



DISPOSITIVO DE MOLHABILIDADE PARA LIGAS DE SOLDAGEM ELETRÔNICA UTILIZANDO O MÉTODO DA GOTA SÉSSIL

Souza, H. R. O.^{1*}; Maciel, A. C. C.¹; Vasconcelos, A. J.¹; Marques, L.P.¹; Cosmo, N. S.¹; Silva, M. A. P. S.¹

1 - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará - UFPA, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, Belém - PA, 66075-110.

hericlesoliveira.ho@gmail.com*; andreccm10@gmail.com;
angelavasconcelos@live.com; luanemarques18.lm@gmail.com;
nadia12188@gmail.com; mariaestillac@gmail.com

RESUMO

Na União Europeia surgiu uma diretiva para restringir substâncias perigosas em eletrônicos, gerando a busca por alternativas à solda à base de chumbo, devido a preocupações de saúde. A solda branda, é essencial em componentes eletrônicos sensíveis ao calor. Com a evolução dos eletrônicos inteligentes, a molhabilidade (capacidade de líquidos se espalharem em superfícies sólidas) tornou-se crítica para integração, miniaturização e flexibilidade de eletrônicos. Entretanto, a escassez de dispositivos acessíveis para testar a molhabilidade limita a pesquisa nesse campo promissor. Visando essa necessidade, um dispositivo acessível e de baixo custo foi desenvolvido para medir a molhabilidade de ligas de baixa temperatura. Os componentes foram fabricados e montados com o objetivo da realização de seis ensaios. O dispositivo proporcionou o gotejamento do material em substratos de cobre, sem contato prévio. Os resultados revelaram ângulos de contato que indicam molhabilidade parcial e baixa aderência devido à perda de calor para o ambiente.

Palavras-chave: livre de chumbo, desenvolvimento de dispositivo, molhabilidade, gota séssil, componentes eletrônicos.

INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas tem uma posição clara sobre o chumbo: é um metal tóxico e pode causar sérios problemas de saúde. A diretiva de Restrição de Substâncias Perigosas limitou o uso de substâncias perigosas em equipamentos

elétricos e eletrônicos nos estados membros da União Europeia (1). Fabricantes de eletrônicos de produtos excluídos e isentos ainda mantêm o uso de chumbo devido a preocupações de confiabilidade nas juntas de solda a longo prazo.

A solda branda refere-se a soldas de baixa temperatura, ideais para componentes sensíveis ao calor. As soldas Sn-Pb eram muito utilizadas devido ao baixo custo, menor temperatura de fusão, boas propriedades mecânicas, molhabilidade adequada (2). Porém, fabricantes buscam soldas livres de chumbo, para substituir as soldas Sn-Pb (3).

Nesse contexto, a relevância do estudo sobre molhabilidade é particularmente evidente no contexto dos avanços na eletrônica. A molhabilidade define propriedades de soldabilidade, especialmente em solda branda, onde não há fusão entre o metal de adição e o substrato (4). Recentemente, o foco em ensaios de molhabilidade aumentou, destacando novos materiais por conta de dispositivos eletrônicos inteligentes que demandam alta integração, miniaturização e flexibilidade (5).

Um método comum para analisar o ângulo de contato é a medição direta do ângulo tangente no ponto interfacial trifásico usando o método da gota séssil (6). Cosmo (2022) descreve esse método como a colocação do material de menor ponto de fusão sobre o substrato sólido, aquecendo-o até a fusão. Variações incluem gotejar o material fundido sobre o substrato na temperatura desejada (7). Visando atender às necessidades de estudo para essa variação de ensaio, foi desenvolvido e aferido um dispositivo de molhabilidade de baixo custo. Este dispositivo contribui na avaliação da molhabilidade considerando a queda da gota líquida da liga em um substrato liso.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do dispositivo de molhabilidade, bem como a metodologia desenvolvida. A sequência apresentada na Figura 1 exhibe as principais atividades do projeto.

Figura 1. Sequência das atividades realizadas para o desenvolvimento do dispositivo.



Diversos materiais foram utilizados, sendo que alguns integram o dispositivo e outros auxiliaram em sua elaboração (Figura 2).

Figura 2. Materiais utilizados no desenvolvimento do dispositivo de molhabilidade.

Base inclinável	Base do Substrato	Resistência elétrica	Chapa de cobre	Lixas metalográficas	Soprador térmico
					
Materiais da peça cerâmica	Arruelas, porcas e parafusos	Fios elétricos e cabo de força	Pirômetro digital	Arco de serra	Furadeira
					
Abraçadeira e nível bolha	Folha de alumínio	Dimmer	Forno	Chaves de fenda e phillips	EPIs
					

Alguns materiais pertencem ao laboratório e, portanto, seus valores não serão incluídos nos custos. O desenvolvimento seguiu uma metodologia que incluiu a confecção da base, da peça cerâmica, montagem do equipamento, preparação dos substratos e corpos de prova, e execução dos testes de molhabilidade.

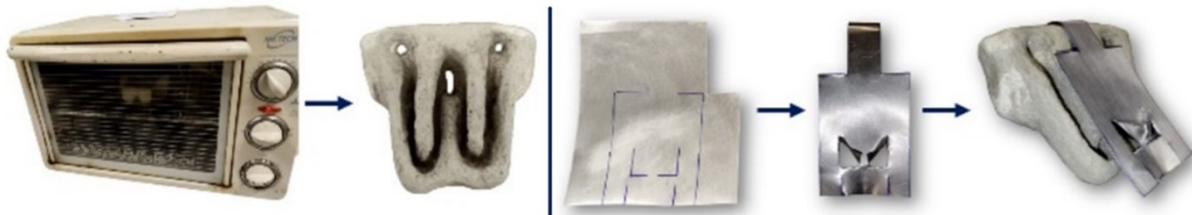
Na seleção das bases do dispositivo, considerou-se tipo de material, inclinação, estabilidade, tamanho e mobilidade. Dois componentes inutilizáveis no laboratório, provenientes de microscópios danificados, foram reaproveitados: uma base ajustável de alumínio e uma base plana de altura regulável. Esses componentes foram unidos, com o suporte acoplado à base ajustável e fixado por parafusos. Furos foram feitos na plataforma ajustável (exibidos nos círculos vermelhos) e na peça cerâmica para fixação e passagem do cabo de força. O resultado da montagem está na Figura 3.

Figura 3. União das bases confeccionadas.



A inserção do cabo de força na parte traseira da base evita que os fios sejam expostos ao calor e garante sua fixação firme com uma abraçadeira. A peça cerâmica foi projetada para concentrar o calor, evitando sua dissipação. Para isso, o molde da peça foi modelado e impresso em 3D, permitindo desenvolver a geometria e cotações desejadas. A Figura 4 mostra o modelo do molde desenvolvido e impresso em 3D.

Figura 5. Confecção da peça cerâmica e folha de alumínio.



2455

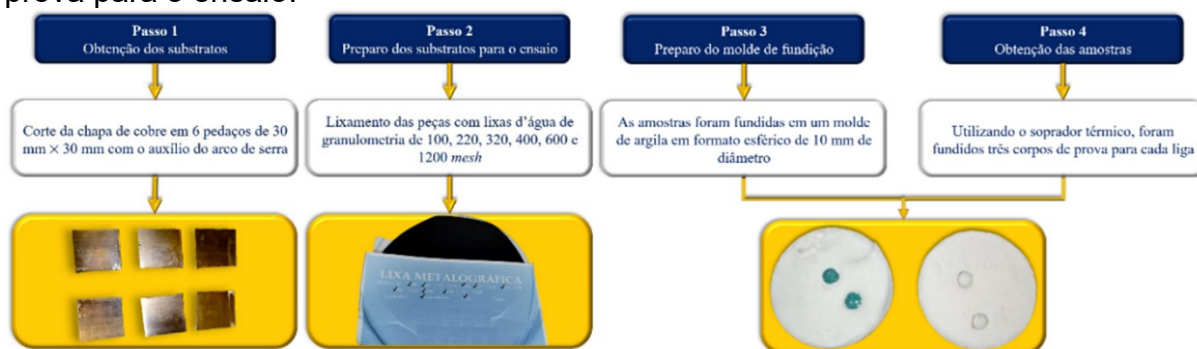
foi acoplado ao cabo, permitindo o controle da potência da resistência. A montagem completa do dispositivo é mostrada na Figura 6, que oferece diferentes perspectivas.

Figura 6. Exibição do dispositivo de molhabilidade desenvolvido em várias perspectivas.



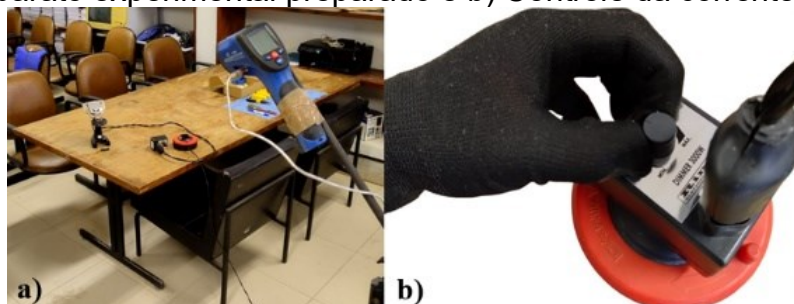
A folha de alumínio foi posicionada na parte frontal da peça cerâmica para ser aquecida pela resistência elétrica, utilizando principalmente convecção, além de radiação e condução. Para garantir a precisão do ensaio, a superfície do substrato foi preparada para se aproximar do modelo ideal proposto por Thomas Young, com a superfície o mais lisa possível. A Figura 7 mostra os passos seguidos para preparar os substratos de cobre e os corpos de prova das ligas utilizadas no ensaio.

Figura 7. Passos de obtenção e preparação dos substratos de cobre e dos corpos de prova para o ensaio.



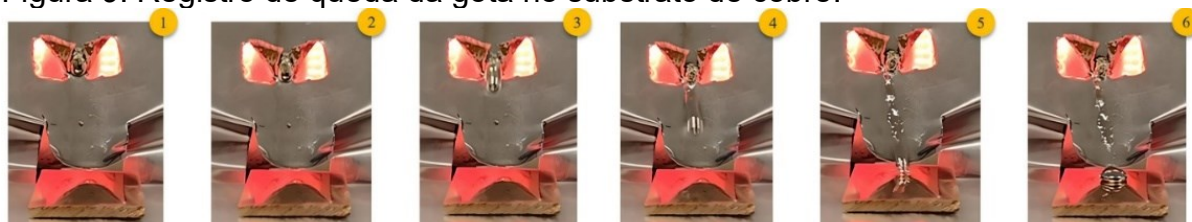
Duas ligas, Sn-5,5%pSb e Sn-37%pPb, foram comparadas nos ensaios de molhabilidade. Equipamentos de proteção individual foram usados devido à presença de chumbo em uma das ligas. Cada corpo de prova foi colocado na folha de alumínio, que foi aquecida pela peça cerâmica. O substrato de cobre foi nivelado a 180° e posicionado a 10 mm da borda da folha de alumínio. Um pirômetro fixado em um tripé mediu a temperatura na linha de contato. Sem isolamento térmico, o ambiente foi controlado para evitar interferências, e o dispositivo foi conectado a uma tomada de 110 V, com a potência ajustada pelo controlador de corrente.

Figura 8. a) Aparato experimental preparado e b) Controle da corrente elétrica.



A queda do corpo de prova no substrato de cobre foi registrada por uma câmera de celular. Além disso, a folha de alumínio foi readaptada para também aquecer o substrato de cobre por condução, facilitando a união da gota com o substrato. A Figura 9 exibe a sequência da queda de 1 a 6.

Figura 9. Registro de queda da gota no substrato de cobre.

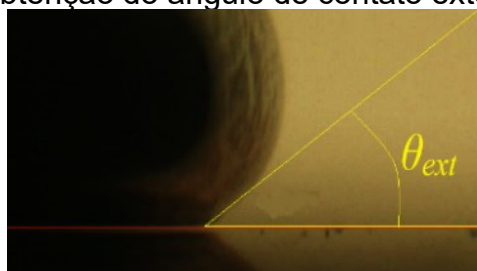


Adiante, utilizando o programa ImageView, o ângulo de contato externo (θ_{ext}) foi medido pelo método óptico da gota séssil, através de imagens do estereoscópio pela angulação formada entre as tensões interfaciais sólido-vapor (γ_{sv}) e líquido-vapor (γ_{lv}) e, portanto, o ângulo de contato (θ) foi obtido através da Equação (1).

$$\theta = 180^\circ - \theta_{ext} \quad (1)$$

Em que θ_{ext} é dado em graus. Então, essa equação considera a superfície do substrato ideal, como o modelo de Thomas Young (Figura 10).

Figura 10. Método para obtenção do ângulo de contato externo.



Por fim, foram feitas medições de várias imagens de cada corpo de prova para verificar a média dos ângulos obtidos, os desvios padrões e variâncias, conferidos pelas Equações (2), (3) e (4), respectivamente.

$$\theta_{\text{médio}} = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n}{n} \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta_{\text{médio}})^2}{n-1} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (4)$$

A confiabilidade da média do ângulo de contato medido pode ser verificada através do desvio padrão e da variância, que analisam a dispersão dos dados. Além disso, a análise ANOVA foi utilizada para determinar a significância das diferenças nos ângulos de contato entre diferentes corpos de prova das ligas Sn-37%pPb e Sn-5,5%pSb. As análises incluíram a soma dos quadrados entre e dentro dos grupos, médias dos quadrados e cálculos da estatística F.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar de não contar com recursos como câmera de alta resolução, isolamento térmico ou dados em tempo real, o dispositivo foi eficaz para a pesquisa, realizando os seis ensaios planejados sem problemas de funcionalidade ou durabilidade. O dispositivo pesa cerca de 1,2 kg, com dimensões de 34,0 cm de altura e 8,0 cm de largura, inclinado a 45°. O material líquido fica suspenso a 10 mm da plataforma de cobre, com a possibilidade de ajuste da altura. Durante os ensaios, a folha de alumínio foi substituída duas vezes, com uma folha sendo usada para cada três ensaios de cada liga. O dispositivo em operação é mostrado na Figura 11.

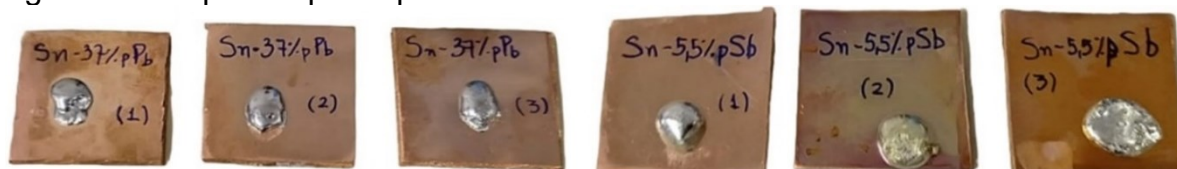
Figura 11. Dispositivo de molhabilidade desenvolvido.



Para realizar os ensaios, os substratos de cobre foram aquecidos até 50 °C para garantir uma boa união entre os metais. O pirômetro óptico registrou que o

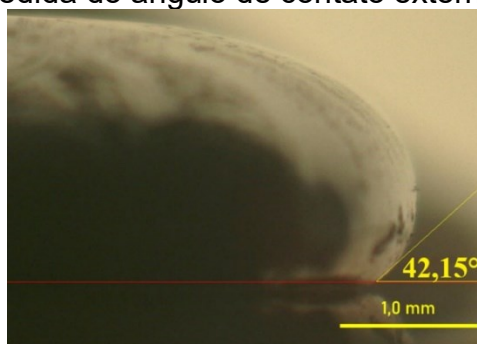
dispositivo pode atingir até 650 °C, mas, por segurança, ele será operado até 400 °C, que é a temperatura ideal do projeto e previne superaquecimento da resistência elétrica. Após aferir e validar o dispositivo de molhabilidade nos ensaios, os corpos de prova foram identificados e agrupados, como mostrado na Figura 12.

Figura 12. Corpos de prova pós-ensaio de molhabilidade.



Durante os ensaios com a liga Sn-37%pPb, observou-se que as gotas apresentavam uma formação específica: um extremo da gota molhava o substrato de forma circular, enquanto o outro mostrava irregularidades. Isso ocorre porque, durante a queda, a transferência de calor entre a folha de alumínio e a gota diminui, levando à solidificação parcial da gota devido à resistência do ar. Características semelhantes foram observadas nos ensaios com a liga Sn-5,5%pSb, devido à pequena diferença de 2 °C entre suas temperaturas *liquidus* e *solidus*. Os ângulos de contato externo indicaram molhamento parcial nos substratos de cobre e foram medidos com o programa ImageView, um exemplo dessas medidas é exibido na Figura 13.

Figura 13. Exemplo de medida do ângulo de contato externo dos corpos de prova.



Desta maneira, a Tabela 1 exibe os ângulos de contato externo dos três corpos de prova da liga Sn-37%pPb, suas médias, desvios padrão e variâncias.

Tabela 1. Ângulos de contato obtidos dos três corpos de prova da liga Sn-37%pPb.

Corpo de prova	Ângulo de contato externo 1 (°)	Ângulo de contato externo 2 (°)	Ângulo de contato externo 3 (°)	Média (°)	Desvio Padrão	Variância
1	42,15	40,05	39,4	40,53	1,44	2,07

2	37,43	36,81	33,84	36,03	1,92	3,68
3	35,16	33,15	32,18	33,50	1,52	2,31
Corpo de prova	Ângulo de contato 1 (°)	Ângulo de contato 2 (°)	Ângulo de contato 3 (°)	Média (°)	Desvio Padrão	Variância
1	137,85	139,95	140,60	139,47	1,44	2,07
2	142,57	143,19	146,16	143,97	1,92	3,68
3	144,84	146,85	147,82	146,50	1,52	2,31

Sendo assim, nota-se que os valores máximos de desvio padrão e variância são 1,92 e 3,68, respectivamente. O mesmo procedimento é feito para utilizando a Tabela 2 que exhibe, para os três corpos de prova da liga Sn-5,5%pSb, os ângulos de contato externo medidos, suas médias, desvios padrões e variâncias.

Tabela 2. Ângulos de contato obtidos dos três corpos de prova da liga Sn-5,5%pSb.

Corpo de prova	Ângulo de contato externo 1 (°)	Ângulo de contato externo 2 (°)	Ângulo de contato externo 3 (°)	Média (°)	Desvio Padrão	Variância
1	33,66	34,22	33,06	34,65	0,58	0,34
2	33,09	32,62	30,49	32,07	1,39	1,92
3	42,48	40,22	40,05	40,92	1,36	1,84
Corpo de prova	Ângulo de contato 1 (°)	Ângulo de contato 2 (°)	Ângulo de contato 3 (°)	Média (°)	Desvio Padrão	Variância
1	143,34	145,78	146,94	145,35	0,58	0,34
2	146,91	147,38	149,51	147,93	1,39	1,92
3	137,52	139,78	139,95	139,08	1,36	1,84

Desta forma, nota-se que os valores máximos de desvio padrão e variância são 1,39 e 1,92, respectivamente. Assim, devido aos desvios padrões e variâncias serem relativamente baixos, as médias dos ângulos de contato obtidas na Tabela 1 e 2 indicam uma boa medição, podendo serem exibidas em relação as ligas na Tabela 3.

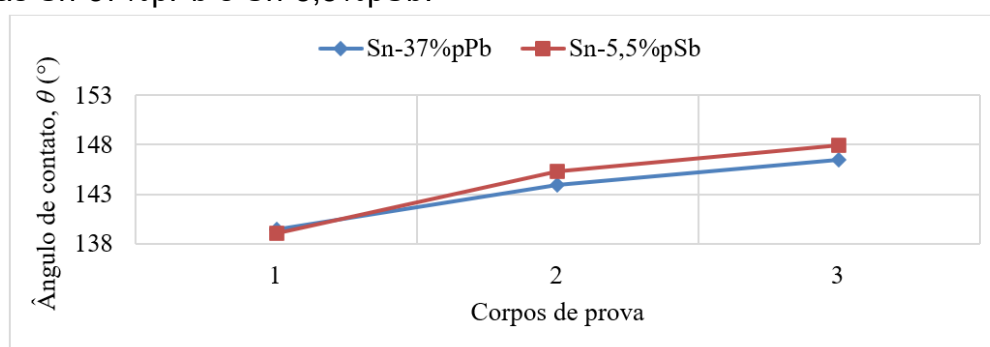
Tabela 3. Médias dos ângulos de contato obtidos dos corpos de prova das ligas Sn-37%pPb e Sn-5,5%pSb.

Liga	Ângulo de contato do corpo de prova 1 (°)	Ângulo de contato do corpo de prova 2 (°)	Ângulo de contato do corpo de prova 3 (°)
Sn-37%pPb	139,47	143,97	146,50
Sn-5,5%pSb	139,08	145,35	147,93

A análise ANOVA para as ligas Sn-37%pPb e Sn-5,5%pSb revelou diferenças estatisticamente significativas nos ângulos de contato. Para Sn-37%pPb, a estatística F foi 48,95 com um valor-p de 0,0001926, indicando variações reais entre os corpos de prova. Para Sn-5,5%pSb, a estatística F foi 14,19 e o valor-p foi 0,0053, também sugerindo diferenças significativas. Esses resultados mostram que as variações observadas não são aleatórias e têm relevância prática para o estudo dos materiais.

Com as médias, é possível gerar o gráfico da Figura 14 que exibe a comparação das médias dos ângulos de contato entre as duas ligas ensaiadas.

Figura 14. Gráfico das médias dos ângulos de contato obtidos dos corpos de prova das ligas Sn-37%pPb e Sn-5,5%pSb.



O gráfico mostra que a liga Sn-37%pPb tem melhor molhabilidade que a liga Sn-5,5%pSb, com menores ângulos de contato nos corpos de prova 2 e 3, apresentando uma diferença de quase 1%. No entanto, no corpo de prova 1, a liga Sn-5,5%pSb apresentou um ângulo de contato 0,27% menor que o da liga Sn-37%pPb. Esse comportamento é semelhante ao estudo de Cosmo *et al.* (2022), onde um dos quatro corpos de prova também mostrou menor ângulo de contato para a liga Sn-5,5%pSb, destacando seu potencial como liga livre de chumbo. Os ângulos de contato neste estudo foram aproximadamente 7,9% menores que os de Cosmo *et al.* (2022), o que pode ser atribuído à queda do material no substrato sólido, aumentando o espalhamento e os ângulos de contato, diferentemente do método convencional da gota séssil usado por Cosmo *et al.* (2022). No entanto, alguns corpos de prova na Figura 12 se soltaram facilmente, indicando má adesão devido à perda de calor durante a queda e ao substrato de cobre não estar na temperatura ideal para formar o composto intermetálico necessário para uma boa junção.

O dispositivo foi desenvolvido usando alguns materiais já disponíveis no laboratório, mas alguns componentes foram adquiridos. Para o levantamento de custos, só os materiais que integram o dispositivo serão contabilizados (Tabela 4).

Tabela 4. Custo do dispositivo de molhabilidade desenvolvido

COMPONENTES / MATERIAIS	UNIDADES	PREÇO
500 g de argila	1	R\$ 7,50
500 g de cimento	1	R\$ 0,50
500 g de massa refratária	1	R\$ 1,40
Abraçadeira de nylon	1	R\$ 0,15
Cabo de força de 2 m	1	R\$ 28,25
Controlador de corrente	1	R\$ 48,95
Folha de alumínio 0,4 mm x 20 cm x 1 m	1	R\$ 17,00
Nível bolha	1	R\$ 16,65
Parafusos, porcas e arruelas 3/16" x 3/4"	2	R\$ 16,95
Resistência elétrica 1000 W	1	R\$ 10,00
TOTAL		R\$ 147,35

CONCLUSÃO

O desenvolvimento de um dispositivo de molhabilidade, apesar de suas limitações em comparação com equipamentos comerciais, mostrou-se uma ferramenta eficaz e acessível para investigar as propriedades de molhabilidade das ligas Sn-37%pPb e Sn-5,5%pSb. O dispositivo funcionou bem durante os testes, permitindo medições precisas dos ângulos de contato e revelando que a liga Sn-37%pPb tem melhor molhabilidade, com ângulos de contato menores, em comparação com a Sn-5,5%pSb. Estes resultados, embora em linha com estudos anteriores, apresentaram variações devido à metodologia e condições de ensaio. Os achados sugerem que ligas sem chumbo, como a Sn-5,5%pSb, podem ser alternativas viáveis na indústria de soldagem eletrônica, atendendo a normas ambientais. Recomenda-se que a indústria invista em melhorias nos dispositivos de molhabilidade para aprimorar a aderência e o controle durante a soldagem. Futuras pesquisas devem focar na otimização das metodologias de medição e na análise de diferentes condições operacionais para aprofundar a compreensão da molhabilidade de ligas de baixa fusão, contribuindo para o progresso contínuo na área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a estrutura e o apoio financeiro fornecidos pela UFPA, CAPES e CNPq para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. PECHT, M.; SHIBUTANI, T.; WU, L. A reliability assessment guide for the transition planning to lead-free electronics for companies whose products are RoHS exempted or excluded. MICROELE RELIABILITY, v. 62, p. 113–123, 2016.
2. JAFFERY, S. H. A.; SABRI, M. F. M.; ROZALI, S.; HASAN, S. W.; MAHDAVIFARD, M. H.; AL-ZUBIADY, D. A. S.; RAVURI, B. R. Oxidation and wetting characteristics of lead-free Sn-0.7Cu solder alloys with the addition of Fe and Bi. MICROELECTRONICS RELIABILITY, v. 139, p. 114802, 2022
3. ZHOU, Z.; CHEN, J.; YU, C.; WANG, Y.; ZHANG, Y. Failure Analysis of Printed Circuit Board Solder Joint under Thermal Shock. COATINGS, v. 13, p. 2023.
4. COSMO, N. S.; BRABO, C. A. da S.; MESQUITA, S. Q.; COSTA, T. A. P. de S.; da ROCHA, O. F. L.; da SILVA, M. A. P. de S. Comparative Analysis of the Wetting Angle in a Lead-free Sn-2.0wt%Sb Alloy. BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT, v. 8, p. 13655–13666, 2022. doi.org/10.34117/bjdv8n2-343.
5. KUANG, H.; WU, B.; WANG, J.; FU, J.; FENG, Y.; YU, C.; WANG, Z.; ZHANG, J.; JI, Y. Wettability and thermal contact resistance of thermal interface material composited by gallium-based liquid metal on copper foam. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, v. 199, p. 123444, 2022.
6. HEBBAR, R. S.; ISLOOR, A. M.; ISMAIL, A. F. Chapter 12 - Contact Angle Measurements. In: N. HILAL, A. F. ISMAIL, T. MATSUURA, D. OATLEY-RADCLIFFE (Eds.), Membrane Characterization pp. 219–255. Elsevier, 2017.
7. SEHIRLI, E.; ERER, A. M.; TURAN, M. K. A new approach for measuring the wetting angles of lead-free solder alloys from digital images. ENG SCI AND TEC, AN INTERNATIONAL JOURNAL, v. 36, p. 101279, 2022.

WETTING DEVICE FOR ELECTRONIC WELDING ALLOYS USING THE SESSILE DROP METHOD

ABSTRACT

In the European Union, a directive emerged to restrict hazardous substances in electronics, leading to the search for alternatives to lead-based solder due to health concerns. Soft solder is essential in heat-sensitive electronic components. With the advancement of smart electronics, wettability has become critical for the integration, miniaturization, and flexibility of electronics. However, the lack of affordable devices for testing wettability limits research in this promising field. Addressing this need, a cost-effective and accessible device was developed to measure the wettability of low-temperature alloys. The components were fabricated and assembled with the objective of conducting six tests. The device allowed the material to drip onto copper substrates without prior contact. The results revealed contact angles indicating partial wettability and low adhesion due to heat loss to the environment.

Keywords: lead-free, device development, wettability, sessile drop, electronic components.