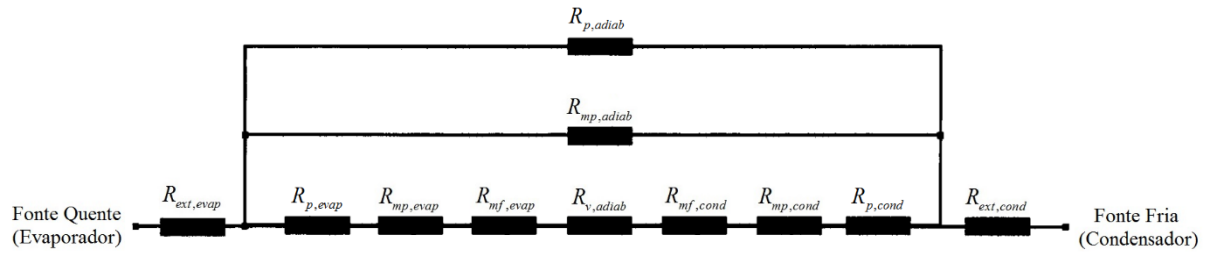
| Tipo de Estrutura                 | $k_{eff}$  | Dados  |
|-----------------------------------|--|--|
| Meio Poroso e Líquido em Série    | $\frac{k_l k_{mp}}{\varepsilon k_{mp} + k_l (1 - \varepsilon)}$  | $k_l$ = condutividade térmica do líquido [ $W/m.K$ ]<br>$k_{mp}$ = condutividade térmica do meio poroso [ $W/m.K$ ]<br>$\varepsilon$ = porosidade do meio<br>$w_f$ = espessura da crista da microranhura [ $m$ ]<br>$w$ = largura da microranhura [ $m$ ]<br>$\delta$ = profundidade da microranhura [ $m$ ] |
| Meio Poroso e Líquido em Paralelo | $\varepsilon k_l + (1 - \varepsilon) k_{mp}$   |  |
| Tela Metálica                     | $\frac{k_l [(k_l + k_{mp}) - (1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp})]}{[(k_l + k_{mp}) + (1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp})]}$  |  |
| Esferas Empacotadas               | $\frac{k_l [(2k_l + k_{mp}) - 2(1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp})]}{[2k_l + k_{mp} + (1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp})]}$ |  |
| Microranhuras Retangulares        | $\frac{(w_f k_l k_{mp} \delta) + w k_l (0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)}{(w + w_f)(0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)}$   |  |

**Quadro 2 - Condutividade térmica efetiva,  $k_{eff}$ , para diferentes estruturas capilares**  
 Fonte: Adaptado de Chi (1976).

A queda de pressão de vapor  $\Delta p_v$ , é definida pela Equação (3.14).

$$\Delta p_v = \left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right) \frac{q^2}{8 \rho_v r_v^4 h_v^2} + 8 \mu_v q \frac{l_{adiab}}{\rho_v \pi r_v^4 h_v} \quad (3.14)$$

Com a análise do circuito térmico da Figura 14, as resistências térmicas são rearranjadas na Figura 15 para a simplificação da metodologia teórica adotada. Pode ser notado que as resistências  $R_{p,evap}$ ,  $R_{mp,evap}$ ,  $R_{mf,evap}$ ,  $R_{v,adiab}$ ,  $R_{mf,cond}$ ,  $R_{mp,cond}$ ,  $R_{p,cond}$  estão dispostas em série entre si e em paralelo com as resistências  $R_{p,adiab}$  e  $R_{mp,adiab}$ . Tal resistência equivalente está em série com as resistências do ambiente externo,  $R_{ext,evap}$  e  $R_{ext,cond}$ , assim a resistência térmica total ou global pode ser representada pela Equação (3.15).



**Figura 15 - Esquema de resistências térmicas simplificado**  
**Fonte: Adaptado de Zuo e Faghri (1998).**

$$R_t = R_{ext,evap} + \left( \frac{1}{R_{p,evap} + R_{mp,evap} + R_{mf,evap} + R_{v,adiab} + R_{mf,cond} + R_{mp,cond} + R_{p,cond}} + \frac{1}{R_{p,adiab}} + \frac{1}{R_{mp,adiab}} \right)^{-1} + R_{ext,cond} \quad (3.15)$$

Devido à escassez de trabalhos que analisaram o processo de eletroerosão a fio para a fabricação de microranhuras em tubos de calor, a metodologia do projeto térmico para os tubos de calor analisados foi adaptada de acordo com a teoria das resistências térmicas apresentada anteriormente desprezando-se as resistências térmicas externas.

A condutividade térmica efetiva  $k_{eff}$  foi adaptada da teoria de Chi (1976) para ranhuras retangulares à presente geometria de microranhuras semicirculares, por proporções de área, definida conforme a Equação (3.16).

$$k_{eff} = 0,8925 \frac{(w_f k_l k_{mp} \delta) + w k_l (0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)}{(w + w_f)(0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)} \quad (3.16)$$

sendo que,  $w$  é a largura da microranhura [ $m$ ],  $w_f$  é a espessura da crista da microranhura [ $m$ ] e  $\delta$  é a profundidade da microranhura [ $m$ ]. Os parâmetros  $k_l$  e  $k_{mp}$  são a condutividade térmica do líquido [ $W/m.K$ ] e a condutividade térmica da estrutura capilar [ $W/m.K$ ], respectivamente.

Neste caso, a resistência térmica total,  $R_t$ , associada aos tubos de calor estudados, pode ser representada pela Equação (3.17):

$$R_t = \left( \frac{1}{R_{p,evap} + R_{mp,evap} + R_{mf,evap} + R_{v,adiab} + R_{mf,cond} + R_{mp,cond} + R_{p,cond}} + \frac{1}{R_{p,adiab}} \right)^{-1} \quad (3.17)$$

Finalmente, a capacidade de transferência de calor do tubo de calor, segundo o projeto térmico executado pelo método das resistências térmicas nesta modelagem teórica, pode ser calculada conforme a Equação (3.18).

$$q_{total} = \frac{\Delta T}{R_t} \quad (3.18)$$

sendo que,  $\Delta T = (T_{p,evap} - T_{p,cond})$ ,  $T_{p,evap}$  e  $T_{p,cond}$  são as temperaturas da parede do evaporador e do condensador do tubo de calor, respectivamente.

### 3.3 LIMITES DE OPERAÇÃO

As limitações da capacidade de transporte de calor de um tubo de calor incluem a incapacidade de bombeamento capilar (limite capilar), o entupimento do escoamento de vapor (limite sônico), o arrasto de líquido da interface líquido-vapor pelo escoamento de vapor (limite de arrasto) e a interrupção do escoamento de líquido pela ebulição nucleada na região porosa (limite de ebulição) (CHI, 1976).

Segundo Peterson (1994), ainda que o desempenho da operação de um tubo de calor dependa fortemente da geometria do invólucro, do fluido de trabalho e da estrutura capilar, o fenômeno fundamental que governa a operação de um tubo de calor é dado a partir da diferença de pressão capilar através das interfaces de líquido-vapor no evaporador e no condensador. Se essa pressão capilar não for suficiente para promover o escoamento de líquido do condensador ao evaporador, o tubo de calor atingirá seu limite capilar e ocorrerá a secagem da estrutura capilar no evaporador. O limite de arrasto, limite viscoso, limite sônico e limite de ebulição também podem limitar a máxima quantidade de calor que um tubo de calor é capaz de transferir quando em regime permanente.

Diante do exposto, nesta Dissertação de Mestrado, atenção especial será dada ao limite capilar, pois ele é compreendido pela literatura como o mais importante dos limites operacionais de um tubo de calor, sendo que, na grande maioria dos casos, ele determina a capacidade máxima do transporte de calor do tubo de calor (REAY *et al.*, 2014). Para tal, sua definição será apresentada pelo ponto de vista de diferentes autores: Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014). Os outros limites operacionais, limites de arrasto, viscoso, sônico e de ebulição, são discutidos no Apêndice A.

### 3.3.1 Limite Capilar

A vaporização do fluido de trabalho no evaporador provoca uma redução deste fluido na estrutura capilar, diminuindo o raio de curvatura do menisco, enquanto que a condensação provoca o efeito contrário, onde o raio de curvatura do menisco aumenta e sua superfície tende a ser plana. Estas diferenças nas curvaturas do menisco provocam uma diferença de pressão capilar entre o evaporador e o condensador, responsável pela circulação de líquido condensado pela estrutura capilar (CHI, 1976).

A Figura 16 ilustra a geometria do menisco em um tubo de calor operando em regime permanente e, também, mostra dois pontos importantes no tubo de calor: o ponto seco, no qual o menisco apresenta o menor raio de curvatura, normalmente localizado na região mais afastada do condensador, e o ponto molhado, onde a pressão do vapor e a pressão do líquido se igualam, ou onde o raio de curvatura é máximo para o tubo de calor. É desejável que o ponto molhado se localize o mais longe possível do evaporador. Para um tubo de calor funcionar corretamente, a diferença de pressão capilar entre os pontos seco e molhado deve ser maior do que a soma de todas as quedas de pressão que ocorrem ao longo dos caminhos do fluido e do vapor (PETERSON, 1994). A Figura 17 apresenta a distribuição de pressão no líquido e no vapor de um tubo de calor.

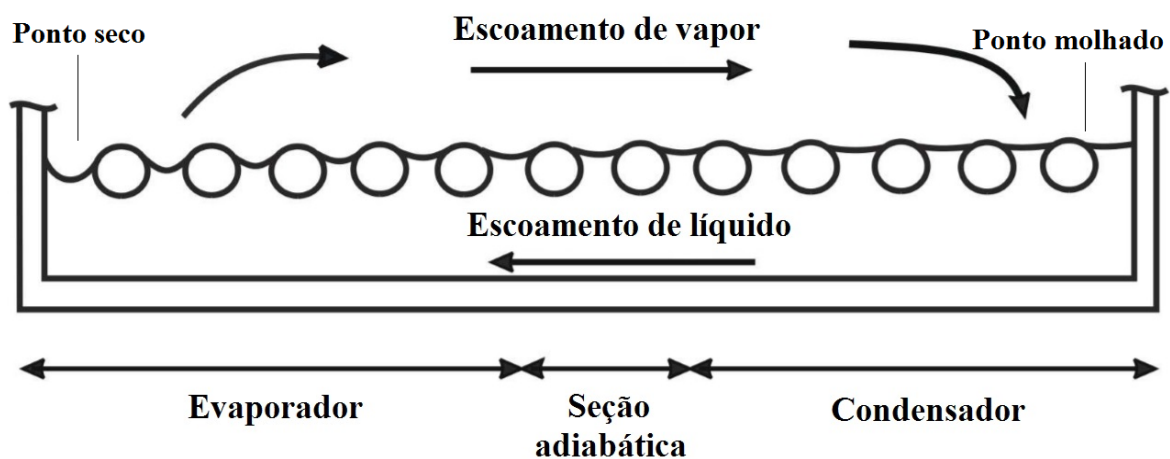


Figura 16 - Variação da curvatura do menisco como função da posição inicial  
Fonte: Adaptado de Peterson (1994).

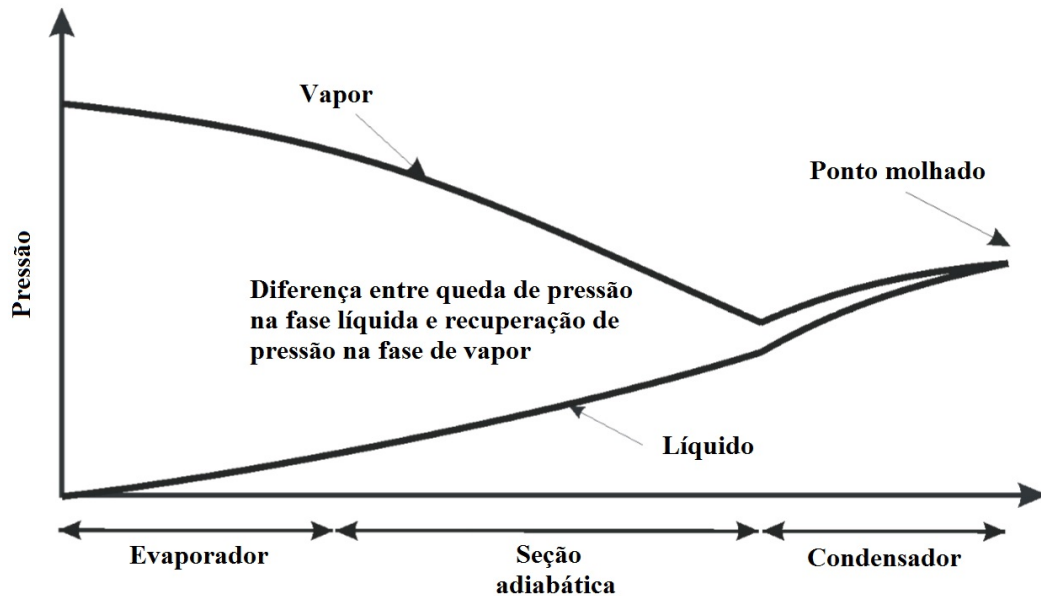


Figura 17 - Típica distribuição de pressão em um tubo de calor  
Fonte: Peterson (1994).

Segundo Peterson (1994), dois são os fenômenos que provocam o bombeamento de vapor da região do evaporador para a região do condensador: a evaporação do fluido de trabalho, que provoca uma concentração de massa de vapor na região do evaporador e o fato do evaporador estar a um nível de temperatura superior ao do condensador, portanto, a uma pressão superior.

Quando a máxima pressão capilar é igual ou superior a soma destas quedas de pressão, a estrutura capilar é capaz de retornar líquido suficiente de forma a evitar a secagem da estrutura capilar no evaporador. Quando a soma das quedas de pressão excede a máxima pressão capilar, o fluido de trabalho não é suprido na taxa necessária para o evaporador e ocorre secagem no evaporador. Esta condição de funcionamento do tubo de calor se chama limite capilar, e varia de acordo com a estrutura capilar, o fluido de trabalho, o fluxo de calor no evaporador e a temperatura de operação (PETERSON, 1994).

Como mencionado anteriormente, a formulação do limite capilar será detalhado pelo ponto de vista de diferentes autores: Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014).

### 3.3.1.1 Chi (1976)

Para Chi (1976), a máxima taxa de transferência de calor relacionada com o limite capilar  $q_{capilar} [W]$  pode ser calculada de acordo com a Equação (3.19).

$$q_{capilar} = \frac{(qL)_{c,m\acute{a}x}}{l_{eff}} \quad (3.19)$$

sendo que,  $l_{eff}$  é o comprimento efetivo do tubo de calor [m], que é relacionado aos comprimentos do evaporador ( $l_{evap}$ ), condensador ( $l_{cond}$ ) e seção adiabática ( $l_{adiab}$ ) pela Equação (3.20).

$$l_{eff} = l_{adiab} + \frac{(l_{evap} + l_{cond})}{2} \quad (3.20)$$

A transferência de calor em função do comprimento do tubo,  $(qL)_{c,m\acute{a}x}$ , [W.m] é relacionada pela Equação (3.21).

$$(qL)_{c,m\acute{a}x} = \frac{P_{bc}}{F_l + F_v} \quad (3.21)$$

sendo que,  $p_{bc}$  é a pressão de bombeamento capilar [Pa] e  $F_l$  e  $F_v$  são os coeficientes de atrito de *Darcy-Weisbach* [Pa/W.m] que se relacionam à queda de pressão associada à fase de líquido e de vapor, respectivamente.

A pressão de bombeamento capilar,  $p_{bc}$ , pode ser expressa pela Equação (3.22).

$$p_{bc} = \Delta p_{c,m\acute{a}x} - \Delta p_{II} - \Delta p_+ \quad (3.22)$$

sendo que,  $\Delta p_{c,m\acute{a}x}$  é a máxima pressão capilar [Pa], representada pela Equação (3.23).

$$\Delta p_{c,m\acute{a}x} = \frac{2\sigma_l}{r_{c,eff}} \quad (3.23)$$

sendo que,  $\sigma_l$  é a tensão superficial do fluido de trabalho no estado líquido [N/m] e  $r_{c,eff}$  é o raio capilar efetivo da estrutura capilar [m], dado pelo Quadro 3, que define o raio capilar efetivo para diferentes estruturas capilares.

| Tipo de Estrutura                       | $r_{c,eff}$              | Dados   |
|---|--------------------------|---|
| Cilindro Circular<br>(Artéria ou Túnel) | $r$                      | $r$ = raio da passagem do escoamento líquido [m]  |
| Microranhura Retangular                 | $w$                      | $w$ = largura da microranhura [m]   |
| Microranhura Triangular                 | $w/\cos \beta$           | $w$ = largura da microranhura [m]<br>$\beta$ = meio ângulo incluído [°]                                   |
| Fios Paralelos                          | $w$                      | $w$ = espaçamento entre dois fios [m]   |
| Telas Metálicas                         | $(w + D_{fio})/2 = 1/2N$ | $D_{fio}$ = diâmetro do fio da tela metálica [m]<br>$N$ = número de malha da tela ( <i>mesh</i> ) [1/pol] |
| Esferas Empacotadas                     | $0,41r_s$                | $w$ = espaçamento entre dois fios [m]<br>$r_s$ = raio da esfera [m]                                       |

**Quadro 3 - Raio capilar efetivo,  $r_{c,eff}$ , para diferentes estruturas capilares**  
**Fonte: Adaptado de Chi (1976).**

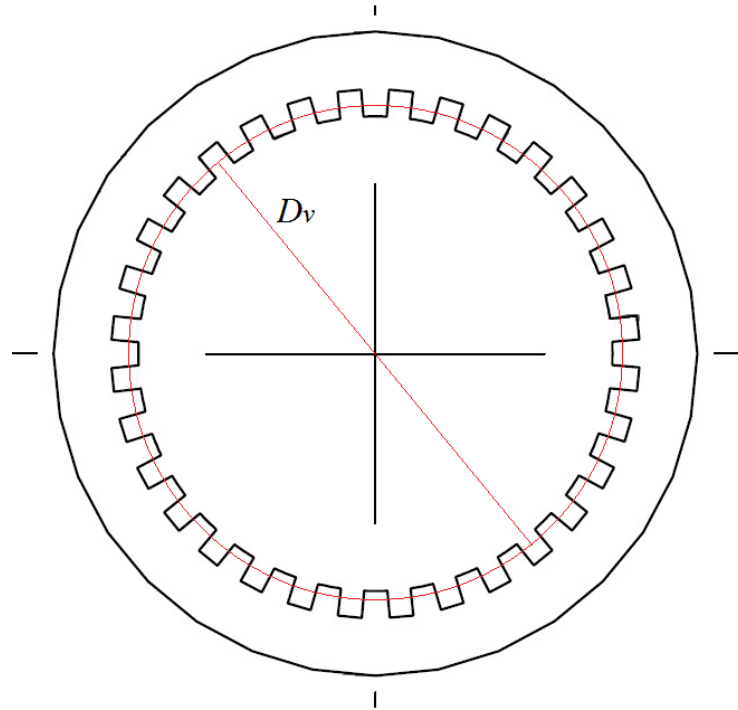
O parâmetro  $\Delta p_{II}$  é referente à queda de pressão hidrostática axial do fluido [Pa] e o parâmetro  $\Delta p_+$  é referente à queda de pressão normal [Pa]. Eles podem ser representados pelas Equações (3.24) e (3.25), respectivamente, por:

$$\Delta p_{II} = \rho_l g L \sin \psi \quad (3.24)$$

sendo que,  $g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ],  $L$  é o comprimento do tubo de calor [m] e  $\psi$  é o ângulo que o tubo faz com a horizontal.

$$\Delta p_+ = \rho_l g D_v \cos \psi \quad (3.25)$$

sendo que,  $D_v$  é o diâmetro do vapor [m], ilustrado na Figura 18 para microranhuras retangulares e definido no Quadro 4 para a estrutura capilar de microranhuras retangulares e de tela metálica.



**Figura 18 - Esquema ilustrativo para o diâmetro do vapor de microranhuras retangulares**  
**Fonte: Autoria própria.**

| Tipo de Estrutura       | $D_v$                   | Dados  |
|-------------------------|-------------------------|--|
| Tela Metálica           | $D_{int} - (NC + NE)$   | $D_{int}$ = diâmetro interno do tubo de calor [m]<br>$NC$ = número de camadas [ ]<br>$NE$ = número de espaçamentos [ ] |
| Microranhura Retangular | $D_{int} + 2(\delta/4)$ | $D_{int}$ = diâmetro interno do tubo de calor [m]<br>$\delta$ = profundidade da microranhura [m]                       |

**Quadro 4 - Diâmetro do vapor,  $D_v$ , para diferentes estruturas capilares**  
**Fonte: Adaptado de Chi (1976).**

O coeficiente de atrito relacionado à fase líquida  $F_l$  [ $Pa/W.m$ ], apresentado na Equação (3.21), é definido através da Equação (3.26).

$$F_l = \frac{\mu_l}{KA_{mp}h_{lv}\rho_l} \quad (3.26)$$

sendo que,  $K$  é a permeabilidade da estrutura capilar [ $m^2$ ] e  $A_{mp}$  é a área transversal da estrutura capilar [ $m^2$ ]. A definição da área transversal da estrutura capilar é apresentada no Quadro 5 para a estrutura capilar de microranhuras retangulares e de tela metálica.



| Tipo de Estrutura          | $A_{mp}$                              | Dados  |
|----------------------------|---------------------------------------|--|
| Tela Metálica              | $\frac{1}{4} \pi (D_{int}^2 - D_v^2)$ | $D_{int}$ = diâmetro interno do tubo de calor [m]<br>$D_v$ = diâmetro do vapor [m]       |
| Microranhura<br>Retangular | $2\pi r_m \delta$                     | $r_m = (D_v + \delta)/2$ = raio médio [m]<br>$\delta$ = profundidade da microranhura [m] |

**Quadro 5 - Área transversal da estrutura capilar,  $A_{mp}$ , para diferentes estruturas**  
Fonte: Autoria própria.

A permeabilidade da região porosa  $K$  é apresentada no Quadro 6, que define a permeabilidade para diferentes estruturas porosas.

| Tipo de Estrutura                       | $K [m^2]$  | Dados  |
|---|--|--|
| Cilindro Circular<br>(Artéria ou Túnel) | $r^2/8$  | $r$ = raio da passagem do escoamento líquido [m]   |
| Microranhura<br>Retangular              | $2\varepsilon (r_{h,l})^2 / (f_l Re_l)$                | $\varepsilon = Nw/(2\pi r_m)$ = porosidade [ ]<br>$w$ = largura da microranhura [m]<br>$\delta$ = profundidade da microranhura [m]<br>$(r_{h,l}) = 2w\delta/(w+2\delta)$ = raio hidráulico líquido [m]<br>$f_l Re_l$ = fator de arrasto do líquido [ ] |
| Anular Circular                         | $2(r_{h,l})^2 / (f_l Re_l)$                            | $(r_{h,l}) = r_1 - r_2$ = raio hidráulico líquido [m]<br>$f_l Re_l$ = fator de arrasto do líquido [ ]  |
| Tela Metálica                           | $\frac{D_{fio}^2 \varepsilon^3}{122(1-\varepsilon)^2}$ | $D_{fio}$ = diâmetro do fio [m]<br>$\varepsilon = 1 - (1,05\pi ND_{fio}/4)$ = porosidade [ ]<br>$N$ = número de malha da tela (mesh) [1/pol]   |
| Esféras Empacotadas                     | $\frac{r_s^2 \varepsilon^3}{37,5(1-\varepsilon)^2}$    | $r_s$ = raio da esfera [m]<br>$\varepsilon$ = porosidade dependente ao modo de empacotamento [ ]   |

**Quadro 6 - Permeabilidade,  $K$ , para diferentes estruturas porosas**  
Fonte: Adaptado de Chi (1976).

O coeficiente de atrito relacionado à fase de vapor  $F_v [Pa/W.m]$ , apresentado na Equação (3.21), é definido através da Equação (3.27).

$$F_v = \frac{(f_v Re_v) \mu_v}{2A_v r_v^2 \rho_v h_{lv}} \quad (3.27)$$

sendo que,  $f_v$  é o fator de atrito do vapor [ ],  $Re_v$  é o número de *Reynolds* do vapor [ ],  $\mu_v$  é a viscosidade dinâmica do vapor [*Pa.s*],  $\rho_v$  é a massa específica do vapor [ $kg/m^3$ ] e  $r_v$  é o raio hidráulico do vapor [*m*], dado por  $r_v = D_v/2$ .

A área por onde escoar o vapor  $A_v$  em [ $m^2$ ], é definida pela Equação (3.28).

$$A_v = \frac{1}{4} \pi D_v^2 \quad (3.28)$$

As correlações correspondentes ao coeficiente de atrito  $F_v$  para escoamentos laminares e turbulentos, compressíveis e incompressíveis, são mostrados no Quadro 7, em função dos números de *Reynolds* ( $Re_v$ ) e de *Mach* ( $Ma_v$ ) do vapor.

| Condições do Escoamento       | $F_v$  |
|-------------------------------|--|
| $Re_v < 2300$<br>$Ma_v < 0,2$ | $\frac{8\mu_v}{r_v^2 A_v \rho_v h_{lv}}$   |
| $Re_v < 2300$<br>$Ma_v > 0,2$ | $\left( \frac{8\mu_v}{r_v^2 A_v \rho_v h_{lv}} \right) \left( 1 + \frac{\gamma_v - 1}{2} Ma_v^2 \right)^{-1/2}$  |
| $Re_v > 2300$<br>$Ma_v < 0,2$ | $\left( \frac{0,019\mu_v}{A_v r_v^2 \rho_v h_{lv}} \right) \left( \frac{2r_v q_{c,máx}}{A_v h_{lv} \mu_v} \right)^{3/4}$   |
| $Re_v > 2300$<br>$Ma_v > 0,2$ | $\left( \frac{0,019\mu_v}{A_v r_v^2 \rho_v h_{lv}} \right) \left( \frac{2r_v q_{c,máx}}{A_v h_{lv} \mu_v} \right)^{3/4} \left( 1 + \frac{\gamma_v - 1}{2} Ma_v^2 \right)^{-3/4}$ |

Quadro 7 - Expressões para o coeficiente de atrito do vapor,  $F_v$   
Fonte: Adaptado de Chi (1976).

sendo que,  $\gamma_v$  é a razão de calores específicos do vapor, definida como  $\gamma_v = c_{p,v}/c_{v,v}$ .  $c_{p,v}$  é o calor específico do vapor à pressão constante [ $J/kg.K$ ] e  $c_{v,v}$  é o calor específico do vapor ao volume constante [ $J/kg.K$ ]. O número de *Reynolds*,  $Re_v$ , e o número de *Mach*,  $Ma_v$ , do vapor, são expressos pelas Equações (3.29) e (3.30).

$$Re_v = \frac{2r_v q_{c,máx}}{A_v \mu_v h_{lv}} \quad (3.29)$$

$$Ma_v = \frac{q_{c,máx}}{A_v \rho_v h_{lv} \sqrt{R_g T_v \gamma_v}} \quad (3.30)$$

sendo que,  $q_{c,m\acute{a}x}$  é a capacidade de transferência de calor do tubo de calor [ $W$ ],  $R_g$  é a constante do gás do fluido de trabalho [ $J/kg.K$ ] e  $T_v$  é a temperatura do vapor (temperatura de operação do tubo de calor) [ $K$ ].

### 3.3.1.2 Peterson (1994)

O limite capilar definido por Peterson (1994) é expresso em termos da Equação (3.31).

$$\Delta p_{c,m\acute{a}x} = \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_{mf,evap} + \Delta p_{mf,cond} + \Delta p_+ + \Delta p_{II} \quad (3.31)$$

sendo que,  $\Delta p_v$  é a queda de pressão da fase de vapor [ $Pa$ ],  $\Delta p_l$  é a queda de pressão da fase líquida [ $Pa$ ],  $\Delta p_{mf,evap}$  e  $\Delta p_{mf,cond}$  são as quedas de pressão da mudança de fase do fluido no evaporador e condensador, respectivamente [ $Pa$ ].  $\Delta p_+$  e  $\Delta p_{II}$  são as quedas de pressão hidrostática normal e axial, respectivamente [ $Pa$ ].

O parâmetro  $\Delta p_{c,m\acute{a}x}$  é a diferença de pressão capilar máxima gerada na estrutura capilar entre os pontos molhado e seco do tubo de calor, definida pela Equação (3.32).

$$\Delta p_{c,m\acute{a}x} = \frac{2\sigma_l}{r_{c,eff}} \quad (3.32)$$

sendo que, o raio capilar efetivo  $r_{c,eff}$  é o mesmo definido no Quadro 3.

A soma das quedas das pressões viscosas e inerciais que ocorrem na fase do vapor é dada pela Equação (3.33).

$$\Delta p_v = \left( \frac{C f_v Re_v \mu_v}{2 r_v^2 A_v \rho_v h_v} \right) l_{eff} q_{c,m\acute{a}x} \quad (3.33)$$

sendo que,  $C$  é uma constante dependente do número de *Mach*. O comprimento efetivo  $l_{eff}$  [ $m$ ] e a área de vapor  $A_v$  [ $m^2$ ] e são definidos nas Equações (3.20) e (3.28), respectivamente.

Os valores de  $f_v Re_v$  e  $C$  podem ser encontrados no Quadro 8 e dependem dos valores de  $Re_v$  e  $Ma_v$  que são definidos respectivamente pelas Equações (3.29) e (3.30).

| Condições do Escoamento       | $f_v Re_v$   | $C$   |
|-------------------------------|--|---|
| $Re_v < 2300$<br>$Ma_v < 0,2$ | 16   | 1   |
| $Re_v < 2300$<br>$Ma_v > 0,2$ | 16   | $\left(1 + \frac{\gamma_v - 1}{2} Ma_v^2\right)^{-1/2}$ |
| $Re_v > 2300$<br>$Ma_v < 0,2$ | $0,038 \left(\frac{2r_v q_{c,máx}}{A_v \mu_v h_{lv}}\right)^{3/4}$ | 1   |

**Quadro 8 - Expressões para o coeficiente de arrasto do vapor,  $f_v Re_v$ , e constante  $C$**   
Fonte: Adaptado de Peterson (1994).

A soma das quedas das pressões viscosas e inerciais que ocorrem na fase do líquido é dada pela Equação (3.34).

$$\Delta p_l = \left( \frac{\mu_l}{K A_{mp} h_{lv} \rho_l} \right) l_{eff} q_{c,máx} \quad (3.34)$$

sendo que,  $A_{mp}$  é área transversal da estrutura capilar [ $m^2$ ], definida no Quadro 5 para tela metálica e a permeabilidade  $K$  [ $m^2$ ] é definida no Quadro 6. No caso de microranhuras retangulares como estrutura capilar, diferentemente de Chi (1976), Peterson (1994) define  $A_{mp}$  pela Equação (3.35).

$$A_{mp} = N(w\delta) \quad (3.35)$$

sendo que,  $N$  é o número de microranhuras axiais no tubo de calor,  $w$  é a largura da microranhura [ $m$ ] e  $\delta$  é a profundidade da microranhura [ $m$ ].

A queda de pressão hidrostática normal,  $\Delta p_+$  é dada pela Equação (3.36).

$$\Delta p_+ = \rho_l g D_v \cos(\psi) \quad (3.36)$$

E a queda de pressão hidrostática axial,  $\Delta p_{II}$  é dada pela Equação (3.37).

$$\Delta p_{II} = \rho_l g L \sin(\psi) \quad (3.37)$$

Segundo Peterson (1994), as quedas de pressão devido ao escoamento nas regiões de evaporação  $\Delta p_{mf, evap}$  e condensação  $\Delta p_{mf, cond}$ , são muito pequenas quando comparadas com as outras quedas de pressão, podendo assim serem desprezadas.

### 3.3.1.3 Reay *et al.* (2014)

Segundo Reay *et al.* (2014), para que o tubo de calor seja funcional, a máxima pressão capilar  $\Delta p_{c, máx}$  deve ser maior do que a queda de pressão total no tubo de calor. Essa queda de pressão é expressa pela Equação (3.38).

$$\Delta p_{c, máx} \geq \Delta p_l + \Delta p_v + \Delta p_g \quad (3.38)$$

sendo que,  $\Delta p_l$  é a queda de pressão requerida para retornar o líquido do condensador ao evaporador;  $\Delta p_v$  é a queda de pressão, necessária para fazer com que o vapor flua do evaporador ao condensador; e  $\Delta p_g$  é a queda de pressão, devido à aceleração da gravidade, a qual pode ser nula, positiva ou negativa, dependendo da inclinação do tubo de calor.

Se a condição da Equação (3.38) não for satisfeita, dar-se-á a secagem da estrutura capilar na região do evaporador e o tubo de calor então falhará. Esta condição se refere ao fluxo de calor máximo permitido que está diretamente relacionado ao limite capilar.

A máxima pressão capilar  $\Delta p_{c, máx}$  é conforme a Equação (3.39).

$$\Delta p_{c, máx} = \frac{2\sigma_l \cos \theta}{r_{c, eff}} \quad (3.39)$$

sendo que,  $\theta$  é o ângulo de contato que o fluido de trabalho faz com a superfície interna do tubo de calor. Este ângulo é formado devido ao fenômeno da condição hidrofílica; quanto mais hidrofílica a condição da superfície e fluido, maior será o ângulo de contato.

A queda de pressão no caminho do líquido  $\Delta p_l$  é definida por Reay *et al.* (2014) da mesma maneira que Peterson (1994) pela Equação (3.34).

A queda de pressão do vapor  $\Delta p_v$  é a soma da queda de pressão inercial para trazer o vapor da estrutura capilar para o centro do tubo e proporcionar o impulso inicial na direção do eixo, e a queda de pressão por atrito no raio  $r_v$ , onde o vapor entra em contato com a superfície da estrutura capilar e pode ser expressa em termos da Equação (3.40).

$$\Delta p_v = \Delta p_{v, \text{evap}} + \Delta p_{v, \text{adiab}} + \Delta p_{v, \text{cond}} \quad (3.40)$$

De acordo com Cotter (1965),  $\Delta p_{v, \text{evap}}$ ,  $\Delta p_{v, \text{adiab}}$  e  $\Delta p_{v, \text{cond}}$  são as quedas de pressão [Pa] do vapor na região do evaporador, da seção adiabática e do condensador, respectivamente.

Na região do evaporador, a queda de pressão pode ser expressa pela Equação (3.41).

$$\Delta p_{v, \text{evap}} = \frac{\dot{m}^2}{8\rho_v r_v^4} \quad (3.41)$$

sendo que,  $\dot{m} = q_{c, \text{máx}}/h_{lv}$  é a vazão mássica do vapor em [kg/s].

A região do condensador pode ser tratada de maneira similar, porém nesse caso o *momentum* será perdido à medida em que a corrente de vapor se estabiliza, assim o termo inercial será negativo, uma vez que deve haver a recuperação de pressão no condensador. Desta forma, a queda de pressão do vapor na região do condensador pode ser expressa pela Equação (3.42).

$$\Delta p_{v, \text{cond}} = -\frac{4}{\pi^2} \frac{\dot{m}^2}{8\rho_v r_v^4} \quad (3.42)$$

Na seção adiabática, Cotter (1965) assumiu um escoamento laminar completamente desenvolvido, assim a diferença de pressão é definida pela Equação (3.43).

$$\Delta p_{v, \text{adiab}} = \frac{8\mu_v \dot{m}}{\rho_v \pi r_v^4} l_{\text{adiab}} \quad (3.43)$$

Dessa maneira, substituindo a expressão  $\dot{m} = q_{c, \text{máx}}/h_{lv}$  e somando as Equações (3.41), (3.42) e (3.43), a expressão completa para a queda de pressão do vapor considerando um escoamento laminar é definida pela Equação (3.44).

$$\Delta p_v = \left(1 - \frac{4}{\pi^2}\right) \frac{q_{c, \text{máx}}^2}{h_{lv}^2 8\rho_v r_v^4} + \frac{8\mu_v q_{c, \text{máx}}}{\rho_v \pi r_v^4 h_{lv}} l_{\text{adiab}} \quad (3.44)$$

A queda de pressão gravitacional é dada pela Equação (3.45).

$$\Delta p_g = \rho_l g L \sen \psi \quad (3.45)$$

uma vez que,  $\psi$  é o ângulo entre o tubo de calor e a direção horizontal.  $\psi$  é considerado positivo quando o condensador está mais baixo do que o evaporador.

Como mencionado anteriormente, devido à falta de trabalhos que analisaram o processo de eletroerosão a fio para a fabricação de microranhuras em tubos de calor, os limites operacionais para os tubos de calor analisados foram adaptados, pois como consequência do novo processo de fabricação, o perfil das microranhuras se tornou quase que semicircular. Dessa maneira, algumas dimensões relacionadas às microranhuras, como: a profundidade  $\delta$ , a largura  $w$  e a largura da crista entre elas  $w_f$  foram definidas em função do diâmetro do fio do processo de eletroerosão  $\phi$ , para cada tipo de configuração de microranhura fabricada.

Os limites operacionais foram escolhidos a partir da teoria de Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014), apresentada anteriormente. Para a adaptação aos tubos de calor com microranhuras axiais, o menor valor de cada um dos limites operacionais foi selecionado. A seguir, apenas a adaptação do limite capilar é apresentada. As correlações que representam os demais limites operacionais adaptados estão disponíveis no Apêndice A.

O limite capilar escolhido está de acordo com Reay *et al.* (2014), representado pelas Equações (3.34), (3.38), (3.39), (3.44) e (3.45):

$$\frac{2\sigma_l \cos \theta}{r_{c,eff}} = \left( \frac{\mu_l}{KA_{mp} h_{lv} \rho_l} \right) l_{eff} q_{c,max} + \left( 1 - \frac{4}{\pi^2} \right) \frac{q_{c,max}^2}{h_{lv}^2 8 \rho_v r_v^4} + \frac{8 \mu_v q_{c,max}}{\rho_v \pi r_v^4 h_{lv}} l_{adiab} + \rho_l g L \sen(\psi) \quad (3.46)$$

Considerando a hipótese de que, em média, 50% das microranhuras estão preenchidas de líquido, o raio capilar efetivo  $r_{c,eff}$ , o raio de vapor  $r_v$  e a área de vapor  $A_v$ , são ajustados à geometria semicircular da microranhura, por:

$$r_{c,eff} = w \quad (3.47)$$

$$r_v = \frac{(D_{int} + \delta/2)}{2} \quad (3.48)$$

$$A_v = \frac{1}{4} \pi \left( D_{int} + \frac{\delta}{4} \right)^2 \quad (3.49)$$

sendo que,  $D_{int}$  é o diâmetro interno [m] do tubo de cobre.

### 3.4 ANÁLISE TEÓRICA DOS TUBOS DE CALOR

Na presente seção são apresentados e discutidos os resultados teóricos do projeto térmico e do limite capilar adaptados para os tubos de calor com microranhuras axiais fabricadas por eletroerosão a fio.

Através do projeto térmico, foi previsto teoricamente a quantidade de energia na forma de calor que o tubo de calor seria capaz de transferir. Feito isso, é necessário então comparar o projeto térmico do tubo de calor com seus limites operacionais, e o menor deles indicará, teoricamente, a potência máxima que o tubo de calor projetado poderá transportar. Esse procedimento é realizado para que o limite teórico de potência máxima que pode ser dissipada pelo tubo de calor não seja ultrapassado, prevenindo o colapso do dispositivo.

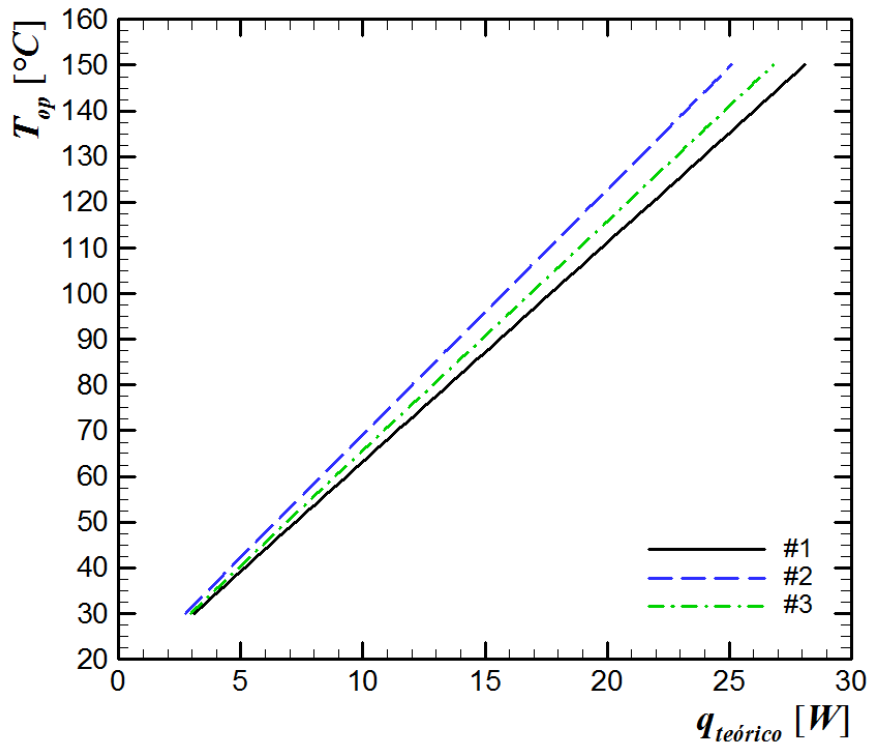
Na resolução do conjunto de equações algébricas do projeto térmico e dos limites operacionais dos tubos de calor o *software Engineering Equation Solver™* (EES™) foi utilizado. As propriedades termofísicas dos materiais e do fluido de trabalho foram retiradas da biblioteca do *software* EES™.

Os parâmetros geométricos e de operação para o projeto térmico do tubo de calor com microranhuras axiais fabricadas por eletroerosão a fio foram baseados em resultados típicos encontrados em aplicações de resfriamento de componentes eletroeletrônicos (BAR-COHEN *et al.*, 2003). Nesse sentido, o tubo de calor utilizado no presente Trabalho teve diâmetro externo de 0,00945 m, diâmetro interno de 0,0070 m, comprimento de 0,20 m, e o comprimento do evaporador, da seção adiabática e do condensador foram de 0,08 m, 0,02 m e 0,10 m, respectivamente.

O resultado do projeto térmico nos permite ter uma estimativa da relação entre a temperatura de operação do tubo de calor em função da potência que pode ser por ele dissipada. Todos os parâmetros geométricos do tubo de calor podem ser variados afim de encontrar uma geometria ótima para a aplicação desejada, tal geometria é caracterizada pela configuração geométrica que permite ao tubo dissipar a maior potência a uma temperatura de operação mais baixa. Com isso, a partir do projeto térmico, o Gráfico 3 descreve a potência que pode ser



dissipada pelos três tubos de calor com diferentes configurações de microranhura em função da temperatura de operação (temperatura da seção adiabática). A obtenção da temperatura de operação foi realizada a partir do circuito térmico mostrado na Figura 15.



**Gráfico 3 - Temperatura de operação em função do  $q_{teórico}$**   
 Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 3 mostra o comportamento da temperatura de operação dos tubos de calor testados em função da potência dissipada. É possível concluir que, segundo o projeto térmico adaptado, o tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 será capaz de dissipar uma maior potência a uma menor temperatura de operação, quando comparado aos tubos de calor com microranhuras do Tipo #2 e #3. Além disso, de acordo com esta análise teórica, o tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 apresentará o pior desempenho quando comparado aos outros dois tubos, pois o tubo de calor atinge temperaturas mais altas a potências mais baixas.

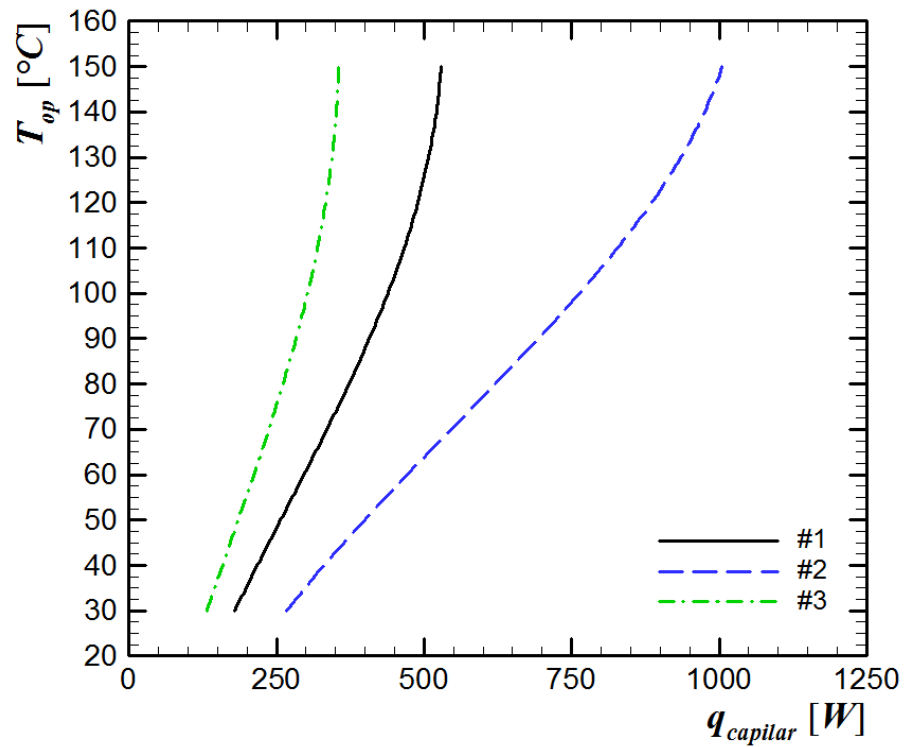
A Tabela 4 mostra os valores das temperaturas de operação do projeto térmico dos três tubos de calor com microranhuras do Tipo #1, Tipo #2 e Tipo #3 em função da potência dissipada.

**Tabela 4 - Temperaturas de operação do projeto térmico dos três tubos de calor com microranhuras em função da potência dissipada, tubo de calor na horizontal (0 °)**

| Temperatura de operação<br>[°C] | Microranhura do<br>Tipo #1<br>$q$ [W] | Microranhura do<br>Tipo #2<br>$q$ [W] | Microranhura do<br>Tipo #3<br>$q$ [W] |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 30                              | 3,0                                   | 2,7                                   | 2,9                                   |
| 35                              | 4,1                                   | 3,6                                   | 3,9                                   |
| 40                              | 5,1                                   | 4,5                                   | 4,9                                   |
| 45                              | 6,2                                   | 5,5                                   | 5,9                                   |
| 50                              | 7,2                                   | 6,4                                   | 6,8                                   |
| 55                              | 8,2                                   | 7,3                                   | 7,8                                   |
| 60                              | 9,3                                   | 8,2                                   | 8,8                                   |
| 65                              | 10,3                                  | 9,2                                   | 9,8                                   |
| 70                              | 11,4                                  | 10,1                                  | 10,8                                  |
| 75                              | 12,4                                  | 11,0                                  | 11,8                                  |
| 80                              | 13,5                                  | 12,0                                  | 12,8                                  |
| 85                              | 14,5                                  | 12,9                                  | 13,8                                  |
| 90                              | 15,6                                  | 13,9                                  | 14,8                                  |
| 95                              | 16,6                                  | 14,8                                  | 15,8                                  |
| 100                             | 17,6                                  | 15,7                                  | 16,8                                  |
| 105                             | 18,7                                  | 16,7                                  | 17,8                                  |
| 110                             | 19,7                                  | 17,6                                  | 18,8                                  |
| 115                             | 20,8                                  | 18,5                                  | 19,8                                  |
| 120                             | 21,8                                  | 19,5                                  | 20,8                                  |
| 125                             | 22,9                                  | 20,4                                  | 21,8                                  |
| 130                             | 23,9                                  | 21,3                                  | 22,8                                  |
| 135                             | 24,9                                  | 22,3                                  | 23,8                                  |
| 140                             | 26,0                                  | 23,2                                  | 24,8                                  |
| 145                             | 27,0                                  | 24,1                                  | 25,8                                  |
| 150                             | 28,1                                  | 25,0                                  | 26,8                                  |

**Fonte: Autoria própria.**

Os limites operacionais também são parâmetros importantes que devem ser considerados no projeto de um tubo de calor. O menor dos limites sempre caracteriza o limite de transferência de calor do tubo de calor. No caso dos tubos de calor com microranhuras do Tipo #1, #2 e #3, o limite capilar foi o menor dentre os limites analisados. O Gráfico 4 mostra o limite capilar dos tubos de calor analisados neste Trabalho.



**Gráfico 4 - Limite capilar em função da temperatura de operação**  
**Fonte: Autoria própria.**

A Tabela 5 mostra os valores das temperaturas de operação do limite capilar dos três tubos de calor com microranhuras do Tipo #1, Tipo #2 e Tipo #3 em função da potência dissipada.

**Tabela 5 - Temperaturas de operação do limite capilar dos três tubos de calor com microranhuras em função da potência dissipada, tubo de calor na horizontal (0 °)**

| Temperatura de operação<br>[°C] | Microranhura do    | Microranhura do    | Microranhura do    |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                 | Tipo #1<br>$q$ [W] | Tipo #2<br>$q$ [W] | Tipo #3<br>$q$ [W] |
| 30                              | 179,6              | 267,6              | 132,4              |
| 35                              | 198,4              | 298,6              | 145,5              |
| 40                              | 217,7              | 331,1              | 158,8              |
| 45                              | 237,2              | 364,8              | 172,1              |
| 50                              | 257,0              | 399,7              | 185,4              |
| 55                              | 276,8              | 435,5              | 198,6              |
| 60                              | 296,6              | 471,9              | 211,7              |
| 65                              | 316,1              | 508,9              | 224,5              |
| 70                              | 335,4              | 546,2              | 237,1              |
| 75                              | 354,3              | 583,6              | 249,3              |
| 80                              | 372,7              | 620,8              | 261,0              |
| 85                              | 390,4              | 657,6              | 272,3              |
| 90                              | 407,4              | 693,8              | 283,0              |
| 95                              | 423,6              | 729,1              | 293,1              |
| 100                             | 438,9              | 763,3              | 302,6              |
| 105                             | 453,2              | 796,3              | 311,4              |
| 110                             | 466,4              | 827,8              | 319,5              |
| 115                             | 478,6              | 857,5              | 326,8              |
| 120                             | 489,5              | 885,4              | 333,3              |
| 125                             | 499,3              | 911,2              | 339,1              |
| 130                             | 507,8              | 934,9              | 344,0              |
| 135                             | 515,0              | 956,2              | 348,1              |
| 140                             | 521,0              | 975,0              | 351,3              |
| 145                             | 525,6              | 991,3              | 353,7              |
| 150                             | 528,9              | 1005,0             | 355,2              |

Fonte: Autoria própria.

## 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste Capítulo, a etapa de construção dos tubos de calor com microranhuras fabricadas por eletroerosão a fio são apresentadas concomitantemente com o aparato utilizado e procedimento de coleta de dados experimentais.

### 4.1 CONSTRUÇÃO DOS TUBOS DE CALOR COM MICRORANHURAS

A construção dos tubos de calor foi executada no Laboratório de Controle Térmico do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do Campus Ponta Grossa - LabCT/DAMEC/UTFPR/PG, enquanto que a fabricação das microranhuras axiais pelo processo de eletroerosão a fio foi executada na empresa ELFF - Erosão a Fio e Usinagem LTDA na cidade de Curitiba/PR.

#### 4.1.1 Características dos Tubos de Calor

Os tubos de calor foram produzidos a partir de um tubo reto de cobre com um diâmetro externo de 9,45 mm (3/8”), um diâmetro interno de 6,20 mm (1/4”) e um comprimento total de 200 mm. As tampas foram usinadas a partir de uma barra maciça de cobre com diâmetro de 9,45 mm, sendo um dos lados perfurado para o acoplamento do capilar de cobre de diâmetro interno de 1 mm e comprimento de 40 mm.

Os tubos de calor analisados apresentam um evaporador de 80 mm de comprimento, uma região adiabática de 20 mm e um condensador de 100 mm. Principal atenção foi dada à estrutura capilar de microranhuras axiais semicirculares dos tubos de calor fabricados neste estudo, no entanto, uma estrutura capilar de tela metálica (*mesh* 100) também foi testada e seu desempenho foi comparado com os resultados provenientes dos tubos de calor com microranhuras axiais. O fluido de trabalho utilizado foi a água deionizada, com uma razão de preenchimento de 60% do volume interno do evaporador. As principais características dos tubos de calor são apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Características do tubo de calor**

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| Diâmetro externo do tubo ( $D_{ext}$ )          | 0,00945 m                   |
| Diâmetro interno do tubo ( $D_{int}$ )          | 0,00700 m                   |
| Comprimento do tubo ( $L$ )                     | 0,20 m                      |
| Comprimento do evaporador ( $l_{evap}$ )        | 0,08 m                      |
| Comprimento da seção adiabática ( $l_{adiab}$ ) | 0,02 m                      |
| Comprimento do condensador ( $l_{cond}$ )       | 0,10 m                      |
| Fluido de trabalho                              | Água deionizada             |
| Razão de preenchimento                          | 60% do volume do evaporador |

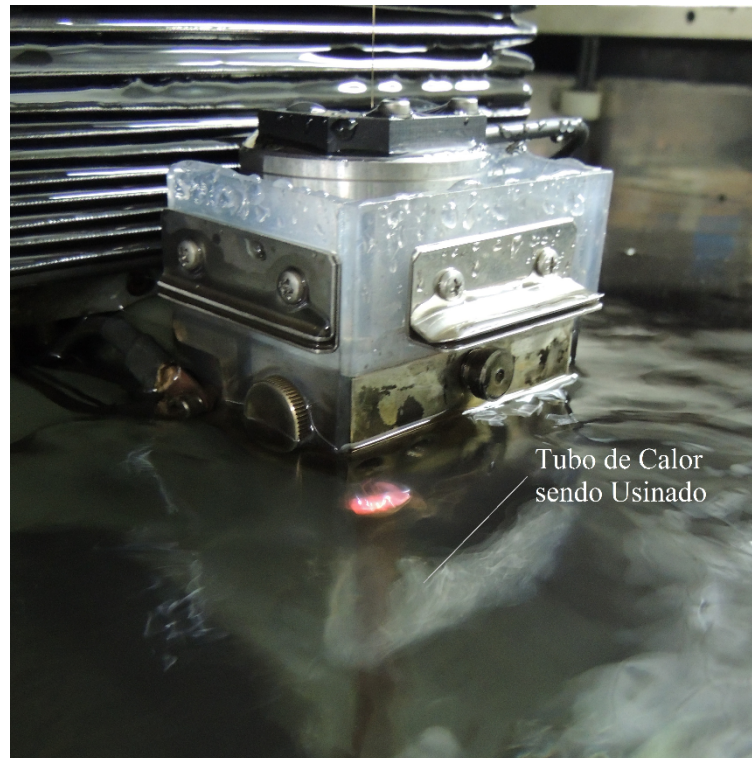
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.2 Fabricação das Microranhuras Axiais

Como mencionado anteriormente, o processo de fabricação das microranhuras foi realizado na empresa ELFF - Erosão a Fio e Usinagem LTDA na cidade de Curitiba/PR, pois a UTFPR/Campus Ponta Grossa não possui de uma máquina de eletroerosão a fio compatível.

Os tubos de cobre usinados foram previamente preparados: corte dimensionado, lixamento, remoção de rebarbas e limpeza. O desenho técnico 2D foi feito em um *software* CNC da máquina de eletroerosão a fio japonesa Fanuc Robocut™ modelo  $\alpha$ -1iC. O fio mais adequado ao processo foi selecionado, neste caso, o fio de latão Ero'Bras™ de 0,25 mm de diâmetro e tensão de 900 N/mm<sup>2</sup>. A máquina foi então configurada e o tubo a ser trabalhado foi fixado no eixo da mesma e alinhado por meio de um relógio comparador Mitutoyo™. O fio foi passado pelo interior do tubo e, então, o reservatório foi preenchido com fluido dielétrico filtrado e o processo de usinagem foi iniciado. A Fotografia 2 mostra o processo de eletroerosão a fio sendo executado para usinar as microranhuras na superfície interna dos tubos de calor.

A Figura 19 ilustra os três tubos fabricados com diferentes configurações geométricas de microranhuras, enquanto a Figura 20 mostra detalhadamente as diferentes configurações de microranhuras através de imagens microscópicas obtidas em um microscópio Tescan™.

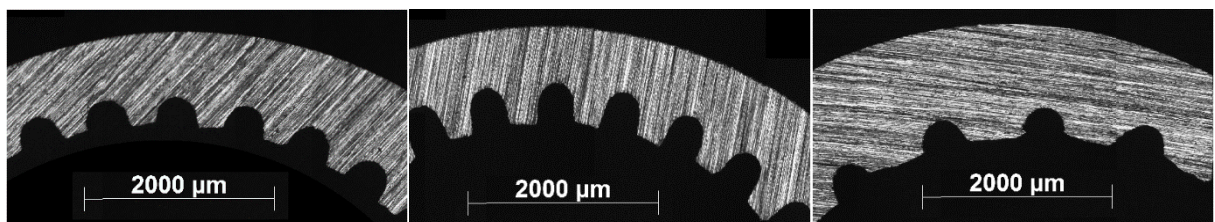


Fotografia 2 - Processo de eletroerosão a fio no tubo de calor de cobre  
Fonte: Autoria própria.



(a) Microranhura do Tipo #1 (b) Microranhura do Tipo #2 (c) Microranhura do Tipo #3

Figura 19 - Tubos com diferentes configurações geométricas de microranhuras  
Fonte: Autoria própria.



(a) Microranhura do Tipo #1 (b) Microranhura do Tipo #2 (c) Microranhura do Tipo #3

Figura 20 - Microranhuras em detalhe  
Fonte: Autoria Própria.

#### 4.1.3 Limpeza do Tubo de Calor e Componentes

A limpeza do tubo e seus componentes é necessária para a eliminação de impurezas, melhorar a qualidade do vácuo e garantir a molhabilidade do fluido de trabalho. Desta forma, todos os componentes do tubo de calor devem estar limpos, antes que o fluido de trabalho seja introduzido. Para tal, o tubo ranhurado, as tampas e o capilar foram previamente limpos utilizando primeiramente acetona, para retirar as maiores impurezas, seguido de uma limpeza com uma solução de ácido sulfúrico com concentração de 10% em volume ( $H_2SO_4$  de 0,1M), e então levados a um banho ultrassônico Kondentehc™ modelo CD-4860, permanecendo mergulhados em álcool etílico 95% durante 15 (quinze) minutos (Fotografia 3), para que fossem completamente limpos. Esse procedimento foi repetido para todos os tubos de calor construídos.



**Fotografia 3 - Banho ultrassônico utilizado na limpeza do tubo de calor e seus componentes**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.4 Montagem

Após a realização da limpeza de seus componentes, o tubo de calor pôde ser propriamente montado. A Fotografia 4 mostra o tubo de cobre, as tampas de fechamento do tubo e o capilar. As tampas e o capilar foram soldadas nas extremidades do tubo de calor de acordo com as posições mostradas na Fotografia 5. O processo de soldagem foi efetuado com



o auxílio de um ferro de soldar Hikari™ Power300 e as peças foram brasadas utilizando uma liga de estanho como material de adição.



**Fotografia 4 - Tubo, tampas e capilar**  
**Fonte: Autoria própria.**

Um dos tubos de calor utilizado neste Trabalho é esquematicamente apresentado na Fotografia 5. Ele é composto por um tubo de cobre oco, uma estrutura capilar interna (microranhuradas axiais) e um fluido de trabalho (água deionizada).



**Fotografia 5 - Tubo de cobre após a soldagem**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.5 Teste de Estanqueidade

Para verificar se não houve falha no processo de soldagem do tubo de calor, um teste de estanqueidade foi realizado utilizando uma bomba de deslocamento positivo manual, um recipiente com água e uma conexão polimérica para ligar a bomba ao tubo capilar. Para tal, o tubo de calor foi submerso em água e, com a bomba de deslocamento positivo, o ar foi bombeado para dentro do tubo. Se houvesse alguma falha, surgiriam bolhas de ar na água, facilitando a identificação da falha na solda. Caso ocorresse o surgimento de bolhas, o tubo de calor deveria ser desmontado, limpo, soldado e testado novamente para a correção da falha no processo de soldagem.

#### 4.1.6 Procedimento de Vácuo

Primeiramente, o tubo de calor foi acoplado a uma bomba de vácuo LAB1000™, através do capilar, para o processo de evacuação inicial, com o intuito de remover principalmente o líquido remanescente do processo de limpeza. O tubo de calor é então

acoplado a uma bomba de vácuo EOS Value™ modelo i260SV (Fotografia 6). Para garantir uma conexão sem vazamentos, gel de vedação (silicone) foi aplicado nas conexões da mangueira polimérica previamente à realização de vácuo no tubo.

A bomba de vácuo permaneceu em funcionamento, acoplada ao tubo de calor, por aproximadamente 4 (quatro) horas. O fluxo na mangueira polimérica foi então interrompido e o vacuômetro verificado para que se garantisse a conformidade do vácuo no interior do tubo de calor. Após a realização do vácuo, a pressão manométrica medida no vacuômetro da bomba foi de -900 mbar (-90 kPa) e a temperatura de saturação do fluido de trabalho referente a essa pressão, foi de 43,74 °C. Com o auxílio de um fórceps, a mangueira polimérica foi vedada e então, a bomba de vácuo foi desligada.



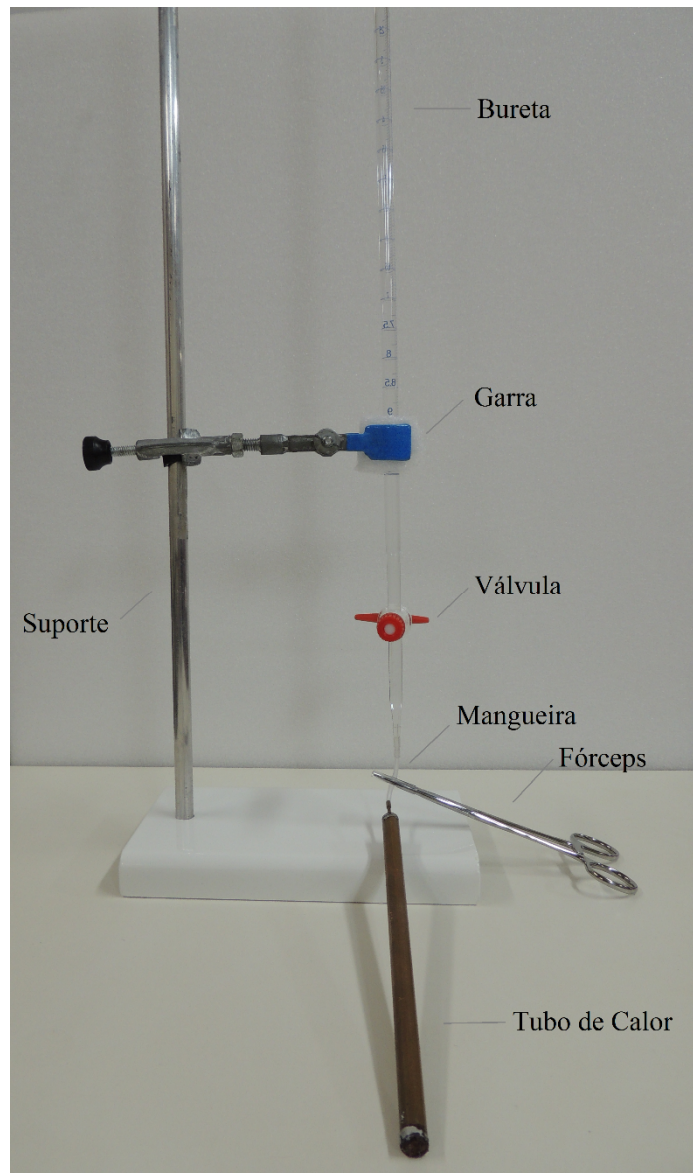
**Fotografia 6 - Bomba de vácuo e tubo de calor**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.7 Preenchimento dos Tubos de Calor com o Fluido de Trabalho

Após o processo de montagem e evacuação serem realizados, a etapa de preenchimento do tubo de calor com o fluido de trabalho foi executada com o auxílio de uma bureta e uma seringa. O volume de fluido de trabalho inserido no tubo de calor é de grande importância para o sistema de bombeamento capilar, pois a transferência de calor depende dessa

quantidade de fluido. Se o volume de fluido for insuficiente, o sistema de bombeamento cessa e o tubo de calor falha, não transferindo energia térmica. Tal volume de fluido foi calculado baseando-se na literatura disponível, sendo para o caso da presente Dissertação de Mestrado, 60% do volume do evaporador, correspondendo à quantidade de 1,8 ml no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1; 1,7 ml no tubo de calor com microranhura do Tipo #2; e 1,6 ml no tubo de calor com microranhuras do Tipo #3.

Para este processo de preenchimento, foi desenvolvida uma pequena estação de preenchimento composta por um suporte universal com garra, uma bureta graduada Global Glass™ (escala de 0,1 ml) com capacidade de 25 ml e um fórceps (Fotografia 7).



**Fotografia 7 - Estação de preenchimento dos tubos de calor**  
Fonte: Autoria própria.

O tubo de calor evacuado foi acoplado a uma mangueira polimérica que faz conexão com a bureta. A mangueira foi pinçada com o fórceps para evitar que ar entrasse no tubo de calor. A bureta estava completamente preenchida com o fluido de trabalho. O próximo passo foi abrir a válvula da bureta cuidadosamente para que não fosse formada nenhuma bolha de ar na tubulação de conexão entre a bureta e o tubo de calor. O processo de abertura do fórceps deve ser feito de maneira cautelosa, pois se a abertura for feita de forma abrupta, bolhas podem entrar no tubo de calor prejudicando o seu funcionamento. O fórceps foi então aberto cuidadosamente para drenar o fluido de trabalho até que o tubo de calor fosse carregado com o volume de fluido desejado.

Como a quantidade de fluido a ser carregada é muito pequena, (inferior a 2 ml) atenção especial foi dada para que essas bolhas não entrassem no tubo de calor (eliminar as bolhas na mangueira, por exemplo). No processo de preenchimento, muito cuidado é necessário para que não se perca o vácuo existente ou ocorra a entrada de ar (fluido não condensável) dentro do tubo de calor. Se isso acontecer, todo o processo de vácuo deve ser realizado novamente.

Após esta etapa, o fórceps foi fechado e, então, o capilar de cobre foi conformado com um alicate de pressão (Fotografia 8), bloqueando o único caminho pelo qual o ar poderia entrar. Além disso, a soldagem do capilar de cobre foi realizada para completar o processo de vedação dos tubos de calor.



(a)



(b)

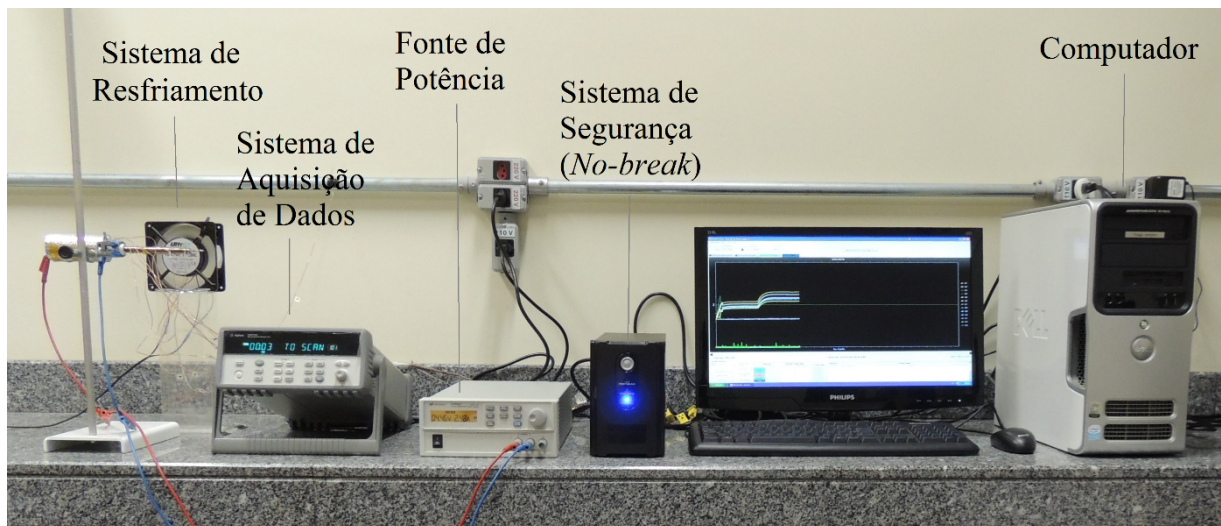
**Fotografia 8 - Clipagem e selagem do capilar de cobre**  
Fonte: Autoria própria.

## 4.2 TESTES EXPERIMENTAIS

Na presente seção, o aparato e o procedimento experimental adotados são descritos.

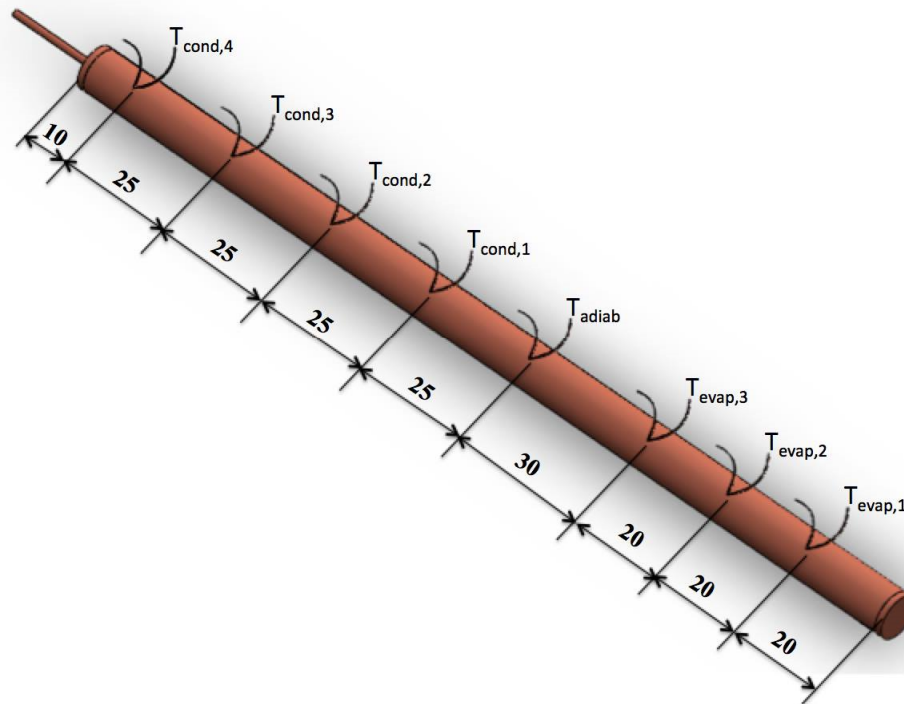
### 4.2.1 Aparato Experimental

O aparato utilizado para os testes experimentais, mostrado na Fotografia 9, foi composto por um sistema de aquisição de dados Agilent™ DAQ-34970A com 20 canais, uma fonte de potência Agilent™ U8002A, um ventilador Ultrar™ DF12038HBL2, um microcomputador Dell™, um suporte universal com garra e um *no-break* NHST™ modelo Compact Plus III de 1200 VA.



**Fotografia 9 - Bancada experimental para realização de testes**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para a avaliação do comportamento térmico do tubo de calor, foram utilizados termopares do Tipo K (Omega™), soldados no Laboratório de Tubos de Calor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina - Labtucal/EMC/UFSC em Florianópolis/SC. Esses sensores de temperatura foram fixados na superfície externa do tubo de calor utilizando uma fita adesiva termosensível (Kapton™). A Figura 21 apresenta de forma esquemática o posicionamento dos termopares no tubo de calor estudado.



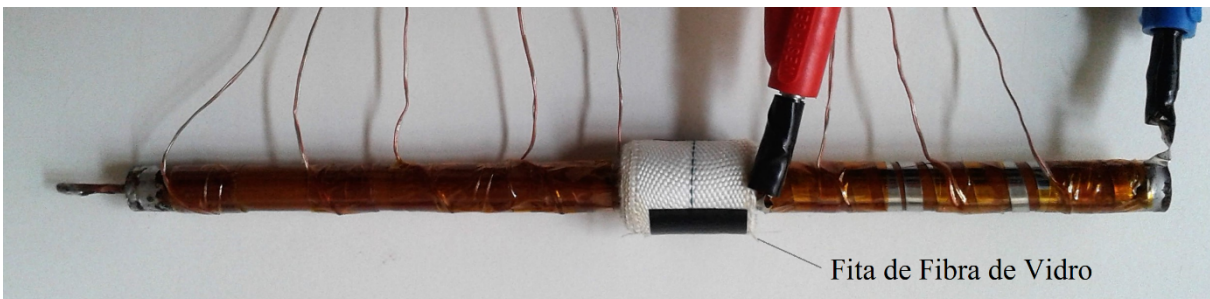
**Figura 21 - Posicionamento dos termopares no tubo de calor (em [mm])**  
**Fonte: Autoria própria.**

Conforme mostrado na Figura 21, 3 termopares foram fixos ao evaporador, 4 ao condensador, 1 na região adiabática. Outros 3 termopares estavam na superfície externa do isolamento térmico do evaporador e 1 destinado à medida da temperatura ambiente. Assim, um total de 12 termopares foram utilizados para a medição das temperaturas nos tubos de calor durante a execução dos testes experimentais.

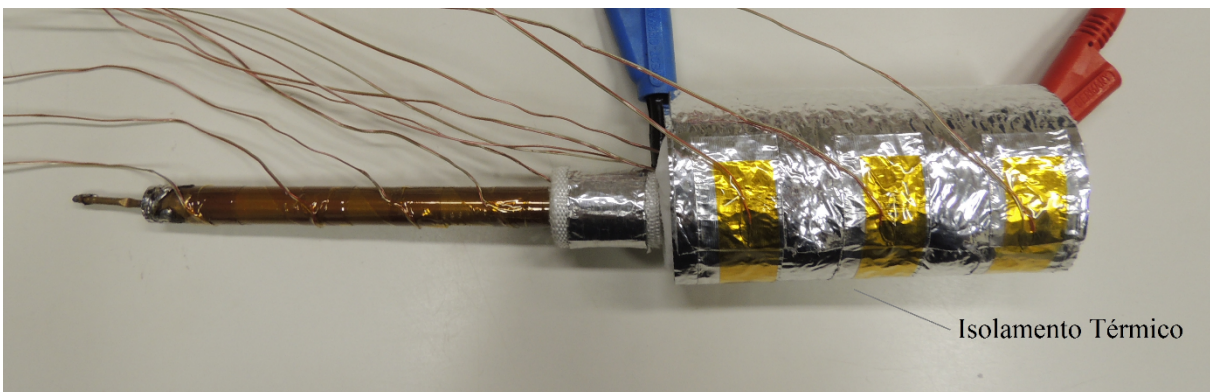
O sistema de aquecimento do evaporador foi realizado pela dissipação de potência proveniente da passagem de uma corrente elétrica em uma fita resistiva (Omega™) de 0,1 mm de espessura e 3,5 mm de largura, feita de uma liga níquel-cromo (Fotografia 10). A fixação da fita resistiva também foi feita com a fita adesiva termosensível. Uma fita de fibra de vidro foi usada na seção adiabática como um isolante térmico entre o suporte e o tubo de calor (Fotografia 11). Um isolamento térmico aeronáutico e uma camada de polietileno cobriram o evaporador do tubo de calor para prevenir a perda de calor para o ambiente (Fotografia 12), garantindo que todo o calor gerado pelo efeito Joule fosse fornecido ao evaporador. Toda a superfície externa do tubo de calor foi protegida com fita adesiva termosensível para que o resistor e os termopares não tivessem contato direto com o tubo de cobre. O sistema de resfriamento por convecção forçada de ar foi constituído pelo ventilador Ultrar™ na região do condensador.



**Fotografia 10 - Tubo de calor com sistema de aquecimento**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Fotografia 11 - Tubo de calor com fita de fibra de vidro na seção adiabática e termopares fixados**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Fotografia 12 - Tubo de calor com sistema de aquecimento, termopares, fita de fibra de vidro na seção adiabática e isolamento térmico aeronáutico**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.2.2 Procedimento Experimental

Para garantir um melhor resultado e a conformidade dos testes, a temperatura do ambiente foi a aproximadamente 20 °C. Uma verificação minuciosa dos equipamentos do aparato e do tubo de calor testado (fixação de termopares, isolamento térmico, conexão do

resistor, entre outros) foi feita antes de cada teste. O tubo de calor foi cuidadosamente fixado ao suporte pela região adiabática e sua inclinação foi ajustada por meio de um transferidor de ângulo acoplado ao suporte. O ventilador foi ligado, corretamente posicionado na região do condensador do tubo de calor e ajustado à velocidade de 5 m/s. O sistema de aquisição de dados foi, então, ativado e as temperaturas medidas pelos termopares eram verificadas em relação à temperatura ambiente, se estas estivessem estáveis e aproximadamente 20 °C, a fonte de potência poderia ser ligada. As inclinações de teste do tubo de calor foram: 0 °, 45 °, 90 °, 135 °, 225 ° e 270 °, em relação à horizontal.

A potência inicial dissipada pela resistência foi de 5 W e após aproximadamente 15 minutos era verificada a condição de regime *quasi* permanente foi alcançada nos testes. Em caso positivo, a potência era reajustada com um acréscimo de 5 W, e nos casos em que regime *quasi* permanente não foi alcançado nesse período de tempo, a potência foi mantida até que se atingisse esta condição. O incremento de potência foi feito até que a temperatura máxima no tubo de calor atingisse a temperatura crítica (150 °C), onde a fusão dos materiais de colagem começa a acontecer. Os dados foram coletados a cada 5 (cinco) segundos, gravados no microcomputador através do *software* Agilent<sup>TM</sup> Benchlink Data Logger 3 e, posteriormente, tratados.

#### 4.3 ANÁLISE DE INCERTEZA

As incertezas experimentais estão associadas às incertezas dos sensores de temperatura (termopares do Tipo K), ao sistema de aquisição de dados e à fonte de potência e foram apresentadas juntamente com os resultados obtidos. Para a determinação da incerteza da medição da potência elétrica, obtida a partir dos resistores elétricos, foi utilizado o método de propagação de erros descrito por Holman (1994). O Apêndice B apresenta estes cálculos. Este mesmo procedimento foi aplicado para a determinação das incertezas das resistências térmicas dos tubos de calor.



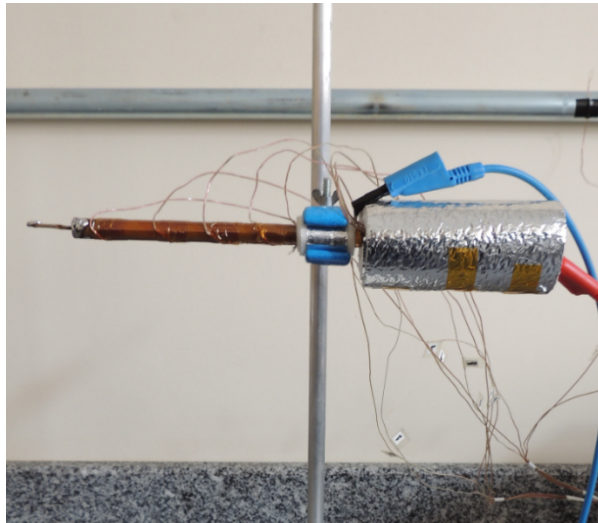
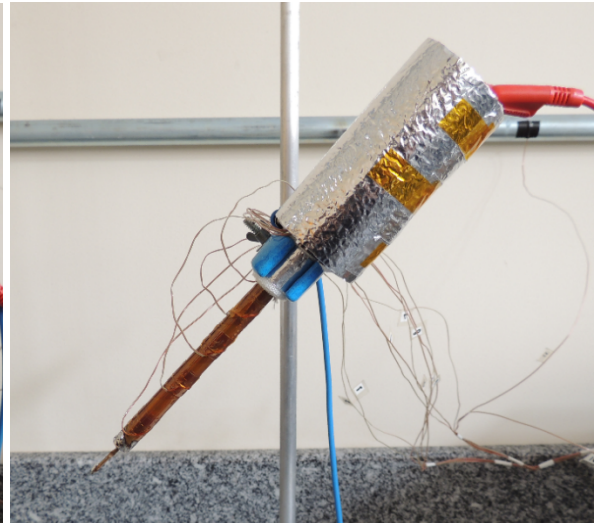
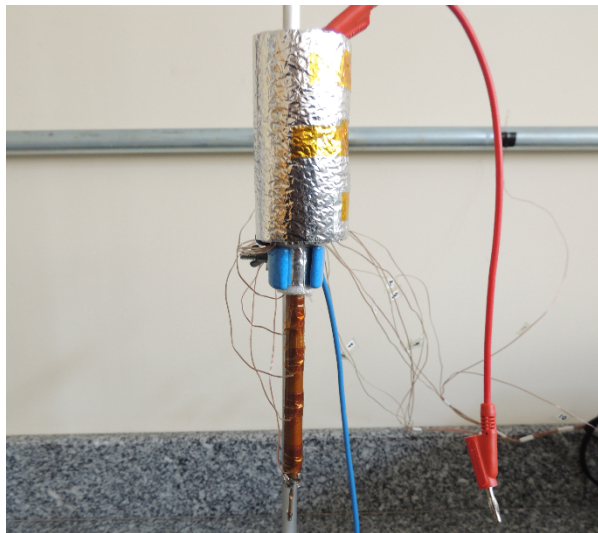
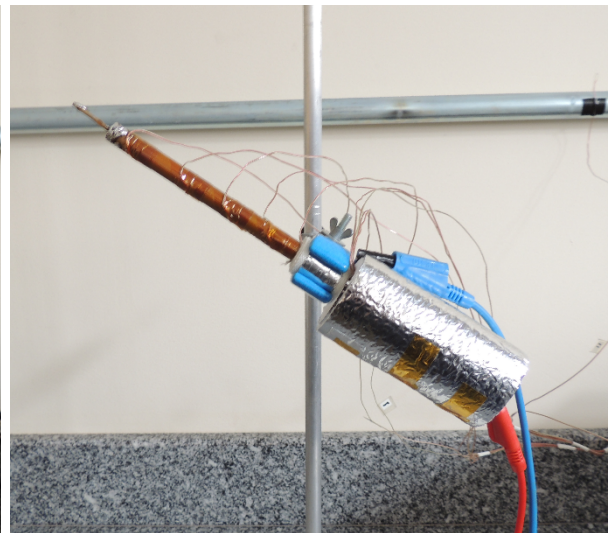
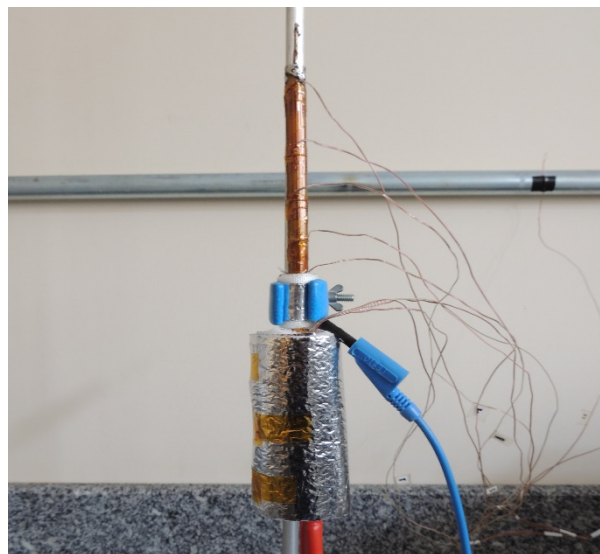
## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Na presente seção são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos do desempenho térmico dos tubos de calor com microranuras axiais (Tipos #1, #2 e #3) fabricadas pelo processo de eletroerosão a fio e efetuada uma comparação entre estes e os resultados provenientes de um tubo de calor contendo uma tela metálica (*Mesh* 100) como estrutura porosa.

Os testes experimentais foram repetidos três vezes para cada configuração e os erros foram comparados levando em consideração o fato de que a diferença entre as médias dos valores fossem menores que  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durante a realização dos testes, a potência dissipada no evaporador do tubo de calor foi mantida constante até que o tubo atingisse regime *quasi* permanente. A partir desse momento, a potência era aumentada para um nível imediatamente superior ( $+ 5\text{ W}$ ) até que o tubo de calor atingisse a temperatura máxima de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por questões de segurança, os testes foram interrompidos quando essa temperatura crítica era atingida. A temperatura ambiente foi mantida em  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . As incertezas experimentais de temperatura foram estimadas em aproximadamente  $\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  e de carga térmica foram  $\pm 1\%$ .

Como mencionado anteriormente, por meio da fonte de potência, uma determinada tensão e corrente foram aplicadas ao resistor elétrico para simular o aquecimento do evaporador nos tubos de calor. Para o sistema de resfriamento do condensador foi utilizada convecção forçada de ar. O escoamento de ar sobre o condensador removia o calor transferido pelo tubo de calor. O ventilador responsável pelo escoamento sobre o condensador do tubo de calor foi ajustado para fornecer uma velocidade de  $5\text{ m/s}$  controlada por um potenciômetro e um anemômetro, com um erro combinado de  $\pm 0,2\text{ m/s}$ . O sistema de aquisição de dados coletou as temperaturas provenientes dos termopares.

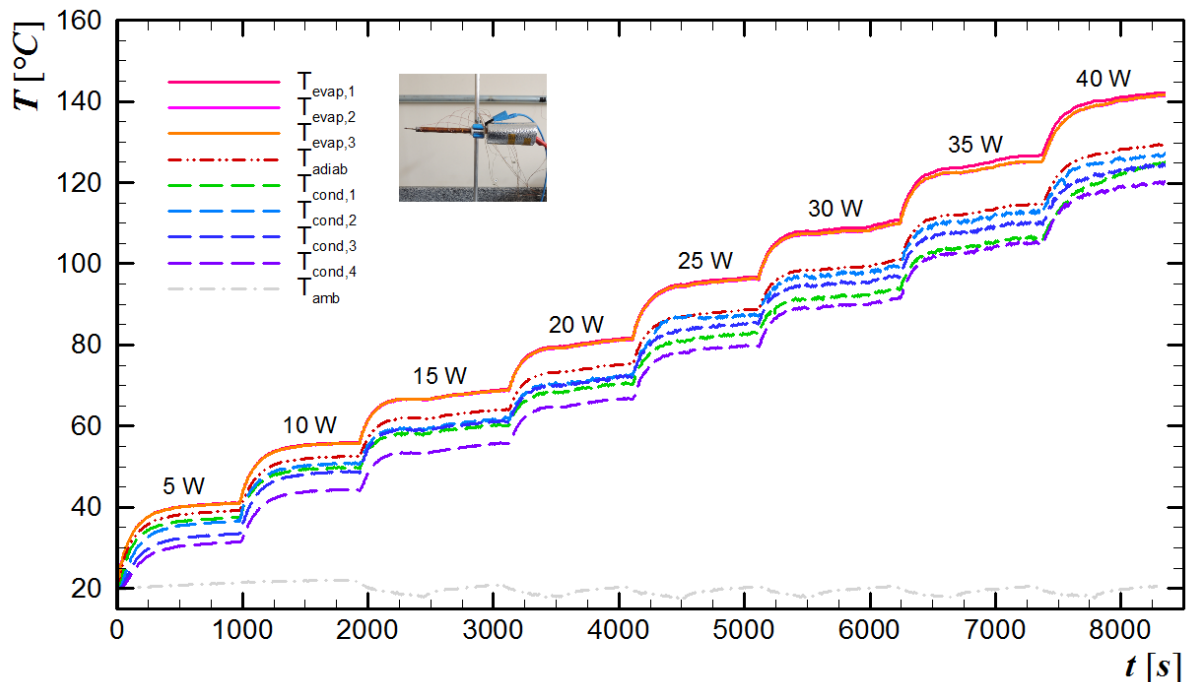
Nesta Dissertação de Mestrado, os tubos de calor com microranuras do Tipo #1, Tipo #2 e Tipo #3, apresentados na Figura 12, foram testados experimentalmente em cinco diferentes posições ( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $225^{\circ}$  e  $270^{\circ}$ ) em relação à horizontal (Figura 22). Na posição  $0^{\circ}$ , os tubos de calor operavam na posição horizontal. Nas posições de  $45^{\circ}$  e  $90^{\circ}$ , o evaporador ficou acima do condensador, sendo a posição de  $90^{\circ}$  a mais crítica. Nas posições de  $225^{\circ}$  e  $270^{\circ}$ , o evaporador ficou abaixo do condensador, sendo a posição de  $270^{\circ}$  a posição vertical (opera como um termossifão).

(a)  $0^\circ$ (b)  $45^\circ$ (c)  $90^\circ$ (d)  $225^\circ$ (e)  $270^\circ$ 

**Figura 22 - Inclinação do tubo de calor em relação à horizontal**  
Fonte: Autoria própria.

## 5.1 TUBO DE CALOR COM MICRORANHURAS DO TIPO #1

O Gráfico 5 ilustra a distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, posicionado sem inclinação com a horizontal ( $0^\circ$ ).



**Gráfico 5 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e sem inclinação ( $0^\circ$ )**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pode ser notado que o evaporador se comportou de maneira isotérmica. No condensador, houve um pequeno gradiente entre as temperaturas mais próximas à seção adiabática e as temperaturas da extremidade do tubo de calor. O tubo de calor operou satisfatoriamente e atingiu regime *quasi* permanente em aproximadamente 300 s após a aplicação de cada carga térmica. Com a potência de 40 W, o tubo de calor alcançou o regime *quasi* permanente à temperatura de operação (temperatura da região adiabática) de aproximadamente  $130^\circ\text{C}$ . Quando a potência foi elevada para 45 W, o tubo de calor atingiu a temperatura de  $150^\circ\text{C}$ , considerada a temperatura crítica dos experimentos e o teste foi interrompido por motivos de segurança.

A Tabela 7 mostra os valores das temperaturas em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à inclinação de  $0^\circ$ .

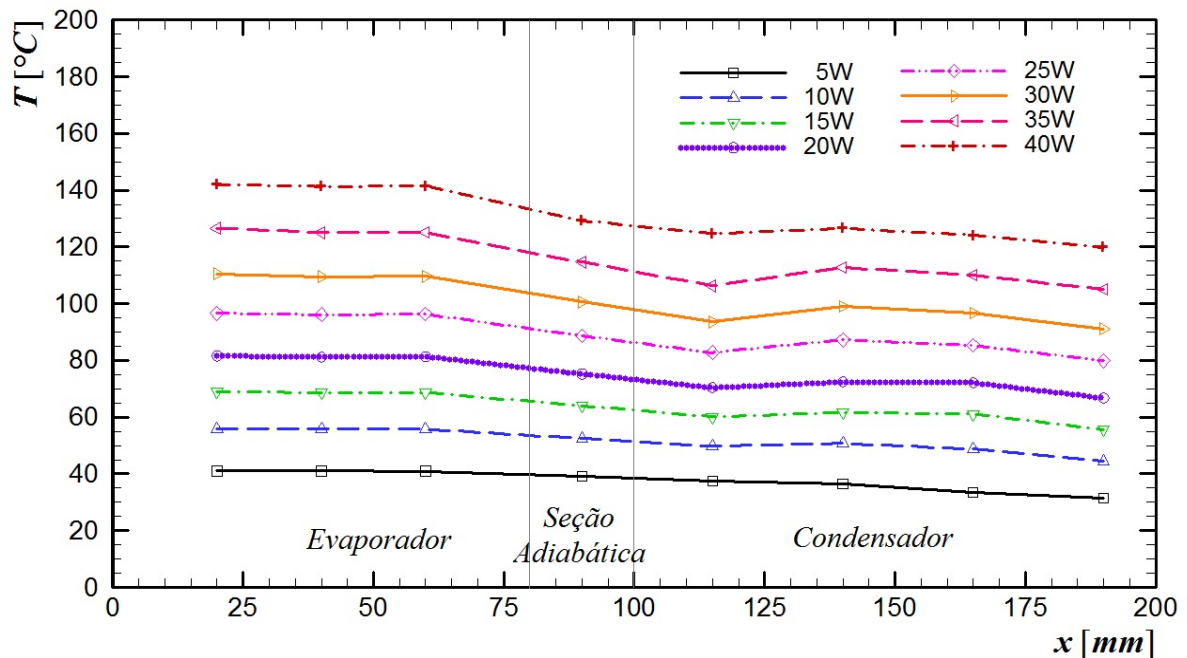
**Tabela 7 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °)**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 41,0                     | 40,9                     | 40,9                     | 39,0                    | 37,4                     | 36,5                     | 33,4                     | 31,3                     | 21,3                  |
| 10           | 55,8                     | 55,7                     | 55,7                     | 52,4                    | 49,7                     | 50,7                     | 48,7                     | 44,3                     | 22,0                  |
| 15           | 68,9                     | 68,6                     | 68,7                     | 63,9                    | 60,1                     | 61,6                     | 61,0                     | 55,6                     | 20,7                  |
| 20           | 81,6                     | 81,1                     | 81,3                     | 75,2                    | 70,3                     | 72,3                     | 72,1                     | 66,6                     | 20,2                  |
| 25           | 96,6                     | 96,1                     | 96,2                     | 88,6                    | 82,7                     | 87,2                     | 85,2                     | 79,8                     | 20,2                  |
| 30           | 110,4                    | 109,5                    | 109,6                    | 100,6                   | 93,5                     | 99,0                     | 96,7                     | 91,1                     | 20,3                  |
| 35           | 126,6                    | 125,0                    | 125,1                    | 114,6                   | 106,2                    | 112,7                    | 110,0                    | 105,0                    | 20,4                  |
| 40           | 142,0                    | 141,3                    | 141,4                    | 129,2                   | 124,6                    | 126,5                    | 124,1                    | 119,8                    | 20,5                  |

Fonte: Autoria própria.

Apesar de não haver grandes oscilações de temperatura durante o regime *quasi* permanente, para a construção de todos os gráficos de temperatura em função do comprimento ao longo do tubo de calor, a temperatura média das últimas trinta medições (150 s) de cada termopar foi calculada a partir da última temperatura medida em cada carga térmica dissipada.

O Gráfico 6 ilustra a distribuição de temperaturas em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 0 ° de inclinação.

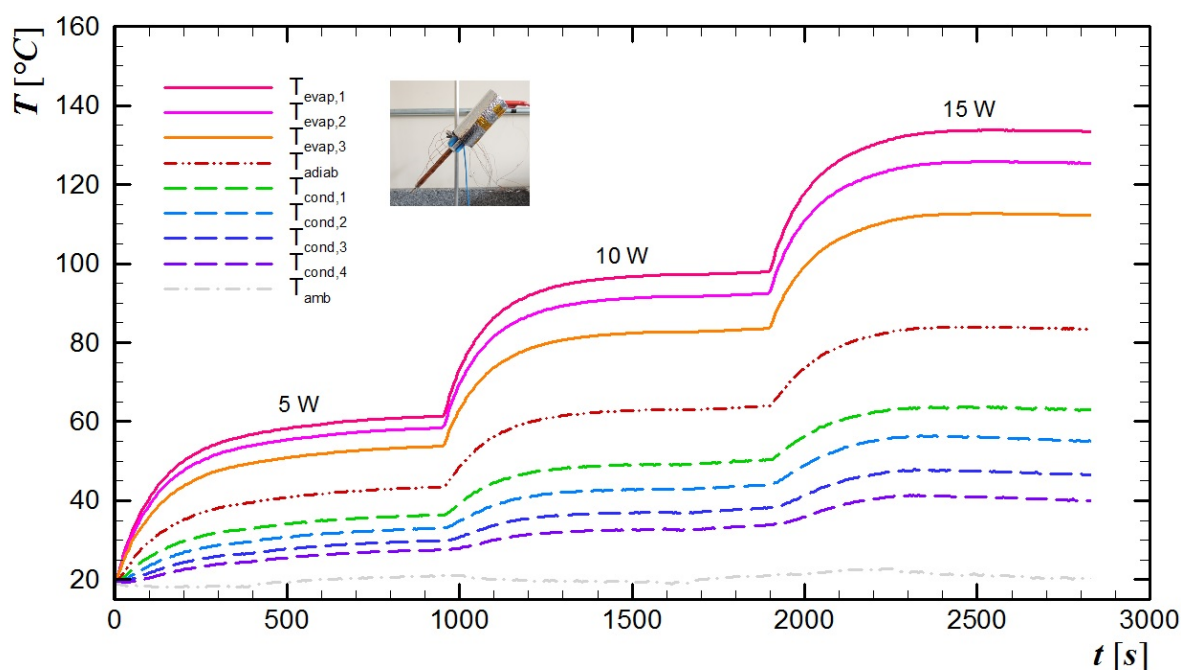


**Gráfico 6 - Distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °)**

Fonte: Autoria própria.

Pode ser notado através do Gráfico 6 que as variações de temperatura no evaporador e no condensador são pequenas para todas as potências dissipadas, ou seja, o perfil de temperatura tem um comportamento muito próximo ao isotérmico, tanto no evaporador quanto no condensador.

O Gráfico 7 ilustra a distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, posicionado à 45 ° de inclinação.



**Gráfico 7 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 45 ° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

Pode ser observado que para a inclinação de 45 ° do tubo de calor, a diferença de temperatura ao longo do tubo alcança um valor elevado. A posição de 45 ° é desfavorável ao funcionamento do tubo de calor, pois o evaporador se encontra acima do condensador, dificultando o escoamento do fluido de trabalho do condensador ao evaporador através da estrutura capilar, principalmente devido à pressão de vapor e a força da gravidade que estão contra a força capilar. O tubo de calor foi capaz de dissipar apenas 15 W e operar em regime *quasi* permanente à temperatura de operação de aproximadamente 85 °C. Quando a potência foi elevada a 20 W, o evaporador do tubo de calor atingiu rapidamente a temperatura crítica e o teste foi interrompido.

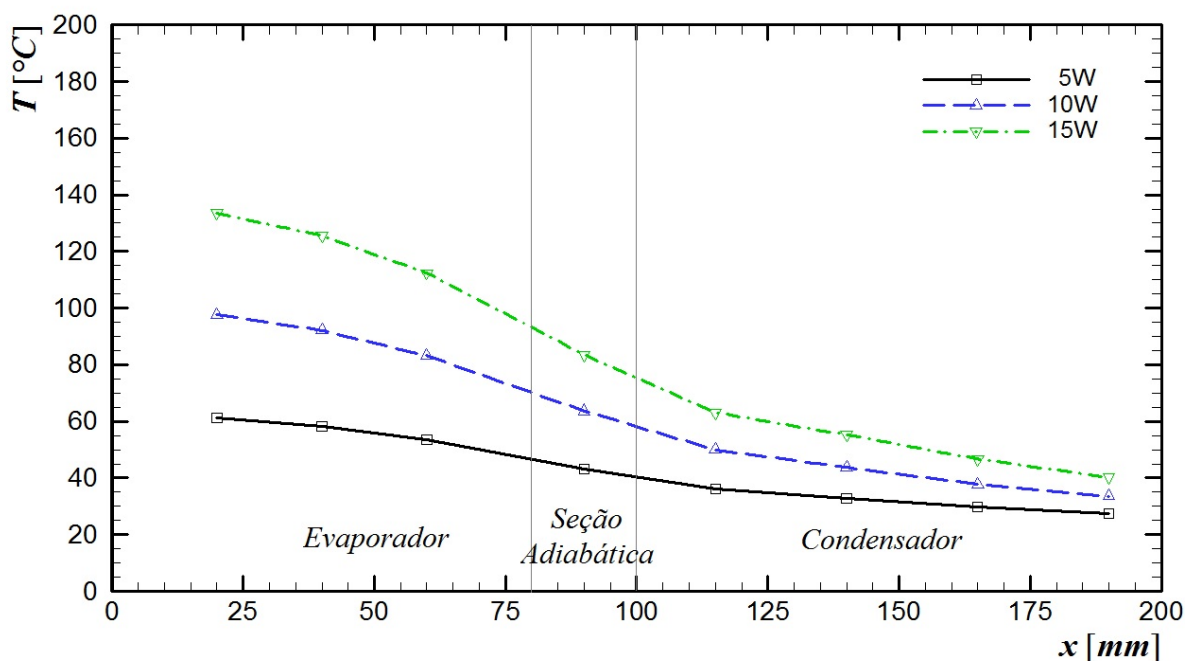
A Tabela 8 mostra os valores das temperaturas em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 45 °.

**Tabela 8 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação**

| Potência<br>[W] | T <sub>evap 1</sub><br>[°C] | T <sub>evap 2</sub><br>[°C] | T <sub>evap 3</sub><br>[°C] | T <sub>adiab</sub><br>[°C] | T <sub>cond 1</sub><br>[°C] | T <sub>cond 2</sub><br>[°C] | T <sub>cond 3</sub><br>[°C] | T <sub>cond 4</sub><br>[°C] | T <sub>amb</sub><br>[°C] |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 5               | 61,1                        | 58,1                        | 53,5                        | 43,2                       | 36,1                        | 32,7                        | 29,6                        | 27,3                        | 19,7                     |
| 10              | 97,6                        | 92,1                        | 83,2                        | 63,6                       | 49,9                        | 43,7                        | 37,8                        | 33,5                        | 18,8                     |
| 15              | 133,5                       | 125,5                       | 112,3                       | 83,5                       | 63,1                        | 55,2                        | 46,7                        | 40,2                        | 17,3                     |

Fonte: Autoria própria.

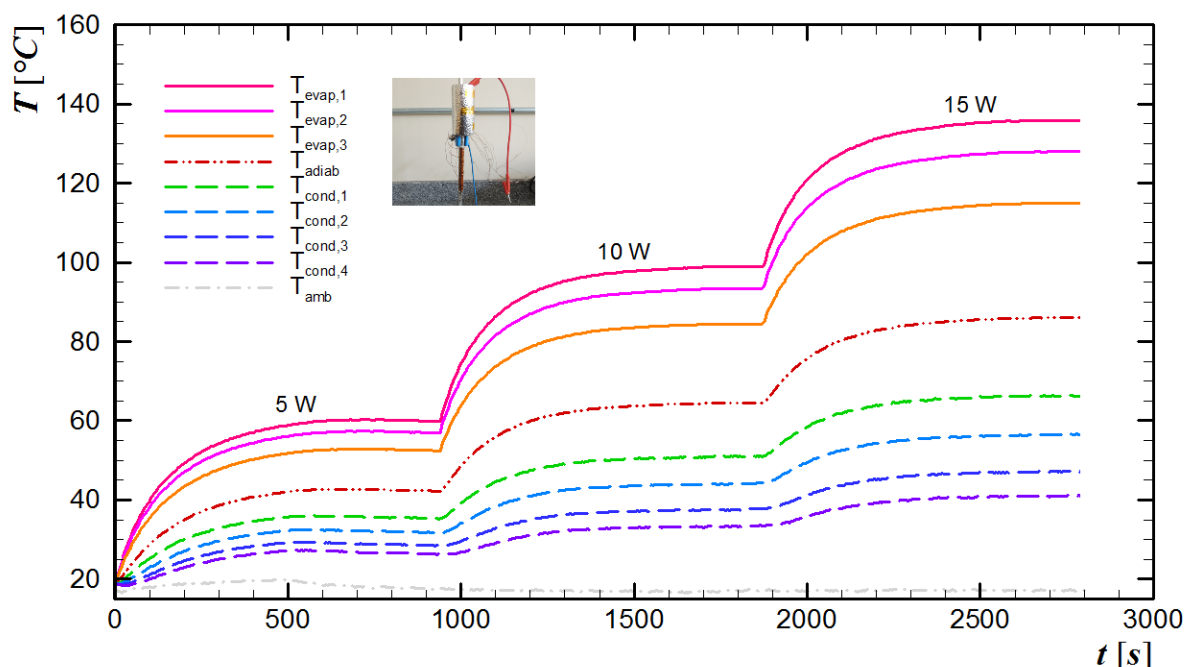
O Gráfico 8 ilustra a distribuição de temperaturas em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação.



**Gráfico 8 - Distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação**  
Fonte: Autoria própria.

O comportamento do tubo de calor com a inclinação de 45 ° apresentou um gradiente de temperatura razoável ao longo do tubo de calor. O perfil de temperaturas não foi isotérmico ao longo do tubo de calor.

O Gráfico 9 ilustra a distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, posicionado à 90 ° de inclinação (posição vertical com o evaporador acima do condensador).



**Gráfico 9 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 90 ° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

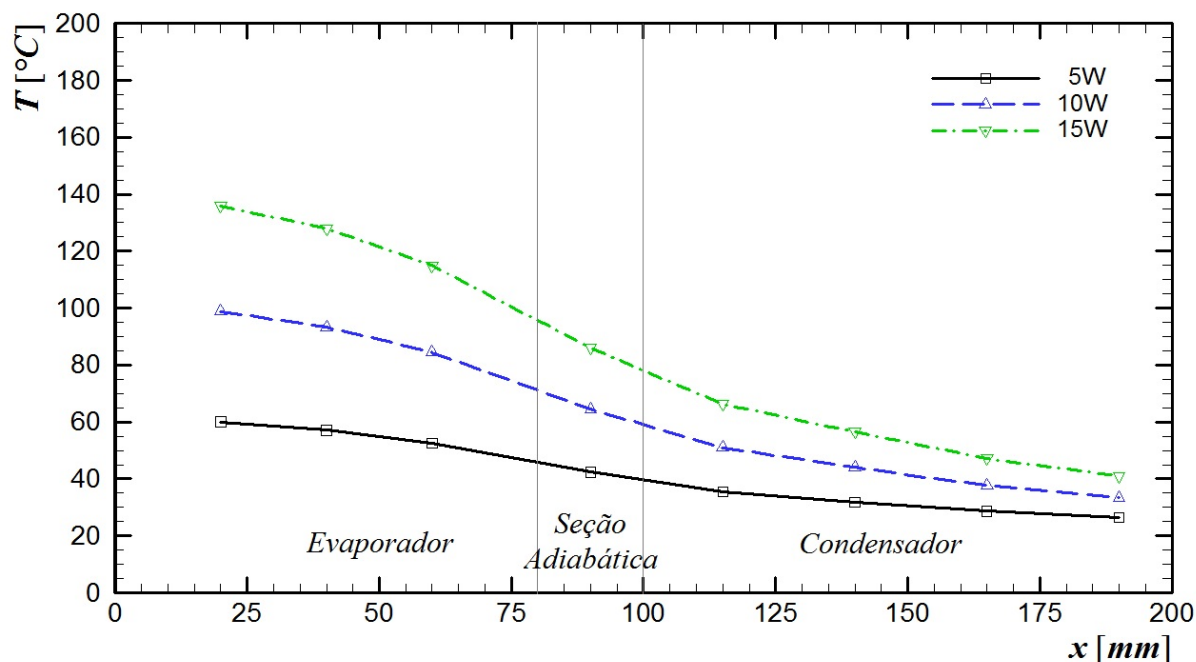
A Tabela 9 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 90 °.

**Tabela 9 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 60,0                     | 57,1                     | 52,6                     | 42,3                    | 35,4                     | 31,8                     | 28,6                     | 26,4                     | 17,7                  |
| 10           | 98,8                     | 93,3                     | 84,4                     | 64,5                    | 50,9                     | 44,0                     | 37,5                     | 33,3                     | 17,0                  |
| 15           | 135,8                    | 127,9                    | 114,9                    | 85,9                    | 66,2                     | 56,4                     | 47,1                     | 40,9                     | 17,1                  |

**Fonte: Autoria própria.**

O Gráfico 10 ilustra a distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor à 90 ° de inclinação.



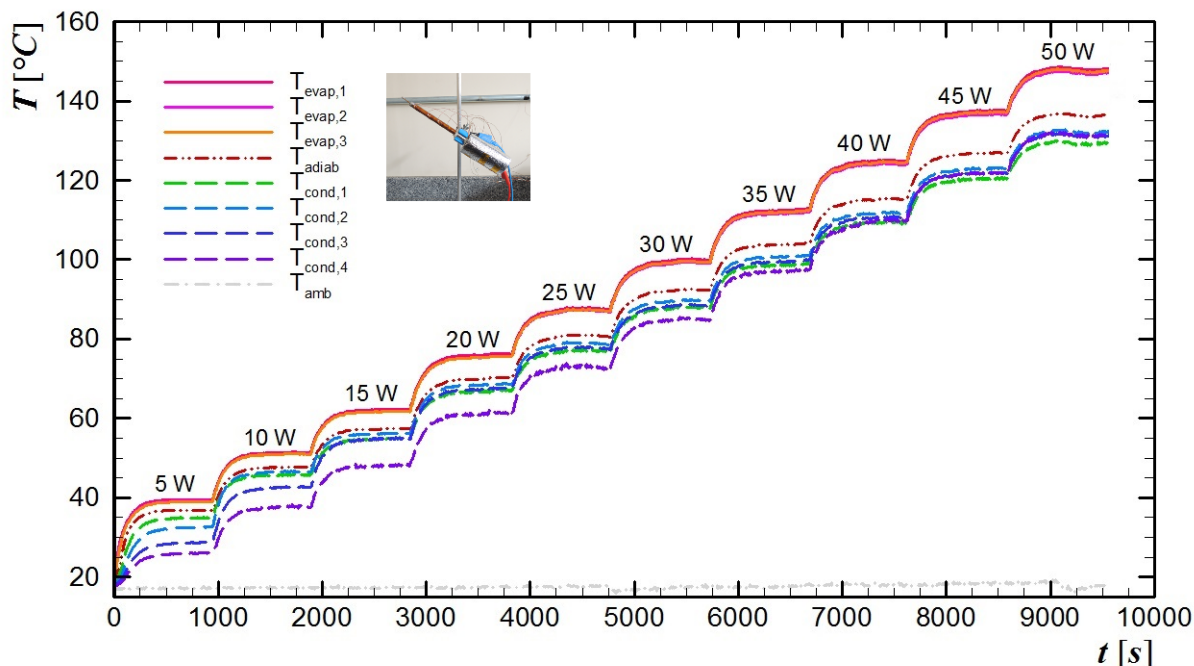
**Gráfico 10 - Distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 90° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

Assim como para a inclinação de 45°, o comportamento do tubo de calor com a inclinação de 90° apresentou um gradiente de temperatura grande ao longo do tubo de calor. O condensador teve sempre a temperatura muito baixa em relação ao evaporador. A posição de 90° também é desfavorável ao funcionamento do tubo de calor, pelos mesmos motivos descritos para a inclinação de 45°. O tubo de calor também foi capaz de operar em regime *quasi* permanente com a dissipação de apenas 15 W aproximadamente à mesma temperatura de operação.

O Gráfico 11 ilustra a distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, posicionado à 225° de inclinação.

O tubo de calor operando a uma inclinação de 225° apresentou o melhor desempenho dentre todas as posições testadas. Pode ser notado, que o evaporador se comportou de maneira isotérmica para todas as potências dissipadas. O condensador apresentou um gradiente de temperatura maior para as potências menores, porém este gradiente foi diminuindo conforme a potência foi aumentada. O tubo de calor operou em regime *quasi* permanente a aproximadamente 135 °C à potência de 50 W. Quando a potência foi elevada a 55 W, o evaporador do tubo de calor atingiu a temperatura de 150 °C e o teste foi interrompido.





**Gráfico 11 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 225° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

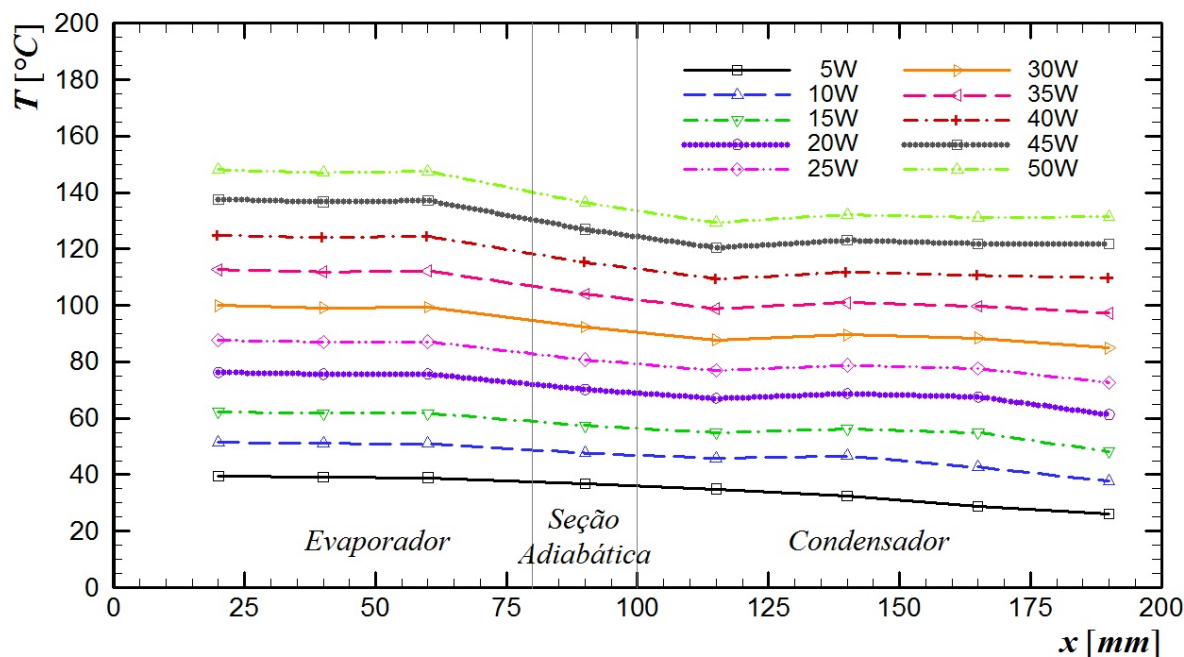
A Tabela 10 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 225°.

**Tabela 10 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 225° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap,1</sub> [°C] | T <sub>evap,2</sub> [°C] | T <sub>evap,3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond,1</sub> [°C] | T <sub>cond,2</sub> [°C] | T <sub>cond,3</sub> [°C] | T <sub>cond,4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 39,4                     | 39,1                     | 38,9                     | 36,8                    | 34,9                     | 32,5                     | 28,7                     | 26,0                     | 17,1                  |
| 10           | 51,4                     | 51,0                     | 51,0                     | 47,6                    | 45,7                     | 46,5                     | 42,6                     | 37,6                     | 17,2                  |
| 15           | 62,2                     | 61,7                     | 61,7                     | 57,4                    | 54,8                     | 56,1                     | 54,8                     | 48,2                     | 17,3                  |
| 20           | 76,2                     | 75,6                     | 75,6                     | 70,2                    | 67,0                     | 68,6                     | 67,5                     | 61,3                     | 17,5                  |
| 25           | 87,6                     | 87,0                     | 87,1                     | 80,7                    | 76,9                     | 78,7                     | 77,6                     | 72,6                     | 17,6                  |
| 30           | 99,9                     | 99,1                     | 99,4                     | 92,3                    | 87,7                     | 89,6                     | 88,4                     | 84,8                     | 17,6                  |
| 35           | 112,6                    | 111,8                    | 112,1                    | 104,0                   | 98,8                     | 100,9                    | 99,7                     | 97,2                     | 17,8                  |
| 40           | 124,8                    | 124,0                    | 124,4                    | 115,2                   | 109,3                    | 111,7                    | 110,6                    | 109,7                    | 17,9                  |
| 45           | 137,6                    | 136,6                    | 137,1                    | 126,9                   | 120,4                    | 123,0                    | 121,8                    | 121,8                    | 18,5                  |
| 50           | 148,0                    | 147,0                    | 147,5                    | 136,3                   | 129,3                    | 132,1                    | 131,1                    | 131,4                    | 17,8                  |

**Fonte: Autoria própria.**

O Gráfico 12 ilustra a distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor à 225° de inclinação.

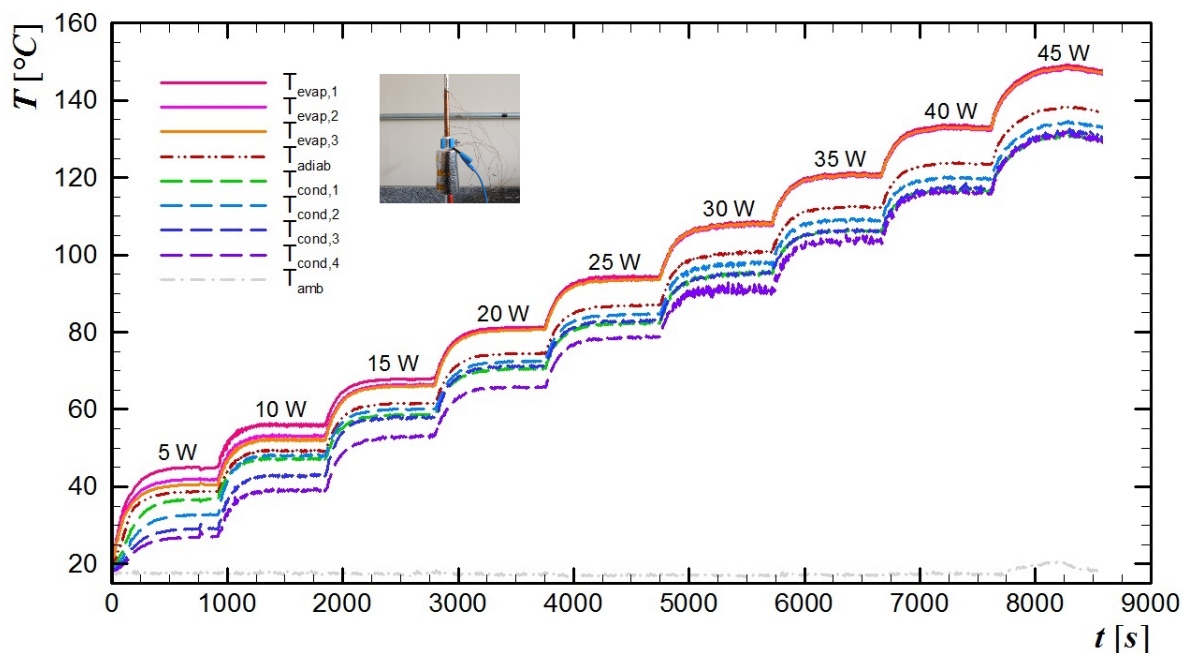


**Gráfico 12 - Distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

Assim como para a inclinação de 0 °, pode ser observado que as variações de temperatura no evaporador e no condensador são pequenas para todas as potências dissipadas. Nesse sentido, o perfil de temperatura tem um comportamento próximo ao isotérmico, tanto no evaporador quanto no condensador. A diferença entre a temperatura média no evaporador e no condensador aumentou com a potência dissipada indicando uma maior transferência de calor.

O Gráfico 13 ilustra a distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, posicionado à 270 ° de inclinação (posição vertical com o condensador acima do evaporador).

O tubo de calor operando à inclinação de 270 ° apresentou o segundo melhor desempenho dentre todas as posições testadas. O comportamento do tubo de calor nesta inclinação se assemelhou muito ao comportamento do tubo operando à inclinação de 225 °, porém ambos o evaporador e o condensador não se comportaram de maneira isotérmica à baixas potências. Com o aumento das potências dissipadas, o evaporador passa a se comportar isotermicamente e o condensador apresenta apenas um pequeno gradiente de temperatura entre a região próxima à seção adiabática e a extremidade do tubo. O tubo de calor operou em regime *quasi* permanente a aproximadamente 135 °C à potência de 45 W e quando a potência foi elevada a 50 W, o evaporador do tubo de calor atingiu a temperatura crítica e o teste foi encerrado.



**Gráfico 13 - Distribuição de temperaturas em função do tempo para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 e 270° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

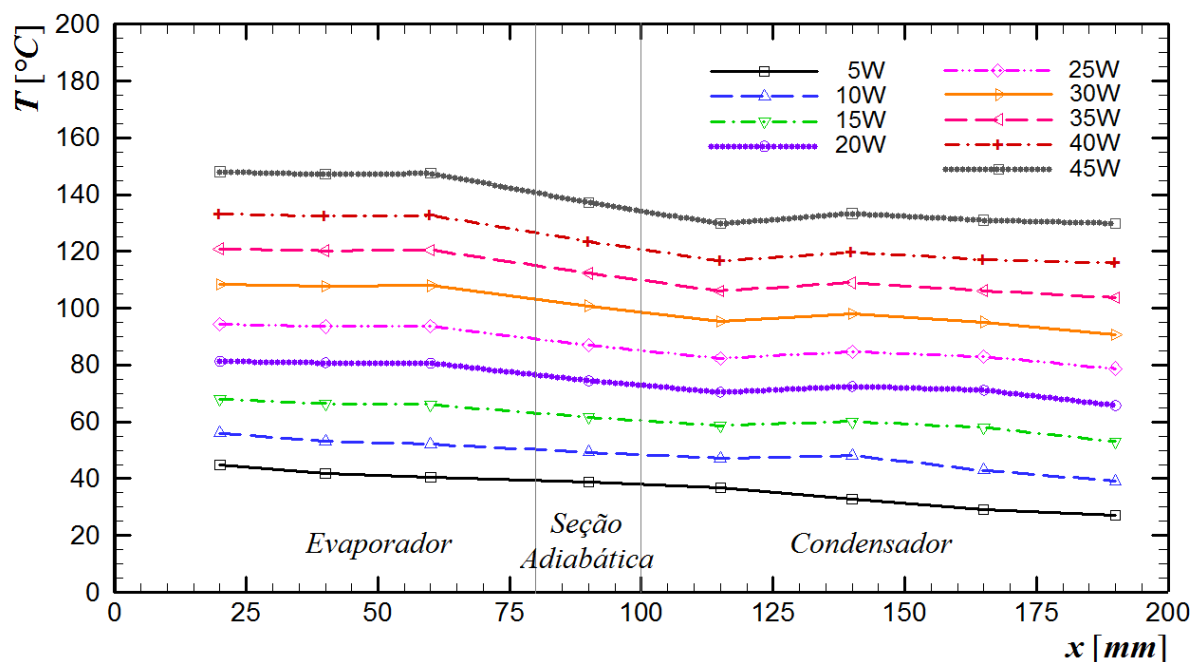
A Tabela 11 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 270°.

**Tabela 11 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 270° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap,1</sub> [°C] | T <sub>evap,2</sub> [°C] | T <sub>evap,3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond,1</sub> [°C] | T <sub>cond,2</sub> [°C] | T <sub>cond,3</sub> [°C] | T <sub>cond,4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 44,8                     | 41,8                     | 40,4                     | 38,7                    | 36,6                     | 32,7                     | 29,1                     | 27,0                     | 17,6                  |
| 10           | 55,9                     | 53,0                     | 52,1                     | 49,2                    | 47,1                     | 48,1                     | 42,8                     | 39,1                     | 17,6                  |
| 15           | 67,9                     | 66,4                     | 66,0                     | 61,6                    | 58,6                     | 60,1                     | 57,9                     | 53,1                     | 17,6                  |
| 20           | 81,3                     | 80,7                     | 80,6                     | 74,5                    | 70,4                     | 72,4                     | 71,1                     | 65,7                     | 17,2                  |
| 25           | 94,3                     | 93,5                     | 93,6                     | 86,9                    | 82,3                     | 84,6                     | 82,9                     | 78,7                     | 17,0                  |
| 30           | 108,3                    | 107,7                    | 108,0                    | 100,7                   | 95,3                     | 98,0                     | 95,1                     | 90,7                     | 17,0                  |
| 35           | 120,9                    | 120,2                    | 120,4                    | 112,2                   | 106,1                    | 108,9                    | 106,1                    | 103,7                    | 17,1                  |
| 40           | 133,2                    | 132,3                    | 132,6                    | 123,5                   | 116,6                    | 119,6                    | 117,0                    | 115,8                    | 17,3                  |
| 45           | 148,0                    | 147,1                    | 147,4                    | 137,2                   | 129,7                    | 133,2                    | 130,9                    | 129,9                    | 18,3                  |

**Fonte: Autoria própria.**

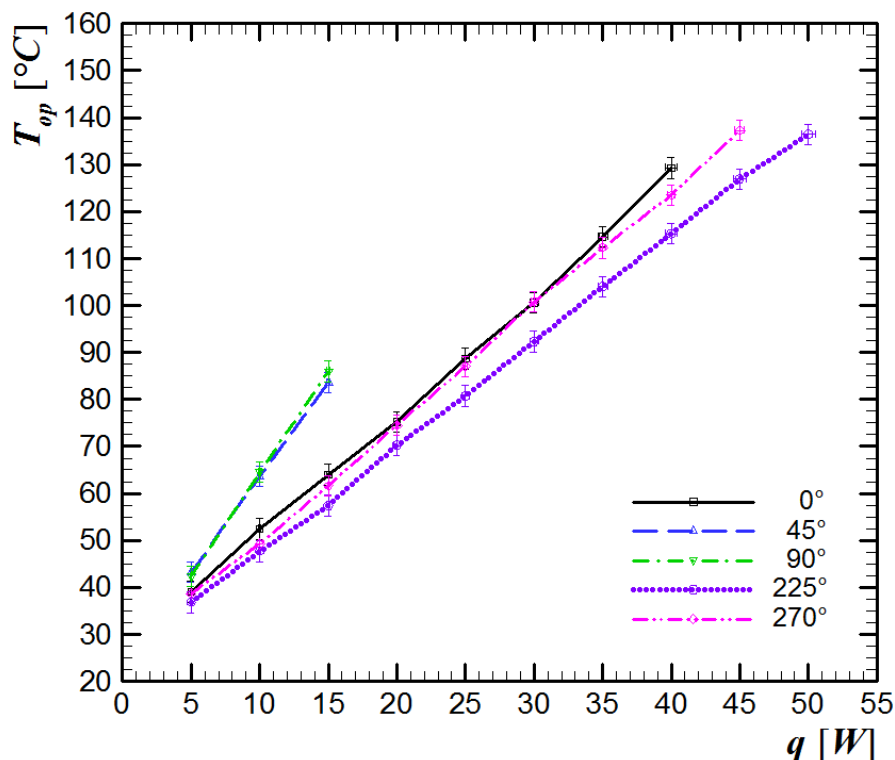
O Gráfico 14 ilustra a distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas ao tubo de calor à 270° de inclinação.



**Gráfico 14 - Distribuição de temperaturas de operação em regime *quasi* permanente em função da posição no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes potências dissipadas à 270° de inclinação**  
**Fonte: Autoria própria.**

Assim como para a inclinação de 0° e 225°, pode ser notado que as variações de temperatura no evaporador e no condensador também são pequenas para todas as potências dissipadas. A diferença entre a temperatura média no evaporador no condensador também aumentou com a potência dissipada.

O Gráfico 15 mostra o comportamento da temperatura de operação em função da potência dissipada no tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 parametrizada na inclinação de operação. Pode ser notado que, independentemente da inclinação analisada, a temperatura de operação varia linearmente com a potência dissipada.



**Gráfico 15 - Temperatura de operação em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes inclinações**  
 Fonte: Autoria própria.

É possível notar que a inclinação de 225° (inclinado com o evaporador abaixo do condensador), foi a posição mais favorável para o desempenho térmico do tubo de calor de microranhuras do Tipo #1, seguida da inclinação de 270° e 0°. As inclinações de 45° e 90° tiveram praticamente o mesmo desempenho, sendo as piores posições de trabalho.

É importante salientar que a temperatura de operação considerada é a temperatura da seção adiabática e que as temperaturas medidas na parte externa do isolamento do evaporador foram muito próximas à temperatura ambiente, garantindo que aproximadamente toda potência dissipada pela resistência elétrica fosse transferida ao evaporador, sendo desprezível a perda de energia através do isolamento.

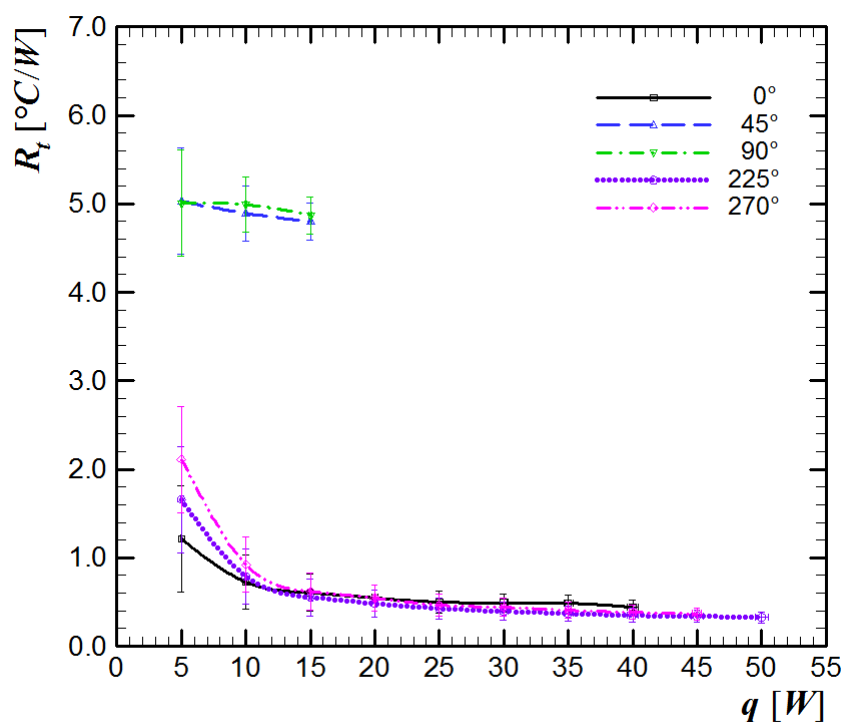
A Tabela 12 mostra os valores das temperaturas de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações.

**Tabela 12 - Temperatura de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em °C)**

| Potência [W] | 0 °   | 45 ° | 90 ° | 225 ° | 270 ° |
|--------------|-------|------|------|-------|-------|
| 5            | 39,1  | 43,2 | 42,4 | 36,8  | 38,7  |
| 10           | 52,5  | 63,6 | 64,5 | 47,7  | 49,3  |
| 15           | 64,0  | 83,5 | 86,0 | 57,4  | 61,6  |
| 20           | 75,2  |      |      | 70,2  | 74,5  |
| 25           | 88,7  |      |      | 80,7  | 87,0  |
| 30           | 100,6 |      |      | 92,3  | 100,8 |
| 35           | 114,6 |      |      | 104,0 | 112,3 |
| 40           | 129,3 |      |      | 115,3 | 123,5 |
| 45           |       |      |      | 126,9 | 137,3 |
| 50           |       |      |      | 136,4 |       |

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 16 apresenta o comportamento da resistência térmica total ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em função da potência dissipada parametrizado na inclinação de operação. Esta resistência térmica é definida na Equação (3.18). As barras verticais indicam a incerteza experimental da medida. Como esperado, a resistência térmica do tubo de calor diminui com o aumento da potência dissipada.



**Gráfico 16 - Resistência térmica em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 para diferentes inclinações**

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 13 mostra os valores da resistência térmica do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em regime *quasi* permanente e sua respectiva incerteza experimental em função da potência dissipada parametrizada na inclinação de operação.

**Tabela 13 - Resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C/W])**

| Potência [W] | 0 °       | 45 °      | 90 °      | 225 °     | 270 °     |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5            | 1,22±0,60 | 5,03±0,60 | 5,01±0,60 | 1,66±0,60 | 2,11±0,60 |
| 10           | 0,73±0,31 | 4,89±0,31 | 4,99±0,31 | 0,79±0,31 | 0,92±0,31 |
| 15           | 0,60±0,21 | 4,80±0,21 | 4,87±0,21 | 0,55±0,21 | 0,62±0,21 |
| 20           | 0,55±0,15 |           |           | 0,48±0,15 | 0,54±0,15 |
| 25           | 0,50±0,12 |           |           | 0,43±0,12 | 0,46±0,12 |
| 30           | 0,49±0,10 |           |           | 0,40±0,10 | 0,44±0,10 |
| 35           | 0,49±0,09 |           |           | 0,37±0,09 | 0,41±0,09 |
| 40           | 0,44±0,08 |           |           | 0,35±0,08 | 0,38±0,08 |
| 45           |           |           |           | 0,34±0,07 | 0,37±0,07 |
| 50           |           |           |           | 0,33±0,06 |           |

**Fonte: Autoria Própria.**

## 5.2 TUBO DE CALOR COM MICRORANHURAS DO TIPO #2

Os resultados experimentais da distribuição de temperatura dos testes com os tubos de calor com microranhuras do Tipo #2 e Tipo #3 são muito similares ao comportamento térmico do tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, diferindo apenas na magnitude dos valores. Nesse sentido, para os tubos de calor com microranhuras do Tipo #2 e #3, os dados referentes às temperaturas de operação em regime *quasi* permanente serão apresentados somente na forma de tabelas.

A Tabela 14 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °).

**Tabela 14 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °)**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 63,9                     | 61,8                     | 56,8                     | 44,3                    | 37,1                     | 32,2                     | 29,5                     | 27,2                     | 19,8                  |
| 10           | 102,8                    | 98,9                     | 89,5                     | 66,3                    | 52,6                     | 43,0                     | 37,9                     | 33,6                     | 19,5                  |
| 15           | 117,7                    | 117,4                    | 117,4                    | 93,9                    | 72,1                     | 56,7                     | 48,5                     | 41,4                     | 19,3                  |
| 20           | 124,7                    | 124,4                    | 124,3                    | 113,4                   | 87,5                     | 67,5                     | 56,9                     | 47,6                     | 18,6                  |
| 25           | 136,2                    | 135,7                    | 135,7                    | 129,4                   | 114,0                    | 86,2                     | 71,4                     | 59,1                     | 17,7                  |
| 30           | 144,7                    | 144,2                    | 144,0                    | 137,3                   | 130,7                    | 100,7                    | 82,5                     | 68,1                     | 17,3                  |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 15 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 45 °.

**Tabela 15 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 66,7                     | 64,5                     | 58,8                     | 45,3                    | 37,3                     | 31,1                     | 28,7                     | 26,2                     | 17,6                  |
| 10           | 103,8                    | 99,9                     | 90,0                     | 66,2                    | 52,1                     | 41,3                     | 37,0                     | 32,6                     | 18,1                  |
| 15           | 145,3                    | 139,7                    | 125,3                    | 89,9                    | 69,2                     | 53,5                     | 47,0                     | 40,6                     | 19,0                  |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 16 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 90 °.

**Tabela 16 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 65,1                     | 63,0                     | 58,1                     | 45,8                    | 38,8                     | 33,1                     | 30,6                     | 28,1                     | 19,7                  |
| 10           | 110,2                    | 106,0                    | 96,2                     | 71,6                    | 57,5                     | 46,4                     | 41,3                     | 36,2                     | 20,4                  |
| 15           | 150,3                    | 144,5                    | 130,4                    | 94,6                    | 73,9                     | 57,5                     | 50,4                     | 43,1                     | 19,4                  |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 17 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 225 °.



**Tabela 17 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 59,8                     | 58,3                     | 53,3                     | 42,4                    | 36,1                     | 31,4                     | 29,5                     | 27,6                     | 21,1                  |
| 10           | 98,5                     | 95,7                     | 85,9                     | 63,5                    | 50,5                     | 41,1                     | 36,5                     | 32,6                     | 18,8                  |
| 15           | 108,2                    | 108,1                    | 107,1                    | 87,2                    | 67,9                     | 53,9                     | 46,9                     | 41,2                     | 20,8                  |
| 20           | 115,3                    | 115,2                    | 114,0                    | 107,0                   | 85,3                     | 65,6                     | 55,5                     | 47,4                     | 19,6                  |
| 25           | 122,9                    | 123,0                    | 121,5                    | 115,8                   | 105,9                    | 80,4                     | 67,1                     | 56,5                     | 18,7                  |
| 30           | 131,6                    | 131,9                    | 130,2                    | 123,8                   | 120,7                    | 98,9                     | 81,9                     | 68,1                     | 20,2                  |
| 35           | 138,7                    | 139,2                    | 137,3                    | 130,4                   | 127,1                    | 112,5                    | 93,2                     | 76,7                     | 17,4                  |
| 40           | 152,0                    | 152,5                    | 151,1                    | 143,3                   | 139,8                    | 130,4                    | 117,0                    | 99,4                     | 19,9                  |

Fonte: Autoria própria.

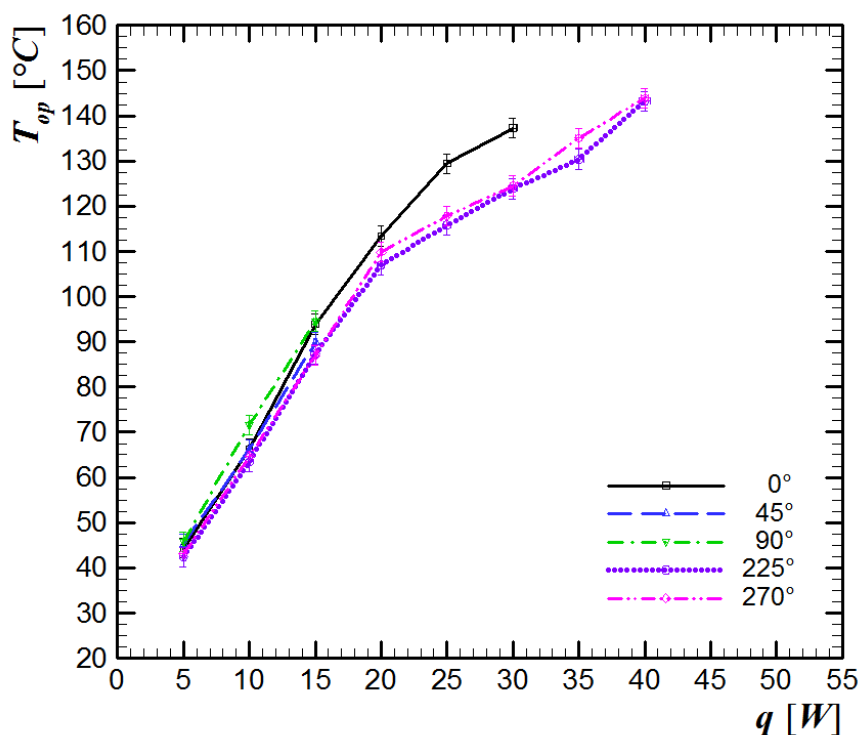
A Tabela 18 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 270 °.

**Tabela 18 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes potências dissipadas à 270 ° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 60,6                     | 58,7                     | 54,0                     | 43,0                    | 36,6                     | 31,8                     | 29,3                     | 27,4                     | 20,3                  |
| 10           | 98,7                     | 95,3                     | 86,2                     | 64,7                    | 52,2                     | 42,7                     | 37,7                     | 34,0                     | 20,1                  |
| 15           | 107,9                    | 107,2                    | 106,8                    | 87,0                    | 67,5                     | 52,5                     | 44,9                     | 39,0                     | 17,3                  |
| 20           | 116,9                    | 116,2                    | 115,8                    | 109,9                   | 91,4                     | 69,7                     | 58,5                     | 49,9                     | 17,8                  |
| 25           | 124,7                    | 123,9                    | 123,4                    | 117,8                   | 110,5                    | 85,2                     | 70,9                     | 60,2                     | 19,8                  |
| 30           | 132,1                    | 131,4                    | 130,8                    | 124,5                   | 121,6                    | 100,2                    | 82,3                     | 68,6                     | 17,3                  |
| 35           | 143,5                    | 142,8                    | 142,0                    | 135,1                   | 132,3                    | 120,8                    | 101,7                    | 84,6                     | 19,2                  |
| 40           | 153,2                    | 152,6                    | 151,9                    | 143,9                   | 140,8                    | 131,5                    | 116,3                    | 97,1                     | 17,0                  |

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 17 ilustra o comportamento da temperatura de operação em função da potência dissipada parametrizada na inclinação de trabalho do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2. Pode ser notado, que conforme a potência dissipada aumenta, a temperatura de operação também aumenta.



**Gráfico 17 - Temperatura de operação em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes inclinações**  
**Fonte: Autoria própria.**

É possível notar que para o tubo de calor com microranhuras do Tipo #2, as inclinações de 225 ° e 270 ° apresentaram um comportamento semelhante da temperatura de operação em função da potência dissipada sendo as posições mais favoráveis para o desempenho térmico do tubo de calor. O teste do tubo de calor sem inclinação (0 °) também apresentou um desempenho satisfatório, confirmando que a estrutura capilar promoveu pressão capilar ao fluido. Assim como para o tubo de calor com microranhuras do Tipo #1, as inclinações de 45 ° e 90 ° para o tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 tiveram praticamente o mesmo desempenho, sendo as piores posições de trabalho.

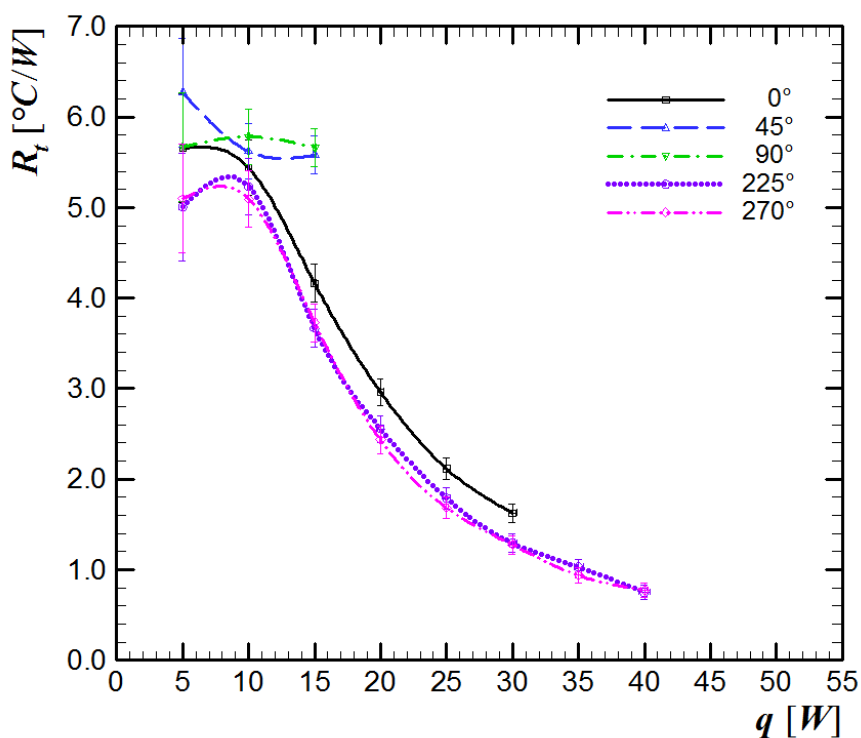
A Tabela 19 mostra os valores das temperaturas de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações.

**Tabela 19 - Temperatura de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C])**

| Potência [W] | 0 °   | 45 ° | 90 ° | 225 ° | 270 °  |
|--------------|-------|------|------|-------|--------|
| 5            | 44,3  | 45,3 | 45,8 | 42,4  | 43,0   |
| 10           | 66,3  | 66,2 | 71,6 | 63,5  | 64,7   |
| 15           | 93,9  | 89,9 | 94,6 | 87,2  | 87,0   |
| 20           | 113,4 |      |      | 107,0 | 109,9  |
| 25           | 129,4 |      |      | 115,8 | 117,8  |
| 30           | 137,3 |      |      | 123,8 | 124,5  |
| 35           |       |      |      | 130,4 | 135,1  |
| 40           |       |      |      | 143,3 | 143,88 |

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 18 apresenta o comportamento da resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em função da potência dissipada considerando diferentes inclinações de operação. Pode ser observado que, na maioria dos casos estudados, a resistência térmica diminui com o aumento da potência dissipada no tubo de calor.



**Gráfico 18 - Resistência térmica em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 para diferentes inclinações**

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 20 mostra os valores das temperaturas de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em regime *quasi* permanente e suas respectivas incertezas experimentais em função da potência dissipada considerando diferentes inclinações.

**Tabela 20 - Resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranhuras do Tipo #2 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C/W])**

| Potência [W] | 0 °       | 45 °      | 90 °      | 225 °     | 270 °     |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5            | 5,66±0,60 | 6,27±0,60 | 5,67±0,60 | 5,01±0,60 | 5,10±0,60 |
| 10           | 5,44±0,31 | 5,62±0,31 | 5,78±0,31 | 5,23±0,31 | 5,09±0,31 |
| 15           | 4,16±0,21 | 5,58±0,21 | 5,67±0,21 | 3,67±0,21 | 3,73±0,21 |
| 20           | 2,96±0,15 |           |           | 2,55±0,15 | 2,43±0,15 |
| 25           | 2,12±0,12 |           |           | 1,79±0,12 | 1,68±0,12 |
| 30           | 1,62±0,10 |           |           | 1,29±0,10 | 1,27±0,10 |
| 35           |           |           |           | 1,03±0,09 | 0,94±0,09 |
| 40           |           |           |           | 0,75±0,08 | 0,78±0,8  |

Fonte: Autoria Própria.

### 5.3 TUBO DE CALOR COM MICRORANHURAS DO TIPO #3

A Tabela 21 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °).

**Tabela 21 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas sem inclinação (0 °)**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 62,4                     | 58,7                     | 54,0                     | 44,0                    | 36,4                     | 33,4                     | 30,2                     | 27,8                     | 20,9                  |
| 10           | 101,2                    | 94,3                     | 85,2                     | 65,9                    | 51,2                     | 45,1                     | 38,9                     | 34,3                     | 20,8                  |
| 15           | 114,4                    | 113,1                    | 110,3                    | 84,9                    | 64,1                     | 55,1                     | 46,1                     | 39,5                     | 20,1                  |
| 20           | 122,7                    | 121,0                    | 121,0                    | 106,7                   | 79,5                     | 67,1                     | 54,3                     | 45,5                     | 18,2                  |
| 25           | 131,8                    | 130,0                    | 130,0                    | 121,5                   | 98,7                     | 84,0                     | 68,0                     | 56,2                     | 21,2                  |
| 30           | 137,5                    | 135,4                    | 135,3                    | 126,6                   | 111,4                    | 93,1                     | 72,2                     | 60,9                     | 19,8                  |
| 35           | 147,2                    | 144,7                    | 144,8                    | 135,5                   | 127,7                    | 111,4                    | 86,8                     | 71,0                     | 19,1                  |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 22 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 45 °.

**Tabela 22 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 45 ° de inclinação**

| Potência<br>[W] | T <sub>evap 1</sub><br>[°C] | T <sub>evap 2</sub><br>[°C] | T <sub>evap 3</sub><br>[°C] | T <sub>adiab</sub><br>[°C] | T <sub>cond 1</sub><br>[°C] | T <sub>cond 2</sub><br>[°C] | T <sub>cond 3</sub><br>[°C] | T <sub>cond 4</sub><br>[°C] | T <sub>amb</sub><br>[°C] |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 5               | 55,8                        | 52,5                        | 48,3                        | 39,6                       | 33,3                        | 30,4                        | 27,6                        | 25,6                        | 19,5                     |
| 10              | 97,7                        | 90,8                        | 82,1                        | 63,6                       | 49,9                        | 43,4                        | 37,4                        | 33,1                        | 19,5                     |
| 15              | 133,7                       | 123,8                       | 110,8                       | 83,5                       | 63,9                        | 54,1                        | 45,3                        | 39,0                        | 19,9                     |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 23 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 90 °.

**Tabela 23 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 90 ° de inclinação**

| Potência<br>[W] | T <sub>evap 1</sub><br>[°C] | T <sub>evap 2</sub><br>[°C] | T <sub>evap 3</sub><br>[°C] | T <sub>adiab</sub><br>[°C] | T <sub>cond 1</sub><br>[°C] | T <sub>cond 2</sub><br>[°C] | T <sub>cond 3</sub><br>[°C] | T <sub>cond 4</sub><br>[°C] | T <sub>amb</sub><br>[°C] |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 5               | 60,5                        | 57,0                        | 52,5                        | 43,0                       | 36,5                        | 32,8                        | 29,6                        | 27,2                        | 20,5                     |
| 10              | 96,0                        | 89,2                        | 80,7                        | 62,4                       | 49,5                        | 42,2                        | 36,2                        | 31,6                        | 18,0                     |
| 15              | 141,2                       | 130,9                       | 117,5                       | 88,9                       | 69,5                        | 57,6                        | 48,4                        | 41,2                        | 20,8                     |

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 24 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 225 °.

**Tabela 24 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 225 ° de inclinação**

| Potência<br>[W] | T <sub>evap 1</sub><br>[°C] | T <sub>evap 2</sub><br>[°C] | T <sub>evap 3</sub><br>[°C] | T <sub>adiab</sub><br>[°C] | T <sub>cond 1</sub><br>[°C] | T <sub>cond 2</sub><br>[°C] | T <sub>cond 3</sub><br>[°C] | T <sub>cond 4</sub><br>[°C] | T <sub>amb</sub><br>[°C] |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 5               | 57,5                        | 54,5                        | 50,3                        | 41,2                       | 35,0                        | 31,8                        | 28,9                        | 26,6                        | 20,5                     |
| 10              | 92,8                        | 87,8                        | 79,6                        | 61,2                       | 48,2                        | 41,6                        | 35,4                        | 30,8                        | 18,4                     |
| 15              | 108,5                       | 106,8                       | 105,9                       | 85,8                       | 66,4                        | 56,3                        | 46,8                        | 39,7                        | 20,7                     |
| 20              | 115,6                       | 113,7                       | 113,5                       | 104,6                      | 82,7                        | 68,5                        | 55,0                        | 45,4                        | 19,0                     |
| 25              | 123,1                       | 120,8                       | 120,6                       | 112,6                      | 101,3                       | 84,0                        | 66,7                        | 54,5                        | 20,7                     |
| 30              | 131,3                       | 128,6                       | 128,4                       | 119,7                      | 111,5                       | 101,0                       | 78,8                        | 63,2                        | 19,5                     |
| 35              | 140,1                       | 137,2                       | 136,8                       | 127,2                      | 119,6                       | 118,8                       | 92,5                        | 73,7                        | 20,7                     |

Fonte: Autoria própria.

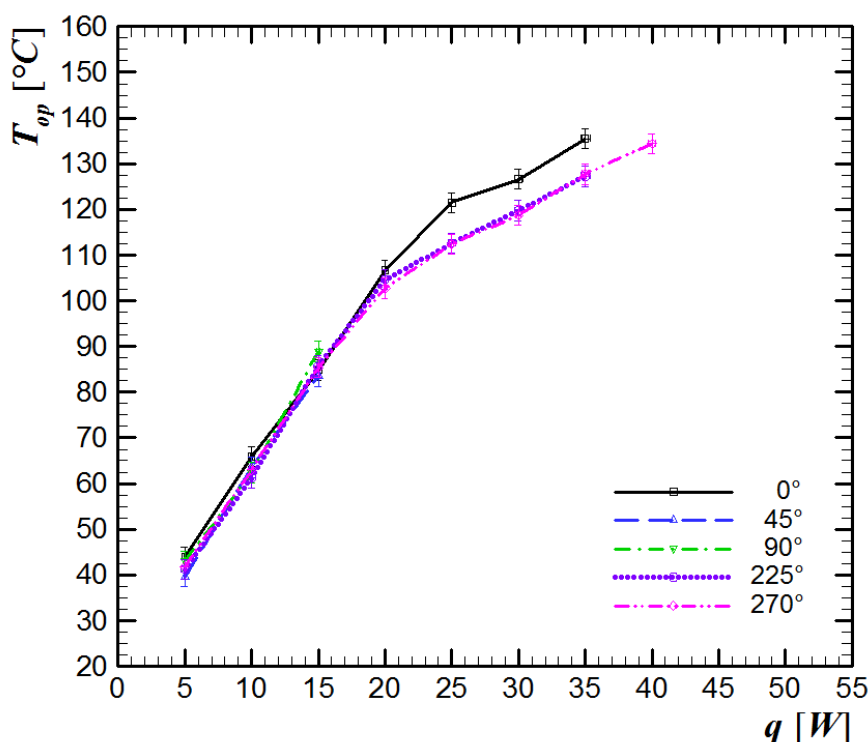
A Tabela 25 mostra os valores das temperaturas de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à inclinação de 270 °.

**Tabela 25 - Temperatura de operação em regime *quasi* permanente do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes potências dissipadas à 270 ° de inclinação**

| Potência [W] | T <sub>evap 1</sub> [°C] | T <sub>evap 2</sub> [°C] | T <sub>evap 3</sub> [°C] | T <sub>adiab</sub> [°C] | T <sub>cond 1</sub> [°C] | T <sub>cond 2</sub> [°C] | T <sub>cond 3</sub> [°C] | T <sub>cond 4</sub> [°C] | T <sub>amb</sub> [°C] |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 5            | 59,0                     | 55,7                     | 51,3                     | 41,9                    | 34,9                     | 32,0                     | 28,8                     | 26,4                     | 20,0                  |
| 10           | 95,8                     | 90,1                     | 81,7                     | 63,1                    | 49,0                     | 43,0                     | 36,4                     | 31,5                     | 18,7                  |
| 15           | 108,7                    | 107,0                    | 104,9                    | 85,4                    | 64,7                     | 55,7                     | 46,1                     | 38,8                     | 20,1                  |
| 20           | 116,6                    | 114,6                    | 114,2                    | 102,7                   | 81,9                     | 69,0                     | 55,1                     | 44,9                     | 18,2                  |
| 25           | 124,6                    | 122,3                    | 122,1                    | 112,4                   | 99,2                     | 85,5                     | 67,8                     | 54,7                     | 20,4                  |
| 30           | 131,3                    | 128,7                    | 128,3                    | 118,7                   | 108,1                    | 98,5                     | 76,7                     | 60,4                     | 17,7                  |
| 35           | 141,3                    | 138,7                    | 138,1                    | 127,7                   | 119,8                    | 118,9                    | 93,5                     | 73,4                     | 20,7                  |
| 40           | 149,0                    | 146,2                    | 145,7                    | 134,4                   | 126,5                    | 130,7                    | 105,7                    | 82,1                     | 19,5                  |

Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 19 mostra o comportamento da temperatura de operação em função da potência dissipada parametrizada na inclinação de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes inclinações. Pode ser observado, que a temperatura de operação aumenta com o aumento da potência dissipada no tubo de calor.



**Gráfico 19 - Temperatura de operação em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes inclinações**

Fonte: Autoria própria.

É possível notar que a inclinação de 225 ° (inclinado com o evaporador abaixo do condensador), foi a posição mais favorável para o desempenho térmico do tubo de calor de

microranhuras do Tipo #3, seguida da inclinação de 270 ° e 0 °. As inclinações de 45 ° e 90 ° tiveram praticamente o mesmo desempenho, sendo as piores posições de trabalho.

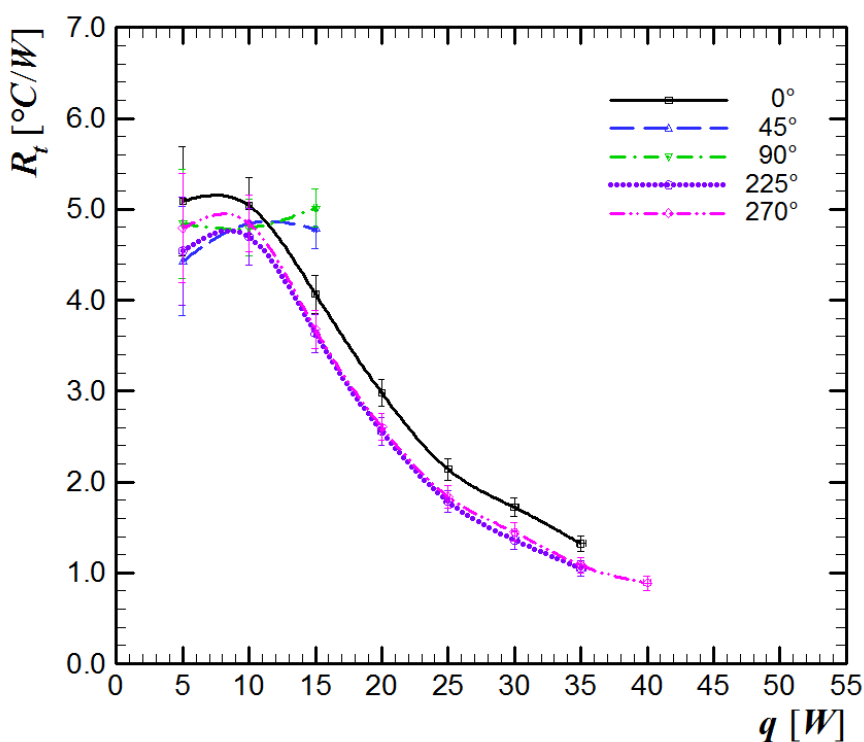
A Tabela 26 mostra os valores das temperaturas de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada considerando diferentes inclinações.

**Tabela 26 - Temperatura de operação do tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C])**

| Potência [W] | 0 °   | 45 ° | 90 ° | 225 ° | 270 ° |
|--------------|-------|------|------|-------|-------|
| 5            | 44,0  | 39,6 | 43,0 | 41,2  | 41,9  |
| 10           | 65,9  | 63,6 | 62,4 | 61,2  | 63,1  |
| 15           | 84,9  | 83,5 | 88,9 | 85,9  | 85,4  |
| 20           | 106,7 |      |      | 104,6 | 102,7 |
| 25           | 121,5 |      |      | 112,6 | 112,4 |
| 30           | 126,6 |      |      | 119,8 | 118,7 |
| 35           | 135,5 |      |      | 127,2 | 127,7 |
| 40           |       |      |      |       | 134,4 |

Fonte: Autoria Própria.

O Gráfico 20 mostra o comportamento da resistência térmica do tubo de calor ranhurado do Tipo #3 em função da potência dissipada e da inclinação. Pode ser observado que, na maioria das vezes, a resistência térmica diminui com o aumento da potência dissipada.



**Gráfico 20 - Resistência térmica em função da potência dissipada ao tubo de calor com microranhuras do Tipo #3 para diferentes inclinações**

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 27 mostra os valores das temperaturas de operação do tubo de calor com microranuras do Tipo #3 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada considerando diferentes inclinações.

**Tabela 27 - Resistência térmica ao longo do tubo de calor com microranuras do Tipo #3 em regime *quasi* permanente em função da potência dissipada para diferentes inclinações (em [°C/W])**

| Potência [W] | 0 °       | 45 °      | 90 °      | 225 °     | 270 °     |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5            | 5,09±0,60 | 4,43±0,60 | 4,84±0,60 | 4,54±0,60 | 4,79±0,60 |
| 10           | 5,04±0,31 | 4,85±0,31 | 4,80±0,31 | 4,70±0,31 | 4,84±0,31 |
| 15           | 4,07±0,21 | 4,78±0,21 | 5,01±0,21 | 3,93±0,21 | 3,68±0,21 |
| 20           | 2,98±0,15 |           |           | 2,55±0,15 | 2,61±0,15 |
| 25           | 2,14±0,12 |           |           | 1,78±0,12 | 1,84±0,12 |
| 30           | 1,72±0,10 |           |           | 1,36±0,10 | 1,45±0,10 |
| 35           | 1,32±0,09 |           |           | 1,05±0,09 | 1,08±0,09 |
| 40           |           |           |           |           | 0,89±0,08 |

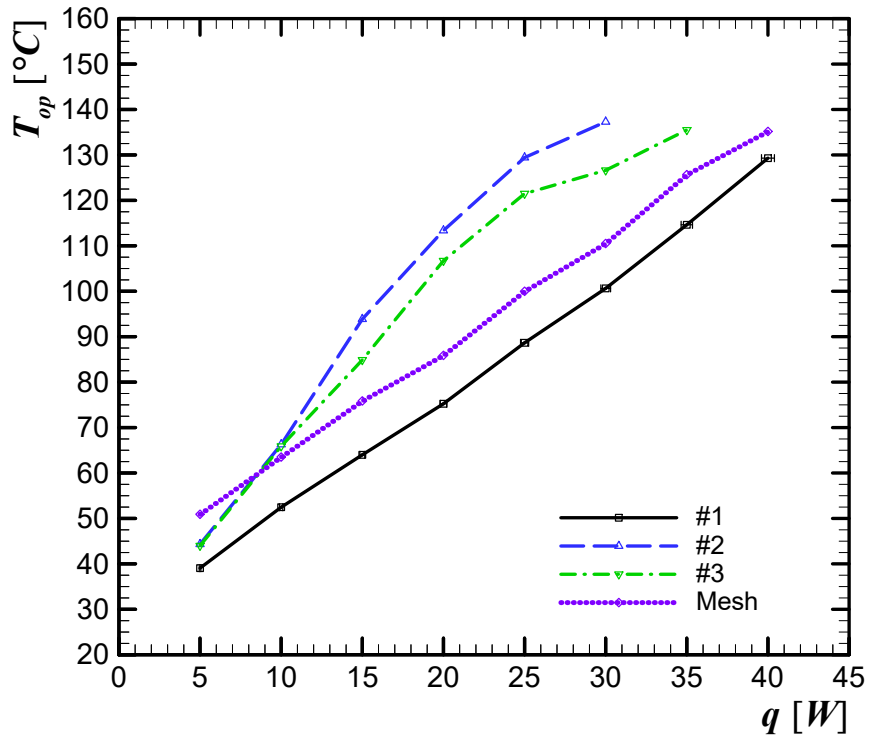
Fonte: Autoria Própria.

#### 5.4 COMPARAÇÃO ENTRE TUBOS DE CALOR COM DIFERENTES ESTRUTURAS CAPILARES

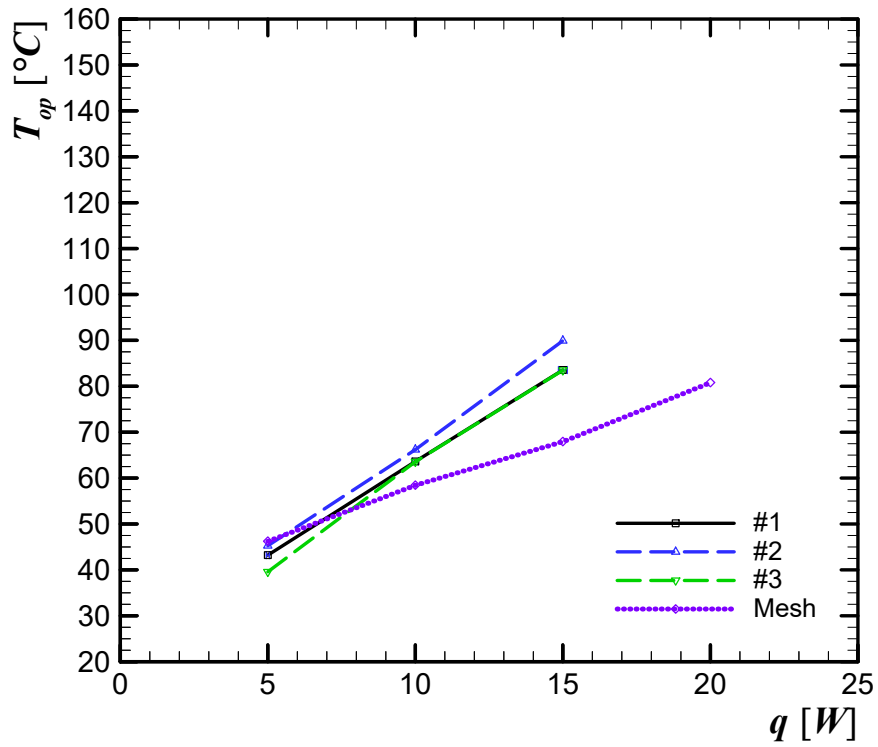
O Gráfico 21 apresenta uma comparação entre o comportamento da temperatura de operação em função da potência dissipada considerando as diversas inclinações dos tubos de calor com microranuras dos Tipos #1, #2 e #3 e de um tubo de calor contendo uma tela metálica (*mesh* 100) como estrutura capilar.

Maiores informações sobre o processo de fabricação e montagem de tubos de calor podem ser obtidas em Santos *et al.* (2014) e Krambeck *et al.* (2015).

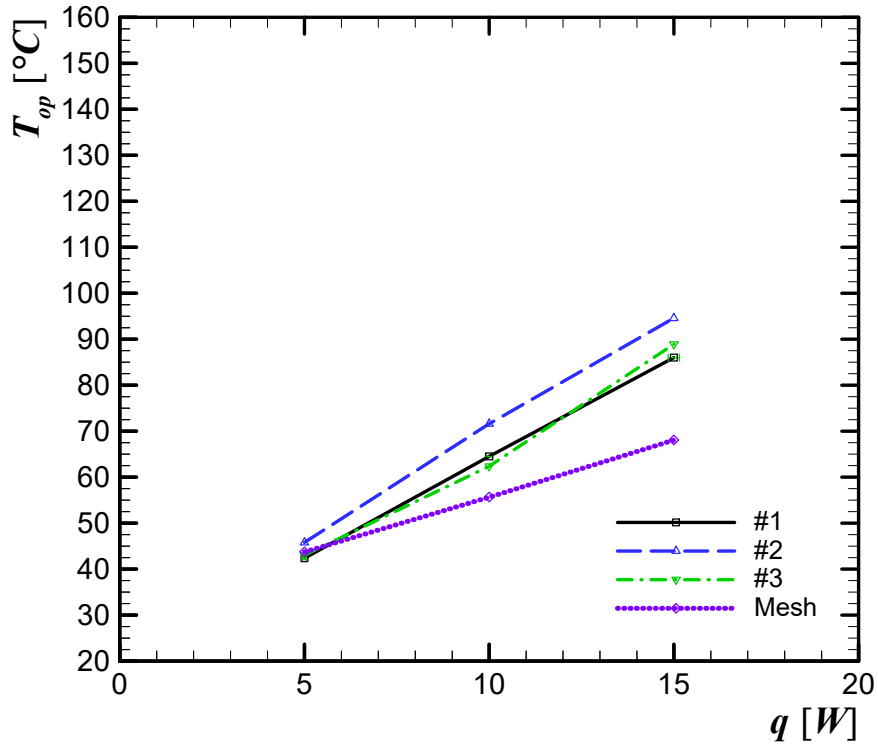




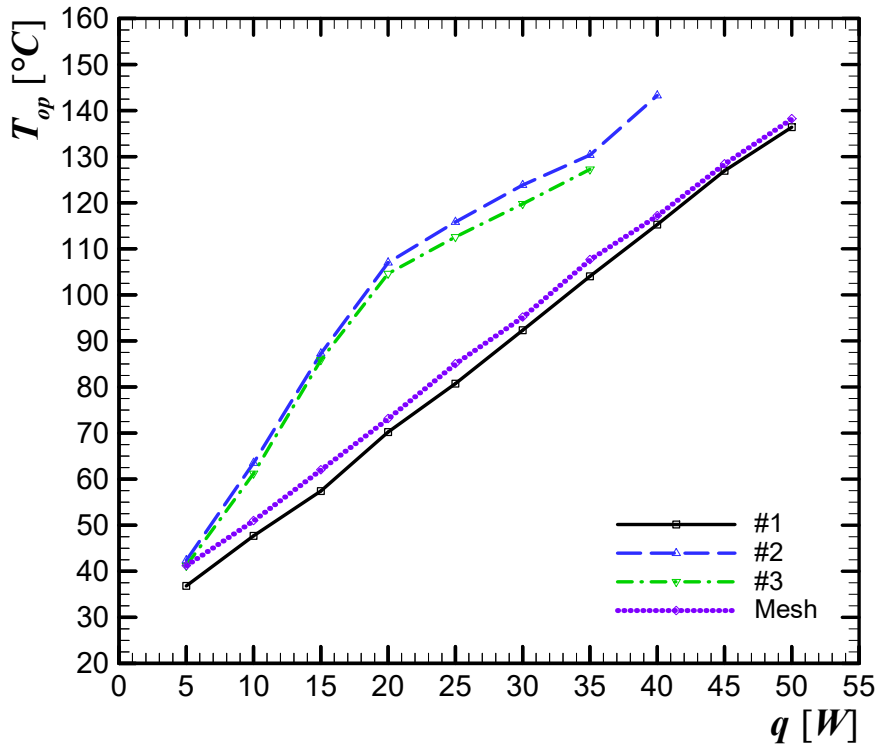
(a) 0°



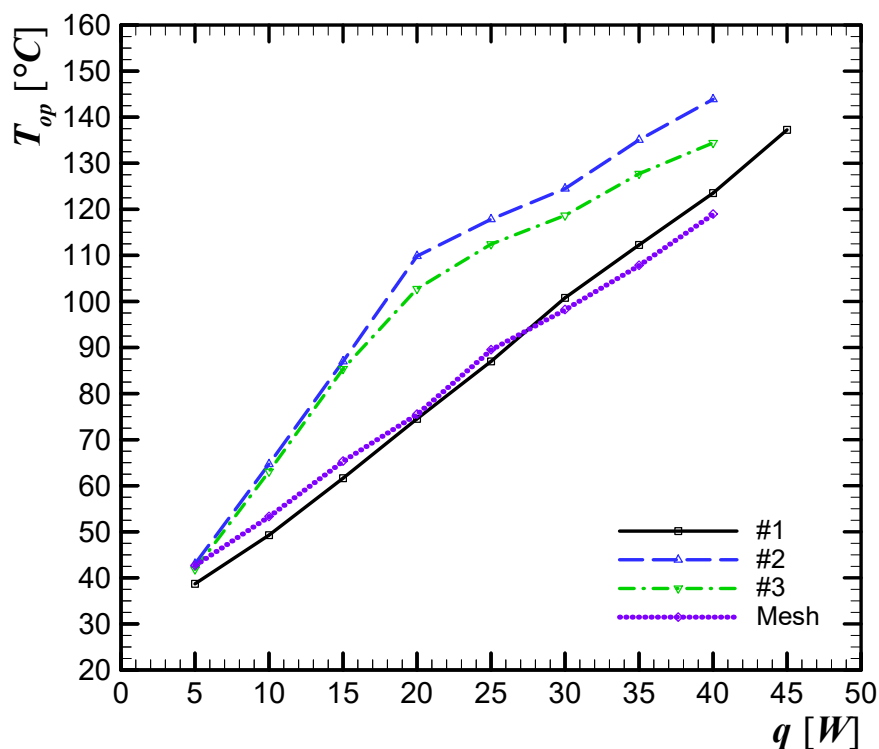
(b) 45°



(c) 90 °



(d) 225 °



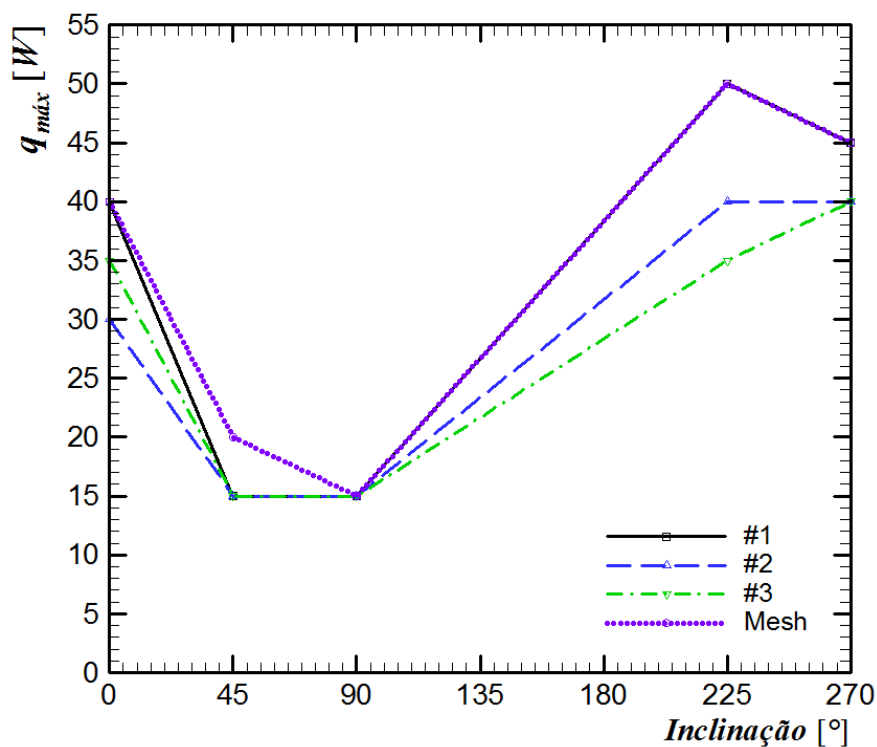
(e) 270 °

**Gráfico 21 - Comparação do comportamento térmico entre os tubos de calor ranhurados e um tubo de calor contendo uma tela metálica como estrutura capilar**

**Fonte: Autoria Própria.**

Pode ser observado pela análise dos resultados experimentais que quando os tubos de calor operaram na horizontal ou com o evaporador abaixo do condensador (gravidade a favor), o desempenho térmico do tubo de calor com microranhuradas do Tipo #1 foi superior ao tubo de calor com tela metálica, no entanto, para as inclinações de 45 ° e 90 ° (contra a gravidade), o desempenho térmico do tubo de calor com tela metálica foi superior ao do tubo de calor com microranhuradas. Esse fato era previsto, uma vez que, para Faghri (1995), o desempenho de microranhuradas axiais é excelente, desde que a aplicação do tubo de calor não seja de uma significativa elevação contra gravidade, pois o tamanho das microranhuradas é grande comparado aos poros da tela metálica, resultando em uma pressão capilar relativamente baixa, contudo uma maior permeabilidade e condutividade térmica. Além disso, os tubos de calor com microranhuradas dos Tipos #2 e #3 apresentaram as piores performances térmicas.

O Gráfico 22 mostra o comportamento da máxima potência dissipada ao tubo de calor em função da inclinação considerando os diferentes tubos de calor analisados (Microranhuradas Tipo #1, Tipo #2 e Tipo #3 e Tela Metálica *Mesh* 100).



**Gráfico 22 - Máxima potência dissipada ao tubo de calor em função da inclinação para diferentes estruturas capilares**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Pode ser observado que nas inclinações de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $225^\circ$  e  $270^\circ$  o tubo de calor com microranhuradas do Tipo #1 e o com *Mesh* 100 foram capazes de dissipar a mesma potência antes de atingir  $150^\circ\text{C}$ . Na inclinação de  $45^\circ$ , o tubo de calor com *Mesh* 100 dissipou mais calor do que o tubo de calor com microranhuradas do Tipo #1.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta Dissertação de Mestrado, o processo de eletroerosão a fio (*wire electrical discharge machining* ou *wire-EDM*) foi utilizado como um método de fabricação alternativo para a confecção de microranhuras axiais em tubos de calor. Uma modelagem baseada no projeto térmico e nos limites operacionais (limites capilar, de arrasto, viscoso, sônico e de ebulição) foi proposta para os tubos de calor com microranhuras axiais de geometria semicircular como estrutura capilar considerando três diferentes autores: Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014). Estes modelos, implementados no *software* EES<sup>TM</sup> (*Engineering Equation Solver<sup>TM</sup>*), foram utilizados como ferramenta para o projeto dos tubos de calor ranhurados propostos. Os tubos de calor foram produzidos a partir de um tubo reto de cobre com um diâmetro externo de 9,45 mm, um diâmetro interno de 6,20 mm e um comprimento total de 200 mm. O fluido de trabalho utilizado foi água deionizada e os tubos de calor foram carregados com uma razão de preenchimento de 60% do volume do evaporador. O condensador foi resfriado por convecção forçada de ar, a seção adiabática foi isolada por uma fita de fibra de vidro e o evaporador foi aquecido utilizando um resistor elétrico em fita de liga de níquel-cromo e isolado do ambiente externo por um isolamento térmico aeronáutico. Os tubos de calor foram testados experimentalmente para inclinações de operação iguais a 0°, 45°, 90°, 225° e 270° com a horizontal, sob cargas térmicas compreendidas entre 5 W e 50 W.

Os resultados do desempenho térmico dos tubos de calor provenientes dos testes experimentais executados mostraram que as microranhuras axiais fabricadas pelo processo de eletroerosão a fio como estrutura capilar funcionaram satisfatoriamente no bombeamento capilar dos tubos de calor analisado. Além disso, na maioria dos casos estudados, o tubo de calor com microranhuras do Tipo #1 apresentou um melhor desempenho térmico quando comparado com um tubo de calor contendo tela metálica como estrutura capilar.

Como sugestões para trabalhos futuros propõe-se: a mudança do número e da profundidade das microranhuras axiais, a alteração da razão de preenchimento do fluido de trabalho, seleção de um fluido de trabalho alternativo, como por exemplo o metanol, a modificação dos comprimentos de evaporador, condensador e seção adiabática e a aplicação de estruturas capilares híbridas (tela-microranhura, meio sinterizado-microranhura). Além disso é sugerido um estudo analítico-experimental de tubos de calor com microranhuras axiais fabricadas por eletroerosão a fio.

## REFERÊNCIAS

- AGILENT TECHNOLOGIES. **Guia do usuário**. Santa Clara, CA, USA. 2012. 71 p.
- ASSELMAN, G.A.A.; GREEN, D.B. **Heat Pipes**. Philips Technical Review, v. 33/4, p. 104-113, 1973.
- BAR-COHEN, A.; WATWE, A.A.; PRASHER, R.S. **Heat Transfer in Electronic Equipment**. In: BEJAN, A.; KRAUS, A.D. **Heat Transfer Handbook**. New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2003. chap.13, p.947-1027.
- BENEDICT, G.F. **Electrical Discharge Wire Cutting**. In: BENEDICT, G.F. **Nontraditional Manufacturing Processes**. 1 ed. New York, NY, USA: Marcel Denker, Inc., 1987. chap.16, p. 231-246.
- BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S.; INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2014.
- BOBBILI, R.; MADHU, V.; GOGIA, A.K. Modelling and Analysis of Material Removal Rate and Surface Roughness in Wire-Cut EDM of Armour Materials. **Engineering Science and Technology**., v. 18, p. 664-668, mar. 2015.
- CHANG, Y.W.; CHENG, C.H.; WANG, J.C.; CHEN, S.L. Heat Pipe for Cooling of Electronic Equipment. **Energy Conversion and Management**., v. 49, p. 3398-3404, jun. 2008.
- CHEN, S.W.; HSIEH, J.C.; CHOU, C.T.; LIN, H.H.; SHEN, S.C.; TSAI, M.J. Experimental Investigation and Visualization on Capillary and Boiling Limits of Micro-Grooves made by Different Processes. **Sensors and Actuators**., v. A 139, p. 78-87, mar. 2007.
- CHI, S.W. **Heat Pipe Theory and Practice: A Sourcebook**. Washington, DC, USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- COTTER, T.P. **Theory of Heat Pipes**. Los Alamos Scientific Laboratory Report No. LA-3246-MS., 1965.
- ENGINEERING EQUATION SOLVER. **F-Chart Software**. Middleton, WI, USA. 2002. 320 p.
- FAGHRI, A. **Heat Pipe Science and Technology**. Washington, DC, USA: Taylor & Francis, 1995.
- FAGHRI, A. Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges. **Frontiers in Heat Pipes**., v. 5/1, p. 1-48, 2014.
- FERRELL, J.K.; DAVIS, H.W. Vaporization Heat Transfer in Heat Pipe Wick Materials. In: First International Heat Pipe Conference, 1973, Stuttgart, Germany. **Proceedings...** Stuttgart: North Carolina State University, 1973.

GAUGLER, R. **Heat Transfer Device**. U.S. Patent No. 2350348, filed Dec. 21, 1942; and issued June 6, 1944.

GOLDSTEIN, R.J.; IBELE, W.E.; PATANKAR, S.V.; SIMON, T.W.; KUEHN T.H.; STRYKOWSKI, P.J.; TAMMA, K.K.; HEBERLEIN, J.V.R.; DAVIDSON, J.H.; BISCHOF, J.; KULACKI, F.A.; KORTSHAGEN, U.; GARRICK, S.; SRINIVSAN, K.; GHOSH, K.; MITTAL, R. Heat Transfer – A Review of 2004 Literature. **International Journal of Heat and Mass Transfer.**, v. 53, p. 4343-4396, 2010.

GROVER, R.; COTTER, T.P.; ERICKSON, G.F. Structures of very High Thermal Conductance. **Journal of Applied Physics.**, v. 35/6, p. 1990-1991, 1964.

GROVER, G. **Evaporation-Condensation Heat Transfer Device**. U.S. Patent No. 3229759, filed Dec. 2, 1963; and issued Jan. 18, 1966.

HOA, C.; BENOIT, D.; ALAIN, A. Roadmap for Developing Heat Pipes for ALCATEL SPACE's Satellites. **Applied Thermal Engineering.**, v. 23, p. 1099-1108, 2003.

HOLMAN, J.P. **Experimental Methods for Engineers**, 6.ed., Singapore, Mcgrall-Hill, 1994.

KRAMBECK, L.; NISHIDA, F.B.; SANTOS, P.H.D.; ALVES, T.A. Configurations of Phosphor Bronze Meshes in Heat Pipes: An Experimental Analysis of Thermal Performance. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science.**, v. 2, p. 11-14, 2015.

LI, Y.; XIAO, H.; LIAN, B.; TANG, Y.; ZENG, Z.X. Forming Method of Axial Micro Grooves Inside Copper Heat Pipe. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China.**, v. 18, p. 1229-1233, 2008.

MANTELLI, M.B.H. Notas de Aula: **Curso sobre Tubos de Calor e Termossifões**. UFSC, Florianópolis, 2009.

NISHIDA, F.B. **Análise Numérica do Escoamento Laminar e da Transferência de Calor de Aquecedores 3D Protuberantes Montados em uma Placa de Circuito Impresso Utilizando Diferentes Fluidos de Resfriamento**. 2012. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2012.

OCHTERBECK, J.M. **Heat transfer in electronic equipment**. In: BEJAN, A.; KRAUS, A.D. **Heat Transfer Handbook**. New Jersey, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2003. chap.16, p.1181-1230.

PERKINS, J. U.K. Patent No. 7059, 1936.

PETERSON, G.P.; PENG, X.F. Experimental Investigation of Capillary Induced Rewetting for a Flat Porous Wicking Structure. ASME **Journal of Energy Resources Technology.**, v. 115/1, p. 62-70, 1993.

PETERSON, G.P. **An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Application**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1994.

PETERSON, G.P. **Heat Pipes**. In: ROHSENOW, W.M.; HARTNETT, J.P.; CHO, Y.I. **Handbook of Heat Transfer**. 3 ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1998. chap.12, p. 21.1-12.20.

PRASHER, R.S. A Simplified Conduction Based Modeling Scheme for Design Sensitivity Study of Thermal Solution Utilizing Heat Pipe and Vapor Chamber Technology. **Journal of Electronic Packaging**., 125/3, p. 378-85, 2003.

REAY, D.A.; KEW, P.A; MCGLEN, R.J. **Heat Pipes: Theory, Design and Applications**. 6 ed. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2014. 251p.

SANTOS, P.H.D.; KRAMBECK, L.; SANTOS, D.L.F.; ALVES, T.A. Analysis of a Stainless Steel Heat Pipe based on Operation Limits. **International Review of Mechanical Engineering**., v. 8, p. 599-608, 2014.

SHABANY, Y. **Heat Transfer: Thermal Management of Electronics**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.

SOMMER, C. **Non-Traditional Machining Handbook**. 1 ed. Houston, TX, USA: Advance Publishing, Inc., 2000.

TANG, Y.; CHEN, P.; WANG, X. Experimental Investigation into the Performance of Heat Pipe with Micro Grooves Fabricated by Extrusion-ploughing Process. **Energy Conversion and Management**., v. 51, p. 1849-1854, 2010.

TANG, Y.; CHI, Y.; CHEN, J.C.; DENG, X.X.; LIU, L.; LIU, X.K.; WAN, Z.P. Experimental Study of Oil-filled High-speed Spin Forming Micro-groove Fin-inside Tubes. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**., v. 47, p. 1059-1068, 2006.

TANG, Y.; DENG, D.; HUANG, G.; WAN, Z.; LU, L. Effect of Fabrication Parameters on Capillary Performance of Composite Wicks for Two-phase Heat Transfer Devices. **Energy Conversion and Management**., v. 66, p. 66-76, 2013.

TREFETHEN, L. **On the Surface Tension Pumping of Liquids or a Possible Role of the Candlewick in Space Exploration**. G.E. Tech. Info., Serial No. 615 D114, 1962.

VANCOUVER WIRE EDM. **Tips for Machinists**. [2015]. 1 fotografia, color. Disponível em: <[http://www.vancouverwireedm.com/Wire\\_EDM\\_Tips\\_For\\_Machinists.htm](http://www.vancouverwireedm.com/Wire_EDM_Tips_For_Machinists.htm)>. Acesso em: 24 jan.2015.

VR-ZONE. **Smartphones in 2014 might come with water cooled heat-pipes**. [2013]. Postado em 18 jun.2013. Disponível em: <<http://vr-zone.com/articles/smartphones-in-2014-might-come-with-water-cooled-heat-pipes/38622.html>>. Acesso em: 22 fev.2015.

WANG, X.; TANG, Y.; CHEN, P. Investigation into Performance of a Heat Pipe with Micro Grooves Fabricated by Extrusion-Ploughing Process. **Energy Conversion and Management**., v. 50, p. 1384-1388, 2009.

YANG, X.; YAN, Y.Y.; MULLEN, D. Recent Developments of Lightweight, High Performance Heat Pipes. **Applied Thermal Engineering**., v. 33-34, p. 1-14, 2012.



ZUO, Z.J.; FAGHRI, A. A Network Thermodynamic Analysis of the Heat Pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer.**, v. 41/11, p. 1473-1484, 1998.

**APÊNDICE A**

## CÁLCULO DOS DEMAIS LIMITES DE OPERAÇÃO

Na maioria dos casos, assim como na presente análise, os limites operacionais apresentados nesta seção exibem valores muito acima do limite capilar, não caracterizando o limite de transferência de calor máximo do tubo de calor. As correlações que caracterizam a teoria e a adaptação dos limites de arrasto, viscoso, sônico e de ebulição são apresentados neste Apêndice, respectivamente, segundo Chi (1976), Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014).

### Limite de Arrasto

O limite de arrasto se caracteriza quando altos níveis de fluxo de calor são fornecidos ao tubo de calor, a velocidade do vapor aumenta, e, como o vapor e o líquido se movem em direções opostas, há uma força cisalhante na interface líquido-vapor. Se a velocidade do vapor for muito alta, gotículas de líquido serão arrastadas pelo vapor e transportadas para o condensador ao invés de se dirigirem para o evaporador, assim o desempenho do tubo decairá. Um excessivo arrasto do líquido pelo vapor resulta na secagem do evaporador (PETERSON, 1994).

#### Chi (1976)

O limite de transferência de calor devido ao arrasto é definido pela Equação (A.1).

$$q_{arrasto} = A_v h_{lv} \left( \frac{\sigma_l \rho_v}{2r_{h,mp}} \right)^{1/2} \quad (A.1)$$

sendo que,  $A_v$  é a área do vapor [ $m^2$ ] e  $r_{h,mp}$  é o raio hidráulico do poro da superfície da estrutura capilar [ $m$ ], definido no Quadro 9.

| Tipo de Estrutura       | $r_{h,mp}$                         | Dados  |
|-------------------------|------------------------------------|--|
| Tela Metálica           | $\frac{1}{2N} - \frac{D_{fio}}{2}$ | $D_{fio}$ = diâmetro do fio [ $m$ ]<br>$N$ = número de malha da tela ( <i>mesh</i> ) [ $1/pol$ ] |
| Microranhura Retangular | $w$                                | $w$ = largura da microranhura [ $m$ ]  |

**Quadro 9 - Raio hidráulico do poro,  $r_{h,mp}$ , para diferentes estruturas capilares**  
Fonte: Adaptado de Chi (1976).

Peterson (1994)

O limite de arrasto utilizado por Peterson (1994) é o mesmo utilizado por Chi (1976), Equação (A.1).

Reay et al. (2014)

A Equação (A.2) descreve a máxima taxa de transferência de calor devido ao limite de arrasto.

$$q_{arrasto} = A_v \sqrt{\frac{2\pi\rho_v h_{lv}^2 \sigma_l}{z}} \quad (A.2)$$

sendo que,  $z$  é uma dimensão que caracteriza a superfície líquido-vapor e está relacionada ao espaçamento da tela [ $m$ ].

O limite de arrasto selecionado para esta Dissertação é caracterizado pela teoria de Chi (1976), Equação (A.1), pois além de ser o modelo que apresenta o menor valor de limite, o raio hidráulico do poro da superfície da estrutura capilar é mais susceptível à adaptação. A adaptação pode ser notada no raio hidráulico do poro  $r_{h,mp}$ , que é adaptado à presente geometria por:  $r_{h,mp} = w$ . Na área de vapor  $A_v$  pela aplicação do novo raio de vapor  $r_v$ .

O Gráfico 23 mostra o limite capilar dos tubos de calor.

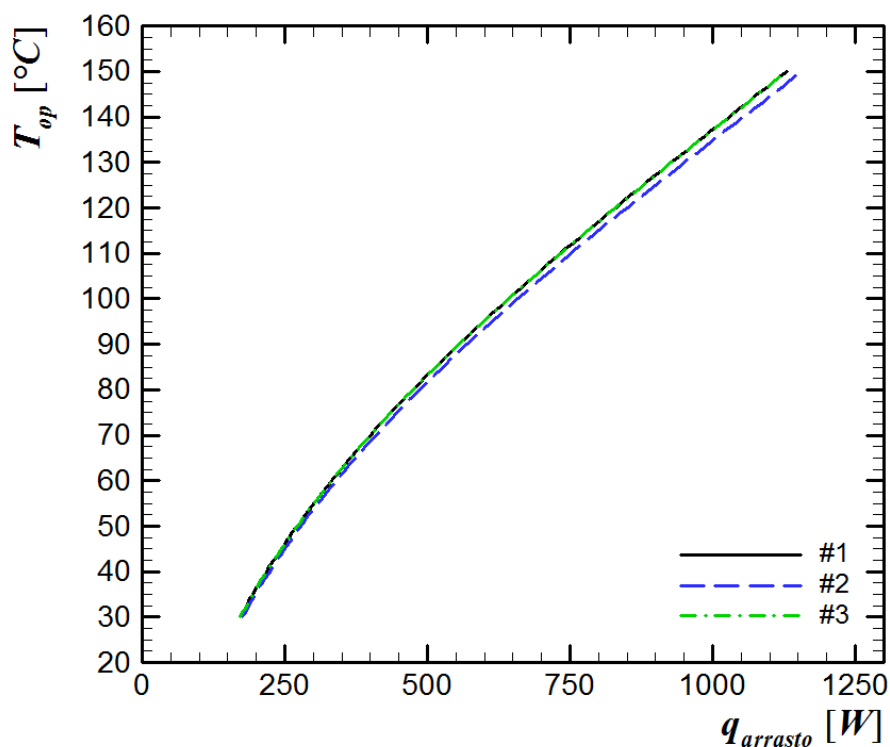


Gráfico 23 - Limites operacionais em função da temperatura de operação  
Fonte: Autoria própria.

### Limite Viscoso

Segundo Reay *et al.* (2014), o limite viscoso é geralmente importante somente na fase inicial de operação do tubo de calor. À baixas temperaturas de operação, a diferença de pressão de vapor não é suficiente para superar as forças viscosas e gravitacionais. Dessa maneira, as forças viscosas são dominantes no fluxo de vapor do evaporador ao condensador e uma grande queda de pressão pode ocorrer. O transporte de vapor e, portanto, a capacidade de transferência de calor no tubo de calor, é limitada sob tal condição.

#### Chi (1976)

A transferência de calor relacionada ao limite viscoso não foi definida por Chi (1976).

#### Peterson (1994)

A máxima transferência de calor relacionada ao limite viscoso é definida pela Equação (A.3).

$$q_{viscoso} = \frac{A_v r_v^2 h_{lv} \rho_v p_{sat}}{16 \mu_v l_{eff}} \quad (\text{A.3})$$

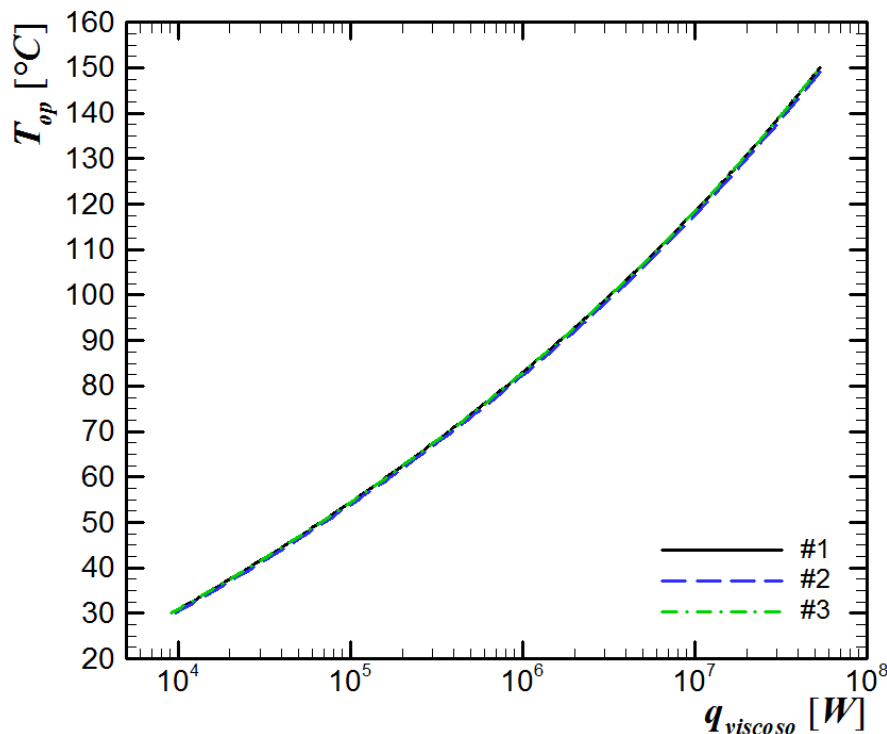
sendo que,  $p_{sat}$  é a pressão de saturação do fluido de trabalho [Pa] na temperatura de operação do tubo de calor.

Reay et al. (2014)

O limite viscoso utilizado por Reay et al. (2014) é o mesmo utilizado por Peterson (1994), Equação (A.3).

O limite viscoso apresentado por Peterson (1994) e Reay et al. (2014), Equação (A.3), foi selecionado para esta modelagem. A adaptação pode ser notada na área de vapor  $A_v$  pela aplicação do novo raio de vapor  $r_v$ .

O Gráfico 24 mostra o limite capilar dos tubos de calor.



**Gráfico 24 - Limites operacionais em função da temperatura de operação**  
**Fonte: Autoria própria.**

## Limite Sônico

Na maioria das vezes, o limite capilar determina o fluxo de calor máximo sobre a maior parte da faixa de operação do tubo de calor, no entanto, no período anterior ao tubo de calor entrar em regime *quasi* permanente, para alguns tubos de calor de alta temperatura, a velocidade do vapor pode alcançar valores sônicos, nesse caso, a velocidade sônica é que caracteriza o limite do desempenho do tubo de calor. Em velocidades próximas à sônica, os efeitos de compressibilidade devem ser considerados no cálculo da queda de pressão de vapor (REAY *et al.*, 2014).

### Chi (1976)

A máxima capacidade de transporte de calor relacionada ao limite sônico está de acordo com o a Equação (A.4).

$$q_{sônico} = A_v \rho_o h_{lv} \left[ \frac{\gamma_v R_g T_o}{2(\gamma_v + 1)} \right]^{1/2} \quad (A.4)$$

sendo que,  $\rho_o$  e  $T_o$  são a massa específica [ $kg/m^3$ ] e a temperatura [ $K$ ] no ponto de estagnação do fluido,  $R_g$  é a constante do gás [ $J/kg.K$ ] e a área do vapor  $A_v$ .

### Peterson (1994)

A transferência de calor máxima relacionada ao limite sônico, é estimada, de acordo com Peterson (1994), em termos da Equação (A.5).

$$q_{sônico} = 0,474 h_{lv} A_v (\rho_v p_v)^{1/2} \quad (A.5)$$

sendo que,  $\rho_v$  [ $kg/m^3$ ] e  $p_v$  [ $Pa$ ] são a massa específica e a pressão do vapor no final do evaporador, respectivamente.

### Reay *et al.* (2014)

O limite sônico utilizado por Reay *et al.* (2014) é o mesmo utilizado por Peterson (1994), Equação (A.5).

O limite sônico selecionado para esta Dissertação é caracterizado pela teoria de Peterson (1994) e Reay *et al.* (2014) através da Equação (A.5), sendo que a adaptação também pode ser notada na área de vapor  $A_v$  pela aplicação do novo raio de vapor  $r_v$ .

O Gráfico 25 mostra o limite capilar dos tubos de calor.

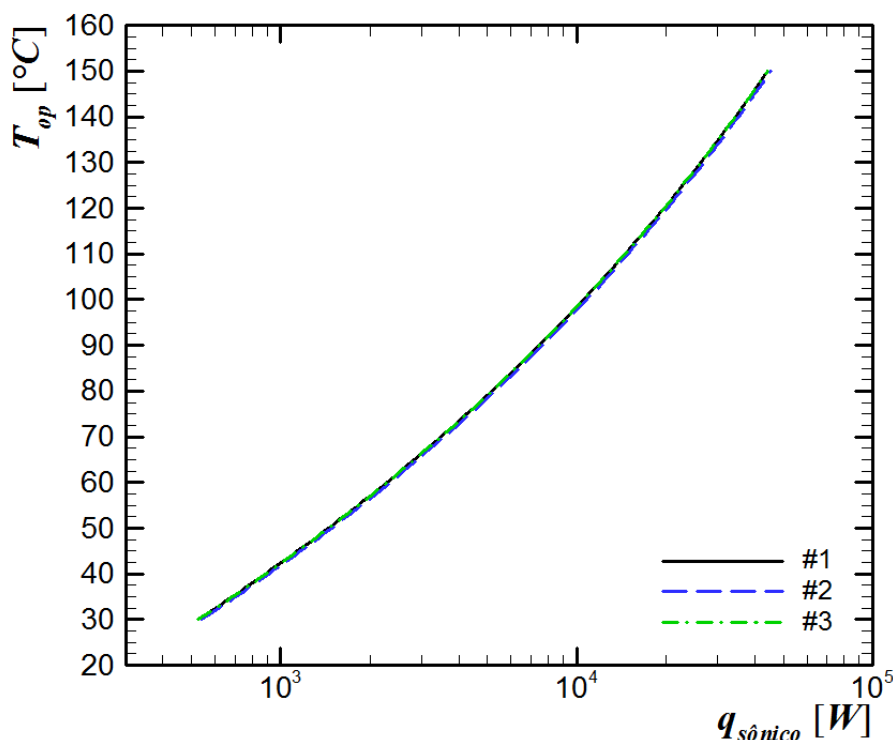


Gráfico 25 - Limites operacionais em função da temperatura de operação  
Fonte: Autoria própria.

### Limite de Ebulição

O limite de transferência de calor por ebulição em tubo de calor ocorre quando, devido a um aumento demasiado na diferença de temperatura através da estrutura capilar ( $T_p - T_{sat}$ ), se sucede o fenômeno da ebulição nucleada. Tal mecanismo de transferência de calor é favorável, contanto que as bolhas formadas não sejam grandes a ponto de não poderem escapar da estrutura capilar, conseqüentemente, bloqueando o retorno do líquido ao condensador. A temperatura da parede do tubo de calor irá aumentar ainda mais rapidamente e o tubo de calor pode ser danificado.



Chi (1976)

O desempenho do tubo de calor limitado pelo limite de ebulição está de acordo com a Equação (A.6).

$$q_{ebulição} = \frac{2\pi l_{evap} k_{eff} T_v}{h_{lv} \rho_v \ln(r_{int}/r_v)} \left( \frac{2\sigma_l}{r_n} - \Delta p_{c,máx} \right) \quad (A.6)$$

sendo que,  $T_v$  é a temperatura do vapor [K],  $r_{int}$  é o raio interno do tubo,  $r_n$  é o raio das bolhas de vapor, que variam de  $2,54 \cdot 10^{-7}$  a  $2,54 \cdot 10^{-5}$  [m] e  $k_{eff}$  é a condutividade térmica efetiva, definida conforme o Quadro 10.

| Tipo de Estrutura                       | $k_{eff}$  | Dados   |
|---|--|---|
| Estrutura Capilar e Líquido em Série    | $\frac{k_l k_{mp}}{\varepsilon k_{mp} + k_l (1 - \varepsilon)}$  | $k_l$ = condutividade térmica do líquido [W/m.K]  |
| Estrutura Capilar e Líquido em Paralelo | $\varepsilon k_l + (1 - \varepsilon) k_{mp}$   |   |
| Tela Metálica                           | $\frac{k_l \left[ (k_l + k_{mp}) - (1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp}) \right]}{\left[ (k_l + k_{mp}) + (1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp}) \right]}$  | $k_{mp}$ = condutividade térmica do estrutura capilar [W/m.K]<br>$\varepsilon$ = porosidade do meio |
| Esferas Empacotadas                     | $\frac{k_l \left[ (2k_l + k_{mp}) - 2(1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp}) \right]}{\left[ 2k_l + k_{mp} + (1 - \varepsilon)(k_l - k_{mp}) \right]}$ | $w_f$ = espessura da crista da microranhura [m]<br>$w$ = largura da microranhura [m]                |
| Microranhuras Retangulares              | $\frac{(w_f k_l k_{mp} \delta) + w k_l (0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)}{(w + w_f)(0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)}$                             | $\delta$ = profundidade da microranhura [m]   |

Quadro 10 - Condutividade térmica efetiva,  $k_{eff}$ , para diferentes estruturas capilares

Fonte: Adaptado de Chi (1976).

Particularmente para estruturas de microranhuras, a espessura da crista da microranhura  $w_f$  é definida pela Equação (A.7).

$$w_f = \left( \pi \frac{r_v + r_{h,l}}{N} \right) - w \quad (A.7)$$

sendo que,  $N$  é o número de microranhuras e  $r_{h,l}$  é o raio hidráulico da região de líquido (estrutura capilar) [m], que é definido conforme a Equação (A.8).

$$r_{h,l} = 2w \left( \frac{\delta}{w + 2\delta} \right) \quad (\text{A.8})$$

Peterson (1994)

Para o limite de ebulição, Peterson (1994) utiliza o mesmo modelo adotado por Chi (1976), o qual é definido pela Equação (A.6).

Reay et al. (2014)

Reay et al. (2014) apud Ferrell & Davis (1973) definem o limite de ebulição de acordo com a Equação (A.9).

$$q_{ebulição} = \frac{g \left( y_c \rho_l \left( \sigma_l / \sigma_{l,ref} \right) - \rho_l L \operatorname{sen} \psi \left( 1 + \alpha_{mp} \Delta T \right) \right)}{\left( \frac{l_{evap} \mu_l}{h_{lv} \rho_l k_p D_{ext} \left( 1 + \alpha_{mp} \Delta T \right)} \right) \left[ \left( \frac{l_{evap}}{2} \right) + l_{adiab} \right]} \quad (\text{A.9})$$

sendo que,  $\sigma_{l,ref}$  é a tensão superficial do fluido de trabalho no estado líquido [ $N/m$ ] calculada na temperatura de referência,  $k_p$  é a condutividade térmica do tubo [ $W/m.K$ ],  $D_{ext}$  é o diâmetro externo do tubo [ $m$ ],  $\alpha_{mp}$  é o coeficiente de expansão linear do material da região porosa [ $1/K$ ],  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre a temperatura de referência e a temperatura de operação [ $K$ ] e  $y_c$  é a altura capilar do fluido [ $m$ ] medida à temperatura de referência, definida pela Equação (A.10).

$$y_c = \frac{2\sigma_l \cos(\theta)}{\rho_v g r_v} \quad (\text{A.10})$$

sendo que,  $\theta$  é o ângulo de contato [ $^\circ$ ].

O limite de ebulição apresentado por Chi (1976) e Peterson (1994) na Equação (A.6), foi o mais adequado para o tubo de calor deste Trabalho.

O parâmetro ( $k_{eff}$ ) é a condutividade térmica efetiva [ $W/m.K$ ] adaptada de Chi (1976) para a presente geometria de microranhura por proporções de área, definida conforme a Equação (A.11).

$$k_{eff} = 0,8925 \frac{(w_f k_l k_{mp} \delta) + w k_l (0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)}{(w + w_f)(0,185 w_f k_{mp} + \delta k_l)} \quad (\text{A.11})$$

sendo que,  $w$  é a largura da microranhura [m],  $w_f$  é a espessura da crista da microranhura [m] e  $\delta$  é a profundidade da microranhura [m]. Os parâmetros  $k_l$  e  $k_{mp}$  são a condutividade térmica do líquido [W/m.K] e a condutividade térmica da estrutura capilar [W/m.K], respectivamente.

O Gráfico 26 mostra o limite capilar dos tubos de calor.

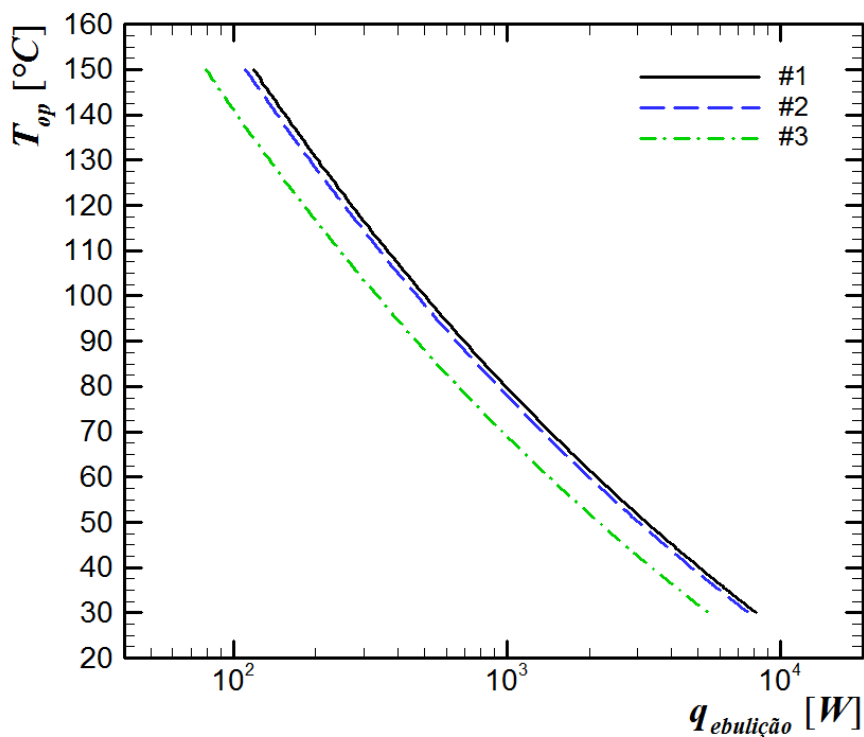


Gráfico 26 - Limites operacionais em função da temperatura de operação  
Fonte: Autoria própria.

**APÉNDICE B**

## CÁLCULO DE INCERTEZAS

Qualquer resultado de uma medida experimental está sujeito a erros, ou seja, sempre haverá uma diferença entre o valor verdadeiro e o valor medido segundo Taylor (1988). Utilizando o procedimento descrito em Holman (1994), as incertezas das medidas experimentais foram analisadas.

### B.1 - Incerteza da Potência Dissipada

Com relação ao fornecimento de potência à resistência elétrica dos testes em bancada, as incertezas de medição associadas a potência dissipada ao evaporador foram estimadas. Foi considerada como incerteza a menor divisão de escala dos mostradores de corrente e de tensão da fonte de potência. Dessa maneira, o erro cometido na medição da corrente é igual a 0,01 A e na medição da tensão igual a 0,01 V. A potência elétrica dissipada pela resistência elétrica é dada pelo produto da tensão pela corrente como mostrado a seguir.

$$P = V.I \quad (\text{B.1})$$

A incerteza da potência elétrica dissipada será:

$$\delta P = \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial V} \delta V \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial I} \delta I \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.2})$$

$$\delta P = \left[ (I \cdot \delta V)^2 + (V \cdot \delta I)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.3})$$

A energia da forma de calor perdida para o isolamento foi desprezível, portanto:

$$\delta P \approx \delta q_{total} \quad (\text{B.4})$$

## B.2 - Incerteza da Resistência Térmica Total Experimental

A resistência térmica total experimental é dada pela razão entre a diferença das temperaturas médias no evaporador e condensador do tubo de calor e a potência inserida nas resistências elétricas. Considerando-se que as perdas térmicas na região do evaporador são desprezíveis e toda energia é transferida para a parede do tubo de calor, a resistência térmica global experimental é estimada da seguinte forma:

$$R_{total} = \frac{T_{med, evap} - T_{med, cond}}{q_{total}} \quad (B.5)$$

A incerteza de medição da resistência térmica equivalente é calculada da seguinte forma:

$$\delta R_{total} = \left[ \left( \frac{\partial R_{total}}{\partial T_{med, evap}} \delta T_{med, evap} \right)^2 + \left( \frac{\partial R_{total}}{\partial T_{med, cond}} \delta T_{med, cond} \right)^2 + \left( \frac{\partial R_{total}}{\partial q_{total}} \delta q_{total} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.6)$$

logo,

$$\delta R_{total} = \left[ \left( \frac{1}{q_{total}} \delta T_{med, evap} \right)^2 + \left( \frac{1}{q_{total}} \delta T_{med, cond} \right)^2 + \left( \frac{T_{med, evap} - T_{med, cond}}{q_{total}^2} \delta q_{total} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (B.7)$$

## B.3 - Incerteza das Temperaturas

No presente Trabalho, termopares do Tipo K (cromel-alumel) foram utilizados. Sabe-se que a repetitividade deste instrumento é 2,2 °C ou 0,75% do valor da leitura. Dessa forma, os valores das incertezas relacionadas ao erro sistemático dos sensores de temperatura foram verificados:

$$\delta T_{média, evap} = \delta T_{média, cond} = \delta T_{amb} = (2,2^2)^{1/2} = 2,2^\circ\text{C} \quad (B.8)$$