

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

NATALIA GIUZIO

**PREPARAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA PASTA
CONDUTORA A BASE DE COBRE E PRATA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2016

NATALIA GIUZIO

**PREPARAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA PASTA
CONDUTORA A BASE DE COBRE E PRATA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

LONDRINA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

PREPARAÇÃO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA PASTA CONDUTORA A BASE DE COBRE E PRATA

Por

NATALIA GIUZIO

Monografia apresentada no dia 31 de outubro de 2016 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO.**

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)
Orientador

Profa. Dra. Silvia Midori Higa

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais-DAEMA-LD)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Cava

(UTFPR - Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – DAEMA-LD)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino

Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia de Materiais

Obs.: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais.

DEDICATÓRIA

À Deus, primeiramente.

Aos meus pais, Carlos e Marina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e sobre tudo à Deus pelo dom da vida e por possibilitar o meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço aos meus pais, Carlos e Marina, que me deram a vida e estiveram sempre ao meu lado, me apoiando e dando forças para continuar.

Agradeço aos meus irmãos, Paulo Henrique e Luis Fernando, pelo companheirismo de toda a vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Odney Brondino, pelo tempo dedicado e por todo conhecimento transmitido.

Agradeço à empresa Eletro In-Matec pela disponibilização de materiais, equipamentos e espaço físico para a realização dos testes, em especial, ao diretor Carlos Giuzio e ao tecnólogo Bruno Solis que estiveram me auxiliando a todo o momento.

Agradeço ao corpo docente do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina por todo o conhecimento passado ao longo desses anos.

E por último, porém não menos importantes, à todos os amigos pelo apoio e incentivo ao longo do curso.

RESUMO

GIUZIO, Natalia. Preparação e análise de desempenho de uma pasta condutora a base de cobre e prata. 2016. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

Esta pesquisa apresenta como tema a preparação de uma pasta condutiva utilizando como material base a borracha de silicone, com partículas de metais condutores, cobre ou prata, dispersas. As conexões elétricas que interligam barramentos e componentes elétricos são muito importantes, entretanto, estudos apontam que a área efetiva de contato nessas conexão é de apenas cerca de 1%. Dessa forma, busca-se o desenvolvimento da pasta condutiva que apresente custo e benefício, que por se apresentar em forma viscosa, propicie o melhoramento da área de contato dessas conexões. Consequentemente, redução de perdas na forma de calor e melhoria da condutividade elétrica entre as partes. Para isso, foram produzidas limalhas de cobre e prata, e estas foram misturadas ao polímero de silicone em diferentes concentrações, estando em cada amostra apenas um tipo de metal. Após a preparação desta pasta, ela foi aplicada em uma conexão entre barramentos de cobre dispostos em um circuito. Foi, então, medido o aquecimento da região através de um termovisor e, por meio da temperatura obtida, a condutividade e resistividade elétrica foi calculada. Considerando a variação de temperatura, foi possível determinar que o desempenho das amostras contendo prata foi superior ao desempenho das amostras contendo cobre. A melhor concentração foi de 90% de prata. Considerando custo e benefício, a utilização da pasta contendo 50% de prata pode ser mais vantajosa, porque a variação de temperatura é pouco superior à concentração maior, o custo é cerca de 40% menor e a viscosidade permite uma melhor aplicação.

Palavras-chave: Pasta condutiva. Cobre. Prata. Conexões elétricas.

ABSTRACT

GIUZIO, Natalia. Preparation and performance analysis of a conductive paste based on copper and silver. 2016. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

This research presents the preparation of a conductive paste using silicone rubber like a base material with scattered particles of conductive metals, copper and silver. The electrical connections that interconnect bars and electrical components are very important, however, researches show that the effective contact area is only about 1%. Thus, is sought the development of conductive paste that have to submit cost e benefit, which present in viscous form, allows improving the contact area of connections. Consequently, reduction of losses in the form of heat and improvement electrical conductivity between the parties. For this purpose, metal powders of copper and silver were produced and these were mixed with the silicone polymer at different concentrations and in each sample being only one type of metal. After preparation of the paste, it were applied on a connection between copper bars that are arranged in a circuit. Were, then, measured the heating region through a thermal imager and through the obtained temperature, the electrical conductivity and resistivity were calculated. Considering the temperature variation, were determined that the performance of silver containing samples was higher than the performance of the samples containing copper. The best concentration was 90% silver. Considering cost and benefit, the use of the paste containing 50% silver may be more advantageous because the change in temperature is slightly higher than the highest concentration, the cost is about 40% lower and viscosity allow better application.

Keywords: Conductive paste. Copper. Silver. Electrical connections.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESTRUTURAS DE POLÍMEROS DE SILICONE.....	20
FIGURA 2 – VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA COM A TEMPERATURA.....	21
FIGURA 3 – HASTE PARA MISTURA UTILIZADA.....	27
FIGURA 4 – ESQUEMA DE CIRCUITO ELÉTRICO UTILIZADO NA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA.....	28
FIGURA 5 – CIRCUITO ELÉTRICO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES.....	28
FIGURA 6 – CONEXÃO DO BARRAMENTO.....	29
FIGURA 7 – BORRACHA DE SILICONE.....	31
FIGURA 8 – BARRA DE PRATA.....	31
FIGURA 9 – BARRA DE COBRE.....	32
FIGURA 10 – LIMA ROTATIVA CILÍNDRICA 8.0MM ROCAST.....	32
FIGURA 11 – LIMALHAS DE COBRE E LIMALHAS DE PRATA.....	33
FIGURA 12 – IMAGEM EM ESTEREOSCÓPIO DAS LIMALHAS DE COBRE E PRATA.....	34
FIGURA 13 – AMOSTRAS DE COBRE (EM ORDEM): 50%, 70% E 90% DE COBRE EM MASSA.....	35
FIGURA 14 – AMOSTRAS DE PRATA (EM ORDEM): 50%, 70% E 90% DE PRATA EM MASSA.....	35
FIGURA 15 – ESPALHAMENTO DAS AMOSTRA NA CONEXÃO DOS BARRAMENTOS.....	36
FIGURA 16 - ESPALHAMENTO DA BORRACHA DE SILICONE.....	40

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COBRE E SUAS LIGAS SENDO A CLASSIFICAÇÃO DA UNS.....	16
TABELA 2 – PROPRIEDADES DO COBRE.....	16
TABELA 3 – LIGAS DE COBRE FORJADO CONTROLADO POR CORES PADRÃO.....	17
TABELA 4 – PROPRIEDADES DA PRATA.....	18
TABELA 5 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA E COEFICIENTE A DE ALGUNS CONDUTORES.....	23
TABELA 6 – GRANULOMETRIA DAS LIMALHAS DE COBRE E PRATA PRODUZIDAS.....	33
TABELA 7 – TEMPERATURAS MEDIDAS POR TERMOVISOR E VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO ENSAIO.....	37
TABELA 8 – RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA CALCULADAS A PARTIR DAS TEMPERTURAS MEDIDAS.....	39
TABELA 9 – DADOS DE TEMPERATURA MEDIDOS PARA AMOSTRA DE 90% AG.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVOS.....	12
3 JUSTIFICATIVA.....	13
4 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
4.1 CONEXÕES ELÉTRICAS.....	14
4.2 COBRE (Cu).....	14
4.2.1 História.....	15
4.2.2 Classificação.....	15
4.2.3 Propriedades.....	16
4.3 PRATA (Ag).....	17
4.3.1 História.....	18
4.3.2 Propriedades.....	18
4.4 POLÍMERO DE SILICONE.....	19
4.4.1 História.....	19
4.4.2 Classificação.....	19
4.4.3 Propriedades.....	20
4.5 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	20
4.5.1 Influência da temperatura na condutividade elétrica.....	21
4.6 VISCOSIDADE.....	23
4.7 PERCOLAÇÃO.....	23
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
5.1 MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS.....	25
5.2 PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	26
5.3 PREPARAÇÃO DA PASTA.....	26
5.4 APLICAÇÃO DA PASTA.....	27
5.5 MONTAGEM DO CIRCUITO.....	27
5.6 MEDIÇÕES.....	29
5.7 ENSAIO DE MOLHABILIDADE.....	29
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
6.1 MATERIAIS A SEREM UTILIZADOS.....	31
6.2 PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS.....	32
6.3 PREPARAÇÃO DA PASTA.....	35
6.4 APLICAÇÃO DA PASTA.....	36
6.5 MEDIÇÕES.....	37
6.6 ENSAIO DE MOLHABILIDADE.....	41
7 CONCLUSÕES.....	43
8 TRABALHOS FUTUROS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

O Brasil passou nos últimos anos por um desenvolvimento sócio-econômico, o que implicou na necessidade de maior oferta energética no país. Levando, conseqüentemente, a investimentos em acionamentos e equipamentos elétricos, abrangendo desde a geração até a transmissão de energia. Quando trata-se de acionamentos elétricos temos o grande uso de painéis elétricos, sejam eles quadros gerais de distribuição, centros de controles de máquinas e outros painéis de comando que são constituídos por equipamentos elétricos e barramentos, ou seja, condutores que serve de conexão entre dois ou mais circuitos.

As conexões elétricas que interligam os barramentos entre si e aos demais equipamentos são de extrema importância. É através delas que a corrente é conduzida de modo a acionar motores, máquinas e fábricas inteiras. A área de contato das conexões elétricas está diretamente relacionada ao desempenho dessas conexões, sendo requisitada uma maior área de contato para uma melhor condutividade. Entretanto, estudos apontam que apenas cerca de 1% da área nominal entre dois condutores é efetiva na condução de corrente elétrica (PADILHA e PAREDES, 2011).

Como forma de minimizar este problema algumas medidas são adotadas, como o aumento da rugosidade e remoção da camada de óxido formada entre os condutores. Outra alternativa recente é a chamada pasta condutora que é aplicada nas conexões com a finalidade de aumentar a área de contato, reduzindo o aquecimento nas regiões da conexões e, conseqüentemente, melhorar a condutividade elétrica. Um relatório de termovisão realizado pela empresa Eletro In-Matec, aponta que as conexões apresentam aumento rápido de temperatura, fator que reduz a condutividade elétrica. Aponta, ainda, que uma temperatura de até 70°C é considerada normal dentro de painéis elétricos (DA SILVA e SOLIS, 2014).

Uma pasta produzida comercialmente pela empresa *Clarus Technology* apresenta uma composição de metais condutivos (base cobre), complexo de lítio, inibidores de corrosão e óleos minerais. Porém, o custo desta pasta é extremamente elevado, chegando a custar dois mil reais por kilograma. Concomitantemente, existem pastas térmicas utilizadas em peças de computadores para dissipação de calor formuladas a partir da aditivação de silicone modificado com componentes especiais, normalmente prata devido à sua elevada condutividade térmica.

Neste cenário, propõem-se a preparação de uma pasta condutora economicamente viável e com bom desempenho, sendo produzida a partir de uma base de silicone, assim como as pastas térmicas, sendo misturadas partículas de cobre a uma das pastas e partículas de prata a outra, como forma de ativação da propriedade elétrica. Acredita-se que a ativação será

propiciada devido a ambos os metais (cobre e prata) apresentarem valores muito elevados de condutividade elétrica. O intuito dessa pasta é ser utilizada em conexões elétricas entre barramentos de cobre.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver uma pasta condutora, ou seja, uma massa plástica a base de borracha de silicone não vulcanizada e partículas de cobre e prata para uso em contatos de peças elétricas, em especial em conexões entre barramentos para painéis elétricos.

Os objetivos específicos são:

A determinação do melhor metal, considerando custo e benefício, para ser utilizado: cobre ou prata, sendo produzidas base de silicone com partículas dispersas de cobre ou base de silicone com partículas dispersas de prata.

A determinação da concentração de cobre ou de prata que apresente os melhores resultados na condutividade elétrica, visando melhor custo e benefício.

3 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a dificuldade encontrada nas conexões e contatos entre componentes elétricos, especialmente em barramentos de cobre utilizados em painéis elétricos, a pasta condutora será desenvolvida com intuito de melhorar o contato entre as partes e ajudar na condução da eletricidade.

O aumento da superfície de contato pode ser justificado pela viscosidade da pasta, permitindo que sejam preenchidas as rugosidade dos barramentos que impede o contato efetivo e a melhoria na condutividade está relacionada com a presença de partículas de cobre ou prata, que são materiais caracterizados por apresentar elevada condutividade elétrica. Além disso, devido à área de contato aumentada, pressupõem-se que a temperatura na região de contato não seja aumentada, fator que prejudica tanto na condutividade elétrica quanto na durabilidade dos equipamentos de painéis elétricos, dependendo do valor atingido.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 CONEXÕES ELÉTRICAS

Os acionamentos elétricos apresentam fatores econômicos e técnicos viáveis, propiciando sua larga escala de utilização em ambientes industriais. Para estes acionamentos, são necessárias conexões e contatos elétricos entre equipamentos e barramentos para transmissão de energia. As conexões elétricas têm como função a transmissão sem interrupção de corrente elétrica por meio de uma interface (PADILHA e PAREDES, 2011).

Os barramentos, por sua vez, podem ser definidos como conexões para dois ou mais circuitos realizadas através de grupo de condutores, que costumam ser utilizados na forma de barras (FONSECA, 2009).

Os materiais que constituem os contatos do equipamentos e barramentos são normalmente metais condutores comerciais, como cobre e alumínio. Algumas vezes, revestimentos superficiais são feitos nestes contatos a fim de melhorar a sua condutividade superficial (PADILHA e PAREDES, 2011).

Para que o objetivo dessas conexões seja cumprido, deve-se estabelecer e manter um bom contato metal-metal (entre a junta metálica). Então, a área de contato entre os condutores está relacionada de forma direta ao desempenho da conexão. Contudo, apenas cerca de 1% da área nominal entre dois condutores é efetiva na condução da corrente elétrica (PADILHA e PAREDES, 2011).

4.2 COBRE (Cu)

O cobre é um metal caracterizado pela coloração vermelho-marron, ponto de fusão de 1083°C, densidade de 8,96 g/cm³ (20°C) e resistividade elétrica de $1,7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (20°C), tornando-o o segundo melhor condutor elétrico, perdendo apenas para a prata, com resistividade igual a $1,5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. O cobre pode ser comparado ao ouro e a prata devido à estrutura eletrônica semelhante sendo ambos da mesma família na tabela periódica e, por isso, é considerado pouco susceptível a oxidação ao ar, formando uma camada superficial de óxido de cobre em contato com o oxigênio (CHIAVERINI, 1986; GULHÁEV, 1981).

4.2.1 História

Acredita-se que o cobre tenha sido o primeiro metal utilizado pelo homem e sua descoberta na superfície terrestre como metal puro é datada de 13000 a.C.. O primeiro uso do cobre foi para substituição da pedra como ferramenta de trabalho e na confecção de armas. É considerado como papel importante na evolução da humanidade (BARBOSA, 2012).

Quando trata-se do Brasil, a história comercial do cobre é um tanto quanto recente. A primeira mina descoberta foi 1874 na Bahia e, a sua prospecção só teve início cerca de 70 anos depois. A primeira planta estabelecida para produção do cobre eletrolítico no Brasil foi também na Bahia no final da década de 80 (BARBOSA, 2012).

4.2.2 Classificação

Existem duas classificações muito usadas para especificar o cobre, a classificação segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a classificação do Sistema de Numeração Unificado para Metais e Ligas (UNS - *Unified Numbering System for Metals and Alloys*) (NUNES, *et al.*, 1990).

Segundo a classificação da ABNT, os principais tipos de cobre são (CHIAVERINI, 1986):

- Cobre eletrolítico tenaz (Cu ETP – *Tenacius electrolytic*): cobre fundido a partir de cobre eletrolítico contendo no mínimo 99,90% de cobre e até 0,1% de prata;
- Cobre refinado a fogo de alta condutibilidade (Cu FRHC - *Refined high conductivity fire*): cobre contendo mínimo de 99,00% de cobre e até 1% de prata;
- Cobre refinado a fogo tenaz (Cu FRTP - *Refined the tenacious fire*): fundido a partir do Cu FRHC contendo no mínimo entre 99,80 e 99,85% de cobre e até 0,2% de prata;
- Cobre desoxidado com fósforo, de baixo teor de fósforo (Cu DLP - *Deoxidized with low phosphorus*): obtido por vazamento em molde, não apresenta óxido cuproso devido a desoxidação com fósforo e contém no mínimo 99,90% de cobre e prata e entre 0,004 e 0,012% de fósforo residual;

- Cobre desoxidado com fósforo, de alto teor de fósforo (Cu DHP - *Deoxidized with high phosphorus*): produzido da mesma forma que o Cu DLP, contendo entre 99,80 e 99,90% de cobre e prata e entre 0,015 e 0,040% de fósforo residual;
- Cobre isento de oxigênio (Cu OF – *Oxygen Free*): cobre eletrolítico com teores de cobre e prata entre 99,95 e 99,99%, este tipo de processamento é realizado para que não seja formado óxido cuproso e que não apresente resíduos desoxidantes;
- Cobre refundido (Cu *Cast*): cobre obtido a partir de cobre secundário e utilizado na produção de ligas, apresenta teor mínimo de cobre variante entre 99,75% (grau A) e 99,50% (grau B).

Segundo a classificação da UNS, as principais ligas de cobre comerciais são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cobre e suas ligas sendo a classificação da UNS.

Liga	Classificação UNS	Composição (% mássico)
Cobre comercialmente puro	C80100 – C81100 C10100 – C15760	> 99% Cu
Ligas de alto teor de cobre	C81300 – C82800	> 94% Cu
Latões vermelhos ao chumbo	C83300 – C85800	75 – 89% Cu
Latões amarelos ao chumbo	C85200 – C85800	57 – 74% Cu
Ligas de alto teor de cobre	C16200 – C19600	> 96% Cu

Fonte: Adaptado de INFOMET.

4.2.3 Propriedades

O grande uso comercial do cobre e de suas ligas ocorre devido à sua gama de propriedades: excelentes condutividades elétricas e térmicas, excepcional resistência a corrosão, fácil fabricação, cor, entre outras (NUNES, *et al.*, 1990).

A Tabela 2 a seguir mostra algumas propriedades do cobre:

Tabela 2 – Propriedades do Cobre.

Propriedade	Valor
Limite de escoamento	5 a 35 kgf/mm ²
Limite de resistência a tração	22 a 45 kgf/mm ²
Alongamento	48 a 6%
Condutividade elétrica	6,0 x 10 ⁷ (Ω.m) ⁻¹
Módulo de elasticidade	12000 a 13500 kgf/mm ²

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, 1986.

Quando se trata da facilidade de fabricação, o cobre pode ser moldado para formatos e dimensões necessárias por qualquer processo comum de fabricação. Pode ser laminado, estampado e deformado à frio. Pode ser laminado, extrudado, forjado e conformado em elevadas temperaturas (NUNES, *et al.*, 1990).

Quando se trata de resistência a corrosão, o cobre pode ser atacado por reagentes comuns e meio ambiente, por exemplo pelo oxigênio do ar. O cobre puro resiste muito bem a ataques sob as condições mais corrosivas (NUNES, *et al.*, 1990).

Quando se trata de coloração, pode ser identificado o componente ligado com a cor do material, como pode ser observado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Ligas de cobre forjado controlado por cores padrão.

Nome da Liga	Nome comum	Descrição de cor
C11000	Cobre eletrolítico tenaz	Rosa claro
C21000	Douradura, 95%	Vermelho – Marron
C22000	Bronze comercial, 90%	Bronze – Dourado
C26000	Bronze cartucho, 70%	Verde – Dourado
C63800	Bronze alumínio	Dourado
C65500	Bronze de alto silício, A	Marrom
C70600	Cobre níquel, 10%	Alfazema clara
C74500	Níquel prata, 65 -10	Cinza – Branco
C75200	Níquel prata, 65-18	Prata

Fonte: Adaptado de NUNES, ADAMS, *et al.*, 1990.

Quando se trata de condutividade elétrica e térmica, o cobre e suas ligas apresentam uma condutividade boa e é o metal mais utilizado em aplicações que precisam dessa propriedade, tais como fios, cabos e conexões elétricas (NUNES, *et al.*, 1990).

Os cobres utilizados em aplicações elétricos são os cobres puros representados pelas classificações UNS C10100 até C13000 (NUNES, *et al.*, 1990).

4.3 PRATA (Ag)

A prata é um metal nobre de cor cinza e brilhante, considerada de alto custo e de propriedades notáveis, apresentando ótima condutividade elétrica, baixa dureza, boa ductilidade e resistência à corrosão. A resistência mecânica da prata pode ser aumentada

formando uma liga por solução sólida com o cobre. A prata é utilizada em grande range de aplicações que incluem jóias, cunhagem, componentes elétricos e eletrônicos e compostos fotográficos (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2012) (DE SOUZA, 2013).

4.3.1 História

Acredita-se que a prata tenha sido o terceiro metal de ocorrência natural a ser descoberto, antecedido pelo ouro e pelo cobre, sendo encontrados objetos de prata datados de 5000 a.C., na Índia. A prata é considerada o elemento mais próximo do ouro que era visto como o metal perfeito (DE SOUZA, 2013).

As primeiras minerações de prata foram realizadas na Grécia por volta de 1000 a.C. e depois em Roma. Outras grandes minas foram descobertas no Novo Mundo (México, Peru, Bolívia) por volta de 1492. A produção de prata nessa região entre 1500 e 1800 representou cerca de 85% da produção mundial (DE SOUZA, 2013).

Atualmente, os maiores produtores de prata são México, Peru, China, Austrália, Chile, Bolívia e Estados Unidos. O Brasil tem uma baixa produção e necessita de importação para suprir o mercado interno (DE SOUZA, 2013).

4.3.2 Propriedades

A prata é caracterizada por apresentar excelentes condutividades elétrica e térmica, alta refletividade, boa resistência a corrosão, sendo estável em ar puro e água e formando uma película superficial em ozônio, gás sulfídrico ou ar com enxofre, e boa ductilidade. A condutividade elétrica da prata é maior entre todos os elementos. A seguir, na Tabela 4, são mostradas algumas propriedades.

Tabela 4 – Propriedades da Prata.

Propriedade	Valor
Ponto de fusão	1234,94 K
Ponto de ebulição	2435 K
Densidade	10490 kg/m ³
Resistividade elétrica	1,63 x 10 ⁻⁸ Ω.m
Condutividade térmica	430 W/m.K
Condutividade elétrica	6,8 x 10 ⁷ (Ω.m) ⁻¹

Fonte: Adaptado de DE SOUZA, RODRIGUES, *et al.*, 2013.

4.4 POLÍMERO DE SILICONE

Os polímeros de silicone encontram uma ampla diversidade de aplicações devido às suas propriedades de boa 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 (BRYDSON, 1999).

4.4.1 História

A primeira vez que foi prevista a possibilidade da existência de compostos organossiliconados foi em 1840 por Dumas. Em 1857, Buff e Wohler encontraram a substância conhecida como triclorosilano pela passagem de gás clorídrico sobre uma mistura de silicone e carbono. Em 1863, Friedel e Crafts prepararam o tetrametilsilano pela primeira vez através da reação do dietil zinco com tetracloreto de silício. Em 1872, Ladenburg produziu o primeiro polímero de silicone através da reação entre dietoximetilsilano com água na presença de vestígios de ácido, formando um óleo muito viscoso. Entretanto, a base do silicone moderno foi colocada pelo professor Kipping, entre 1899 e 1944. Em 1904, Kipping criou o termo silicone para definir produtos da hidrólise dos cloretos de silício dissubstituídos. A produção do silicone teve início em 1956 pela *Union Carbide Corporation*. Na década de 1970, as taxas de crescimento para o silicones foram maiores do que para os demais polímeros comerciais, mostrando uma taxa de 10-15% de crescimento anual (BRYDSON, 1999).

4.4.2 Classificação

Os polímeros de silicone são apresentados de diversas formas: fluídos de silicone, resinas de silicone e borrachas de silicone. Na Figura 1 a seguir, temos um exemplo de estrutura para fluído de silicone (A) e borracha de silicone (B) (BRYDSON, 1999).

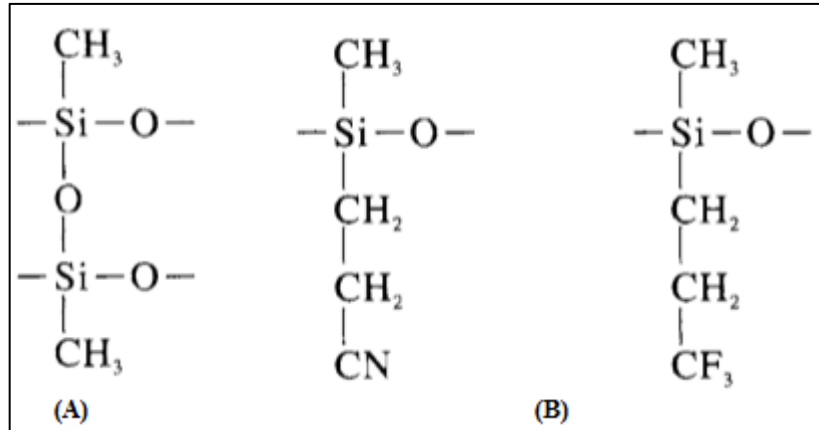


Figura 1. Estruturas de polímeros de silicone: (A) Fluido; (B) Borracha
Fonte: Adaptado de BRYDSON, 1999.

4.4.3 Propriedades

A resina de silicone apresenta boa resistência ao calor e baixa resistência mecânica, devido à tendência de formação de anéis com consequência baixa eficiência de ligações cruzadas e forças intermoleculares fracas. São, também, altamente hidrofóbicas e bom isolante elétrico, especialmente a elevadas temperaturas e sob umidade (BRYDSON, 1999).

A borracha de silicone, por sua vez, apresenta estabilidade à temperatura, retenção de elasticidade a baixas temperaturas e boas propriedades elétricas. Apresentam custo superior às borrachas naturais e tem propriedades mecânicas inferiores à temperatura ambiente. A gama de temperatura de uso geral é de -50 a 250°C. A condutividade térmica é, também, elevada, cerca de duas vezes a da borracha natural. Além de apresentar excelentes propriedades elétricas, quando comparado com outras borrachas (BRYDSON, 1999).

4.5 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (σ)

A facilidade com que um material conduz corrente, ou seja, a condutividade elétrica de um material, é uma das características elétricas mais importantes. Ela é utilizada de modo a expressar a natureza de um material, sendo definida como o inverso da resistividade elétrica (ρ):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} [(\Omega \cdot m)^{-1}] \quad (1)$$

Essa propriedade em materiais sólidos exibe uma faixa surpreendente de valores. A classificação de acordo com a condutividade apresenta 3 grupos principais: condutores, semicondutores e isolantes. Os condutores podem ser exemplificados pelos metais (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2012).

4.5.1 Influência da temperatura na condutividade elétrica

A resistividade elétrica e, portanto, a condutividade elétrica para componentes metálicos, pode ser influenciada por três fatores principais: temperatura, pureza e deformação. A temperatura ambiente, os elétrons de valência de um metal puro estão praticamente todos ionizados, o que implica numa concentração quase constante de elétrons livres. Entretanto, à medida em que a temperatura é elevada, ocorre um aumento na vibração dos elétrons da rede cristalina, aumentando o número de colisões entre elétrons livres e fixos na rede e, portanto, acarretando a perda de mobilidade dos elétrons livres e a consequente elevação da temperatura do corpo condutor (chamado Efeito Joule). A redução da condutividade elétrica é provocada pela redução no livre caminho médio dos elétrons livres, já que o número de elétrons livres permanece constante (BRIGATTO e MACHADO, 2013) (SHACKELFORD, 2008).

A resistência elétrica (R) é a razão entre o produto da resistividade elétrica (ρ) e o comprimento do condutor (L) por sua área (A), conforme Equação 2.

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A} [\Omega] \quad (2)$$

Na Figura 2 a seguir, tem-se uma curva de variação da resistência elétrica com a temperatura.

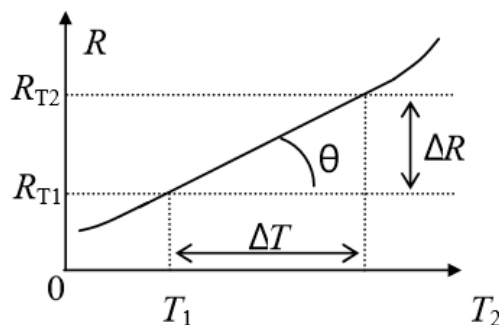


Figura 2. Variação da resistência elétrica com a temperatura
Fonte: BRIGATTO e MACHADO, 2013.

Analisando a curva acima, pode-se inferir que a inclinação do segmento de reta é igual a:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{R_{T_1} - R_{T_2}}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

Trabalhando com a Equação 1, encontra-se uma característica intrínseca do material que descreve o comportamento de sua resistividade com a temperatura, chamado de coeficiente de variação da resistividade com a temperatura (α) dado em $^{\circ}\text{C}^{-1}$:

$$\alpha_{T_1} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{R_{T_1}} = \frac{R_{T_2} - R_{T_1}}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

O parâmetro α é definido para uma determinada temperatura e para materiais puros. Quando conhecidos a resistividade elétrica e o coeficiente α de um metal a uma dada temperatura (T_1), pode-se calcular a resistividade para qualquer temperatura (T_2):

$$R_{T_2} = R_{T_1} \cdot [1 + \alpha_{T_1} \cdot (T_1 - T_2)] \quad (5)$$

A temperatura ambiente é normalmente de 20°C e, portanto, os coeficientes α são tabelados a esta temperatura e, então, para qualquer temperatura T , a resistividade elétrica de um metal (ρ_T) é dada por:

$$\rho_T = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20)] \quad (6)$$

Embora o coeficiente de variação da resistividade não seja aplicado para misturas, pode ser uma alternativa de verificação da variação da ordem de grandeza da resistividade destas em função da temperatura, considerando que a mistura esteja como filme entre duas placas. Na Tabela 5 são apresentadas a resistividade elétrica (ρ) e o coeficiente de variação da resistividade (α) com a temperatura para alguns metais condutores a temperatura de 20°C .

Tabela 5 – Resistividade elétrica e coeficiente α de alguns condutores.

Material	Resistividade a 20°C ρ ($\Omega.m$)	Coefficiente de resistividade a temperatura α ($^{\circ}C^{-1}$)
Alumínio	$28,28 \times 10^{-9}$	0,00390
Chumbo (99,73%)	$206,48 \times 10^{-9}$	0,00336
Cobre	$17,24 \times 10^{-9}$	0,00393
Ferro (99,99 + %)	$97,10 \times 10^{-9}$	0,00651
Magnésio (99,80%)	$44,60 \times 10^{-9}$	0,01784
Níquel (99,95 + Co)	$68,40 \times 10^{-9}$	0,00690
Ouro	$24,40 \times 10^{-9}$	0,00340
Platina (99,99%)	$106,00 \times 10^{-9}$	0,00392
Prata (99,78%)	$15,90 \times 10^{-9}$	0,00410
Tungstênio	$55,10 \times 10^{-9}$	0,00450
Zinco	$59,16 \times 10^{-9}$	0,00419

Fonte: Adaptado de SHACKELFORD, 2008.

4.6 VISCOSIDADE (μ)

A viscosidade é uma propriedade do material e diz respeito ao seu escoamento viscoso. Pode ser definida como a medida da resistência a uma deformação permanente de um material não cristalino (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2012). Tratando o conceito de forma mais palpável, a viscosidade é a facilidade de um material escoar (BRUNETTI, 2008).

Pode ser descrita pela razão entre tensão de cisalhamento aplicada (τ) e a variação da velocidade em função da distância (dv/dy) para o escoamento viscoso de um líquido entre duas placas (CALLISTER JR. e RETHWISCH, 2012) (BRUNETTI, 2008).

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} [Pa.s] \quad (7)$$

A viscosidade sofre influência de diversas condições, tais como pressão e temperatura (BRUNETTI, 2008).

4.7 PERCOLAÇÃO

A percolação é uma ferramenta no estudo dos hidrídidos que permite a utilização de materias com magnitudes de propriedades muito diferentes. (ASHBY, 2012). A dispersão de pó metálico em polímero isolante, tema abordado neste trabalho, é um caso de percolação.

O estudo da percolação visa determinar a quantidade e a forma do material que deve ser adicionada ao outro material (matriz) para promover a propriedade desejada. No caso de partículas metálicas em polímeros que objetiva a condução em massa, o quesito necessário é a conectividade, ou seja, quando há no arranjo um único contato entre as suas superfícies. A conectividade indica, por tanto, a fração de partículas condutoras necessárias para atingir o patamar de percolação (ASHBY, 2012).

Podem ser adotadas algumas medidas para reduzir o patamar de percolação, tais como a redução do tamanho das partículas de metal, que proporciona um caminho único que se conecta, embora, partículas muito pequenas exigem maior quantidade em massa para um boa condução que pode alterar as propriedades do polímero (flexibilidade, moldabilidade). Outra medida seria um aumento na fração de volume, que proporciona aumento nos caminhos condutores seguindo equação parabólica e, depois, de forma linear. Ademais, a morfologia das partículas pode ser modificada, substituindo as esferas (normalmente utilizadas) por fibras, que apresentam maior facilidade de contato e sua razão de aspecto está diretamente relacionada com a redução do patamar de percolação (ASHBY, 2012).

Além dos exemplos de condutividade elétrica, a percolação é uma ferramenta nos estudos de passagem de líquidos através de espumas bastando, também, um único contato para que haja o vazamento (ASHBY, 2012).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste trabalho foram utilizados 3 tipos de materiais para preparação da pasta condutiva, são eles:

- 32g de Limalha de cobre (pureza 99,9% Cu) (Anexo A);
- 32g de Limalha de prata (pureza 99,9% Ag);
- 100g de Borracha de silicone não vulcanizada (Anexo B).

Os metais usados apresentaram granulometria pré-determinada e fixada.

Para montagem do circuito padrão para medições foram necessários:

- Barramento de 55A com dimensões padrão: 3/8 x 1/16;
- Circuito de carga de 55A;
- Resistência elétrica de 11880W;
- Tensão elétrica de 220V.

Para a preparação das amostras e análises foram necessários:

- Balança Analítica com precisão de 0,001g;
- Conjunto de peneiras para separação granulométrica;
- Estereoscópio;
- Furadeira de bancada Mais Máquinas Industriais – Modelo FBM;
- Lima rotativa cilíndrica 8.0mm Rocast;
- Multímetro digital Minipa – Modelo ET-4050;
- Termovisor Minipa – Modelo FLIR i3 (Anexo C);
- Parafusadeira elétrica BOSCH 9,6V para controle de torque.

Outros materiais:

- Acondicionador de amostras;
- Álcool etílico hidratado 70° INPM;
- Espátula plástica;
- Haste para misturas;
- Placa de Petri.

A balança, o conjunto de peneiras e o estereoscópio foram utilizadas na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Londrina. Os demais equipamentos e procedimentos foram utilizados e realizados na empresa Eletro In-Matec de Londrina – PR.

5.2 PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas de cobre e prata foram obtidas a partir do processo de limagem mecânica de uma barra de cada material, em que a lima rotativa foi acoplada à furadeira de bancada. O processo foi realizado mecanicamente como forma de facilitar a produção das limalhas.

As limalhas foram peneiradas, de modo a separar os grãos por sua granulometria. As malhas utilizadas nesta separação foram 425mm (35 mesh), 300mm (48 mesh) e 180mm (80 mesh). Além disso, as limalhas foram analisadas por meio de estereoscopia, utilizando placas de Petri, verificando a sua morfologia. Esse procedimento foi realizado para garantir a reprodutibilidade da pasta.

5.3 PREPARAÇÃO DA PASTA

A pasta foi preparada em pequenas quantidades, cerca de 4g, variando a concentração mássica de metal. A massa das amostras foi determinada de acordo com a massa que é produzida para pastas térmicas.

São determinadas as seguintes amostras:

- Amostra 1: 100% silicone;
- Amostra 2: 50% silicone + 50% cobre;
- Amostra 3: 30% silicone + 70% cobre;
- Amostra 4: 10% silicone + 90% cobre;
- Amostra 5: 50% silicone + 50% prata;
- Amostra 6: 30% silicone + 70% prata;
- Amostra 7: 10% silicone + 90% prata;

Para garantir uma mistura homogênea, foi utilizada uma furadeira de bancada com um pequeno aparato metálico (haste para mistura) acoplado na ponta, com velocidade controlada (70 rpm) e tempo determinado (1 minuto). A haste para mistura é mostrada na Figura 3 a seguir.

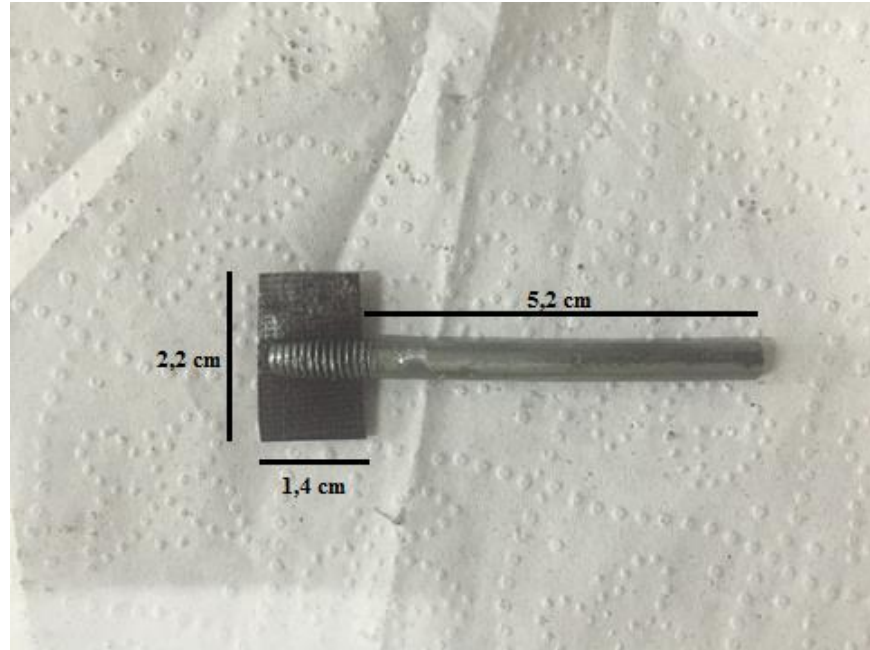


Figura 3. Haste para mistura utilizada.
Fonte: Autoria própria.

5.4 APLICAÇÃO DA PASTA

A pasta foi aplicada na conexão localizada no centro do barramento de dimensões padrões. Para garantir que a região de aplicação fosse igual para todas as amostras, o local foi limpo utilizando álcool etílico, removendo resquícios de óleo e poeira. Além disso, a aplicação da pasta foi feita com a utilização de espátula plástica realizando movimentos do centro para a borda.

5.5 MONTAGEM DO CIRCUITO

O circuito foi montado de acordo com o esquema a seguir na Figura 4.

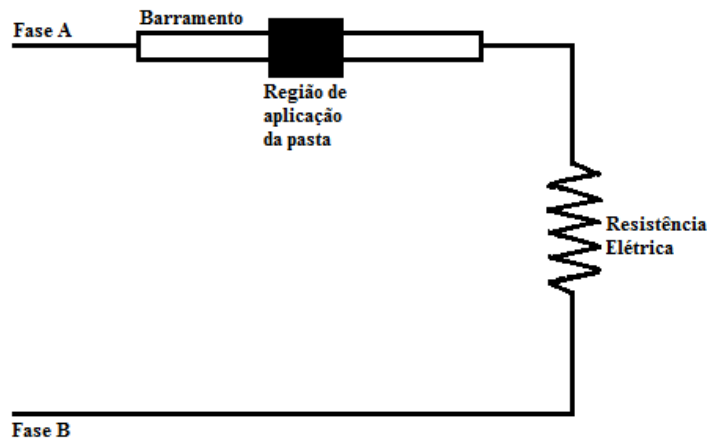


Figura 4. Esquema de circuito elétrico utilizado na medição da temperatura.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5 é apresentada o circuito elétrico utilizado. As resistências foram montadas no canhão de uma extrusora e conectadas a conexão de barramentos.

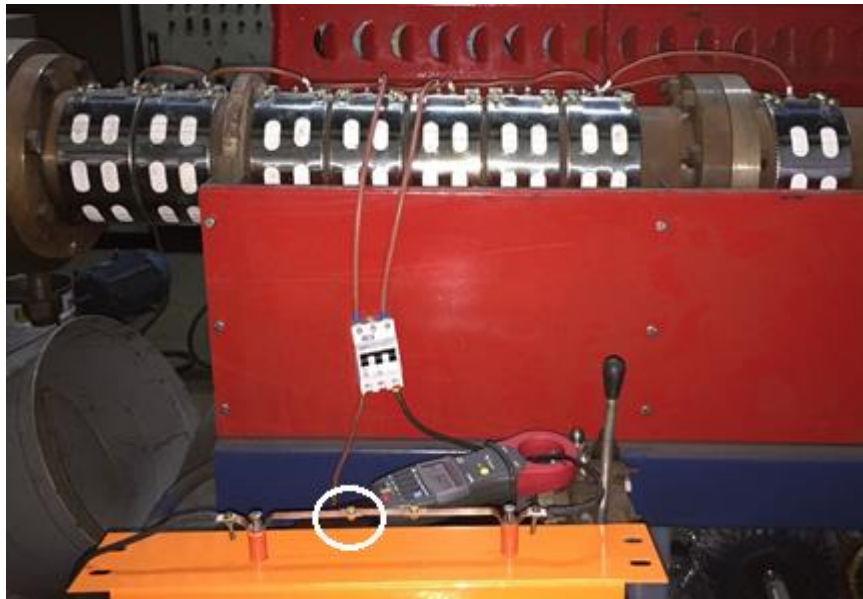


Figura 5. Circuito elétrico utilizado nas medições. Em destaque, conexão em que as pastas foram aplicadas.

Fonte: Autoria própria.

A região da Figura 4, em que se indica a aplicação da pasta, contém uma conexão entre barramentos conforme Figura 6 a seguir.

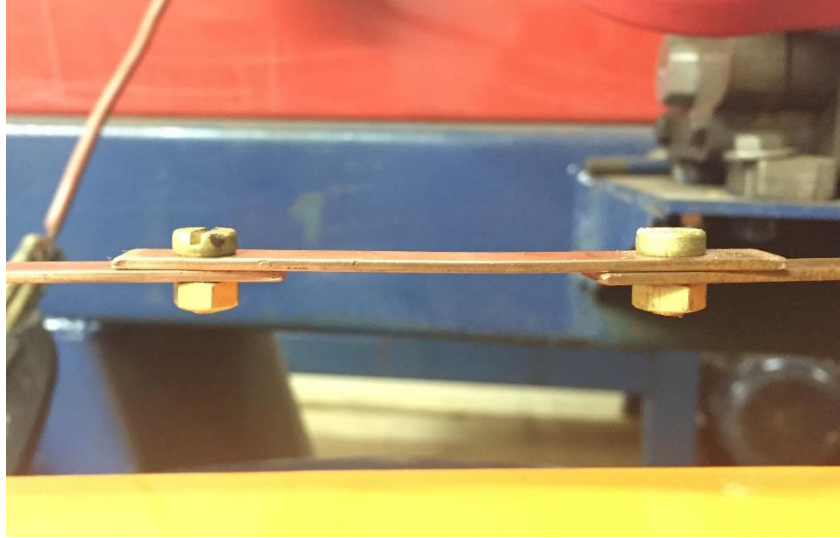


Figura 6. Conexão do barramento.
Fonte: Autoria própria.

Os parafusos utilizados foram de latão e o torque nas conexões foi controlado utilizando uma parafusadeira, sendo utilizado 1N em todos os testes, para que não causar interferência nos resultados.

5.6 MEDIÇÕES

Foram realizadas medições com o multímetro, verificando a corrente elétrica que atravessava o barramento. Foram também realizadas medições com o termovisor, verificando a temperatura na conexão e nas regiões adjacentes a ela, registrando em escala de temperatura. As termovisões foram realizadas em 5 e 5 minutos durante 30 minutos para cada amostra.

A partir da temperatura obtida com o termovisor, a resistividade e a condutividade elétrica foi calculada utilizando a Equação 6, anteriormente apresentada.

5.7 ENSAIO DE MOLHABILIDADE

Como forma de observar o comportamento da borracha de silicone sobre a superfície de um barramento de cobre, foi realizado um ensaio visual e registrando por meio de fotografia. Duas gotas de borracha de silicone foram depositadas em lados opostos de uma barra de cobre: uma gota com a borracha no estado como recebida e outra vulcanizada, utilizando 3% em massa

de seu catalisador. As gotas foram observadas e registradas durante 9 dias estando expostas às condições ambientes.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A borracha de silicone utilizada se apresentou em forma de pasta não vulcanizada conforme Figura 7, e os metais em barras, conforme Figura 8 e Figura 9, a seguir.

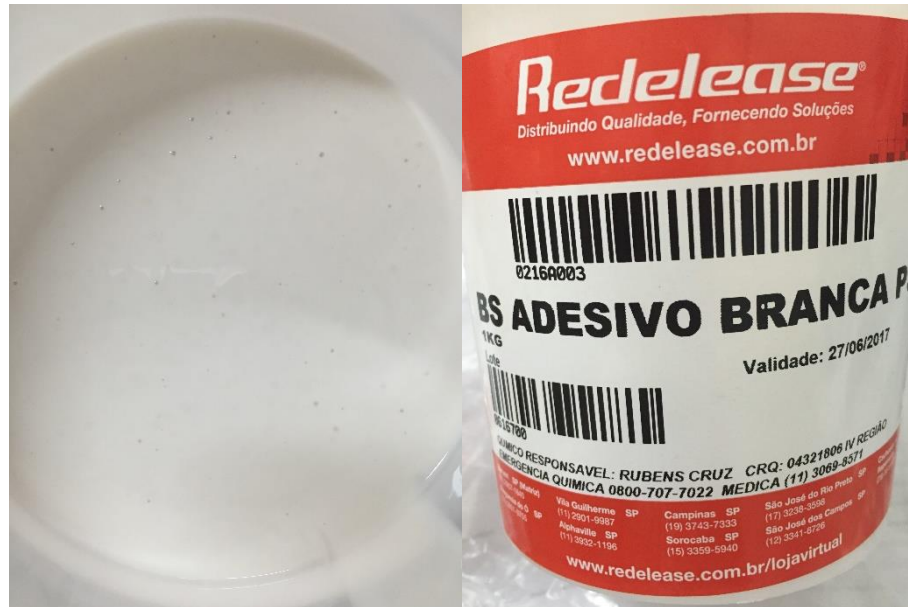


Figura 7. Borracha de silicone.



Figura 8. Barra de prata.

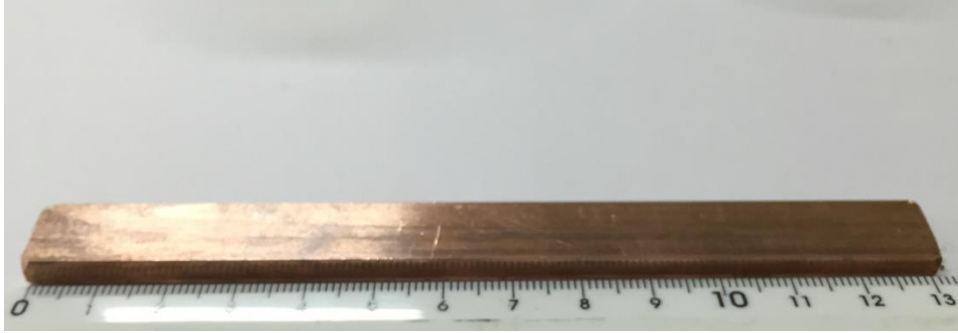


Figura 9. Barra de cobre.

6.2 PREPARAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas de cobre e prata foram preparadas utilizando a lima rotativa ilustrada na Figura 10 a seguir.



Figura 10. Lima rotativa cilíndrica 8.0mm ROCAST: vista lateral e vista superior

Após o processo de limagem, foram geradas limalhas que são mostradas na Figura 11 a seguir.

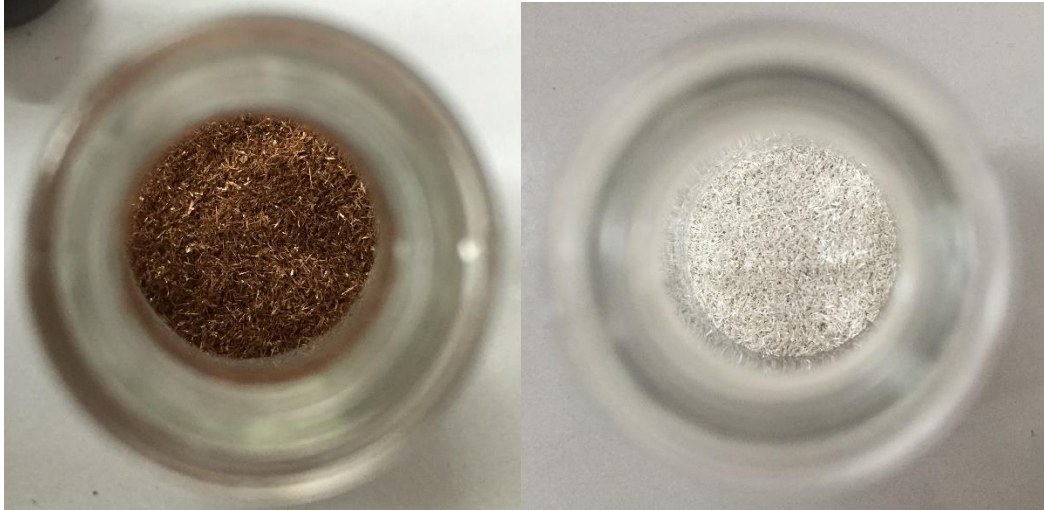


Figura 11. Limalhas de cobre e limalhas de prata.

Foi, então, realizada a separação granulométrica dessas limalhas, suas massas e seus percentuais equivalentes estão expostos na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6 – Granulometria das limalhas de cobre e prata produzidas.

Limalhas de Cobre			Limalhas de Prata		
Malha	Massa Retida	% Retido	Malha	Massa Retida	% Retido
35 mesh (425 mm)	0,121g	0,41%	35 mesh	0,718g	2,24%
48 mesh (300 mm)	0,202g	0,68%	48 mesh	1,849g	5,78%
80 mesh (180 mm)	22,493g	75,53%	80 mesh	23,694g	74,04%
Fundo	6,965g	23,39%	Fundo	5,742g	17,94%
Total	29,781g	100%	Total	32,003g	100%

Para uma melhor observação das malhas obtidas, foi construída uma curva de distribuição granulométrica, disposta no Gráfico 1.

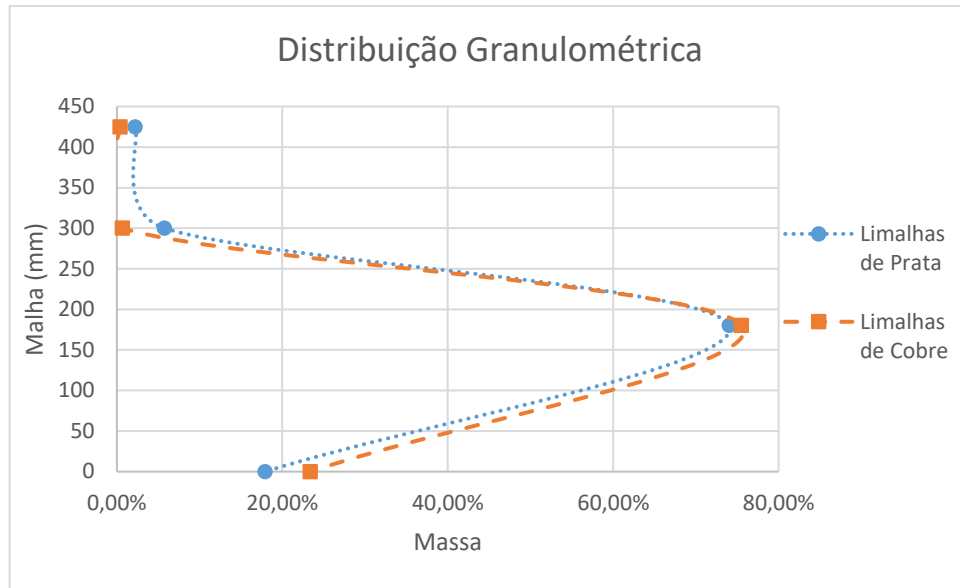


Gráfico 1 – Curva de distribuição granulométrica das limalhas metálicas

Os primeiros testes foram realizados com cobre e neles utilizou-se apenas as limalhas retidas na malha 80 mesh, ou seja, partículas maiores que 180mm. Nos testes seguintes, realizados com prata, optou-se por utilizar as massas retidas e passantes na malha 80 mesh, ou seja, partículas maiores e menores a 180mm. Isso foi realizado como forma de obter um melhor empacotamento das partículas, podendo as partículas menores preencher as vacâncias entre as partículas maiores e criar, dessa maneira, uma conectividade. Em ambos os casos, as partículas apresentam tamanho inferior a 400mm.

Além disso, foi feita a verificação em estereoscópio da morfologia das limalhas e as imagens estão dispostas na Figura 12 a seguir.

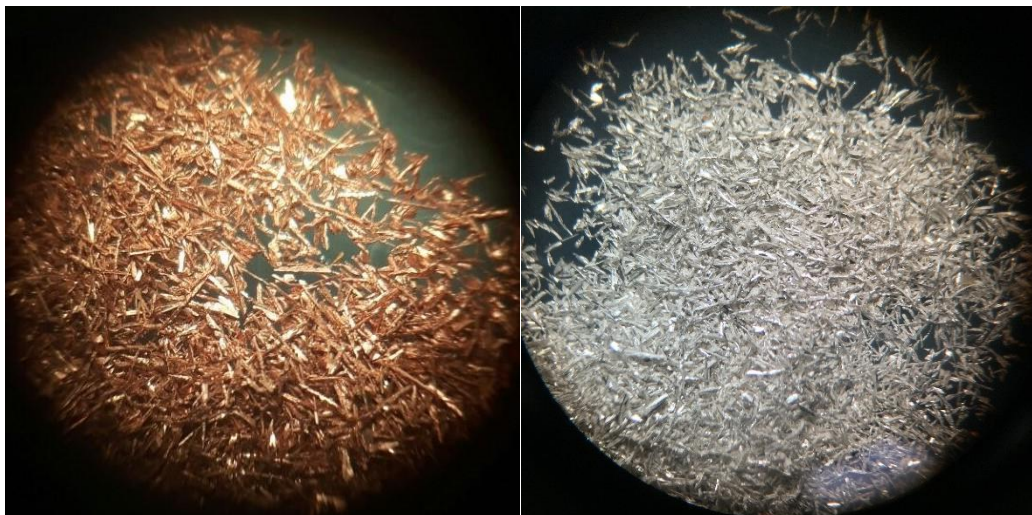


Figura 12. Imagem em estereoscópio das limalhas de cobre e prata.

Pode-se observar que as limalhas produzidas apresentam morfologia lamelar, tanto para cobre como para prata. Esse formato pode ser explicado pelo método de produção adotado, a limage mecânica. Como abordado anteriormente, as morfologias fibrosas são mais vantajosas se comparada com as esféricas, e neste caso, as limalhas são fibras de baixa razão de aspecto. Ou seja, existe maior facilidade em criar uma conectividade.

6.3 PREPARAÇÃO DA PASTA

Após a mistura, realizada com auxílio de furadeira de bancada e um aparato metálico (ilustrado anteriormente), foram obtidas as seguintes amostras, mostradas na Figura 13 e 14.



Figura 13. Amostras de cobre (em ordem): 50%, 70% e 90% de cobre em massa.



Figura 14. Amostras de prata (em ordem): 50%, 70% e 90% de prata em massa.

Pode-se observar que as amostras contendo 50% de metal, apresentou separação de fases por gravidade. Na imagem, é possível notar um aspecto de líquido pouco pastoso. Enquanto as amostras com 90% de metal se apresentaram com aspecto de limalhas umedecidas, de difícil

espalhamento. As amostras intermediárias, contendo 70% de metal, apresentaram uma consistência boa para aplicação. Sendo em todos os casos necessário no momento de utilização da pasta, homogeneizá-las novamente com auxílio de uma espátula. Além disso, devido à maior densidade da prata (10g/cm^3) em relação ao cobre ($8,93\text{g/cm}^3$), o volume ocupado por ela é menor. Ao ser misturada com a borracha de silicone, esse menor volume propiciou uma pasta mais viscosa, devido ao maior volume ocupado de silicone em relação as amostras de cobre.

6.4 APLICAÇÃO DA PASTA

As amostras foram aplicadas em uma das conexões dos barramentos, como descrito anteriormente, e o resultado dessa aplicação para cada amostra é mostrada na Figura 15 a seguir.

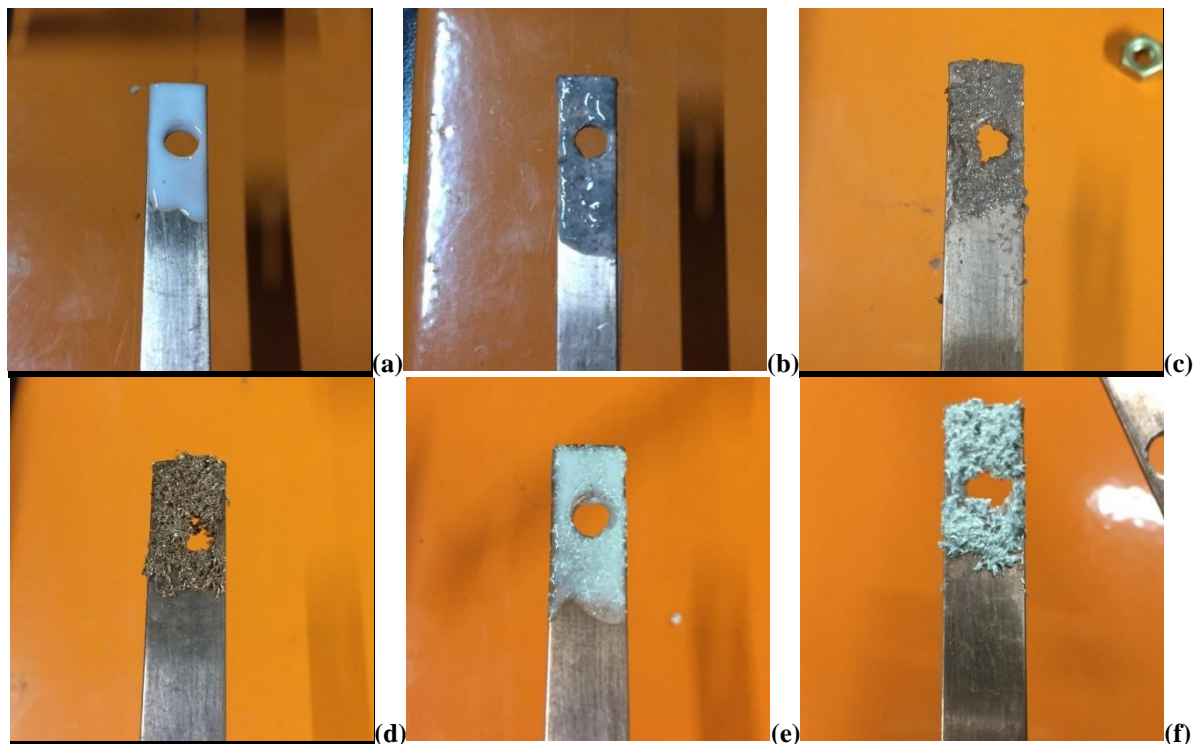
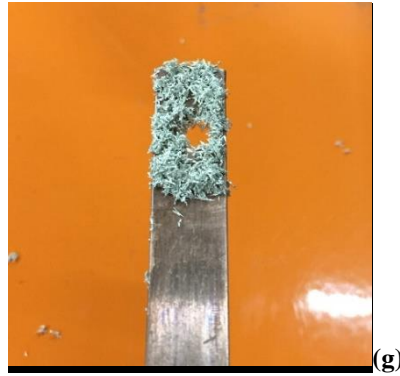


Figura 15. Espalhamento das amostra na conexão dos barramentos: (a) Amostra 100% borracha de silicone; (b) Amostra 50% cobre; (c) Amostra 70% cobre; (d) Amostra 90% cobre; (e) Amostra 50% prata; (f) Amostra 70% prata; (g) Amostra 90% prata.



Continuação Figura 15. Espalhamento das amostra na conexão dos barramentos: (a) Amostra 100% borracha de silicone; (b) Amostra 50% cobre; (c) Amostra 70% cobre; (d) Amostra 90% cobre; (e) Amostra 50% prata; (f) Amostra 70% prata; (g) Amostra 90% prata.

6.5 MEDIÇÕES

Por fim, foram realizadas as medidas de temperatura em circuito elétrico. Com tais dados, a resistividade e a condutividade elétrica foi calculada para cada temperatura medida. A variação de temperatura durante os testes também foi avaliada. Na Tabela 7 a seguir, são mostradas as temperaturas medidas e suas variações durante o ensaio.

Tabela 7 – Temperaturas medidas por termovisor e variação de temperatura no ensaio.

Amostras	Sem pasta	100% silicone	50% Cu	70% Cu	90% Cu	50% Ag	70% Ag	90% Ag
Tempo (min)	Temperatura (°C)							
0	27,2	27,0	27,6	28,5	32,6	32,1	32,4	34,5
5	33,6	37,2	39,8	35,4	39,6	36,5	35,7	36,6
10	34,7	41,1	42,3	39,2	41,8	37,4	37,7	39,1
15	34,8	42,4	43,9	40,0	43,1	38,9	38,6	40,8
20	38,5	43,0	44,2	40,3	44,4	39,1	39,8	40,4
25	38,9	43,4	44,0	40,4	44,7	39,4	40,5	40,3
30	40,3	43,6	44,5	42,8	45,3	39,5	41,2	40,4
ΔT	13,1	16,6	16,9	14,3	12,7	7,4	8,8	5,9

Analisando as temperaturas, pode-se observar que a amostra contendo 50% de prata é a que atinge menor valor final (39,5°C), comparando tanto com a conexão sem pasta quanto com as demais pastas. Nota-se, também, que a temperatura inicial varia para as diversas amostras, devido a questões ambientais, por isso, pode-se realizar uma análise de variação de temperatura. Analisando, então, quanto a variação de temperatura, o melhor desempenho pode ser observado

na amostra de 90% de prata, em que houve uma variação de apenas 5,9°C enquanto no caso da conexão sem pasta essa variação foi de 13,1°C.

Nota-se também que o desempenho do cobre em ambas as análises, temperatura atingida e variação de temperatura, apresentou desempenho inferior. Acredita-se que isso se deve a dois motivos: a menor condutividade elétrica do cobre em relação à prata; e o uso apenas das limalhas retidas na malha com mesh 80, reduzindo o empacotamento e, conseqüentemente, dificultando a conectividade das amostras.

Com os dados, foi possível construir a curva de temperatura *versus* tempo para cada amostra. Estas curvas são mostradas no Gráfico 1 a seguir.

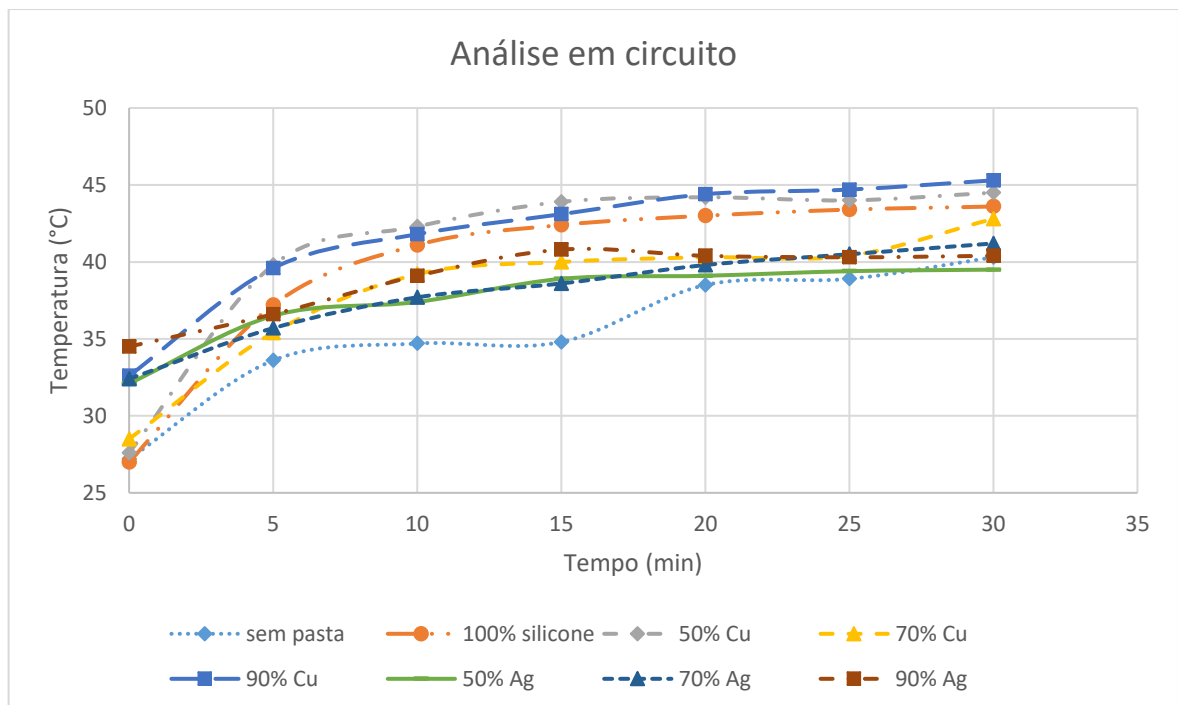


Gráfico 2. Curva de temperatura em função do tempo em análise em circuito elétrico.

Analisando o gráfico acima, podemos observar que praticamente todas as curvas apresentam o mesmo comportamento: inicialmente a taxa de crescimento é mais acentuada até aproximadamente 15/20 minutos e, a partir de então, essa taxa diminui tornando a curva pouco inclinada com aspecto próximo a uma curva linear.

O ensaio realizado no circuito sem utilização da pasta, difere um pouco deste comportamento, crescendo até 5 minutos, estabilizando do 5 ao 15, crescendo novamente até 20 e voltando a se estabilizar até o fim do período de medições.

A resistividade e a condutividade elétrica foram calculadas utilizando as Equações 6 e 1 para as amostras de cobre e prata e estão apresentadas na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Resistividade e condutividade elétrica calculadas a partir das temperaturas medidas.

Tempo (min)	50% Cu		70% Cu		90% Cu	
	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (σ)	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (σ)	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (σ)
0	1,90E-08	5,27E+07	1,91E-08	5,24E+07	1,93E-08	5,18E+07
5	1,98E-08	5,05E+07	1,95E-08	5,13E+07	1,98E-08	5,05E+07
10	2,00E-08	5,01E+07	1,98E-08	5,06E+07	1,99E-08	5,02E+07
15	2,01E-08	4,98E+07	1,98E-08	5,05E+07	2,00E-08	4,99E+07
20	2,01E-08	4,98E+07	1,98E-08	5,04E+07	2,01E-08	4,97E+07
25	2,01E-08	4,98E+07	1,98E-08	5,04E+07	2,01E-08	4,97E+07
30	2,01E-08	4,97E+07	2,00E-08	5,01E+07	2,02E-08	4,96E+07
Tempo (min)	50% Ag		70% Ag		90% Ag	
	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (σ)	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (σ)	Resistividade ($\Omega.m$)	Condutividade (σ)
0	1,79E-08	5,60E+07	1,79E-08	5,59E+07	1,80E-08	5,55E+07
5	1,81E-08	5,51E+07	1,81E-08	5,53E+07	1,82E-08	5,51E+07
10	1,82E-08	5,49E+07	1,82E-08	5,49E+07	1,83E-08	5,46E+07
15	1,83E-08	5,46E+07	1,83E-08	5,47E+07	1,84E-08	5,43E+07
20	1,83E-08	5,46E+07	1,84E-08	5,45E+07	1,84E-08	5,43E+07
25	1,83E-08	5,45E+07	1,84E-08	5,43E+07	1,84E-08	5,44E+07
30	1,83E-08	5,45E+07	1,85E-08	5,42E+07	1,84E-08	5,43E+07

Pode-se observar inicialmente a diferença de condutividade elétrica do cobre e da prata. Segundo Callister, essa diferença é de cerca de 12% em temperatura ambiente.

Como era esperado, nota-se a partir da tabela anterior um aumento da resistividade e diminuição da condutividade elétrica ao longo do tempo do experimento, isso devido ao aumento de temperatura ocorrido. Ademais, nota-se que a melhor condutividade ao final dos 30 minutos de experimento se dá para a amostra de 50% de prata (5,45E+07) e esta está muito próxima ao valor da amostra de 90% de prata (5,44E+07). Os valores finais de condutividade para as amostras apresentam até 3 décimos de diferença em relação ao inicial, o que confirma a influência da temperatura na condução elétrica, mesmo para pequenas variações.

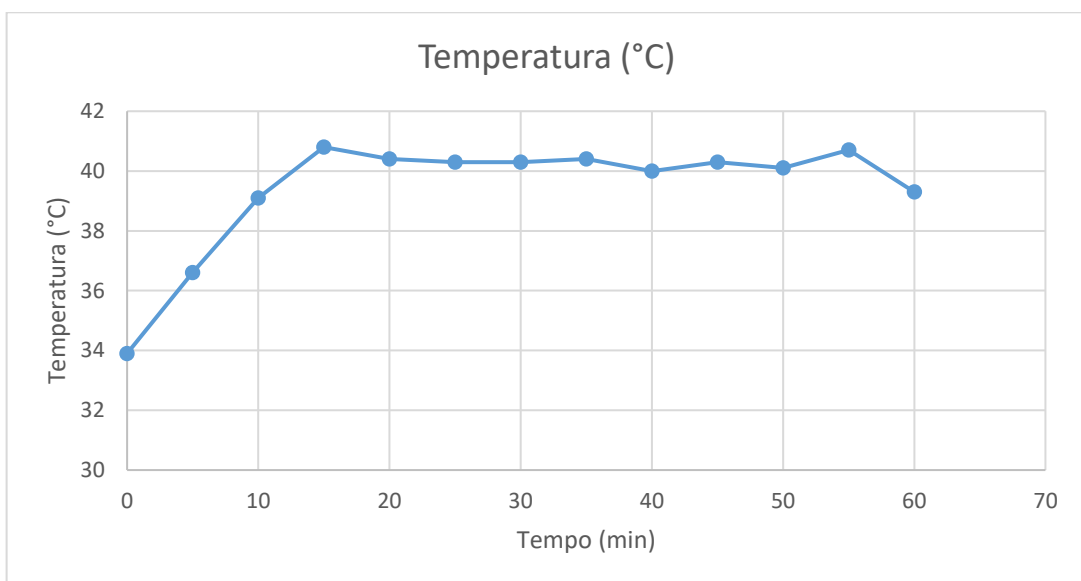
A amostra considerada de melhor desempenho de acordo com a menor variação de temperatura, porém de espalhamento é mais difícil, 90% de prata, foi submetida a um período maior de tempo de ensaio, cerca de 60 minutos. Os dados obtidos podem ser observados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Dados de temperatura medidos para amostra de 90% Ag.

Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	34,5
5	36,6
10	39,1
15	40,8
20	40,4
25	40,3
30	40,4
35	40,4
40	40
45	40,3
50	40,1
55	40,7
60	39,3
ΔT	5,4

Por influência do ambiente, a temperatura inicial é superior às demais amostras. O pico de temperatura é alcançado após 15 minutos, e posteriormente a isso, a pasta se comporta oscilando a temperatura em décimos de graus. Deve-se salientar que a variação de temperatura (temperatura final menos a temperatura inicial) em 60 minutos é menor do que todos os outros casos em 30 minutos.

A seguir, no Gráfico 3, é mostrada a curva construída a partir dos valores de temperatura em função do tempo para a amostra contendo 90% de prata.

**Gráfico 3. Curva de temperatura em função do tempo para amostra de 90% Ag.**

Analisando o gráfico anterior, pode-se dizer que a partir de 15 minutos, a temperatura segue uma linha aproximadamente linear, com variações decimais, indicando a ação da pasta.

6.6 ENSAIO DE MOLHABILIDADE

As gotas de borracha de silicone em diferentes estados, vulcanizadas e não-vulcanizadas, foram fotografadas durante 9 dias. Os registros são apresentados na Figura 16 a seguir.

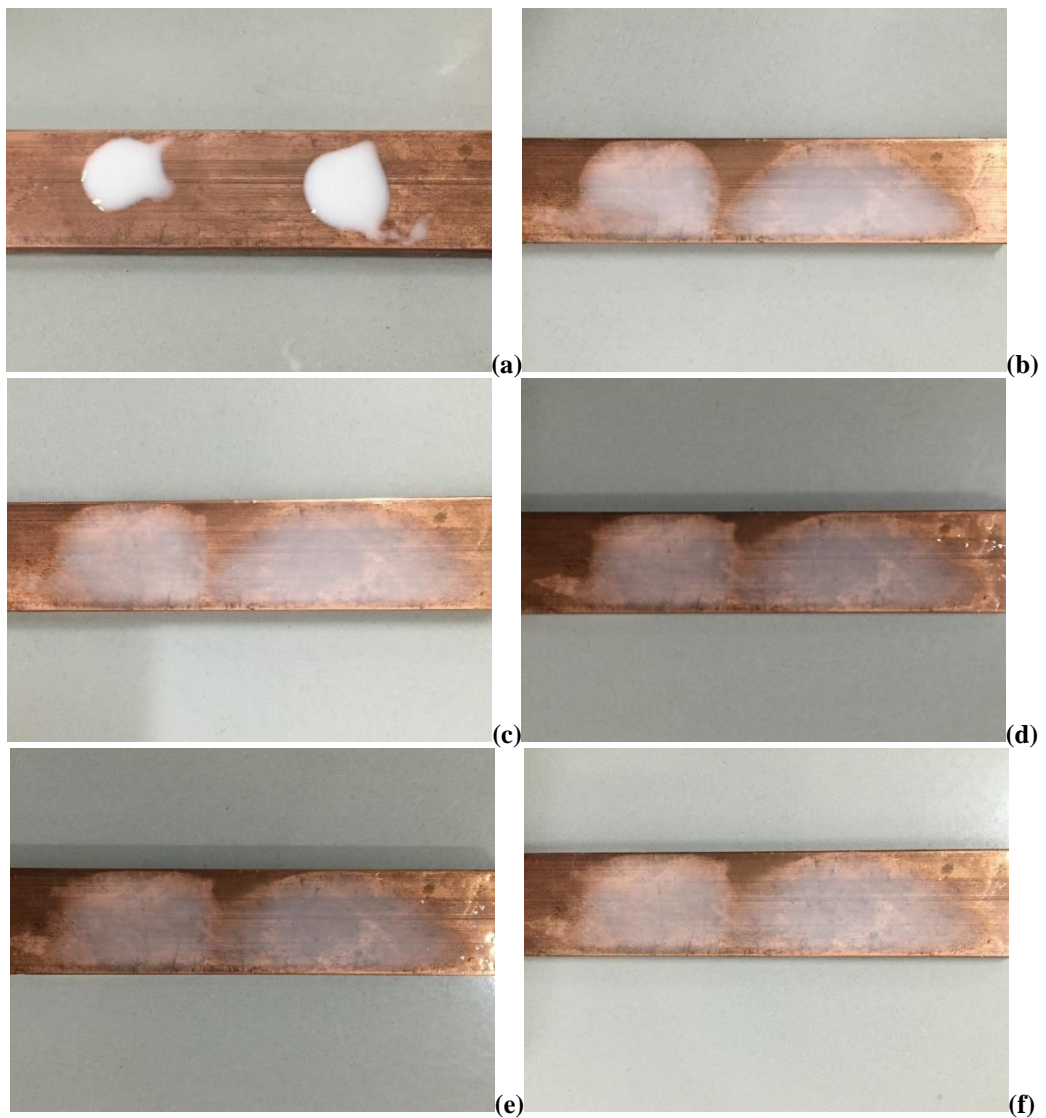
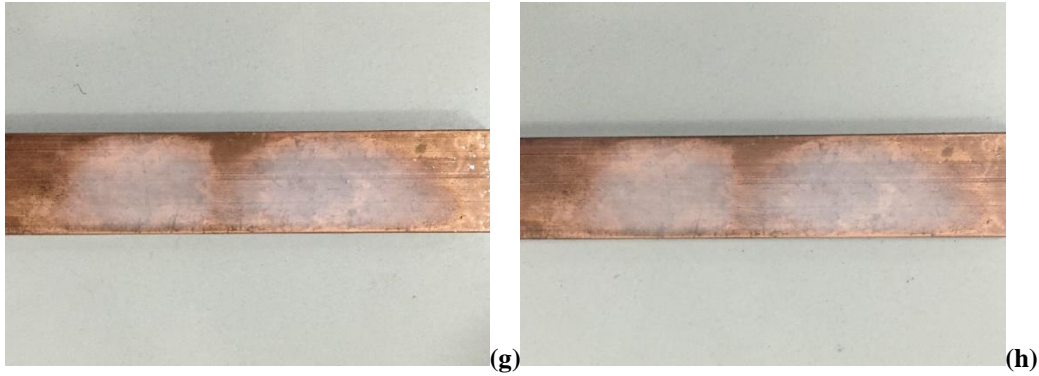


Figura 16. Espalhamento da borracha de silicone: esquerda vulcanizada; direita: não-vulcanizada. (a) 0 horas; (b) 24 horas; (c) 48 horas; (d) 72 horas; (e) 144 horas; (f) 168 horas; (g) 192 horas; (h) 216 horas



Continuação Figura 16. Espalhamento da borracha de silicone: esquerda vulcanizada; direita: não-vulcanizada. (a) 0 horas; (b) 24 horas; (c) 48 horas; (d) 72 horas; (e) 144 horas; (f) 168 horas; (g) 192 horas; (h) 216 horas.

A partir da Figura 16, é possível notar que o espalhamento da borracha não-vulcanizada é muito maior e em 24 horas já pode ser visualizado com facilidade. Além de ser possível ver nas imagens, observou-se através do contato que a espessura da pasta se tornou mais fina ao passar dos dias, indicando uma possível molhabilidade. O uso da borracha não-vulcanizada por ser justificado por meio deste ensaio.

7 CONCLUSÕES

Dessa forma, a partir de todos os procedimentos e experimentos realizados pode-se concluir que o objetivo principal deste trabalho foi atingido, ou seja, a pasta condutora foi produzida utilizando como base a borracha de silicone não vulcanizada ativada com partículas metálicas (cobre e prata).

Além disso, foi possível determinar que o desempenho da prata foi superior ao desempenho do cobre e a melhor concentração é de 90%, observando a variação de temperatura. Considerando custo e benefício, a utilização da pasta contendo 50% de prata pode ser mais vantajosa, porque a variação de temperatura é pouco superior à concentração maior, o custo é cerca de 40% menor e viscosidade permite uma melhor aplicação. Desta maneira os objetivos específicos também são atingidos, sendo possível determinar o melhor metal e a melhor concentração, considerando custo e benefício.

8 TRABALHOS FUTUROS

São propostos, como trabalhos futuros, a realização de outros ensaios com o cobre, utilizando as partículas menores que 180 μm que foram descartadas na separação granulométrica. Testes com concentrações intermediárias também são propostos objetivando a obtenção da melhor concentração. Ademais, ensaios com maior período de tempo, observando o momento de estabilização de temperatura, e ensaios com barramentos maiores expostos a correntes superiores, que apresentam menores áreas de contato efetivo. Todos os ensaios são propostos para que futuramente a pasta condutiva seja produzida e comercializada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHBY, M. **Seleção de materiais no projeto mecânico**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], v. I, 2012.

BARBOSA, C. **Cobre**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

BRIGATTO, G. A. A.; MACHADO, P. C. M. **Apostila de Materiais Elétricos para Engenharias Elétricas e da Computação**. 1. ed. Goiás: Universidade Federal de Goiás, 2013.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

BRYDSON, J. A. **Plastics Materials**. 7nd. ed. [S.l.]: Elsevier Ltd, 1999.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw Hill, 1986.

DA SILVA, R. P.; SOLIS, B. R. **Relatório de Termovisão - Análise das instalações elétricas da indústria Rações Pioneira**. Eletro In-Matec. Londrina. 2014.

DE SOUZA, G. D. Prata: breve histórico, propriedades e aplicações. **Elemental**, Cidade do México, 2013.

FONSECA, C. M. **Dimensionamento de barramentos em subestações**. Porto Alegre. 2009.
GULHÁEV, A. P. **Metais e suas ligas**. Moscovo: MIR, 1981.

INFOMET. **Cobre e suas ligas**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=109>>. Acesso em: Abril 2016.

NUNES, R. et al. **Metals Handbook - Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. 10. ed. [S.l.]: [s.n.], 1990.

PADILHA, H.; PAREDES, R. S. **Revestimentos de cobre, bronze alumínio e alumínio/níquel depositados por aspersione térmica sobre substratos de alumínio para melhorar desempenho de conexões elétricas**. 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Caxias do Sul: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 2011.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

WELLMAN, B. **Copper Casting and Alloys**. New York: Copper Development Association, 1994.

ANEXOS

ANEXO A – Certificado de composição do cobre;

ANEXO B – Ficha técnica da Borracha de Silicone;

ANEXO C – Data Sheet Termovisor Minipar FLIR i3.

ANEXO A – Certificado de composição do cobre

**NELMETAIS TECNOLOGIA E COMERCIO DE METAIS LTDA**

Rua Camé, 491 - CEP 03121-020 - Moóca - São Paulo
 CNPJ: 07.187.179/0001-87 Insc. Est.: 117.029.745.110 Fone: (11) 3531-3444 Fax: (11) 3531-3431
 Site: www.nelmetais.com.br e-mail: nelmetais@nelmetais.com.br

Certificado de Qualidade (QUALITY CERTIFICATE)

Nº: (Number)	039.887	Data: (Date)	28/09/2016	N. FISCAL: (Invoice)	178.378
--------------	---------	--------------	------------	----------------------	---------

Item	Corrida: (Heat)	Nº: (Number)	Peso: (Weight)	Descrição: (Description)	Liga: (Alloy)	Acab.: (Finish)
1		315.834	8,8 KGS	BARRA CHATA COBRE ELETROLITICO CANTOS VIVOS 1/2" X 1/4"	Cobre Eletrolítico 110	
2		315.834	6,6 KGS	BARRA CHATA COBRE ELETROLITICO CANTOS VIVOS 1/2" X 3/16"	Cobre Eletrolítico 110	
3		315.834	21,8 KGS	BARRA CHATA COBRE ELETROLITICO CANTOS VIVOS 2" X 5/16"	Cobre Eletrolítico 110	
4		315.834	45,3 KGS	BARRA CHATA COBRE ELETROLITICO CANTOS VIVOS 3. 1/2" X 3/8"	Cobre Eletrolítico 110	

Análise Química % Peso (Chemical Analysis)

Item	Cobre	Outros							
1	99,9900	0,0100							
2	99,9900	0,0100							
3	99,9900	0,0100							
4	99,9900	0,0100							


Propriedades Físicas/Mecânicas (Physical/Mechanical Properties)

Item	Limite Resistência (Tensile Strength)	Limite Escoamento (Yield Strength)	Estricção % (% Reduction of AREA)	Alongamento % (% Elongation)	Tamanho do Grão ASTM (Grain Size)	Dureza	Condutibilidade Elétrica % IACS (Electrical Conductivity)	Teste Oxálico ASTM (Oxalic Test)	Densidade g/cm3 (Density)	Impregnação
1						80,00 (HB)				
2						80,00				
3						80,00				
4						80,00				

A Composição Química e as Propriedades Físicas e Mecânicas listadas neste Certificado de Qualidade, representam as informações da DATA SHEET (Folhas de Dados) emitidas pelo Fabricante.

(Certificate, copy the Chemical Analysis and Physical/Mechanical Properties of the Data Sheet manufacturer)

ANEXO B - Ficha técnica da Borracha de Silicone



Redelease
Distribuindo Qualidade, Fornecendo Soluções

Manual básico de utilização:

Produto: Kit Silicone (Branca/Azul PS ou Rosa) com Cat. (PS-1).

Proporções de uso:

Padrão: 100% de Silicone para 03% de Catalisador (em massa/"peso"), ou seja, 100 gramas de Silicone para 03 gramas de Catalisador (exemplo).

Variável: Para controlar a densidade final da Borracha, variar de 2% (menos densa) até 05% (mais densa).

Tempos médios de trabalho e cura:

Tempo de Trabalho: Depois de misturado o Catalisador à Borracha, terá aproximados 8 minutos de trabalho dependendo da umidade do ar até que o processo de cura se inicie.

Tempo de Cura Parcial: 04 a 06 horas.


Tempo de Cura Total : 5 dias

Armazenamento:

Armazenar os dois produtos sempre em suas embalagens originais, em local seco, em temperatura ambiente e sem constante contato com a luz solar.

Dicas Básicas:

- * Para aumentar a vida útil de um molde, prepare-o com o Redelub (Spray de Silicone) antes de cada tiragem.
- * Para a criação dos moldes, use Vaselina Sólida no modelo a ser copiado.
- * Por padrão, moldes feitos em Borracha dispensam o uso de desmoldantes.
- * Detritos dos componentes podem ser removidos com solvente (Thinner).
- * Para produção em peças em resina epóxi, utilize sempre o Redelub a cada tiragem.

 <p>Barueri ° São Paulo (Matriz) (11) 2907-1840</p> <p>Freguesia do Ó ° São Paulo (11) 3931-9755</p> <p>Vila Guilherme ° São Paulo (11) 2901-9987</p>	<p>Alphaville ° São Paulo (11) 3932-1196</p> <p>Campinas ° SP (19) 3743-7333</p> <p>Sorocaba ° SP (15) 3359-5940</p>	<p>São José do Rio Preto ° SP (17) 3238-3598</p> <p>São José dos Campos ° SP (12) 3341-6726</p> <p>Cachoeiro de Itapemirim ° ES (28) 3518-6747</p>
---	---	---

ANEXO C – Data Sheet Termovisor Minipar FLIR i3



Especificações	
Modelo	i3
Imagem	
Resolução	60 x 60
Total de Pixels	3.600
Sensibilidade Térmica	< 0,15 °C
Precisão	2º ou 2% da leitura
Faixa de Temperatura	-20°C a 250°C
Campo de Visão	12,5° x 12,5°
Foco	Foco Fixo
Detector	Microbolômetro
Tela	LCD de 2,8" Colorido
Frequência da Imagem	9 Hz
Correção de Emissividade	Ajustável de 0,1 a 1,0
Análise	
Paleta	Ferro, Arco-Íris, Preto/Branco
Modo de Medição	Ponto Central
Armazenamento	
Tipo de Arquivo	Radiométrico JPEG (>5.000)
Outros	
Tipo da Bateria / Duração	Li-Ion / >5 hrs
Sistema de Recarga	Adaptador AC na câmera
Dimensões / Peso	223 x 79 x 83 mm / 340 g Incluindo Bateria
Choque	25 G, IEC 68-2-29
Vibração	2 G, IEC 68-2-6
Garantia	2 anos de garantia do termovisor e 10 anos para o detector

INFORMAÇÕES PARA PEDIDOS:
minipa@minipa.com.br



MINIPA DO BRASIL LTDA.

AVENIDA João Carlos Ladeira, 51 - Vila Lázaro - 04044-000
 São Paulo - SP - Tel. (11) 5079-1001 - Fax (11) 5079-3005



FEELA - Rua São Francisco, 626 - Barra I - Niterói - RJ 24131-000
 Niterói - RJ - Tel. (11) 2627-0001



www.minipa.com.br



APÊNDICES

APÊNDICE A – Cronograma de atividades;

APÊNDICE B – Imagens registradas por termovisão.

APÊNDICE B – Imagens registradas por termovisão

A seguir são listadas algumas das imagens obtidas através de termovisão.

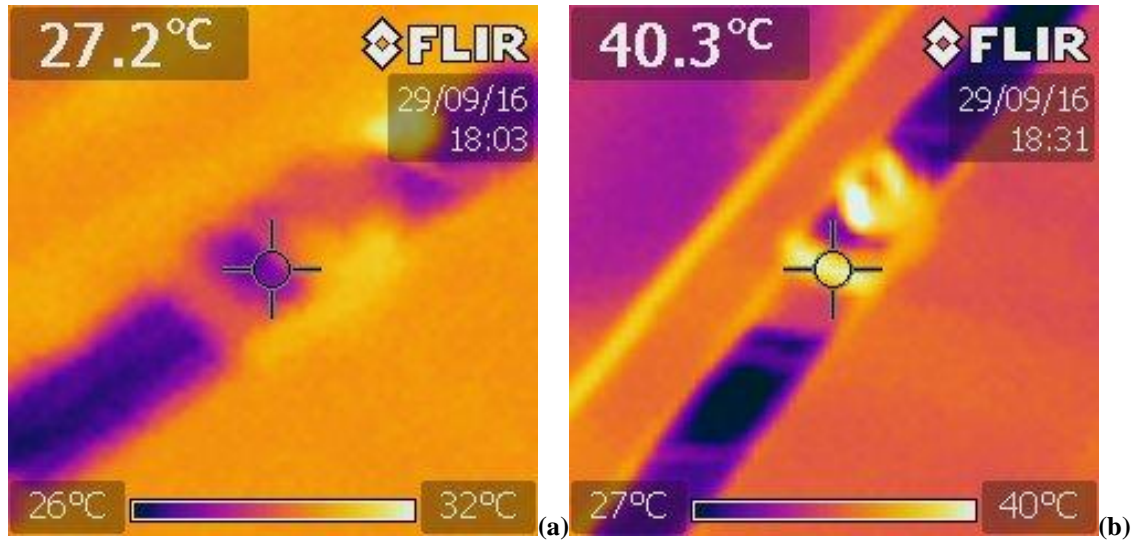


Figura 1. Termovisão para conexão sem pasta: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

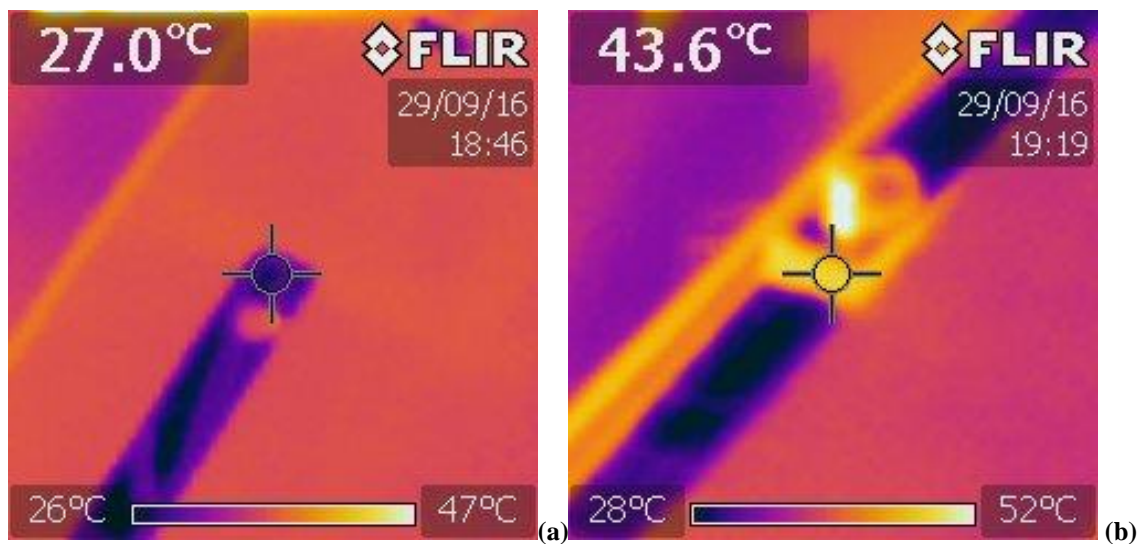


Figura 2. Termovisão para conexão com silicone: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

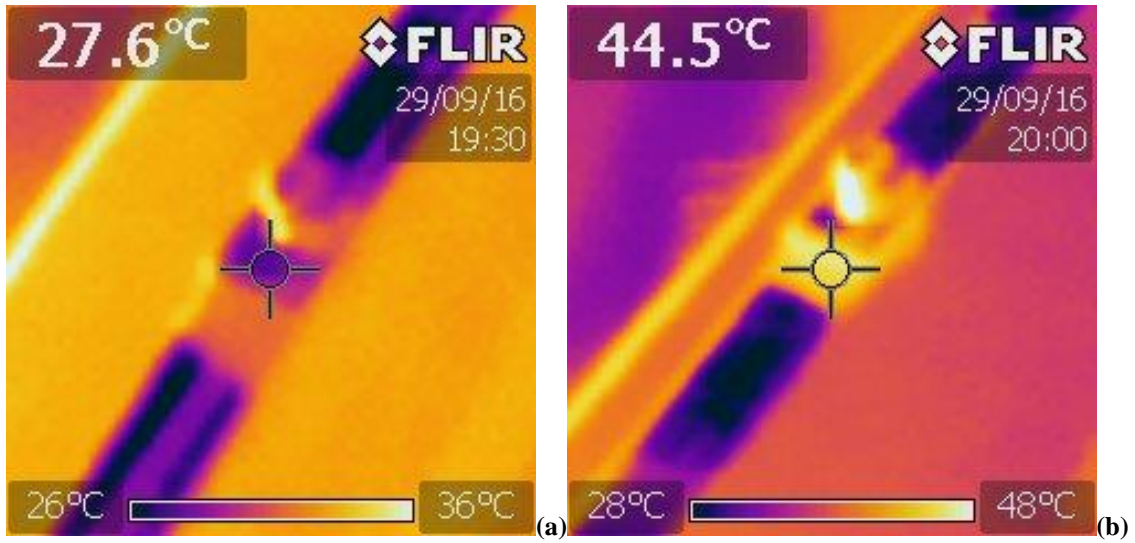


Figura 3. Termovisão para conexão com amostra de 50% Cu: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

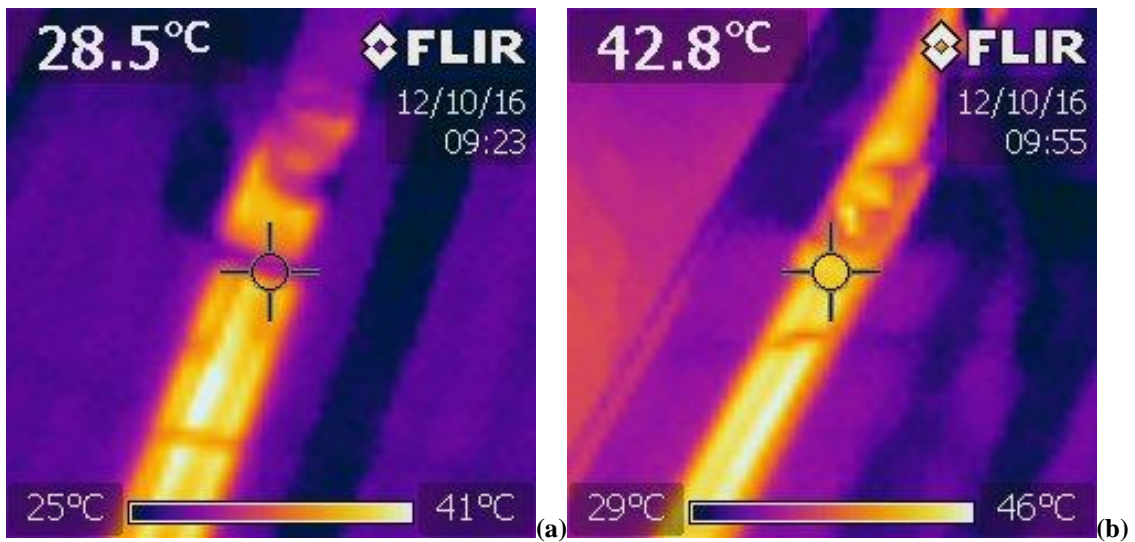


Figura 4. Termovisão para conexão com amostra de 70% Cu: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

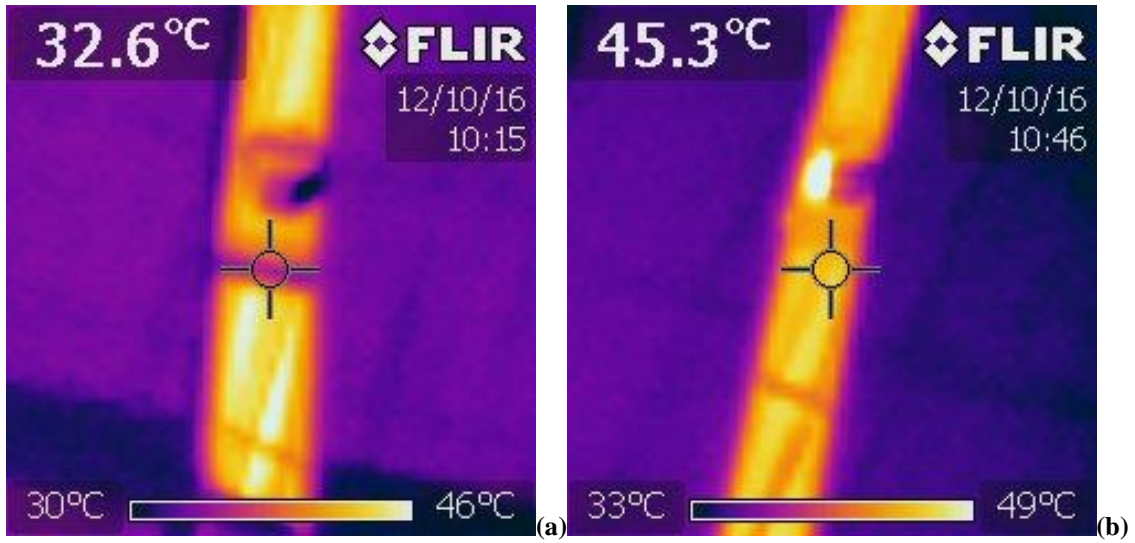


Figura 5. Termovisão para conexão com amostra de 90% Cu: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

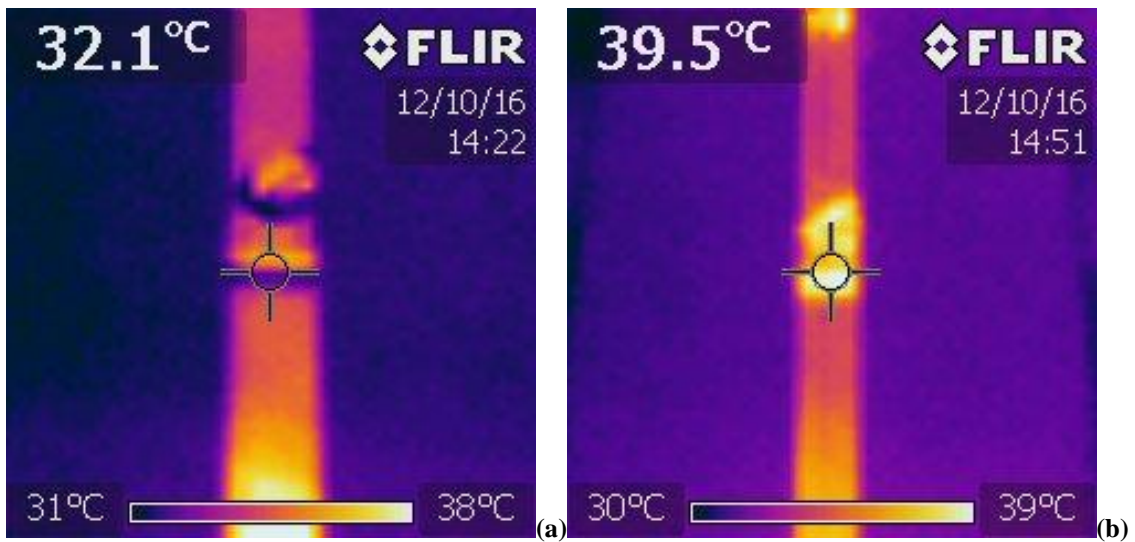


Figura 6. Termovisão para conexão com amostra de 50% Ag: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

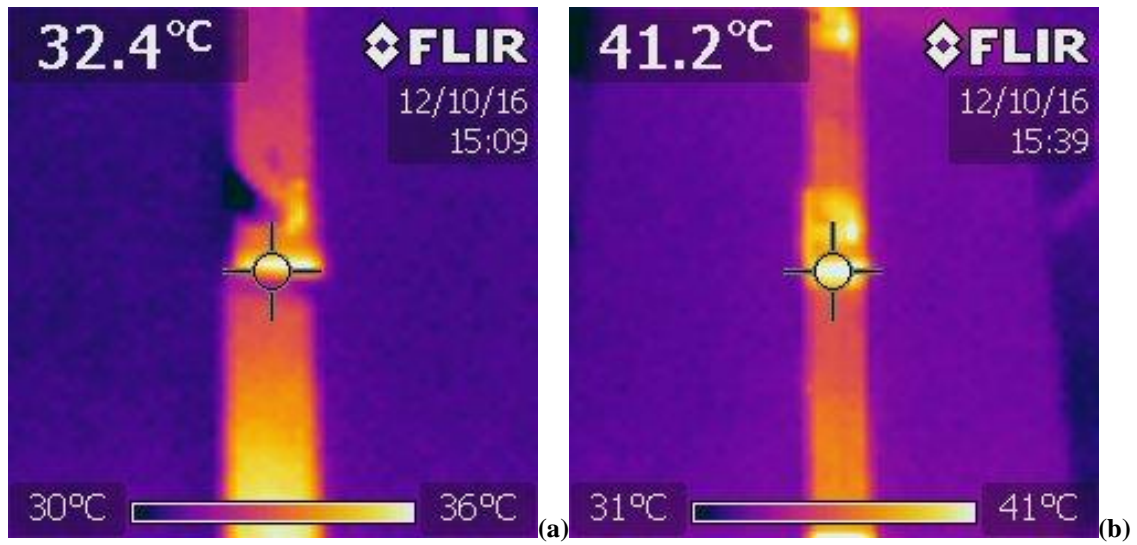


Figura 7. Termovisão para conexão com amostra de 70% Ag: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.

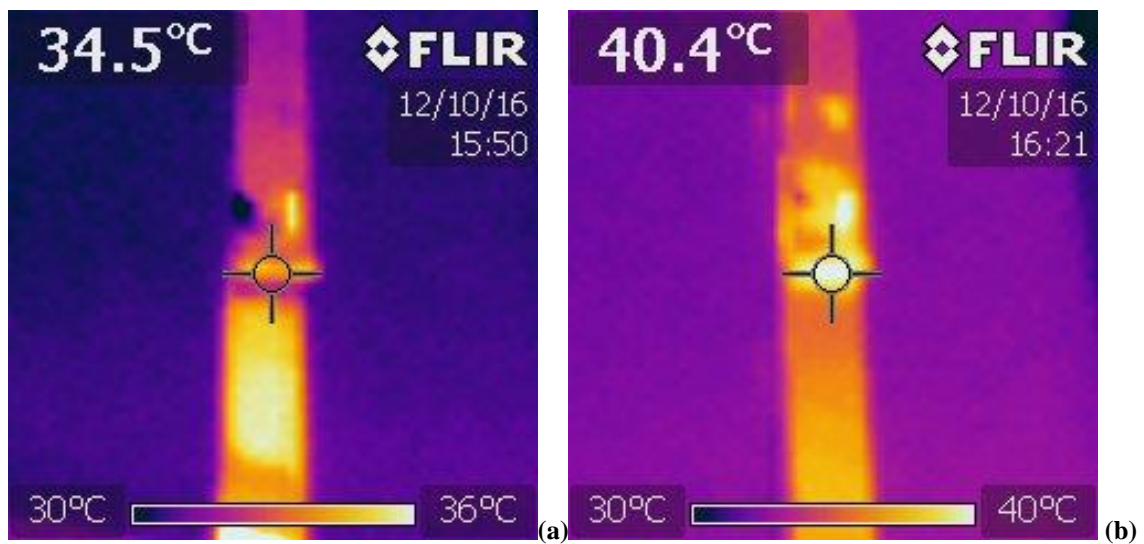


Figura 8. Termovisão para conexão com amostra de 90% Ag: (a) no tempo 0; (b) no tempo 30.