

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
RIO GRANDE DO SUL
Câmpus Farroupilha

Adesivos Condutores Elétricos Elaborados com Preenchedores de Prata Aplicados na Montagem de Circuitos Elétricos e Microeletrônicos

Maico Minosso, maicomino@gmail.com¹

Prof. Dr. Cristian Schweitzer de Oliveira (orientador), cristian.oliveira@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Prof. Dr. Matias Rossato Muraro (coorientador), matias.muraro@farroupilha.ifrs.edu.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha
Av. São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, 95180-000, Farroupilha - RS, Brasil.

Resumo: Neste trabalho nós investigamos a aplicação de adesivos eletricamente condutores (ECAs) na montagem de circuitos elétricos e microeletrônico. Os ECAs foram elaborados com 80% do peso total de preenchedores de pó de prata comercial (flocos de prata) e recuperada a partir de sucata de joias, ambos tratados com ácido tioglicólico. Os resultados mostraram que os ECAs apresentaram resistividade elétrica média na ordem de $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, semelhante a valores encontrados na literatura, e os circuitos montados com ECAs mostraram desempenho elétrico semelhante aos circuitos montados com a solda tradicional de Sn-Pb. Além disso, ensaios de tração mostraram que os componentes soldados com ECAs suportam tensões máximas pouco inferiores aos soldados com Sn-Pb, o que indica uma boa robustez mecânica dos ECAs.

Palavras-chave: reciclagem da prata, adesivo condutor elétrico, montagem de circuitos elétricos

1. INTRODUÇÃO

Na microeletrônica é comum a utilização da solda formada pela liga chumbo-estanho na soldagem dos componentes. Como o chumbo é altamente prejudicial ao meio ambiente e ao ser humano, há uma preocupação global na busca por soldas alternativas (Kang & Sarkhel, 1994);(Abteu & Selvaduray, 2000). Uma promissora possibilidade são os adesivos condutores elétricos, em inglês electrically conductive adhesives (ECAs), que são basicamente constituídos por uma matriz polimérica e um material preenchedor condutivo elétrico, responsáveis pelas propriedades mecânicas e elétricas da solda, respectivamente (Lee et al., 2009). Os ECAs apresentam diversas vantagens em relação a solda tradicional de chumbo-estanho, umas delas é de que necessitam de uma baixa temperatura para formar a solda entre os componentes e também podem ser utilizados em grande variedade de aplicações eletrônicas pela sua capacidade de ligação em vários substratos e maior flexibilidade (Aradhana, Mohanty, & Nayak, 2020). Algumas interessantes aplicações são na formação de interconexões de células solares (Theunissen et al., 2018) e na montagem de circuitos elétricos em substratos flexíveis, como filmes de politereftalato de etileno (PET) (Wen et al., 2019).

Muitos ECAs utilizam resina epóxi como matriz polimérica devido a sua elevada resistência química e térmica, boa adesão a vários materiais, compatibilidade com vários aditivos e substratos, baixo encolhimento, etc (Frederick, 2009). O elemento preenchedor mais comumente utilizado é a prata, devido a sua boa condutividade elétrica e processabilidade (Lin & Zhong, 2008). No entanto, partículas comerciais são processadas com o uso de lubrificantes que diminuem a condutividade elétrica das partículas e dificultam o uso na fabricação de ECAs (Wang et al., 2014). Uma possibilidade é substituir o lubrificante por outros componentes químicos de cadeia carbônica curta, tais como, ácidos dicarboxílicos e moléculas tióis, que além de protegerem as partículas de prata de oxidação, melhoram a condutividade elétrica dos ECAs elaborados com estes preenchedores (Cui, Fan, Li, & Adhesives, 2014; Li, Moon, & Wong, 2005b; Li, Wong, & Reports, 2006; Lovinger, 1979; Lu, Tong, Wong, & Technologies, 1999; Zhang et al., 2010). Contudo, mesmo com o tratamento por moléculas orgânicas as partículas de prata comerciais se tornem aptas para o uso na elaboração de ECAs, uma grande

desvantagem é o seu alto custo comercial. Uma solução para isso é a utilização de partículas de prata obtidas a partir de reciclagem de prata. O trabalho recente mostra que ECAs elaboradas com partículas de prata recuperadas, apresentaram desempenho mecânico e elétrico semelhante a de ECAs elaboradas com partículas comerciais tratadas por moléculas orgânicas (Cristian S de Oliveira et al., 2018).

Neste trabalho, nós investigamos a preparação de ECAs com partículas de prata comerciais e recuperadas, ambas tratadas por ácido tioglicólico, escolhido por ser constituído de moléculas tióis de curta cadeia carbônica. Esta característica facilita a adsorção das moléculas na superfície das partículas e ajuda na condução de corrente elétrica entre elas (Li, Moon, & Wong, 2005a). Os ECAs elaborados foram caracterizados eletricamente e testados na fabricação de circuitos elétricos de diferentes tipos e diferentes substratos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Acetona adquirida da Química Moderna (Barueri, Brasil), álcool etílico 99,5% da Labsynth (Diadema, Brasil) e detergente da Sigma Aldrich (São Paulo, Brasil) foram usados para limpar os resíduos de joias. Ácido nítrico (HNO₃) obtido da Labsynth, cloreto de sódio (NaCl) da Labsynth e sódio borohidreto (NaBH₄) 99% da Sigma Aldrich foram usados para reciclagem de prata pó. Etanol ≥ 99,8% adquirido da Sigma Aldrich (São Paulo, Brasil) e ácido tioglicólico ≥ 97% da Dinâmica (Indaiatuba, Brasil) foram usados para funcionalização de partículas de prata. Epóxi éter diglicidílico de bisfenol A (DGEBA), agente de cura tetraetilenopentamina (TEPA), e álcool isopropílico solvente 99,5% de pureza, foram adquiridos da Sigma Aldrich (São Paulo, Brasil) e usado para a formulação da matriz polimérica. Flocos de prata com um diâmetro de 20 µm, 99% de pureza, foram usados como enchimento de adesivos e foram adquiridos de Sigma Aldrich (São Paulo, Brasil). Sucata de joias de prata adquiridas em relojoaria (Caxias do Sul, Brasil) foram utilizadas para a recuperação de partículas de prata. Placas de circuito impresso, jumpers, resistores e leds usados na montagem de circuitos elétricos foram adquiridos da Eletrônica Sintel (Bento Gonçalves, Brasil). Equipamento Politerm Model: POL-16E 0-32V 0-5A e Politerm POL-79 Dual Display Multimeter, utilizado para medição de resistividade.

2.2. Reciclagem de Joias de Prata

A sucata de prata foi cortada em tamanho médio de 5 mm e colocada em solução de detergente à 100 °C por 1 hora sob constante agitação mecânica. Após esse processo, as peças passaram por um filtro e enxaguadas com água deionizada. Em seguida foi realizada a limpeza com acetona em banho ultrassônico 50 W por 5 minutos, seguido de filtragem e enxague com água, após o processo foi repetido com álcool etílico. Em seguida os pedaços de prata foram colocados em estufa a 80 °C por 2 horas para secagem completa.

Para a recuperação de prata foi utilizada a sequência a seguir para cada 1 grama de sucata de prata. As peças de Ag são imersas em solução aquosa contendo HNO₃ numa razão de 3:1 (água: HNO₃), sob constante agitação mecânica durante 1 h, para obtenção de nitrato de prata (AgNO₃). A quantidade mínima de HNO₃ utilizada para reagir com as peças de prata foi de 0,78g e determinada através da equação química abaixo.



Em seguida, adicionou-se à solução 0,27 g de NaCl, que foi agitada mecanicamente durante 20 min, obtendo-se assim cloreto de prata (AgCl). A quantidade mínima de NaCl utilizada para reagir com AgNO₃ foi determinada através da equação química abaixo.



Então, a solução com AgCl foi filtrada e o AgCl foi seco durante 2 h a 60°C. O AgCl seco (1 g) foi adicionado a uma solução de 300 mg de NaBH₄ diluído em 50 ml de água deionizada a 60 °C, sob constante agitação mecânica durante 1 h (Murphy, Ackerman, & Heeren, 1991). A solução então tornou-se cinzenta indicando a formação de pó de prata metálico, determinada através da equação abaixo.



Que foi filtrado e enxaguado com água deionizada e etanol. Finalmente, o pó foi seco em estufa a 60 °C durante 5 h.

2.3. Tratamento das Partículas de Prata por Ácido Tioglicólico

O pó de prata comercial e o recuperado foram tratados em solução aquosa de 10 mM de ácido tioglicólico (HSCH_2COOH) durante 48 horas em temperatura ambiente. Logo após esse período, as partículas foram enxaguadas com álcool etílico e centrifugadas 3 vezes a 2800 rpm com duração de 1 minuto. Em seguida o pó de prata foi colocado para secar em estufa a 50° C por 24 horas.

2.4. Preparação dos ECAs

Primeiramente as partículas de prata (preenchedores) foram previamente peneiradas em peneiras com aberturas de dimensões de 20 μm , com o propósito de se excluir aglomerados de partículas indesejáveis na formulação de ECAs.

A matriz polimérica foi preparada a partir de resina epóxi diglicidil éter de bisfenol A - $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_4$ - (DGEBA) e agente de cura tetraetilenopentamina - $\text{C}_8\text{H}_{23}\text{N}_5$ - (TEPA) numa proporção em peso de 3:1.

Para a formulação dos adesivos, a resina DGEBA foi diluída em 200 μL de álcool etílico a 50 °C, após a diluição, foram adicionadas as partículas previamente peneiradas e a mistura foi agitada novamente em agitador vórtex durante 4 min e banho de ultrassônico por mais 4 min. Em seguida foi adicionado o agente de cura TEPA e a mistura foi agitada novamente em agitador vórtex durante 4 min e banho de ultrassônico por mais 4 min. Finalmente, o adesivo é submetido a um fluxo de ar oxigênio durante 30 s para a evaporação do solvente.

A quantidade de enchedores de prata foi fixada em 80% do peso total dos ECAs.

2.5. Teste de Resistividade

2.5.1. Preparação da Amostra

Para fazer as amostras utilizou-se uma máscara retangular de 38mm de comprimento por 8 mm de largura em uma base de vidro, com o uso de uma espátula passou-se o ECA sobre essa máscara. Em seguida a máscara foi retirada e a amostra foi aquecida na estufa em duas etapas: A primeira a 50 ° C por 15 minutos, para evaporar completamente os solventes presentes na amostra; A segunda à 140 ° C por 2 horas, para processar a cura da matriz polimérica. A Figura 1 mostra a máscara de um ECA no suporte de vidro pós o processo de cura.

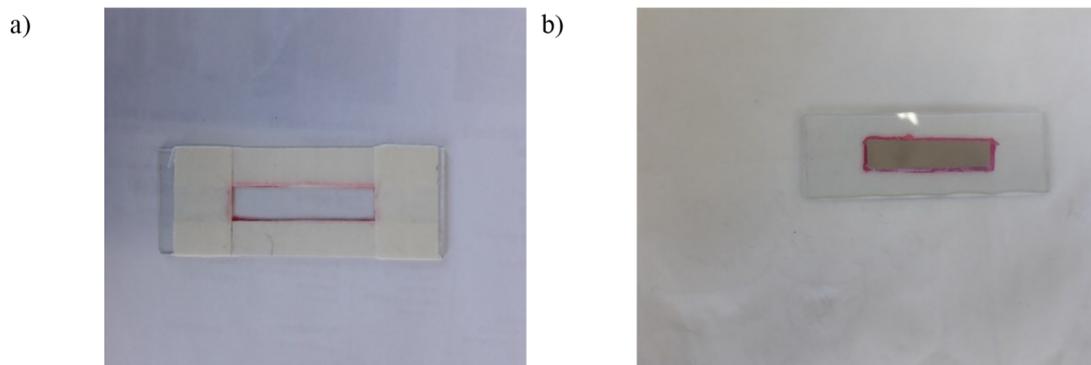


Figura 1: a) máscara utilizada para fabricação das amostras b) foto do adesivo pós cura sobre a placa de vidro

2.5.2. Medida da Resistividade

A resistividade das amostras curadas de ECAs foi medida através do método 4 pontas, que é capaz de medir somente a resistência da amostra. Para isso foram utilizados dois multímetros (um como fonte corrente e outro para medida de tensão) e uma sonda com 4 pontas de distância s entre si. Assim, uma corrente de 200mA foi aplicada entre as 2 sondas exteriores e a tensão V medida entre as 2 sondas internas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

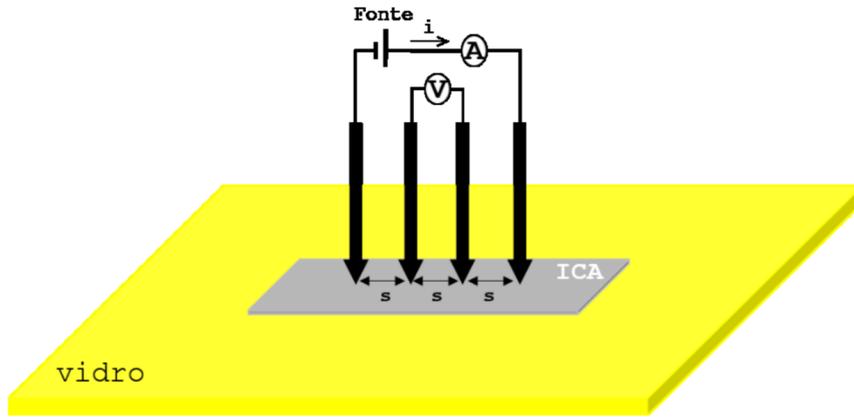


Figura 2. Esquema de medição de resistividade por 4 pontas.

A resistividade elétrica (ρ) é calculada a partir da equação abaixo,

$$\rho = \rho_s w \quad (4)$$

onde w é a espessura e ρ_s é a resistividade da amostra dada por,

$$\rho_s = \frac{V}{I} C \left(\frac{a}{d}, \frac{d}{s} \right) \quad (5)$$

Onde, $C \left(\frac{a}{d}, \frac{d}{s} \right)$ é um fator de correção dependente das dimensões da amostra e da distância entre as pontas. Para uso da Eq. 2 as amostras foram preparadas seguindo as seguintes restrições: $\frac{d}{s} > 1$, $\frac{a}{d} \geq 4$ e $\frac{w}{s} < 0.4$. Onde a é o comprimento da amostra e d a largura (Smits, 1958).

2.6. Montagem de Circuitos Elétricos

Circuitos e microcircuitos elétricos para comparar a utilização das soldas de ECA com a solda de tradicional de Sn-Pb.

2.6.1. Circuitos Elétricos em Placas de Circuito Impresso (PCI)

Circuitos elétricos foram montados em placas de circuito impresso compostos de led, resistor de 200Ω , fonte de tensão de 5V e jumpers (fios elétricos). As montagens foram elaboradas do seguinte modo: solda dos componentes feita pela solda convencional de Sn-Pb em trilhas de cobre da PCI (circuito 1), solda dos componentes feita por ECA em trilhas de cobre da PCI (circuito 2) e trilhas e solda dos componentes feitos com ECA (circuito 3). A Figura 3 abaixo mostra as fotos desses circuitos.

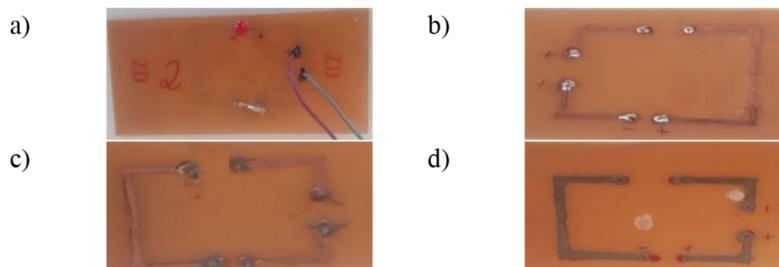


Figura 3. a) Parte frontal do circuito elétrico composto por led, resistor de 200Ω e jumpers que foram ligados a fonte de tensão. b) Circuito 1 - parte de trás com solda dos componentes nas trilhas de cobre feita com solda Sn-Pb. c) Circuito 2 - parte de trás com solda dos componentes nas trilhas de cobre feita com ECA. d) Circuito 3 - parte de trás com trilhas e solda dos componentes feitos com ECA.

2.6.2. Módulo Opto Acoplador

O módulo opto acoplador 3,3 a 30Vdc 4 canais, foi adquirido da 4hobby (Caxias do Sul, Brasil) e sua função é possibilitar o isolamento das duas tensões distintas usadas em um projeto de eletrônica. O dispositivo foi utilizado para testes de solda de componentes microeletrônicos com ECAs.

2.7. Teste de Circuitos Elétricos Flexíveis

Como pode ser visualizado na Figura 4, o circuito 1 da Figura 3 foi alterado (Figura 4a) e conectado por jumpers a uma fita de ECA curada sobre um substrato plástico flexível feito de PVC e plastificante de dimensões 15 x 6,2 cm (Figura 4b). O aparato foi montado com o objetivo de testar a possibilidade do uso de ECAs sob substratos flexíveis na composição de circuitos elétricos.

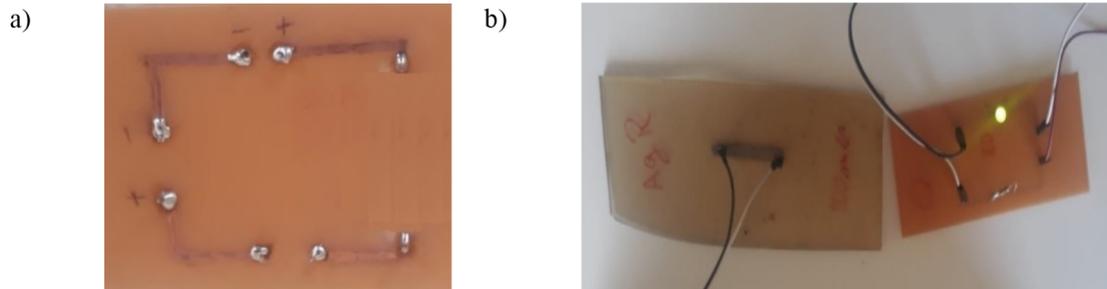


Figura 4. a) Circuito 1 alterado por raspagem de trilha de cobre do lado direito e conexão de dois jumpers com solda de Sn-Pb. b) Circuito 1 alterado conectado por jumpers em fita de ECA curado sobre substrato flexível de PVC com plastificante.

O aparato da Figura 4b foi utilizado em ensaios onde se submeteu o substrato flexível a tensões laterais que resultou na formação de uma curvatura, esta foi aumentando até que o led do aparato desligasse. Os ensaios foram filmados e os vídeos foram transferidos para o software tracker, que é capaz de determinar com boa precisão as alturas máximas atingidas pelas curvaturas dos substratos durante os ensaios.

2.8. Ensaios Mecânicos nas Soldas

Com o objetivo de comparar a capacidade de fixação de componentes em circuitos elétricos soldados por ECAs em relação a solda Sn-Pb, foi criado um dispositivo composto por um dinamômetro digital acoplado a um fuso trapezoidal de 500mm de comprimento. A foto do experimento pode ser vista na Figura 5 abaixo.



Figura 5. Dispositivo criado para testes mecânicos na fixação de componentes em circuitos elétricos

Como pode ser visto na Figura 5, um componente soldado num circuito elétrico, que está fixo na base do dispositivo, é tensionado para cima conforme o giro do fuso e o dinamômetro ligado em série no sistema registra a tensão aplicada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Resistividade elétrica dos ECAs

A Tabela 1 mostra a resistividades elétricas médias e os desvios padrões para ECA, preparados com adesivos elétricos 80% pp de partículas de prata reciclada (AgR) e comercial (AgC) tratadas com 10 mM de ácido tioglicólico. A menor resistividade elétrica medida foi para a prata comercial com valores de $3,89 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$.

Tabela 1 – Resistividade elétrica para ICA preparadas com 80 % pp de preenchedores Ácido Tioglicólico

Preenchedores	Resistividade Elétrica ($10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$)
AgR-10mM Ac. Tioglicólico	$6,41 \pm 1,49$
AgC-10mM Ac. Tioglicólico	$3,89 \pm 0,44$

Os valores médios encontrados estão na mesma ordem de grandeza de resistividades encontradas para ECAs comerciais e na literatura para mesma concentração de preenchedores (Ji et al., 2015). Mais especificamente em relação aos ECAs elaborados com AgR-10 mM de ácido tioglicólico, os valores também estão na mesma ordem de grandeza de resultados encontrados em trabalho publicado por co-autor deste trabalho (C. S. de Oliveira et al., 2018), onde foi utilizado também AgR mas tratadas com molécula ditiol DTT (DL-ditiotreitól), molécula de curta cadeia carbônica semelhante a molécula de ácido tioglicólico utilizado neste trabalho.

3.2. Aplicação de ECA em Circuitos Elétricos

3.2.1. Circuitos montados em PCI

Abaixo a tabela 2 apresenta as medidas de tensões elétricas da fonte, resistor e LED feitas por um multímetro nos circuitos elétricos 1, 2 e 3. Os ECAs utilizados nas amostras foram elaborados com 80% pp de preenchedores de AgR – 10mM ácido tioglicólico.

Tabela 2– Tensão nos circuitos elétricos feitos em placa de circuito impresso

Circuito 1 (trilhas de cobre e solda Sn-Pb)	Tensão(V)
LED	1,91
Resistor	2,48
Fonte	4,8
Circuito 2 (trilhas de cobre e solda de ECA)	
LED	2,48
Resistor	1,42
Fonte	4,56
Circuito 3 (trilhas e solda de ECA)	
LED	1,98
Resistor	2,34
Fonte	4,47

Pelos valores de tensões medidas nos circuitos 1 e 3 observa-se um desempenho elétrico semelhante entre um circuito feito do modo convencional (cobre e solda Sn-Pb) e um circuito feito com trilhas e soldas de ECA. O resultado mostra que o uso de ECA para a formação de trilhas condutoras elétricas, pode ser uma alternativa em relação a soldagem convencional. Já as tensões medidas no circuito 2 (cobre e ECA) mostram que, apesar de as tensões dissipadas no LED e resistor serem distribuídas de forma diferente do que nos circuitos 1 e 3, o ECA pode ser usado como substituto da solda de Sn-PB na montagem de componentes em placas de PCI com trilhas de cobre.

3.2.2. Módulo Opto Acoplador

A Figura 6 mostra um comparativo de testes de acionamento do circuito opto-acoplado, onde os componentes (Led, resistores, circuito integrado SMD PC817 e conectores) foram soldados com Sn-Pb e com ECA feita com preenchedores de AgR – 10mM ácido tioglicólico. Pode-se observar os resultados para transições do sinal de entrada, de nível baixo para alto e de nível alto para nível baixo.

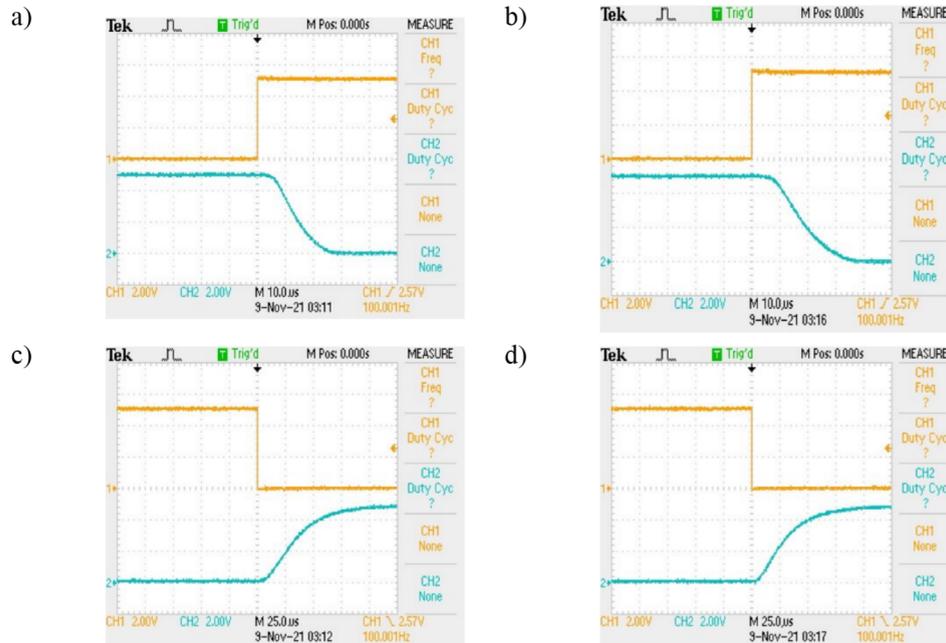


Figura 6. a) Gráfico da transição de nível baixo para nível alto na entrada do módulo opto acoplado montado com solda de Sn-Pb. b) Gráfico da transição de nível baixo para nível alto da entrada do módulo opto acoplado montado com ECA. c) Gráfico da transição de nível alto para nível baixo na entrada do módulo opto acoplado com solda de Sn-Pb. d) Gráfico da transição de nível alto para nível baixo na entrada do módulo opto acoplado montado com ECA.

Os resultados foram obtidos para o sinal de entrada com frequência chaveamento de 100 Hz. A amplitude da tensão de entrada é de 5V, e o lado de saída foi alimentado também com 5V. O desempenho em relação aos níveis de tensão de saída e tempo de resposta para o circuito montado com ECA foram similares aos resultados obtidos com o circuito montado com solda de Sn-Pb.

3.3. Valores da Curvatura dos ECAs

A Figura 7 mostra a altura máxima atingida na curvatura de substratos flexíveis com fitas de ECAs aderidas sobre suas superfícies, no momento em que os LEDs dos circuitos desligaram.

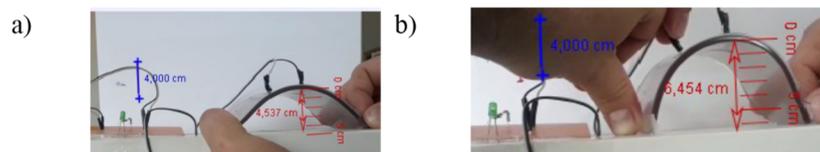


Figura 7. a) aparato montado com fita de ECA feita com preenchedores de AgR – 10mM ácido tioglicólico sobre substrato flexível. Altura da curvatura em 4,537 cm. b) aparato montado com fita de ECA feita com preenchedores de AgC – 10mM ácido tioglicólico sobre substrato flexível. Altura da curvatura em 6,454 cm.

Pode-se verificar que ambos os substratos atingiram elevadas curvaturas mantendo o circuito funcionando com passagem de corrente. Esses resultados destacam uma promissora aplicação no uso de ECAs, como a fabricação de sensores e dispositivos elétricos flexíveis.

Em relação ao desempenho, verificou-se um melhor desempenho de ECAs elaboradas com AgC ($h = 6,454$ cm) do que as com AgR ($h = 4,537$ cm). Isso pode ser explicado pela maior uniformidade do formato das partículas comerciais em relação as partículas obtidas a partir de prata reciclada. As partículas comerciais apresentam uma distribuição uniforme de tamanho e formato (flocos), enquanto as partículas recuperadas apresentam diversos formatos e tamanhos diferentes (ovais, esféricas, cilíndricas, aglomerado, etc..) (C. S. de Oliveira et al., 2018). A melhor uniformidade de tamanho e formato pode contribuir para o melhor contato entre as partículas quando o adesivo sofre alguma deformação. Por exemplo, mesmo com a deformação o contato entre dois flocos que estão um sobre o outro, não necessariamente alinhados, pode continuar acontecendo entre suas extremidades, mas no caso de um cilindro sobre uma esfera, que pode ocorrer em ECA feito com AgR, fica mais difícil manter o contato entre estes com a deformação do adesivo.

3.4. Resultados do ensaio de tração

O objetivo foi testar em ensaios de tração componentes de circuitos elétricos e módulos opto acoplador montados com ECA de AgR – 10mM ácido tioglicólico e solda Sn-Pb.

Tabela 3 – Tensão máxima atingida pelos circuitos Sn-Pb, AgR- 10 mM ácido tioglicólico

Amostras	Tensão máxima (N)
Componente de fixação de cabos do módulo opto acoplador soldado com ECA	18,49
Componente de fixação de cabos do módulo opto acoplador soldado com Sn-Pb	24,73
Jumpers soldados em trilhas de cobre pelo método pin through hole com ECA	100,45
Jumpers soldados em trilhas de cobre pelo método pin through hole com Sn –Pb	116,15

Apesar de as tensões máximas suportadas pelos componentes soldados com ECA serem menores do que as tensões máximas obtidas com a soldagem por Sn-Pb, as diferenças não foram tão elevadas, o que possibilita o uso de ECAs na fixação de componentes eletrônicos e circuitos impressos. Cabe ressaltar que os ECAs testados tinham 80% pp de preenchedores, que não contribuem para a fixação mecânica e robustez da solda. No entanto, há a possibilidade de se reduzir a quantidade de preenchedores até o limite de condutividade elétrica isotrópica do ECA e, assim, é possível melhorar as propriedades mecânicas do adesivo, a robustez da solda e conseqüentemente o desempenho nos ensaios de tração.

4. CONCLUSÃO

Os ECAs elaborados apresentaram resistividade elétrica média semelhante a valores encontrados na literatura e de adesivos condutores elétricos comerciais. Os ECAs foram utilizados na montagem de circuitos elétricos e microeletrônicos, medidas elétricas mostraram que os circuitos apresentaram respostas de sinais elétricos semelhantes aos obtidos nos mesmos circuitos elaborados com a solda Sn-Pb. Os ECAs também foram aplicados em circuitos elaborados com substrato flexível e mesmo com os substratos submetidos a elevadas curvaturas, a passagem de corrente continuou atravessando o circuito. Além disso, ensaios de tração em componentes montados em circuitos com uso de ECAs, apresentaram um desempenho pouco inferior ao da solda de Sn-Pb, mas os resultados mostram que os ECAs proporcionam boa robustez mecânica na soldagem dos componentes. Por isso, consideramos uma promissora alternativa o uso de ECAs na montagem de circuitos elétricos e eletrônicos, com destaque para a elaboração de circuitos flexíveis.

5. REFERÊNCIAS

Abtey, M., & Selvaduray, G. (2000). Lead-free solders in microelectronics. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 27(5-6), 95-141.

Aradhana, R., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2020). A review on epoxy-based electrically conductive adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 99, 102596.

Cui, H.-W., Fan, Q., Li, D.-S. J. I. J. o. A., & Adhesives. (2014). Surface functionalization of micro silver flakes and their application in electrically conductive adhesives for electronic package. 48, 177-182.

de Oliveira, C. S., Quispe, L. T., Cid, C. C. P., Sierra, J. A., de Barros, S., Mello, A., & Pasa, A. A. (2018). DTT functionalization of Ag particles for conducting adhesives. *Journal of Adhesion*, 94(6), 473-485. doi:10.1080/00218464.2017.1288113

de Oliveira, C. S., Quispe, L. T., Pla Cid, C. C., Sierra, J. A., de Barros, S., Mello, A., & Pasa, A. A. J. T. J. o. A. (2018). DTT functionalization of Ag particles for conducting adhesives. 94(6), 473-485.

Frederick, A. (2009). *Processing and characterisation of nano-enhanced composites*. Auckland University of Technology,

Ji, Y.-H., Liu, Y., Huang, G.-W., Shen, X.-J., Xiao, H.-M., Fu, S.-Y. J. A. a. m., & interfaces. (2015). Ternary Ag/epoxy adhesive with excellent overall performance. 7(15), 8041-8052.

Kang, S. K., & Sarkhel, A. K. (1994). Lead (Pb)-free solders for electronic packaging. *Journal of electronic materials*, 23(8), 701-707.

Lee, D. W., Li, L., Wang, S. X., Lu, J., Wong, C., Bhattacharya, S. K., & Papapolymerou, J. (2009). Embedded passives. In *Materials for Advanced Packaging* (pp. 459-502): Springer.

Li, Y., Moon, K.-S., & Wong, C. J. J. o. e. m. (2005a). Adherence of self-assembled monolayers on gold and their effects for high-performance anisotropic conductive adhesives. 34(3), 266-271.

Li, Y., Moon, K.-S., & Wong, C. J. J. o. e. m. (2005b). Monolayer-protected silver nano-particle-based anisotropic conductive adhesives: Enhancement of electrical and thermal properties. 34(12), 1573-1578.

Li, Y., Wong, C. J. M. S., & Reports, E. R. (2006). Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications. 51(1-3), 1-35.

Lin, Y., & Zhong, J. (2008). A review of the influencing factors on anisotropic conductive adhesives joining technology in electrical applications. *Journal of Materials Science*, 43(9), 3072-3093.

Lovinger, A. J. (1979). Development of electrical conduction in silver-filled epoxy adhesives.

Lu, D., Tong, Q. K., Wong, C. J. I. T. o. C., & Technologies, P. (1999). A study of lubricants on silver flakes for microelectronics conductive adhesives. 22(3), 365-371.

Murphy, J., Ackerman, A., & Heeren, J. J. J. o. C. E. (1991). Recovery of silver from and some uses for waste silver chloride. 68(7), 602.

Smits, F. (1958). Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *Bell System Technical Journal*, 37(3), 711-718.

Theunissen, L., Willems, B., Burke, J., Tonini, D., Galiazzi, M., & Henckens, A. (2018). *Electrically conductive adhesives as cell interconnection material in shingled module technology*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.

Wang, L., Wan, C., Fu, Y., Chen, H., Liu, X., & Li, M. J. J. o. e. m. (2014). Study on the effects of adipic acid on properties of dicyandiamide-cured electrically conductive adhesive and the interaction mechanism. 43(1), 132-136.

Wen, J., Tian, Y., Hang, C., Zheng, Z., Zhang, H., Mei, Z., . . . Tian, Y. J. N. (2019). Fabrication of novel printable electrically conductive adhesives (ECAs) with excellent conductivity and stability enhanced by the addition of polyaniline nanoparticles. 9(7), 960.

Zhang, R., Moon, K.-S., Lin, W., Duan, Y., Lotz, S. M., & Wong, C. J. I. t. o. a. p. (2010). Interfacial Design of Anisotropic Conductive Adhesive Based Interconnects Using Molecular Wires and Understanding of Their Electrical Conduction. 33(4), 892-898.

Electrical Conductive Adhesives Made with Silver Fillers Applied in the Assembly of Electrical and Microelectronic Circuits

Maico Minosso, maicomino@gmail.com¹

Teacher Dr. Cristian Schweitzer de Oliveira (advisor), cristian.oliveira@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Teacher Dr. Matias Rossato Muraro (co-advisor), matias.muraro@farroupilha.ifrs.edu.br²

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha
Av. São Vicente, 785, District Cinquentenário, 95180-000, Farroupilha - RS, Brazil.

Abstract: In this work we investigate the application of electrically conductive adhesives (ECAs) in the assembly of electrical and microelectronic circuits. The ECAs were made with 80% of the total weight of commercial silver powder fillers (silver flakes) and recovered from jewelry scrap, both treated with thioglycolic acid. The results showed that ECAs presented mean electrical resistivity in the order of $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, similar to values found in the literature, and circuits assembled with ECAs showed electrical performance similar to circuits assembled with traditional Sn-Pb solder. Furthermore, tensile tests showed that components welded with ECAs withstand maximum stresses slightly lower than those welded with Sn-Pb, which indicates a good mechanical strength of the ECAs.

Keywords: silver recycling, electrically conductive adhesive, assembly of electrical circuits