

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Sthevan Klingel

**Caracterização de pastas térmicas poliméricas aplicadas em eletrônicas de
potência**

Blumenau

2022

Sthevan Klingel

**Caracterização de pastas térmicas poliméricas aplicadas em eletrônicas de
potência**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina Campus Blumenau como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materias.

Orientador: Prof. Dr. Johnny de Nardi Martins
Coorientador: Walter Jony Coelho Thiel

Blumenau

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Klingel, Stevan

Caracterização de pastas térmicas poliméricas aplicadas em eletrônicas de potência / Stevan Klingel ; orientador, Johnny de Nardi Martins, coorientador, Walter Jony Coelho Thiel, 2022.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Pasta térmica. 3. Dissipadores de Calor. 4. Eletrônica de Potência. I. Martins, Johnny de Nardi . II. Thiel, Walter Jony Coelho . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

Sthevan Klingel

Caracterização de pastas térmicas poliméricas aplicadas em eletrônicas de potência

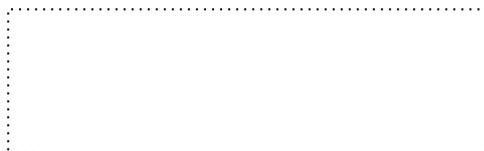
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 01 de Dezembro de 2022.



Sthevan Klingel
Acadêmico

Banca examinadora:



Prof. Dr. Johnny de Nardi Martins
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Claudio Michel Poffo
Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr.Leonardo Ulian Lopes

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais que acreditaram e investiram em mim, sem eles nada disso teria sido possível.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina, e a todo corpo docente pelo aprendizado, auxílio e vivência com os quais pude ser apresentado ao longo desses anos de trajetória acadêmica.

Fico muito agraciado a todos os companheiros que fiz no Campus de Blumenau, que direta ou indiretamente me ofereceram uma figura de apoio durante minha jornada.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, prof. Johnny, o qual me ajudou e auxiliou durante a elaboração desse documento de conclusão de curso.

Ao meu coorientador Walter, por ter me apresentado o tema de pesquisa desse documento, sem o auxílio dele, esse trabalho não teria sido possível.

A empresa WEG, por ter me dado todo o suporte necessário para a realização desse trabalho.

“Se quiser triunfar na vida, faça da
perseverança, a sua melhor amiga;
da experiência, o seu sábio
conselheiro;
da prudência, o seu irmão mais velho;
e da esperança, o seu anjo guardião”.
(Joseph Addison, 1709)

RESUMO

Pasta térmica, também conhecida como graxa térmica, é um material usado para preencher as lacunas microscópicas existentes entre duas superfícies, visando melhorar a transferência de calor entre ambas. Os dissipadores de calor desempenham um papel importante nos dispositivos eletrônicos que possuem componentes emitindo calor em decorrência do efeito Joule, por fornecerem um caminho eficiente para a energia ser transferida para o ar ambiente e para longe dos componentes eletrônicos. Porém, para que os dissipadores de calor tenham máximo rendimento, é necessário que ocorra o melhor contato possível entre as superfícies, com isso em face de tal necessidade é imprescindível o uso de pastas térmicas em tais componentes. O presente trabalho de conclusão de curso, teve o intuito de realizar a caracterização de três pastas térmicas na empresa a onde foi realizado o período de estágio final do autor: as pastas térmicas x, y e z. Avaliando as propriedades das pastas térmicas, foi averiguado quanto à possibilidade de homologar novos materiais a linha produtiva da fábrica. Sendo assim, esse trabalho se dividiu em três análises: análise de perda de massa, análise de grupos funcionais e por fim análise do desempenho térmico. A análise térmica consistiu na validação térmica do material, a onde foi monitorado a relação de desempenho térmico ao longo do tempo das pastas térmicas, apresentando quais dessas possuem a maior e menor condutividade térmica, sendo constatado que a pasta térmica x possui a maior propriedade dentre as três. A análise dos grupos funcionais foi feita buscando investigar a fase orgânica das pastas térmicas por meio da análise de seus grupos funcionais, sendo verificado que as pastas avaliadas possuem o polímero Polidimetilsiloxano em sua composição química. A análise de perda de massa teve por objetivo estabelecer qual pastas térmicas apresentará ao longo do tempo de ensaio, a maior e a menor perda de massa nesse período de tempo, sendo descoberto que a pasta térmica z, apresentou a menor perda de massa.

Palavras-chave: Pasta térmica; Dissipadores de Calor; Eletrônica de Potência.

ABSTRACT

Thermal paste, also known as thermal grease, is a material used to fill in the microscopic gaps between two surfaces to improve heat transfer between them. Heat sinks play an important task in electronic devices which are continuously emitting heat due to the Joule effect, because they provide an efficient path for energy to escape into ambient air and flow away from electronics devices. However, for heat sinks to show their maximum performance, it is important that there exists the best possible contact between the surfaces, therefore, in view of this need, the use of thermal pastes in such components is essential. This course conclusion paper aimed to characterize three different thermal pastes in the factory where the author's final internship program was developed: thermal pastes x, y and z. Studying the properties of these thermal pastes, the possibility of approving new materials for the factory's production line was investigated. Therefore, this work was divided into three analyses: analysis of mass loss, analysis of functional groups and finally analysis of thermal performance. The thermal analysis consisted in the thermal validation of the material, where the thermal performance ratio over time of the thermal pastes was monitored, showing which of them have the highest and lowest thermal conductivity, and it was found that the thermal paste x has the highest thermal conductivity among the three. The analysis of the functional groups was made to investigate the organic phase of the thermal pastes through the analysis of their functional groups, and it was verified that the evaluated pastes have the Polydimethylsiloxane polymer in their chemical composition. The mass loss analysis aimed to establish which thermal pastes will present, over the analysis time, the highest and lowest mass loss in this period of time, showing that the thermal paste z, presented the lowest mass loss.

Keywords: Thermal past; Heatsinks; Power electronics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Demonstração do fluxo de calor, com a presença de Silicone.....	20
Figura 2: Demonstração do fluxo de calor, com a presença de Silicone.....	23
Figura 3: Formato da partícula da carga, exemplos de cargas e suas vantagens.....	26
Figura 4: Funções de uma eletrônica de Potência.....	28
Figura 5: Estrutura de um IGBT.....	29
Figura 6: Desenho esquemático de um dissipador de calor.	30
.....	35
Figura 7: Dissipação de calor em módulos IGBT.....	35
Figura 8: Amostras y e z.....	37
Figura 9: Amostra pasta térmica x.....	38
Figura 10: Trocador de calor.....	40
Figura 11: Utilização do estêncil.	42
Figura 12: Termopar do tipo t inserido em um input.	43
Figura 13: Registrador térmico YOKOGAWA modelos GP10/GP20.....	43
Figura 14: Modelo de amostra utilizando uma lâmina	45
Figura 15: ESTUFA DIGITAL SSDi 30L.....	45
Figura 16: Espectrômetro PerkinElmer modelo Frontier.....	46
Figura 17: Primeiro registro térmico realizado (ensaio térmico 0 horas).....	48
Figura 18: Segundo registro térmico realizado (ensaio térmico 250 horas)...	51
Figura 19: Terceiro registro térmico realizado (ensaio térmico 500 horas)...	51
Figura 20: Quarto registro térmico realizado (ensaio térmico 1000 horas)...	54
Figura 21: Espectro de FTIR para a amostra x.....	57
Figura 22: Espectro de FTIR para a amostra z.....	58
Figura 23: Espectro de FTIR para a amostra y.....	58
Figura 24: Ensaio perda de massa até 1008 horas (60480 minutos) para as pastas térmicas.....	61

LISTA DE EQUAÇÕES

- (1) $R_{th,forçado} = f^* R_{th,convecção}$
- (2) $P_{cond} = \frac{Q}{t} = KA * (\Delta T)/L$
- (3) $R_{th} = \frac{d}{\lambda A}$
- (4) $P_{th,c} = \frac{\lambda * A * \Delta T}{d}$
- (5) $R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{th,c}}$
- (6) $C_{th} = \frac{\Delta Q_{th}}{\Delta T}$
- (7) $\Delta Q_{th} = c_{th} * m * \Delta T$

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao primeiro registro térmico.....	50
Tabela 2: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao segundo registro térmico.....	52
Tabela 3: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao terceiro registro térmico.....	53
Tabela 4: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao quarto registro térmico.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

WAU	WEG Automação
WDR	WEG DRIVERS
DQF	Departamento de Qualificação de Fornecedores
RTH	Heat Sink Thermal Resistance
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
DDP	Diferença de Potencial
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
TIM	Thermal Interface Material

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 PASTAS TÉRMICAS.....	19
2.1.1 MATERIAIS DE INTERFACE TÉRMICA	20
2.1.2 Propriedades Térmicas das Pastas Térmicas	21
2.1.3 Pastas Térmicas Siliconadas	22
2.1.4 O Envelhecimento de Pastas Térmicas	24
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	24
2.2.1 Uso de Cargas em Matrizes	25
2.2.2 Condutividade Térmica em Materiais Compósitos	26
2.3 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA	27
2.3.1 IGBT	28
2.4 DISSIPADOR DE CALOR	29
2.5 VENTILADORES.....	31
2.6 TERMOPARES	31
2.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	32
2.8 RESISTÊNCIA TÉRMICA	35
2.9 CAPACIDADE TÉRMICA	36
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS.....	37
3.2 MÉTODOS UTILIZADOS	38
3.2.1 Ensaio Desempenho Térmico	39
3.2.2 Análise Perda de Massa	44
3.2.3 Análise grupos Funcionais	46
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 DESEMPENHO TÉRMICO	47
4.2 ESPECTROSCOPIA DE INFRA VERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER	57

4.3 ENSAIO DE PERDA DE MASSA	60
5.0 CONCLUSÃO	64
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS.....	66

1.0 INTRODUÇÃO

As pastas térmicas são elementos termicamente condutores, aplicadas entre as interfaces de dois componentes (como placa de circuito e dissipadores de calor) para melhorar a condutância térmica entre eles. Com isso, esses materiais possuem uma função essencial na redução da resistência térmica entre duas superfícies distintas, pois aumenta a eficiência da transferência térmica entre ambas. Como resultado, é essencial um gerenciamento térmico mais sistemático e resfriamento eletrônico, porque a confiabilidade do equipamento diminui fortemente com o aumento da temperatura da junção. Assim, o gerenciamento eficiente da geração de calor em dispositivos eletrônicos tornou-se um problema crítico na indústria eletrônica moderna (SWAMY, 2019).

Dessa maneira os materiais de interface térmica são necessários para que haja o melhor contato possível entre as superfícies, reduzindo a resistência térmica interfacial. Com isso, as pastas térmicas possuem a função de ocupar fisicamente os espaços “vazios” de dois materiais em contato para melhorar a condução de calor através da interface, pois esses espaços vazios, caso não sejam preenchidos pelas pastas térmicas, são ocupados fisicamente por ar. Essas lacunas de ar atuam como uma barreira para transferir o calor da placa de circuito para o dissipador de calor, aumentando a resistência de contato do sistema.

Os TIMs (materiais de interface térmica) geralmente são fabricados pela dispersão de partículas de alta condutividade, como metais (por exemplo, prata, cobre) ou cerâmica (por exemplo, óxido de alumínio, óxido de zinco ou nitreto de boro) dentro de uma fase orgânica de baixa condutividade, como graxa de silicone. Com o objetivo de criar um material com propriedades reológicas mais próximas às da fase orgânica o material comporta-se com um gel sólido, porém com maior condutividade térmica efetiva (DUE; ROBINSON, 2013).

A problemática da utilização de pastas térmicas atualmente reside principalmente em sua estabilidade. A estabilidade dessa refere-se à sua capacidade de manter a resistência térmica da interface por um longo período de tempo ou condição de uso extensivo. O material de baixa qualidade ou escolhido de forma inadequada se degradará com o tempo, fazendo com que a resistência térmica da interface e a temperatura de junção do dispositivo eletrônico aumentem substancialmente levando a falhas do dispositivo. Com isso, umas das propostas desse trabalho foi investigar a correlação entre o “envelhecimento” das pastas

térmicas, por meio dos testes de caracterização que foram realizados, e como isso afetava sua resistência térmica ao longo dos ensaios

Visando adquirir uma pasta térmica que possa garantir certa confiança em sua utilização, suas propriedades e estabilidade devem ser investigadas. Dessa forma, o presente trabalho de conclusão de curso buscou avaliar a estabilidade e confiabilidade a longo prazo das pastas térmicas que estão sendo adquiridas pela empresa a onde o autor realizou o período de estágio 3. Por confiabilidade entende-se que por meio dos testes que foram realizados nesse presente trabalho, os mesmos garantem que as pastas térmicas desempenharão as propriedades desejadas por meio de ensaios de caracterização. Averiguando se possuem as propriedades necessárias a fim de que seja garantido um bom desempenho das mesmas ao longo de uso nos produtos. Dentre essas características, pode-se citar boa condutividade térmica e baixa perda de massa associada à sua utilização. Sendo assim, a caracterização de pastas térmicas aplicadas em eletrônicas de potência (ensaios térmicos, ensaios perda de massa) é necessária.

Vale ressaltar, que os ensaios de caracterização das pastas térmicas são os procedimentos adotados, quando deseja-se estudar a possibilidade de homologar novas pastas térmicas para a linha produtiva da fábrica. As pastas a serem analisadas quanto a sua homologação são as pastas térmicas: y e z. Também foi testado em conjunto com essas duas pastas térmicas, a x, um material já validado e homologado pela empresa. A caracterização da pasta térmica x, possui o objetivo de oferecer resultados que serão estabelecidos como parâmetros em relação as outras duas pastas. Além dos testes citados, o presente trabalho também buscou investigar quanto aos grupos funcionais presentes nas pastas térmicas x, y e z. Para que por meio dessa análise, fosse feita uma correlação de todos os resultados obtidos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade de uso das pastas térmicas nos módulos de potência das linhas solar e eólico da empresa WEG.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo comparativo de três pastas térmicas, investigando sua estabilidade térmica e de massa ao longo de um período de 1000 horas;
- Correlacionar os resultados encontrados no ensaio térmico e de perda de massa, com uma análise qualitativa da composição química orgânica das pastas térmicas, por meio do estudo de seus grupos funcionais;
- Estabelecer uma correlação entre os ensaios de: análise térmica, análise de perda de massa e análise dos grupos funcionais;

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PASTAS TÉRMICAS

As pasta térmicas são um tipo promissor de materiais de interface térmica (TIM), sendo tradicionalmente apontadas como a primeira classe de materiais desenvolvida, visando o preenchimento do espaço intersticial entre interfaces sólidas. O preenchimento entre as interfaces é necessário, pois é desejado que seja eliminado todo o ar intersticial, já que o mesmo apresenta baixos valores de condutividade térmica. Logo, as graxas térmicas são mais adequadas por fornecerem uma combinação de baixa resistência térmica interfacial e de massa devido a sua natureza não curada. O gel é um semissólido que se comporta como um líquido e um sólido. Em outras palavras, combina as propriedades da graxa e do polímero reticulado. Os géis são usados para processadores de alto desempenho e alta potência exigidos por dissipadores de calor integrados. O gel de silicone é geralmente empregado como base devido às suas propriedades únicas, incluindo baixo módulo de elasticidade, características de umectação e boa estabilidade térmica (SWAMY, M. C. et al., 2019).

Segundo Sarvar e Whalley (2006) as pastas térmicas possuem geralmente um componente primário de base de polimérica e cargas metálicos e/ou cerâmicas, formando assim uma pasta. O silicone é comumente utilizado como base por sua boa estabilidade térmica, boas características de molhamento e baixo módulo de elasticidade. Cargas cerâmicas como alumina, nitreto de alumínio, óxido de zinco, dióxido de silício e óxidos de berílio são comumente usadas, assim como prata e alumínio de cargas metálicas. O material base e as cargas são misturadas para formar uma pasta que pode ser aplicada para superfícies de acoplamento. Logo, são muitas vezes fabricados pela dispersão de partículas de alta condutividade, como metais ou cerâmica dentro de uma fase orgânica com condutividade mais baixa, como silicone.

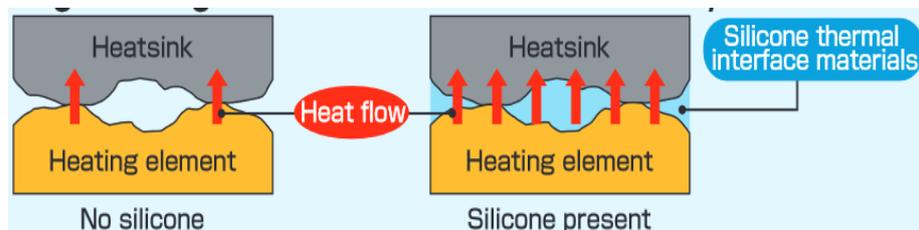
O objetivo das pastas é criar um material com as propriedades mecânicas mais próximas da fase orgânica, embora com uma condutividade térmica efetiva mais alta em decorrência de sua aditivação. Pois como característica de sua reologia, as pastas devem fluir e se adequar às interfaces, sendo essa propriedade associada a sua fase orgânica. (DUE; ROBINSON, 2013).

Por esta razão e outras, as graxas térmicas são amplamente empregadas em micro-eletrônica e aplicações de refrigeração do módulo de potência. Embora as graxas térmicas forneçam comparativamente desempenho, eles sofrem de vários

mecanismos de falha que podem comprometer gravemente o funcionamento do sistema do dispositivo eletrônico em que for instalada. Na literatura é geralmente aceito que as pastas térmicas falham principalmente devido ao bombeamento ou secagem. No entanto, outros mecanismos de falha, como os associados com a evaporação e redução de solventes foram observado (DUE; ROBINSON, 2013).

Na Figura 1, de forma pratica observa-se o efeito da aplicação de uma pasta térmica com base de silicone na estrutura do material. A utilização de silicone aumenta o fluxo de calor do componte, conforme imagem a baixo, o que auxilia na maior eficiência na dissipação do calor.

Figura 1: Demonstração do fluxo de calor, com a presença de Silicone



Fonte: Adptado de BILSON e RAVINDRA (2008).

2.1.1 MATERIAIS DE INTERFACE TÉRMICA

As pastas térmicas são também conhecidas como materiais de interface térmica, ou TIM (Thermal Interface Material), sendo essenciais para garantir uma condução de calor adequada entre duas faces adjacentes. Em princípio, um composto térmico ou TIM (material de interface térmica) é um isolante térmico, no entanto, o TIM ainda é um melhor condutor térmico do que o ar, que tem uma condutividade térmica λ de 0,02 W/(m*K). Por essa razão, os matérias de interface térmica não são considerados como condutores, pois em termos práticos a função desse material é fechar os espaços de ar e vazios entre o módulo IGBT e o meio de resfriamento, oferecendo uma condutividade térmica melhor do que a do ar (MORA; MARAN, 2010).

Os principais ingredientes dos compostos TIM são óleo de silicone e óxido de zinco, sendo quanto menores as partículas, melhor a ligação térmica. Compostos sem silício também estão disponíveis, mas não são recomendados para eletrônica de potência, pois podem volatilizar (VOLKE; HORNKAMP, 2010).

Os materiais metálicos que possuem uma condutividade térmica elevada, a exemplo da solda de Índio que tem uma condutividade térmica de 86 W/(mK), superior a pasta térmica Dow Corning TC-1996, com 4 W/(mK), porém por mais que ofereçam uma condutividade térmica maior em relação as pasta térmicas poliméricas, não podem ser utilizados como materias de interface térmica. (DOW CHEMICAL COMPANY, 2022). Na utilização de TIM busca-se minimizar a espessura da camada de pasta térmica, enquanto a espessura da solda é limitada por limitações metalúrgicas advindas dos distintos coeficientes de expansão térmica dos materiais empregados. Sendo assim, em decorrência do maior coeficiente de expansão térmica dos materias metálicos em relação as pastas térmicas poliméricas, torna seu uso indesejável.

Vale ressaltar que para a pasta térmica Dow Corning TC-1996, o fabricante recomenda uma espessura de 0,02 mm, pois a espessura da camada que está sendo aplicada na interface dos materiais deve ser controlada. Como listado nesse tópico, as pastas térmicas poliméricas não são propriamente materias condutores, sendo assim, aplicações muitos “espessas”, resultam em um material que apresentará mais características de isolamento, do que propriamente de condução. Com isso, a espessura de aplicação de camada deve ser controlada.

2.1.2 Propriedades Térmicas das Pastas Térmicas

Há uma série de fatores que devem ser levados em consideração em relação as pastas térmicas, tais como:

Condutividade térmica: a condutividade térmica determina sua capacidade de transferir calor através da interface e como tal, tem um impacto significativo no seu desempenho térmico

- **Resistência térmica:** deve idealmente, ser a mais baixa possível para manter o dispositivo abaixo de sua temperatura de operação.

- **Condutividade elétrica:** a depender da carga utilizada as pastas térmicas podem ser eletricamente condutores, a exemplo do uso de cargas metálicas como a prata. Já as pastas térmicas que não são condutoras possuem como carga inorgânica os oxidos, a exemplos das cerâmicas.

- **Temperatura de mudança de fase:** importante que temperatura de fusão seja abaixo do máximo temperatura de funcionamento do aparelho para que possa efetivamente transferir calor através da interface, mas o mais alto possível para evitar uma mudança de fase ocorrendo durante o transporte.

Viscosidade: deve ser alta o suficiente para evitar que o material de interface flua quando colocado em uma orientação vertical, que pode resultar em gotejamento para fora do conjunto.

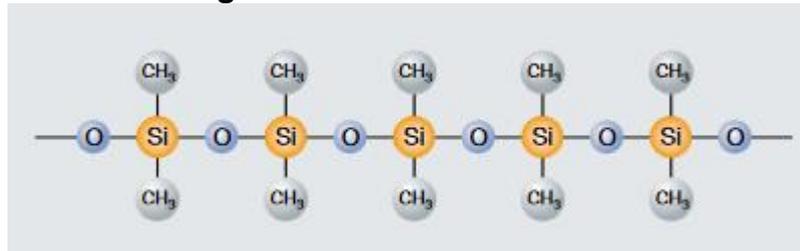
Das propriedades citadas anteriormente, dois valores são importantes e representam as propriedades térmicas desses materiais, que é a condutividade térmica (λ) e seu inverso a resistência térmica. Vale ressaltar, que essas propriedades afetam diretamente o desempenho da dissipação de calor de um trocador de calor, pois quanto maior a condutividade térmica da pasta térmica, mais eficientemente o sistema irá dissipar o calor emitido pelas eletrônicas de potência (SARVAR;WHALLEY;CONWAY, 2006).

É importante mencionar que o mecanismo da dissipação de calor não é apenas afetado pelos valores de condutividade térmica das pastas térmicas, existem outras variáveis de processo, a exemplo do “envelhecimento das pastas térmicas”, que também afetam esse mecanismos dissipativo (SARVAR;WHALLEY;CONWAY, 2006).

2.1.3 Pastas Térmicas Siliconadas

Os silicones são empregados nos mais variados tipos de aplicação, como em aditivos de engraxamento, sendo produtos sintéticos modernos baseados em areia de quartzo, que está disponível em quantidades praticamente ilimitadas, possuindo um desempenho versátil em decorrência de sua estrutura química. Como resultado, silicones oferecem inúmeras possibilidades de uso (WACKER,2011).

Esses polímeros também são conhecidos como dimetil polissiloxanos. São polímeros formados por unidades repetidas de siloxano, o qual é uma cadeia de átomos de silício e átomos de oxigênio alternados, frequentemente combinado com carbono e hidrogênio. Os silicones existem em muitas formas, como óleo de silicone, graxa de silicone, borracha de silicone, resina de silicone e o silicone disponível mais comum é polidimetilsiloxano (PDMS), com base na Figura 2 é possível observar a estrutura do PDMS (PRIYANKA, 2017).

Figura 2: Estrutura Poldimetilsiloxano.

Fonte: WACKER (2011).

Os polímeros de silicone encontram uma ampla diversidade de aplicações devido à sua estabilidade térmica, boas características de isolamento elétrico, propriedade hidrofóbica e antiadesiva e a constância de propriedades ao longo de um amplo intervalo de temperatura. Estes polímeros estão disponíveis em várias formas, como fluidos, graxas, borrachas e resinas. (LAZARINI; AGNELLI, 2019)

Segundo Bilson e Ravindra (2008), comparado com polímeros orgânicos convencionais, os silicones apresentam propriedades térmicas superiores. Alguns elastômeros de silicone permanecem flexíveis a -100°C e mantêm suas propriedades por longos períodos até 200°C . Sendo amplamente empregados no uso de pastas térmicas, pois sua diversidade de aplicação decorre de suas características de boa estabilidade térmica e constância de propriedades ao longo de um amplo intervalo de tempo. Sendo justamente as particularidades necessárias almejadas em uma pasta térmica, conforme citado no tópico 2.1.3. Por mais que a condução térmica das pastas seja em decorrência de sua aditivação, também é desejado que a matriz polimérica ofereça boas propriedades condutivas e por um longo período de tempo. A fim de que seja oferecida sinergia positiva entre a matriz de silicone e a carga inorgânica.

Os TIM de silicone são compostos que contêm uma alta proporção de cargas termicamente condutoras, exibindo excelente condutividade térmica em decorrência da reologia das pasta de silicone, possibilitando o encaixe perfeito no espaço entre o elemento de aquecimento e o dissipador de calor. Sendo assim, as pastas à base de silicone, são muito utilizadas pois garantem um bom contato térmico entre as superfícies, o que garantirá a diminuição da resistência e contato. Vale ressaltar, que esse material de interface pode manter um estado semi-sólido acima de 200°C e manter a estabilidade química por um longo tempo, o que torna seu uso desejável em eletrônicas de potência (LIU, 2020).

2.1.4 O Envelhecimento de Pastas Térmicas

Apesar da ampla pesquisa e desenvolvimento no setor de TIMs, há uma falta de dados sobre seu desempenho térmico a longo prazo para aplicações eletrônicas de alta temperatura. É desejável desenvolver módulos eletrônicos de potência que são confiáveis em operação contínua em uma temperatura alta e por períodos de vários anos, exemplos incluem o setor aeroespacial. Portanto, há a necessidade de identificar TIMs adequados e entender seu desempenho térmico a longo prazo para eletrônica de alta potência (SKURIAT, 2013).

A estabilidade e confiabilidade a longo prazo é a capacidade de proporcionar uma condutância térmica suficiente, mesmo após um longo período ou uso extensivo do sistema eletrônico do equipamento. O principal iniciador da deterioração de pastas térmicas e TIMs é o descasamento térmico entre os componentes usados (ABORAS, 2011).

Materiais de preenchimento de fendas condutivas térmicas devem possuir boa condutividade térmica, estabilidade a altas temperaturas e elasticidade a baixas temperaturas. Entretanto, as propriedades mecânicas, por exemplo, módulo dinâmico, fluência, e relaxamento do estresse, têm um impacto sobre os materiais. A caracterização do desempenho do início de vida útil não é suficiente, uma vez que o desempenho pode se degradar com o uso.

O envelhecimento de pastas térmicas se dá de forma gradativa ao longo de sua vida, tendo forte impacto em suas propriedades. A degradação ocorre tanto na forma mecânica, como quimicamente, pela alteração de estruturas químicas da graxa. Os efeitos do envelhecimento são função de um grande conjunto de variáveis, sendo os mais notáveis a temperatura e o tempo de trabalho, porém estudos anteriores apontam outras causas de envelhecimento, como contaminantes (micropartículas e interações químicas com a estrutura do rolamento), aspectos físico-dimensionais entre outros (MARRA, 2017).

2.2 Materiais Compósitos

Muitas das nossas tecnologias modernas demandam materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. Os mais variados setores industriais estão cada vez mais buscando materiais estruturais que possuam baixas

densidades, sejam fortes, rígidos e apresentem boa resistência, e que ao mesmo tempo não sejam facilmente corroídos, ou seja, uma combinação de características consideravelmente formidável. Esses materiais de uma maneira geral são qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades (LOPES, 2017).

A maioria dos materiais compósitos são compostos por duas fases: a matriz, que é contínua e a fase dispersa (cargas) que é envolvida pela matriz. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (LOPES, 2017).

2.2.1 Uso de Cargas em Matrizes

As cargas têm como principal função melhorar significativamente as propriedades mecânicas dos materiais da matriz, ou seja, fornece as propriedades mecânicas aos materiais compósitos, como alta resistência e alto módulo. A natureza dos materiais compósitos é para reforçar usando agentes de reforço. Entre os vários tipos de agentes, como partículas, flocos, fibras e outros (WANG; ZHENG, 2011).

Segundo Merlini (2020), as cargas podem ser definidas como materiais sólidos, não solúveis, que são adicionadas em uma matriz em quantidades suficientes para alterar alguma propriedade ou por razões econômicas reduzir custos do processamento do material. Os compósitos particulados são constituídos de partículas de um ou mais materiais dispersos em uma matriz polimérica, cerâmica ou metálica. As cargas particuladas permitem maior flexibilidade de projeto e uma vasta gama de combinações possíveis. Alguns exemplos de formatos de carga, assim como exemplos de cargas e suas vantagens podem ser observados na Figura 3.

Figura 1: Formato da partícula da carga, exemplos de cargas e suas vantagens.

Formato	Exemplo de cargas	Vantagens
Esférico	Pó de alumínio, óxido de alumínio, negro de fumo, grânulos de cerâmica e vidro, cobre, sílica, prata, dióxido de titânio, óxido de zinco	Maior densidade de empacotamento, uniforme distribuição de tensão, menor viscosidade
Cúbico	Hidróxido de cálcio, feldspato	Bom reforço e densidade de empacotamento
Laminar	Barita, feldspato	
Dendrítico	Níquel, cobre	Maior área de superfície para interação
Flakes (Lamelar)	Alumínio, grafite, caolinita, mica, perlita, prata, talco, verniculite, montmorilonita	Facilidade de orientação e menor permeabilidade de líquidos, gases e vapor
Alongado	Whisker de borato de alumínio (fitas ou cilindros), fibras de aramida, carbono e vidro (fibra), atapulgita (agulha), dióxido de titânio e wollastonita (acicular), farinha de madeira (fibra)	Superior reforço e reduz o encolhimento e expansão térmica
Irregular	Óxido de alumínio, hidróxido de alumínio, antracito, atapulgita, barita, carbonato de cálcio, argila, dolomita, hidróxido de magnésio, sílica precipitada	Não apresentam vantagens aparente, mais são mais fácil de serem fabricadas e assim, são mais baratas.

Fonte: MERLINI (2020).

As partículas podem ter uma grande variedade de geometrias, porém elas devem possuir aproximadamente as mesmas dimensões em todas as direções (eixos iguais). Para que ocorra um reforço eficaz, as partículas devem ser pequenas e devem estar distribuídas por igual ao longo de toda a matriz. Além do mais, a fração volumétrica das duas fases influencia o comportamento; as propriedades mecânicas são melhoradas com o aumento do teor do material particulado (MERLINI, 2020).

A natureza química da superfície define a compatibilidade e a adesão entre a carga e a matriz, pois determinam aspectos como molhabilidade e energia livre superficial. Partículas inorgânicas são dispersas numa matriz de polímero orgânico, com o objetivo de melhorar as propriedades e desempenho do polímero, tanto a nível mecânico como térmico. Geralmente, um material inorgânico exibe uma baixa interação com polímeros orgânicos, levando a uma dispersão pobre do material na matriz. A chave é compreender e manipular a química que ocorre entre o polímero e os reforços, a fim de obter uma dispersão homogênea e uma boa interação entre o polímero e o material de enchimento e reforço (SILVA, 2013).

2.2.2 Condutividade Térmica em Materiais Compósitos

Para melhorar a condutividade térmica de materiais não condutores, como os polímeros, é comum a aditivação desses materiais por meio de cargas, sendo que a taxa de melhoria da condutividade térmica depende das cargas, sua natureza, sua

estrutura e entre outros. Sendo que quanto maior o carregamento de cargas condutoras térmicas, maior seria a condutividade térmica resultante (BURGER, 2016).

A condução térmica do material compósito é governada essencialmente pela condutividade térmica intrínseca do componente mais isolante, neste caso o polímero. A interface preenchimento/matriz representa um parâmetro importante a ser considerado para melhorar a condutividade térmica, por que grandes interfaces levam a um forte espalhamento da energia térmica. Sendo que quanto maior a interface, mais tempo a energia térmica do polímero levará para ser “evacuado” através de enchimentos termicamente condutivos. Sendo assim, quanto melhor a compatibilidade na interface, por exemplo, ligações covalentes entre as cargas e a matriz, mais energia térmica é transferida da matriz para as cargas condutoras, o que acarretará em melhor condução térmica (BURGER, 2016).

Logo, o material de reforço dá propriedades condutoras ao material compósito, e a resina a matriz desempenha um papel adesivo para dar formabilidade ao material. Portanto, para obter um bom desempenho geral na condução térmica, devemos aumentar a quantidade de enchimento ou material aprimorado, tanto quanto possível, controlar a interface dos materiais que compõem o compósito e fazer com que os materiais compósitos tenham a melhor processabilidade (BURGER, 2016).

2.3 ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Os circuitos de eletrônica de potência servem para converter potência elétrica de uma forma para outra, por meio da utilização de dispositivos eletrônicos. Por meio de dispositivos semicondutores como chave, ocorre a manipulação ou controle do valor da tensão, corrente ou potência de um circuito eletrônico.

A eletrônica de potência tem a capacidade de transformar uma corrente Alternada (CA), para uma corrente contínua (CC), ou vice e versa além de mudar a característica da amplitude e frequência de uma CA, para outros valores de amplitude e também de frequência. Em outras palavras em circuitos de eletrônica de potência onde de um lado ocorre a chegada de corrente CA (corrente alternada), ocorrerá a transformação para corrente contínua (HART, 2016). Na Figura 4, se observa esquematicamente o que foi descrito nesse parágrafo

Figura 2: Funções de uma eletrônica de Potência



Fonte: O autor (2022).

Em resumo, eletrônicas de potência tem como objetivo modificar valores de tensão e corrente para atender a especificação da carga e correntes exigidas. Quando ocorre a mudança de uma corrente para uma corrente cc, o equipamento é denominado de Retificador. No caso inverso, quando tem-se uma corrente CC e deseja-se transforma-la para uma corrente alternada a eletrônica de potência é denominada de Inversores.

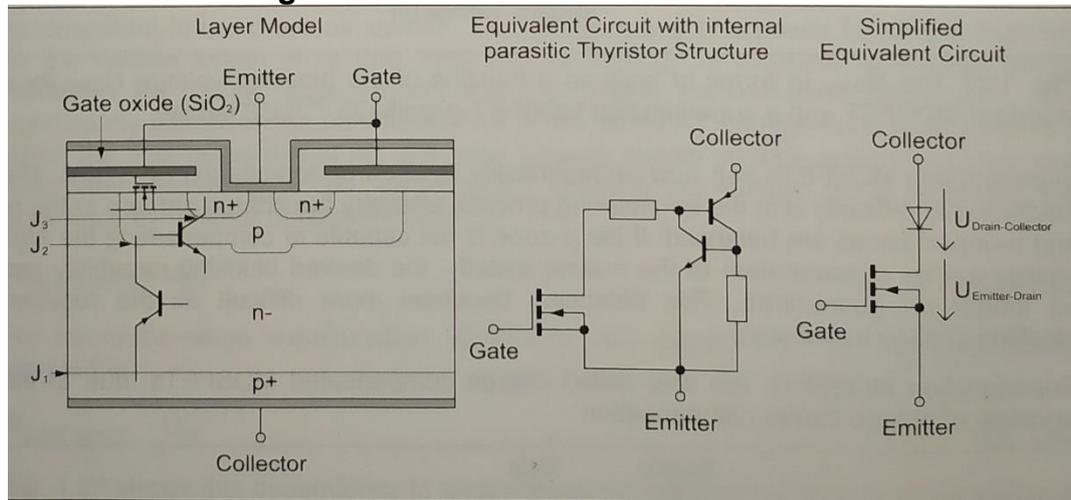
2.3.1 IGBT

A sigla IGBT, é uma abreviação da frase: insulated gate bipolar transistors. Os IGBTs possuem uma estrutura do tipo npn e pnp, o que implica que os transistores de junção bipolar, possuem portadores majoritários e minoritários disponíveis durante a fase condutora. A queda de tensão interna de um transistor bipolar quando é ligado é, portanto, menor do que em um MOSFET de potência com corrente e tensão de bloqueio comparáveis, sendo que nesse apenas as operadoras majoritárias estão disponíveis (FERNANDES, 1991).

De acordo com Volke e Horkamp (2010), combinando o comportamento de “gate” (Figura 5) de um MOSFET com o comportamento de condução de um transistor bipolar produz um transistor bipolar de porta isolada (IGBT). Em termos de design interno, o IGBT é estruturado como um MOSFET vertical, exceto que possui uma zona p⁺ adicional de alta dopagem no terminal de drenagem que, em um IGBT, é chamada de coletor. Se o IGBT estiver desligado, há tensão negativa ou 0V no “gate” e a tensão no emissor é mais negativa que no “collector”, o IGBT está operando no modo de

bloqueio direto e a junção pn J_2 está bloqueando. As junções pn J_1 e J_3 , por outro lado, são condutivas. Para obter capacidade de bloqueio suficiente, a base n^- deve ser suficientemente larga e apresentar dopagem suficientemente baixa. O processo descrito aqui, pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 3: Estrutura de um IGBT.



Fonte: (VOLKE; HORNKAMP, 2010).

2.4 DISSIPADOR DE CALOR

Toda eletrônica de potência precisa ser capaz de dissipar sua perda energética seja como um chip ou em um pacote de módulos. O dissipador de calor é o elo final na cadeia térmica do local onde a perda de energia ocorre pela primeira vez até o dissipador térmico. O dissipador de calor que será usado dependerá dos semicondutores e da aplicação utilizada. Além disso, um dissipador de calor também pode funcionar como um elemento mecânico, como parte do caso de um inversor. A tarefa do dissipador de calor é transferir a energia térmica alimentada a ele da maneira mais eficaz possível para um meio de resfriamento (de fato, esse meio de resfriamento é o elo final da cadeia térmica se não for considerado onde o próprio meio descarrega a energia (VOLKE; HORNKAMP, 2010).

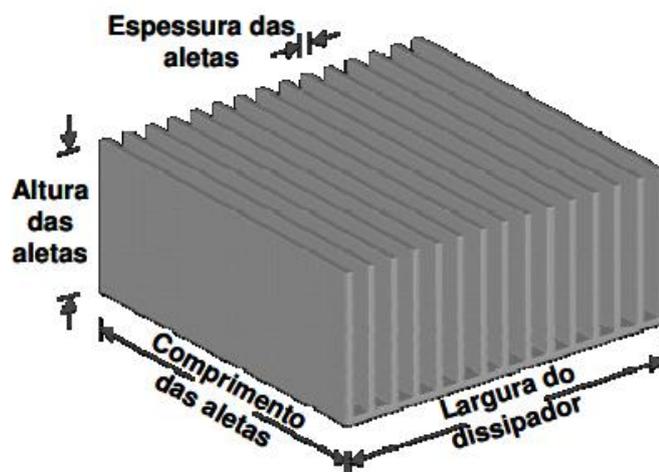
Dissipador é o componente responsável por remover o calor do microprocessador. A troca de calor ocorre por condução entre o dissipador e o microprocessador e por convecção forçada entre o dissipador e o ar ambiente. Segundo Oliveria (2007) um dissipador de calor convencional, consiste basicamente de uma placa metálica, conhecida como base do dissipador e de várias aletas perpendiculares à base. A função da base é espalhar o calor concentrado proveniente do componente eletrônico para uma área maior, onde estão instaladas as aletas. As

aletas, por sua vez, facilitam a transferência de calor da base para o ar ambiente. Portanto, devido a sua característica tri-dimensional do fluxo de calor, a base maciça do dissipador apresenta a chamada resistência de espalhamento.

Recentemente, a Intel tem deixado de incluir um dissipador para os microprocessadores topo-de-linha, em virtude das elevadas Potências Térmicas de Projeto (TDP), havendo a necessidade de buscar uma solução mais robusta. Devido a isso, há um grande mercado para dissipadores aftermarket, o que propicia o desenvolvimento de tecnologias que proporcionam maiores capacidades de dissipação de calor.

Uma nova tecnologia foi desenvolvida pelo Sandia National Laboratories, que combina o dissipador e a ventoinha em um único componente. Esse design tem como ponto fundamental a espessura da lacuna entre a base fixa e a ventoinha metálica, que deve ser aproximadamente 10m. Segundo Soto (2012) operando com essa espessura e com uma velocidade de 2500 rpm, o Sandia Cooler apresenta uma resistência térmica de 0.15 °C/W. O autor indica ainda que a resistência térmica do dissipador Noctua NH-D14 é de cerca de 0.10 °C/W. Na Figura a baixo, se observa um modelo de dissipador de calor.

Figura 4: Desenho esquemático de um dissipador de calor.



Fonte: Adaptado de SOTO (2012).

2.5 VENTILADORES

Quando um dissipador de calor esfria naturalmente, sua energia térmica é direcionada para o ar ambiente que existe livremente no espaço ao seu redor. Essencialmente, este dissipa o calor principalmente por convecção e parcialmente por radiação térmica. A proporção de energia dissipada através da radiação térmica depende da forma do dissipador de calor. Em um dissipador de calor com aletas, por exemplo, a energia é dissipada por radiação térmica quase que exclusivamente através da seção circunferencial do dissipador de calor. A distância entre as aletas é muitas vezes muito estreita para que a radiação seja direcionada para fora e, em vez disso, a única troca de radiação está entre as aletas que são opostas uma à outra. Portanto, a proporção de radiação não aumenta proporcionalmente à área de superfície disponível para convecção (VOLKE; HORNKAMP, 2010).

Existem dois tipos de resfriamento forçado: resfriamento a ar forçado e resfriamento líquido. No resfriamento a ar forçado, o ar frio é movido por um ventilador e aspirado ou soprado pelas aletas do dissipador, dependendo de onde o ventilador está colocado. A resistência térmica do dissipador de calor depende da velocidade do ar frio que passa por ele. Volke e Hornkamp (2010), relata que quanto maior a velocidade do ar, maior a quantidade de calor que pode ser dissipada, até um ponto em que a energia térmica não pode mais ser dissipada no o ar que passa e a resistência térmica se equilibra para um valor mais ou menos independente da velocidade do ar. A superioridade de um resfriador de ar com ar forçado em relação à ventilação por convecção pode ser expressa por um fator de redução f , conforme a equação a seguir.

$$R_{th,forçado} = f \cdot R_{th,convecção} \quad (1)$$

2.6 TERMOPARES

A utilização de termopares é empregado quando se é necessário a aferição de temperatura de maneiras simples, sendo muito utilizados nos mais diversos processos em que é necessário a medição de temperatura. De forma resumida para que seja fabricado um termopar é necessário que duas ligas metálicas distintas sejam unidas em uma de suas extremidades. Para que quando ocorra uma diferença de temperatura (ΔT), entre suas extremidades, unida e separada respectivamente, é

observado o surgimento de uma diferença de potência entre suas extremidades dando origem ao sinal elétrico, que pode ser medido e quantificado (INDUSTRIAL, 2022)

O sistema termopar é um método conhecido entre as técnicas de medição de temperatura, pelo fato de ser economicamente viável e poder cobrir grandes faixas de temperatura dependendo do tipo de termopar que está sendo utilizado. Uma das extremidades de suas junções chamamos de junta quente e, a outra extremidade onde ligamos os aparelhos ou cabos de compressão é chamada de junta fria. A quente quando submetida a uma fonte de calor faz com que seja gerada uma tensão pequena, na casa dos mili volts, que é proporcional à sua junta fria, este efeito é chamado de Seebeck. Mas não é qualquer metal que provoca um efeito perceptivo, algumas ligas são adotadas pelo sistema internacional devido sua confiabilidade e precisão na mudança de tensão em relação a mudança de temperatura (INDUSTRIAL, 2022).

Vale ressaltar, que no presente estudo foi-se utilizado um termopar do tipo T, para com que sejam feitas as medições de temperatura que serão descritas no tópico **3.1**. Os termopares do tipo T, são comumente denominados Cobre Constantan ou Cu-Co, sendo muito empregados em aplicações que exijam temperaturas negativas ou próximas de zero graus, podendo também ser aplicados em temperaturas de até 250°C (INDUSTRIAL, 2022).

2.7 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segundo H. Moysés (2018) os mecanismos de transferência de calor se baseiam em três principais processos: convecção, radiação e condução. A convecção ocorre principalmente em fluidos, tendo como principal característica a transferência de calor pelo movimento do próprio fluido, constituindo uma corrente convectiva. Quando um fluido é aquecido, em decorrência da agitação molecular e do aumento das distâncias intramoleculares causando pelo ganho energético, o aumento de espaços vazios presentes dentro do fluido tende a diminuir sua densidade. Em contrapartida, quando o fluido é resfriado a menor agitação molecular resulta em um fortalecimento entre suas ligações o que ocasiona em maior compactação atômica resultando em um aumento de sua densidade. Por efeitos gravitacionais, o fluido mais denso tende a permanecer em menores altitudes em relação ao menos denso, o que naturalmente ocasiona correntes de convecção existem duas formas de convecção: convecção

livre (natural) e convecção forçada. A convecção livre funciona de acordo com os princípios físicos de um diferencial de densidade em um material em diferentes temperaturas. À medida que o material aquece, seu volume aumenta e ele se expande, isso reduz sua densidade. Os radiadores de aquecimento são um bom exemplo. O ar quente do radiador sobe; ar frio afunda. A turbulência do ar é causada unicamente pela diferença de densidade do ar em diferentes temperaturas. Na convecção forçada, um fluxo de gases ou líquidos é criado artificialmente. Este é o método usual de dissipação de calor em eletrônica de potência e é amplamente utilizado. O método mais comumente usado é o resfriamento a ar, pelo qual o ar ambiente é soprado ou sugado pelas aletas de um ventilador do dissipador de calor (H. Moysés, 2018).

A transferência de calor por radiação, ocorre por meio de emissões de radiação eletromagnética. Com isso, a energia emitida por um corpo em forma de radiação, ao incidir sobre outro objeto, pode resultar em seu aumento de temperatura. Sendo o principal exemplo para tal fenômeno a radiação solar (H. Moysés, 2018). A radiação é a energia térmica que não está ligada a partículas elementares para transporte de um local para outro. Portanto, ao contrário da convecção, também pode ocorrer no vácuo. A radiação térmica é a radiação eletromagnética que irradia na velocidade da luz e envia ou captura todos os corpos materiais no processo. Dependendo da temperatura do corpo material, esta energia pode estar em uma das várias faixas de comprimento de onda. É importante notar que todo corpo radiante não apenas emite radiação térmica, mas também pode absorvê-la. Na eletrônica de potência, o radiador térmico é o dissipador de calor. referenciado à superfície de um dissipador de calor - seja água, ar forçado ou resfriamento por convecção - o efeito de dissipação de calor por radiação é quase desprezível. No entanto, diferentes superfícies de resfriamento exercem alguma influência. A condição da superfície do dissipador de calor pode influenciar a emitância. Espelhos e alumínio polido são dois exemplos, em que a emitância é quase 0 (VOLKE; HORNKAMP, 2010).

A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas adjacentes, menos energéticas, de uma substância devido às interações entre essas partículas. Com isso, a condução térmica descreve a condução da difusão térmica em matéria sólida ou líquida como resultado de uma diferença de temperatura. Os elétrons e átomos de um determinado objeto,

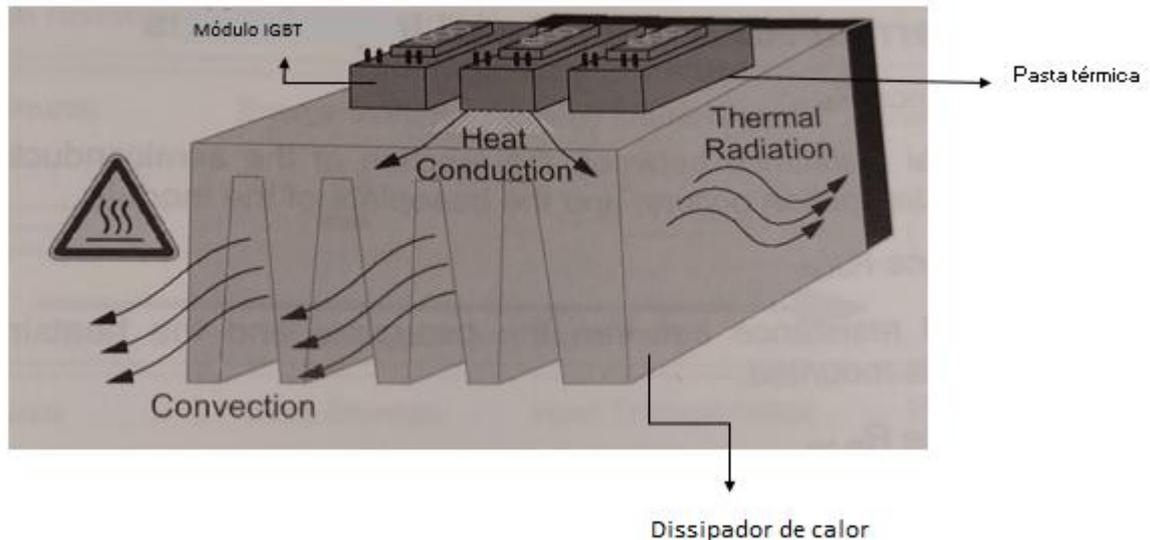
vibram em devido a energia a que estão sendo expostos. Essas vibrações e a energia associada, são transferidas por colisões entre os átomos. Por consequência, uma região em que está ocorrendo um aumento de temperatura, irá propagar a energia térmica entre todos os átomos que fazem parte desta região, para as regiões ao entorno. A física da condução térmica é muito semelhante à da elétrica. As fontes de calor na engenharia térmica são como as cargas elétricas na engenharia elétrica. A seguinte descrição de resistência térmica, capacidade térmica e resistência térmica transitória são todas abrangidas pelo termo "condução". (Incropera, 2017).

Para a equação de transferência de calor por condução tem-se:

$$P_{cond} = \frac{Q}{t} = KA * (\Delta T)/L \quad (2)$$

Segundo Halliday e Resnick (2009), a Equação 3 é tida como para uma placa de área A e de espessura L, considerando que seus lados encontrem-se em temperaturas TQ e TF por uma fonte quente e uma fonte fria. O valor de Q, corresponde a energia transferida na forma de calor por meio de uma placa, do lado quente para o lado frio, considerando um intervalo de tempo t. Vale ressaltar, que o valor de k (condutividade térmica), é uma constante que depende do material de que é feita o material. Na Figura 7 é possível observar a atuação das três principais formas de condução de calor entre um módulo IGBT, pasta térmica, e um dissipador. Visualiza-se que o calor gerado no módulo IGBT, é transmitida para a pasta térmica, e seguida para o dissipador térmico, por meio de processos de condução de calor. Com isso, o dissipador de calor irá sofrer um incremento em sua temperatura, em decorrência ao calor gerado pelo módulo IGBT. Vale ressaltar, conforme é evidenciado pela Figura 7, o dissipador de calor, irá transferir a sua energia térmica para o ambiente, por meio de duas principais formas, radiação e convecção (Halliday; Resnick, 2009)

Figura 5: Dissipação de calor em módulos IGBT.



Fonte: Adaptado pelo autor (VOLKE; HORNKAMP, 2010).

2.8 RESISTÊNCIA TÉRMICA

A capacidade de um meio, seja ele sólido, líquido ou gasoso de transportar energia térmica, na forma de calor é descrita como condutividade térmica, sendo a condutividade térmica uma propriedade do material que pode ser descrita pelo símbolo λ . Como a condutividade térmica é uma função específica do meio, ela pode ser considerada como uma constante do material, onde uma unidade usada para dimensioná-la pode ser descrita como $W/(m \cdot K)$ (Incropera, 2017).

VOLKE e HORNKAMP (2010) conclui que se a seção transversal A e a espessura do meio são conhecidas, é possível determinar a resistência térmica R_{th} . Sendo a unidade de resistência térmica dada por $[K/W]$.

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda A} \quad (3)$$

Se a diferença de temperatura ΔT do meio puder ser derivada da espessura, o fluxo de calor $P_{th,c}$ pode ser declarado juntamente com a condutividade térmica λ . A

unidade do fluxo de calor é W, e é descrito pela lei de condutividade térmica, de acordo com a Lei de Fourier.

$$P_{th,c} = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{d} \quad (4)$$

Com isso, o fluxo de calor pode ser correlacionado com a resistência térmica, de acordo com a seguinte expressão:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{th,c}} \quad (5)$$

Logo, conclui-se que quanto menor a condutividade térmica de um material, maior é sua resistência térmica. Ou seja, um componente com uma resistência térmica elevada é um mau condutor de calor, portanto possui características de isolamento.

2.9 Capacidade Térmica

Segundo VOLKE e HORNKAMP (2010) a capacidade térmica C_{th} (também conhecida como capacidade de calor), expressa como a unidade J/K, é derivada da relação entre o calor Q_{th} e a diferença de temperatura ΔT . Em outras palavras, a capacidade térmica pode ser descrita como a quantidade de energia armazenada a cada mudança de temperatura.

$$C_{th} = \frac{\Delta Q_{th}}{\Delta T} \quad (6)$$

O calor Q_{th} pode ser descrito de acordo com a equação 6 pela capacidade térmica específica c_{th} , massa m e a diferença de temperatura ΔT .

$$\Delta Q_{th} = c_{th} \cdot m \cdot \Delta T \quad (7)$$

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, foi abordado os procedimentos e materiais utilizados para a realização do estudo e avaliação das pastas térmicas.

Em termos de aplicação, as pastas térmicas descritas nesse trabalho são utilizadas na superfície de contato que reside entre os módulos de potência, denominados IGBT'S e o dissipador de calor. Sendo o dissipador de calor, o responsável pela troca térmica do módulo de potência ou do inversor, das linhas eólico ou solar. A linha eólico está relacionada com os produtos pertinentes à energia eólica, já a linha solar é referente aos produtos que são utilizados na energia solar.

3.1 Materiais

Na Figura 8, é visto as duas amostras que foram utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização. A amostra que se encontra a esquerda na figura logo a baixo, é referente a pasta y, já a amostra que se encontra a direita se refere a amostra z. As amostras y e z foram doados pelo mesmo fornecedor, vale ressaltar que a doação de materiais para ensaios de caracterização é algo comum por parte dos fornecedores, que tenham interesse em fazer com que seus produtos possam ser testados e homologados na empresa.

Figura 6: Amostras y e z.



Fonte: Adaptado pelo autor (2022).

Na Figura 9, é visto a pasta térmica x, que foi utilizada para os ensaios de caracterização presentes nesse trabalho. Por ser uma pasta que já foi aprovado seu status de utilização (material homologado), as amostras dessa pasta foram retiradas diretamente da fábrica.

Figura 7: Amostra pasta térmica x.



Fonte: O autor (2022).

3.2 Métodos UTILIZADOS

Seguindo os padrões adotados pela empresa, para que uma pasta térmica, possa ser homologada pela mesma (ter o seu uso aprovado por meio de ensaios de caracterização), três métodos de análises são necessários: análise de perda de massa, análise de grupos funcionais e por fim análise do desempenho térmico. A análise térmica consiste na validação térmica do material, a onde foi monitorado a relação de desempenho térmico ao longo do tempo das pastas térmicas. A análise dos grupos funcionais foi feita buscando investigar a fase orgânica das pastas térmicas por meio da análise de seus grupos funcionais. A análise de perda de massa teve por objetivo estabelecer qual pasta térmica apresentará ao longo do tempo de ensaio, a maior e a menor perda de massa nesse período de tempo. Vale ressaltar, que apesar da pasta x já ser homologada, ainda não havia sido feito a avaliação de seus grupos funcionais.

É importante mencionar, para que seja aprovada a utilização de uma pasta térmica nos equipamentos eletrônicos, primeiramente seus resultados nos ensaios de desempenho térmico e ensaio de perda de massa devem apresentar desempenho satisfatório, como será discutido nos tópicos 4.1 e 4.3, por meio da análise de seus

resultados. Após a realização desses testes caso seu uso seja aprovado nos ensaios de análise térmica e perda de massa, por meio da investigação de suas propriedades, as pastas térmicas serão testadas diretamente nos módulos de sua aplicação nos produtos em que são utilizadas. Durante o ensaio de desempenho térmico que será descrito no tópico 3.2.1, os módulos de potência recebem uma potência de aproximadamente 1,2KW não sendo testados com sua carga plena de teste. A carga plena ocorre quando se emprega toda a potência de utilização do módulo, por exemplo, os módulos solares chegam a utilizar uma carga de 2,5KW, enquanto no ensaio térmico somente é utilizado 1,2 KW de potência. E com os módulos com sua carga plena de teste, novas leituras de desempenho térmico serão feitas.

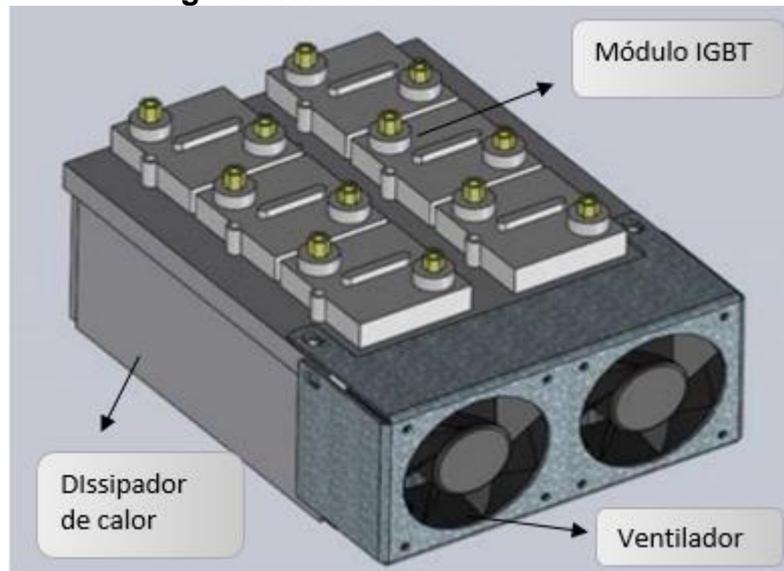
As pastas térmicas que são homologadas, tiveram o seu uso em fábrica aprovado, ou seja, foram testadas com a carga plena de testes. Sendo assim, primeiramente as amostras devem ser testadas nos ensaios de desempenho térmico, perda de massa e análise dos grupos funcionais. Caso seu resultado seja aprovado nesses ensaios, seguirá a ser testada na fábrica com a carga completa de teste, o qual sendo aprovado sua utilização em fábrica, poderá então ser homologada. Vale ressaltar, que o presente trabalho não contempla os testes das pastas térmicas em fábrica, somente foi abordado os ensaios de análise.

3.2.1 Ensaio Desempenho Térmico

Os ensaios de desempenho térmico, possuem como função avaliar o desempenho térmico da pasta térmica, para que sejam estudadas suas propriedades térmicas, a exemplo de sua condutividade térmica. O ensaio deve ocorrer pelo período de 42 dias (1000 horas), pois assim a norma interna da empresa, a onde está sendo realizado o período de estágio, estabelece. Além de que os fornecedores também correlacionam em seus “datasheet’s”, a condutividade térmica com o período de 1000 horas, por exemplo: a pasta térmica x terá uma condutividade de 1,96 W/m.k, para 1000 horas de uso. Sendo assim, a empresa procurou alinhar o seu ensaio de desempenho térmico, com um padrão de tempo que é estabelecido no mercado. O ensaio de desempenho térmico ocorreu diariamente pelo período de 8 horas diárias, até com que se totalizasse as 1000 horas ensaiadas. O período de testes se procedeu dessa forma, 8 horas diárias, para que coincida com o horário de turno normal da empresa, ou seja, o teste foi realizado das 8 horas da manhã até as 16 horas da tarde.

Na Figura 10, se observa um modelo de trocador de calor utilizado nos testes de desempenho térmico. Vale ressaltar, que cada pasta térmica foi aplicada em um trocador de calor distinto, para a realização dos testes. Dessa maneira a pasta térmica x foi ensaiada em um trocador de calor, a pasta térmica y em outro trocador, e a pasta térmica z em outro trocador de calor. Sendo assim, ao todo foram necessários três trocadores de calor para realização dos testes de desempenho térmico das amostras. Conforme é visto na Figura 10, o trocador de calor é montado a partir da junção dos seguintes componentes: módulo IGBT, dissipador de calor, ventilador. Além dos três componentes que formam um trocador de calor, é importante mencionar que cada eletrônica de potência ou módulo IGBT, é composta pela união de dois resistores.

Figura 8:Trocador de calor



Fonte: Adaptado pelo autor propriedade intelectual WEG (2022).

Durante o ensaio de desempenho térmico é aplicada uma potência elétrica, nas eletrônicas de potência, mais especificamente nos resistores dos módulos IGBT'S de 1,2 KW. Com isso, em decorrência do efeito Joule por consequência da potência que é aplicada cada resistor, resulta em perdas térmicas que deverão ser dissipadas pelo dissipador de calor, de alumínio. A interface entre o dissipador de calor e do módulo IGBT é preenchida pelas pastas térmicas, sendo esse espaço relacionado a pequenas lacunas referentes as rugosidades das superfícies. Por isso, é utilizado pastas térmicas em eletrônicas de potência, pois se utiliza desse material, para se preencher os espaços vazios ao invés do ar (que é um mal condutor de calor). Além

do conjunto descrito que descreve um trocador de calor, associado ao mesmo haverá um termopar.

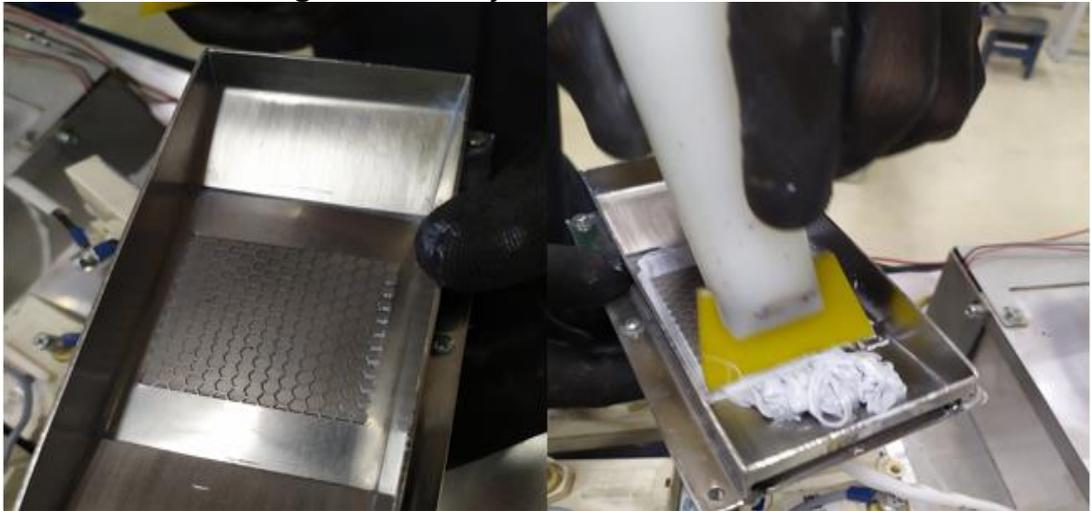
Os termopares são parte importante do teste de desempenho térmico, pois são esses que farão o registro térmico do ensaio. Como o sistema de medição está próximo do resistor, a leitura que é considerada no termopar diz respeito a temperatura apresentada no resistor das eletrônicas de potência, não a temperatura das pastas térmicas.

Com base na fórmula 7, é aplicado uma potência de 1,2 KW nos trocadores de calor, pois calculasse que a potência parcial aplicada em cada resistor do trocador de calor, relacionada a massa do dissipador de calor e seu c_{th} , irá resultar em uma temperatura de aproximadamente 80°C, levando em consideração os efeitos das perdas térmicas por convecção. Além da potência aplicada, é levado em consideração a massa do dissipador de calor, pois o mesmo é o responsável pela dissipação do calor em si, e como o volume está associado a quantidade de matéria disponível de alumínio que irá contribuir com a dissipação térmica, o cálculo da massa deve ser levado em conta, dessa forma cada dissipador de calor presente nesse teste deve pesar cerca de 0,5 kg. A frequência de ventilação também deve ser considerada, pois como dito no tópico 2.6, as trocas térmicas por convecção são uma parte importante das perdas térmicas efetuadas pelo trocador de calor. Vale ressaltar, que a temperatura de ensaio é estabelecida como 80 °C, pois essa temperatura atende o limite de funcionamento de grande parte das eletrônicas de potência e trocadores de calor utilizados. Para efeitos de cálculo, é desconsiderado os efeitos das pastas térmicas, pois elas afetam no decaimento da temperatura dos resistores, caso seja considerada a sua influência, a temperatura que é medida pelos termopares (temperatura do resistor), será menor que 80 °C. Como as pastas térmicas estão continuamente conduzindo o calor que é gerado pelas perdas de potência dos resistores, e por haver uma condução contínua da energia térmica para o dissipador de calor, o registrador térmico apresentará um registro térmico inferior a 80 °C. Sendo que, quanto menor a temperatura medida pelo termopar, mais eficientemente está ocorrendo a troca térmica entre a pasta térmica e o módulo IGBT.

No que diz respeito à aplicação das pastas térmicas nos trocadores, de calor, o primeiro passo a ser realizado é a limpeza dos Módulos IGBT, pois deve ser garantido que a região em que a pasta térmica será aplicada esteja isenta de qualquer contaminação que possa influenciar nos experimentos a serem realizados (a pasta

térmica é aplicada na junção entre o módulo IGBT e do dissipador de calor). Após a limpeza da região a ser aplicada as pastas térmicas, as mesmas serão manuseadas com um auxílio de um estêncil e uma espátula. Uma característica interessante do conjunto de distribuição de pasta térmica é a presença de um estêncil com orifícios em forma de favo de mel, este além de auxiliar em sua distribuição garante que a superfície de aplicação possua uniformidade associado ao controle de camada aplicada. Sendo assim, é aplica uma espessura de 0,001 m de pasta térmica em uma área de $3,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Na Figura 11, pode ser observado o estêncil utilizado antes (imagem a esquerda) e durante a aplicação da pasta térmica (imagem a direita).

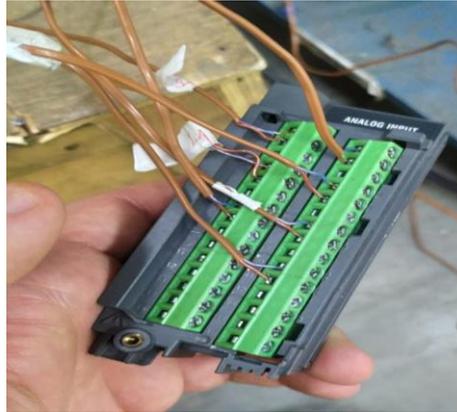
Figura 9:Utilização do estêncil.



Fonte: O autor (2022).

Após a aplicação das pastas térmicas, um termopar do tipo t, é inserido no trocador de calor, para que seja feito o registro da temperatura de ensaio. A baixo na Figura 12, é possível visualizar o conjunto termopar mais input. O input será acoplado em um registrador térmico que irá fornecer os dados de temperatura versus tempo estudados nesse relatório.

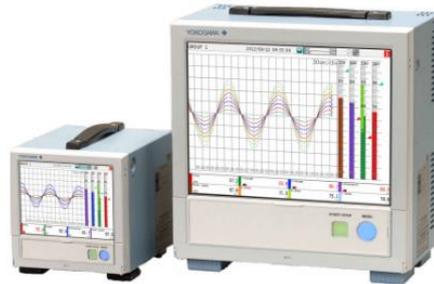
Figura 10: Termopar do tipo t inserido em um input.



Fonte: O autor (2022).

Vale ressaltar que o registrador térmico é da empresa YOKOGAWA, sendo seu modelo o GP20.

Figura 11: Registrador térmico YOKOGAWA modelos GP10/GP20.



Fonte: (YOKOGAWA, 2022)

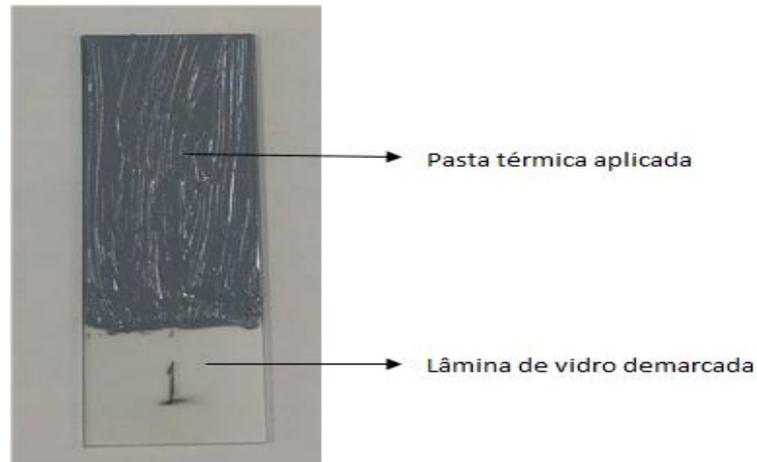
Vale ressaltar, que pelo ensaio de desempenho térmico, permitiu que fosse avaliado as condutividades térmicas das pastas térmicas x, y e z na prática. Pois, o registrador térmico possibilitou o registro das variações da temperatura dos resistores, com o decorrer do tempo de ensaio. Sendo que, quanto menor a temperatura medida pelo termopar, mais eficientemente está ocorrendo a troca térmica entre a pasta térmica e o módulo IGBT, pois a dissipação de energia térmica dos resistores, está sendo transmitida para o dissipador de calor. Resultando em um resistor com menor temperatura, por que nesse caso nesse caso como a leitura indicou uma menor energia térmica, aponta que o componente apresentou uma menor temperatura em decorrência de uma troca térmica mais eficiente.

3.2.2 Análise Perda de Massa

A análise de perda de massa consiste em oferecer estresse térmico as pastas térmicas, a fim de que seja garantido certa confiabilidade ao TIM, por confiabilidade se entende que esse material apresenta boa estabilidade termo química. Pois caso o material não seja estável quanto a sua composição, terá maior suscetibilidade a se degradar e por consequência, perder massa. Sendo assim, é estudado se as pastas térmicas resistem a temperaturas próximas ao limite do funcionamento de grade parte das eletrônicas de potência, sendo essa temperatura adotada como 80°C. Durante esse ensaio a pasta térmica dentre as amostras (x, y e z), que apresentar a menor perda de massa, teoricamente é mais apropriada a ser empregada nas condições térmicas de uso de uma eletrônica de potência. Vale ressaltar, que esse ensaio e seus procedimentos devem seguir a norma ISO 8301-1991.

Segundo a norma, o ensaio de perda de massa deve se proceder a uma temperatura de 80°C, pelo período de 1000 horas ininterruptas. Para a realização desse experimento, primeiramente deve ser selecionada uma lâmina de vidro, que necessita ser enumerada, na região fosca. Em seguida, deve ser pesado e registrado o peso da lâmina em uma balança de precisão analítica, para que se tenha exato conhecimento da quantidade que está sendo aplicada de pasta térmica. Com uma espátula, foi aplicado e espalhado uma pequena quantidade de pasta térmica, aproximadamente 0,5 g a 1,2 g formando uma camada fina e lisa do material, o conjunto lâmina de vidro mais pasta térmica pode ser vista na Figura 14. Por conseguinte, deve ser pesado novamente em uma balança de precisão analítica, o conjunto lâmina mais pasta térmica e registrado esse dado para comparações futuras. Vale ressaltar, que a norma exige que todo esse ensaio seja feito em duplicata. A pesagem das amostras se procederá semanalmente, uma vez por semana, até com seja completado o período de 1000 horas de ensaio. A perda de massa foi calculada com base na referencial da primeira pesagem, isto é: lâmina mais pasta térmica antes de serem ensaiadas na estufa, em comparação a nova massa encontrada para o então atual tempo de experimento. A partir dos dados registrados, calcular-se a perda de massa em relação à massa inicial das amostras em cada pesagem, com isso será obtido um percentual de redução de massa em relação a massa inicial. Por fim, será traçado um gráfico de perda de massa em relação ao tempo.

Figura 12: Modelo de amostra utilizando uma lâmina



Fonte: Adaptado do fornecedor (2022).

Na Figura 15, é visto a estufa utilizada para a realização dos experimentos de perda de massa do material.

Figura 13: ESTUFA DIGITAL SSDi 30L.



Fonte: LKP (2022).

É importante mencionar, que o estudo da análise de perda de massa das pastas térmicas, permite uma melhor compreensão acerca do desempenho térmico das pastas, pois está diretamente relacionado ao conceito de resistência térmica de contato. Quando dois sólidos são colocados em contato, existe condução de calor através desta interface, no entanto existe uma resistência térmica de contato que é inerente às irregularidades e imperfeições de ambas as superfícies. Dessa forma, a área efetiva de contato é sempre menor que a área da interface, provocando o efeito de constrição, ou seja, deformação nas linhas de fluxo de calor. Com isso, surge uma resistência térmica adicional, à qual é chamada de resistência térmica de contato. O estudo da análise de perda de massa do material, está diretamente ligado a

resistência térmica de contato, pois a perda de massa das pastas térmicas, resulta na elevação da resistência de contato entre a eletrônica de potência, e o dissipador de calor. Pois a perda de material, faz com que menos pasta térmica esteja preenchendo as interfaces até então ocupadas pelas pastas, resultando na formação de “vazios”, acarretando na elevação da resistência térmica de contato (MENDES, 2018).

3.2.3 Análise grupos Funcionais

Os experimentos para análises de grupos funcionais foram realizados no Laboratório de Ensaio Térmicos e Espectroscopia (LTE) da UFSC – Blumenau. Para os espectros obtidos foi considerada uma faixa de número de onda de 4000 a 400 cm^{-1} , sob uma resolução de 4 cm^{-1} e utilizando 32 varreduras para cada espectro. Por meio desse ensaio foi estudado os grupos funcionais característicos da fase orgânica das pastas térmicas x, y e z. Pode meio da Figura 15, pode ser observado o espectrômetro utilizado nos ensaios.

Figura 14:Espectrômetro PerkinElmer modelo Frontier.



Fonte: O autor (2022).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

4.1 Desempenho Térmico

Para que uma pasta térmica, possa ser fornecida e comercializado no mercado, os fornecedores devem divulgar no “datasheet” desse material, uma série de informações técnicas, referentes a seu produto. Com isso, foi extraído dos “datasheets”, dados pelo fornecedor das pastas térmicas x, y e z os dados pertinentes a condutividade térmica desses materiais. Com base nas informações do Quadro 1, que foram fornecidas pelo fabricante, pode-se visualizar a condutividade térmica que cada pasta (em condições ideais), apresenta.

Quadro 1: Dados de condutividade térmica fornecidos.

Pasta Térmica	Condutividade térmica	Unidade
z	4,98	W/m.k
x	1,96	W/m.k
y	4,98	W/m.k

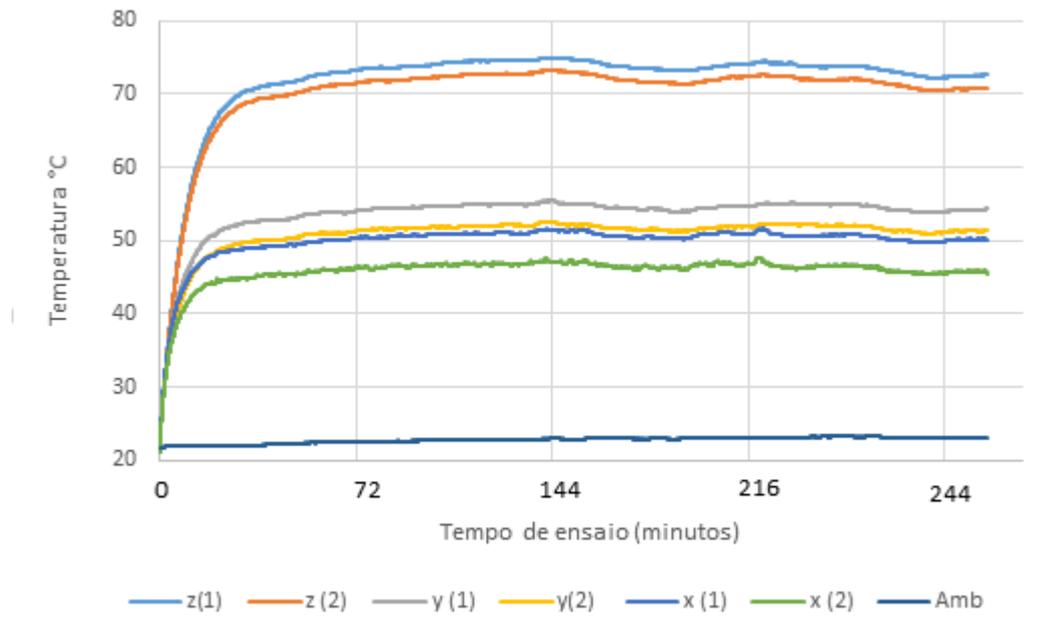
Fonte: O autor (2022).

Segundo o Quadro 1, a pasta x possui a menor condutividade térmica em relação as outras duas pastas térmicas. Sendo assim, por meio das análises de desempenho térmico das amostras, é esperado que a temperatura medida no termopar para a pasta térmica x, seja a maior possível. Pois como dito anteriormente, quanto menor a condutividade térmica de uma pasta, menos eficientemente o calor gerado por efeito joule nos resistores, será transmitido e dissipado no dissipador de calor, com isso, maior será a medição registrada pelo termopar, referente ao resistor. Vale ressaltar, que durante o ensaio de desempenho térmico das pastas térmicas, foram feitos 4 registros térmicos. O primeiro registro térmico é referente as amostras em 0 horas de ensaio (logo que o trocador de calor foi montado, prontamente foi realizado o primeiro registro térmico), o segundo registro térmico é referente as amostras em 250 horas de ensaio, o terceiro registro térmico é referente as amostras com 500 horas de ensaio e por fim, o último registro térmico é referente as amostras com 100 horas de ensaio. Com as análises de desempenho térmico das amostras feitas ao decorrer dos ensaios, espera se avaliar qualitativamente o quanto a condutividade térmica de cada pasta será afetada pelo decorrer do tempo.

Por meio da Figura 17, foi possível observar o primeiro registro do desempenho térmico das três amostras. Para o ensaio realizado a zero horas, se

observa o desempenho térmico das pastas, antes do início do processo de degradação térmica. Sendo assim, como ainda não foi dado início ao processo de “envelhecimento”, os dados referentes a esse ensaio representam os maiores valores de condutividade térmica encontrados de forma qualitativa. É importante mencionar, que as pastas térmicas foram ensaiadas tendo-se como referência a temperatura amb (ambiente).

Figura 15:Primeiro registro térmico realizado (ensaio térmico 0 horas).



Fonte: O autor (2022).

Com base na Figura 17, é observado três momentos distintos que ocorrem durante o ensaio de desempenho térmico. O primeiro momento se passa até aproximadamente a primeira meia hora de ensaio, nesse período de tempo em que o ensaio é iniciado, observa-se uma rápida elevação da temperatura. O segundo momento é caracterizado pela mudança do perfil da elevação da temperatura dos resistores, pois o sistema começa a se aproximar de uma estabilização da temperatura dos mesmos. Nesse intervalo de tempo, ocorrerá o equilíbrio térmico entre a potência dissipada em forma de energia térmica nos resistores, e a distribuição de calor na massa ou volume do dissipador, conforme a fórmula 7. Para esse experimento é aplicado uma potência total de aproximadamente 1,2 KW, que será distribuída uniformemente em cada resistor dos módulos IGBT, sendo que o calor gerado por efeito Joule por causa da aplicação dessa potência nos resistores, será transferido para a massa do dissipador de calor até com que atinja um valor limiar.

Desconsiderando os efeitos da pasta térmica, o valor limiar da transferência de energia deveria ocorrer quando os resistores apresentassem uma temperatura de aproximadamente 80°C (conforme descrito no tópico 3.2.1). Esse valor de temperatura não é atingido, pois, as pastas térmicas estão continuamente conduzindo o calor que é gerado pelas perdas de potência dos resistores. Sendo que, quanto menor a temperatura medida pelo termopar, mais eficientemente está ocorrendo a troca térmica entre a pasta térmica e o módulo IGBT, o que na prática se traduz como uma melhor condutividade térmica da pasta. Vale ressaltar que o segundo momento ocorre entre os primeiros 30 minutos de ensaio até um período de 120 minutos, nesse intervalo de tempo a temperatura nos resistores ainda não apresenta qualquer decaimento.

Com isso, o terceiro momento é marcado quando a temperatura nos resistores passa a decair, por influência do assentamento ou acomodação da pasta térmica na interface do material, onde o assentamento é caracterizado por sua distribuição nas interfaces, dos módulos IGBT e do dissipador de calor. Sendo que, quanto melhor a distribuição da pasta térmica na interface, menor será a resistência de contato entre as duas interfaces, com isso, a temperatura decairá. Sendo assim, as variações de temperatura encontradas ao longo do ensaio de desempenho térmico do material, ocorrem pela movimentação da pasta térmica na interface, pois essa movimentação afeta diretamente a resistência de contato entre os módulos de potência e o dissipador de calor.

Outra análise a ser feita para a Figura 17, é referente as temperaturas de ensaio dos resistores obtidas nesse período de tempo. É notado que para os resistores a onde foi aplicado a pasta térmica x, uma menor temperatura de ensaio foi coletada. De forma prática esse resultado se traduz, como uma maior condutividade térmica em relação as outras amostras (y e z). Em outras palavras, em virtude de sua maior condutividade, a pasta térmica x apresentou maior eficiência em transferir o calor para o dissipador de calor.

Os dados presentes nas análises de registro térmico, estão divididos entre: z (1) e (2), y (1) e (2), por fim x (1) e (2). As subdivisões (1 e 2), ocorreram dessa forma pois cada dissipador de calor em que foi colocado cada pasta térmica, possui dois termopares distintos, com isso, houveram dois registros térmicos distintos. Outro ponto a ser destacado é que apesar de ter-se duas pastas térmicas idênticas sendo ensaiadas no mesmo trocador de calor, observou-se dados diferentes comparando-

se a pasta térmica x (1), que apresentou uma maior temperatura de ensaio, em relação à pasta térmica x (2). Isso ocorreu devido o local onde estavam sendo coletados os dados térmicos no Termopar. Para as amostras de numeração 1, o termopar situa se a uma posição mais distante em relação ao ventilador (que está acoplado ao trocador de calor), em relação as amostras de numeração 2. Logo, os dados coletados em 1 pelo termopar recebem uma menor influência do ventilador, do que em 2. Como discutido no tópico 2.5, os ventiladores são de suma importância para as trocas térmicas realizadas em trocadores de calor e em virtude desse fenômeno, os termopares acoplados a região 2, apresentaram uma troca térmica mais eficiente. Logo a diferença de dados entre as amostras de numeração 1 em relação a 2, ocorreu devido a trocas térmicas mais eficientes. Uma menor influência do ventilador, do que em 2. Como discutido no tópico 2.5, os ventiladores são de suma importância para as trocas térmicas realizadas em trocadores de calor e em virtude desse fenômeno, os termopares acoplados a região 2, apresentaram uma troca térmica mais eficiente. Logo a diferença de dados entre as amostras de numeração 1 em relação a 2, ocorreu devido a trocas térmicas mais eficientes.

Tabela 1: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao primeiro registro térmico.

Pasta térmica	Temperatura mínima de ensaio(°C)	Temperatura máxima de ensaio (°C)
z (1)	21	75
z (2)	21	73
y (1)	21	55
y (2)	21	53
x (1)	21	52
x (2)	21	48

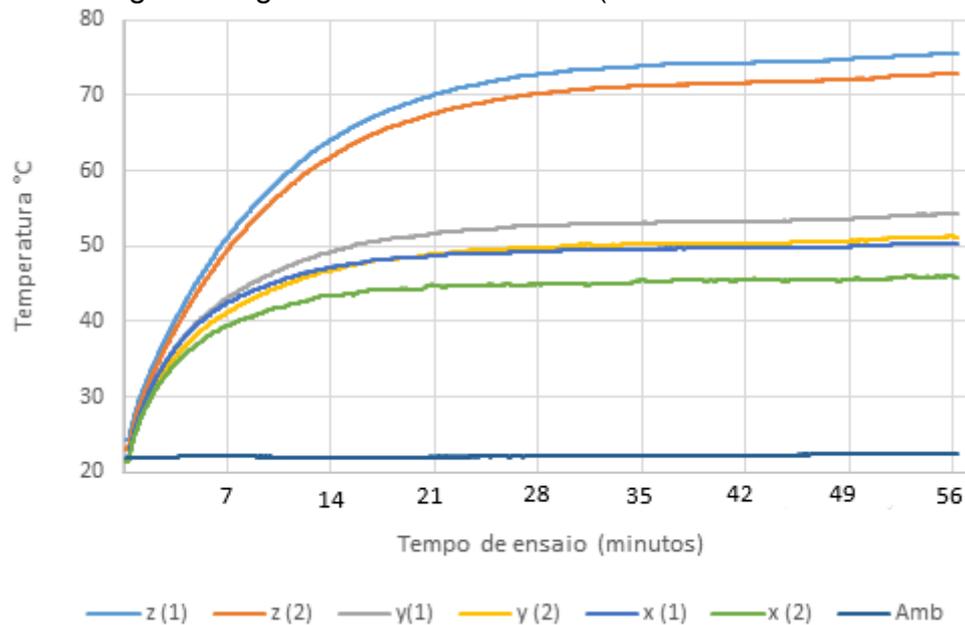
Fonte: O autor (2022).

Com base na Tabela 1, foi possível calcular que a diferença de temperatura máxima de ensaio da amostra z (2) em comparação a x (2), é de aproximadamente 25,5 °C. Como dito anteriormente, a condutividade térmica das pastas térmicas se expressa nas temperaturas de ensaio de desempenho térmico que são encontradas nos resistores. Com isso, com base no “datasheet” que foi fornecido pelo fornecedor referente aos valores de condutividade térmica, para as pastas x, y e z, era esperado que a temperatura medida pelo termopar, fosse menor para y e z em comparação a

x. Todavia os dados experimentais mostraram que a pasta x, apresentou uma condutividade térmica superior em relação as outras duas pastas.

Os dados da Figura 18 referem-se ao segundo registro térmico obtido, que é referente as amostras quando totalizavam um período de tempo de 250 horas ensaiadas, no trocador de calor.

Figura 16: Segundo registro térmico realizado (ensaio térmico 250 horas).



Fonte: O autor (2022).

Com base na Figura 18, é identificado que o gráfico apresentado não apresentou a transição entre o segundo para o terceiro momento. Com isso, como não foi observado o início do decaimento das temperaturas dos resistores, não foi identificado qual supostamente seria a máxima temperatura de ensaio que poderia ser obtida durante o registro desses dados.

Analisando os dados obtidos para a Figura 18, observa-se que pasta x ainda apresentou o melhor desempenho em relação às demais pastas térmicas, evidenciando uma maior condutividade térmica quando comparada as demais.

Tabela 2: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao segundo registro térmico.

Pasta térmica	Temperatura mínima de ensaio(°C)	Temperatura máxima de ensaio (°C)
z (1)	24	75
z (2)	24	74
y (1)	24	55
y (2)	24	53
x (1)	24	53
x (2)	24	45

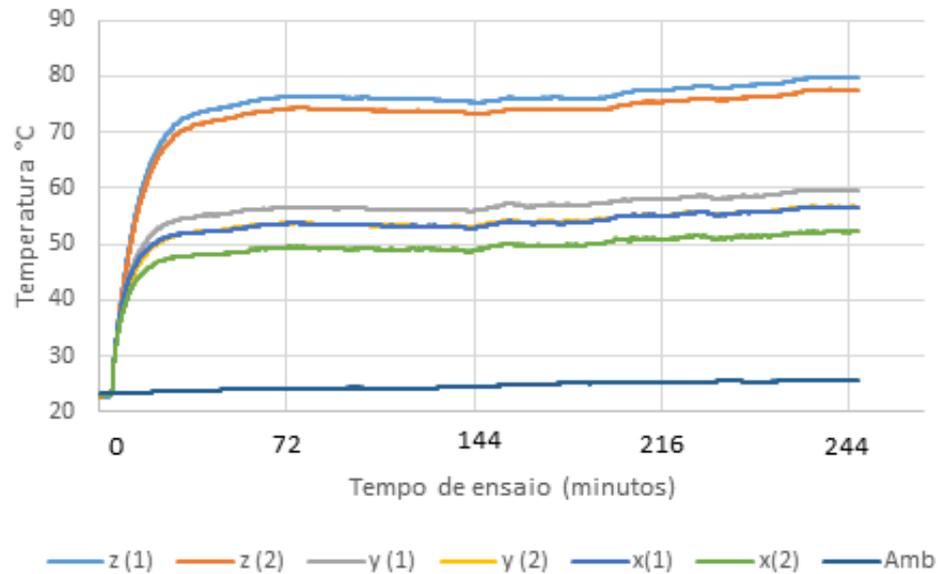
Fonte: O autor (2022).

Comparando-se os dados apresentados na Tabela 2 em relação aos da Tabela 1, observou-se um pequeno aumento na temperatura máxima de ensaio em relação as amostras z (1) e (2), para as demais amostras a temperatura máxima encontrada foi menor. Como pode-se observar na Figura 18, o tempo de ensaio para as amostras em duzentas e cinquenta horas foi menor do que para zero horas. Com isso, não foi possível registrar qual seria a temperatura máxima de ensaio, que marcaria o início do assentamento ou acomodação da pasta térmica na interface do material. A onde após o assentamento, as temperaturas registradas passariam a variar, ao invés de somente crescer.

Para a Tabela 2, era esperado ao menos um ligeiro aumento das temperaturas máximas alcançadas em decorrência do início da degradação térmica do material, ou seja, é esperada uma progressiva perda de condutividade térmica. A degradação é definida por qualquer reação química que modifique a qualidade de interesse de um material polimérico ou de um composto polimérico, nesse caso a degradação é estudada com base à condutividade térmica. Referindo-se as pastas térmicas ou compósitos poliméricos, um dos grandes responsáveis pela condutividade térmica do material são as cargas que são adicionadas em sua composição química. Considerando que as cargas devem ser fortemente agregadas pela matriz polimérica, formando agregados devido às forças de van der Waals, caso essa interação carga-matriz seja afetada de alguma forma, irá afetar a condutividade térmica do material. Sendo assim, a degradação da fase polimérica em decorrência do calor, resulta em um efeito negativo na interação carga-matriz, que por sinal irá prejudicar a condução térmica da pasta térmica polimérica (YUJUN, 2014).

Os dados da Figura 19 referem-se ao terceiro registro térmico obtido, que é referente as amostras quando totalizavam um período de tempo de 500 horas ensaiadas, no trocador de calor.

Figura 17: Terceiro registro térmico realizado (ensaio térmico 500 horas).



Fonte: O autor (2022).

Com o registro térmico de 500 horas, observou-se um aumento da temperatura máxima alcançada em relação ao registro térmico de 0 horas, o que caracteriza perda de condutividade térmica do material. As temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao terceiro registro térmico, podem ser vistas na tabela a seguir.

Tabela 3: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao terceiro registro térmico.

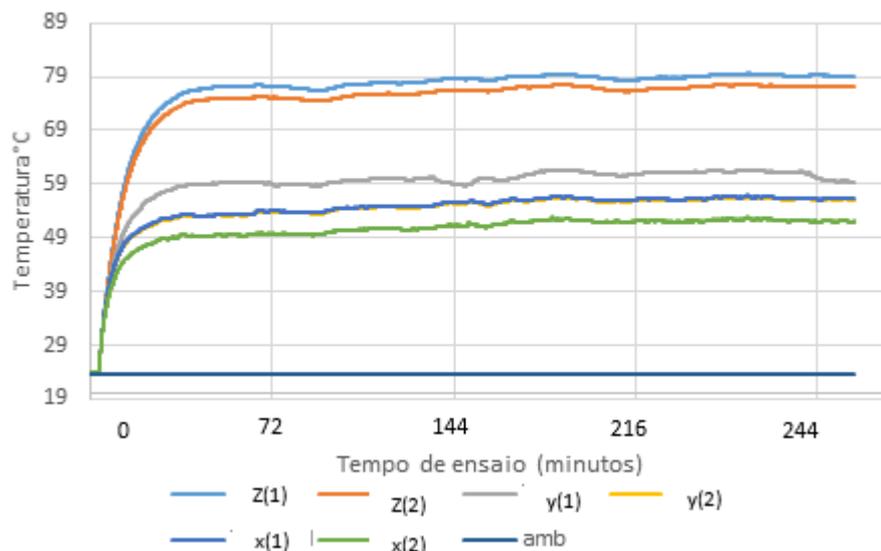
Pasta térmica	Temperatura máxima de ensaio(°C)	Temperatura mínima de ensaio (°C)
z (1)	80	23
z (2)	78	23
y (1)	60	23
y (2)	57	23
x (1)	57	23
x (2)	53	23

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 3 mostra que houve um aumento de todas as temperaturas máximas de ensaio, comparando-se os dados das Tabelas 1 e 3. Como relatado por YUJUN (2014), a condutividade térmica de uma pasta térmica de matriz polimérica é diretamente relacionada as cargas inseridas na matriz. Caso haja um enfraquecimento das ligações entre matriz-carga, a temperatura máxima de ensaio irá aumentar, pois a capacidade que o TIM possui em dissipar calor, diminuirá. Vale ressaltar, que o enfraquecimento das forças de van der Waals nas pastas térmicas é em decorrência de sua degradação, gerada pelo estresse térmico (SARVAR; WHALLEY, 2006).

Os dados da Figura 20 referem-se ao quarto registro térmico obtido, que é referente as amostras quando totalizavam um período de tempo de 1000 horas ensaiadas, no trocador de calor.

Figura 18: Quarto registro térmico realizado (ensaio térmico 1000 horas).



Fonte: O autor (2022).

A Figura 20 representa o último registro térmico feito, totalizando o tempo de testes que é requerido para as homologações de pastas térmicas, como mencionado no tópico 3.2.1. A partir de todos os registros térmicos obtidos, foi notado que as amostras ao serem ensaiadas com uma potência de 1,2 KW, pelo período de 1000 horas, resulta na elevação das temperaturas encontradas nos resistores dos módulos IGBT, por consequência da diminuição da condutividade térmica, das pastas térmicas. A estabilidade e confiabilidade a longo prazo de um TIM refere-se à sua capacidade de manter a condutividade térmica por um longo período de tempo ou condição de uso extensivo. O material TIM de baixa qualidade ou escolhido de forma inadequada

se degradará com o tempo, isso resulta na elevação da resistência térmica de contato, potencialmente levando a falhas. As pastas térmicas, desempenham um papel fundamental na redução da resistência térmica de contato entre superfícies sólidas dos módulos de potência e do dissipador de calor. Caso a transferência térmica seja prejudicada, irá afetar o desempenho do trocador de calor como um todo.

Com base nos registros térmicos da figura 20, o trocador de calor que foi ensaiado com a pasta térmica x, apresentou a menor temperatura registrada em seus resistores, já o trocador que recebeu a pasta z, as maiores temperaturas. Em outras palavras, a condutividade térmica exibida para o ensaio de 1000 horas para x, foi a maior dentre as amostras x, y e z. Sendo assim, é demonstrado melhor eficiência dessa pasta, o que lhe confere melhor confiabilidade em relação as demais.

Foram levantadas algumas hipóteses para a melhor condutividade térmica da pasta térmica x em relação as demais. Em geral sabe-se que quanto maior o carregamento (ou seja, o enchimento fração) na pasta térmica, maior é a sua condutividade térmica, no entanto, isso é regido pela viscosidade e molhabilidade do polímero. O tamanho da partícula é também um fator importante na mistura de polímeros como partículas podem atuar como espaçadores entre as superfícies e afeta a espessura da linha de ligação e, portanto, a temperatura resistência. Também é encontrado que uma otimização da distribuição de tamanho de partícula fornece o processamento benéfico de um material de menor viscosidade. (SARVAR; WHALLEY, 2006).

De acordo com os dados obtidos na Tabela 4, observa-se um pequeno aumento em relação as temperaturas máximas de ensaio obtidas para as pastas x e y, em relação a Tabela 3. Contudo a pasta z, foi identificado uma ligeira diferença negativa em relação a essa temperatura máxima alcançada, isso sugere que desde o período de testes de 500 horas, não houve perda de condutividade térmica para a pasta. Como não houve perda de condutividade, as interações entre a matriz polimérica e sua carga não foram afetadas de forma negativa, por um longo período de tempo, pois a diferença de tempo decorrido entre os registros térmicos da Figura 19 para a Figura 20, totalizam 500 horas.

Tabela 4: Temperaturas máximas e mínimas registradas, referentes ao quarto registro térmico.

Pasta térmica	Temperatura máxima de ensaio(°C)	Temperatura mínima de ensaio (°C)
z (1)	80	23
z (2)	77	23
y (1)	62	23
y (2)	57	24
x (1)	57	24
x (2)	53	24

Fonte: O autor (2022)

Sendo assim, do ponto de vista dos resultados coletados nesse experimento, a pasta z estaria reprovada. Apesar de apresentar pouca variação de temperatura, em relação às temperaturas máximas obtidas, demonstrou temperaturas máximas registradas nos resistores muito elevadas, sempre na faixa dos 70°C. Sabendo que as propriedades de condutividade térmica dos TIM's são oriundas de sua aditivação por partículas térmicas condutoras, nos leva a crer que a sua falta de condutividade deve-se algo de errado com sua aditivação (KANG, 2020). Podendo ser o tamanho da partícula inadequado, mistura de polímeros com partículas ineficientes, alta viscosidade, baixa molhabilidade da matriz com a carga ou até mesmo a falta de aditivos em sua fórmula estequiométrica, são hipóteses a serem levantadas para sua alta resistência térmica, sendo que todos os questionamentos apontam para erros de formulação ou composição do TIM.

Analisando os dados para y, esta pasta apresentou pouca variação entre a temperatura máxima encontrada em 0 hora, em relação à temperatura máxima encontrada para o ensaio de 1000 horas. Todavia como nesse trabalho, está sendo feito um estudo comparativo entre as propriedades térmicas das pastas térmicas, pelo fato da pasta x ter apresentado um desempenho superior a y, torna suas propriedades de condutividade térmica, menos atrativas.

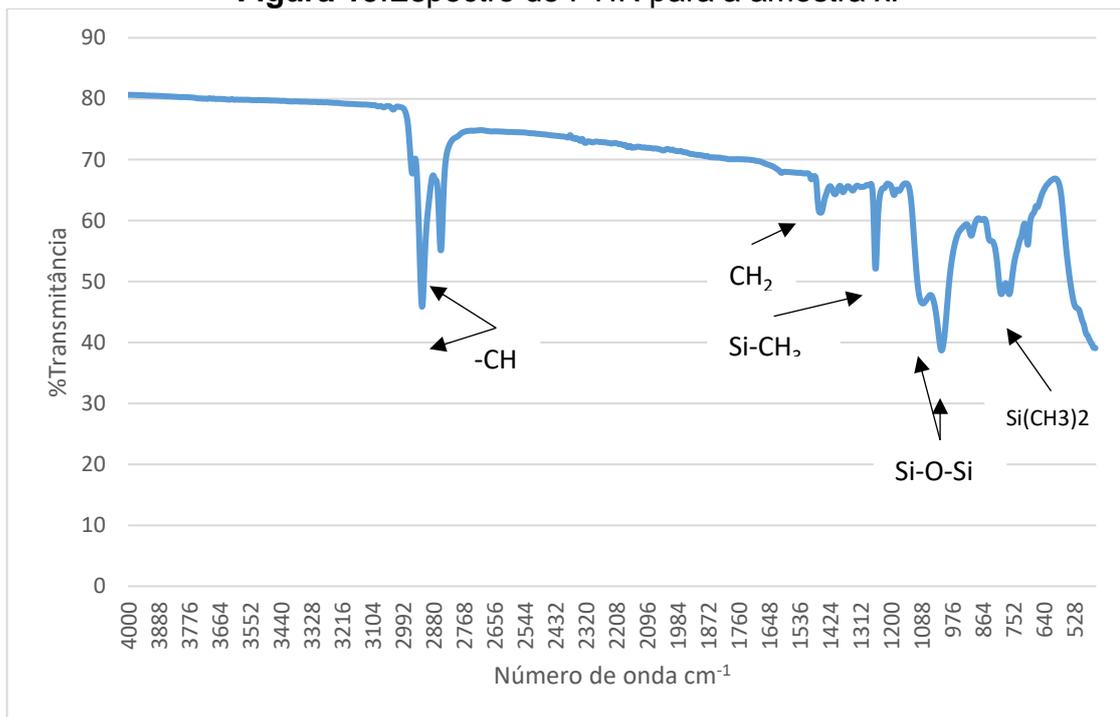
Em resumo as degradações citadas nesse tópico referem-se a degradações térmicas causadas pela exposição a potência de 1,2 KW, aplicada no trocador de calor por períodos prolongados de tempo. Existe certa diferença entre a degradação térmica causada por aquecimento rápido a altas temperaturas (acima de 200 °C) e a degradação causada a temperaturas inferiores por longos períodos de exposição. No primeiro caso, há fornecimento de energia suficiente para o rompimento de ligações químicas e formação dos primeiros radicais livres, pois geralmente a absorção de uma

quantia de energia que exceda a energia da ligação só pode ocorrer a temperaturas mais altas que 400 a 600 °C. A temperatura mais baixa as quebras de ligação são menos frequentes, assim o segundo processo é que distingue as macromoléculas dos compostos de baixa massa molar. Por exemplo, uma amostra de um filme de polietileno não estabilizado sofrerá um processo de amarelecimento se armazenada durante alguns meses no escuro, à temperatura ambiente em atmosfera oxidante. O amarelecimento é uma clara indicação da ocorrência de reações de oxidação. (DE PAOLI, 2009).

4.2 Espectroscopia de Infra Vermelho com Transformada de Fourier

Com base na Figura 21, foi possível identificar os grupos funcionais encontrados na pasta x.

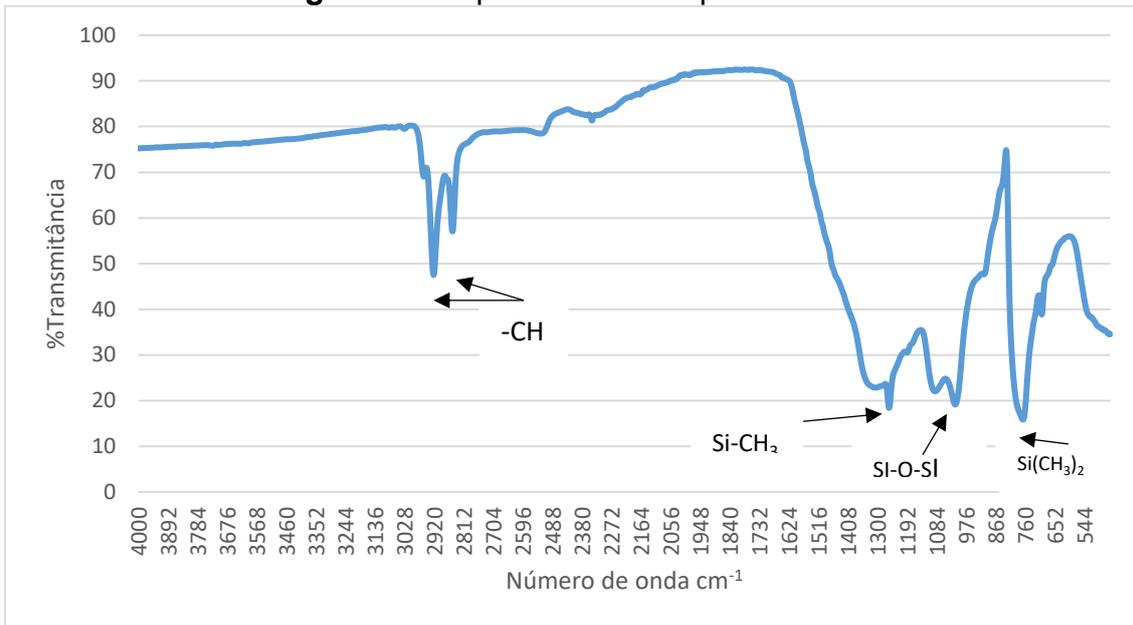
Figura 19:Espectro de FTIR para a amostra x.



Fonte: O autor (2022).

Com base na figura 22, é possível identificar os picos dos grupos funcionais para a pasta z.

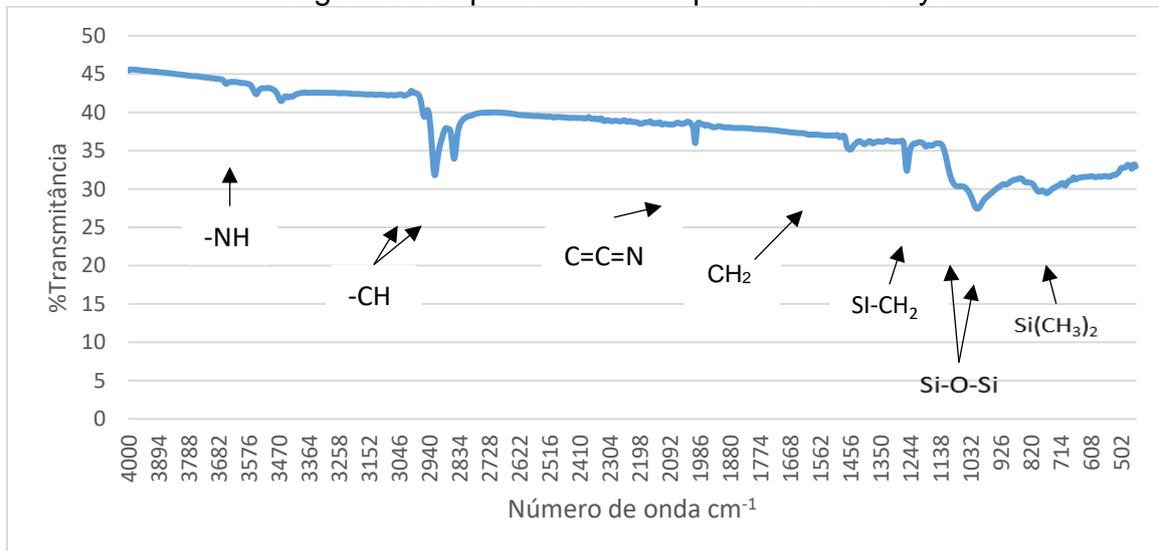
Figura 20: Espectro de FTIR para a amostra z.



Fonte: O autor (2022).

Com base na Figura 23, foram identificados os picos referentes a pasta y, assim como os grupos funcionais encontrados durante a análise da amostra.

Figura 21: Espectro de FTIR para a amostra y.



Fonte: O autor (2022).

As pastas térmicas apresentaram picos de estiramento de C-H próximos a 3000 cm^{-1} , além de picos de dobramento de CH₂ e CH₃ na faixa de 1475 a 1365 cm^{-1} , sendo o estiramento C-H ocorrendo por volta de 3000 cm^{-1} ($3000\text{-}2500 \text{ cm}^{-1}$). Caso um composto possua hidrogênios vinílicos, aromáticos, acetilênicos, a absorção C-H acontece em frequências superiores ou maiores a 3000 cm^{-1} . Esses compostos

demonstram hibridizações sp^2 e sp . Já para o CH_2 , os grupos de metileno têm uma absorção de dobramento característica que gira em torno e 1465 cm^{-1} (DUTRA; TAKAHASHI; DINIZ, 2013).

É possível observar que as três amostras presentes apontam estiramento assimétrico C-H sp^3 . Analisando os dados para as três pastas térmicas, observa-se que os estiramentos das ligações possuem aspecto de banda forte e fino. Para a pasta x os picos estão centrados entre 2922 cm^{-1} e 2911 cm^{-1} , já para a pasta térmica z os picos estão centrados 2922 cm^{-1} e 2854 cm^{-1} , por fim para y 2920 cm^{-1} e 2852 cm^{-1} . As três amostras apresentaram certa similaridade quanto à posição relativa dos picos, somente se diferenciando quanto a suas intensidades. As Figuras 21 e 22, demonstram que as pastas térmicas x e z apresentam picos mais intensos em relação à y, indicando uma maior presença de ligações do tipo para as duas pastas.

As Figuras 21 e 23 mostraram a presença de grupos metila ($-CH_2$), com picos centrados em 1460 cm^{-1} e 1464 cm^{-1} de aspecto de banda fracos, possuindo modo de vibração com deformação angular simétrica. Em contra partida, para a Figura 22 não foi possível identificar tal pico, pois a região em que o mesmo estaria evidenciado, possui uma banda larga que está encobrindo as outras, impossibilitando as detecções para essa região (DUTRA; TAKAHASHI; DINIZ, 2013).

Para a Figura 21 com pico centrado em 1258 cm^{-1} , para a Figura 23 com pico centrado em 1256 cm^{-1} e por fim para a Figura 22 também com pico centrado em 1258 cm^{-1} , foi identificado a presença da $Si-CH_3$. Segundo JOHNSON (2013), a presença da ligação indica a deformação de CH_3 em $Si-CH_3$.

Para todas as amostras foi identificada a presença do Siloxano, Si-O-Si. O Siloxano é caracterizado pela presença de vibração de alongamento assimétrico de Si-O e bandas em aproximadamente 1004 cm^{-1} e 1066 cm^{-1} para a Figura 23, em 1018 cm^{-1} e 1090 cm^{-1} para a Figura 21 e por fim 1016 cm^{-1} e 1096 cm^{-1} para a Figura 22. A presença dessas bandas ocorre devido ao alongamento de Si-O e vibração de flexão. Vale ressaltar, que para as pastas x e z, a intensidade dos picos é muito similar, sendo mais atenuada para y, o que indica uma menor presença de ligações do tipo na mesma (DUTRA; TAKAHASHI; DINIZ, 2013). Por fim, o último pico comum as três amostras a ser destacado, ocorre aproximadamente entre 766 cm^{-1} e 802 cm^{-1} , apresenta $-CH_3$ "rocking" (deformação angular "rocking") e Si-C alongamento em $Si-CH_3$ (GAO, 2014).

De acordo com GAO (2014) e LO (2015) a presença dos grupos funcionais comuns às três amostras, destacados anteriormente, identificam a presença de Polidimetil siloxano (PDMS). Neste sentido ambas as pastas térmicas possuem o PDMS em sua composição química. Não sendo possível avaliar por meio do ensaio de FTIR, qual o percentual dessa composição polimérica para cada amostra, pois a Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier é um ensaio qualitativo, não quantitativo.

Por fim, para a pasta y, observa-se a presença de dois picos que não são notados nas outras análises de FTIR. Em 3464 cm^{-1} caracteriza a presença de uma amina primária com estiramento N-H, já em 2000 cm^{-1} evidência a presença de um estiramento C=C=N representando uma cetenimina. A presença desses grupos funcionais possivelmente representa aditivos não reagidos presentes na formulação química do polímero. Alguns tipos de aditivos são incorporados ao polímero pelo próprio fabricante, durante ou após o processo de polimerização. Para isso, foi levantado duas principais hipóteses quanto à presença desses aditivos residuais.

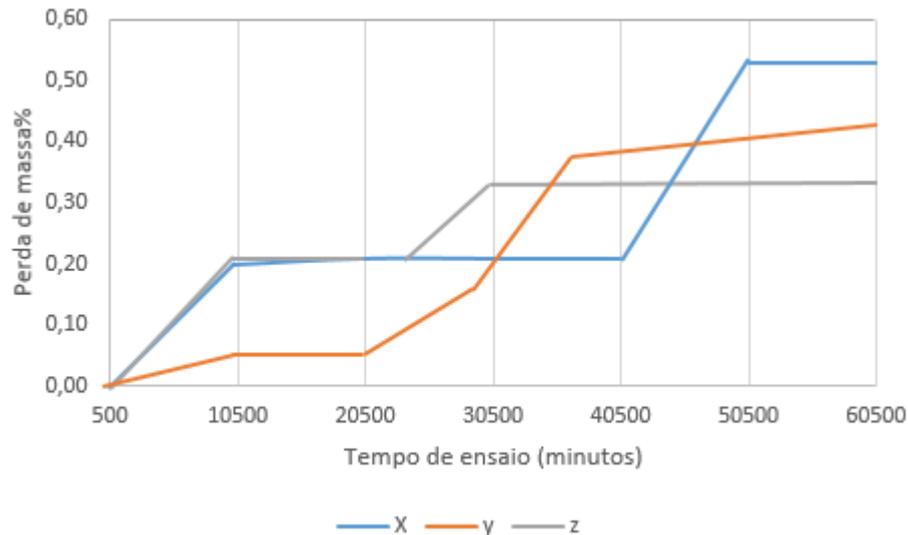
A primeira hipótese refere-se a caso esses aditivos sejam essenciais para as reações de polimerização do PDMS, isso justificaria a menor intensidade dos picos referentes aos grupos funcionais da pasta y, em relação às outras, pois como o aditivo não foi consumido em sua totalidade uma menor quantidade de grupos funcionais será formado.

A segunda hipótese refere-se à presença de aditivos que possuem a função de estabilização. Os agentes estabilizantes possuem a ação de inibir o processo específico de degradação. Depende do uso específico do artefato feito com o polímero. Isto significa que, para cada tipo de polímero e de aplicação é necessário adotar uma estratégia específica para inibir a degradação. Estes aditivos poderão atuar desativando os produtos reativos da degradação ou consumindo os produtos da reação de iniciação, impedindo a sua propagação. Para os casos das pastas térmicas, é de suma importância a presença de aditivos que inibam a termo oxidação. (Martins, 2021).

4.3 Ensaio de Perda de Massa

Os dados do ensaio de perda de massa estão apresentados na Figura 24.

Figura 22:Ensaio perda de massa até 1008 horas (60480 minutos) para as pastas térmicas.



Fonte: Adaptado do Fornecedor (2022).

A análise de perda de massa consiste em oferecer estresse térmico as pastas térmicas, a fim de que seja garantido certa confiabilidade ao TIM, por confiabilidade se entende que esse material apresenta boa estabilidade termo química. Pois caso o material não seja estável quanto a sua composição, terá maior suscetibilidade a se degradar e por consequência, perder massa.

Embora as pastas proporcionem um desempenho térmico, na interface relativamente bom, elas sofrem de vários mecanismos de falha que podem comprometer severamente o funcionamento do dispositivo eletrônico no qual foram instaladas. Segundo SKURIAT (2013), é geralmente aceito que as pastas térmicas falhem em decorrência da secagem (perda de massa). No entanto, outros mecanismos de falha, como aqueles associados à presença e subsequente evaporação de solventes (o que também resulta em perdas de massa) é observado. De qualquer forma, a degradação no desempenho térmico do TIM depende da temperatura de operação, do tempo de uso, do carregamento mecânico e das propriedades do material. Com isso, é notado na Figura 24, que a taxa de degradação da pasta térmica é uma forte função da temperatura operacional e do número de ciclos térmicos, por isso que ao variar a temperatura de ensaio de 50 °C (essa temperatura de ensaio ocorreu até 20500 minutos) para 80° C observou-se uma perda de massa

mais acentuada. É importante mencionar, que houve a variação da temperatura de ensaio em aproximadamente 20500 minutos, para que o ensaio se enquadre com ISO 8301-1991.

O estudo da análise de perda de massa das pastas térmicas, permite uma melhor compreensão cerca do desempenho térmico das pastas, pois como dito anteriormente, está diretamente relacionado ao conceito de resistência térmica de contato (MENDES, 2018).

O uso de TIM reduz a resistência de contato em uma eletrônica de potência, pois é um material de engenharia com melhores propriedades de condutividade que o ar, sendo que o mesmo é um condutor térmico ineficiente atuando como uma barreira térmica impedindo a transferência eficiente de calor através da interface. Sendo assim, a perda de massa é uma propriedade interessante a ser avaliada nas pastas térmicas, pois caso o material esteja perdendo massa ao longo de seu tempo de uso, uma quantidade de matéria ali presente na eletrônica de potência, está sendo perdida. Logo, a transferência de calor entre a eletrônica de potência e o dissipador de calor é afetada, sendo assim, quanto menor a perda de massa que ocorrer em um TIM durante esse ensaio, menor será o ganho em resistência térmica de contato para o trocador de calor, e menor será a elevação de temperatura registrado nos resistores dos módulos IGBT.

Apesar de a pasta térmica x, apresentar uma maior perda de massa em relação as outras pastas térmicas (aproximadamente 0,1% a mais em relação a y e 0,15% em relação a z), o ensaio de desempenho térmico que é realizado durante o mesmo intervalo de tempo do ensaio de perda de massa, comprovou que o maior percentual de perda de massa da amostra x, em relação as outras, não afetou negativamente na temperatura registrado no resistor do módulo IGBT, para 1000 horas de ensaio. Com isso, o maior percentual de perda de massa para x, afeta negativamente no ganho de resistência térmica de contato em relação as outras pasta térmicas, porém não o suficientemente para fazer com que a condutividade térmica em y e z, seja suficientemente mais eficiente que x. Pois, apesar de as amostras y e z apresentarem menor perda de massa em relação a x, ainda assim as temperaturas máximas encontradas nos resistores para o ensaio de 1000 horas, no tópico 4.1, foram maiores em relação a x.

É importante mencionar que a pasta térmica y além de apresentar propriedades de condução térmica similares a x, demonstra uma melhor estabilidade

química, motivo o qual apresentou menor perda de massa durante o ensaio. Vale ressaltar, que por mais que a pasta térmica z apresente a menor perda de massa durante o ensaio, seus resultados de condutividade térmica no Tópico 4.1, foram insatisfatórios, o que prontamente a desclassifica em relação as outras pastas térmicas.

5.0 CONCLUSÃO

Os ensaios de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier indicaram, que a fase polimérica presente em todas as pastas térmicas utilizadas, é constituída por polidimetil siloxano.

Seguindo os padrões adotados, para que uma pasta térmica possa ser homologada e ser aprovada por meio de ensaios de caracterização, foram realizados os ensaios de caracterização presentes nesse trabalho de conclusão de curso. Os testes realizados foram: testes de desempenho térmico, avaliação dos grupos funcionais por FTIR e ensaios de perda de massa.

Com base nos ensaios realizados, a pasta térmica z foi reprovada quanto a sua homologação, pois como apontado no tópico 4.1 sua condutividade térmica foi insatisfatória.

Analisando os dados para a Figura 24 em especial para a pasta y, a sua menor perda de massa em relação a x ao longo do período de ensaio, é um fator que chama a atenção. Pois as pastas x e y apresentam resultados similares de temperatura máxima alcançada no ensaio de desempenho térmico e uma perda de massa similar no ensaio feito no tópico 4.3. Todavia como apontado no tópico 4.2, a pasta térmica y, apresenta aditivos não reagidos em sua formulação química, o que representa falhas em relação ao controle do processo. Como deve ser buscado que os fornecedores tenham o máximo controle sobre seu processo produtivo, uma falha em relação a formulação química é um fator suficiente para desqualificar a pasta y, em relação a x.

Com base nos resultados avaliados nesse trabalho de conclusão de curso, foi concluído que as pastas térmicas y e z, não podem ser homologadas e portanto sua utilização em fábrica deve ser descartada.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Para futuras análises de homologação de pastas térmicas, sejam feitas análises de DSC nas amostras. Com o objetivo de investigar a fase inorgânica das pastas térmicas;
- Análises de microscopia óptica, para acompanhamento da degradação da microestrutura do material durante a realização do ensaio de desempenho térmico.

REFERÊNCIAS

ABORAS, M. et al. Automated test system for in-situ testing of reliability and aging behaviour of thermal interface materials. 2011.

BERGMAN, Theodore L. et al. Incropera's principles of heat and mass transfer. Wiley Global Education, 2017.

BURGER, N. et al. Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory. **Progress in Polymer Science**, v. 61, p. 1-28, 2016.

Brydson, J.A. Plastic Materials. 7th Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.

CAPACITOR M.O.S.(METAL-OXIDO-SEMICONDUCTOR). In: CAPACITOR M.O.S.(METAL-OXIDO-SEMICONDUCTOR). Campinas: Unicamp, 1995. Cap. 5. p. 89-104.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, v. 589, p. 249, 2002.

DE CARVALHO, André Luiz Costa et al. Análise, caracterização e simulação de sistemas fotovoltaicos fotoajustáveis. 2020.

DOW CHEMICAL COMPANY (ed.). **Enhanced performance and reliability of your electronics design**: thermally conductive materials selection guide. Usa: Trademark Of The Dow Chemical Company, 2022. 16 p.

DUE, Jens; ROBINSON, Anthony J. Reliability of thermal interface materials: A review. Applied Thermal Engineering, v. 50, n. 1, p. 455-463, 2013.

FERREIRA, Miguel. Potência elétrica e efeito de Joule. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, n. 1, 2013. INDUSTRIAL, Curso Termometria Instrumentação. **Tudo sobre o Termopar Tipo T CuCo (Cobre Constantan)**. 2014. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=eIGishnp_NM&ab_channel=CursoTermometriaInstrumenta%C3%A7%C3%A3oIndustrial FERNANDES, Dilnei Jose Martins. Conversor DC-DC quase-ressonante para altas potencias utilizando IGBT. 1991.. Acesso em: 14 out. 2022.

GIUZIO, Natalia. **Preparação e análise de desempenho de uma pasta condutora a base de cobre e prata**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PRIYANKA. **Inorganic Polymers**: silicones. Blumenau: Sonoro, 2017. 35 slides, color.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física, vol. 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi, v. 10, 2009.

HART, Daniel W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos. McGraw Hill Brasil, 2016.

LAZARINI, Rafael G.; AGNELLI, José AM. ESTUDO DE ELASTÔMEROS DE SILICONE PARA APLICAÇÕES EM ATIVIDADES DE ENSINO NA ÁREA MÉDICA, 2019.

Lopes, Bruno Leonardy Sousa Polímeros reforçados por fibras vegetais : um resumo sobre esses compósitos / Bruno Leonardy Sousa Lopes. -- São Paulo : Blucher, 2017. 43 p. : il., color

LKP (ed.). **ESTUFA DIGITAL SSDi 30L**. Disponível em: https://www.lkpdagnosticos.com.br/equipamentos/estufa-digital-ssdi30l?parceiro=3898&gclid=CjwKCAiAheacBhB8EiwAltVO21S81Ob8WMuBYozGaGjJiPRCvm6maDG_NuXOUDFcWPx1yj-pvzuVlxoCvI4QAvD_BwE. Acesso em: 14 dez. 2022.

LIU, Ziqiang et al. Preparation of Binary thermal silicone grease and Its application in battery thermal management. *Materials*, v. 13, n. 21, p. 4763, 2020.

MATTEDE, Henrique. **Tudo sobre o Termopar TO que é um termopar? ipo T CuCo (Cobre Constantan)**. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-termopar/>. Acesso em: 17 out. 2022.

MARRA, M. Otávio. Desenvolvimento de uma metodologia para degradação de graxas lubrificantes em laboratório. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

NASCIMENTO, Cristiane da Cunha et al. Síntese, caracterização e aplicação em fotocatalise de nanocristais semicondutores de sulfeto de cádmio suportados em argila tiolada. 2011.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor. Editora Blucher, 2018.

OLIVEIRA, Alexandre Silveira et al. Uso de termossifão em câmara de vapor para eliminação de pontos quentes em dissipadores aletados. 2007.

SILVA, Cátia Rodrigues da. Processamento reativo e relação estrutura-propriedades em compósitos termoplásticos de Poliamida reforçados com cargas inorgânicas de Titanossilicatos. 2013. Tese de Doutorado.

KANG, Haneul et al. Thermal conductivity characterization of thermal grease containing copper nanopowder. **Materials**, v. 13, n. 8, p. 1893, 2020.

MORA, Nora Díaz; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. Apostila de materiais elétricos. **Universidade estadual do oeste do Paraná-Unioeste. Foz do iguaçu**, 2010.

MENDES, Daniel Dias. Estudo teórico e experimental da resistência térmica de contato em interfaces alumina-alumínio. 2018.

MERLINI, Claudia. **COMPÓSITOS PARTICULADOS**. Blumenau: Departamento de Engenharia | Centro de Blumenau, 2020. 40 slides, color.

SARVAR, Farhad; WHALLEY, David C.; CONWAY, Paul P. Thermal interface materials-A review of the state of the art. In: **2006 1st electronic systemintegration technology conference**. IEEE, 2006. p. 1292-1302.

SOTO, César Massaki Teshima. **Sandia exhibe protótipo de cooler com dissipador de calor "flutuante" e que gira a 2000 RPM**. 2012. Disponível em: <https://adrenaline.com.br/noticias/v/12207/sandia-exibe-prototipo-de-cooler-com-dissipador-de-calor-flutuante-e-que-gira-a-2000-rpm>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SOARES, Robson de Miranda et al. Comportamento elétrico de mulita obtida do topázio. 2005.

DA SILVA, Leonardo Moraes. Eletroquímica do Estado Sólido: fundamentos sobre materiais semicondutores. **Apostila do Laboratório de Química Ambiental (LQA), São Paulo UNICAMP**, 2005.

SWAMY, M. C. et al. A review of the performance and characterization of conventional and promising thermal interface materials for electronic package applications. *Journal of Electronic Materials*, v. 48, n. 12, p. 7623-7634, 2019.

VALLÊRA, Antônio M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de Física**, v. 1, n. 2, p. 17, 2006.

VOLKE, Andreas; HORNKAMP, Michael (ed.). **IGBT Modules: technologies, driver and application**. Munich: Infineon Technologies Ag, 2011. 534 p.

YOKOGAWA (comp.). **Touch Screen GP10/GP20**. Disponível em: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/measurement/data-acquisition-products/data-logger/touch-screen-gp10-gp20/#Details>. Acesso em: 21 12

YUJUN, Gou et al. Effects of multi-walled carbon nanotubes addition on thermal properties of thermal grease. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 74, p. 358-367, 2014.

WANG, Ru-Min; ZHENG, Shui-Rong; ZHENG, Ya-Ping George. Polymer matrix composites and technology. Elsevier, 2011.

WACKER (Germany) (ed.). **Silicones**: compounds and properties. Munich: Wacker, 2011. 32 p. WACKER (Germany) (ed.). **Silicones**: compounds and properties. Munich: Wacker, 2011. 32 p.