

Confiabilidade de ligas isentas de chumbo para a união de dispositivos eletrônicos por soldagem branda: revisão narrativa

Reliability of lead-free alloys for joining electronic devices by soft soldering: narrative review

Willy Ank de Moraes¹ | <https://orcid.org/0000-0003-3795-0467>

Artigo de revisão

Como Citar

Morais WA. Confiabilidade de ligas isentas de chumbo para união de dispositivos eletrônicos por soldagem branda: revisão narrativa. Rev Científica Integrada 2023, 6(1):e202314. Doi: <https://doi.org/10.59464/2359-4632.2023.3067>

Conflito de interesses

Não há conflito de interesses.

Submetido em: 31/03/2023

Aceito em: 10/07/2023

Publicado em: 20/07/2023

¹ Universidade de Ribeirão Preto, Guarujá, SP, Brasil.

Autor correspondente

Willy Ank de Moraes

Av. Dom Pedro I, 3300, Jardim Centenário, Guarujá – SP, Brasil.
e-mail: willyank@usp.br

Revista Científica Integrada (ISSN 2359-4632)

<https://revistas.unaerp.br/rci>

RESUMO

Objetivo: Analisar as características de confiabilidade no uso de ligas isentas de chumbo empregadas na união elétrica, por soldagem branda, de circuitos eletrônicos. **Métodos:** Trata-se de uma revisão narrativa, realizada em 2023, focado na simulação mecânica do desempenho destas ligas em uniões de componentes eletrônicos do tipo Ball Grid Array (BGA), realizada por soldagem branda, incluindo estudos dos últimos cinco anos, de modo a descrever as particularidades dos fenômenos mecânico-metalúrgicos presentes nestas ligas especialmente sobre fadiga térmica, principal fenômeno degradativo associado às suas falhas. **Resultados:** Os resultados apontam que juntas SAC possuem diferentes graus de efetividade, em função da distribuição e posição das esferas (balls). Além disso, certas condições vinculadas à proximidade ao ponto eutético das ligas e a formação de compostos intermetálicos mostraram-se relevantes. **Conclusões:** a forma de análise abordada pode ser vantajosa para avaliar diferentes geometrias (arquiteturas) de juntas BGA, mas que precisa de complementações posteriores para abranger os efeitos dos mecanismos de alteração microestrutural das ligas estudadas.

Palavras-chave: Soldagem branda; Ligas isentas de chumbo; Confiabilidade.

ABSTRACT

Objective: To analyze the reliability characteristics in the use of lead-free alloys used in the electrical union, by soft soldering, of electronic circuits. **Methods:** This is a narrative review, carried out in 2023, focused on the mechanical simulation of the performance of these alloys in Ball Grid Array (BGA) type electronic components joints, performed by soft soldering, including studies from the last five years, so that to describe the particularities of the mechanical-metallurgical phenomena present in these alloys, especially regarding thermal fatigue, the main degradative phenomenon associated with their failures. **Results:** The results indicate that SAC joints have different degrees of effectiveness, depending on the distribution and position of the spheres (balls). Furthermore, certain conditions linked to the proximity to the eutectic point of the alloys and the formation of intermetallic compounds were relevant. **Conclusions:** The form of analysis addressed can be advantageous to evaluate different geometries (architectures) of BGA joints, but it needs further complements to cover the effects of the mechanisms of microstructural alteration of the studied alloys.

Keywords: Soft welding; Lead-free alloys; Reliability.

Introdução

O desempenho operacional e confiabilidade de sistemas eletrônicos, especialmente aqueles empregados em aplicações críticas ou de segurança, está diretamente vinculado à qualidade da união por soldagem branda (soldering) empregada nestes componentes às suas respectivas placas de circuito (ZHOU et al., 2023; GUO et al., 2022; TAN et al., 2020). Tais sistemas são tipicamente expostos a condições adversas de vibração, umidade, temperatura, poeira e impacto mecânico que têm o potencial de abreviar drasticamente sua vida útil. Neste sentido, Guo et al. (2005), quantificaram as principais causas de falha nas ligações entre componentes eletrônicos como sendo: fadiga térmica (55%), vibração (20%), umidade (19%) e poeira (6%) (Figura 1).

A avaliação do desempenho das uniões por soldagem branda pode ser feita através de vários parâmetros, os quais incluem resistência ao cisalhamento, resistência à fluência (creep), fadiga térmica, resistência ao impacto em queda e à vibração (DEPIVER et al., 2020; ZHOU et al., 2023). O envelhecimento térmico dos metais da junta leva a mudanças em sua microestrutura, favorecendo falhas pelo mecanismo de fluência. Adicionalmente, durante a operação de um dispositivo eletrônico, suas conexões elétricas ficam sujeitas a tensões mecânicas. A principal causa dessas tensões é devida aos diferentes coeficientes de dilatação térmica (CDT) do componente eletrônico e da placa de circuito impresso (PCI), que tipicamente geram tensões cisalhantes, como ilustra a Figura 2 (THEEVEN, 2002; ROVITTO; VILLA, 2019; ZHOU et al., 2023; REN; HUANG, 2021). A continuidade do uso destes dispositivos leva os mesmos à fadiga térmica, que pode culminar em falhas nas uniões, conforme indicado na Figura 1.

A fluência é apontada como um mecanismo de deformação dominante nas uniões por soldagem branda de dispositivos eletrônicos (DEPIVER et al., 2020; THEEVEN, 2002). Neste caso, as baixas temperaturas liquidus das ligas empregadas levam a alcançar temperaturas homólogas ($T_h = T / T_{liquidus}$) que disparam os mecanismos de fluência, mesmo em temperaturas razoavelmente baixas. Neste caso, as diferentes respostas de dilatação térmica linear dos materiais do equipamento eletrônico tendem a gerar tensões que induzem relaxação (damping) por fluência nas ligas empregadas na soldagem branda, que estão submetidas a valores mais elevados, por exemplo: $T_h > 0,40$ (DEPIVER et al., 2020).

Kattner (2002) sugere que as ligas empregadas nestas aplicações devam possuir uma temperatura solidus acima de 208°C de modo a garantir uma temperatura homóloga máxima de 0,90 em picos de temperatura de 160°C. Por outro lado, este mesmo autor aponta que é necessário limitar a diferença entre as temperaturas liquidus e solidus em 30°C, como forma de se evitar defeitos nas juntas, causados por vibrações durante o resfriamento a partir das temperaturas empregadas na soldagem branda.

Uma das formas de melhorar a confiabilidade de equipamentos eletrônicos está na adoção de uma arquitetura de juntas de soldagem branda mais adequada. Neste sentido, os chamados pacotes BGA (Ball Grid Array) têm sido amplamente adotados, já que estes apresentam muitas vantagens sobre outros pacotes eletrônicos (DEPIVER et al., 2021; ROVITTO; VILLA, 2019). Não obstante a confiabilidade na operação de módulos unidos pela arquitetura BGA também depende da vida em fadiga térmica das juntas.

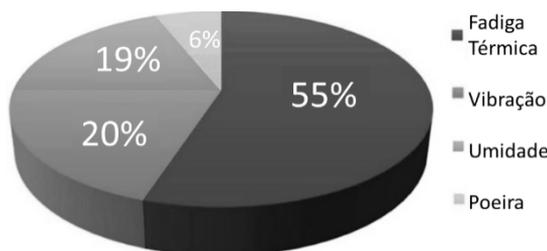
Adicionalmente, a adoção abrangente da diretiva Restriction of Hazardous Substances (RoHS), induziu a necessidade de desenvolvimentos e uso de ligas isentas de chumbo, inclusive na manufatura de eletrônicos (TAN et al., 2020; JIAN et al., 2023). Entre as ligas introduzidas, estão as ligas Sn-Ag-Cu (SAC), utilizadas para substituir as ligas estanho-chumbo (Sn-Pb) convencionais devido a algumas vantagens, tais como: baixa temperatura de fusão, propriedades mecânicas superiores e boa soldabilidade (ZHANG et al., 2009; ZHOU et al., 2023; XINMENG et al. 2021). A Figura 3 apresenta justamente que há uma pequena diferença de temperatura entre os ciclos de aquecimento empregados no uso da liga Sn-Pb tradicional e de uma liga Sn-Ag-Cu (SAC 305) para a união por soldagem branda entre componentes eletrônicos com a placa de circuito impresso. Altas temperaturas devem ser evitadas, pois estas levam à degradação dos circuitos eletrônicos (XINMENG et al. 2021). Apesar do potencial de emprego das ligas SAC e de sua utilização, a literatura salienta que ainda permanecem limitações no seu emprego, que exigem mais pesquisas para definir padrões de processamento e ligas mais confiáveis (THIRUGNANASAMBANDAM, 2018; JIAN et al., 2023).

Foi dentro deste contexto que são desenvolvidos estudos, como os realizados por Depiver et al. (2020 e 2021) ou Guo et al. (2022) para simular o desempenho de ligas SAC. Vários autores buscam avaliar a geração de tensões e deformações associados aos mecanismos de fluência e de fadiga

térmica, notoriamente indutores de falhas nas conexões eletrônicas (THEEVEN, 2002; QUIN et al., 2015).

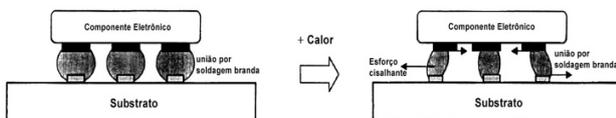
O presente estudo visou analisar as características de confiabilidade no uso de ligas isentas de chumbo empregadas na união elétrica, por soldagem branda, de circuitos eletrônicos. Para isso, tomou-se como base a análise por elementos finitos das condições mecânicas em uniões do tipo Ball Grid Array (BGA) de quatro ligas estanho-prata-cobre (Sn-Ag-Cu ou SAC) empregadas para substituir as ligas estanho-chumbo (Sn-Pb) convencionais.

Figura 1. Causa de falha primária em pacotes eletrônicos.



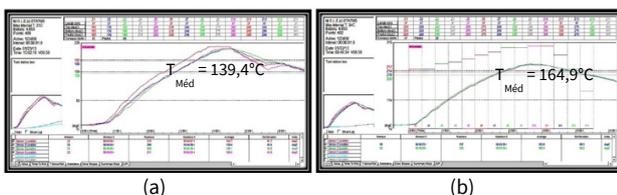
Fonte: adaptado de Guo et al. (2005), apud Depiver et al. (2021).

Figura 2. Juntas de soldagem branda sujeitas a tensões de cisalhamento durante a ciclos de carregamento térmico oriundos da incompatibilidade do CDT entre matriz, união e substrato.



Fonte: adaptado de Theeven (2002).

Figura 3. Exemplos de cartas de registros de temperatura durante o tratamento térmico (*reflow*): (a) liga Sn-Pb tradicional e (b) liga SAC 305 (Sn com 3% Ag e 0,50%Cu)



Fonte: adaptado de THIRUGNANASAMBANDAM (2018)

Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido na forma de uma revisão bibliográfica focada na literatura dos últimos cinco anos. A exemplo disso, destaca-se os estudos de Depiver et al. (2020; 2021), que apresentam resultados de simulação de desempenho mecânico em união elétricas entre dispositivos eletrônicos e suas respectivas placas mãe através do processo de soldagem branda (soldering). As abordagens adotadas nos trabalhos consultados estão descritas neste item e os resultados por estes obtidos são apresentados e discutidos nos itens seguintes.

A avaliação do desempenho de uniões de circuitos eletrônicos pode ser efetuada por abordagens práticas, através de ensaios de durabilidade, ou por estudos de simulação. Estes últimos possuem a vantagem de testar configurações diferentes sem os custos e o tempo necessários dos testes experimentais (ROVITTO; VILLA, 2019; XINMENG et al., 2021; REN; HUANG, 2021; JIAN et al., 2023), sendo empregado em diversos estudos (GUO et al., 2022; DEPIVER et al, 2020; ZHOU et al., 2023). Depiver et al. (2020) empregaram a técnica de elementos finitos (FEA) para simular as condições mecânicas presentes em uma configuração de junta BGA 6x6, formada por cinco ligas.

A Tabela 1 identifica as ligas avaliadas e suas composições químicas, todas estas próximas às suas respectivas composições eutéticas. No caso particular das ligas SAC, seu ponto eutético ternário ocorre na Temperatura de 215,9°C e na composição 3,73%Ag e 0,85%Cu (NIST, 2021), conforme ilustrado pelo diagrama de equilíbrio ternário representado na Figura 4, no qual também está mostrada a localização das ligas avaliadas.

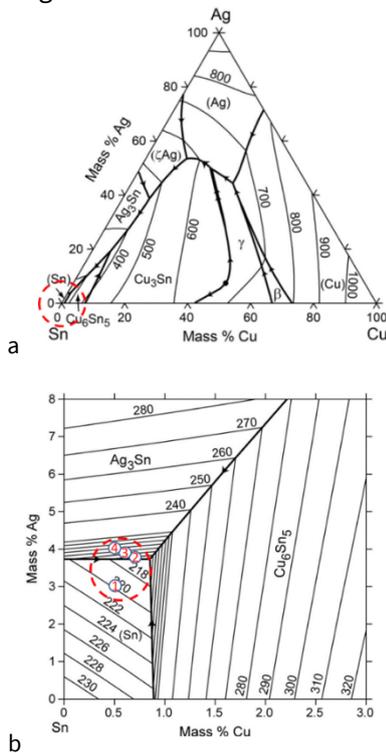
Tabela 1. Composições químicas das ligas avaliadas por Depiver et al. (2020).

Identificação		Composição			Temperaturas			
Liga	Local de emprego	%Sn	%Ag	%Cu	%P b	T _s [°C]	T _L [°C]	DT [°C]
SAC305*	JEITA (Japan)	96,5 %	3,00 %	0,50 %	-	217	220	3
SAC387*	European Union (EU)	95,5 %	3,80 %	0,70 %	-	217	219	2
SAC396*	iNEMI (USA)	95,5 %	3,90 %	0,60 %	-	217	221	4
SAC405*	Mundial	95,5 %	4,00 %	0,50 %	-	217	222	5
Sn63Pb37	Padrão tradicional	63%	-	-	37%	183	183	0

Legenda: $T_{Solidus}$, $T_{Liquidus}$ temperaturas *solidus* e *liquidus*. * SAC XYZ: S=Sn; A=Ag; C=Cu; X,Y=%Ag e 0,Z=%Cu.
 Fonte: elaborado pelo autor.

A configuração BGA 6x6 simulada por Depiver et al. (2020) está ilustrada na Figura 5. Sob o ponto de vista do comportamento mecânico e em referência às ligas avaliadas na simulação por FEA, considerou-se que todos os materiais são considerados homogêneos, durante o carregamento. Além disso, considerou-se que os materiais envolvidos apresentam comportamento elástico linear e isotrópico, à exceção: (1) da PCI, considerada ortotrópica (de comportamento não isotrópico) e (2) do metal da soldagem branda, que altera sua resposta mecânica devido ao efeito da fluência (creep).

Figura 4. Superfície liquidus do diagrama ternário Sn-Ag-Cu.

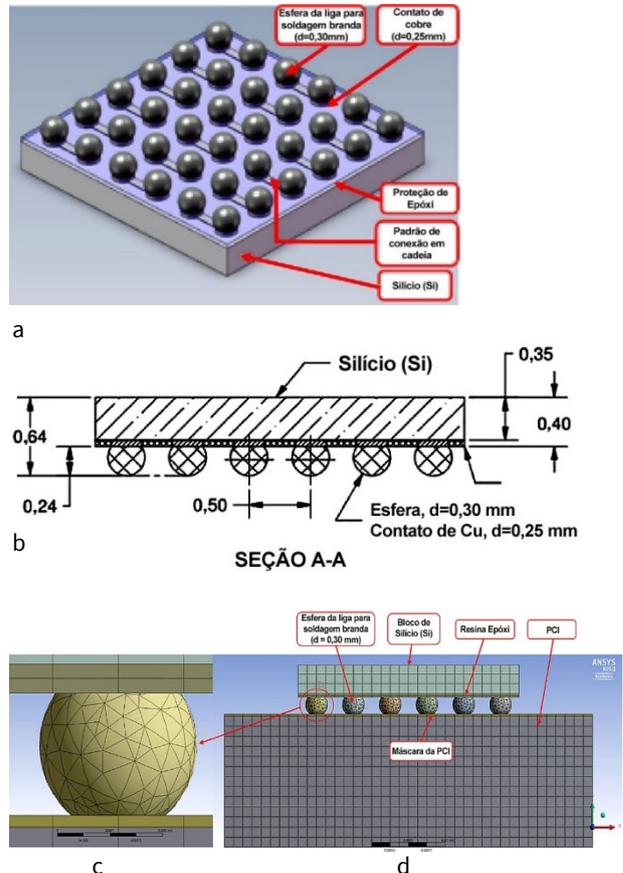


Legenda: (a) visão geral e (b) detalhe ao redor da composição eutética com a indicação das 4 ligas avaliadas, SAC 305 (#1), 387 (#2), 396 (#3) e 405 (#4).
 Fonte: adaptado de NIST (2021).

Na análise de Depiver et al. (2020), adotou-se a condição Solder Mask Defined pads (SMD), que define um nicho na PCI na qual será depositado pontualmente uma esfera (ball) da liga para efetuar a soldagem branda. Nesta geometria, considera-se que a liga empregada na soldagem branda deve molhar apenas as superfícies planas dos contatos de

cobre da PCI e do dispositivo eletrônico a ser fixado. Algumas simulações consideram, inclusive, empenamentos que podem ocorrer na fase de aplicação do tratamento térmico (reflow) para fixação dos componentes (GUO et al., 2022).

Figura 5. Configuração da soldagem branda empregada no modelo de elementos finitos.



Legenda: (a) configuração geral 6x6 esferas/depósitos (balls); (b) dimensões consideradas; (c) malha de elementos finitos (EF) e (d) visão geral dos materiais
 Fonte: adaptado de Depiver et al. (2020)

Para descrever o comportamento em fluência das ligas pode-se adotar uma equação descritiva do fenômeno, tal como a equação de Garofalo-Arrhenius (GAROFALO; BUTRYMOWICZ, 1996):

Equação 1

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha \cdot \sigma)]^n e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)}$$

Sendo, $\dot{\epsilon}$ a taxa de deformação por fluência; A uma constante do material; α um multiplicador do *senh*, obtido a partir do ajuste de dados experimentais; σ a tensão de cisalhamento aplicada; n o expoente de tensão que pode ser determinado a partir do mapa de deformação por fluência (pelo

mecanismo de deformação por movimentação de discordâncias, n entre 5 e 7); Q a energia de ativação; R a constante universal dos gases e, T a temperatura absoluta.

A Tabela 2 apresenta os valores adotados pelo trabalho de Depiver et al. (2020) para a Equação (1) e alguns valores de propriedades mecânicas relevantes à simulação, que foi efetuada com os softwares SolidWorks® e ANSYS R19.0.

Tabela 2. Parâmetros das ligas empregados no estudo de Depiver et al. (2020).

Liga	Parâmetros da Equação de Garofalo-Arrhenius				Algumas propriedades físicas e mecânicas					
	A [s ⁻¹]	a [MPa ⁻¹]	n	Q [kJ/mol]	μ [g/cm ³]	r [m W×m]	λ [W/(m×K)]	α [mm/(m×°C)]	E [GPa]	ν [A.d.]
SAC30	2,63E	0,04	5,	52,4	7,3	0,1	58	23,5	51,	0,
5	+03	53	0		8	32			0	40
SAC38	3,20E	0,03	5,	65,3	7,4	0,1	60	17,6	45,	0,
7	+04	7	1		4	32			0	36
SAC39	4,41E	0,00	4,	45	7,4	0,1	61	23,2	43,	0,
6	+05	5	2		6	32			0	30
SAC40	1,70E	0,14	4,	55	7,4	0,1	62	20,0	44,	0,
5	+01		2		4	32			6	42
Sn63P	1,00E	0,1	2,	44,9	8,4	0,1	50	20,0	56,	0,
b37	+01	0	0		0	45			0	30

Legenda: A, a, n e Q parâmetros da Equação (1); μ massa específica; ρ resistividade elétrica; λ condutividade térmica; α coeficiente de dilatação térmica (CDT) linear; E módulo de elasticidade e ν coeficiente de Poisson.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Para realizar qualquer simulação por FEA, torna-se necessário adotar condições de contorno adequadas. No caso de Depiver et al. (2020), estas foram as seguintes: (1) estado livre de tensão na temperatura ambiente, fixada em 22°C, sendo essa também a temperatura inicial do carregamento durante a fadiga térmica; (2) desprezou-se a tensão inicial nos conjuntos, que poderia ser acumulada após a etapa de reflow, aquecimento realizado para fazer a união final com o dispositivo eletrônico (vide Figura 3); (3) considera-se que todas as superfícies de contato estão ligadas com adesão perfeita e (4) variações processuais, tais como o crescimento de intermetálicos (IMC), também foram desprezadas.

O envelhecimento isotérmico foi estudado simulando a submissão da configuração adotada (Figura 5) por 45 dias (64.800 h) às seguintes temperaturas: -45°C, 25, 75 e 150°C. Tal condição de simulação induziu os níveis de temperaturas homólogas listadas nas duas últimas colunas da Tabela 3. Tais valores de temperatura homóloga estão em faixas ($T_h > 0,4$) nas quais pode-se

considerar que ocorram fenômenos de fluência (Depiver et al., 2020).

Tabela 3. Condições de simulação de envelhecimento isotérmico (por 45 dias) das cinco ligas estudadas por Depiver et al. (2020).

#	Liga	$T_{Liquidus}$ [°C]	$T_{mín}$ [°C]	$T_{máx}$ [°C]	$T_{h\ mín}$	$T_{h\ máx}$
1	SAC305	220	-40	150	0,473	0,858
2	SAC387	219	-40	150	0,474	0,860
3	SAC396	222	-40	150	0,471	0,855
4	SAC405	221	-40	150	0,472	0,857
5	Sn63Pb37	183	-40	150	0,511	0,928

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Adicionalmente, a fadiga térmica foi simulada por FEA considerando-se 6 ciclos térmicos acelerados completos de 36 ciclos a partir de 22°C e variando de -45°C a até 150°C, com uma espera de 5 min. em cada patamar inferior e superior de temperatura.

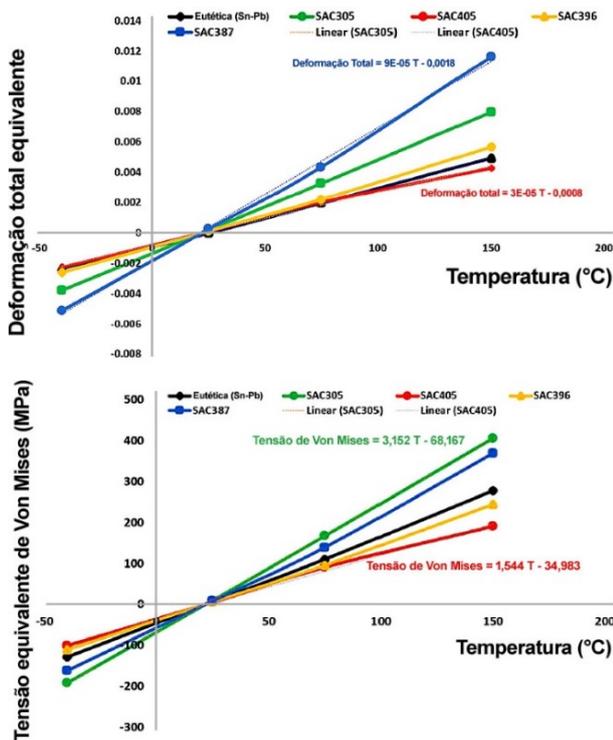
Resultados

Os resultados obtidos nas simulações foram agrupados em função de três itens referentes à avaliação dos metais estudados: (1) efeito do envelhecimento isotérmico na resposta à fluência; (2) efeito da fadiga térmica na resposta à fluência de diferentes soldas e (3) confiabilidade dos conjuntos BGA estudados.

O efeito do envelhecimento isotérmico foi avaliado para cada uma das quatro temperaturas consideradas (-45°C, 25, 75 e 150°C) quantificando-se a: deformação total equivalente (ϵ_{ef}), tensão equivalente de Von Mises (σ_{VM}) nas soldas e densidade de energia de deformação (E_d).

A Figura 6 apresenta dois dos gráficos obtidos nesta análise, que ilustram os comportamentos após a simulação de envelhecimento. Percebeu-se que algumas ligas SAC apresentam comportamentos similares ou até melhores do que a liga tradicional Sn63Pb37. Destaque para a liga SAC 405, que apresentou o melhor comportamento e para as ligas SAC 387 e 305 que apresentaram os piores resultados.

Figura 6. Comparação do desempenho de uniões efetuadas por soldagem branda com as ligas Sn63Pb37 e SAC 305, 387, 396 e 405, sob envelhecimento isotérmico.



Legenda: Na primeira figura, há uma deformação total equivalente; na segunda figura, uma tensão equivalente de Von Mises.

Fonte: adaptado de Depiver et al. (2020).

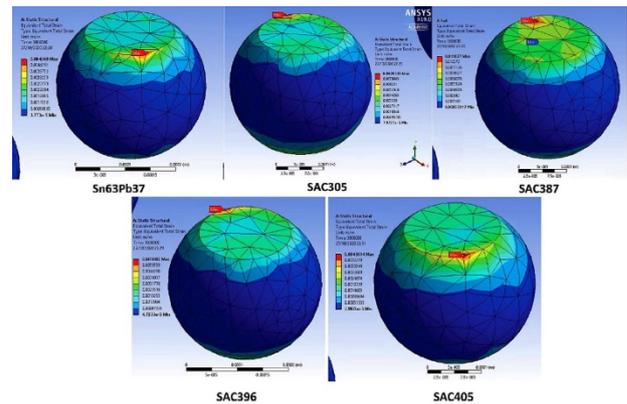
Uma forma de complementar a análise do efeito do envelhecimento isotérmico é pela representação gráfica da distribuição das deformações equivalentes nas esferas/depósitos de soldagem do BGA simulado.

A Figura 7 ilustra os resultados obtidos de deformação equivalente nas partes mais solicitadas das malhas geradas por FEA, após simulação de 45 dias a temperatura de 150°C. Nesta situação, a liga SAC 405 apresentou o melhor resultado, ou seja, menor deformação presente, como mostrado também na Figura 6.

A representação da intensidade das deformações nas malhas também indica que a máxima deformação ocorre na parte superior, no contato com o componente eletrônico, representado pelo bloco de silício (Figura 5). Devido a esta maior deformação, espera-se que este seja o local de maior probabilidade de geração de danos.

A Figura 8 apresenta um outro resultado da simulação do efeito da fadiga térmica, no qual é possível perceber que as esferas/depósitos (balls) mais afastados estão em condições de carregamento mais críticas do que aqueles localizados mais ao centro da união (BGA).

Figura 7. Distribuição das deformações equivalentes após simulação de envelhecimento isotérmico de 45 dias a 150°C.

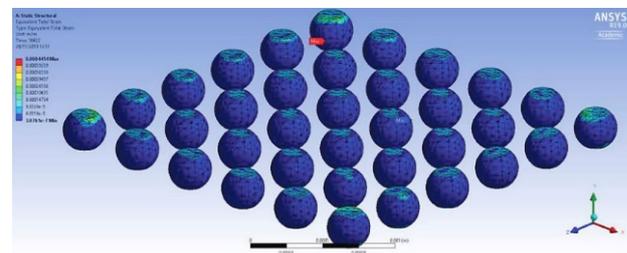


Legenda: Deformações equivalentes máximas obtidas: $7,98 \times 10^{-3}$ para SAC 305; $11,63 \times 10^{-3}$ para SAC 387; $5,68 \times 10^{-3}$ para SAC 396; $4,30 \times 10^{-3}$ para SAC 405 e $4,97 \times 10^{-3}$ para Sn63Pb37.

Fonte: adaptado de Depiver et al. (2020).

O efeito da fadiga térmica também foi avaliado quantificando-se os mesmos parâmetros avaliados na análise do envelhecimento isotérmico (ϵ_{ef} , σ_{VM} e E_d). Porém, os resultados foram apresentados em função do tempo transcorrido ao longo dos ciclos de fadiga térmica, para cada uma das cinco ligas.

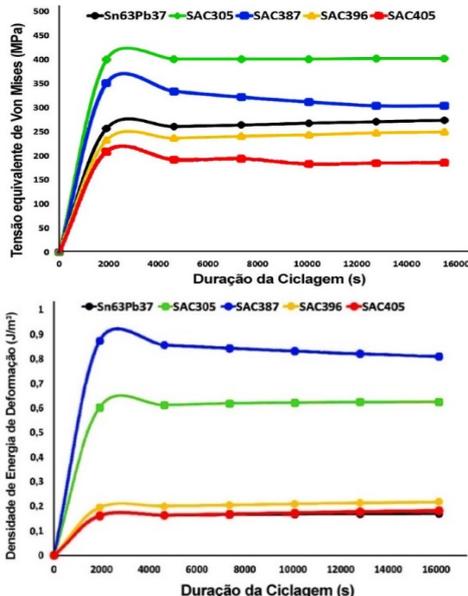
Figura 8. Visão geral da distribuição da deformação nas regiões de contato das esferas de solda com o dispositivo eletrônico durante a simulação da fadiga térmica para a liga SAC 405 após 16.000 s de simulação.



Fonte: adaptado de Depiver et al. (2020).

A Figura 9 apresenta os gráficos derivados desta análise demonstrando que as ligas também apresentam comportamentos distintos sob fadiga térmica, como foi obtido para o envelhecimento isotérmico. Novamente a liga SAC 405 apresentou o melhor desempenho, em contradição ao pior desempenho das ligas SAC 387 e 305 nesta simulação.

Figura 9. Comparação do desempenho de uniões efetuadas por soldagem branda da liga eutética Sn63Pb37 e SAC 305, 387, 396 e 405, submetidas à fadiga térmica.



Legenda: (a) tensão equivalente de Von Mises (σ_{VM}) e (b) densidade de energia de deformação (E_d) versus temperatura (T).

Fonte: adaptado de Depiver et al. (2020).

Os resultados gráficos apresentados na Figura 7 e 8, permitem prever a localização e quantificar a susceptibilidade de danos em função da liga empregada e da arquitetura BGA adotada. Para sistemas que sofrem a influência de diversas variáveis, como o avaliado (XINMENG et al. 2021), é costumeira a criação de indicadores para quantificar a sensibilidade destes em relação a um resultado desejado, como sua confiabilidade (GUO et al., 2022).

Assim sendo, a partir dos resultados das simulações de envelhecimento isotérmico e fadiga térmica é possível criar indicadores de desempenho para cada uma das ligas avaliadas, obtendo-se uma classificação geral relativa. O resultado, quantificado em termos do nível de confiabilidade, pode ser expresso como no gráfico apresentado na Figura 10.

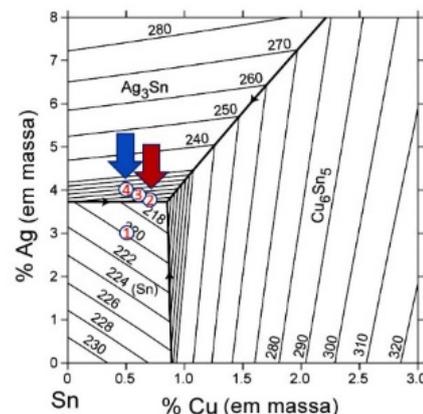
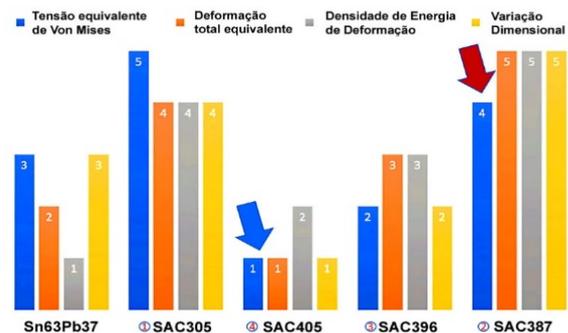
A atualização dos parâmetros da lei constitutiva para a fluência, Equação (1), assim como o emprego de valores representativos deve ser bem ponderada, pois pequenas alterações de alguns dos parâmetros, como a energia de ativação Q , podem levar a grandes variações nos resultados.

Um exemplo desta variação está apresentado na Figura 11, na qual estão apresentados resultados comparativos da relação entre a taxa de deformação

($\dot{\epsilon}$) e a tensão (σ) aplicada para a liga SAC 387, na temperatura de 150°C. Ainda na Figura 11, deve-se notar a grande diferença entre a energia de ativação de 0,40233 kJ/mol, utilizada por Schubert et al. (2001) apud Theeven (2002), com o valor de 65,3 kJ/mol, apresentado na Tabela 2.

Os valores empregados no trabalho de Depiver et al. (2020) e apresentados na Tabela 2 foram oriundos de publicações entre 2001 e 2005. Em um trabalho seguinte (DEPIVER et al., 2021), os mesmos autores empregaram uma versão mais completa da Equação (1) e parâmetros oriundos de bibliografias mais recentes, desta vez dos anos 2005 a 2016.

Figura 10. Resultados gerais das ligas avaliadas.



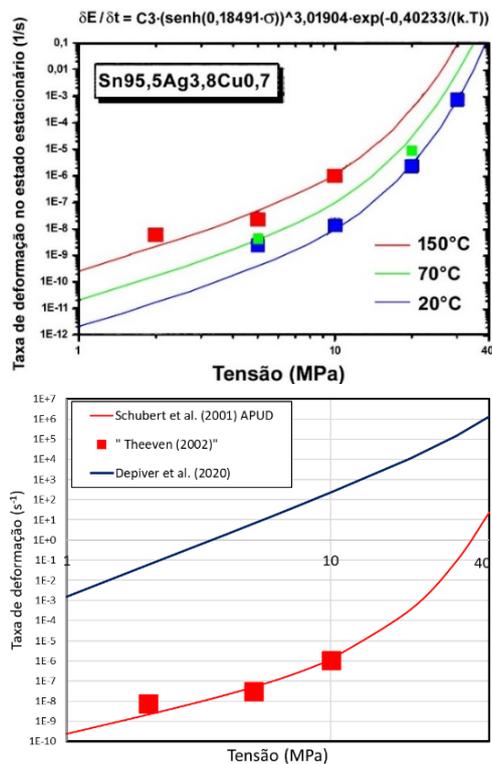
Legenda: (a) gráfico resumindo a confiabilidade das ligas pelos critérios avaliados (média nos dois tipos de simulações feitas), sendo que a confiabilidade aumenta de 1 (melhor) para 5 (pior) (adaptado de Depiver et al., 2020) e (b) posição relativa das ligas na curva liquidus do diagrama de fases ternário.

Fonte: adaptado de NIST, 2021.

O trabalho de Qin et al. (2015) aponta dificuldades de se determinar experimentalmente com precisão a magnitude e a distribuição de tensão, deformação e energia de deformação nas juntas obtidas por soldagem branda, devido ao volume envolvido ser pequeno e muito difícil de ser caracterizado. A Figura

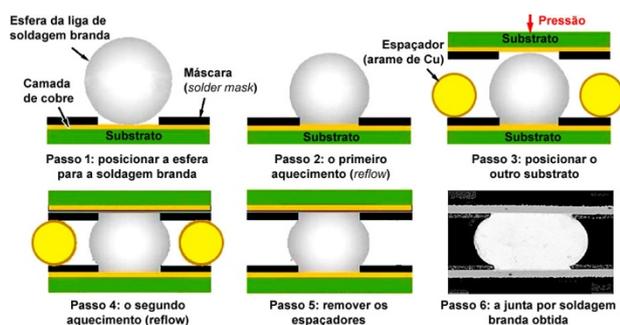
12, retirada deste trabalho, ilustra o ciclo completo da soldagem branda empregada em pacotes BGA.

Figura 11. Comparação de resultados disponíveis na literatura para o comportamento em fluência da liga SAC 387 e resultados previstos pelos parâmetros empregados por Depiver et al. (2020) e Schubert et al. (2001) apud Theeven (2002).



Fonte: (a) adaptado de Schubert et al. (2001) apud Theeven (2002); (b) elaborado pelo autor (2023).

Figura 12. Procedimento para a preparação de uma única junta BGA por soldagem branda por tratamento térmico (reflow) duplo.



Fonte: adaptado de Qin et al. (2015)

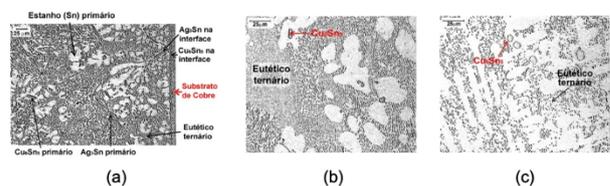
Assim sendo, uma das condições de contorno adotadas por Depiver et al. (2020), ou seja, a não

existência de tensões residuais após a etapa de tratamento térmico final (reflow), pode não ser precisa, porém seria muito difícil de ser determinada experimentalmente. Mesmo assim, esta é uma consideração simplificadora que pode ser avaliada em simulações mais detalhadas, pois as condições de dilatação térmica do conjunto e da liga empregada na soldagem branda devem introduzir tensões residuais que poderão influenciar o desempenho posterior desta união.

Entende-se que um trabalho de modelamento e simulação precisa partir de considerações e condições de contorno bem específicas para viabilizar a sua implementação. Uma das principais considerações feitas por Depiver et al. (2020), foi a homogeneidade dos materiais presentes, destacando que não ocorre formação de compostos intermetálicos (IMCs) na liga depositada por soldagem branda. Os próprios autores citam a presença de IMC como uma característica destas ligas, porém esta condição não foi considerada naquele estudo.

Entretanto, é justamente a presença e evolução de IMCs, apontada por vários estudos, como o de Zhang et al. (2009), que têm forte influência sobre a confiabilidade dos componentes eletrônicos unidos pelos tipos de ligas estudados por Depiver et al. (2020). Lewis (2003) apresentou, no seu estudo sobre evolução das microestruturas das ligas Sn-Al-Cu, alguns resultados interessantes ressaltando a evolução termodinâmica e estrutural das ligas SAC, como exemplificado na Figura 13.

Figura 13. Variação microestrutural da liga SAC 405 em diferentes condições de uso.



Legenda: (a) estrutura próxima ao ponto de contato com o circuito eletrônico logo após a soldagem branda; (b) estrutura nas regiões afastadas do ponto de contato com o circuito eletrônico logo após a soldagem branda e (c) estrutura nas regiões afastadas do ponto de contato com o circuito eletrônico após tratamento isotérmico por 4 semanas (28 dias ou 672 h) a 152°C.

Fonte: adaptado de Lewis (2003).

A presença e distribuição dos IMCs afeta o desempenho da união presente iniciando trincas entre as partículas presentes, como descrito por Depiver et al. (2020) para a liga Sn63Pb37 tradicional.

Em adição à consideração da presença de IMCs, o trabalho de Qin et al. (2015) aborda o papel relevante dos IMCs na ocorrência de fraturas, inclusive após o tratamento térmico (reflow), realizado ao final do processo de soldagem branda (vide Figura 11). Zhou et al. (2023) também aborda esta questão associando a presença dos maiores níveis de tensão nas regiões de contato com o cobre nas placas e dispositivos com o metal das juntas (Figura 7) com a maior susceptibilidade de formação de IMCs.

Discussão

A partir dos resultados apresentados, as ligas SAC396 e, principalmente, a SAE405 geraram uma união BGA por soldagem branda mais confiável, ao menos na arquitetura modelada (Figura 5). Na simulação, as juntas obtidas com as ligas SAC405 e SAC396 apresentaram as menores magnitudes de tensão, deformação, variação dimensional e densidade de energia de deformação do que as demais ligas isentas de chumbo avaliadas, conforme apresentado na Figura 10. Adicionalmente, em comparação com a liga Sn63Pb37, a liga SAC405 conseguiu apresentar um desempenho superior em todos os critérios das simulações, levando à recomendação do uso da liga SAC405, em substituição da liga Sn63Pb37.

Outro resultado relevante foi a relação entre o desempenho das ligas que apresentam um maior afastamento relativo do ponto eutético ternário e um maior teor de prata ($\approx 4\%Ag$), como mostrado na Figura 10. Esta tendência é observada em alguns trabalhos, como o de Jian et al. (2023) que registraram um melhor desempenho de uma liga SAC com $\%Ag \approx 4\%$, em comparação com a SAC 305 ($3\%Ag$), especialmente em condições de fadiga, em experimentos laboratoriais.

Os resultados obtidos pelas simulações, ilustrados nas Figuras 7 e 8, indicam que os locais críticos de dano máximo se localizam especialmente na parte superior das juntas soldadas, na periferia da BGA empregada em uma PCB. Desta forma, estas devem ser as regiões onde é necessário o fortalecimento das juntas por soldagem branda. A FEA também pode ser empregada como forma de avaliar diferentes arquiteturas de BGA, avaliando os efeitos geométricos e a presença de diferentes coeficientes de dilatação térmica dos materiais empregados sobre as tensões e deformações geradas, desde que estejam disponíveis parâmetros representativos do comportamento destas ligas sob condições de fluência.

A Figura 11 demonstrou a influência do uso de dados oriundos de diferentes bibliografias sobre os resultados obtidos, o que ilustra a importância de empregar parâmetros atualizados e representativos, assim como o cuidado na formulação de conclusões e tomada de decisões com base nos parâmetros adotados.

Finalmente, a presença e distribuição dos IMCs afeta o desempenho da união presente iniciando trincas entre as partículas surgidas nas ligas afetadas. As empresas fabricantes de eletrônicos geralmente adotam padrões de teste ou personalizam seus padrões baseados em medições de resistividade elétrica das juntas (DEPIVER et al., 2020, p.265). Alguns padrões (IPC-9701, IPC-SM-785, JESD22-B111 e IPC/JEDEC-9702) consideram que uma junta falha quando sua resistência ultrapassa um certo patamar na sua confecção, uso ou após testes mecânicos ou de choque térmico (Zhou et al., 2023). Esta consideração é importante, pois ressalta a importância da presença de IMCs, que dificultam a condutividade elétrica nas interfaces dos contatos elétricos de cobre, onde tendem a ser mais numerosos. Desta forma, os IMCs são um fator relevante para a confiabilidade das uniões entre componentes eletrônicos e precisam ser avaliados em estudos mais amplos, como abordado por QIN et al. (2015); Tan et al. (2020) e Ren e Huang (2021).

Conclusão

Dentre as opções para avaliar a união por soldagem branda (soldering) de componentes eletrônicos e suas placas de circuito impresso (PCIs) destaca-se a técnica de elementos finitos (FEA, Finite Element Analysis). Esta técnica permite fazer análises e experimentações variadas com menor impacto em tempo e custo, obtendo-se resultados práticos e relevantes para o projeto de uniões soldadas e, também, definir condições laboratoriais ou práticas a serem experimentadas.

Visando a substituição das tradicionais ligas eutéticas Estanho-Chumbo (Sn-Pb), estão sendo avaliadas ligas Estanho-Prata-Cobre (SAC), que apresentam vantagens relevantes, mas que necessitam de estudos para serem adequadamente empregadas. Adicionalmente, os chamados pacotes BGA também têm sido empregados como forma de promover uma união elétrica com menor impacto térmico e de geração de tensões entre os dispositivos eletrônicos e suas PCIs, o que favorece o uso de novas ligas, que necessitam de temperaturas de trabalho mais elevadas.

Os trabalhos aqui avaliados, especialmente os baseados em análises por FEA, indicam pontos importantes a serem consideradas na execução de uniões BGA com ligas SAC, especialmente os pontos de maiores tensões, susceptibilidade das ligas a danos, tendências em termos de composição química e a relevância dos compostos intermetálicos (IMCs) na confiabilidade das juntas.

Referências

- DEPIVER, J. A.; MALLIK, S.; AMALU, E. H. Effective solder for improved thermo-mechanical reliability of solder joints in a ball grid array (BGA) soldered on printed circuit board (PCB). **Journal of Electronic Materials**; v. 50, n. 1, p. 263, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08525-9>.
- DEPIVER, J. A.; MALLIK, S.; AMALU, E. H. Thermal fatigue life of ball grid array (BGA) solder joints made from different alloy compositions. **Engineering Failure Analysis**; v. 125, n. 1, p. 105447, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105447>.
- GAROFALO, F.; BUTRYMOWICZ, D. B. Fundamentals of creep and creep-rupture in metals. **Physics Today**; v. 19, n. 5, p. 100, 1966. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.3048224>.
- GUO, Q.; ZHAO, M.; WANG, H. SMT solder joint's semi-experimental fatigue model. **Mechanics Research Communications**; v. 32, n. 3, p. 351, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2004.03.011>.
- GUO, Y.; LIU M.; YIN, M.; YAN, Y. Reliability sensibility analysis of the PCB assembly concerning warpage during the reflow soldering process. **Mathematics**; v. 10, n. 17, p. 3055, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/math10173055>.
- JIAN, M.; HAMASHA, S.; ALAHMER, A.; HAMASHA, M.; WEI, X.; BELHADI, M. E. A.; HAMASHA, K. Analysis and modeling of aged SAC-Bi solder joints subjected to varying stress cycling conditions. **Materials**; v. 16, n. 2, p. 750, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/ma16020750>.
- KATTNER, U. R. Phase diagrams for lead-free solder alloys. **JOM**; v. 54, n.12, p. 45, 2002. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02709189>.
- LEWIS, S. L. **Microstructural evolution in tin-silver-copper eutectic alloys**. 2003. 107 p. Dissertation (Master in materials science and engineering) - Department of Materials Science and Engineering, Lehigh University, 2003.
- PHASE diagrams & computational thermodynamics: Ag-Cu-Sn system. **National Institute of Standards and Technology**, Gaithersburg (USA), 13 de jan de 2002. Disponível em: <[Ag-Cu-Sn Phase Diagram & Computational Thermodynamics \(nist.gov\)](https://www.nist.gov/pml/phase-diagram-computational-thermodynamics)>. Acesso em: 15 de jun. de 2021.
- QIN, H. B.; ZHANG, X. P.; ZHOU, M. B.; LI, X. P.; MAI, Y. W. Geometry effect on mechanical performance and fracture behavior of micro-scale ball grid array structure Cu/Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu solder joints. **Microelectronics Reliability**; v. 55, n. 8, p. 1214, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2015.05.013>.
- REN, J.; HUANG, M. L. Board-level drop reliability and fracture behavior of low-temperature soldering Sn-Ag-Cu/Sn-Bi-X hybrid BGA solder joints for consumer electronics. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**; v. 32, n. 11, p. 15453, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06094-z>.
- ROVITTO, M.; VILLA, C. M. Novel methodology for real time thermal expansion characterization on ball grid array substrate stack-up materials. **Microelectronics Reliability**; v. 100, n. 1, p. 113478, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113478>.
- SCHUBERT, A.; WALTER, H.; GOLLHARDT, A.; MICHEL, B. Materials mechanics, and reliability issues of lead-free solder interconnects. In: 2nd International Conference on Benefiting from Thermal and Mechanical Simulation in (Micro-) Electronics – EuroSimE 2001, 2001, Paris. **Proceedings** [...] Paris: Europa production, 2001. p. 171-178.
- TAN, C. Y.; SALLEH, M.A.A.M.; SAUD, N. The study of interfacial reaction between snagcu (sac) lead-free solder alloys and copper substrate: a short review. In: The Ziggurat International Conference on Materials Science and Engineering (ZICMSE 2020), 2020, London. **Proceedings** [...] London: IOPscience, 2020. p. 864 012182.
- THEEVEN, J. G. A. **Creep and failure of lead-free solder alloys**. 2002. 103 p. Dissertation (master's in mechanical engineering) - Department of Mechanical

Engineering, Technische Universiteit Eindhoven, 2007.

THIRUGNANASAMBANDAM, S. **Lead-free doped solder joint reliability under harsh temperature cycling environment to study the long-term isothermal aging effects of heat sinks, solder paste volume, board substrate material, component substrate material and component sizes**. Thesis (Doctoral in industrial and systems engineering) - Department of Industrial and Systems Engineering, Auburn University, 2018.

XINMENG, Z.; YUEFENG, L.; JUN, Z.; MINGMING, S.; BOBO, Y.; YANG, L.; CHUNFENG, G.; RONGRONG, H. Effect of soldering temperature on the reliability of sn-ag-cu lead-free solder joints. **Journal of Electronic Materials**; v. 50, n. 3, p. 869, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08715-5>.

ZHANG, Y.; CAI, Z.; SUHLING, J. C.; LALL, P.; BOZACK, M. J The effects of SAC alloy composition on aging resistance and reliability. In: 59th Electronic Components and Technology Conference, 2009, San Diego. **Proceedings** [...] San Diego: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. p. 370-389.

ZHOU, Z.; CHEN, J.; YU C.; WANG Y.; ZHANG Y. Failure analysis of printed circuit board solder joint under thermal shock. **Coatings**; v. 13, n. 3, p. 572, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13030572>.

Contribuições dos autores

de Morais WA contribuiu com a concepção, análise, interpretação dos dados e redação do artigo.

Editor-chefe

José Claudio Garcia Lira Neto

Copyright © 2023 Revista Científica Integrada.

Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença Creative Commons CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original. É a licença mais flexível de todas as licenças disponíveis. É recomendada para maximizar a disseminação e uso dos materiais licenciados.