



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Aeroespacial

Desenvolvimento de instrumentação para caracterização das propriedades térmicas de materiais de interface de sistemas espaciais

Autor: Gustavo Saraiva Lopes
Orientador: Professor Dr. Ronne Toledo

Brasília, DF
2024



Gustavo Saraiva Lopes

**Desenvolvimento de instrumentação para caracterização
das propriedades térmicas de materiais de interface de
sistemas espaciais**

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Professor Dr. Ronne Toledo

Brasília, DF

2024

Gustavo Saraiva Lopes

Desenvolvimento de instrumentação para caracterização das propriedades térmicas de materiais de interface de sistemas espaciais / Gustavo Saraiva Lopes. – Brasília, DF, 2024-

Orientador: Professor Dr. Ronne Toledo

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2024.

1. Propriedades térmicas. 2. Materiais de interface. I. Professor Dr. Ronne Toledo. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Desenvolvimento de instrumentação para caracterização das propriedades térmicas de materiais de interface de sistemas espaciais

CDU 02:141:005.6

Gustavo Saraiva Lopes

Desenvolvimento de instrumentação para caracterização das propriedades térmicas de materiais de interface de sistemas espaciais

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Professor Dr. Ronne Toledo
Orientador

Professor Dr. William Reis
Convidado 1

Professor Dr. Lui Txai Calvoso Habl
Convidado 2

Brasília, DF
2024

Resumo

Os materiais de interface térmica são aqueles utilizados na microeletrônica com o intuito de melhorar o rendimento da transferência de calor entre a fonte e o dissipador, aumentando a área efetiva de troca. Devido ao crescente aumento na capacidade de processamento e à miniaturização dos componentes eletrônicos, se faz necessário um controle térmico cada vez mais preciso e robusto para garantir a manutenção da temperatura dentro da faixa de operação dos componentes eletrônicos. Neste trabalho, objetiva-se desenvolver um equipamento de instrumentação capaz de mensurar a condutividade térmica de materiais de interface dos subsistemas espaciais. Em específico, será medida a condutividade térmica de pastas térmicas que, dentre outros, são os materiais de interface utilizados na fixação destes subsistemas.

Palavras-chaves: Materiais de interface; Condutividade térmicas; Instrumento de medição.

Abstract

The thermal interface materials are used in microelectronics to improve the heat transfer rate between the heat source and sink, by increasing the effective area of contact. Due to the processing capability improvement and the miniaturization of electronic components, it is required a sturdy and precise thermal control to guarantee the maintenance of the temperature in the electronic components operation temperature range. The objective of this project is to develop an equipment capable to measure the thermal conductivity of space systems thermal interface materials. In specific, the thermal conductivity of thermal greases will be measured that, between others, are materials used on the joints of those subsystems.

Key-words: Thermal interface materials; Thermal conductivity; Measurement equipment.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama parede plana	24
Figura 2 – (a)Visão macroscópica de duas superfícies em contato; (b) Visão microscópica da área de contato efetivo entre duas superfícies rugosas; (c) Representação das lacunas de ar entre as superfícies preenchidas com um material de interface	26
Figura 3 – Pasta térmica a base de silicone com múltiplas partículas condutoras	33
Figura 4 – Equipamento de medição de materiais de interface	34
Figura 7 – Circuito elétrico do Módulo MAX6675	38
Figura 8 – Representação esquemática do equipamento de medição de condutividade térmica	42
Figura 9 – Ilustração do equipamento e localização dos termopares	43
Figura 10 – Vista isométrica do equipamento	47
Figura 11 – Vista lateral do equipamento	47
Figura 12 – Vista superior do equipamento	48
Figura 13 – Vista isométrica do tarugo superior	48
Figura 14 – Furos de alocação dos termopares	49
Figura 15 – Vista inferior do equipamento	50
Figura 16 – Representação do reservatório de circulação de água	50
Figura 17 – Condições de contorno da simulação térmica	53
Figura 18 – Malha utilizadas na simulação	54
Figura 19 – Réplica de madeira	57
Figura 20 – Recipiente 1 após a retirada do modelo de madeira	58
Figura 21 – Recipiente 2 com as passagem do metal líquido	58
Figura 22 – Forno a gás utilizado para derreter o alumínio	59
Figura 23 – Alumínio derretido	59
Figura 24 – Peça fundida	60
Figura 25 – Peça usinada	62
Figura 26 – Peça usinada - tarugo inferior	62
Figura 27 – Posição e comprimento dos termopares	63
Figura 28 – Peça usinada - Reservatório de água	63
Figura 29 – Peça usinada - tampa de acrílico	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de pastas e materiais de mudança de fase	29
Tabela 2 – Condutividade térmica de diversos materiais	31
Tabela 3 – Dimensões do modelo preliminar do equipamento	51
Tabela 4 – Descrição das variações analisadas em cada iteração	52
Tabela 5 – Legenda da tabela 6	54
Tabela 6 – Resultados obtidos para cada iteração	55
Tabela 7 – Dimensões do modelo idealizado	56
Tabela 8 – Comparação dos resultados do modelo de referência e o modelo idealizado .	56
Tabela 9 – Dimensões utilizadas para a construção	56
Tabela 10 – Especificações ROMI D600	61

Lista de abreviaturas e siglas

UA	Unidade Astronômica
RI	Radiação Infravermelha
BLT	<i>Bondline Thickness</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
TIM	<i>Thermal Interface Material</i>
CPU	Computador Pessoal Unitário
CNC	Comando Numérico Computadorizado
NC	Numérico Computadorizado
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

Lista de símbolos

σ	Constante de Stefan-Boltzmann
α	Absortividade
ρ	Massa específica
ε	Emissividade
μ	Micro
δ	delta
Δ	Delta
k	Condutividade térmica
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor
A	Área
c_v	Condutividade térmica a volume constante
T	Temperatura

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
2	ESTADO DA ARTE	21
2.1	Ambiente espacial	21
2.2	Transferência de calor	22
2.2.1	Balanco térmico	23
2.2.2	Transferência de calor em superfícies planas	24
2.3	Controle térmico	25
2.4	Materiais de interface	26
2.4.1	Pastas térmicas	30
2.5	Equipamentos de medição de condutividade térmica	33
2.6	Processos de fabricação: fundição e usinagem	34
2.6.1	Fundição	34
2.6.2	Usinagem	35
2.7	Sensores termopar	36
3	ASPECTOS GERAIS	39
3.1	Escopo do Trabalho	39
3.2	Elaboração dos objetivos	39
3.2.1	Objetivo geral	39
3.2.2	Objetivos específicos	39
3.3	Estrutura do Trabalho	39
4	BANCADA EXPERIMENTAL	41
4.1	Requisitos gerais	41
4.2	Concepção geral do equipamento	41
4.3	Solução termodinâmica	42
4.4	Subsistema de aquecimento	45
4.5	Subsistema de resfriamento	45
4.6	Modelo 3D do equipamento	46
4.6.1	Detalhamento da estrutura	48
4.6.1.1	Parte superior	48
4.6.1.2	Parte inferior	49
4.7	Simulação térmica	50
4.7.1	Metodologia da simulação	52
4.7.2	Malha e parâmetros de qualidade	53

4.7.3	Resultados das análises térmicas	54
4.8	Construção do equipamento	56
4.8.1	Processo de fundição	57
4.8.2	Processo de usinagem	61
4.9	Montagem e utilização	64
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
	Referências	69

1 Introdução

O sistema de controle térmico de um equipamento tem como função monitorar e controlar as temperaturas internas do equipamento, garantindo que as temperaturas dos componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos permaneçam dentro das faixas requeridas de funcionamento, (s, o).

No âmbito espacial, controle térmico se tornou crítico, pois em órbita as espaçonaves devem dissipar grandes quantidades de calor devido à absorção da radiação solar e à geração de calor interno. Em sistemas aeroespaciais, engenheiros responsáveis pelo design das espaçonaves entendem que, com a miniaturização dos microprocessadores, concomitante ao aumento de potência gerada, o desenvolvimento do subsistema de controle térmico deve ser considerado requisito fundamental e presente durante todo o ciclo do projeto, (a, i).

Uma das ferramentas empregadas para compor este subsistema é a utilização de materiais de interface, dispositivos de controle térmico passivo cujo objetivo é facilitar a passagem de calor, ao utilizar materiais cuja condutividade térmica é elevada, e aumentar a área efetiva de transferência, ocupando regiões antes preenchidas por ar, cuja condutividade térmica é baixa. Dentre os tipos de materiais de interface, destacam-se as pastas, objeto deste relatório, cuja característica principal é a capacidade de compensar a rugosidade entre as faces em contato com seu aspecto volátil, acarretando em maior dissipação de calor.

Dentre as propriedades dos materiais de interface, a condutividade térmica tem fundamental relevância, pois dita sua aplicabilidade. Assim, o objetivo deste trabalho é construir um instrumento capaz de aferi-la, sob a luz dos conceitos clássicos da termodinâmica. Para tal, as etapas de *design*, simulação térmica e fabricação serão apresentadas detalhadamente de forma a possibilitar o futuro uso deste equipamento para fins de estudo de materiais de interface e sua utilização no cenário aeroespacial.

2 Estado da arte

2.1 Ambiente espacial

Na superfície terrestre, a exposição à radiação solar é diminuída devido à proteção da atmosfera. Porém, em órbita, os satélites estão submetidos à direta exposição eletromagnética proveniente de outros corpos celestes, com destaque ao Sol. Por outro lado, os satélites também radiam energia eletromagnética para a face escura do universo, (s, o). Nesta situação, o controle térmico de um satélite procura mitigar os efeitos indesejados destas radiações: cargas térmicas excedentes, potencialmente causadoras de danos aos componentes eletrônicos. Exemplos de ferramentas disponíveis para a realização deste controle são: refletores solares, isoladores multicamadas, tintas especiais, etc.

Durante uma missão espacial, os satélites se submetem a maior quantidade de radiação térmica quando estão em órbita. Nesta situação, existem dois tipos de fontes atuantes na espaçonave: fonte externa e fonte interna. A fonte externa é oriunda, principalmente, da radiação solar e da radiação refletida pela terra - Albedo - e também da radiação infravermelha emitida pela terra. As fontes internas são referentes às dissipações internas dos equipamentos.

A principal fonte de radiação advém do Sol. A energia solar transferida por segundo para uma unidade de área em uma superfície a uma distância de uma unidade astronômica (1 UA) é representada pela constante S:

$$S = 1368 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.1)$$

Além da radiação solar, outra carga térmica que atinge a espaçonave é o Albedo, que é uma porcentagem da radiação solar sendo refletida pela superfície terrestre. Esta radiação depende fortemente da distância da espaçonave em relação à superfície terrestre. Em geral, seu impacto é pequeno em comparação à radiação solar direta, sendo maior em órbita baixa, onde representa cerca de 25% do valor de S, (u, e).

A criação de um modelo de representação da variação do Albedo em relação à posição orbital é complexa, pois este varia constantemente de acordo com a região geográfica, mares, lagos ou terra, cobertura de nuvens, entre outros fatores que estão no campo de visão do satélite. Ou seja, seu valor depende da posição orbital do satélite e, portanto, do tempo. Além disso, a dificuldade na criação do modelo de representação se dá pela complexidade de separação de fenômenos de reflexão e reemissão de radiação pela terra.

Por meio de modelos já existentes, é conhecido que o Albedo é maior nas regiões continentais do que nas oceânicas e aumenta com o aumento da latitude, devido à grande quanti-

dade de neve e gelo, (i, e). Separadamente, seu valor é relativamente simples de ser calculado. Tomando um elemento de superfície $d\sigma$, a radiação refletida por essa porção é descrita pela *Lambert's cosine-law*. Tendo o valor de reflexão, é possível encontrar a radiação efetivamente refletida por meio da radiação incidente já conhecida. O efeito resultante seria a soma de todos os elementos de superfície terrestres iluminados pelo Sol, (u, e).

Concomitante à reflexão da radiação solar, a superfície terrestre emite radiação infravermelha (RI). A fim de atingir o equilíbrio térmico, a Terra emite parte da radiação solar que absorve no comprimento de onda RI. A intensidade da emissão depende de fatores como a temperatura da superfície, temperatura do ar, quantidade de nuvens e latitude, (i, e).

Por fim, existe outro carregamento térmico que deve ser considerado durante o momento de abertura de coifa do veículo lançador. Quando ocorre a liberação do satélite, além de estar sujeito ao calor da queima do propelente, o veículo estará em uma velocidade elevada em meio a uma região onde há partículas e a densidade atmosférica é ainda alta. O fluxo de calor causado pelo atrito com essas partículas é modelado pela equação 2.2, (s, o).

$$q = \frac{\alpha \rho V^3}{2} [W/m^2] \quad (2.2)$$

Onde α representa o coeficiente de acomodação (entre 0,6 e 0,8), ρ é a densidade atmosférica e V a velocidade relativa do veículo com a atmosfera. É importante ressaltar que a densidade atmosférica varia com a altitude, nível da atividade solar eletromagnética, etc.

2.2 Transferência de calor

Considerando que no ambiente espacial não há troca de calor por convecção, devido à inexistência de matéria (vácuo), os dois únicos modos de transferência de calor são condução e radiação. Sendo a condução preponderante no ambiente interno das espaçonaves e a radiação o modo principal de transferência de calor entre a espaçonave e o ambiente espacial.

A condução térmica pode ocorrer em líquidos, sólidos e gases. Em líquidos e gases, esta ocorre devido às colisões das moléculas, já nos sólidos, devido à combinação de vibrações de moléculas próximas, (n, e). A forma como a condução ocorre depende de diversos fatores: tipo de material, tipo de ambiente, condições do ambiente e a diferença de temperatura a que o meio está sujeito.

Considerando a transferência de calor em estado permanente, ou seja, não há variação das propriedades em relação ao tempo, o cálculo da condução de calor em uma parede plana de espessura x , área de seção normal ao fluxo de calor A , condutividade térmica K e taxa de condução de calor \dot{Q} é modelado pela equação 2.3, descrita abaixo, conhecida como equação de *Fourier*.

$$\dot{Q}_{cond} = -KA \frac{dt}{dx} \quad [W] \quad (2.3)$$

Já a radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas. Contrariamente à convecção e condução, a transferência de energia por meio da radiação não exige a existência de um meio. A radiação térmica é emitida e absorvida pelos corpos devido à diferença de temperatura, (n, e). A taxa de radiação que é emitida por uma superfície é dada por:

$$\dot{Q}_{emis} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad [W] \quad (2.4)$$

Onde $\sigma = 5.670 * 10^8 \frac{W}{m^2.K^4}$ é a constante de *Stefan-Boltzmann*, T_s é a temperatura da superfície em questão, A_s é a área da superfície e ε é a emissividade da superfície.

Por fim, a taxa de radiação absorvida por uma superfície depende da taxa de radiação incidente nesta, como mostra a equação abaixo:

$$\dot{Q}_{abs} = \alpha \dot{Q}_{inc} \quad [W] \quad (2.5)$$

Onde α é a absortividade média e \dot{Q}_{inc} é a taxa de radiação incidente.

2.2.1 Balanço térmico

A análise das propriedades dos materiais de interface através do uso do equipamento de medição requer o conhecimento de equações relacionadas ao conceito de balanço de energia, pois o equacionamento necessário partirá dos princípios da primeira lei da termodinâmica. A primeira lei da termodinâmica, ou lei da conservação de energia, diz que: A taxa de energia que entra menos a taxa de energia que sai do sistema é igual a variação da energia total do sistema.

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \Delta \dot{E}_{sistema} \quad [J] \quad (2.6)$$

Sendo $E_{ent} - E_{sai}$ correspondentes à energia líquida de transferência de calor, trabalho e massa e $\Delta E_{sistema}$ correspondente à mudança de energia interna, cinética, potencial, etc.

Uma das premissas necessárias para a formulação das equações governantes do equipamento de medição é que o sistema opere em condições permanentes, ou seja, as propriedades do sistema não variam em relação ao tempo. Além disso, não haverá realização de trabalho no equipamento, sendo assim, a única forma de transferência de energia será por meio de calor. Em suma, a equação 2.7 descrita abaixo será a equação governante para este caso de estudo.

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta U = mc_v \Delta T \quad [J] \quad (2.7)$$

Onde c_v é o calor específico a volume constante.

2.2.2 Transferência de calor em superfícies planas

Considerando a geometria plana formada pelo espalhamento da pasta térmica entre as duas superfícies de contato, o fenômeno físico de condução térmica pode ser modelado por meio de uma equação unidimensional com direção perpendicular a superfície, similar ao problema clássico da transferência de calor: “Condução de calor em uma parede plana”.

O problema 1D de condução de calor em parede plana pode ser derivado partindo de três premissas principais:

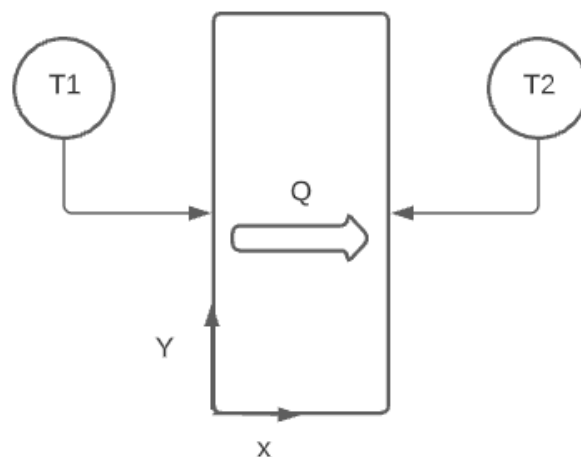
- Condição permanente de condução de calor;
- Condutividade térmica constante ao longo do material, e
- Condução de calor unidimensional, considerando que a espessura da parede é muito menor do que as outras dimensões.

Partindo destas premissas, as equações governantes de condução de calor, a equação de *Fourier*, podem ser simplificadas resultando na equação governante expressa a seguir:

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{q}_{cond}L}{K} \quad [K] \quad (2.8)$$

Onde T_2 é a temperatura no lado mais frio da parede, T_1 é a temperatura do lado mais quente da parede, \dot{q}_{cond} é o fluxo de calor por unidade de área em W/m^2 e L a espessura de parede, conforme mostrado no diagrama da Figura 1.

Figura 1 – Diagrama parede plana



Fonte: autor

Note que um rearranjo dos termos da equação 2.8, e com as medições das temperaturas nas superfícies de contato, T_1 e T_2 , permite a obtenção da condutividade do material de interface, a pasta térmica, conforme equação 2.9.

$$K = \frac{\dot{q}_{cond}L}{T_1 - T_2} \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (2.9)$$

2.3 Controle térmico

Sarvar et al. (2009) enfatiza o aumento de processamento de componentes, bem como a energia gerada, nas últimas décadas. O autor apresenta a comparação entre um Intel Pentium de 1ª geração que possuía dissipação de energia de 34,8 W e um processador de última geração 64-bit dual-core Intel Xeon® 7041 que dissipa 165 W. Além do aumento de potência, a evolução das tecnologias de nano e microeletrônica está intimamente atrelada à necessidade de sistemas de controle térmico robustos, que garantam a manutenção das temperaturas de trabalho na faixa operacional dos componentes em espaços cada vez menores.

Segundo Jaswal (2011), quase diariamente, novos componentes eletrônicos estão sendo introduzidos ao mercado com maior capacidade de processamento e menor tamanho. Este processo de miniaturização requer do projeto de controle térmico robustez para garantia de maior eficiência de dissipação de calor e vida útil. Para o cumprimento de tal requisito, soluções relacionadas à utilização de líquidos para resfriamento, materiais de interface, refrigeração por convecção, entre outros, são analisadas.

Os tipos de controladores térmicos podem ser divididos em sistemas ativos, que necessitam de energia elétrica para seu acionamento como resfriadores, aquecedores, circuitos de bombeamento, entre outros, e sistemas passivos, que não requerem uso de energia elétrica como materiais de interface ou materiais de revestimento, (s, o). Em projetos espaciais, ambas as formas de controle são combinadas, de forma a maximizar a eficiência do subsistema de controle térmico do veículo.

O uso de líquidos resfriadores exige acréscimo de partes como tubos, conectores, reservatórios ou bombas, o que aumenta a complexidade do sistema e, conseqüentemente, seu custo. Além disso, sistemas deste tipo consomem energia para seu funcionamento, que, em termos de projeto, representa desvantagem em relação a sistemas passivos, que não possuem tal demanda. Projetos de controle térmico com a utilização de resfriamento por convecção combinado com a aplicação de materiais com alta condutividade térmica se mostram tão ou mais eficientes que resfriamento por líquido. Além do fator eficiência, estes demonstram menor complexidade e custo.

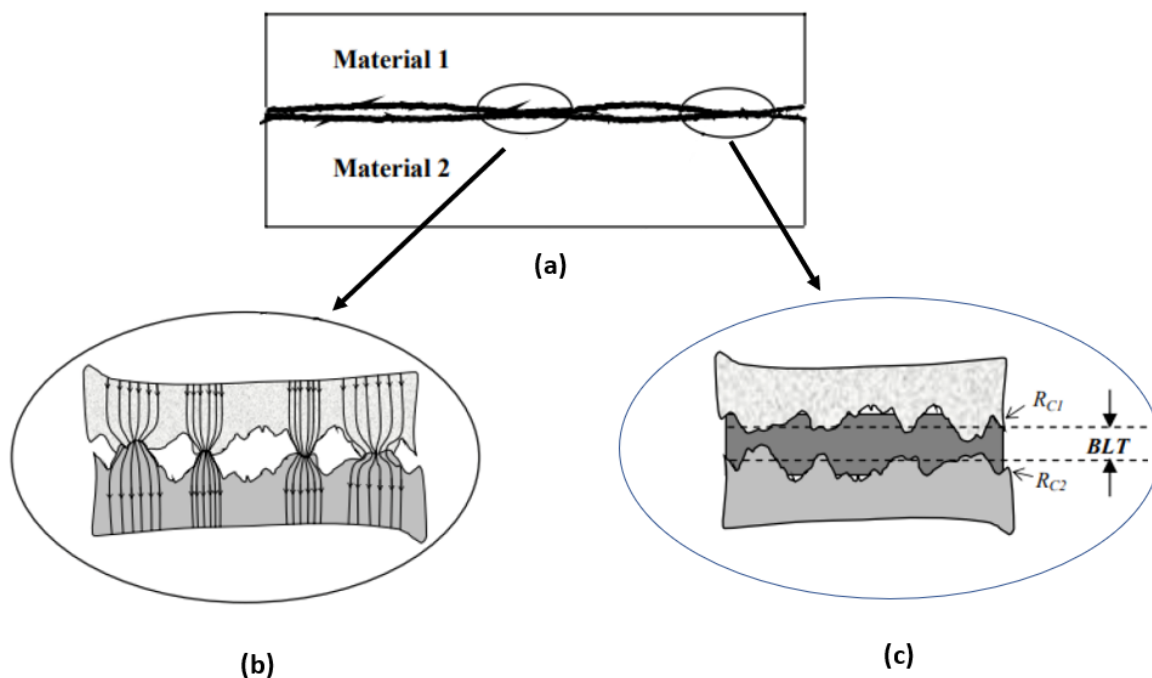
Equipamentos de resfriamento por convecção como *coolers* e ventoinhas são altamente aproveitados, desde projetos simples e com menor gradiente de temperatura envolvida, até pro-

jetos mais complexos. Isto é devido à eficiência da convecção para retirada de calor do sistema e, além disso, o custo energético de operação é reduzido em relação ao líquido. Porém, como citado no parágrafo acima, as formas de resfriamento são combinadas a fim de melhorar a relação entre custo e eficiência. Desta forma, *coolers* são utilizados juntamente à aplicação de materiais de interface, que são capazes de reduzir a resistência térmica e facilitar a dissipação de calor.

2.4 Materiais de interface

Quando duas superfícies rugosas e desiguais estão em contato, microscopicamente, há imperfeições entre ambas que geram pequenas lacunas de ar. Devido à condutividade térmica do ar ser baixa, em torno de $0,03 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, estas lacunas se tornam regiões de alta resistência térmica, (a, h). Para melhorar a transferência de calor, é interessante aumentar a área de contato efetivo, diminuindo as lacunas de ar. Na Figura 2-(b) é possível observar as zonas onde há o contato efetivo e as lacunas de ar existentes.

Figura 2 – (a) Visão macroscópica de duas superfícies em contato; (b) Visão microscópica da área de contato efetivo entre duas superfícies rugosas; (c) Representação das lacunas de ar entre as superfícies preenchidas com um material de interface



Fonte: SARVAR (2009, p.3)

No caso representado na Figura 2-(c), o material de interface utilizado é a pasta térmica. Por ser um composto pastoso e as superfícies não serem completamente uniformes, a espessura assumida após a aplicação não é uniforme. Porém, para fins de análise, é assumido que a pasta

possui uma espessura média entre as superfícies chamada de *Bond-Line Thickness* (BLT), que pode ser traduzido como espessura média de contato. A aferição do BLT pode ser feita com a utilização de um microscópio de varredura eletrônica, (m, i).

A espessura aproximada do *Thermal Interface Material* (TIM) é medida pela variação das ondulações da superfície e a determinação de um valor médio aproximado. Tal valor, conhecido como *Bondline Thickness*(BLT) ou espessura média de contato representa a espessura média, após a estabilização, do material de interface utilizado. No caso apresentado na Figura 2 (c), o TIM já aplicado representa variação na resistência térmica efetiva do sistema, equacionada como:

$$R_{efetiva} = \frac{BLT}{AK_{TIM}} + R_{c1} + R_{c2} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (2.10)$$

Sendo $R_{efetiva}$ a resistência efetiva total do sistema, K_{TIM} a condutividade térmica do material de interface e R_c as resistências das superfícies em contato A resistência térmica é influenciada por uma série de fatores como rugosidade, nivelamento, módulo de elasticidade e pressão. Para fins de projeto, é interessante reduzi-la ao máximo possível, diminuindo o valor da espessura do TIM, BLT, e utilizando materiais com alta condutividade térmica, fazendo assim com que o primeiro termo da equação seja próximo de zero. Por outro lado, reduzir a rugosidade reduz a quantidade de lacunas e a pressão de junção do TIM, o que também contribui para a diminuição do $R_{efetiva}$.

Tratando sobre a espessura média de contato das pastas térmicas, o autor (m, i) apresenta a caracterização de um chip de silício Intel Pentium 4, onde o objetivo seria determinar a BLT do material de interface utilizado e a composição do chip. O corpo de prova foi preparado através de polimento e cortes específicos para que se tornasse ávido à análise do microscópio óptico modelo Hitachi TM1000 e um espectrômetro, onde foram medidos a espessura média do TIM e os materiais de composição, respectivamente.

Como resultado, constatou-se que a espessura média do material de interface térmica variava ao longo do comprimento do chip devido a não regularidade de temperatura e pressão no processo de fundição. Com valor de espessura aproximado em 173 μm , conclui-se que o material se tratava de um híbrido entre um material de interface térmica e um material de fundição do chip, com predominância de silício.

A linearização da espessura do TIM garante a uniformidade da passagem de calor através das placas, portanto é ressaltada a importância da correta aplicação do composto. Dessa forma, a pasta térmica a ser analisada no equipamento de medição deve ser distribuída uniformemente para que o fluxo de calor seja, aproximadamente, constante em todos os pontos de contato da mesma.

Para melhorar a transferência de calor entre duas superfícies, uma das soluções possíveis é a utilização de materiais de interface, que são subsistemas de controle térmico passivos

e têm como objetivo o aumento da área de contato efetiva, como mostrado na Figura 2-(b) e (c). Mesmo com sua implementação, é possível observar que ainda existem lacunas de ar, porém a área de contato é aumentada significativamente. Analisando a estrutura microscópica de contato entre as duas superfícies, conclui-se que, devido à rugosidade, é interessante a utilização de materiais com composição pastosa como pastas, géis ou lubrificantes térmicos para melhor preenchimento de espaços. Dentre outros motivos, a vasta utilização de pastas térmicas na indústria eletrônica e microeletrônica ocorre graças a capacidade de se moldar às junções de forma eficiente.

De maneira geral, os diversos tipos de TIM têm como objetivo o preenchimento das lacunas de ar oriundas do contato de duas superfícies rugosas. Suas variações modificam as formas como tais lacunas são preenchidas, a depender da composição do TIM utilizado. Seu sucesso, no entanto, depende da forma de aplicação, do design da junção e da qualidade do material de interface utilizado.

A classificação de materiais de interface incluem: isolantes elastoméricos, fitas adesivas condutoras de calor, materiais de mudança de fase, condutores térmicos preenchedores de lacunas, componentes térmicos de cura em ativação, pastas térmicas e adesivos térmicos. Comumente, a maior utilização em projetos de engenharia é de pastas térmicas, esponjas térmicas (*thermal pads*) e materiais de mudança de fase.

Os materiais de mudança de fase são compostos que, em temperatura ambiente, permanecem em estado sólido, porém uma ligeira mudança de temperatura provoca mudança de fase, o tornando pastoso. O objetivo de utilização de materiais de mudança de fase é aproveitar as propriedades pré-cura das esponjas e pós-cura das pastas térmicas. Devido à pressão necessária para a junção ser demasiadamente grande e o padrão de espalhamento na área de contato não ser constante, a depender da aplicação e da composição, sua utilização é limitada em comparação às esponjas e pastas térmicas.

Já as pastas térmicas têm sido amplamente utilizadas em aplicações com demanda de alta performance e espessura pós-cura fina como *notebooks*, CPU's, processadores de alta performance, sistemas de comunicação, sistemas automotivos, entre outros. Em contraponto desta, as esponjas térmicas são requisitadas em casos de menor performance como *chipsets*, *diskdrives*, etc.

A diferença entre as pastas e esponjas térmicas se dá, principalmente, nas características pré e pós-cura. No processo pré-cura da pasta térmica, seu manuseio, carregamento e transporte são dificultados pela composição pastosa, pois os requisitos para manutenção de tal estado têm pouca margem de manobra. As esponjas, por outro lado, possuem estrutura bem definida, o que extingue estes empecilhos. Já no estado pós-cura, quando o TIM se encontra em plena eficiência, as propriedades térmicas das pastas alcançam valores maiores, possibilitando a utilização em sistemas de alto processamento, além do melhor preenchimento de lacunas.

Além da condutividade térmica, que é a capacidade do material de conduzir calor, outra importante propriedade a ser considerada é a densidade, principalmente em usos onde a relação peso x potência é importante como aeronaves ou espaçonaves. Nestas ocasiões, quanto menor a densidade, maior a gama de aplicações por não afetar significativamente o peso do veículo. Além disso, a tensão causada por choques durante o carregamento é diretamente proporcional à massa.

O processo de escolha entre os tipos de TIM para quaisquer usos pode ser elencado a partir das características principais de cada tipo, mostradas na tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens de pastas e materiais de mudança de fase

Pastas térmicas	
Vantagens	Desvantagens
Alta condutividade térmica	oscilações térmicas podem resultar em separação do polímero
Camada de fina espessura, logo baixa resistência térmica	Passível de poluição de outros componentes por excesso de substrato
Baixo custo	<i>pump-out e dry-out</i>
Materiais de mudança de fase	
Vantagens	Desvantagens
Mais estável e menos suscetível a separação do polímero	Condutividade térmica baixa comparado às pastas térmicas
Maior facilidade de aplicação e manuseio do que pastas	Necessário pressão constante, podendo gerar tensão mecânica
Maior longevidade por não passar pelo processo de <i>dry-out</i>	O preenchimento é reduzido e os vazios gerados podem causar variações térmicas cíclicas
Não possui tempo de cura após a aplicação	Pode causar aumento da resistência térmica da superfície

Fonte: autor

Além das vantagens e desvantagens citadas para cada tipo de TIM, é tácita a adaptação de escolha de um material de interface ao projeto e requisitos do mesmo. A escolha ideal para cada tipo de projeto leva em consideração os seguintes fatores, além dos supracitados do subtópico anterior, 2.4.1:

- **Condutividade elétrica:** Por ser tratar de polímeros compostos por materiais não condutivos, em sua maioria, a condutividade elétrica não entra em questão;

- **Temperatura de mudança de fase:** A temperatura do TIM deve ser tal que a mudança de fase ocorra e o ar seja expelido quando aplicado. No entanto, esta não deve acontecer durante o carregamento ou transporte, por exemplo. Ou seja, o controle de temperatura do material deve ser considerado desde a fabricação até a aplicação final;
- **Viscosidade:** Esta propriedade, quando a temperatura está acima da temperatura de mudança de fase, impede que o material escorra quando aplicado verticalmente e mantenha a forma da superfície aplicada;
- **Faixa de temperatura de aplicação:** A escolha da composição polimérica depende do ambiente no qual será utilizado;
- **Acabamento da superfície:** Alguns tipos de TIM desempenham a função de preencher os espaços melhor que outros a depender da granulometria e rugosidade das superfícies;
- **Tempo de vida:** Microprocessadores são projetados para ter um tempo de vida em torno de 8 anos, enquanto componentes de telecomunicação espaciais, décadas. O material deve ser capaz de desempenhar seu papel pelo tempo necessário para que o componente se mantenha com eficiência dentro do esperado.

2.4.1 Pastas térmicas

As pastas térmicas consistem em uma mistura de dois componentes: uma base polimérica e um material de preenchimento (composto metálico ou cerâmico). Silicone é comumente utilizado como base polimérica por conta da sua temperatura de estabilização, baixa energia de molhabilidade ¹ na superfície e baixo módulo de elasticidade. Os materiais de preenchimento são utilizados para aumentar a condutividade térmica da pasta e favorecer sua capacidade de transferência de calor. São exemplos: Alumina, Nitreto de alumínio, Óxido de zinco, Dióxido de silicone, Óxido de Berílio, etc, (s, a).

Em geral, quanto maior a quantidade do material de preenchimento, maior a condutividade térmica, logo maior a transferência de calor. Porém, o tipo e a máxima quantidade de material de preenchimento são ditados pela viscosidade e propriedades termodinâmicas da base polimérica.

Além disso, dentre outros fatores, para a escolha da proporção é importante levar em consideração o tamanho das partículas da matriz polimérica gerada. Para tamanhos maiores que o ideal, tais partículas podem gerar espaços entre a superfície e o material de interface e afetar a BLT, o que ocasionaria a não uniformidade da passagem de calor em todos os pontos da superfície, (r, a). A longo prazo, para componentes que operam em altas temperaturas, é

¹ molhabilidade: é a habilidade de um líquido em manter contato com uma superfície sólida, resultante de interações intermoleculares quando ambos são colocados em contato

possível a ocorrência de picos de temperatura nestes pontos, podendo gerar empenamento ou desgaste acentuado na região.

Boudenne et al. (2005) realizou estudos sobre o comportamento do polipropileno infundido de cobre, material de preenchimento, em 2 tamanhos de partícula diferentes. Como resultado, foi observado que o composto preenchido com partículas de Cu menores apresentou maior condutividade térmica do que o preenchido com partículas maiores, na mesma concentração.

A principal vantagem na utilização de pastas térmicas é a eficiência no preenchimento de espaços deixados entre duas superfícies. Como o ar tem baixa condutividade térmica, o máximo preenchimento das lacunas pela pasta é importante para o acréscimo da passagem de calor. A tabela 2 mostra a diferença entre as condutividades de alguns materiais, e nela é possível notar que as pastas térmicas possuem condutividade térmica mais de 40x maior que a do ar.

Tabela 2 – Condutividade térmica de diversos materiais

Materiais	Condutividade térmica a 25°C (W/mk)
Ar atmosférico	0,024
Água	0,058
Pastas térmica (média)	1 a 1,12
Alumínio	205
Cobre	401

Fonte: autor

Suas principais desvantagens consistem na dificuldade de manuseio e, principalmente, a contaminação de outros componentes por conta de excessos que escorrem da superfície, (r, a).

Para classificação e escolha da pasta térmica para um projeto, é necessária avaliação de 3 fatores: composição, condutividade térmica e tempo de cura. Obviamente, existem outros fatores como: força dielétrica, razão de mistura, tempo de vida, força de tensão, resistividade volumétrica, etc. Porém, para este estudo de caso, não serão relevantes.

- **Composição:** os tipos mais comuns de pastas térmicas encontradas no mercado brasileiro são de prata e óxido de zinco. A primeira é utilizada em casos em que o equipamento tenha um sobreaquecimento elevado devido ao alto processamento de dados. Ex.: PC *gamer*, veículos espaciais ou supercomputadores. Já as de óxido de zinco com base de silicone, são de uso comum e mais baratas em comparação às de prata, normalmente utilizadas em computadores e equipamentos eletrônicos que não possuem alto processamento;
- **Condutividade térmica:** esta característica dirá quanto o material térmico influenciará na passagem de calor, sendo que quanto maior a condutividade, melhor a passagem. Porém,

a escolha entre os mais diversos tipos de pastas térmicas depende da necessidade do equipamento e do projeto, pois materiais com alta condutividade térmica possuem custo elevado;

- **Tempo de cura:** é o tempo necessário para que a pasta, após a aplicação, alcance seu pico máximo de eficiência. Esta característica é importante em casos de usos em alta performance, pois a depender do tempo de cura e das condições do ambiente em que estará submetida, a capacidade da pasta será reduzida drasticamente antes mesmo de alcançar a máxima eficiência. Na aplicação estudada, o tempo de cura não impactará o sistema de proteção térmica, visto que, desde o lançamento, a pasta térmica já operará em sua máxima eficiência.

O autor Jiang (2022) explicita como a composição das pastas térmicas influencia dissipação de calor em um ambiente espacial. Neste ambiente, a espaçonave deve ser capaz de dissipar o calor proveniente da absorção dos raios solares e da geração de calor interna dos equipamentos. Portanto, se torna crítica a eficiência de transferência de calor pelo componente.

Como solução, pastas térmicas foram utilizadas como TIM das superfícies para a diminuição das resistências de contato das junções da espaçonave. De forma geral, são as mais utilizadas em espaçonaves, visto que alcançam valores de condutividade térmica mais altos, sendo eficientes em ambientes com altos gradientes de temperatura, e possuem densidade reduzida em comparação à materiais de mudança de fase e esponjas térmicas. Além destas propriedades, as pastas térmicas possuem a capacidade de preenchimento de micro espaços de aproximadamente 100μ entre duas superfícies.

Apesar das vantagens, é um desafio à engenharia o fato de que a degradação das pastas durante o uso reduz a confiabilidade e a eficiência de transferência de calor com o tempo. Esta degradação ocorre de duas formas conhecidas: *dry-out* e *pump-out*. A forma mais pronunciada em pesquisa é o *pump-out*, fenômeno induzido pelo deslocamento entre duas superfícies conectadas que, conseqüentemente, forçam o escoamento da pasta para fora do lugar proposto. Ainda, este fenômeno é ocasionado por tensões térmicas e mecânicas ou erro de montagem da junção em questão.

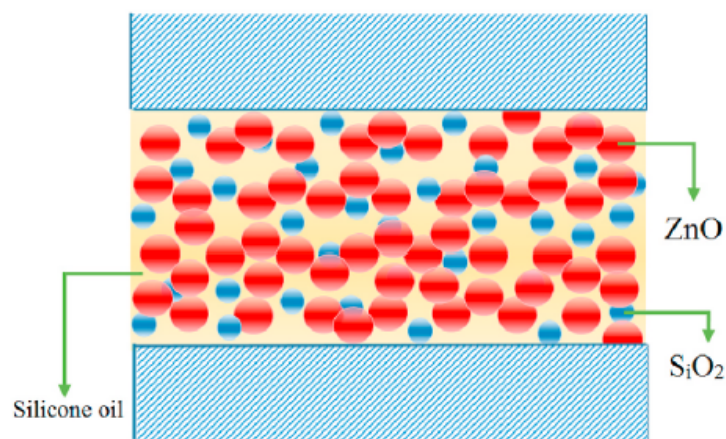
A principal causa de preocupação em relação à degradação por *pump-out* é que geralmente se inicia a partir de 1000 ciclos de funcionamento. Em contraste, a degradação por *dry-out*, que é de menor interesse por ser um processo de longa duração, se inicia pela formação de uma rede de drenagem, originada pela compressão da pasta, que força a matriz fluida a escorrer e se separar, devido à capilaridade e à presença de partículas de ar.

Ao contrário da degradação por *pump-out*, que é mais agressiva, mas pode ser mitigada, a degradação por *dry-out* é inevitável com o tempo de funcionamento. Para projetos espaciais com duração de muitos anos, é interessante estimar em quanto tempo o processo de *dry-out* ocorrerá, pois será o período em que a eficiência de condução da pasta cairá drasticamente.

A criação de um modelo de análise prático de como e quando o processo de *dry-out* irá acontecer no ambiente espacial é de alto custo e de difícil produção. Por mais que existam processos de teste, os dados gerados não são 100% confiáveis para aplicação prática devido às simplificações. Adicionalmente, é necessário existir um modelo teórico e analítico que seja capaz de realizar a predição deste fenômeno. Porém, o fenômeno depende de fatores como a variação de volume da pasta, a movimentação das superfícies e a evaporação do óleo de silicone com o tempo de uso.

Para a criação de um método teórico de análise, JIANG (2022) utilizou uma pasta térmica a base de silicone como matriz polimérica e óxido de zinco e dióxido de silicone como condutores térmicos. A composição é apresentada na figura 3.

Figura 3 – Pasta térmica a base de silicone com múltiplas partículas condutoras



Fonte: JIANG (2022, p.3)

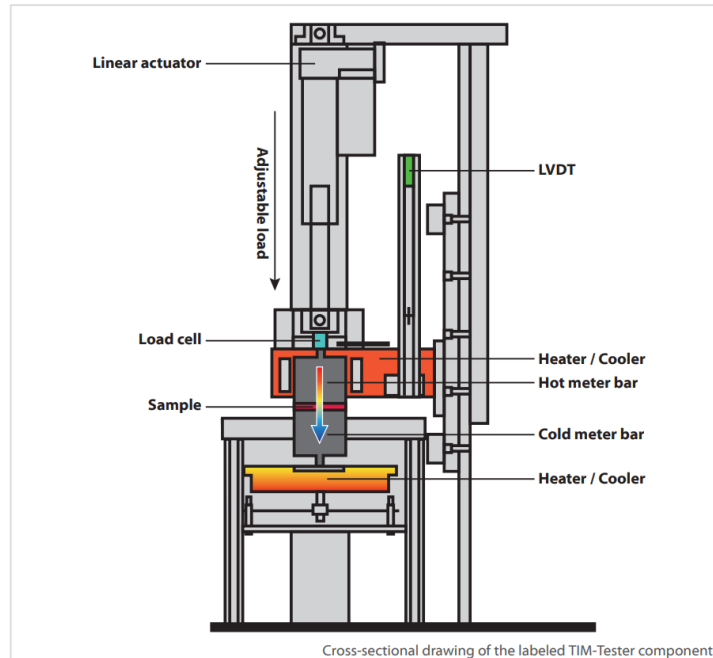
Em ambiente espacial, o processo de *dry-out* é atribuído, principalmente, à perda de óleo de silicone pela formação de finos canais capilares. Inicialmente, as partículas são distribuídas uniformemente, porém com o tempo de uso, a separação das partículas ocorre espontaneamente. Concomitante à separação da matriz polimérica do substrato condutivo, a condutividade térmica da pasta diminui gradativamente e a resistência térmica de contato se torna insignificante.

2.5 Equipamentos de medição de condutividade térmica

Como exemplo de equipamento que possui a mesma finalidade e funcionamento semelhantes, a empresa *Linseis*, produtora de instrumentos de análise térmica, criou o *Thermal Interface Material Tester (TIM-Tester)* com o objetivo de medir a condutividade térmica aparente de uma vasta gama de materiais de interface, (2, ()). Seguindo o disposto no método de testes padrão de medição de condutividade térmica para materiais de alta condutividade térmica, ASTM D5470, a empresa criou um modelo semelhante ao proposto neste projeto, com mais funcionalidades, no qual uma amostra é submetida à uma fonte quente e uma fonte fria

e o cálculo é baseado nos princípios da Lei de *Fourier*. Um esquemático do equipamento é apresentado na figura 4.

Figura 4 – Equipamento de medição de materiais de interface



Fonte: LINSEIS (2019)

2.6 Processos de fabricação: fundição e usinagem

2.6.1 Fundição

O processo de fundição consiste na fabricação de um metal inteiramente sólido através do vazamento de um metal líquido pela cavidade de um molde que possua o formato desejado da peça (s, o). Decorrido o tempo de resfriamento, o metal líquido se solidifica no formato do molde e gera a peça de trabalho.

Os tipos de fundição diferenciam-se pela forma como o molde é criado e o metal líquido é depositado, sendo os principais: fundição de investimento, sob pressão, centrífuga, de molde permanente, de gesso e de areia. O método utilizado para a fabricação foi o de fundição em areia, com os insumos e equipamentos pertencentes ao laboratório de fundição da Universidade de Brasília. Os moldes podem ser feitos em areia verde, areia seca, areia cimento e areia de macho, sendo que a escolha da matéria prima utilizada influi diretamente nas características do molde, tais como: permeabilidade, facilidade de manuseio, facilidade de desmoldagem, entre outros (L, A). Neste projeto, foi utilizada areia com sílica e 5% de bentonita, molhada em água durante o manuseio.

2.6.2 Usinagem

Para o processo de fabricação de um material, normalmente, haverá mais de um método conhecido que poderá ser empregado. A escolha entre os possíveis, segundo Kalpakjian(2002), deve ponderar, principalmente, os seguintes fatores:

- Tipo do material e suas propriedades;
- Propriedades da peça final;
- Tamanho, forma e complexidade do produto;
- Acabamento superficial exigido;
- Custo de ferramental; e
- Disponibilidade de equipamento e experiências operacionais.

Este projeto foi concebido com a proposta de ser usinado em chapas de alumínio, devido tanto ao custo ferramental, quanto à disponibilidade de equipamento e pessoal especializado. Portanto, a usinagem será o processo principal para a concepção do produto final deste relatório.

A usinagem pode ser definida como uma operação que, ao conferir à peça forma, dimensões e acabamentos, produz cavacos. E por cavaco entende-se: porção de material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular. (c, a)

Na usinagem de um material, a cunha (ferramenta de corte) penetra no material, o deformando. Ultrapassada a tensão de cisalhamento máxima do material, este começa a escoar e, a depender do formato da cunha utilizada, é formado um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte, dando a forma desejada à peça. (h, c)

Dentre as diversas operações possíveis durante o processo de usinagem, foi utilizado o fresamento. Segundo ?? as operações de fresamento são conhecidas por sua versatilidade, além de garantir altas taxas de remoção de material, devido à quantidade de arestas de corte da ferramenta. Neste tipo de operação, o material-alvo é fixado em uma mesa e a ferramenta de corte gira e se movimento transversal e longitudinalmente. Dentre os tipos, destacam-se os seguintes:

- Fresamento tangencial (concordante ou discordante);
- Fresamento tangencial de canais ou de perfis;
- Fresamento de topo;
- Fresamento frontal;

- Fresamento com fresa de topo esférica; e
- Fresamento de cavidades.

As máquinas utilizadas para a operação são do tipo Comando Numérico Computadorizado(CNC): um computador dedicado ao controle dos movimentos de uma máquina operatriz (e.g fresadoras e tornos CNC), (p, a).

Segundo ?? as maquinas de NC (controle numérico) e posteriormente as CNC são máquinas ferramentas que automatizam o processo de produção sem a necessidade de supervisão constante de um operador, além de permitir um ganho de produtividade. Controle numérico pode ser definido como uma operação de máquinas-ferramentas por meio de instruções especificadas em código para o sistema de controle de máquina.

Segundo ?? o procedimento de integração pode ser descrito como se segue.

- A peça é construída em um software de *design* e gera um arquivo CAD;
- O arquivo CAD é lido por um software CAM que interpreta as dimensões do desenho e as transformam em G-code, linguagem apropriada para máquinas CNC;
- O G-code é mandado, linha por linha, para a máquina CNC;
- A controladora interpreta os sinais e os envia para os *drivers* de potência dos atuadores;
- Os *drivers* ajustam o sinal e os envia para os atuadores, que transformam o sinal digital em um movimento mecânico; e
- Os movimentos são programados previamente, via CAM, e a ferramenta de corte inicia o procedimento de usinagem.

Além do tipo de máquina CNC (fresadora, torno, lâmina d'água, etc.), outro fator determinante para o tipo de operação de desejo é a quantidade de eixos disponíveis pelo equipamento. ??raz que, quanto maior o número de eixos, maior o grau de complexidade das peças usinadas. Para o presente projeto, foram utilizadas máquinas com 3 eixos de deslocamento disponíveis, além dos 3 eixos de rotação correspondentes a cada eixo, figura 2.6.2.

2.7 Sensores termopar

Sensores termopar são sensores de temperatura que fornecem medidas rápidas e precisas de um vasto intervalo de temperaturas, (M, c). Nas mais diversas indústrias, são vagamente utilizados por serem facilmente utilizados.

O funcionamento do termopar se baseia no *seebeck effect*: diferença de potencial produzida entre duas junções de condutores quando há uma diferença de temperatura entre eles.

Além disso, de acordo com ?? os dois condutores devem estar isolados eletricamente um do outro, e se manter assim durante a medição, para que o sinal de saída possa ser mensurado.

Na figura 2.7, percebe-se que não há diferença efetiva entre os fios conectados na ponta do termopar, visto que ambos os metais estão imersos na mesma região. Portanto, para que haja geração de força eletromotriz, cada condutor deve possuir composição química distinta um do outro, de forma que a resposta produzida seja diferente.

A escolha do termopar depende da faixa de temperatura de operação e das condições da medição, sendo que os tipos variam as faixas de temperatura ideais, tempo de resposta e o tipo de junção:

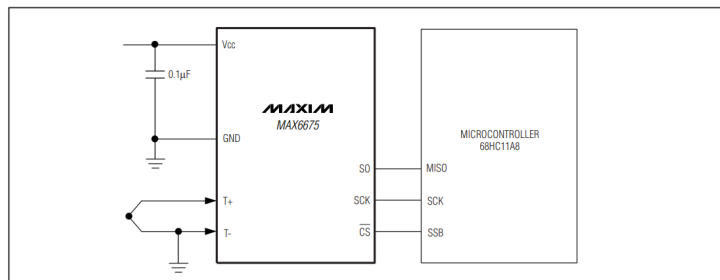
- **Termopares isolados:** A junção não está em contato com a bainha do sensor, logo tem a vantagem de transferência mais eficiente e tempo de resposta mais rápido. Porém, por ter contato direto, é impróprio para situações propensas à oxidação; e
- **Termopares não isolados:** O termopar não entra em contato com a bainha metálica e, normalmente, está isolado eletricamente.

Além de serem caracterizados pelo tipo de junção, são pela faixa de temperatura de operação, pode ser dos tipos k, j, T, E, N, S, R e B. Mais comumente utilizado, incluindo neste projeto, os sensores tipo k possuem faixa de operação de -200°C a 1260°C e são conhecidos por boa precisão e estabilidade, apesar de apresentar resultados inconsistentes próximo ao limite de temperatura. Por ser composto por uma liga de níquel-cromo, possui boa resistência a oxidação, ??

Para coletar os dados produzidos, é necessário conectá-lo a um sistema de aquisição de dados, cujo objetivo é fornecer dados digitais a partir da medição de grandezas físicas. Em outras palavras, é um sistema de converter um sinal elétrico (voltagem) em um dado de engenharia (temperatura).

Neste projeto, para compor este sistema serão utilizados um Arduino Uno R3 e um módulo MAX6675. O módulo MAX6675 tem a função principal de amplificar e converter o sinal transmitido pelo termopar, que originalmente chega em mV, para que o processamento seja realizado pelo Arduino. O módulo possui faixa de temperatura de -20°C a 85°C , o que limita a faixa de operação do próprio termopar, e possui 4 entradas de conexão, sendo uma de fonte de energia e 3 de comunicação com o Arduino. Segundo o *Datasheet* do fabricante, o circuito de conexão elétrica entre o módulo e o Arduino segue as especificações da figura 7.

Figura 7 – Circuito elétrico do Módulo MAX6675



Fonte: Autor

3 Aspectos gerais

3.1 Escopo do Trabalho

O projeto de conclusão de curso compreenderá o dimensionamento teórico e construção do instrumento de medição de condutividade térmica de pastas térmicas.

3.2 Elaboração dos objetivos

3.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um instrumento de medição de condutividade térmica de materiais de interface de sistemas espaciais.

3.2.2 Objetivos específicos

- Criar o *design* o equipamento com base em análises termodinâmicas; e
- Documentar o processo de construção do equipamento via usinagem e fundição.

3.3 Estrutura do Trabalho

- Parte 1: A parte 1 deste projeto objetiva o levantamento bibliográfico, o equacionamento teórico e a modelagem 3D do projeto, e
- Parte 2: A segunda parte tem como objetivos a concepção da estrutura, com base em análises termodinâmicas e a construção do equipamento via fundição e usinagem.

4 Bancada experimental

4.1 Requisitos gerais

Vista a teoria e conceitos por trás do projeto, a próxima etapa é a descrição detalhada da solução. Inicialmente, é necessário estabelecer as premissas da análise teórica.

- Regime permanente, ou seja, as propriedades não variam em relação ao tempo;
- O equipamento será isolado de tal forma que a análise teórica para a transmissão de calor será considerada unidimensional. Dessa forma, considera-se o eixo vertical ao centro do equipamento como direção do fluxo de calor;
- Serão desconsiderados efeitos gravitacionais, cinéticos, geração de energia interna e efeitos advindos da turbulência do escoamento;
- O ambiente controlado de utilização do equipamento possibilitará a consideração de inexistência de convecção e radiação de calor do equipamento com o meio, apenas com o fluido de trabalho, e
- A análise será realizada considerando equilíbrio termodinâmico.

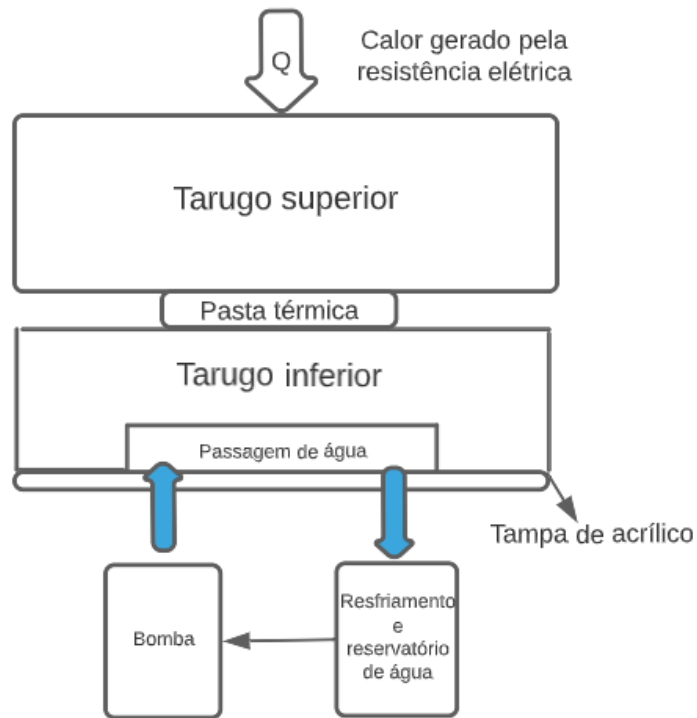
4.2 Concepção geral do equipamento

A Figura 8 apresenta a concepção geral do equipamento. Para a explicação de seu funcionamento, foi dividido em duas porções: o subsistema de aquecimento (superior) e subsistema de resfriamento (inferior).

A porção superior compreenderá as resistências elétricas e o tarugo superior, na qual ocorrerá o aquecimento do equipamento, a fim de gerar um fluxo de calor que atravesse todo o equipamento, incluindo a pasta térmica. Para que haja equilíbrio termodinâmico do sistema, ou seja, a quantidade de calor retirada ser aproximadamente igual à acrescida, na porção inferior do equipamento ocorrerá o resfriamento do calor incidente através de convecção. Para desempenhar esta função, será utilizada uma bomba de indução elétrica, que fornecerá a pressão necessária para que a água escoe dentro do espaço reservado, e um resfriador para garantir que o fluido inserido esteja na temperatura requerida.

O objetivo do equipamento é determinar a condutividade térmica da pasta térmica inserida entre ambos os tarugos. O fluxo de calor, direcionado para baixo devido à diferença de temperatura, de acordo com (n, e) é constante para as condições de contorno propostas. Esta

Figura 8 – Representação esquemática do equipamento de medição de condutividade térmica



Fonte: autor

suposição é confirmada na seção 4. Sendo o fluxo de calor constante e tendo as temperaturas medidas por termopares, Figura 8, é possível determinar a condutividade térmica da pasta, como demonstrado no capítulo a seguir.

4.3 Solução termodinâmica

Dar-se-á início ao cálculo de transferência de calor, através do qual será possível mensurar a condutividade térmica da pasta térmica, partindo da derivada básica que descreve a transferência de calor em 1 dimensão. Pressupondo as condições de contorno descritas na seção 4.1 e utilizando o sistema de referência estabelecido na Figura 8:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(k \frac{\delta T}{\delta X} \right) + \dot{e}_{gen} = 0 \quad (4.1)$$

Considerando que não há geração interna de energia, o termo \dot{e}_{gen} é levado a zero. Além disso, o termo \mathbf{k} , que representa a condutividade térmica, não varia em relação a eixo x , logo é um termo constante e pode ser simplificado.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta T}{\delta X} \right) = 0 \quad (4.2)$$

Portanto, é possível chegar na seguinte conclusão:

$$\frac{d^2T}{dX^2} = 0 \quad (4.3)$$

A segunda derivada representa a curvatura de uma função. Por ser 0, isto significa que a curvatura é constante. Logo, qualquer reta pode ser considerada uma solução para essa equação diferencial, (n, e). Para provar esta teoria aplicada ao caso onde há apenas condução térmica, partiremos do sistema linear abaixo:

$$T_1 = a + bx_1 \quad T_2 = a + bx_2 \quad (4.4)$$

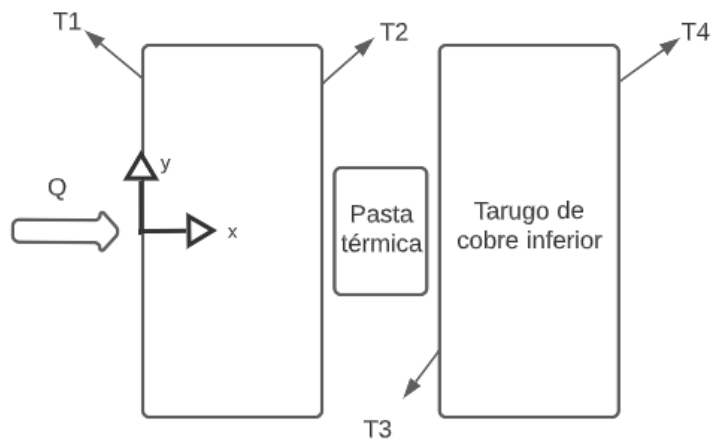
Resolvendo o sistema de equações e isolando a variável **b**, temos:

$$b = \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} \quad (4.5)$$

Através da equação 2.3, é possível enxergar que a variável **b** obtida na equação 4.5 se refere à porção da equação de *Fourier*, equação 2.3. Ou seja, para as condições apresentadas para o dimensionamento teórico do instrumento de medição, foi possível obter a prova de que uma solução linear pode ser a solução para a transferência de calor por condução, pois a variável **b** representa a proporção de mudança de temperatura em uma determinada espessura.

A solução de transferência de calor para o presente estudo de caso utilizará o sistema de referência proposto na figura 8. Como representado, o eixo de referência para a direção do fluxo de calor é o eixo normal à peça: *x*.

Figura 9 – Ilustração do equipamento e localização dos termopares



Fonte: autor

A Figura 8 representa o fluxo de calor que ocorrerá entre os dois tarugos e a pasta térmica. As superfícies denotadas por T_1 , T_2 , T_3 e T_4 são as superfícies que terão os valores de temperatura medidos pelos termopares.

Com base na teoria de transferência de calor, é possível afirmar que o fluxo de calor em um sistema fechado é constante. Logo, a quantidade de calor adicionada pela resistência elétrica deve ser equivalente à quantidade de calor que é resfriada pelo subsistema de resfriamento, (n, e). Para comprovar tal afirmação, utilizaremos a equação que representa o equilíbrio térmico de um sistema:

$$\dot{Q}_{entrada} + \dot{Q}_{saida} = \frac{dE}{dt} \quad (4.6)$$

A equação 4.6 diz que a variação da taxa de transferência de calor deve ser igual a variação da energia no sistema com o tempo. Explicitadas as condições as premissas na seção 4.1, considerou-se que o sistema opera em estado permanente, ou seja, não há variação de propriedades em relação ao tempo.

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{saida} \quad (4.7)$$

Confirmada a relação de igualdade entre a taxa de quantidade de calor que entra e a taxa de quantidade de calor que sai, equação 4.7, e sabendo como calcular tais quantidades através da equação 2.3, encontraremos a relação entre as quantidades de calor em todas as partes do equipamento, utilizando os pontos da Figura 8 como referência.

Fluxo de calor que passa pelo tarugo entre os pontos 1 e 2:

$$q_{1-2} = K_{1-2} \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (4.8)$$

Fluxo de calor que passa pela pasta térmica entre pontos 2 e 3:

$$q_{2-3} = K_{2-3} \frac{T_3 - T_2}{x_3 - x_2} \quad (4.9)$$

Fluxo de calor que passa pelo tarugo entre os pontos 3 e 4:

$$q_{3-4} = K_{3-4} \frac{T_4 - T_3}{x_4 - x_3} \quad (4.10)$$

Tais relações são importantes, pois, com as medições realizadas através de termopares nas superfícies 1, 2, 3 e 4, com o conhecimento das distâncias ao longo do eixo x estabelecido e dos materiais envolvidos, é possível apresentar a seguinte solução:

$$q_{1-2} = q_{2-3} = q_{3-4} \quad (4.11)$$

$$K_{1-2} \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} = K_{2-3} \frac{T_3 - T_2}{x_3 - x_2} = K_{3-4} \frac{T_4 - T_3}{x_4 - x_3} \quad (4.12)$$

A equação 4.12 nos mostra que uma relação entre as condutividades térmicas, nas diferentes partes do equipamento, pode ser determinada em função da variação de temperaturas e distâncias das respectivas partes. Portanto, para encontrar a condutividade térmica da pasta, basta solucionar a equação em prol de isolá-la.

Por facilidade de identificação, chamaremos a variável K_{2-3} de K_{pasta} e as variáveis K_{1-2} e K_{3-4} de K_{Tarugo} .

$$K_{pasta} = \frac{(T_2 - T_1)(x_3 - x_2)}{(T_3 - T_2)(x_2 - x_1)} K_{tarugo} \quad (4.13)$$

4.4 Subsistema de aquecimento

O calor do sistema será gerado por uma resistência elétrica. Através das informações do fabricante, é possível encontrar a potência gerada:

$$P = R * I^2 \quad [W] \quad (4.14)$$

A partir do cálculo de potência, é possível mensurar a quantidade de calor gerado por unidade de tempo. Para isso, é importante ressaltar que $1Watt = 1joule/segundo$. Tendo em vista esta proporção, a quantidade de calor pode ser calculado por:

$$\dot{Q} = P * \Delta t \quad [J/s] \quad (4.15)$$

$$\dot{Q} = R * I^2 * \Delta t \quad [J/s] \quad (4.16)$$

A equação 4.16 apresenta a quantidade de calor por unidade de tempo que passará pelo equipamento. Os requisitos do subsistema de resfriamento são ditados por este resultado.

4.5 Subsistema de resfriamento

Na porção inferior do equipamento, ilustrada na Figura 16, haverá uma cavidade no tarugo reservado para o escoamento de água. A vedação deste espaço será feita com uma tampa de acrílico devidamente vedada com o auxílio de *O-ring's*, materiais de borracha que exercem pressão no encaixe entre o tarugo e a tampa, mitigando a possibilidade de vazamento de fluido, além do parafusamento na face inferior do tarugo inferior.

Para este estudo de caso, é interessante que a água escoe de forma aproximadamente contínua, o que nos possibilitaria assumir estado permanente, no qual as propriedades deste fluido em uma determinada posição não variam em relação ao tempo. Isto é, a complexidade de

assumir que o fluido escoar de forma não constante e que este escoamento pode ser turbulento, não faz parte do escopo deste projeto. Em suma, para o cálculo de volume de líquido escoante necessário, utilizaremos as premissas da seção 4.1.

Como nos resultados obtidos acima, partiremos da equação de quantidade de calor para as premissas adotadas.

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T \quad [J/s] \quad (4.17)$$

Como sabemos associar a resistência elétrica à quantidade de calor por unidade de tempo, equação 4.16, e conhecidas as temperaturas medidas na entrada e na saída do volume de controle, é possível mensurar a vazão mássica de líquido necessária para proporcionar o resfriamento desta quantidade de calor.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c\Delta T} \quad [Kg/s] \quad (4.18)$$

Por fim, para encontrar a vazão volumétrica necessária, consideraremos a densidade da água (ρ) como sendo, aproximadamente, $997 \text{ Kg}/\text{m}^3$ e utilizaremos a equação da densidade para encontrar a vazão volumétrica de líquido necessária:

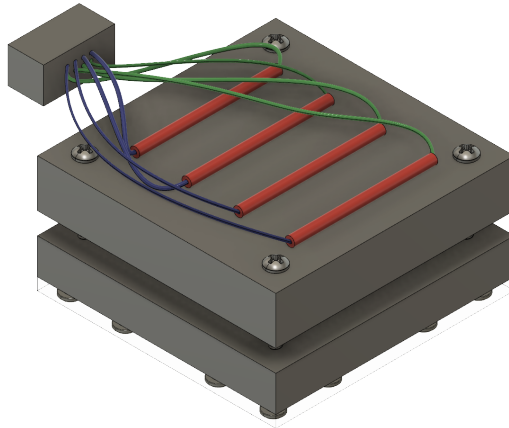
$$\dot{V} = \dot{m}/\rho \quad [m^3/s] \quad (4.19)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{c\Delta T\rho} \quad [m^3/s] \quad (4.20)$$

4.6 Modelo 3D do equipamento

Com a utilização do software de modelagem 3D *Fusion 360*, da empresa *Autodesk*, foi criado o modelo no qual processo de construção será baseado, mostrado, em vista isométrica, na figura 10.

Figura 10 – Vista isométrica do equipamento

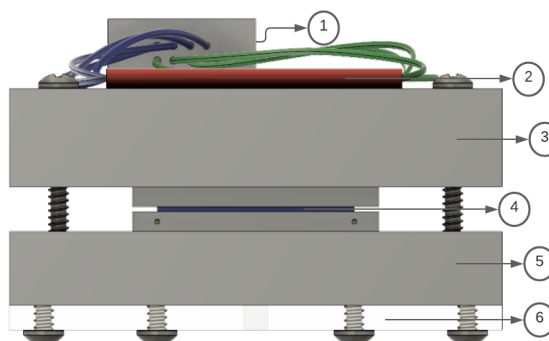


Fonte: autor

Para o melhor entendimento de seus componentes, na figura 11 é mostrada a identificação numérica de cada parte, cujas descrições estão abaixo.

- 1: Representação abstrata de uma fonte com conexões por fios com as resistências elétricas;
- 2: Representação abstrata das resistências elétricas;
- 3: Tarugo superior;
- 4: Pasta térmica;
- 5: Tarugo inferior, e
- 6: Tampa do reservatório de água.

Figura 11 – Vista lateral do equipamento



Fonte: autor

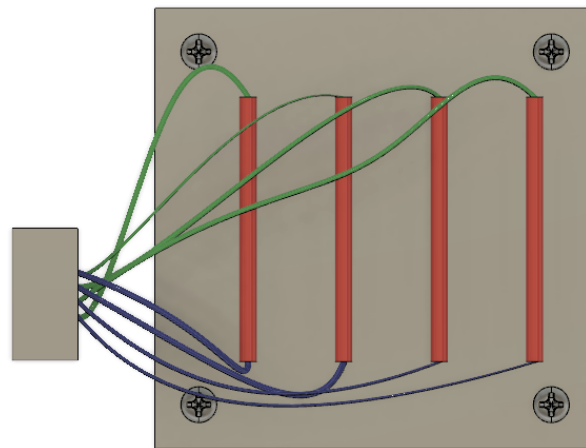
Vale ressaltar que o termo "abstrato" na definição da bateria e das resistências é utilizado pois se trata de uma representação visual mutável, não fidedigna a modelos reais.

4.6.1 Detalhamento da estrutura

4.6.1.1 Parte superior

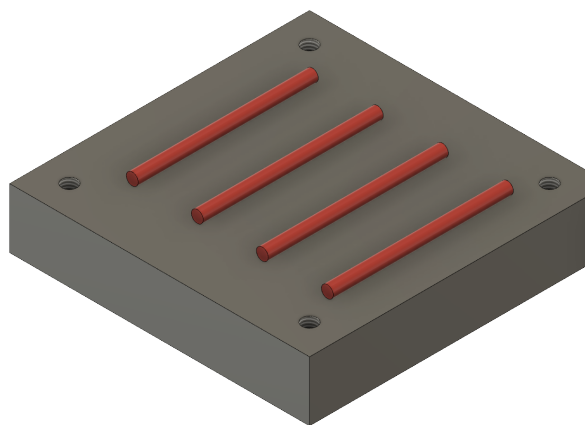
A porção superior, como explicado nos capítulos anteriores, será a porção de aquecimento, onde se encontram as resistências, representadas em vermelho nas figuras 12 e 13. A fixação do tarugo superior ao inferior será feita com quatro parafusos passantes M8x1.25 *Phillips*. Devido à baixa pressão exercida sobre o equipamento durante sua utilização, os parafusos serão rosqueados utilizando a ranhura feita por usinagem nos próprios furos, acoplados a arruelas de borracha para prevenir a transferência de calor da peça de alumínio para o parafuso.

Figura 12 – Vista superior do equipamento



Fonte: autor

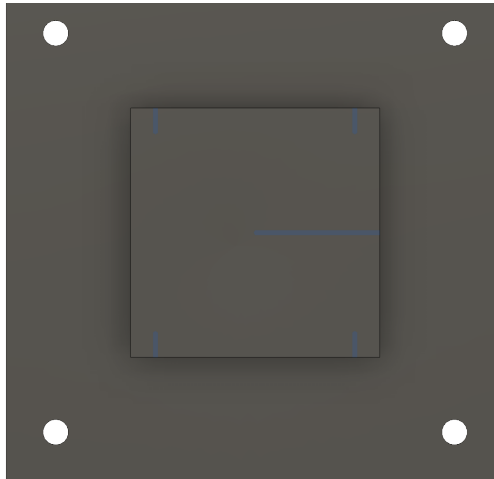
Figura 13 – Vista isométrica do tarugo superior



Fonte: autor

Para que a leitura das temperaturas ocorra nas superfícies especificadas na figura 8, os termopares serão inseridos nos orifícios representados em azul na figura 14, feitos nas faces laterais das elevações.

Figura 14 – Furos de alocação dos termopares



Fonte: autor

4.6.1.2 Parte inferior

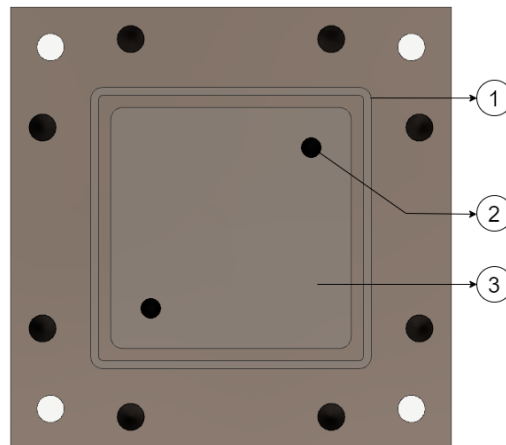
Para a fixação da tampa de acrílico, serão utilizados 6 parafusos M8x5 mm *Phillips*, distribuídos de acordo com a figura 15. Tal quantidade é justificada pela necessidade de evitar o vazamento de água do reservatório de circulação.

A cavidade ao redor do reservatório de circulação de água tem como objetivo a alocação de *O-rings* para a pressurização da tampa de acrílico e a mitigação do vazamento, junto à presença dos parafusos. A cavidade onde ocorrerá a circulação da água possui profundidade de 10 mm, como representa a figura 16, e a alimentação de água será via tubo, representados pelo item 2 na figura 15.

A figura 15 representa a vista inferior do equipamento e, a partir dos itens numerados, é possível identificar os seguintes componentes:

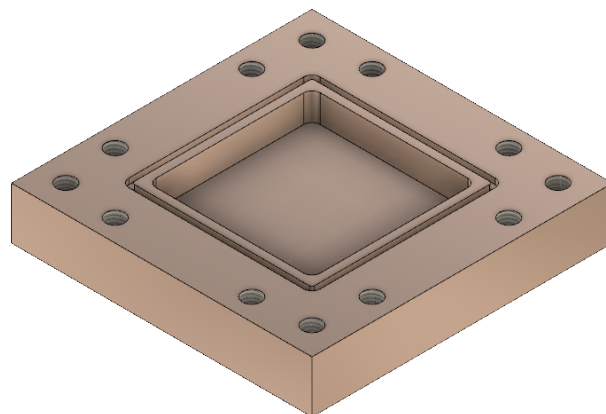
- 1: Espaço reservado para instalação de *O-rings*;
- 2: Furos na tampa de acrílico para entrada dos tubos de água;
- 3: Espaço vazio com profundidade de 10 mm para a circulação da água, e

Figura 15 – Vista inferior do equipamento



Fonte: autor

Figura 16 – Representação do reservatório de circulação de água



Fonte: autor

4.7 Simulação térmica

A simulação térmica possui como objetivo principal neste projeto a concepção do *design* do equipamento, de forma a alcançar, ou aproximar, as premissas adotadas.

Em primeira instância, para que o equipamento funcione adequadamente, é preciso criar um modelo cujas dimensões possibilitem um cenário em que a transferência de calor unidimensional seja possível. A metodologia para a criação deste modelo baseou-se em simulações iterativas, nas quais foram alteradas as dimensões de partes do equipamento para avaliar a variação da temperatura nas direções perpendiculares à assumida como direção de propagação do fluxo de calor.

Na prática, ao assumir que a transmissão de calor é unidimensional, assume-se que esta transmissão é irrelevante em outras direções, quando comparada à direção principal, reduzindo significativamente a complexidade de cálculo e o custo computacional. Portanto, ao realizar as simulações térmicas com diferentes dimensões, buscou-se aquelas que obtivessem a menor variação de temperatura na direção perpendicular ao fluxo, visto que este foi definido na direção vertical com sentido para baixo, partindo das resistências à porção de resfriamento.

Primeiramente, criou-se um modelo de pasta térmica simplificado em um formato retangular com espessura igual a 1mm que pudesse ser utilizado na simulação computacional. Apesar de irreal, já que na prática suas propriedades físicas não as permitem assumir dimensões exatas sem um modelador físico, com o modelo extrai-se a variação de temperatura, cujo valor deve ser o menor possível. Apesar de não ter sua dimensão propositalmente alterada para avaliação da reação nas simulações, definiu-se um valor de preenchimento da área da elevação pela pasta fixo em 80%, considerando que, na prática, a pasta ocupará algo próximo deste valor. Portanto, ao alterar a dimensão da área da elevação, o modelo de pasta térmica ocupará 80% do valor correspondente.

Como início do processo iterativo, criou-se um modelo preliminar da estrutura do equipamento, cujas dimensões estão na tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões do modelo preliminar do equipamento

Parte do equipamento	Comprimento x largura (mm^2)	Espessura (mm)
Tarugo superior	100x100	15
Tarugo Inferior	100x100	15
Elevação (superior e inferior)	50x50	4
Pasta térmica (modelo)	40x40	1
Tampa	100x100	5

Fonte: autor

A partir do modelo preliminar, criou-se iterações com mudanças em 3 dimensões específicas: **a espessura do tarugo superior, a espessura e a área das elevações onde a pasta será aplicada**. O objetivo é avaliar como as mudanças nas dimensões influem na variação de temperatura na direção horizontal e estimar as dimensões que apresentarem os melhores resultados, a fim de criar um modelo idealizado. As mudanças analisadas em cada iteração são mostradas na tabela 4. No total, foram realizadas 15 iterações.

Tabela 4 – Descrição das variações analisadas em cada iteração

Nº da iteração	Parte alterada	Dimensões preliminares(mm)	Dimensões analisadas(mm)
1	Espessura do tarugo superior	15	17
2		15	13
3		15	10
4		15	8
5		15	6
6	Área da elevação	50x50	20x20
7		50x50	30x30
8		50x50	40x40
9		50x50	60x60
10		50x50	70x70
11	Espessura da elevação	4	2
12		4	3
13		4	5
14		4	6
15		4	7

Fonte: autor

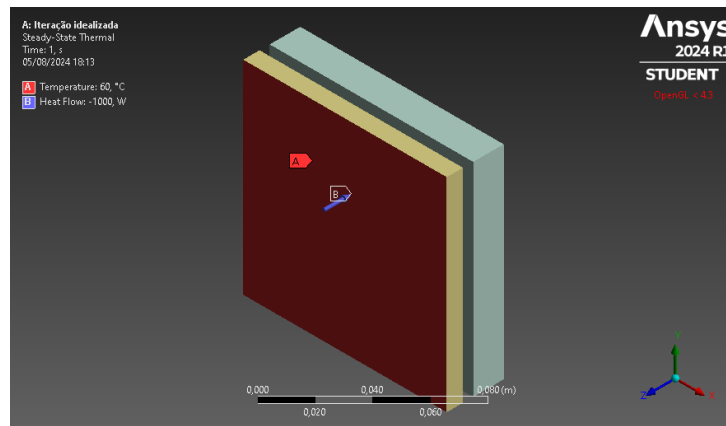
4.7.1 Metodologia da simulação

A simulação térmica do equipamento foi feita com a utilização do módulo *steady-state thermal analysis* do *software Ansys*, da empresa *Ansys Inc.*, (2, ()). O objetivo do projeto é analisar as propriedades da pasta térmica em estudo, logo o objeto de interesse da simulação é a variação que ocorre em sua superfície e ao longo de sua espessura.

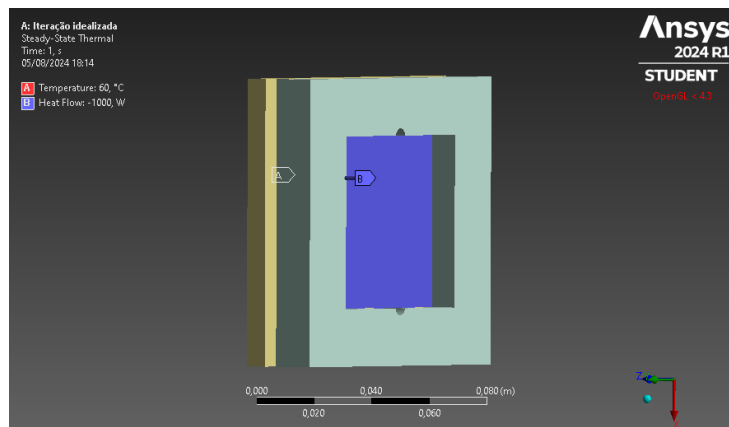
Inicialmente, foram definidas as condições de contorno que modelam o funcionamento do equipamento computacionalmente. Para a criação de um fluxo de calor, é necessário definir duas condições de contorno: uma temperatura especificada na superfície de entrada ou saída e um fluxo de calor na outra superfície. Visto que o objetivo é a análise da variação da temperatura e não seu valor, os valores adotados para a temperatura e fluxo de calor são genéricos.

Como as resistências serão as responsáveis por aumentar a temperatura na superfície superior, utilizou-se esta como a superfície de entrada, cuja temperatura específica é de 60°C, e a superfície inferior da cavidade onde haverá a circulação de água como a de saída, com um fluxo de calor especificado de 1000W com o sentido para baixo, por ser a porção de resfriamento. Ambas as superfícies estão representadas na figura 17.

Figura 17 – Condições de contorno da simulação térmica



(a) Temperatura especificada na face superior



(b) Fluxo de calor especificado na face inferior

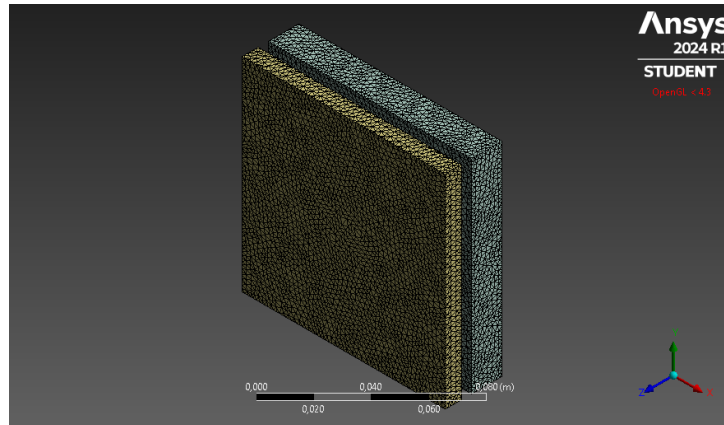
Fonte: Autor

4.7.2 Malha e parâmetros de qualidade

O *software Ansys*, em sua versão estudiantil, possui limitações quanto a quantidade de elementos por medida de comprimento, portanto, é inviável a construção de uma malha extremamente refinada. Neste, caso, utilizando o parâmetro "qualidade dos elementos" da ferramenta de malha do programa, buscou-se valores considerados bons, sem extrapolar a quantidade de elementos máxima. Segundo a documentação do proprietário, valores mínimos acima de 0,2 indicam boa qualidade de malha (2,).

Ademais, para aumentar os parâmetros de qualidade de malha, optou-se por retirar os furos dos parafusos e termopares, visto que estes concentram uma grande quantidade de elementos devido às configurações de malha do programa. Além disso, a presença, ou não, dos furos não tem relevância na análise térmica a ser feita, sendo utilizados apenas para fixação. A malha e os parâmetros de qualidade mencionados estão apresentados nas figuras 18a e 18b, respectivamente.

Figura 18 – Malha utilizadas na simulação



(a) Malha do equipamento

Mesh Metric	Element Quality
Min	0,21323
Max	0,99974
Average	0,77878
Standard Deviation	0,11698

(b) parâmetros de qualidade da malha

Fonte: Autor

4.7.3 Resultados das análises térmicas

Ao explicitar a metodologia, condições de contorno e a malha utilizada na simulação, nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para cada iteração. Os pontos de interesse da análise na superfície da pasta são as temperaturas máxima, mínima e no ponto central do modelo de pasta. A coordenada (0,0), ponto central do equipamento, será utilizado como ponto de referência para o cálculo.

Utilizando a mesma numeração da tabela 4 para as iterações, na tabela 6 estão apresentados os resultados obtidos e, para facilitação no entendimento, a tabela 5 mostra a correspondência entre o número das iterações e a respectiva mudança que elas representam.

Tabela 5 – Legenda da tabela 6

Legenda
Iteração 0 (referência)
Iterações 1-5(Espessura do tarugo superior)
Iterações 6-10(Área da elevação)
Iterações 11-15(Espessura da elevação)

Fonte: autor

Tabela 6 – Resultados obtidos para cada iteração

Iteração	Valor máx	Valor mín	Valor central	Variação bruta	Variação percentual
0	49,34°C	30,43°C	43,1°C	6,24°C	12,65%
1	47,75°C	29,34°C	41,65°C	6,10°C	12,77%
2	49,42°C	31,22°C	43,81°C	5,61°C	11,35%
3	50,85°C	32,83°C	45,83°C	5,02°C	9,87%
4	51,92°C	34,13°C	47,42°C	4,50°C	8,67%
5	59,93°C	35,56°C	49,20°C	10,73°C	17,90%
6	7,73°C	-64,28°C	-14,6°C	22,33°C	288,87%
7	33,02°C	-7,64°C	20,47°C	12,55°C	38,01%
8	43,16°C	16,30°C	35,23°C	7,93°C	18,37%
9	52,57°C	38,98°C	46,63°C	5,94°C	11,30%
10	54,66°C	45,58°C	48,8°C	5,86°C	10,72%
11	50,15°C	30,86°C	44,57°C	5,58°C	11,13%
12	49,44°C	30,65°C	43,61°C	5,83°C	11,79%
13	47,75°C	29,83°C	41,70°C	6,05°C	12,67%
14	46,77°C	29,26°C	40,74°C	6,03°C	12,89%
15	45,82°C	28,63°C	39,74°C	6,08°C	13,27%

Fonte: autor

- **Variação da espessura do tarugo:** segundo os dados da tabela 6, é possível perceber que, ao diminuir a espessura do tarugo, a variação de temperatura diminui, tendo como menor variação percentual a iteração 4, que corresponde à espessura de 8 mm para o tarugo superior;
- **Variação da área da elevação:** contrariamente ao caso anterior, ao aumentar a área da elevação onde a pasta será aplicada, obtém-se melhores resultados, e a menor variação é encontrada na iteração 10, que corresponde à área de $70 \times 70 \text{ mm}^2$; e
- **Espessura da elevação:** por fim, ao aumentar a espessura da elevação, é possível perceber o aumento da variação de temperatura, apesar de pequeno em comparação às iterações anteriores. Como resultado, a iteração 11 apresentou menor variação, correspondente à espessura da elevação de 2 mm.

Tiradas as devidas conclusões, foi construído um modelo, intitulado modelo idealizado, com as dimensões que obtiveram os melhores resultados para cada um dos 3 casos, mostradas na tabela 7.

Para aferir a veracidade da metodologia adotada para a criação deste modelo, realizou-se a simulação térmica e os resultados obtidos em comparação com os da estrutura preliminar (iteração 0) são apresentados na tabela 8.

Tabela 7 – Dimensões do modelo idealizado

Parte do equipamento	Comprimento x largura (mm^2)	Espessura (mm)
Tarugo superior	100x100	8
Tarugo Inferior	100x100	15
Elevação (superior e inferior)	70x70	2
Pasta térmica (modelo)	56x56	1
Tampa de acrílico	100x100	5

Fonte: autor

Tabela 8 – Comparação dos resultados do modelo de referência e o modelo idealizado

Iteração	Valor máx	Valor mín	Valor central	Varição bruta	Varição percentual
Referência	49,34°C	30,43°C	43,1°C	6,24°C	12,65%
Idealizada	57,03°C	49,40°C	53,24°C	3,79°C	6,65%

Fonte: autor

Ao fim do processo iterativo, as novas dimensões para o equipamento obtiveram redução percentual de 50% e redução de 2,45 °C na variação bruta de temperatura em relação ao modelo preliminar, mostrando a adequação da metodologia utilizada com o objetivo de redução da variação de temperatura na direção horizontal.

4.8 Construção do equipamento

A construção do modelo utilizou como base o *design* construído por meio das simulações térmicas e as condições fornecidas pela estrutura dos laboratórios da Universidade de Brasília campus Gama. Assim, em comparação às dimensões apresentadas na tabela 7, houve alterações no modelo, mostradas na tabela 9.

Tabela 9 – Dimensões utilizadas para a construção

Parte do equipamento	Comprimento x largura (mm^2)	Espessura (mm)
Tarugo superior	110x110	10,87
Tarugo Inferior	110x110	10,87
Elevação (superior e inferior)	70x70	5
Tampa de acrílico	110x110	5

Fonte: Autor

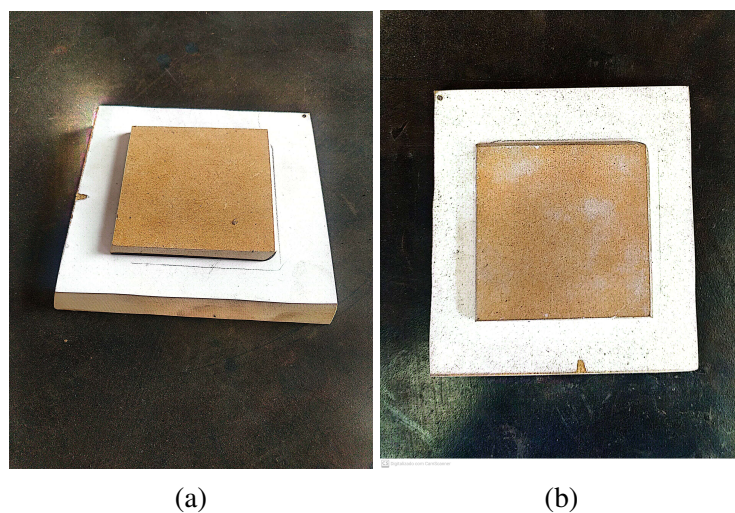
A construção do equipamento foi realizada por dois processos distintos: por fundição e usinagem. Tendo em vista que o método principal é a usinagem de chapas de alumínio lisas, adquiridas externamente, a opção de fundir, utilizando alumínio reutilizado, servirá, em outra etapa do projeto, para comparar os resultados obtidos entre os métodos. Para fins deste relatório, os resultados apresentados serão referentes às chapas de alumínio usinadas.

4.8.1 Processo de fundição

Abaixo, estão apresentados os procedimentos necessários para a fundição do equipamento.

- **Modelo de madeira:** uma réplica de madeira, no formato da peça, foi construída para dar forma à areia durante o processo de criação do molde, figura 19. Esta foi utilizada como base para o assentamento da areia, que toma sua forma em um recipiente de madeira específico para o processo. Tendo em vista que é necessária a usinagem da peça após o fim da fundição para que o acabamento seja refinado adequadamente, a réplica possui dimensões ligeiramente maiores que as dimensões do equipamento no CAD, tabela 9, de forma a possibilitar a retirada de material sobressalente: 120x120x16mm. Ademais, suas bordas foram levemente chanfradas, assim a desmoldagem seria facilitada.

Figura 19 – Réplica de madeira

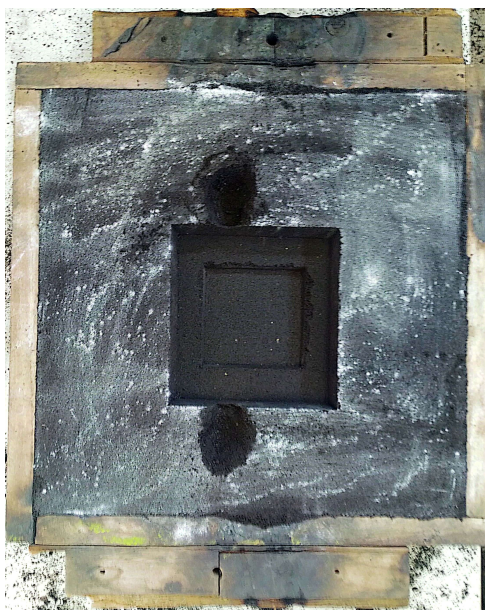


Fonte: Autor

- **Preparação da areia:** a fim de obter adesão entre a areia e a réplica de madeira e homogeneidade ao longo das camadas, a areia deve estar devidamente peneirada, já que a presença de blocos ou pedras poderiam gerar camadas irregulares e a consequente quebra do bloco durante a desmoldagem. Este fator é importante, principalmente, nas camadas próximas à réplica de madeira, pois garante que as dimensões do molde fiquem de acordo com o desejado.
- **Molde de areia:** para a criação do molde, foram utilizados dois recipientes de madeira, os quais foram preenchidos com areia, tendo em seu fundo a réplica de madeira. O objetivo deste processo, além de criar o molde na areia, é criar uma passagem para a deposição adequada do metal líquido. O primeiro recipiente, cujo fundo é forrado por uma placa para evitar vazamentos, recebe a réplica virada para cima e então a areia é despejada. Após seu

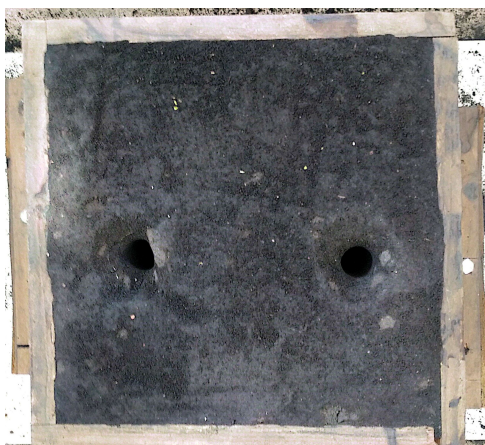
total preenchimento, é virado de cabeça para baixo e o segundo recipiente, de dimensões próximas para que possam ser fixados, é colocado acima e preenchido. Neste último, são criadas as passagens para o metal líquido ao preenchê-lo de areia ao redor de dois tubos de diâmetro próximo nos locais especificados na figura 21. A imagem 20 mostra o 1º recipiente, após o preenchimento e retirada da réplica de madeira e um pequeno desnível criado com uma pinça para guiar o metal líquido ao espaço de destino. A imagem 21 foi capturada após a fixação do 2º recipiente, acima do primeiro, com as passagens já criadas, na posição final para o derramamento.

Figura 20 – Recipiente 1 após a retirada do modelo de madeira



Fonte: Autor

Figura 21 – Recipiente 2 com as passagens do metal líquido



Fonte: Autor

- **Despejo do metal líquido:** finalizada a criação do molde, foram aguardadas 72h para

que a areia assentasse e se solidificasse. Decorrido o prazo, o metal foi derretido em um forno a gás cuja temperatura de trabalho chega a 720°C, figura 22. O metal utilizado foi o alumínio, proveniente de sucata reutilizada pelo laboratório. O processo de derretimento durou, em média, 3 horas, contando o tempo de aquecimento do forno, e o alumínio derretido, figura 23, foi despejado nos orifícios apresentados na figura 21.

Figura 22 – Forno a gás utilizado para derreter o alumínio



Fonte: Autor

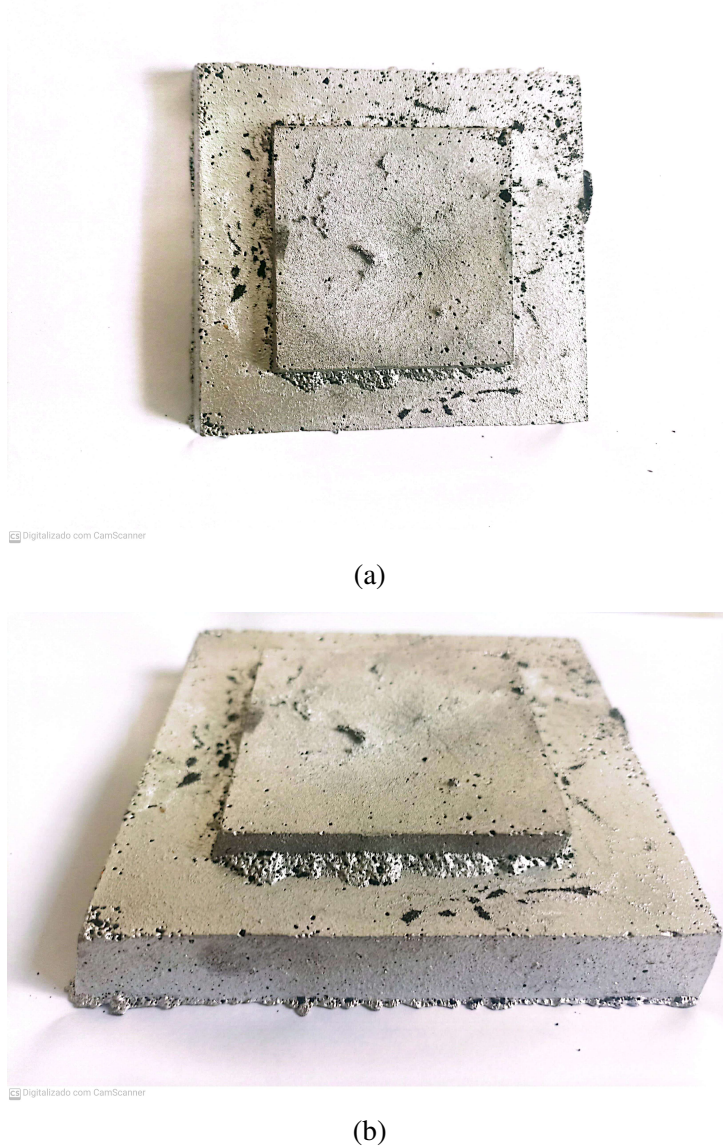
Figura 23 – Alumínio derretido



Fonte: Autor

Como resultado final da fundição, obteve-se a seguinte peça.

Figura 24 – Peça fundida



Fonte: Autor

Nota-se, na figura 24, a necessidade de acabamento superficial e acerto das dimensões finais. Para utilização futura, se faz necessária a realização das seguintes operações, principalmente: 1-Nivelamento: o manuseio do molde de areia gerou um pequeno desnível na superfície da elevação de ambas as peças, que deve ser nivelado para que a distribuição de calor seja uniforme nesta face; 2-Subtração de material: o alumínio sobressalente deve ser retirado de todas as bordas para o faceamento e acerto das dimensões; 3-Faceamento: após a retirada de material, o tratamento das faces é essencial para garantir o nivelamento e o aspecto visual; 4-Cortes: Por fim, são necessários cortes para a definição das dimensões finais, além dos necessários para a criação do reservatório de água, na superfície inferior da peça inferior e do rastro do *O'ring*.

Ademais, necessita-se da furação dos parafusos destinados à junção dos dois tarugos e à fixação da tampa.

Do ponto de vista da qualidade do material, é notória a diferença entre a peça produzida via fundição e a via usinagem. Isto é devido, principalmente, à qualidade do insumo utilizado em ambos os processos: via fundição, utilizou-se, majoritariamente, sucata de alumínio de peças reutilizadas, e na usinagem foram utilizadas chapas de alumínio. Assim, é esperada maior uniformidade e melhores propriedades mecânicas desta última. Já da perspectiva do processo, seria possível obter melhores resultados com a sua repetição para a correção de pequenos erros como desníveis, inconsistências entre as camadas e falhas pontuais no molde de areia.

Apesar disso, visto que o objetivo era a construção, o objetivo inicial foi cumprido e, com o devido tratamento e acabamento, a peça é perfeitamente utilizável para o estudo proposto para este projeto.

4.8.2 Processo de usinagem

O insumo utilizado para a usinagem do equipamento foi uma chapa de alumínio de dimensões 5/8" (15,87mm)x150x300mm, da qual foram usinados os tarugos inferior e superior. A máquina utilizada foi a ROMI D600, ferramenta de usinagem de alta precisão e sistema de interface integrado para aplicações diversas, cujas especificações estão abaixo, (ROMI,2024). Em ambos os casos, o *software* utilizado para o auxílio de CAD e CAM foi o *Autodesk Fusion 360*.

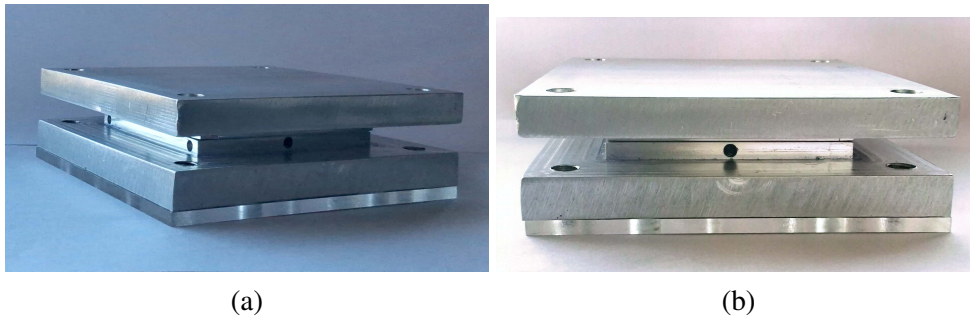
Tabela 10 – Especificações ROMI D600

Cone eixo-árvore(ISO)	40
Faixa de velocidade(RPM)	10 a 10.000
Magazine	20 ferramentas
Superfície da mesa	914x560 mm
Motor	25 cv/18,5 KW
CNC	Fanuc 0i-MF Plus

Fonte: ROMI (2024)

A tampa de acrílico foi gerada de uma peça com dimensões aproximadas de 5 x 200 x 200mm. Pela simplicidade da peça, optou-se por utilizar a Router CNC, uma máquina controlada por computador utilizada na indústria para usinagem de alta precisão em 3 dimensões, comumente utilizada para cortes, gravações, moldagens ou subtração de materiais como madeira, nylon ou acrílico. Alguns modelos podem realizar trabalhos em alumínio, geralmente com o propósito de gravação. Normalmente, a armação e os rolamentos da router não estão configurados para suportar uma alta rigidez e seu espaço de trabalho costuma ser maior que as fresadoras CNC. Ao fim da usinagem, obteve-se o seguinte resultado.

Figura 25 – Peça usinada

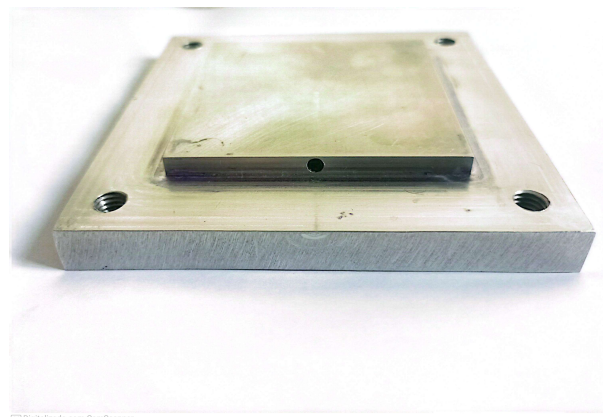


Fonte: Autor

Após a usinagem, alguns detalhamentos se fizeram necessários para o acabamento adequado da peça: rosqueamento dos furos, aumento dos furos que não receberiam rosca e a furação dos espaços alocados para os termopares.

O rosqueamento dos furos foi realizado manualmente com um macho de 3 passos para um M8 com passo de 1,25. Por praticidade, as roscas para os parafusos maiores, que juntam as duas peças, foram feitas apenas na peça inferior, assim como as roscas necessárias para a fixação da tampa. Os furos restantes, tanto os furos para os parafusos maiores na peça superior, quanto os furos de fixação na tampa, foram aumentados para 8mm para que a passagem dos parafusos fosse viável. Na figura 26, é possível notar o tarugo inferior, com os furos devidamente rosqueados, além da entrada de um dos termopares.

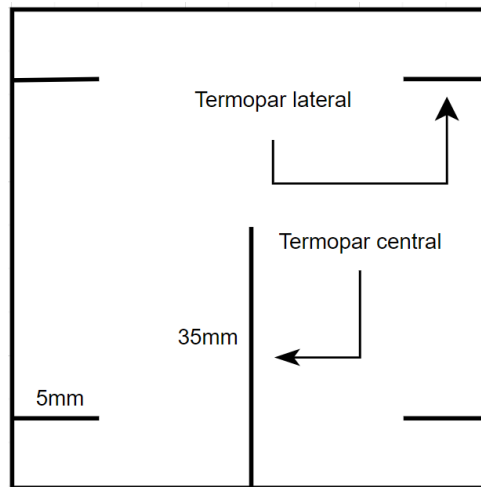
Figura 26 – Peça usinada - tarugo inferior



Fonte: Autor

Os furos destinados para os termopares foram feitos com a furadeira de bancada KMD-32 e uma broca de 3,5mm. Para a medição da temperatura média da elevação onde a pasta será posta, serão utilizados 5 termopares, distribuídos nos 4 cantos e no centro da elevação. A posição e comprimento de cada furo está disposto na figura 27. No total, foram feitos 10 furos destinados para alocação de termopares tipo k.

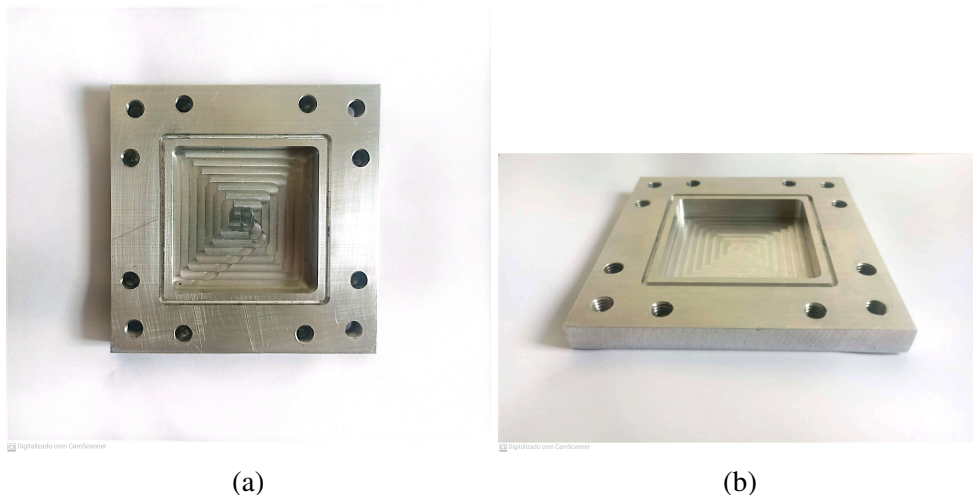
Figura 27 – Posição e comprimento dos termopares



Fonte: Autor

A figura 28 apresenta a superfície inferior do tarugo inferior, na qual nota-se o reservatório de água, os furos destinados à fixação da tampa de acrílico e o rastro do *O'ring*. Como apresentando no capítulo anterior, o reservatório possui 10mm de profundidade e foram projetos 8 furos M8 para a fixação da tampa.

Figura 28 – Peça usinada - Reservatório de água



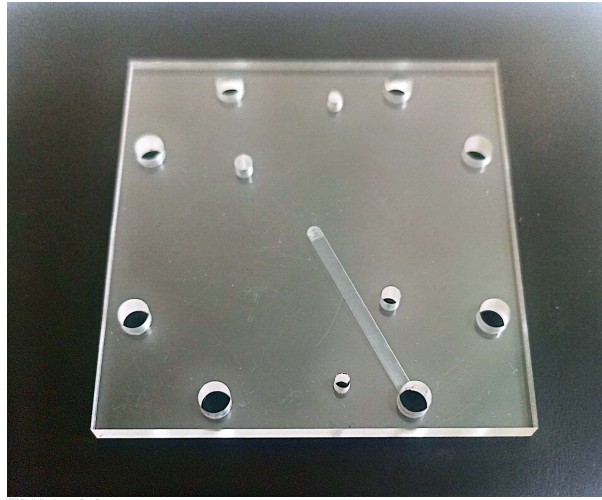
(a)

(b)

Fonte: Autor

A figura 29 mostra o resultado da tampa de acrílico após a usinagem.

Figura 29 – Peça usinada - tampa de acrílico



Os termopares a serem utilizados possuem diâmetro de, aproximadamente, 3,2mm. Na figura 26, nota-se que, ao definir a espessura da elevação como 5mm, o espaço de trabalho para a furação com a furadeira de mesa diminui, o que gerou dificuldades no momento de seu uso. Além disso, o furo do termopar central, cujo comprimento deveria ser 35mm, não chegou a tanto, pois o cabeçote da furadeira não permitia o alcance da profundidade desejada, chegando a apenas 33mm. Logo, para a melhoria deste aspecto do projeto, seria interessante o aumento da espessura da elevação, levando em consideração o diâmetro do cabeçote da furadeira.

Além disso, inicialmente, os cantos que definem os limites do reservatório e do rastro do *O'ring* eram cantos vivos - não curvados. Após reunião de planejamento da usinagem, fez-se necessária a alteração, adicionando cantos curvados a um raio de 3mm.

Da figura 29, percebe-se um rastro que parte do centro ao primeiro furo. Devido ao procedimento de "zeramento" do equipamento, isto é, a definição do ponto e da rota iniciais, a fresa criou o rastro visível. Ademais, como a peça de acrílico era reutilizada, há 2 furos que não constam no CAD realizado inicialmente, 16, porém, do ponto de vista prático, quando bem vedada, não afetarão o desempenho do equipamento.

4.9 Montagem e utilização

Passada a construção, é dado início ao processo de montagem. Para tanto, o seguinte material foi utilizado:

- 4 parafusos M8x25mm para junção dos dois tarugos;
- 8 parafusos M8x12mm para fixação da tampa;
- 1 mini gerador hidráulico 12v;

- 2 recipientes;
- 2 termopares tipo k;
- 1 módulo MAX 6675;
- 1 Arduino Uno R3;
- Resistências elétricas;
- 2 conectores de 5mm; e
- Um *O'ring* de espessura 2mm.

Em primeira instância, é necessária a fixação da tampa ao tarugo inferior, parte que não será modificada ou retirada com frequência. Inicialmente, aloca-se o *O'ring* no espaço destinado, mostrado nas figuras 16 e 28. Logo em seguida, utiliza os parafuso M8x12mm para rosqueá-los, fixando a tampa, figura 29.

Ainda na porção de resfriamento, serão utilizados dois conectores, nos quais os tubos serão encaixados. Para gerar o fluxo de água, o mini gerador hidráulico, conectado a uma fonte 12v, será posicionado e conectado ao tubo que liga ao reservatório de água. Para que a água que adentre o equipamento esteja resfriada e possibilite maior troca de calor, em um dos recipientes com água será despejado gelo, e o tubo de saída será direcionado ao outro recipiente.

Na porção de aquecimento, as resistências devem ser posicionadas e fixadas à superfície superior do tarugo superior. Por fim, após a aplicação da pasta térmica na elevação, utiliza-se os 4 parafuso M8x25mm para a fixação final.

A testagem se baseia na utilização da equação 4.13, a qual depende de 4 medições de temperatura, como mostra a figura 8. Assim, o início do teste depende da medição das temperaturas da água gelada e da superfície superior onde as resistências estão fixadas, que serão feitas com os termopares. Após, aloca-se os termopares nos espaços destinados para a medição da temperaturas em ambas as elevações. Como explicado acima, o módulo MAX6675 e o Arduino farão a digitalização dos dados obtidos pelo sensor para avaliação posterior dos resultados. Então, com as temperaturas coletadas, e com as informações geométricas da construção, é possível coletar a variação de condutividade térmica e aferir seu valor médio, assim como seu desvio padrão da média.

5 Considerações finais

O sistema de controle térmico ganha destaque a medida que a microeletrônica evolui. Em sistemas espaciais, tal afirmativa expõe a importância vital do funcionamento deste sistema para o sucesso de um projeto de missão espacial. Os materiais de interface, em especial, as pastas térmicas, são dispositivos de controle térmico passivos, cujo objetivo é o aumento da transferência de calor entre as fontes, processadores e baterias, e os subsistemas de resfriamento.

O objetivo deste relatório foi a construção de um equipamento capaz de realizar medições de condutividade térmica de materiais de interface através de dois processos de fabricação distintos: a usinagem e a fundição. Como resultado, o equipamento originado do processo de fundição alcançou os parâmetros desejados, necessitando, ainda, de refino via usinagem para sua utilização final. Já o originado do processo de usinagem alcançou o estado desejado ao combinar múltiplas ferramentas durante sua fabricação e se encontra apto para testes futuros.

Almeja-se, posteriormente, a testagem de ambos os modelos e aferir a precisão de suas medidas, em comparação com um ao outro e com modelos de simulação termodinâmica. Além disso, é possível a realização de estudos concernentes ao tipo e propriedades de materiais de interface, testando modelos pré-existentes e propondo novos modelos ou composição de materiais.

Referências

aaaa. Nenhuma citação no texto.

Adan Norton. Cnc plasma build. <https://adam-horton.blogspot.com/p/cnc-plasma-build_16.html>, 2012. Nenhuma citação no texto.

Ansys Inc. *Ansys - Engineering Simulation*. <<https://www.ansys.com/>>, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

R. D. L. BALDAM. *Fundição-Processos e Tecnologias Correlatas*. Saraiva Educação SA, 2014. Citado na página 34.

G. Beutler. *Methods of Celestial Mechanics: Volume II: Application to Planetary System, Geodynamics and Satellite Geodesy*. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

A. Capelli. *Automação industrial: controle do movimento e processos contínuos*. Ed. Érica, 2008. Citado na página 36.

Y. A. Cengel. *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications*. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 22, 23, 41, 43 e 44.

A. D. S. B. Costa. Projeto de fundição em areia. *Encontros de Iniciação Científica UNI7*, 9 (1), 2019. Citado na página 34.

L. L. Costa and P. N. d. Souza. Estudos de subsistemas de controle térmico para pequenos satélites para aplicação ao nanosatc-br, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 19, 22 e 25.

P. Jaswal and C. Dwevedi. Thermal interface materials used for improving the efficiency and power handling capability of electronic devices: A review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE TECHNOLOGY CREATIVE ENGINEERING*, 1(5), 2011. Citado na página 30.

Z. Jiang, J. Li, Z. Qu, L. Wang, and J. Miao. Theoretical analysis on thermal grease dry-out degradation in space environment. *International Journal of Thermal Sciences*, 179:107694, 2022. ISSN 1290-0729. doi: <<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107694>>. URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072922002290>>. Citado na página 19.

S. Jimenez and J. Alberto. Caracterización del material de interfaz térmica (tim) de un microprocesador. *Revista Tecnología en Marcha*, 26:36–41, 2013. Citado na página 27.

R. Leite and I. Muraoka. Estudo de técnicas para controle térmico de satélites. *Curso Propesa, CTA, São José dos Campos*, 1993. Citado na página 22.

Linseis. *Thermal Interface Material Tester (Tim-tester)*. <<https://www.linseis.com/en/products/thermal-conductivity-instruments/tim-tester/>>, 2019. Citado na página 33.

Á. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, and M. B. da Silva. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher, 2015. Citado na página 35.

A. O. McMahon. *Introduction to Thermocouples and Thermocouple Assemblies*. ISA, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

A. Mostafa, M. I. El-Saftawy, E. I. Abouelmagd, and M. A. López. Controlling the perturbations of solar radiation pressure on the Lorentz spacecraft. *Symmetry*, 12(9), 2020. ISSN 2073-8994. doi: <10.3390/sym12091423>. URL <<https://www.mdpi.com/2073-8994/12/9/1423>>. Citado na página 21.

R. M. Park. Thermocouple fundamentals. *Course Tech., Temp*, pages 2–1, 2010. Citado na página 37.

H. Polastrini. Desenvolvimento de uma máquina cnc de baixo custo com software e hardware abertos. *Relatório (Graduando em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Minas Gerais*, 2016. Citado na página 36.

F. Sarvar, D. Whalley, and P. Conway. Thermal interface materials - a review of the state of the art. 2 2009. URL <https://repository.lboro.ac.uk/articles/conference_contribution/Thermal_interface_materials_-_a_review_of_the_state_of_the_art/9553214>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

A. J. Schuitek et al. Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente. 1997. Citado na página 35.

P. Smid. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc., 2003. Citado na página 36.

J.-W. Zhao, R. Zhao, Y.-K. Huo, and W.-L. Cheng. Effects of surface roughness, temperature and pressure on interface thermal resistance of thermal interface materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140:705–716, 2019. ISSN 0017-9310. doi: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.045>>. URL <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793101931556X>>. Citado na página 26.