

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME ANTONIO BARTMEYER**

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA  
CAPILAR POR SINTERIZAÇÃO DE PÓ DE COBRE PARA  
APLICAÇÃO EM TUBOS DE CALOR**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2018**

**GUILHERME ANTONIO BARTMEYER**

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA  
CAPILAR POR SINTERIZAÇÃO DE PÓ DE COBRE PARA  
APLICAÇÃO EM TUBOS DE CALOR**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel do curso de  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná Câmpus  
Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves  
Coorientador: Prof. Dr. Davi Fusão

**PONTA GROSSA**

**2018**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Câmpus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação Profissional  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Bacharelado em Engenharia Mecânica



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UMA ESTRUTURA CAPILAR POR  
SINTERIZAÇÃO DE PÓ DE COBRÉ PARA APLICAÇÃO EM TUBOS DE CALOR**

por

**GUILHERME ANTONIO BARTMEYER**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 7 de dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel 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. Thiago Antonini Alves**  
Orientador

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz**  
Membro Titular

**Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**  
Coordenador do Curso

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os meus familiares pela compreensão, pois em muitos momentos estive ausente.

Ao meu orientado Prof. Dr. Thiago Antonini Alves, que me guiou na realização deste trabalho e muitos outros.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Davi Fusão, por compartilhar seu conhecimento e experiência.

A Larissa Krambeck, pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Mestre Robson Couto, pela solicitude.

Agradeço também a todos que trabalharam no LabCT/UTFPR-PG e LabMPEE/UTFPR-PG pelo apoio, amizade e colaboração.

Agradeço ao Laboratório de Caracterização de Materiais da UTFPR-PG por disponibilizar o Microscópio Eletrônico de Varredura e o Forno tubular de atmosfera controlada.

Agradeço ao Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (LIMAC/UEPG) por ceder o Espectrômetro *Shimadzu*<sup>TM</sup> EDX-7000 e Granulômetro *Cilas*<sup>TM</sup>.

Agradeço o EDITAL 1/2018 - PROGRAD/PROREC - APOIO À EXECUÇÃO DE TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC, que permitiu a compra da chapa aquecedora utilizada no presente Trabalho de Conclusão de Curso.

## RESUMO

BARTMEYER, Guilherme Antonio. **Fabricação e caracterização de uma estrutura capilar por sinterização de pó de cobre para aplicação em tubos de calor.** 2018. **77 páginas.** Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Neste trabalho foi discutida e estudada a confecção de estruturas porosas a partir de pó metálico de cobre, pelo processo de sinterização, com o intuito de prever sua aplicabilidade como estrutura capilar em tubos de calor. Esta estrutura é a responsável pelo bombeamento capilar do fluido de trabalho no interior dos dispositivos passivos de transferência de calor. Este estudo experimental compreendeu a análise da matéria prima, processo de obtenção da estrutura porosa, confecção de bancadas experimentais e os resultados de seus respectivos ensaios (permeabilidade, porosidade, raio crítico e condutividade térmica). O pó de cobre foi analisado utilizando *Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (ED-XRF) Shimadzu™ EDX-7000*, por Granulometria por Difração a Laser em um Granulômetro *Cilas™* e por Microscopia Eletrônica de Varredura em um MEV *Tescan™ VEGA3*. A estrutura capilar foi sinterizada em um forno tubular horizontal *Inti™ FT-1200* com atmosfera controlada composta por 95% de Argônio e 5% de hidrogênio. A porosidade da estrutura sinterizada foi avaliada pelo Método de Arquimedes, baseado na norma *MPIF Standard 42 (Denomination of density of Compacte dor Sintered Powder Metarlugy Products)*, e pelo Método da Picnometria a Hélio. Foi confeccionado uma bancada experimental para levantamento das propriedades de permeabilidade e raio crítico, baseada na norma *Norma MPIF Standard 39 (Determination of Properties of Sintered Bronze P/M Filter Powders)*, e uma bancada experimental para avaliação da condutividade térmica baseada na norma *NBR 15220 Parte 04 (Desempenho térmico de edificações – Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida)*. Testes experimentais térmicos realizados com tubos de calor sinterizados mostraram que a estrutura capilar funcionou satisfatoriamente, viabilizando a utilização de pó sinterizado como meio capilar para Tubos de Calor.

**Palavras-chave:** Sinterização. Metalurgia do pó. Estrutura Capilar. Tubos de calor.

## ABSTRACT

BARTMEYER, Guilherme Antonio. **Manufacture and characterization of a capillary structure by sintering copper powder for application in heat pipes.** 2018. 77 sheets. Bachelor's Degree in Mechanical Engineering - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

In this work, the preparation of porous structures from copper metal powder by the sintering process was discussed and studied, in order to predict its applicability as a capillary structure in heat pipes. This structure is responsible for the capillary pumping of the working fluid inside the passive heat transfer devices. This experimental study comprised the analysis of the raw material, the process of obtaining the porous structure, the preparation of experimental benches and the results of their respective tests (permeability, porosity, critical radius and thermal conductivity). Copper powder was analyzed using Shimadzu™ EDX-7000 Energy Dispersion X-Ray Fluorescence Spectrometry (ED-XRF), by Laser Diffraction Granulometry on a Cilas™ Granulometer and by Scanning Electron Microscopy in a VEGA3 Tescan™. The capillary structure was sintered in an Inti™ FT-1200 horizontal tubular oven with a controlled atmosphere composed of 95% Argon and 5% Hydrogen. The porosity of the sintered structure was evaluated by the Archimedes Method, based on the MPIF Standard 42 (Denomination of density of Compactor Sintered Powder Metallic Products), and the Helium Pycnometry. An experimental bench was developed to survey the properties of permeability and critical radius, based on the MPIF Standard 39 (Determination of Properties of Sintered Bronze P / M Filter Powders), and an experimental bench for thermal conductivity evaluation, based on NBR 15220 Part 04 (Desempenho térmico de edificações – Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida). Thermal experimental tests of the sintered heat pipes showed that the capillary structure worked satisfactorily, making possible the use of sintered powder as a capillary structure for Heat Pipes.

**Keywords:** Sintering. Powder metallurgy. Capillary structure. Heat pipes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento de um tubo de calor.....	16
Figura 2 - Faixa de temperatura de operação para fluidos de trabalho comumente utilizados. ....	17
Figura 3 - Molhabilidade de um fluido em uma superfície. ....	18
Figura 4 - Diferentes meios capilares.....	19
Figura 5 - Força capilar em tubos.....	21
Figura 6 - Empescoçamento entre partículas.....	24
Figura 7 - Coalescência de partículas por sinterização.....	25
Figura 8 - Estágios de sinterização. ....	26
Figura 9 - Curva de sinterização de meio poroso de cobre.....	27
Figura 10 - Resistência térmica para diferentes concentrações de nanofluidos de água com partículas de CuO, na inclinação de 45°. ....	29
Figura 11 - Esquema de funcionamento do Mini Tubos de Calor.....	30
Figura 12 - Localização dos Termopares no Mini Tubo de Calor.....	30
Figura 13 - Desempenho dos diferentes mini tubos de calor saturados.....	31
Figura 14 - Perfil das estruturas capilares sinterizadas em tubos de cobre. ....	32
Figura 15 - Resistência térmica em função da potência dissipada para os Tipos #1, #2 e #3 à 45°. ....	34
Figura 16 - Fluxograma experimental.....	35
Figura 17 - Curva de temperaturas de ciclo de sinterização. ....	39
Figura 18 - Fluxograma de funcionamento da bancada de Permeabilidade. ....	43
Figura 19 - Porta amostras.....	43
Figura 20 - Esquema de funcionamento do aparato de Condutividade Térmica.....	46
Figura 21 - Distribuição do tamanho de partículas do Pó Metálico de Cobre.....	50
Figura 22 - Posição dos Termopares no Tubo de Calor.....	56
Figura 23 - Resistência Térmica Equivalente de um tubo de calor com pó sinterizado e de uma barra sólida de cobre.....	56

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Poros em microestrutura sinterizada.....	19
Fotografia 2 - Vista transversal dos tubos de calor após o uso de nanofluido de CuO. .....	28
Fotografia 3 - Regiões do tubo de calor desenvolvido por Kumaresan et al. (2014). .....	28
Fotografia 4 - Inclinações de operação testadas em relação a horizontal.....	33
Fotografia 5 - Pó de cobre.....	36
Fotografia 6 - Equipamento para espectrometria a laser. ....	37
Fotografia 7 - Matrizes para sinterização. ....	38
Fotografia 8 - Preparação do Tubo de Calor para sinterização.....	38
Fotografia 9 - Forno de atmosfera controlada. ....	39
Fotografia 10 – Amostras sinterizadas para os ensaios.....	40
Fotografia 11 - Aparato de permeabilidade: visão geral.....	42
Fotografia 12 – Aparato de permeabilidade: visão aproximada. ....	42
Fotografia 13 - Aparato experimental.....	44
Fotografia 14 - Porta amostras.....	45
Fotografia 15 - Aparato para Método de Arquimedes. ....	47
Fotografia 16 - Imersão em água fervente. ....	48
Fotografia 17 - Balança de precisão.....	48
Fotografia 18 - Montagem para o o Método de Arquimedes. ....	49
Fotografia 19 - Equipamento para Picnometria a Hélio.....	49
Fotografia 20 - Microscopia Eletrônica de Varredura do Pó de Cobre. ....	51
Fotografia 21 - Microscopia Eletrônica de Varredura de uma das amostras sinterizadas. ....	52
Fotografia 22 - Teste experimental do Tubo de Calor na posição horizontal. ....	55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das estruturas capilares sinterizadas fabricadas.....	32
Tabela 2 - Resultados de Porosidade pelo Método de Arquimedes.....	52
Tabela 3 - Resultados de Porosidade pelo Método da Picnometria de Hélio.....	53
Tabela 4 - Resultados do Ensaio de Permeabilidade.....	53
Tabela 5 - Resultados de Raio Crítico.....	54
Tabela 6 - Resultados do Ensaio de Condutividade Térmica.....	54
Tabela 7 - Parâmetros do Tubo de Calor. ....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	Objetivo geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	TÓPICOS APRESENTADOS .....	13
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	TUBOS DE CALOR .....	15
2.1.1	Funcionamento de um Tubo de Calor.....	16
2.1.1.1	Invólucro.....	16
2.1.1.2	Fluido de Trabalho .....	17
2.1.1.3	Estrutura Porosa como Estrutura Capilar.....	18
2.1.1.4	Propriedades pertinentes da estrutura capilar.....	19
2.1.1.4.1	Porosidade.....	20
2.1.1.4.2	Capilaridade.....	20
2.1.1.4.3	Formato e tamanho de poro .....	21
2.1.1.4.4	Permeabilidade .....	22
2.1.1.4.5	Condutividade térmica .....	22
2.2	OBTENÇÃO DA ESTRUTURA POROSA POR SINTERIZAÇÃO DE PÓ METÁLICO.....	23
2.2.1	Força Motriz da Sinterização .....	24
2.2.2	Estágios de Sinterização .....	25
2.2.3	Ciclo de Sinterização .....	26
2.3	ALGUNS TRABALHOS DISPONÍVEIS NA LITERATURA.....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
3.1	LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES DO PÓ METÁLICO .....	36
3.2	SINTERIZAÇÃO DO PÓ DE COBRE .....	37
3.3	LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES DA ESTRUTURA SINTERIZADA	

3.3.1	Permeabilidade e Raio Crítico .....	41
3.3.2	Condutividade Térmica .....	44
3.3.3	Porosidade .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
4.1	Caracterização do Pó Metálico de Cobre.....	50
4.2	Caracterização da estrutura capilar .....	51
4.3	Porosidade .....	51
4.4	Permeabilidade e raio crítico.....	53
4.5	Condutividade Térmica .....	54
4.6	Testes preliminares do desempenho térmico do Tubo de Calor .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>57</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	58
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE A – Projeto Construtivo da Bancada de Permeabilidade e Raio Crítico</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE B - Projeto Construtivo da Bancada de Condutividade Térmica.....</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO A - Resultados da Análise de Distribuição Granulométrica por Difração a Laser do Pó de Cobre XF.....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Tubo de calor é um dispositivo passivo de transferência de calor, o qual está presente em nosso dia a dia, tendo diversas aplicações, sendo algumas delas o uso em eletroeletrônicos, aquecedores solares de água e painéis fotovoltaicos.

O tubo de calor possui elevada capacidade de transferir energia por meio de um pequeno gradiente de temperatura sem adição de energia (REAY *et al.*, 2014). Seu funcionamento é baseado no fenômeno de mudança de fase do fluido de trabalho, que ganha energia ao evaporar em um ponto e dissipa em outro, realizando assim a troca de calor, o que explica sua grande eficiência, uma vez que os coeficientes de transferência de calor associados aos fenômenos de condensação e ebulição são extremamente altos (KUMARESAN *et al.*, 2014).

Os tubos de calor normalmente funcionam com três regiões, o evaporador, a seção adiabática e o condensador. No evaporador o fluido de trabalho contido no tubo de calor evapora ao receber calor da fonte quente. Na seção adiabática, a qual pode não existir, o fluido de trabalho não realiza nenhuma troca térmica e está em trânsito. No condensador, o fluido de trabalho condensa ao perder calor para a fonte fria. O fluido de trabalho condensado deve retornar para o evaporador para que o ciclo continue; sendo assim, necessita-se da ação de uma estrutura capilar que realize o bombeamento deste fluido do condensador até o evaporador, permitindo a operação do tubo de calor em qualquer posição (KRAMBECK *et al.*, 2018).

A estrutura capilar é fundamental para a operação do tubo de calor, pois o bombeamento capilar permite o escoamento de líquido dentro do dispositivo de forma passiva. Suas propriedades influenciam diretamente na capacidade de bombeamento de fluido de trabalho e, conseqüentemente, da eficiência do dispositivo, havendo assim a necessidade de controle destas propriedades.

Um dos métodos de obtenção de estruturas capilares é o processo de sinterização, o qual utiliza como matéria prima o pó metálico. Neste processo, tanto as propriedades do pó quanto os parâmetros de operação do forno influenciam diretamente nas propriedades finais da estrutura capilar (GERMAN, 1994).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é a fabricação e caracterização de uma estrutura sinterizada a partir do pó metálico de cobre para aplicação em tubos de calor.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso são:

-Caracterizar o pó metálico

-Obter estrutura porosa por sinterização do pó metálico

-Projetar e construir bancadas experimentais para determinação das propriedades de permeabilidade, raio crítico, condutividade térmica de estrutura sinterizada.

-Determinar as propriedades de porosidade, permeabilidade, raio crítico, condutividade térmica de estrutura sinterizada.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Tubos de calor com estrutura capilar sinterizada são amplamente utilizados para transferência de calor, apresentando muitas vantagens quando comparados com outros dispositivos de transferência de calor. Sendo assim o melhor entendimento do mecanismo de transporte de fluido de trabalho por estrutura capilar, mecanismo de

grande impacto na eficiência de um tubo de calor, pode permitir o seu aperfeiçoamento deste dispositivo e expandir suas utilizações.

### 1.3 TÓPICOS APRESENTADOS

No presente Trabalho de Conclusão de Curso, os estudos realizados serão apresentados em seis capítulos, contendo também Anexos e Apêndices.

No capítulo 1, foi apresentada a introdução do trabalho, contextualizando tubos de calor no meio científico e industrial.

No capítulo 2, são apresentados os princípios físicos que regem o comportamento de tubos de calor, principais propriedades de uma estrutura capilar para a aplicação em tubos de calor e também do método de obtenção de estruturas sinterizadas. Neste capítulo as informações apresentadas provêm de estudos de autores com experiência e reconhecimento nos respectivos assuntos. Neste capítulo também são apresentados estudos que abordam os temas presentes neste Trabalho de Conclusão de Curso.

No capítulo 3, são apresentados todos os passos necessários para a reprodução experimental do presente Trabalho de Conclusão de Curso. Apresenta a matéria prima utilizada, a obtenção de suas propriedades, o processo de obtenção de amostras e seus parâmetros, confecção de bancadas experimentais para a avaliação de propriedades pertinentes de estruturas sinterizadas e a realização de testes experimentais para obtenção de propriedades das estruturas sinterizadas.

No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais obtidos pelos procedimentos apresentados no capítulo 3 (Metodologia). Os resultados são apresentados e discutidos, informando os valores das propriedades mensuradas anteriormente. Também são apresentados resultados de Krambeck (2018), que apresenta o funcionamento de um tubo de calor utilizando a mesma estrutura sinterizada apresentada neste estudo como meio capilar.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos estudos realizados neste trabalho de conclusão de curso e também são apresentadas sugestões para estudos mais aprofundados. Neste capítulo, a eficácia das bancadas experimentais confeccionadas é avaliada. Também é discutida a eficácia da utilização de estruturas sinterizadas como meio capilar em tubos de calor.

No capítulo 6, são apresentados os estudos consultados para a consolidação teórica do presente Trabalho de Conclusão de Curso.

Os últimos capítulos do presente trabalho têm como objetivos apresentar informações adicionais, que não foram aplicadas de forma integral no corpo do trabalho. São estes os Apêndices A e B e Anexo A. Os apêndices apresentam os projetos construtivos das bancadas experimentais e o anexo apresenta os resultados completos da avaliação de distribuição do pó de cobre.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo é abordado o princípio de funcionamento dos tubos de calor, seus principais componentes, as propriedades mais impactantes de cada um no funcionamento de um tubo de calor. Além disso, é apresentada uma explicação sobre o processo de sinterização e uma revisão da literatura associada ao desenvolvimento de tubos de calor com pó sinterizado, auxiliando a compreensão dos estudos realizados nesta área.

### 2.1 TUBOS DE CALOR

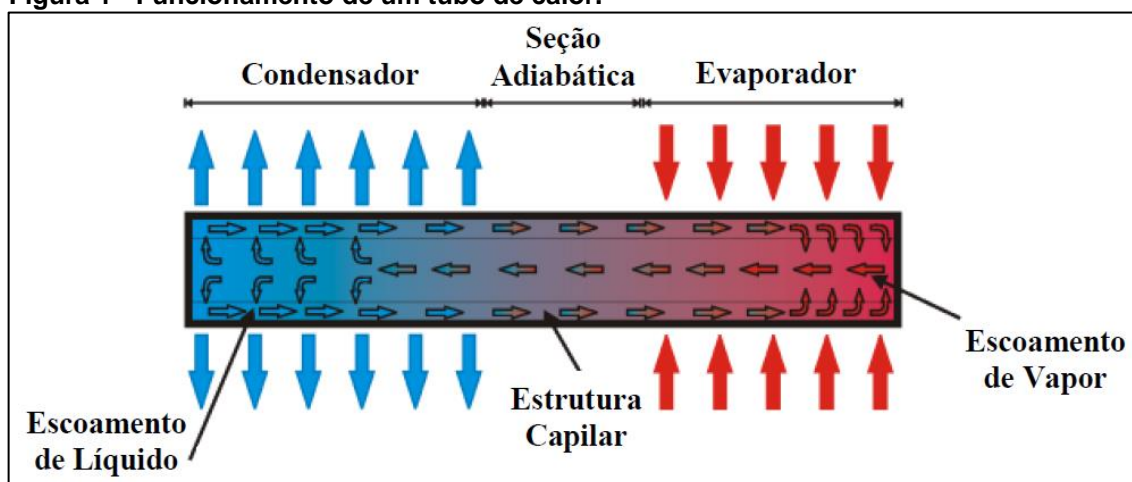
Tubos de calor possuem grande capacidade de transferência de calor em diversas posições de trabalho, fato possível devido ao bombeamento capilar (REAY *et al.*, 2014). A compreensão dos componentes de um tubo de calor e suas propriedades é importante para a análise de seu desempenho térmico.

O tubo de calor é composto, basicamente, por três componentes: invólucro, fluido de trabalho e estrutura capilar. O invólucro contém o fluido de trabalho e estrutura capilar, o fluido de trabalho realiza a troca de energia pela mudança de fase e a estrutura capilar realiza o bombeamento do fluido de trabalho na forma líquida do condensador ao evaporador (FAGHRI, 2014; REAY *et al.*, 2014). A Figura 1 apresenta de forma esquemática um tubo de calor.

O fato de a troca de calor ser realizada pela troca de fases permite grande troca de energia com pequenas variações de temperatura e com pequenas seções, sendo usados até mesmo dentro de celulares (REAY *et al.*, 2014).



Figura 1 - Funcionamento de um tubo de calor.



Fonte: Krambeck *et al.*, 2018.

### 2.1.1 Funcionamento de um Tubo de Calor

Em um tubo de calor a transferência de calor se dá da região do evaporador para a do condensador, passando pela região adiabática. Diferenças de pressão e massa específica fazem com que o fluido de trabalho vaporizado se mova do evaporador para o condensador, trocando de fase. O fluido de trabalho, agora na forma líquida, é levado novamente até o evaporador por bombeamento capilar, possível pela estrutura capilar presente nas paredes do tubo, fechando o ciclo de operação (REAY *et al.*, 2014).

#### 2.1.1.1 Invólucro

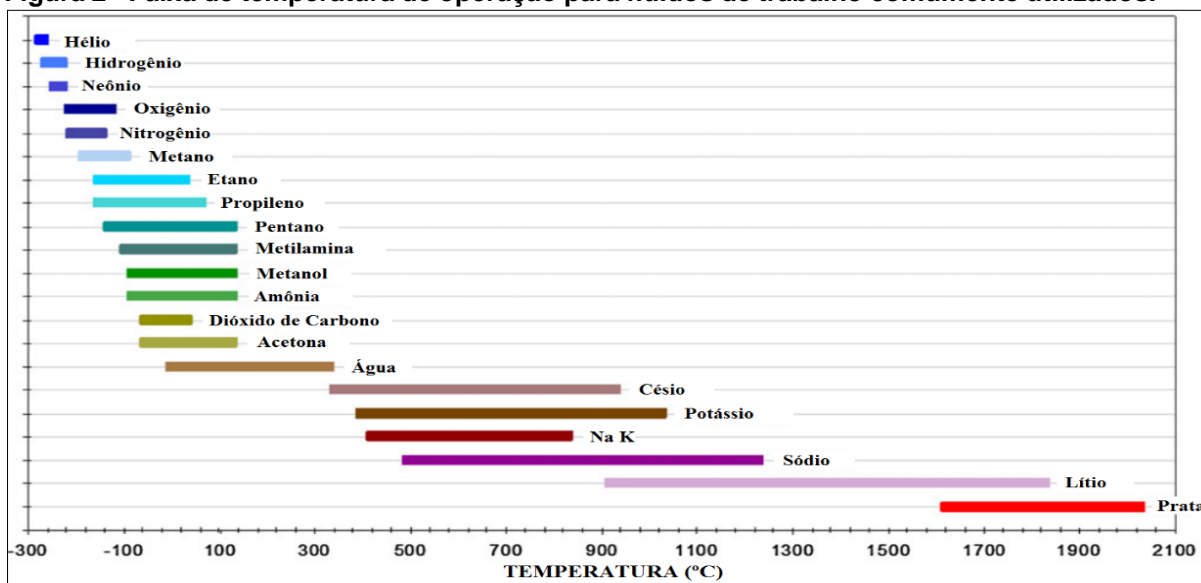
A função do invólucro é conter o fluido de trabalho e a estrutura capilar. Embora não atue ativamente na transferência de calor, ele permite a troca térmica também por condução da região quente até a região fria (FAGHRI, 2014). Ele deve ser compatível química e mecanicamente com o fluido de trabalho e a estrutura capilar.

### 2.1.1.2 Fluido de Trabalho

Tendo como função a mudança de fases, o fluido de trabalho deve se encontrar no estado líquido no evaporador e no estado gasoso no condensador. Diferentes fluidos de trabalho e razões de preenchimento permitem que o tubo de calor trabalhe com diferentes eficiências em diferentes faixas de operação, devido à variação de propriedades do fluido submetido a pressões (FAGHRI, 2014). A Figura 2 apresenta os fluidos de trabalho mais indicados para cada faixa de temperaturas de operação.

Dentre as propriedades pertinentes de um fluido de trabalho, destacam-se: boa estabilidade térmica, boa molhabilidade com os materiais que compõe o tubo de calor, pressão de vapor compatível com a temperatura de trabalho, alto calor latente, alta condutividade térmica, baixa viscosidade nas formas líquidas e de vapor e uma alta tensão superficial (WALLIN, 2012).

**Figura 2 - Faixa de temperatura de operação para fluidos de trabalho comumente utilizados.**



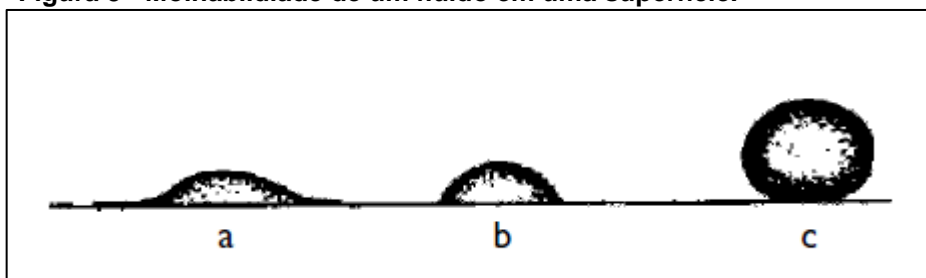
Fonte: Yang *et al.* apud Nishida (2016).

Diferenças de pressão e massa específica permitem a chegada do fluido de trabalho no estado gasoso ao condensador, e a sua interação, após perda de energia para a fonte fria, com a estrutura capilar permite a chegada do fluido de trabalho no estado líquido ao evaporador. Devido a este fato, propriedades relacionadas a

interação fluido estrutura capilar tem grande impacto no funcionamento dos tubos de calor (REAY *et al.*, 2014).

A tensão superficial de um líquido faz com que este tenda a possuir a menor área de interface, e quando este se encontra em contato com uma superfície, a atratividade entre as duas define a molhabilidade do líquido nesta superfície. Os casos (a), (b) e (c), da Figura 3, representam uma alta molhabilidade, média molhabilidade e nenhuma molhabilidade, respectivamente (REAY *et al.*, 2014). Esta relação de molhabilidade entre o fluido e a estrutura capilar interfere nas forças capilares necessárias para o bombeamento capilar eficiente e, conseqüentemente, no funcionamento adequado do tubo de calor.

**Figura 3 - Molhabilidade de um fluido em uma superfície.**



Fonte: Reay *et al.*, 2014.

#### 2.1.1.3 Estrutura Porosa como Estrutura Capilar

A estrutura capilar é localizada aderida na parte interna do invólucro, como apresentado na Figura 4. Sua função dentro do tubo de calor é bombear por capilaridade o fluido de trabalho, no estado líquido, do condensador para o evaporador (JIANG *et al.*, 2014).

As principais estruturas capilares utilizadas em tubos de calor também são apresentadas na Figura 4, sendo elas tela metálica, ranhuras e pó sinterizado.

**Figura 4 - Diferentes meios capilares.**



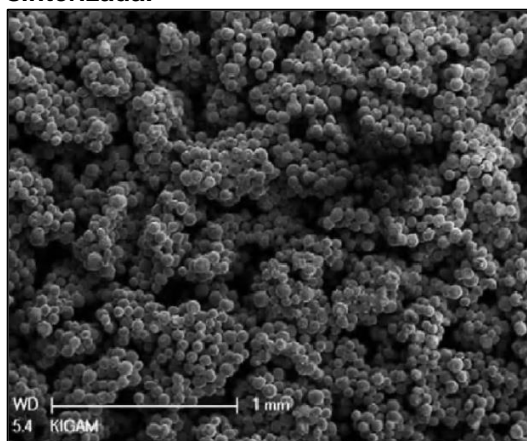
Fonte: Celsia (2018).

#### 2.1.1.4 Propriedades pertinentes da estrutura capilar

Uma estrutura porosa consiste de um material que contém vazios, os poros (GERMAN,1994). Para a utilização como estrutura capilar para tubos de calor, algumas das propriedades da estrutura porosa tem maior impacto no desempenho de um tubo de calor, entre elas: porosidade, capilaridade, tamanho e forma de poro, permeabilidade e condutividade térmica (FAGHRI, 2014).

A Fotografia 1 apresenta a Microscopia Eletrônica de Varredura de uma estrutura sinterizada, nela pode-se observar os poros.

**Fotografia 1 - Poros em microestrutura sinterizada.**



Fonte: Reay *et al*, 2014.

#### 2.1.1.4.1 Porosidade

A fração de vazios em uma estrutura porosa é determinada porosidade. Esta propriedade representa de forma grosseira o preenchimento da estrutura porosa. A porosidade existe de forma aberta e de forma fechada. Porosidade aberta é a que permite propriedades como permeabilidade e filtração, pois os poros estão abertos permitindo o fluxo de fluido de um poro para o outro. Porosidade fechada não permite o fluxo de fluidos, impossibilitando permeabilidade e filtração, já que os poros não possuem passagem de um para o outro. A porosidade fechada pode ser obtida em apenas alguns testes, como a Picnometria a Hélio (GERMAN, 1994).

A determinação da porosidade pode ser realizada pela razão de volumes, o que pode se tornar difícil em casos onde a estrutura porosa possui forma complexa. Quando a estrutura porosa possui uma forma complexa, métodos como a razão de vazios em uma metalografia ótica, Picnometria a Hélio e Técnica de Arquimedes podem ser efetuados (GERMAN, 1994).

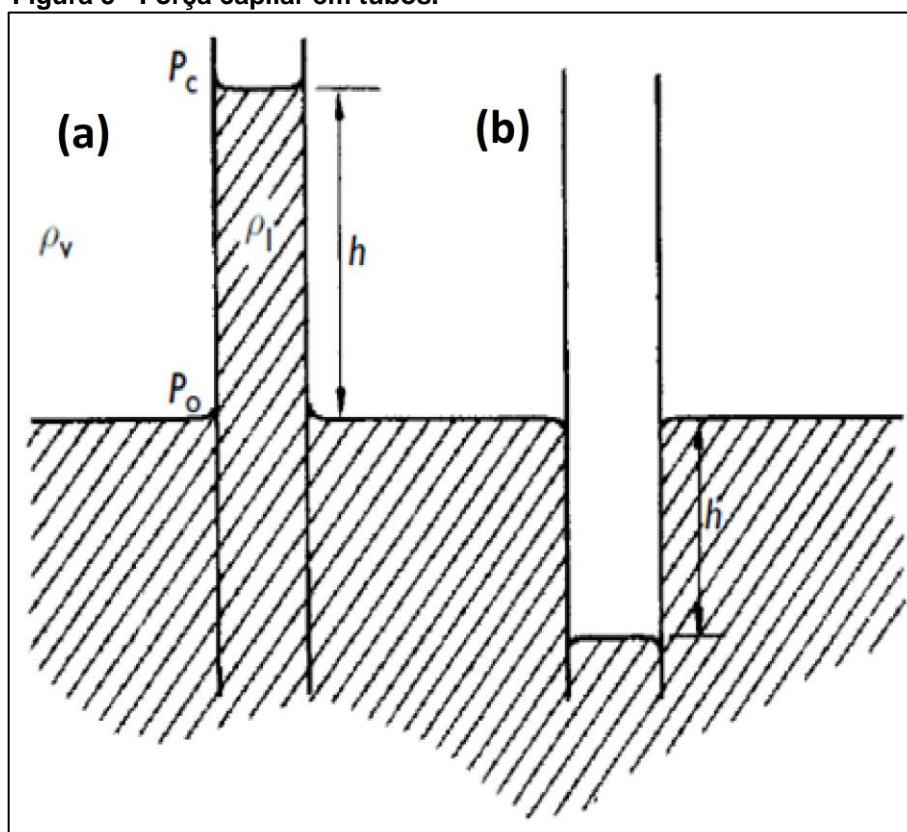
A Técnica de Arquimedes compara o peso da estrutura seca ( $W_1$ ), o peso da amostra molhada ( $W_2$ ) e o peso da amostra imersa em água ( $W_3$ ) para obter a porosidade  $\rho$  da amostra como mostrado Equação (1) (GERMAN, 1994):

$$\rho = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} * 100 \quad (1)$$

#### 2.1.1.4.2 Capilaridade

A capilaridade é determinada pelo tamanho de poro e a compatibilidade entre o material da estrutura porosa e o fluido de trabalho. Representa a molhabilidade da estrutura quando em contato com um fluido, estando relacionada com a força de bombeamento do fluido de trabalho em aplicações em tubos de calor (GERMAN, 1994). A Figura 5 apresenta a ação capilar de um fluido quando em contato com uma estrutura com que possui afinidade (a), molhando a estrutura, e outra com que não possui afinidade (b).

Figura 5 - Força capilar em tubos.



Fonte: Reay et al., 2014.

#### 2.1.1.4.3 Formato e tamanho de poro

Porosidade é uma forma incompleta de determinação da estrutura porosa por não considerar formato, tamanho e conexões entre os poros. A avaliação do formato e tamanho de poro pode ser determinada por uma Metalografia Ótica, Teste de Ponto de Bolha ou Porosimetria de Mercúrio também podem ser utilizados. A Metalografia Ótica permite a visualização da estrutura e avaliação de suas dimensões, Teste ponto de Bolha auxilia na determinação do raio crítico da estrutura enquanto a Porosimetria de Mercúrio na determinação da distribuição de poros abertos ao longo da estrutura porosa (GERMAN, 1994).

O raio crítico da estrutura porosa permite uma classificação mais aprofundada dos poros. Tal propriedade relaciona a pressão necessária para ocasionar o surgimento de bolhas em uma amostra embebida por um líquido conhecido. A Equação (2), obtida da Norma MPIF *Standard* 39, apresenta a relação entre a tensão

superficial do líquido  $\sigma$  [N/m], o ângulo de contato do líquido com o poro  $\theta$ , a pressão de nucleação da primeira bolha  $p$  [Pa], a massa específica do líquido  $\rho_l$  [kg/m<sup>3</sup>], a aceleração da gravidade  $g$  [m/s<sup>2</sup>] e a altura do filme de líquido depositado na amostra  $h$  [m] para a determinação do raio crítico  $r_c$  [m].

$$r_c = 2 \frac{\sigma \cos \theta}{p - \rho_l g h} \quad (2)$$

#### 2.1.1.4.4 Permeabilidade

A resistência que uma estrutura porosa apresenta para um determinado escoamento de fluido passando por ela determina a permeabilidade da mesma. O coeficiente de permeabilidade é comumente calculado utilizando a Lei de *Darcy* (Equação 3), que relaciona a perda de carga em um escoamento de fluido conhecido que passa por uma estrutura porosa com sua permeabilidade, levando em consideração as dimensões da estrutura e as propriedades do fluido, onde  $Q$  é o escoamento,  $A$  é a área da seção por onde o fluxo ocorre,  $t$  é a espessura da estrutura,  $n$  é a viscosidade do fluido,  $P_1$  e  $P_2$  são as pressões de entrada e saída da amostra, respectivamente, e  $\alpha$  é o coeficiente de permeabilidade. Para casos em que o escoamento pela estrutura porosa é muito alto, a Lei de *Darcy* pode não se mostrar tão eficaz, sendo necessário levar em consideração a velocidade do escoamento (GERMAN, 1994).

$$Q = \frac{\alpha A}{nt} + \frac{P_1^2 - P_2^2}{2P_2} \quad (3)$$

#### 2.1.1.4.5 Condutividade térmica

Devido à descontinuidade estrutural causada pela presença de vazios, a condutividade térmica da estrutura porosa diminui significativamente quando comparada com a da matéria prima compactada. A presença de fluidos nos poros aumenta a condutividade térmica do conjunto quando em temperaturas elevadas.

Correlações permitem a estimativa desta propriedade levando em conta porosidade e sensibilidade estrutural (GERMAN, 1994).

A condutividade térmica de um sólido pode ser avaliada pela Lei de *Fourier* (Equação 4):

$$Q = \frac{A \times K \times \Delta T}{L} \quad (4)$$

Sendo que  $A$  representa a área da seção do sólido,  $K$  representa a condutividade térmica do material,  $\Delta T$  representa a diferença de temperatura nas faces do material,  $L$  representa a espessura do material e  $Q$  o fluxo de calor que transpassa o material.

Maiores informações sobre valores da condutividade térmica podem ser obtidas em Krambeck (2018).

## 2.2 OBTENÇÃO DA ESTRUTURA POROSA POR SINTERIZAÇÃO DE PÓ METÁLICO

O processo de metalurgia do pó consiste na produção de estruturas a partir de partículas metálicas no estado de pó. Um acumulado de pó, prensado ou não, é exposto à altas temperaturas, causando a coalescência entre as partículas que o compõe e consolidando sua forma (CHIAVERINI, 1986).

A obtenção de materiais porosos por metalurgia do pó permite a obtenção de uma estrutura de propriedades controladas, pois controlar o processo de sinterização permite a obtenção precisa de propriedades pertinentes (CHIAVERINI, 1986).

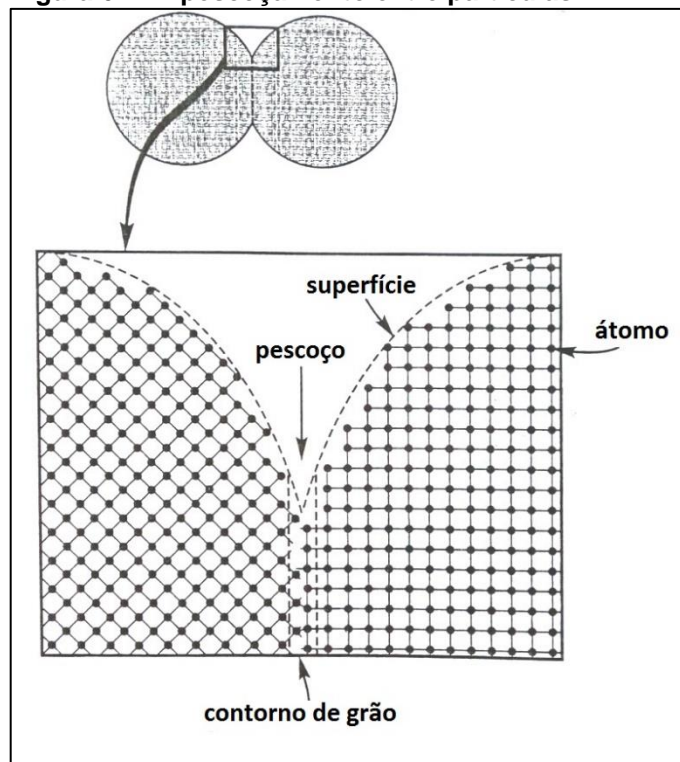


### 2.2.1 Força Motriz da Sinterização

O fenômeno de coalescência das partículas de pó se dá pela diminuição da energia livre do sistema, uma tendência natural ao estado de menor energia. A diminuição da energia livre ocorre pela diminuição das interfaces ou superfícies livres, eliminação de defeitos de rede e eliminação de potencial químico (SOUZA, 2006).

A difusão atômica permite a diminuição da energia superficial do pó pela formação e crescimento de pescoços, ligações entre as partículas de pó que diminuem a área superficial das mesmas. A difusão auxilia na reordenação dos átomos na estrutura cristalina, diminuindo defeitos de rede pré-existentes, como é mostrado na Figura 6.

**Figura 6 - Empescoçamento entre partículas.**

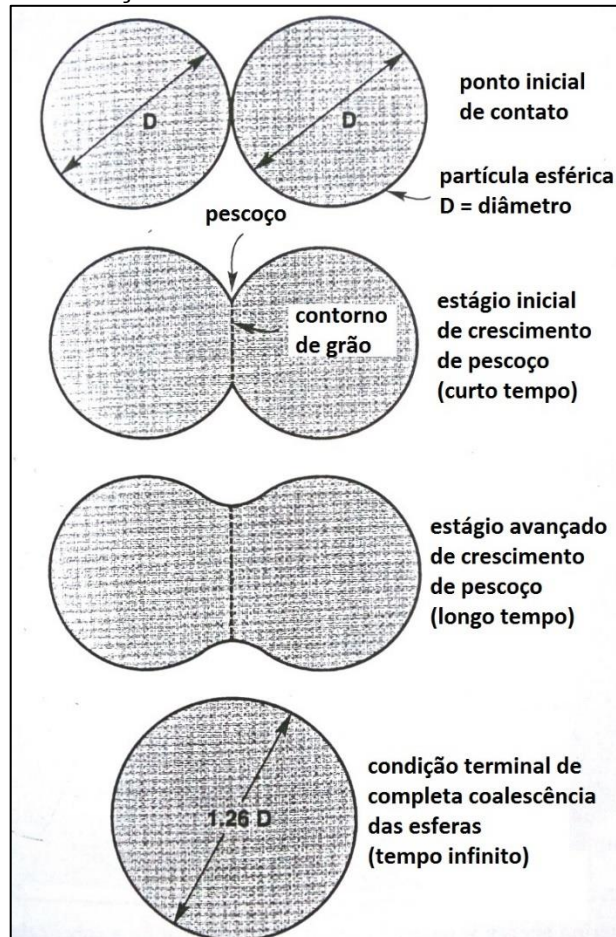


Fonte: Adaptado de German, 1994.

Onde existe contato entre partículas, as fronteiras de grão de cada uma se unem para diminuir a interface sólido-vapor, criando um pescoço, processo que tende à ligação completa das partículas como uma nova esfera, como é mostrado na Figura

7. A diminuição da área total e a formação dos empescoçamentos resultam na densificação da estrutura ao longo do processo de sinterização, levando ao encolhimento da mesma (GERMAN, 1994).

**Figura 7 - Coalescência de partículas por sinterização.**



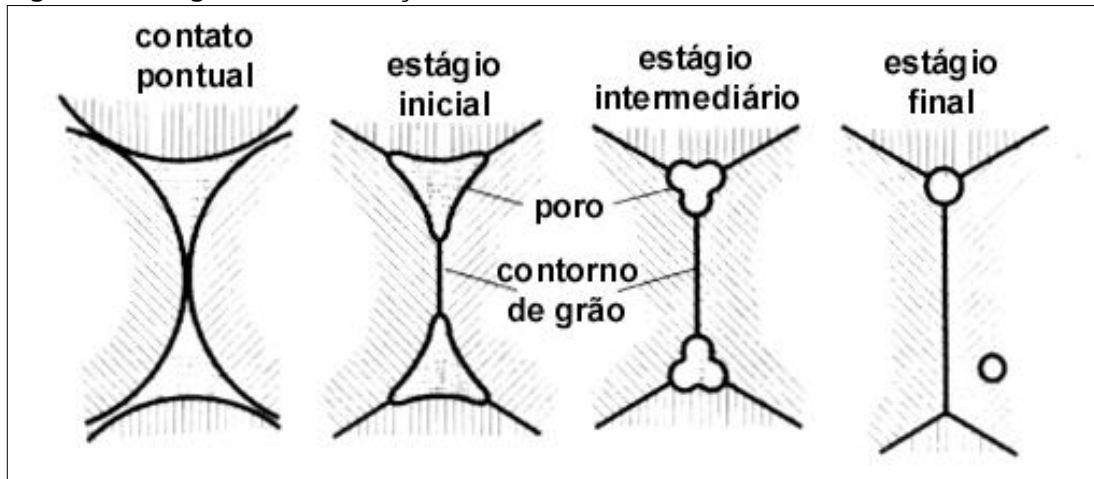
Fonte: Adaptado de German, 1994.

### 2.2.2 Estágios de Sinterização

A sinterização do pó consiste de estágios, sendo eles a formação de pescoços, crescimento dos pescoços, diminuição do tamanho de poros e fechamento dos mesmos os tornando isolados e densificação da estrutura, como apresentado na Figura 8. Parâmetros como temperatura e tempo de aquecimento influenciam para a aceleração do processo. Quanto maior a temperatura, maior a facilidade de difusão

dos átomos, já quanto maior o tempo de exposição à alta temperatura, maiores os efeitos da difusão (GERMAN, 1994).

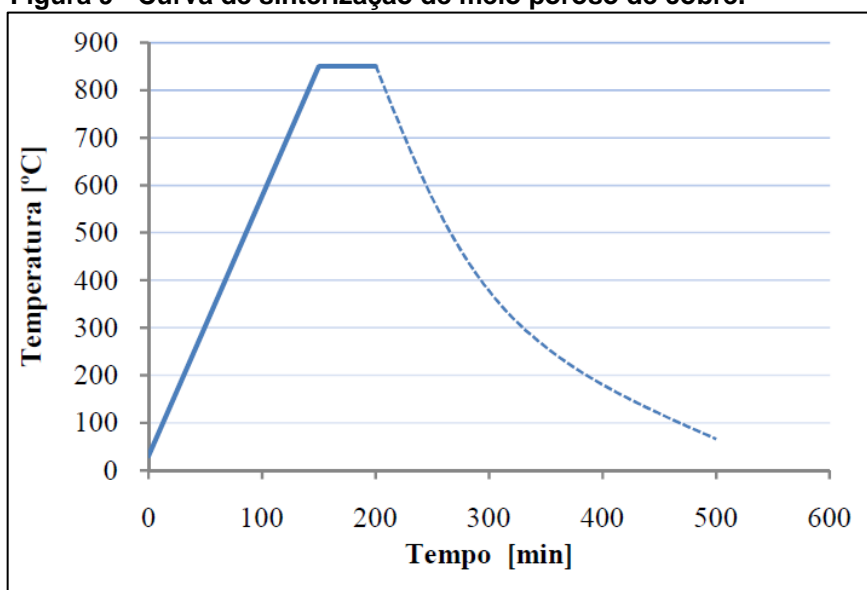
**Figura 8 - Estágios de sinterização.**



**Fonte:** Adaptado de German (1994).

### 2.2.3 Ciclo de Sinterização

A sinterização ocorre com o aquecimento controlado do pó, permanência na temperatura máxima de sinterização por tempo controlado e resfriamento, respectivamente (Figura 9). O aquecimento é realizado em forma de rampa, com o aumento gradual da temperatura. Isto permite o aquecimento gradual de todas as partículas com um menor gradiente de temperaturas. Ao chegar na temperatura de sinterização, a permanência por tempo controlado permite controlar o avanço dos estágios de sinterização até o ponto desejado, controlando as propriedades finais da estrutura (GERMAN, 1994).

**Figura 9 - Curva de sinterização de meio poroso de cobre.**

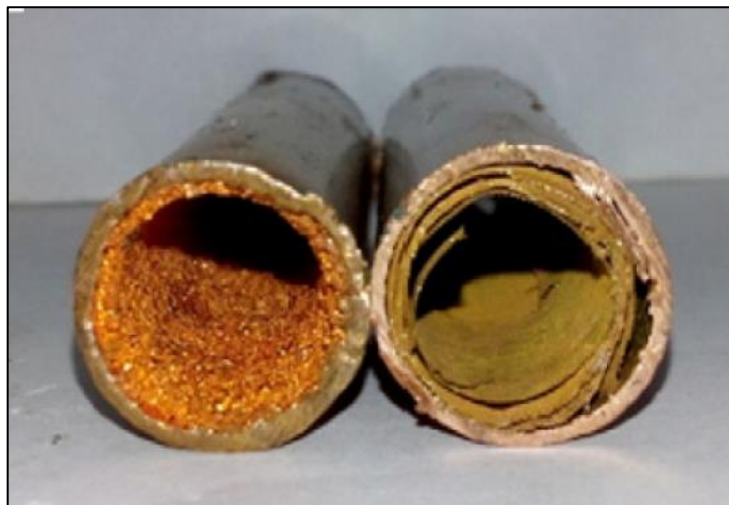
Fonte: Mera, 2011.

### 2.3 ALGUNS TRABALHOS DISPONÍVEIS NA LITERATURA

Nesta seção serão apresentados estudos realizados por outros autores que têm aderência ao tema abordado no presente Trabalho de Conclusão de Curso. Serão apresentadas de forma breve as características de cada estudo, seus resultados e conclusões.

Kumaresan *et al.* (2014) estudaram o desempenho de tubos de calor utilizando duas estruturas capilares distintas preenchidos com nanofluido de CuO. As estruturas capilares utilizadas foram as de tela metálica e pó sinterizado, como mostrado na Fotografia 2. Os parâmetros variados durante os experimentos foram fluido de trabalho, ângulo de inclinação e potência de entrada. Ao todo, oito tubos de calor foram testados, sendo que quatro utilizavam tela metálica e quatro de pó sinterizado como estrutura capilar. As estruturas capilares mantiveram as mesmas espessuras. Para cada tipo de estrutura capilar, um tubo foi preenchido com água deionizada e três com nanofluidos de CuO (KUMARESAN *et al.* 2014).

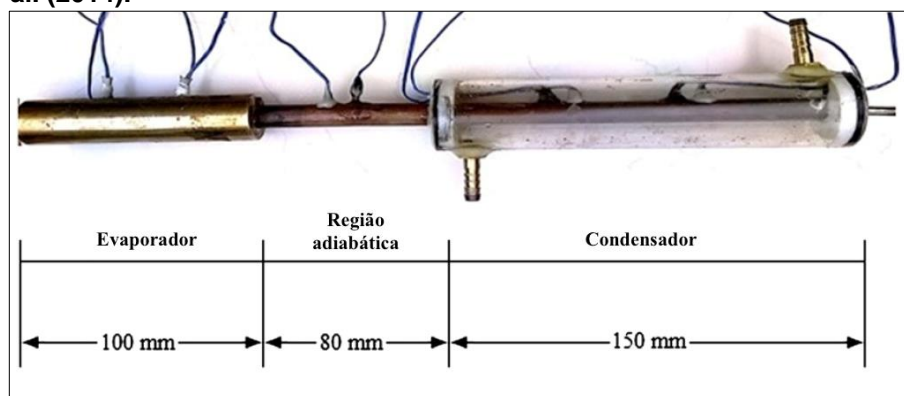
**Fotografia 2 - Vista transversal dos tubos de calor após o uso de nanofluido de CuO.**



Fonte: Kumaresan *et al.* (2014).

O aquecimento ocorreu por meio de uma resistência elétrica e o arrefecimento por meio de convecção forçada de água, como pode ser observado na Fotografia 3.

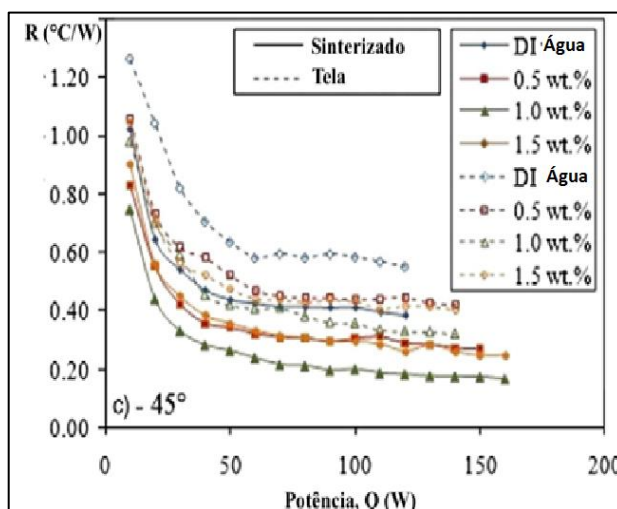
**Fotografia 3 - Regiões do tubo de calor desenvolvido por Kumaresan et al. (2014).**



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

As tomadas de temperatura foram realizadas na superfície dos tubos de calor. A Figura 10 apresenta os resultados de resistência térmica obtida para os oito tubos de calor, ensaiados na posição de 45°.

**Figura 10 - Resistência térmica para diferentes concentrações de nanofluidos de água com partículas de CuO, na inclinação de 45°.**



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

Dentre outros, Kumaresan *et al.* (2014) concluem que a melhor eficiência dos tubos de calor se deu com ângulo de inclinação de 45° e 60°, que os tubos de calor com pó sinterizado apresentaram menor resistência térmica quando comparados com os de tela metálica e que a presença de nanopartículas no fluido de trabalho aumenta e reduz a resistência térmica dos tubos de calor de forma considerável.

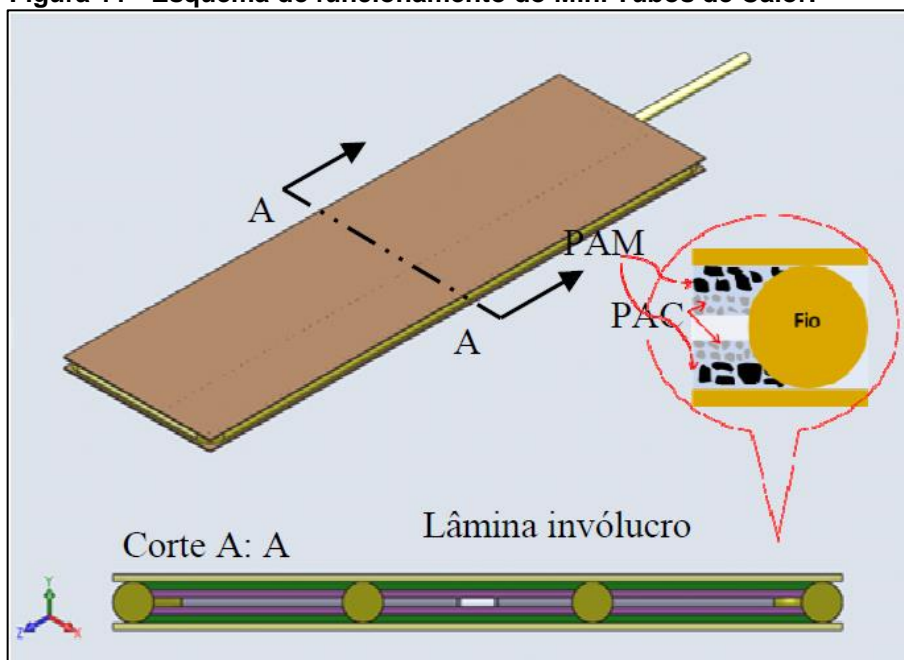
Mera (2011) realizou a confecção de mini tubos de calor com múltiplas camadas de pó de cobre sinterizado para avaliar seu comportamento.

Em sua tese de mestrado, o autor avaliou as propriedades do pó de cobre pelo método de Difração *Fraunhofer*. A porosidade das amostras foi avaliada pelo Método de Arquimedes e técnica de análise de imagens através do software *Imago*®. O raio crítico da estrutura porosa foi calculado utilizando *Young-Laplace* em função da pressão para a qual se forma uma bolha de gás no extremo oposto onde este gás é injetado. A condutividade térmica da amostra sinterizada foi avaliada por meio de bancada experimental baseado no método comparativo (ASTM E1225) que trabalha no vácuo. A permeabilidade da estrutura sinterizada foi avaliada utilizando amostras de formato cilíndrico. Um escoamento de ar era forçado pelas amostras e a Lei de *Darcy* foi aplicada.

A sinterização ocorreu consolidando a criação de combinações de camadas de dois diferentes pós de cobre e amostras de camada única, com geometria plana.

O esquema construtivo dos mini tubos pode ser observado na Figura 11, mostrando que a camada de pó mais grosso foi depositada perto do invólucro e a de pó mais fino em seu interior. Pequenos fios foram utilizados para dar suporte mecânico às paredes do mini tubo de calor.

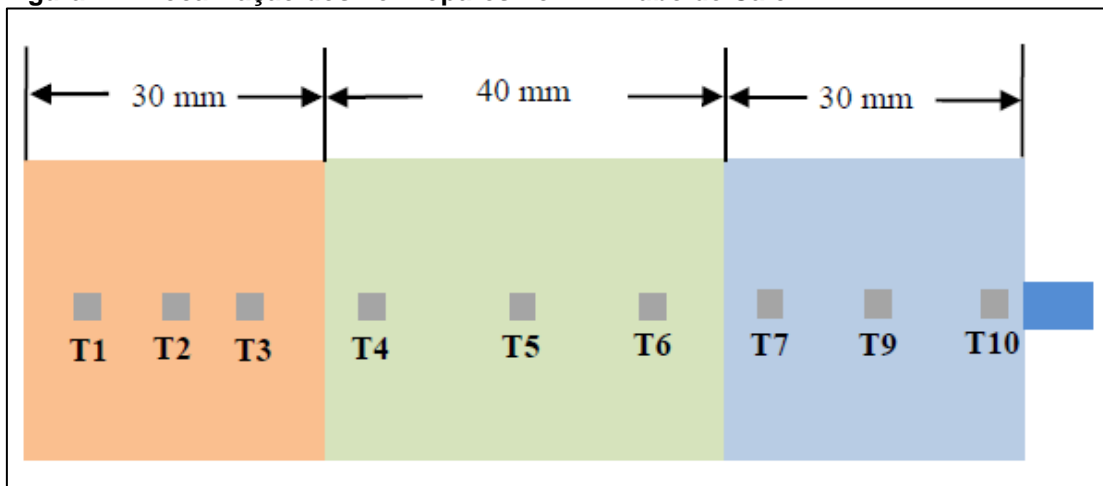
**Figura 11 - Esquema de funcionamento do Mini Tubos de Calor.**



Fonte: Mera (2011).

Para a medição de temperatura foram empregados termopares do tipo T posicionados em todas as zonas do tubo, conforme apresentado na Figura 12.

**Figura 12 - Localização dos Termopares no Mini Tubo de Calor.**

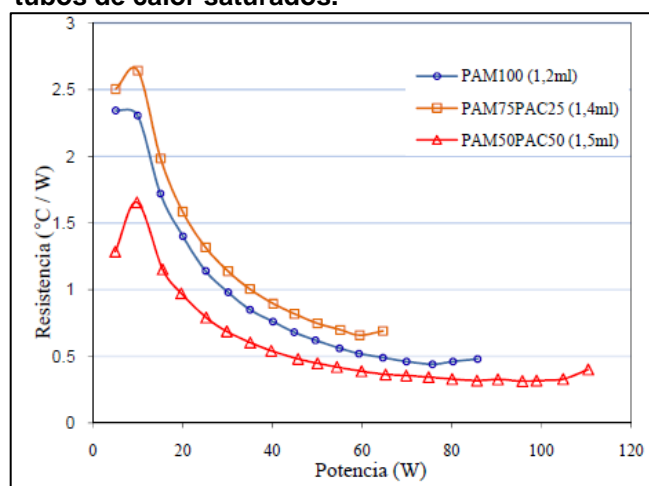


Fonte: Mera (2011)

A potência para o aquecimento da região do evaporador foi fornecida por resistências elétricas e o resfriamento da região do condensador foi realizado utilizando um banho termostático. Os mini tubos de calor foram testados com diferentes volumes de fluido de trabalho, variando de 0,8 ml até 1,5 ml de água destilada.

Na Figura 13 pode ser observado o desempenho térmico dos diferentes mini tubos de calor preenchidos com fluido suficiente para saturar suas estruturas capilares.

**Figura 13 - Desempenho dos diferentes mini tubos de calor saturados.**



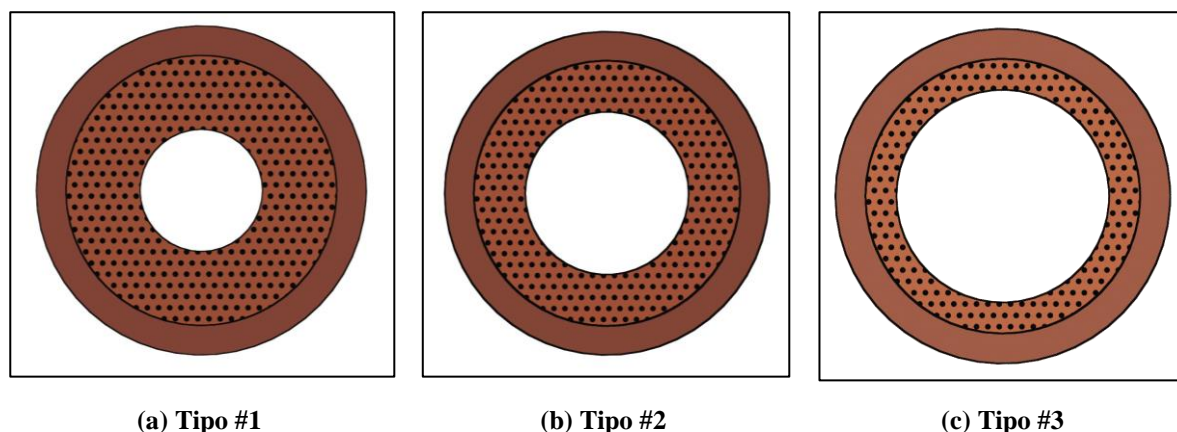
Fonte: Mera (2011)

Neste trabalho, Mera (2011) conclui, dentre outros, que a condutividade térmica e a geometria de uma matriz porosa foram fatores dominantes no resultado de condutividade térmica efetiva de um tubo de calor.

Krambeck (2018), em sua tese de mestrado, realizou a análise de desempenho de tubos de calor com pó sinterizado variando a espessura da estrutura capilar e a razão de preenchimento. Foram testados tubos de calor com três espessuras de estrutura capilar (Figura 14). Suas medidas são apresentadas na Tabela 1.



Figura 14 - Perfil das estruturas capilares sinterizadas em tubos de cobre.



Fonte: Krambeck (2018).

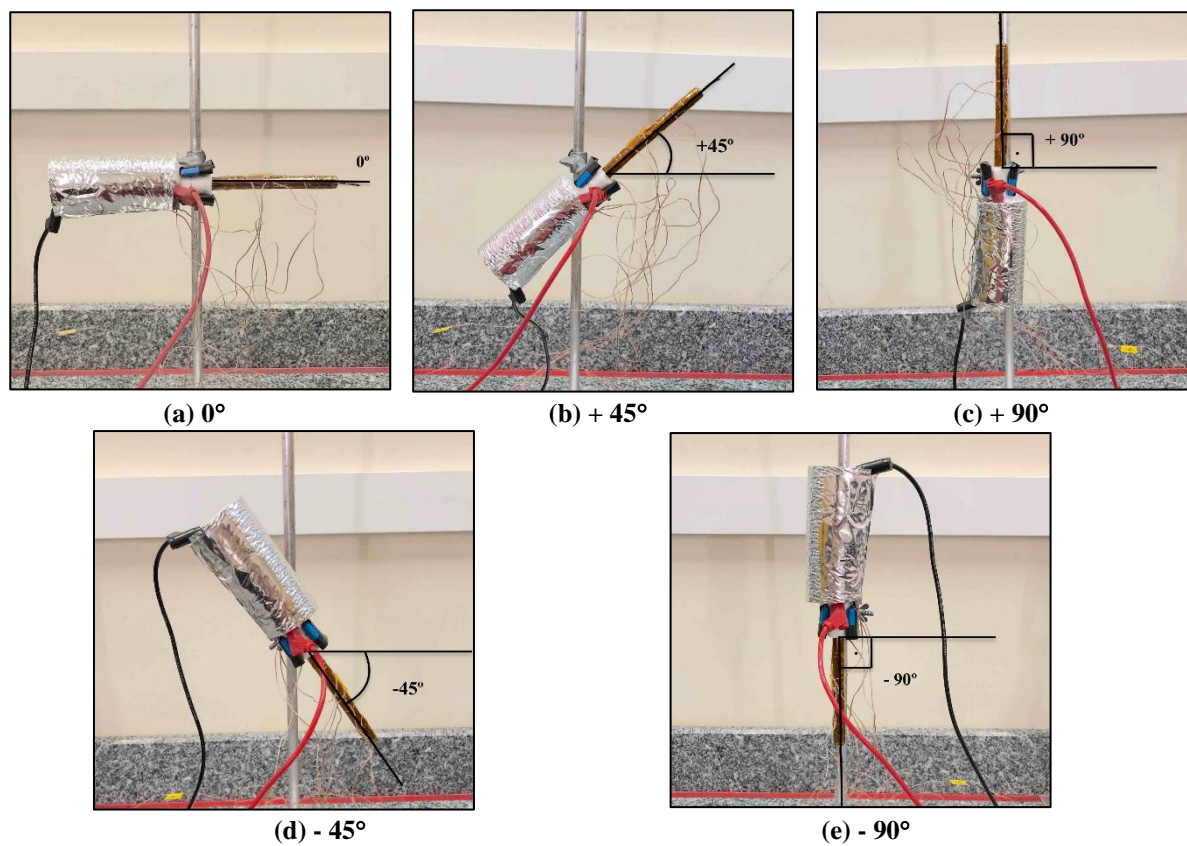
Tabela 1 - Características das estruturas capilares sinterizadas fabricadas.

Parâmetro	Tipo #1	Tipo #2	Tipo #3
Diâmetro externo do tubo [mm]	9,45	9,45	9,45
Diâmetro externo da estrutura capilar [mm]	7,75	7,75	7,75
Diâmetro interno da estrutura capilar [mm]	3,50	4,75	6,00
Espessura [mm]	2,125	1,500	0,875

Fonte: Krambeck (2018).

O fluido de trabalho utilizado foi água destilada e os tubos de calor foram testados com razões de preenchimento de 60%, 80%, 100% e 120% do volume do evaporador. Todos os tubos de calor foram testados em 0° (horizontal), + 45°, + 90° (evaporador abaixo do condensador), - 45° e - 90° (evaporador acima do condensador) de inclinação, como mostra a Fotografia 4.

Fotografia 4 - Inclinações de operação testadas em relação a horizontal.



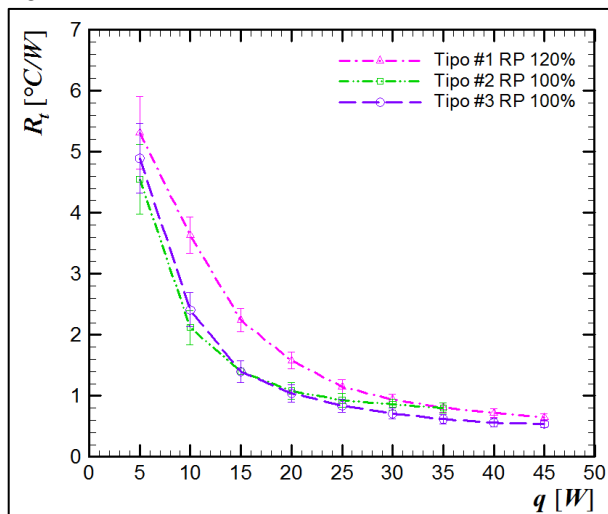
Fonte: Krambeck (2018).

Foram dissipadas potências compreendidas entre 5W e 45W, variando a cada 5W. A potência foi dissipada por efeito *Joule* e o arrefecimento por meio de um ventilador.

Os tubos de calor se comportaram de forma semelhante para todas as inclinações de trabalho e, de acordo com a temperatura de operação, todos os tubos poderiam ser aplicados para potências de até 35W. No entanto, o tubo de calor do tipo #3 apresentou o melhor desempenho térmico, se destacando à potências entre 40 e 45W.

A Figura 15 apresenta a resistência térmica dos tubos de calor, em suas melhores configurações, em função das potências dissipadas para a inclinação de 45°.

**Figura 15 - Resistência térmica em função da potência dissipada para os Tipos #1, #2 e #3 à 45°.**



Fonte: Krambeck (2018).

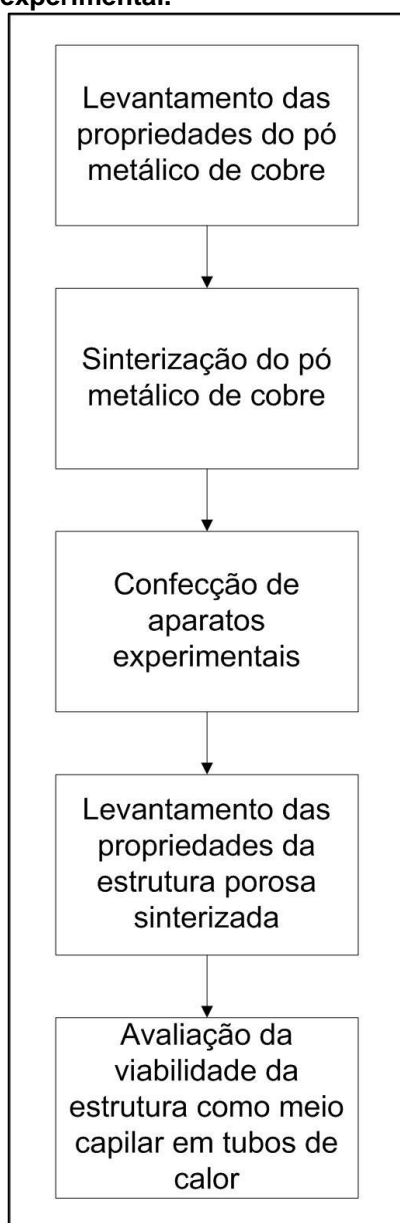
Krambeck (2018) concluiu que os tubos de calor com pó sinterizado se mostraram eficientes em condições adversas de trabalho e que o tipo #3, com razão de preenchimento de 100%, apresentou o melhor desempenho dentre os testados.

Como visto na literatura apresentada, o desempenho térmico de tubos de calor é estudado com interesse em seu aperfeiçoamento. Estudos realizados utilizando diferentes estruturas capilares e fluidos de trabalho buscam encontrar a menor resistência térmica efetiva do tubo de calor

### 3 METODOLOGIA

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo a confecção e avaliação das propriedades pertinentes da estrutura porosa para utilização em tubos de calor, sendo assim, faz-se necessário a caracterização do pó metálico de cobre, sinterização da estrutura porosa, confecção de aparatos experimentais e avaliação da estrutura porosa sinterizada, respectivamente, como apresentado na Figura 16.

**Figura 16 - Fluxograma experimental.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.1 LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES DO PÓ METÁLICO

O pó metálico de cobre utilizado foi o XF obtido por meio de atomização a gás (BARTMEYER *et al*, 2018). Apresentado nas Fotografia 5.

**Fotografia 5 - Pó de cobre.**



**Fonte: Autoria própria.**

O tamanho e formato das partículas do pó foram avaliadas por imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura, no Laboratório de Caracterização de Materiais do DAMEC/UTFPR/PG.

A análise granulométrica do pó de cobre ocorreu por espectrometria a laser, utilizando o Granulômetro *Cilas*<sup>TM</sup> 920 (Fotografia 6), do Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (LIMAC/UEPG), apresentado na Fotografia 7, que permite a obtenção da distribuição de tamanho das partículas.

**Fotografia 6 - Equipamento para espectrometria a laser.**



**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 SINTERIZAÇÃO DO PÓ DE COBRE

A sinterização ocorreu em um forno tubular horizontal *Inti*<sup>TM</sup> FT-1200, apresentado nas Fotografias 8 e 9, com atmosfera controlada composta por 95% de Argônio e 5% de hidrogênio, do Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do *Câmpus* Ponta Grossa – DAMEC/UTFPR/PG. Os parâmetros de sinterização utilizados foram obtidos de Bartmeyer *et al* (2017) com rampa de aquecimento de 20 C°/min, temperatura de sinterização de 800 C° e tempo de permanência na temperatura de sinterização de 15 minutos.

Para a realização dos diferentes ensaios nas amostras sinterizadas fez-se necessário a obtenção de diferentes amostras com dimensões padronizadas. Cada tipo de amostra foi confeccionado utilizando uma matriz específica, como apresentado na Fotografia 7.

**Fotografia 7 - Matrizes para sinterização.****(a) Permeabilidade****(b) Condutividade térmica****(c) Porosidade**

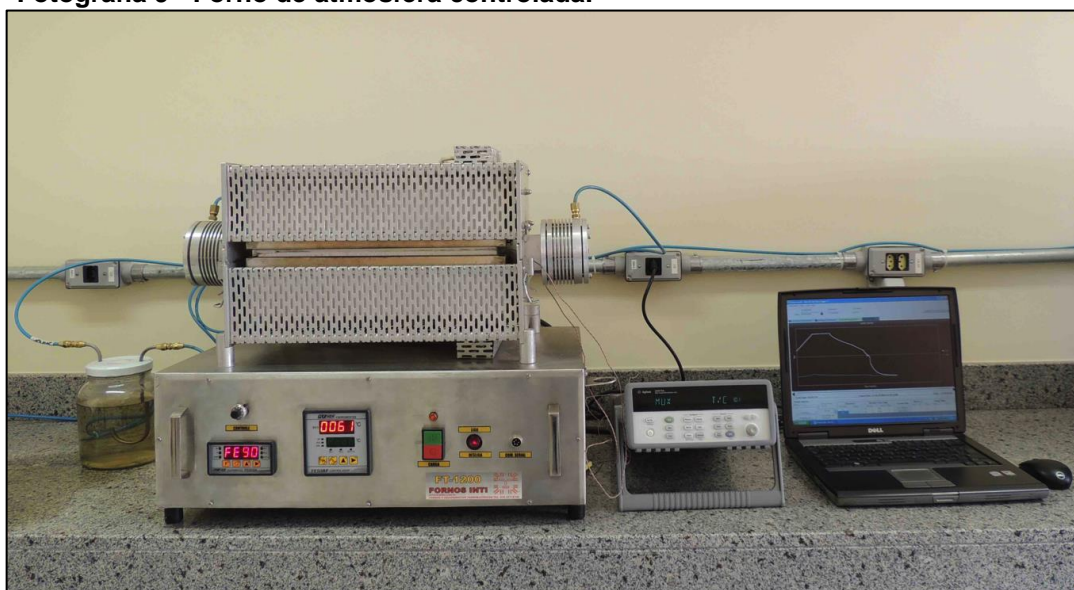
Fonte: Autoria própria.

Para ao preenchimento das matrizes, o pó foi depositado por meio de gravidade, sem compactação. O excesso de pó foi raspado das matrizes e então elas foram introduzidas no forno com o auxílio de uma chapa e plataforma apresentadas na Fotografia 8.

Para a sinterização de pó de cobre no interior do tubo de calor fez-se necessário a confecção de suportes que garantissem a concentricidade do tubo de cobre com um mandril. O pó de cobre então foi depositado por meio da gravidade e então o conjunto foi introduzido no forno como todas as amostras.

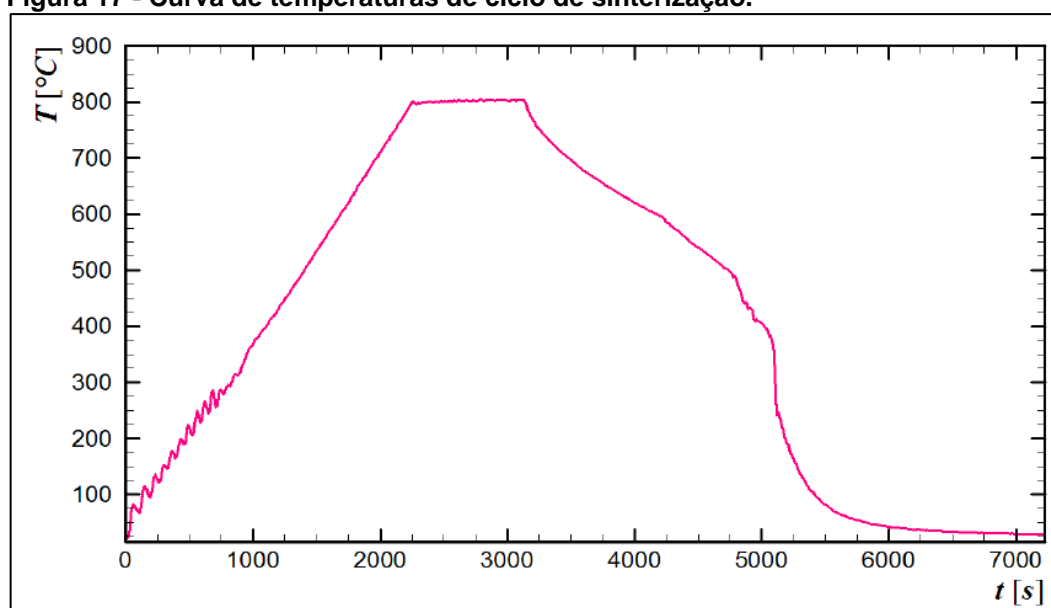
**Fotografia 8 - Preparação do Tubo de Calor para sinterização.**

Fonte: Autoria própria.

**Fotografia 9 - Forno de atmosfera controlada.**

Fonte: Autoria própria.

A Figura 17 apresenta a curva real de temperatura de sinterização de uma das amostras utilizadas neste estudo. Nela podem ser observadas todas as etapas de aquecimento e resfriamento: Rampa de aquecimento; sinterização à temperatura constante e resfriamento. Cada uma das etapas apresenta variações devido aos sistemas utilizados para obtê-las, como o sistema de controle das resistências no forno e o ventilador utilizado para intensificar o resfriamento.

**Figura 17 - Curva de temperaturas de ciclo de sinterização.**

Fonte: Autoria própria.



Como mencionado, foram sinterizadas amostras de diferentes formatos para os ensaios de permeabilidade (a), porosidade (b) e condutividade térmica (c), como apresentado na Fotografia 10.

**Fotografia 10 – Amostras sinterizadas para os ensaios.**



**(a) Permeabilidade**

**(b) Porosidade**

**(c) Condutividade térmica**

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES DA ESTRUTURA SINTERIZADA

A estrutura porosa sinterizada teve sua forma analisada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Sua permeabilidade avaliada em uma bancada experimental de permeabilidade desenvolvida no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética da UTFPR - Ponta Grossa, baseada na Norma MPIF *Standard* 39. A porosidade avaliada pelo Método de Arquimedes, baseado na norma MPIF *Standard* 42, e pelo método de Picnometria a Hélio. A condutividade térmica foi avaliada em uma bancada experimental de Condutividade Térmica desenvolvida no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética da UTFPR – Ponta Grossa, baseada na norma NBR 15220 Parte 04.

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada com o equipamento *Tescan*<sup>TM</sup> VEGA3, do Laboratório de Caracterização de Materiais do DAMEC/UTFPR/PG, que permite avaliar a forma e tamanho dos poros da estrutura sinterizada.

### 3.3.1 Permeabilidade e Raio Crítico

Para a avaliação da permeabilidade da estrutura sinterizada fez-se necessário desenvolver de um aparato experimental. O aparato foi desenvolvido com base na Norma MPIF *Standard 39* e permite a obtenção das propriedades de permeabilidade e raio crítico da amostra porosa.

O aparato desenvolvido consiste em um equipamento que filtra ar pressurizado, controla sua pressão e vazão e então mede a perda de carga que o escoamento de ar sofre ao permear a amostra porosa.

O escoamento de ar pressurizado é fornecido por um compressor *Vonder™* com 30 litros de reservatório e pressão máxima de 120 lb/pol<sup>2</sup> (827,371 KPa). O tratamento de ar é realizado em um filtro regulador de ar odontológico quadruplo médio ½" *Pressure™* CJ042-M, que remove do ar água, óleo, partículas grandes e pequenas, respectivamente. Este dispositivo também permite o controle da pressão de saída do ar tratado.

A medição e controle do escoamento de ar é feita por um rotâmetro *Protec Export™* com capacidade de medição de vazão de 6 até 30 litros por minuto. Este possui uma válvula de agulha que permite o controle preciso da vazão. A queda de pressão no escoamento é medida por um manômetro digital *Digitron™* ExiallCT4, que tem uma de suas saídas acoplada no porta amostras e outra aberta para a atmosfera. A ligação entre os componentes fixos foi realizada utilizando tubos de cobre e conectores de anilha com rosca NPT ou borrachas de vedação, com o propósito de garantir melhor vedação. A conexão entre o porta amostras e o manômetro foi feita utilizando uma mangueira pneumática de poliuretano PU 6,00 x 1,00.

A bancada experimental foi montada em uma estrutura construída de perfis de alumínio estrutura 30 x 30 mm, uma chapa de ACM de 4 mm de espessura, um tampo de MDF de 18 mm de espessura e quatro amortecedores vibrastop micro.

Os seus componentes são apresentados nas Fotografias 11 e 12. Seu projeto construtivo é apresentado no Apêndice A.

**Fotografia 11 - Aparato de permeabilidade: visão geral.**



Fonte: Autoria própria.

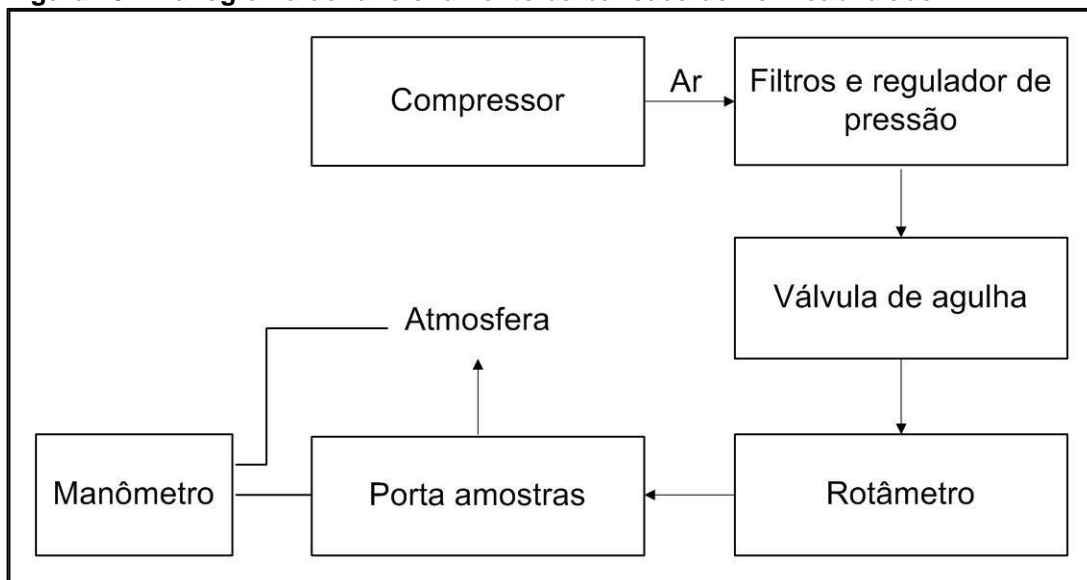
**Fotografia 12 - Aparato de permeabilidade: visão aproximada.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18 pode-se observar o fluxograma de funcionamento do aparato de permeabilidade.

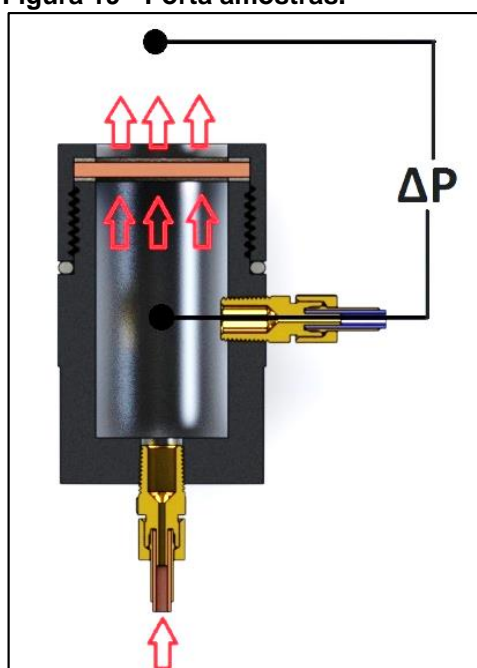
**Figura 18 - Fluxograma de funcionamento da bancada de Permeabilidade.**



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 19 demonstra o funcionamento do porta amostras, onde pode-se observar a alocação da amostra e da tomada de pressões pelo manômetro.

**Figura 19 - Porta amostras.**



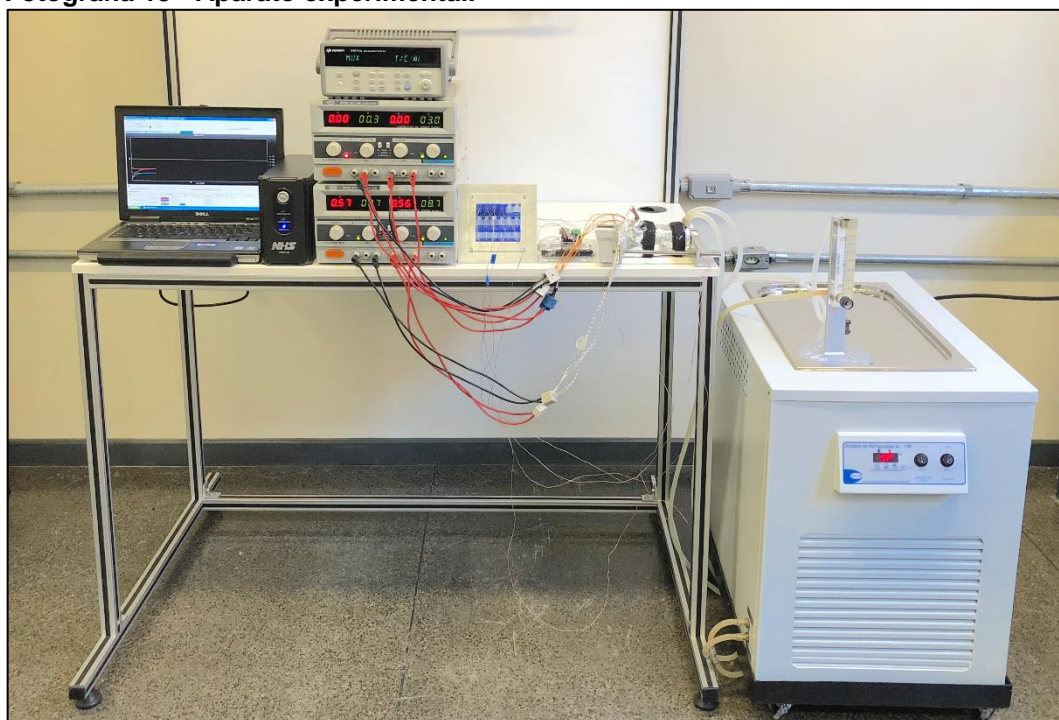
Fonte: Autoria própria.

Foi realizado o ensaio de três amostras, iniciando com a vazão de 6 L/min até 28 L/min, variando a cada 2 L/min. O resultado apresentado de coeficiente de permeabilidade é a média dos valores de cada amostra.

### 3.3.2 Condutividade Térmica

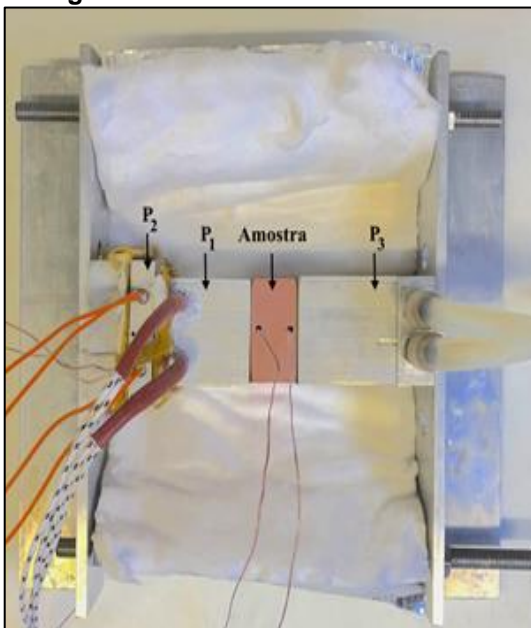
A condutividade térmica efetiva da estrutura porosa sinterizada foi avaliada em uma bancada experimental desenvolvida baseado no princípio da placa quente protegida, adaptado da norma NBR 15220 Parte 04, apresentado na Fotografia 13.

**Fotografia 13 - Aparato experimental.**



**Fonte: Autoria própria.**

O porta amostras é composto por uma placa quente protetora, uma placa quente aquecedora, uma placa fria, envoltório isolante e quatro resistências de cartucho. A amostra é alocada dentre as placas quente aquecedora e fria e tem a temperatura de suas faces medidas por termopares do tipo T. O porta amostras é montado utilizando um dispositivo que tem como objetivo manter todas as placas e amostra em contato (Fotografia 14).

**Fotografia 14 - Porta amostras.**

**Fonte: Autoria própria.**

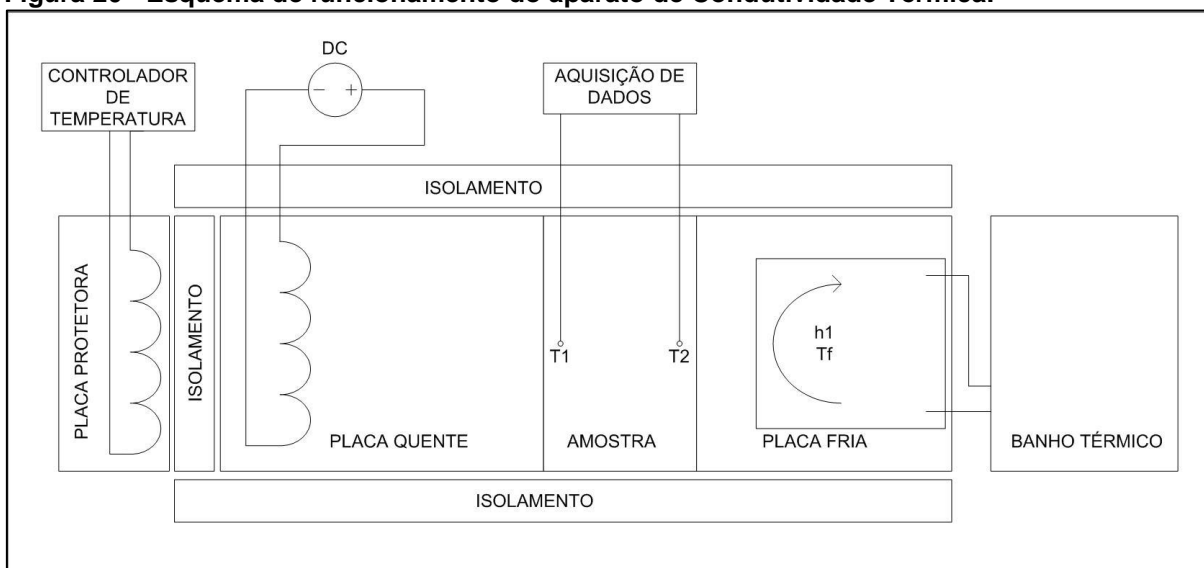
Neste sistema, a placa protetora garante que as duas faces de um isolamento permaneçam à mesma temperatura, tornando uma das superfícies da placa quente adiabática e o fluxo de calor unidirecional.

As placas quente, fria e protetora foram confeccionadas a partir de barra quadrada de alumínio, usinadas no Laboratório de Usinagem da UTFPR - Câmpus Ponta Grossa. Nas placas quente e protegida, furos foram feitos para alocar as resistências de cartucho. Na placa fria foi realizada a usinagem de canal para arrefecimento por água. O projeto construtivo do aparato se encontra no Apêndice B.

O sistema de prensagem consiste em dois perfis de alumínio, barras roscadas e porcas de aço inoxidável. Todo o isolamento térmico do aparato é realizado por manta aeronáutica *3M™ MTI Polyfab™*

O esquema de funcionamento do aparato de condutividade térmica é apresentado na Figura 20, onde o fluxo de calor gerado por uma fonte de potência atravessa a amostra de dimensões conhecidas e as temperaturas das faces são medidas, podendo-se obter assim a condutividade térmica da amostra pela Lei de *Fourier* (Eq. 4).

**Figura 20 - Esquema de funcionamento do aparato de Condutividade Térmica.**



Fonte: Autoria própria.

O aparato utilizado é apresentado na Fotografia 13. A bancada experimental é composta, da esquerda para a direita, por um *notebook Dell™*, um *nobreak NHS™* de 1200 VA, duas fontes de alimentação *Politerm™* 16E, um sistema de aquisição de dados *Agilent™* 34970A com um multiplexador *Agilent™* 34901A de 20 canais, um sistema de controle computadorizado *Arduíno* para a placa quente, um banho ultratermostatizado *SOLAB™* SL-130 e um rotâmetro de área variável *Omega Engineering™* F-L2051 com válvula reguladora.

A Fotografia 14 apresenta o porta amostras aberto. Nele pode-se identificar, da esquerda para a direita, a Placa protetora (P2), Placa quente (P1), Amostra e Placa fria (P3).

A aquisição de dados de temperatura foi realizada por termopares da *Omega Engineering™* do Tipo T, posicionados dentro de furos nas amostras.

O projeto construtivo da bancada experimental encontra-se no Anexo B.

### 3.3.3 Porosidade

A porosidade da estrutura porosa sinterizada foi avaliada pelos Métodos de Arquimedes e da Picnometria a Hélio.

O aparato e a metodologia para a aplicação do Método de Arquimedes seguiram a norma MPIF *Standard 42*. Fez-se necessário a confecção de um aparato para a pesagem da amostra imersa, apresentado na Fotografia 15. O aparato consiste em uma mesa para suporte do recipiente com fluido e uma estrutura para suporte da amostra.

**Fotografia 15 - Aparato para Método de Arquimedes.**



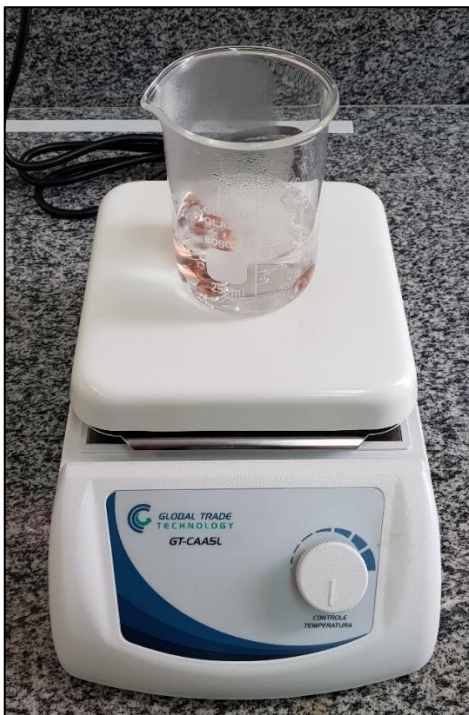
**Fonte: Autoria própria.**

Para a realização do ensaio fez-se necessária a secagem das amostras, pesagem das amostras secas, impregnação das amostras pela imersão em água fervente por uma hora (Fotografia 16). As amostras foram imersas em um Becker sobre uma placa aquecedora *Global Trade Technology™* modelo GT-CAA5L, adquirida com recursos provenientes do EDITAL 1/2018 - PROGRAD/PROREC - APOIO À EXECUÇÃO DE TRABALHOS DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC.

A pesagem das amostras impregnadas em água e então a pesagem das amostras submersas, utilizando a montagem do aparato na balança (Fotografia 17). A secagem ocorreu em um forno *Inti™* FT-1200. Todas as medidas de peso foram realizadas uma balança de precisão *Schimadzu™* EDX -7000. A montagem do aparato na balança de precisão é mostrado na Fotografia 18.



**Fotografia 16 - Imersão em água fervente.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Fotografia 17 - Balança de precisão.**



**Fonte: Autoria própria.**

**Fotografia 18 - Montagem para o Método de Arquimedes.**



**Fonte: Autoria própria.**

O ensaio de porosidade por Picnometria a Hélio foi realizado no Laboratório Interdisciplinar de Materiais Cerâmicos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (LIMAC/UEPG), utilizando o equipamento *Quantachrome Instruments™ Ultracycrometer 1000*, apresentado na Fotografia 19.

**Fotografia 19 - Equipamento para Picnometria a Hélio.**



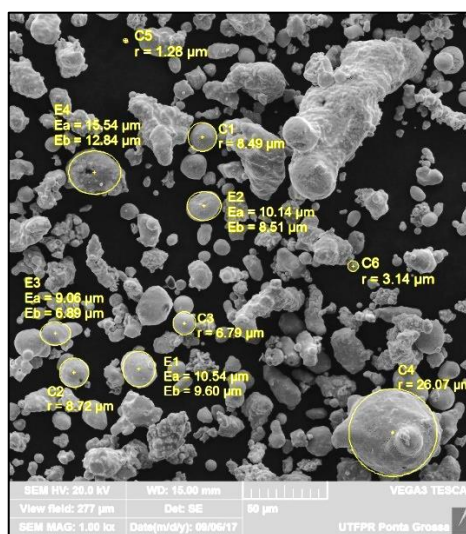
**Fonte: Autoria própria.**



Mais informações sobre as propriedades do pó de cobre estão disponíveis no Anexo A.

O pó de cobre também foi avaliado por Microscopia Eletrônica de Varredura, como apresentado na Fotografia 20.

**Fotografia 20 - Microscopia Eletrônica de Varredura do Pó de Cobre.**



**Fonte: Autoria própria.**

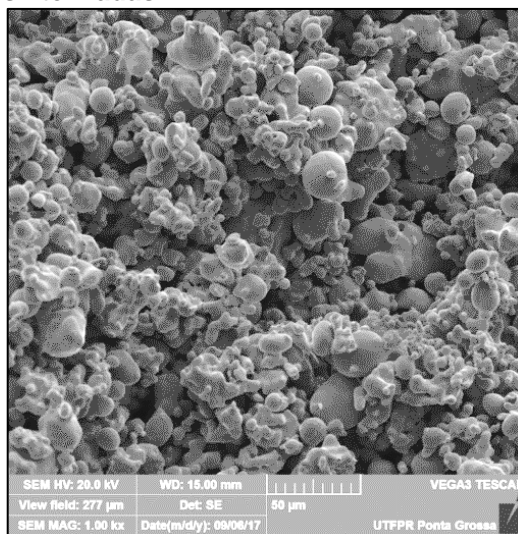
## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA CAPILAR

As bancadas e aparatos experimentais desenvolvidas neste Trabalho de Conclusão de Curso foram apresentadas nas Fotografias 11, 12, 13 e 14 e seus respectivos projetos técnicos encontram-se nos anexos A e B.

## 4.3 POROSIDADE

Na Fotografia 21 pode-se observar a Microscopia Eletrônica de Varredura de uma das amostras sinterizadas neste Trabalho de Conclusão de Curso.

**Fotografia 21 - Microscopia Eletrônica de Varredura de uma das amostras sinterizadas.**



**Fonte: Autoria própria.**

Os dados de porosidade da estrutura sinterizada obtidos pelo Método de Arquimedes são apresentados na Tabela 2, sendo a média avaliada em 55,0%. Os dados de porosidade da estrutura sinterizada obtidos pelo Método da Picnometria a Hélio são apresentados na Tabela 3, sendo a média de porosidade total avaliada em 54,8%.

**Tabela 2 - Resultados de Porosidade pelo Método de Arquimedes.**

<b>Amostra</b>	<b>Porosidade [%]</b>
<b>A</b>	55,1
<b>B</b>	55,1
<b>C</b>	55,5
<b>D</b>	55,2
<b>E</b>	54,3
<b>Média</b>	<b>55,0</b>

**Fonte: Autoria própria.**

**Tabela 3 - Resultados de Porosidade pelo Método da Picnometria de Hélio.**

<b>Amostras</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
Porosidade aparente [%]	55,4	53,4	54,6	<b>54,5</b>	0,82
Porosidade fechada [%]	0,02	0,16	0,83	<b>0,33</b>	0,35
Porosidade total [%]	55,4	53,6	55,4	<b>54,8</b>	0,85
Densidade aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	8,8	8,8	8,7	<b>8,8</b>	0,05
Densidade aparente total [g/cm <sup>3</sup> ]	3,9	4,1	3,9	<b>4,0</b>	0,09
Densidade aparente Pic. Hélio [g/cm <sup>3</sup> ]	9,1	8,9	8,9	<b>9,0</b>	0,09
Densidade geométrica [g/cm <sup>3</sup> ]	3,7	3,7	3,7	<b>3,7</b>	0,0

**Fonte: A autoria própria.**

Os dados obtidos pelos dois métodos diferem em menos de 1% de porosidade, demonstrando a confiabilidade do Método de Arquimedes. Maiores informações sobre o ensaio de permeabilidade estão disponíveis no Anexo B.

#### 4.4 PERMEABILIDADE E RAIOS CRÍTICOS

A permeabilidade avaliada das amostras sinterizadas é apresentada na Tabela 4, a média obtida foi de  $7,81 \cdot 10^{-13} \pm 0,38 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ .

**Tabela 4 - Resultados do Ensaio de Permeabilidade.**

<b>Amostra</b>	<b>Permeabilidade [m<sup>2</sup>]</b>
A	$7,80 \cdot 10^{-13} \pm 0,38 \cdot 10^{-13}$
B	$7,41 \cdot 10^{-13} \pm 0,36 \cdot 10^{-13}$
C	$8,21 \cdot 10^{-13} \pm 0,39 \cdot 10^{-13}$
<b>Média</b>	<b><math>7,81 \cdot 10^{-13} \pm 0,38 \cdot 10^{-13}</math></b>

**Fonte: A autoria própria.**

O raio crítico das amostras sinterizadas é apresentada na Tabela 5. A média obtida foi de  $6,57 \pm 0,22 \text{ } \mu\text{m}$ .

**Tabela 5 - Resultados de Raio Crítico.**

<b>Amostra</b>	<b>Raio crítico [<math>\mu\text{m}</math>]</b>
A	6,96 $\pm$ 0,24
B	6,45 $\pm$ 0, 21
C	6,30 $\pm$ 0,20
<b>Média</b>	<b>6,57 <math>\pm</math> 0,22</b>

**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.5 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica das amostras sinterizadas é apresentada na Tabela 6. A média da condutividade térmica efetiva obtida foi de 15,1 W/mK.

**Tabela 6 - Resultados do Ensaio de Condutividade Térmica.**

<b>Amostra</b>	<b>Condutividade Térmica Efetiva [W/mK]</b>
A	16,5
B	13,6
C	15,3
<b>Média</b>	<b>15,1</b>

**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.6 TESTES PRELIMINARES DO DESEMPENHO TÉRMICO DO TUBO DE CALOR

Krambeck *et al* (2018) realizaram um estudo da eficiência de um tubo de calor, utilizando a estrutura sinterizada abordada neste Trabalho de Conclusão de Curso como estrutura capilar, de forma experimental. As características construtivas deste tubo de calor são apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Parâmetros do Tubo de Calor.**

Parâmetro	Tubo de Calor
Diâmetro interno do tubo [mm]	7,75
Diâmetro externo do tubo [mm]	9,45
Comprimento do evaporador [mm]	80
Comprimento da região adiabática [mm]	20
Comprimento do condensador [mm]	100
Fluido de trabalho	Água destilada
Razão de preenchimento [%]	100
Quantidade do fluido de trabalho [mL]	2,83
Estrutura capilar	Pó de cobre sinterizado
Diâmetro interno da estrutura capilar [mm]	4,75
Espessura da estrutura capilar [mm]	1,50

Fonte: Adaptado de Krambeck *et al* (a), 2018.

O aparato experimental utilizado para a realização dos testes do tubo de calor são apresentados na Fotografia 22. O aparato é composto por uma fonte de alimentação (*AgilentTM* U8002A), um sistema de aquisição de dados (*AgilentTM* 34970A com 20 canais), um notebook (*DellTM*), um estabilizador (*NHSTM*), um suporte universal e um ventilador (*UltrarTM*).

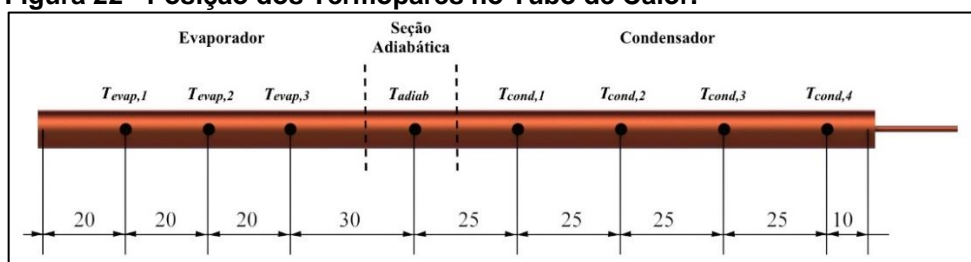
**Fotografia 22 - Teste experimental do Tubo de Calor na posição horizontal.**

Fonte: Krambeck *et al* (a), 2018.

Foram utilizados termopares *Omega EngineeringTM* do tipo K para avaliação da distribuição de temperaturas no tubo de calor. Eles foram fixados na superfície externa do tubo de calor com o auxílio de uma fita *KaptonTM*. A Figura 22 mostra a distribuição dos termopares. Três foram colocados na região do evaporador, um na região adiabática e quatro na região do condensador.



**Figura 22 - Posição dos Termopares no Tubo de Calor.**



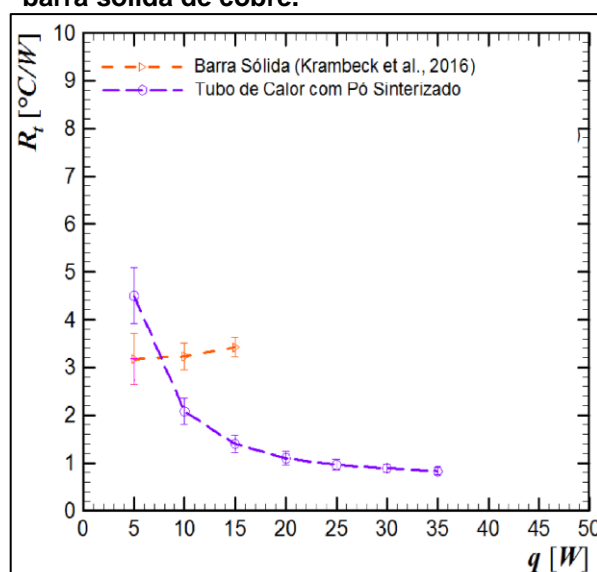
Fonte: Krambeck *et al* (a), 2018.

O aquecimento do evaporador foi realizado pela dissipação de energia térmica por efeito *Joule*, gerada pela passagem de corrente elétrica por uma resistência de níquel-cromo *Omega Engineering*<sup>TM</sup> de 0,1 mm de espessura e 3,5 mm de largura.

Para garantir que todo o fluxo de calor gerado pela resistência elétrica fosse dissipado no evaporador, toda a região do evaporador foi envolta por isolamento térmico aeronáutico.

Na Figura 23 encontra-se o resultado experimental do desempenho do tubo de calor com pó sinterizado como meio capilar. O resultado apresentado se dá em termos de resistência, desta forma, o dispositivo com menor resistência ao fluxo de calor tem o melhor desempenho. O tubo de calor com pó sinterizado como estrutura capilar, funcionando na posição horizontal, funcionou de forma adequada.

**Figura 23 - Resistência Térmica Equivalente de um tubo de calor com pó sinterizado e de uma barra sólida de cobre.**



Fonte: Adaptado de Krambeck *et al* (b), 2018.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste Trabalho de Conclusão de Curso foi discutida e estudada a confecção de estruturas porosas a partir de pó metálico de cobre, pelo processo de sinterização, com o intuito de prever sua aplicabilidade como estrutura capilar em tubos de calor. Foi realizada a análise da matéria prima, processo de obtenção da estrutura porosa, confecção de bancadas experimentais e os seus resultados de seus respectivos ensaios. O pó de cobre foi analisado utilizando Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Dispersão de Energia (ED-XRF), por Granulometria por Difração a Laser e por Microscopia Eletrônica de Varredura. A estrutura capilar foi sinterizada em um forno tubular horizontal com atmosfera controlada composta por 95% de Argônio e 5% de hidrogênio. A porosidade da estrutura sinterizada foi avaliada pelo Método de Arquimedes, baseado na norma MPIF *Standard* 42 e pelo da Picnometria a Hélio. Foi confeccionado uma bancada experimental para levantamento das propriedades de permeabilidade e raio crítico, baseada na norma Norma MPIF *Standard* 39, e uma bancada experimental para avaliação da condutividade térmica baseada na norma NBR 15220 Parte 04. Testes experimentais térmicos realizados com tubo de calor sinterizados mostraram que a estrutura capilar funcionou satisfatoriamente, viabilizando a utilização de pó sinterizado como meio capilar para Tubos de Calor.

Os experimentos requeridos para o levantamento das propriedades pertinentes à este estudo foram realizados dentro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa e da Universidade Estadual de Ponta Grossa, sendo ainda necessária a confecção de aparatos experimentais.

As bancadas experimentais desenvolvidas neste trabalho cumpriram seus objetivos, fornecendo os dados necessários para a quantificar as propriedades pertinentes (permeabilidade, raio crítico e condutividade térmica) da estrutura sinterizada para aplicação em tubos de calor.

As bancadas experimentais desenvolvidas encontram-se disponíveis para utilização com fins educacionais e de pesquisa, já sendo usadas por pesquisadores de outras instituições.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros de forma a dar continuidade ao trabalho desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso são:

- Sinterização de pós de diferentes materiais;
- Utilização de pós de diferentes tamanhos;
- Combinação de diferentes pós e tamanhos.

## 6 REFERÊNCIAS

BARTMEYER, G.A.; KRAMBECK, L.; COUTO DA SILVA, R.; FUSÃO, D.; ANTONINI ALVES, T. **Characterization of a copper powder for heat pipe wick applications.** International Journal of Advanced Engineering Research and Science, v. 5, pp. 52-54, 2018.

BARTMEYER, G.A.; KRAMBECK, L.; FUSÃO, D.; ANTONINI ALVES, T. **Aplicação da sinterização de pó de cobre para estrutura capilar em tubos de calor.** Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, v. 44, pp. 74, 2017.

**Heat Pipe & Vapor Chamber Technology Overview.** Celsia, 2018. Disponível em: <<http://celsiainc.com/heat-pipe-and-vapor-chamber-technology-overview/>>. Acesso em: 17 fev. 2018.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação Mecânica V. 3,** 2 ed. São Paulo, Brazil, 388p., 1986.

FAGHRI, A., 2014. **Heat Pipes: Review, Opportunities and Challenges.** *Frontiers in Heat Pipes*, Vol. 5, pp 01-48.

GERMAN, R.M. **Powder Metallurgy Science.** Metal Powder Industry Federation, New Jersey, USA, 472p., 1994.

JIANG, Lelun; LING, Jintian; JIANG, Linzhen; TANG, Yong; LI, Yan; ZHOU, Wei; GAO, Jinwu. **Thermal performance of a novel porous crack composite wick heat pipe.** Energy Conversion and Management, v.81, p. 10-18, 2014.

KRAMBECK, L., BARTMEYER, G.A., FUSÃO, D., SANTOS, P.H.D., ANTONINI ALVES, T., 2018. **Thickness Influence of the Copper Powder Sintered Capillary Structure in the Thermal Performance of Heat Pipes.** 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering November 25th-28th, 2018, Águas de Lindóia, SP, Brazil.(a)

Krambeck, L., Bartmeyer, G.A., Fusão, D., Santos, P.H.D. and Antonini Alves, T., 2018. **“Desempenho térmico de um tubo de calor utilizando pó de cobre sinterizado como estrutura capilar”**. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2018. Salvador, Brasil.(b)

KRAMBECK, Larissa. **Estudo Experimental do Desempenho Térmico de Estruturas Capilares de Pó de Cobre Sinterizado em Tubos de Calor**. 2018p. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, PR, 2018.

KUMARESAN, G., VENKATACHALAPATHY, S., ASIRVATHAM, L.G., WONGWISES, S., 2014. **Comparative study on heat transfer characteristics of sintered and mesh wick heat pipes using CuO nanofluids**. International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 57, pp. 208-215.

MERA, Juan P. F. **Análise da transferência de calor em meios de porosidade variável para tubos de calor**. 2011p. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2011.

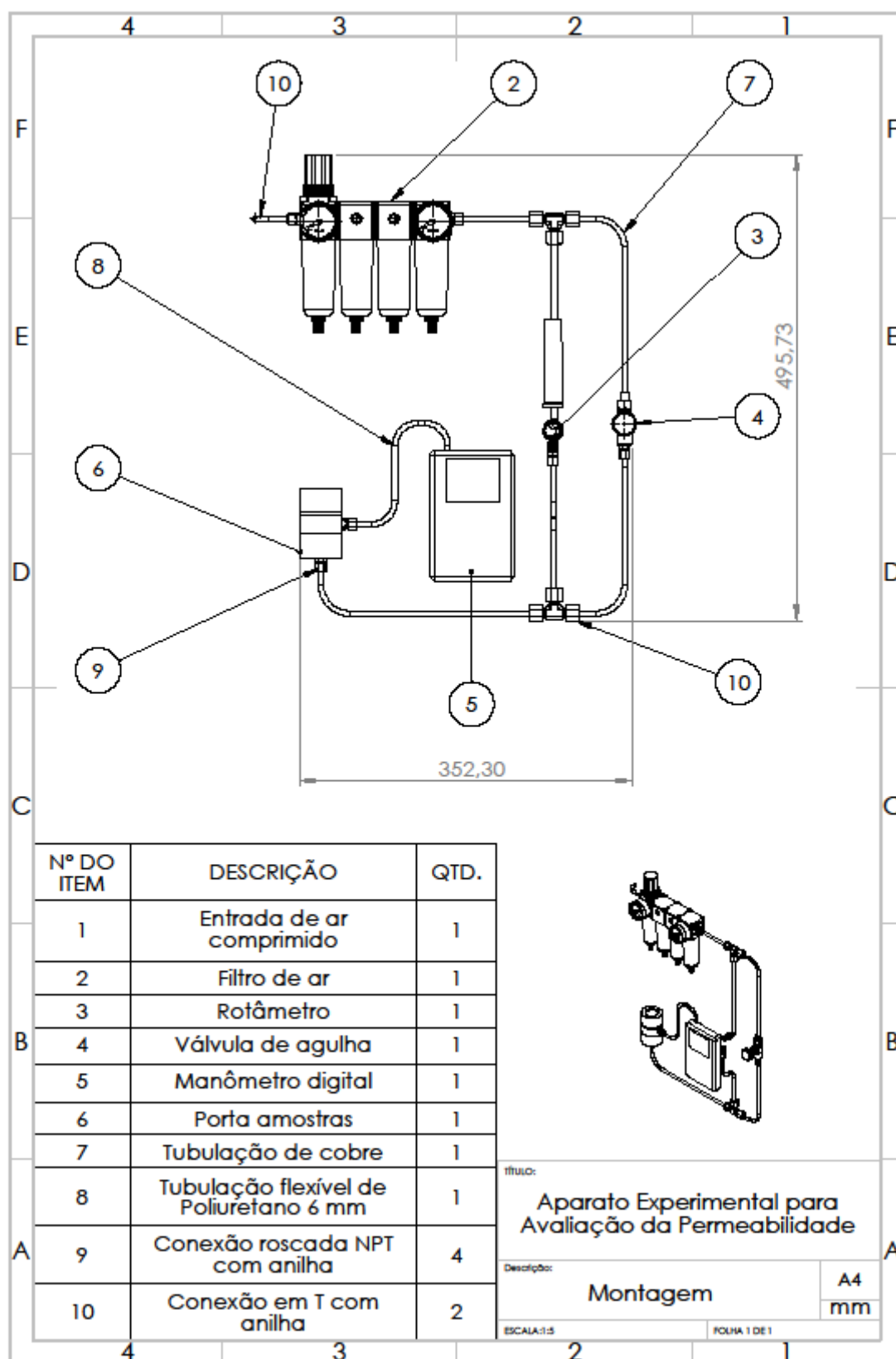
NISHIDA, Felipe B. **Desenvolvimento de Tubos De Calor com Microranhuras Fabricadas por Eletroerosão a Fio**. 2016. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

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

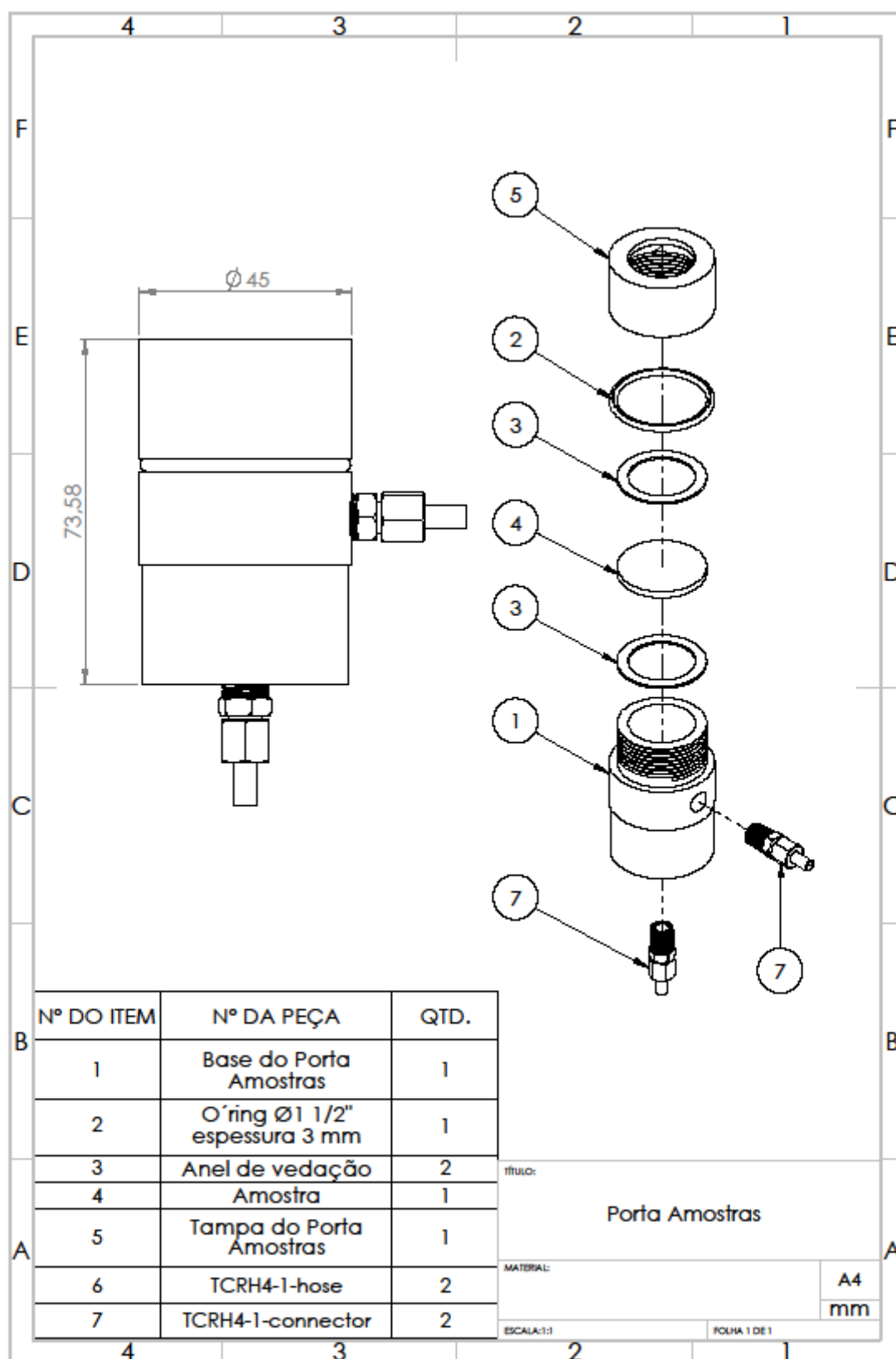
SOUZA, W. **Estudo da porosidade ideal de uma estrutura sinterizada de cobre puro para aplicação em uma câmara de vapor**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.

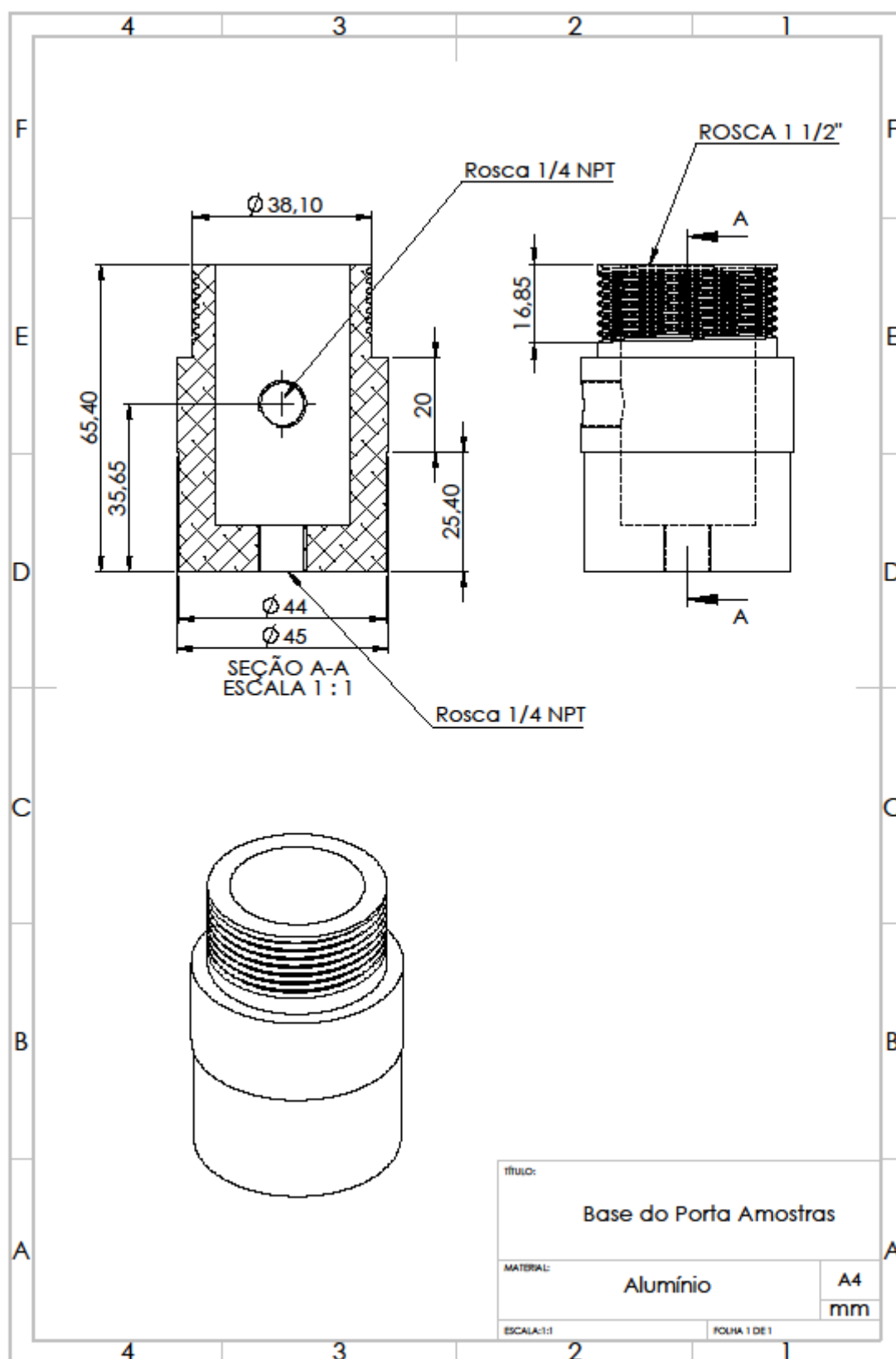
WALLIN, P., 2012. **Heat Pipe, selection of working fluid**. Dept. of Energy Sciences, Faculty of Engineering, Lund University, Box 118, 22100 Lund, Sweden.

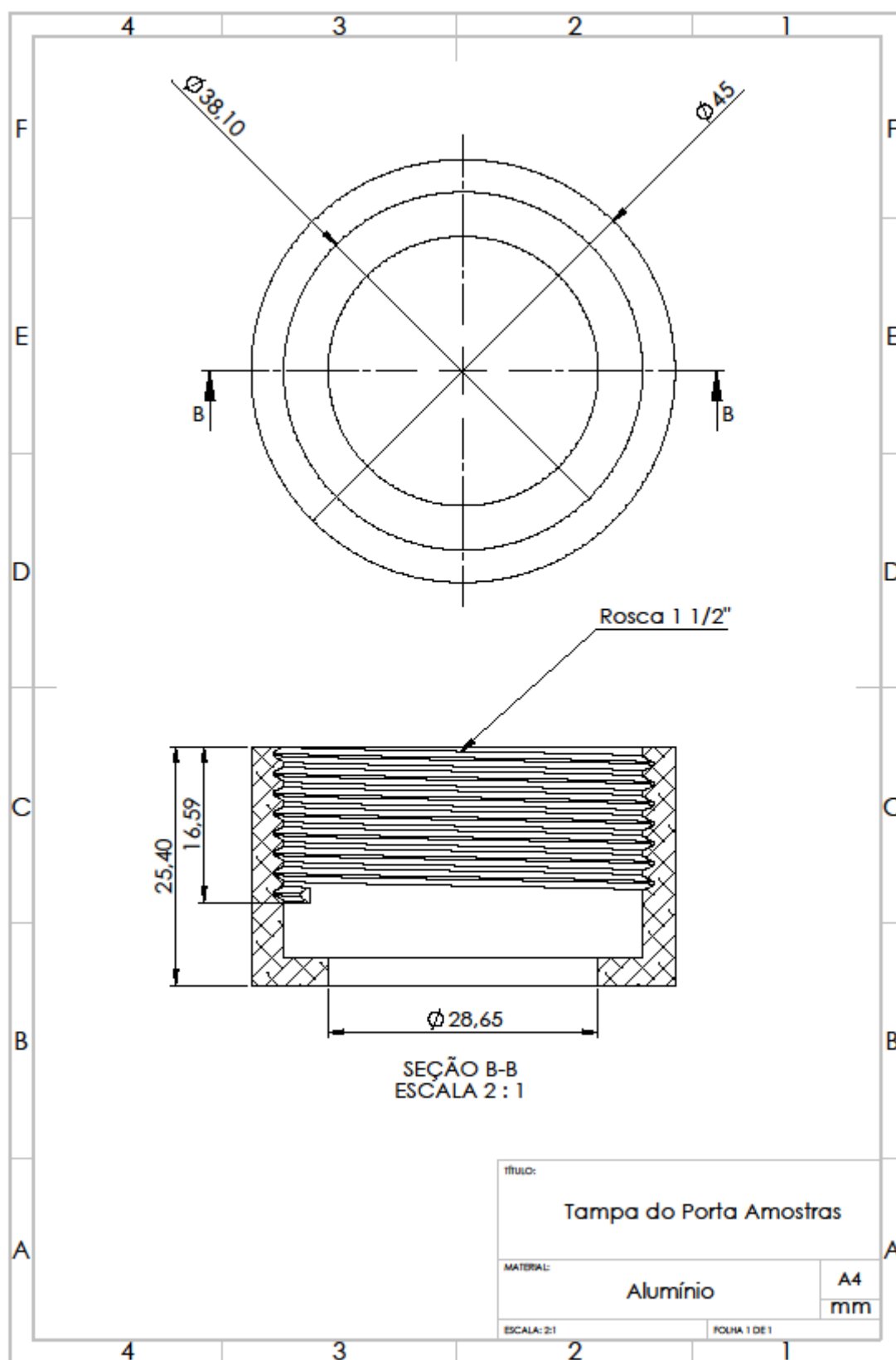
**APÊNDICE A – Projeto Construtivo da Bancada de Permeabilidade e Raio Crítico**

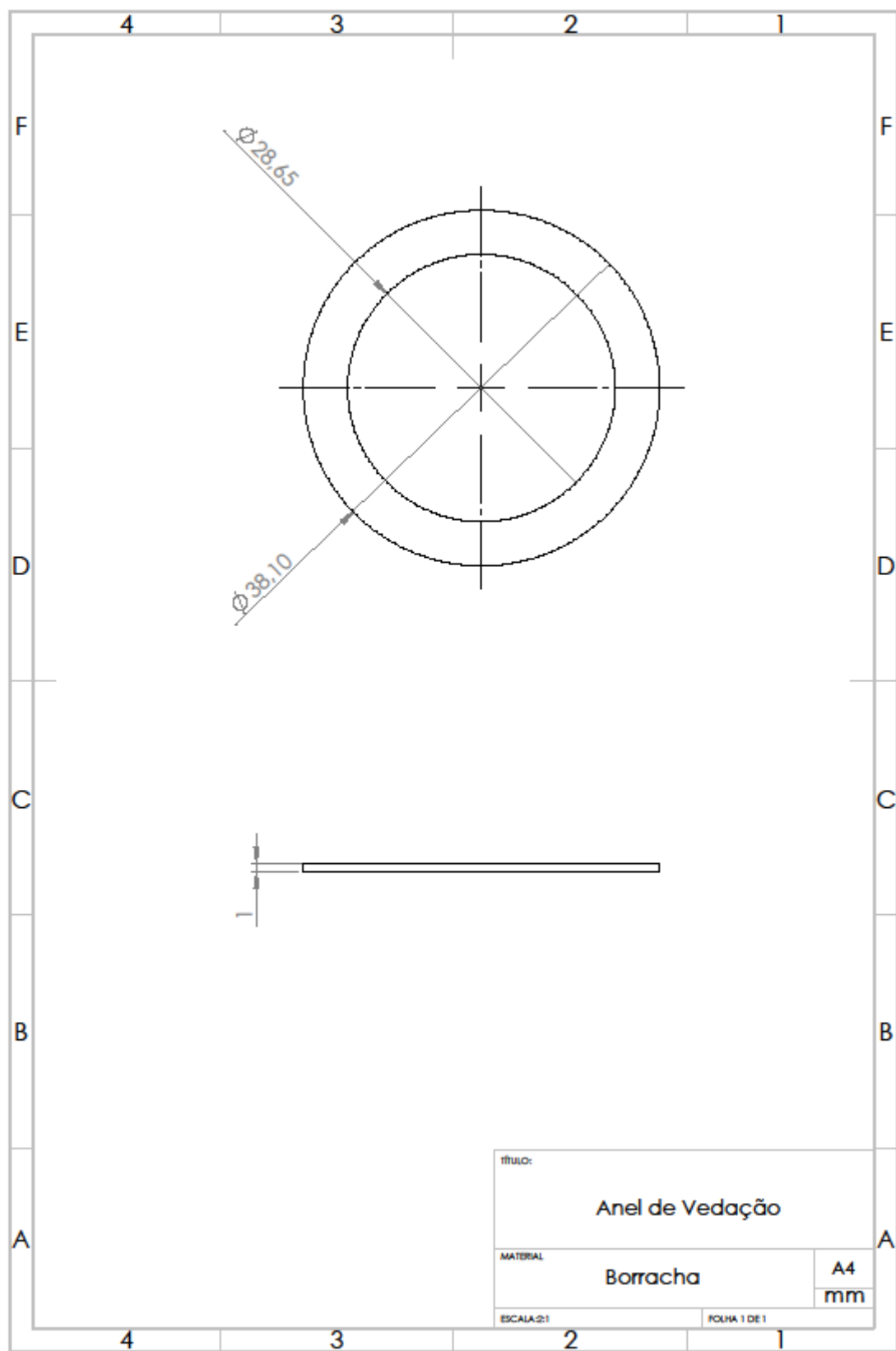




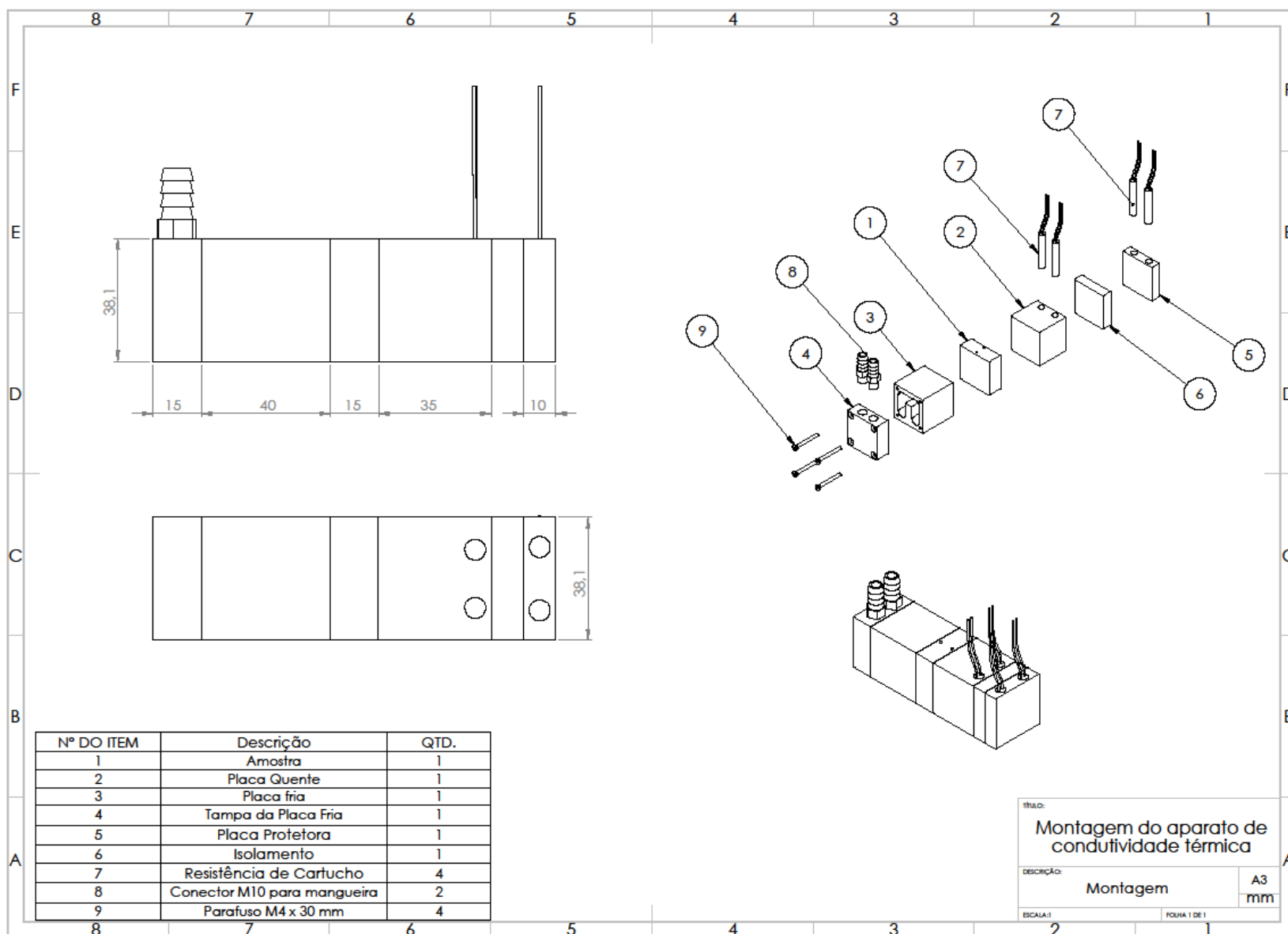


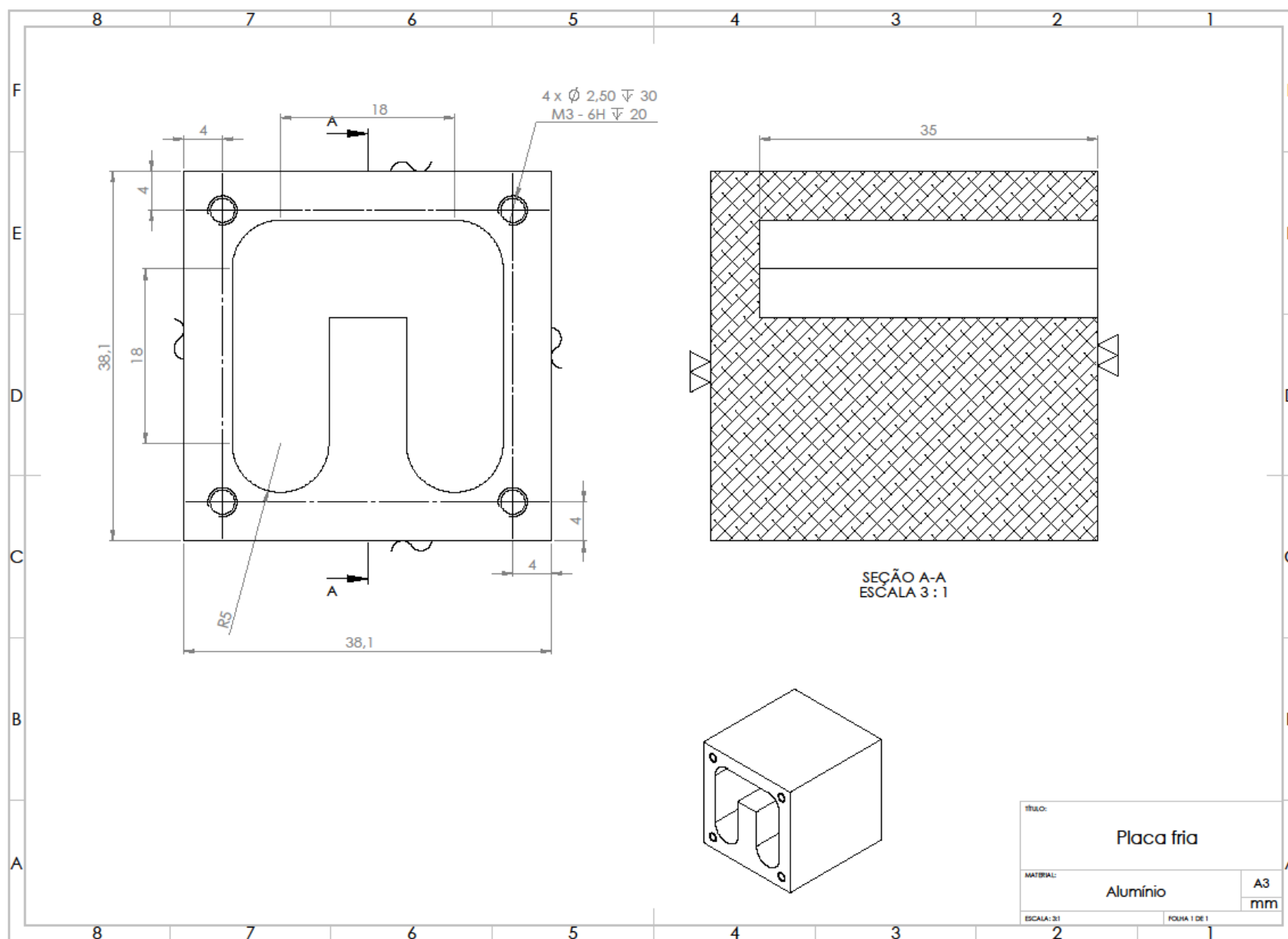


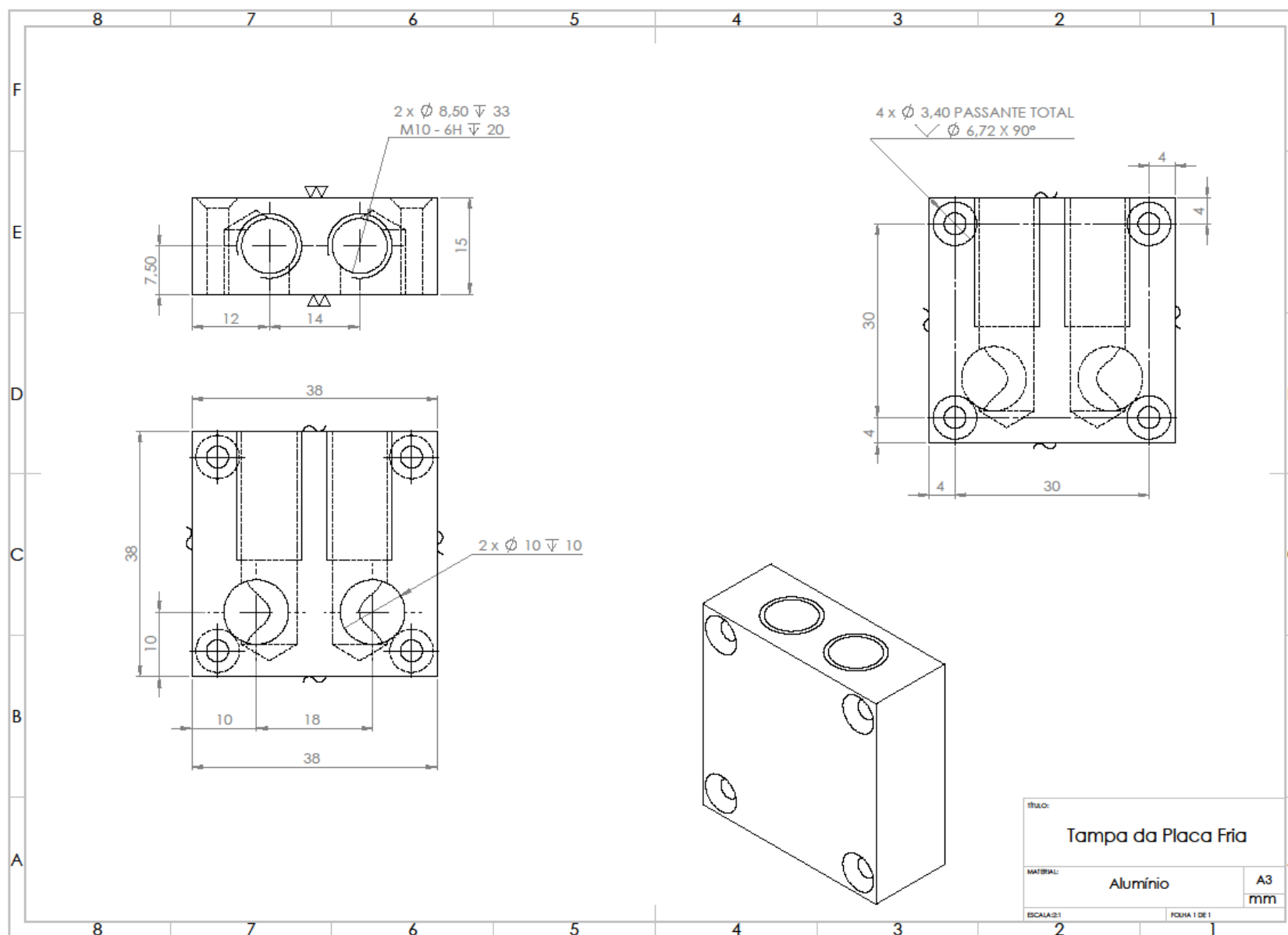




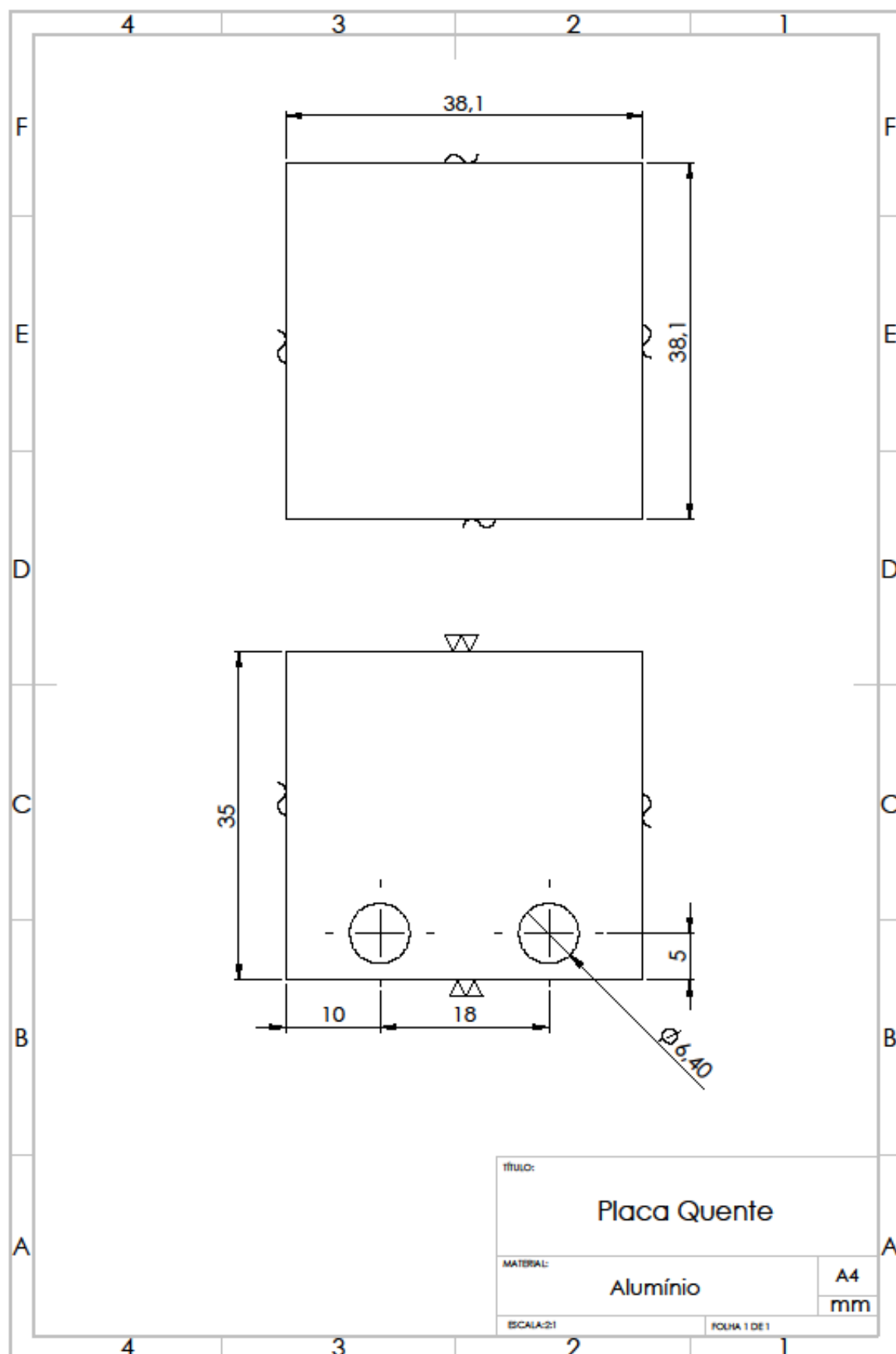
**APÊNDICE B - Projeto Construtivo da Bancada de Condutividade Térmica**

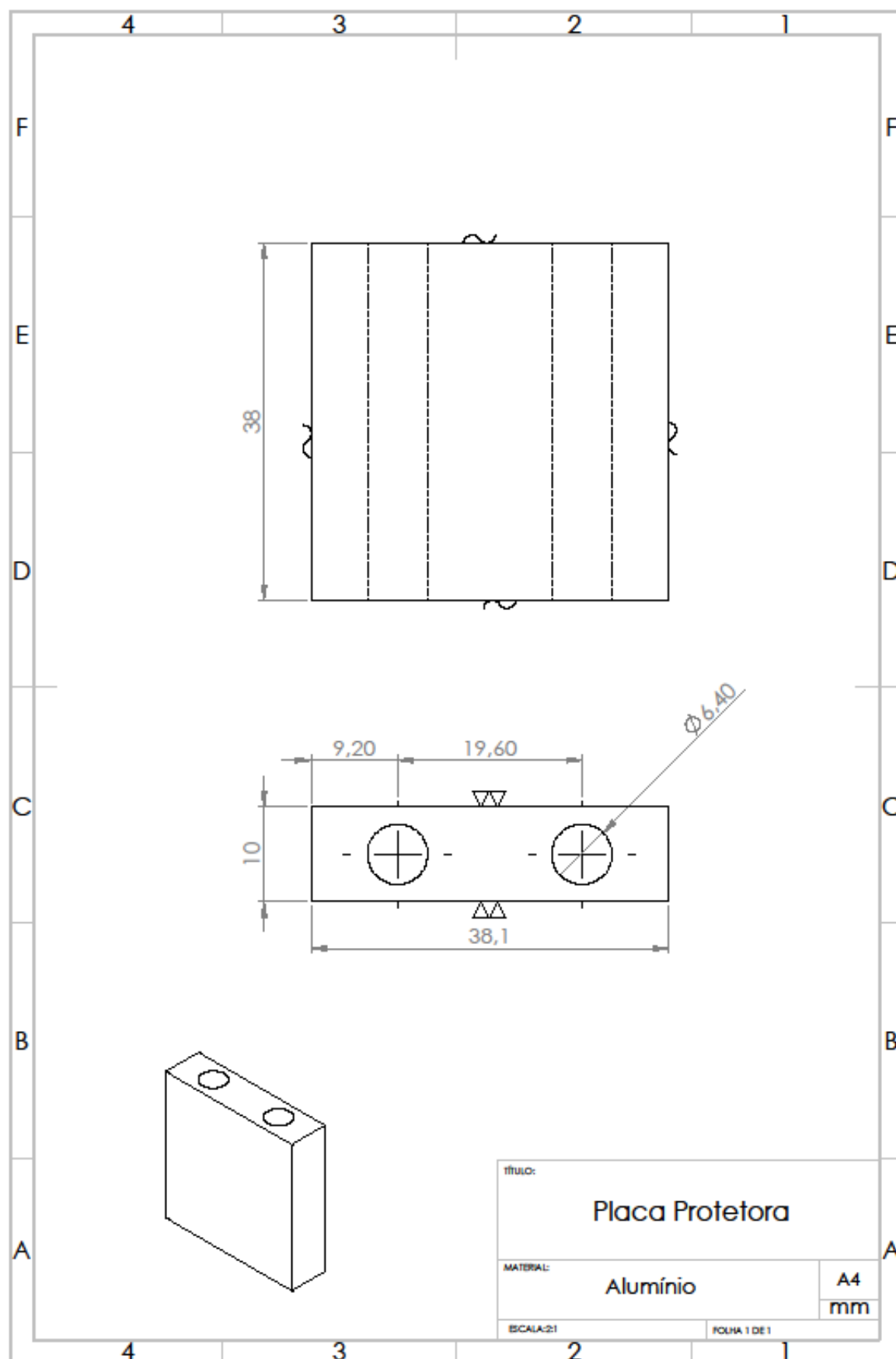












**ANEXO A - Resultados da Análise de Distribuição Granulométrica por Difração a Laser do Pó de Cobre XF**



## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

### CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 mu - 400.00 mu / 30 Classes

Ref da amostra : Cu  
 Type produit : MAT PRIMA  
 Client : TEBECHERANI  
 Comentários : 1,5g DE AMOSTRA  
 Líquido : AGUA  
 Agente dispersante : ALCOOL  
 Operador : DOUGLAS  
 Empresa : UEPG  
 Localização : LIMAC  
 Data : 05/04/2018 Hora : 14:17:09  
 Índice med. : 432

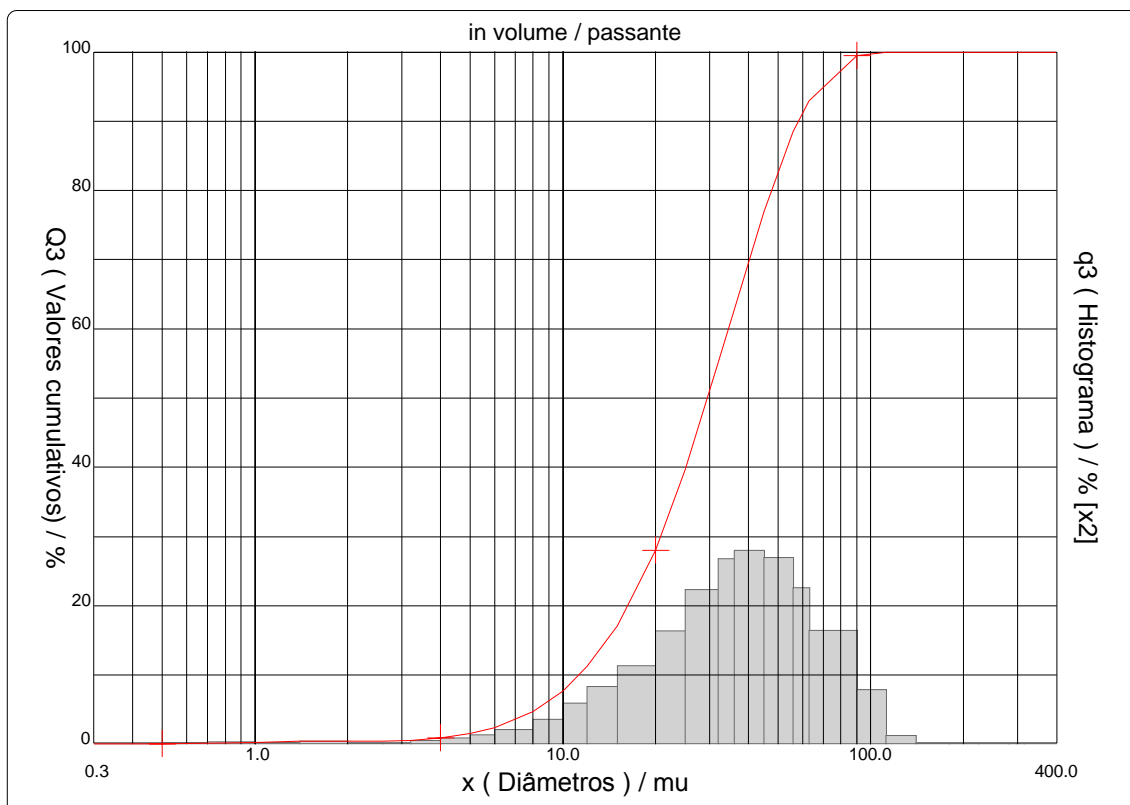
Ultrassom : 60 s (+durante)  
 Concentração : 95  
 Diâmetro a 10% : 11.27 mu  
 Diâmetro a 50% : 29.50 mu  
 Diâmetro a 90% : 58.31 mu  
 Diâmetro médio : 33.00 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Sim / Não  
 Medida./Limp. : 0/0/3  
 SOP : UEPG2

Valores cumulativos particulares

in volume / passante

x	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
Q3	0.00	0.04	0.13	0.20	0.38	0.38	0.38	0.55	0.92	1.55
x	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
Q3	2.39	4.68	7.70	11.22	17.09	28.03	39.65	55.10	62.81	76.89

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %



Núm. de série : 314

Ref : 2.r113.m14.66A0000/3.30/432/m25.0.5.10.1Fh.20.5.10.1Bh/Q-.0.0.0.0/70.0.15.g60.2.9.10.1.10.P1900.1.10.N.0/V 5.12/830



## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

### CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 mu - 400.00 mu / 30 Classes

Ref da amostra : Cu Type produit : MAT PRIMA Client : TEBECHERANI Comentários : 1,5g DE AMOSTRA Líquido : AGUA Agente dispersante : ALCOOL Operador : DOUGLAS Empresa : UEPG Localização : LIMAC Data : 05/04/2018 Hora : 14:17:09 Índice med. : 432	Ultrassom : 60 s (+durante) Concentração : 95 Diâmetro a 10% : 11.27 mu Diâmetro a 50% : 29.50 mu Diâmetro a 90% : 58.31 mu Diâmetro médio : 33.00 mu Fraunhofer Densidade/Fator : ----- Superfície específica : ----- Diluição automática : Sim / Não Medida./Limp. : 0/0/3 SOP : UEPG2
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Valores cumulados característicos in volume / passante

	0.30	0.50	0.70	1.00	1.40	2.00	2.60	3.20	4.00	5.00
x	0.00	0.04	0.13	0.20	0.38	0.38	0.38	0.55	0.92	1.55
Q3	0.00	0.02	0.06	0.04	0.11	0.00	0.00	0.17	0.35	0.60
	6.00	8.00	10.00	12.00	15.00	20.00	25.00	32.00	36.00	45.00
x	2.39	4.68	7.70	11.22	17.09	28.03	39.65	55.10	62.81	76.89
Q3	0.98	1.69	2.87	4.10	5.58	8.07	11.05	13.28	13.89	13.39
	56.00	63.00	90.00	112.0	140.0	180.0	224.0	280.0	315.0	400.0
x	88.45	92.97	99.47	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Q3	11.22	8.14	3.87	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
q3										

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %