

Visão Geral da Confiabilidade do Empacotamento CBGA de Componente Eletrônico Submetido à Ciclagem Térmica

Alirio Cavalcanti de Brito

Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE
São José dos Campos, Brasil
alirio.brito@inpe.br

Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE
São José dos Campos, Brasil
marcelo@dem.inpe.br

Resumo- A complexidade crescente dos empacotamentos de componentes eletrônicos empregados em sistemas eletrônicos aeroespaciais, automotivos, etc., requer o desenvolvimento de novos métodos de análise e de predição da confiabilidade. Particularmente, o empacotamento do tipo *Ceramic Ball Grid Array* (CBGA) de componentes eletrônicos possui muitas variáveis (parâmetros de projeto) que influenciam a confiabilidade do componente. Este artigo apresenta uma visão geral da confiabilidade do empacotamento CBGA de componentes eletrônicos submetidos à ciclagem térmica. Para isto, o artigo discute o emprego de métodos como o Projeto de Experimentos (*Design of Experiments- DOE*) e da Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (*Partial Least Squares-PLS*). A técnica de Regressão PLS é um método estatístico de estudo das relações entre as variáveis respostas (observadas) e as variáveis influentes (latentes). O PLS apresenta ainda, a vantagem de reduzir o efeito indesejado da multicolinearidade presente na maioria dos modelos de regressão. O artigo espera demonstrar que tais métodos são adequados para tal análise e podem ser empregados para outros tipos de empacotamento complexos de componentes eletrônicos.

Palavras-chave—confiabilidade, CBGA, projeto de experimentos, PLS

Abstract- The increasing complexity of packages of electronic components used in aerospace, automotive, etc., electronic systems requires the development of new reliability analysis and prediction methods. Particularly, the Ceramic Ball Grid Array (CBGA) packaging type of electronic components has many variables (design parameters) that influence the reliability of the component. This paper presents an overview of the reliability of CBGA packaging of electronic components submitted to thermal cycling. For this purpose, it discusses the application of methods such as Design of Experiments (DOE) and Partial Least Squares Regression (PLS). The PLS Regression is a statistical method to study the relationships between the response variables (observed) and the influential variables (latent). The PLS also has the advantage of reducing the undesired effect of multicollinearity presents in most regression models. The paper expects to demonstrate that such methods are suitable for such analysis and can be used for other complex packaging types of electronic components.

Keywords—reliability, CBGA, design of experiments, PLS

I. INTRODUÇÃO

Segundo Lau [1] em 1989 a Motorola e a Citizen desenvolveram, conjuntamente, o empacotamento *Ball Grid Array* (BGA) em corpo feito de material plástico. Logo em seguida, a própria Motorola com a IBM, seguindo uma abordagem similar desenvolveram o BGA em corpo cerâmico que daqui por diante neste artigo será designado como *Ceramic Ball Grid Array* (CBGA). Está fora do escopo deste artigo apresentar as vantagens e as desvantagens do CBGA. Em aplicações de alta confiabilidade, o CBGA além de possuir as vantagens do BGA em corpo plástico, tem ainda, as características de hermeticidade e de boa dissipação térmica.

Existem diferentes versões de BGA em corpo plástico e em cerâmico. Neste artigo será tratado somente as versões em corpo cerâmico por apresentar melhores características sob ponto de vista da confiabilidade e da qualidade para aplicações nos setores que exigem alta confiabilidade. Mesmo o CBGA tem muitas versões sendo que o mais empregado é o que está mostrado na Fig. 1 e é o objeto de estudo no presente artigo.

As interconexões elétricas do CBGA dispostas na forma de uma matriz mostradas na Fig. 2 são constituídas de esferas de solda de uma determinada liga podendo ser, por exemplo, estanho chumbo ou liga sem chumbo (leadfree). Cada esfera de solda forma uma interconexão elétrica que sob ciclagem térmica apresenta um comportamento termomecânico que determinará a sua vida sob fadiga dada pelo número de ciclos térmicos para falhar.

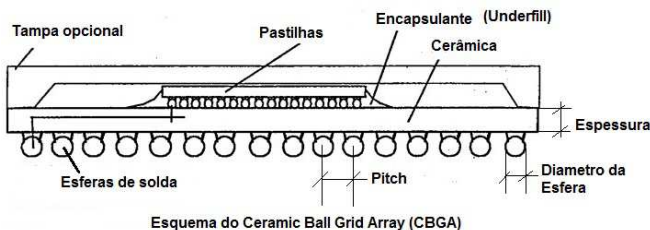


Figura 1. Esquema do Componente CBGA

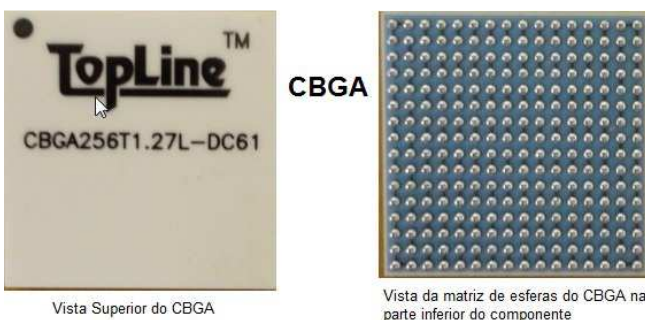


Figura 2. Vista superior e inferior de um CBGA

Este artigo apresenta uma visão geral da confiabilidade do empacotamento CBGA de componentes eletrônicos submetidos à ciclagem térmica seja durante a sua vida sob

fadiga ou sob teste acelerado de ciclagem térmica. O artigo também apresenta os parâmetros que mais influenciam na confiabilidade das juntas de solda obtidos por meio de Projeto de Experimentos e sugere o emprego da técnica de Regressão pelo Método dos Mínimos Quadrados Parciais conhecido por *Partial Least Squares* (PLS) como o método de predição do número de ciclos térmicos para falhar em testes acelerados de ciclagem térmica. Os testes acelerados de ciclagem térmica referem-se a situações onde o ambiente em que se encontra o empacotamento eletrônico é submetido a excursões de temperatura cíclicas e tem a finalidade de avaliar a confiabilidade. Os testes acelerados de ciclagem térmica consistem de certo número de ciclos e cada ciclo com um tempo de permanência em alta temperatura, com uma rampa indo de alta para baixa temperatura, com um tempo de permanência em baixa temperatura, com uma rampa indo de baixa para alta temperatura até completar a quantidade de ciclos requerida. O empacotamento eletrônico é submetido a uma temperatura isotérmica entrando em equilíbrio com o ambiente durante os tempos de permanência de alto e de baixa temperatura. O descasamento dos coeficientes de expansão térmica CET entre o substrato e a Placa de Circuito Impresso (PCI) produz a deformação e a fadiga das juntas de solda no decorrer dos ciclos causando as falhas de interconexão nas juntas de solda.

II. DEFINIÇÕES

No presente contexto a definição de confiabilidade é aquela apresentada no documento da IPC-SM-785 [2] como sendo a capacidade de um produto funcionar sob certas condições e por um período estabelecido de tempo sem exceder um nível aceitável de falha.

Também definida no documento referido acima, a falha em junta de solda é o resultado de dano acumulado de fadiga por cisalhamento, um fenômeno conhecido por desgaste, produzido por descasamento cíclico de expansão térmica nos materiais envolvidos.

A falha na junta de solda é caracterizada tipicamente por uma fratura total não apresentando de fato uma desconexão elétrica e nem um expressivo aumento na sua resistência elétrica. Segundo, ainda, a IPC-SM-785, a junta de solda falha, eletricamente falando, se manifestando somente durante os transientes térmicos e mecânicos ou por distúrbios na forma de *spikes* de alta resistência ($\geq 300\Omega$) de curta duração ($\sim 1\mu\text{seg}$).

Durante as variações de temperatura as juntas de solda estão sujeitas a carregamento, não de tensão, mas de cisalhamento. No entanto, as fraturas superficiais das juntas fraturadas deslizam uma sobre as outras, produzindo as intermitências características de curta duração. Portanto, segundo Engelmaier [3] a definição prática de falha é a interrupção confirmada da continuidade elétrica ($\geq 300\Omega$) para períodos extremamente curtos, acontecendo quase exclusivamente durante as transições cíclicas.

A distribuição de Weibull de dois parâmetros é a distribuição usada para prever a vida em fadiga de juntas de solda em diferentes porcentagens da vida em fadiga:

$$F\%(N) = 1 - e^{-\left(\frac{N}{\alpha_w}\right)^\gamma} \quad (1)$$

Onde N é o número de ciclos de vida em fadiga, F%(N) é o percentual de itens falhos nos ciclos N, α_w é a vida característica de fadiga definida pela falha de 63,2% dos componentes, dado em número de ciclos e γ é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull. Esse parâmetro de forma varia com o tipo de empacotamento e com a qualidade da montagem. Os valores de γ entre 4 e 11 são encontrados na literatura para o CBGA.

III. PARÂMETROS DE PROJETO QUE INFLUENCIAM NA CONFIABILIDADE DO CBGA

De acordo com a IPC-SM-785, existem 9 parâmetros de projeto que influenciam primariamente ou têm efeitos de primeira ordem na confiabilidade de fixação feita por liga de solda. São eles:

- a) Tamanho do componente: o tamanho físico do componente determina a quantidade de deslocamento que uma junta de solda experimenta durante a expansão e a contração da solda. Quanto maior o componente maior é a ameaça a confiabilidade.
- b) Tipo de fixação: componente com terminal ou sem terminal determina o máximo nível de estresse imposto à junta de solda durante a ciclagem térmica.
- c) Altura da junta de solda: ela determina o nível de tensão experimentada pela junta de solda para um dado deslocamento do componente e do substrato.
- d) Área da junta de solda: a área determina as tensões numa junta de solda, resultado do deslocamento de um dado componente/substrato.
- e) Rigidez do terminal: a rigidez do terminal determina as forças resultantes de um dado deslocamento componente/substrato. Por causa das juntas de solda nos cantos dos componentes sofrerem o maior deslocamento, pois estes estão na diagonal que passa pelo centro do componente, fica sendo a rigidez nessa direção da diagonal a mais preocupante. Menor rigidez dos terminais resulta em maior confiabilidade.
- f) Coeficiente de Expansão Térmica (CET): o CET determina a variação na dimensão linear de um material devido à variação na temperatura. Componentes e substratos são feitos de uma variedade de materiais tendo todos diferentes CETs.
- g) Descasamento de CETs: o descasamento do CET ($\Delta\alpha$) é a diferença entre os CETs dos dois materiais unidos; na maioria dos casos é o descasamento do CET entre o componente e o substrato o mais importante e o menos importante é o descasamento do CET entre a solda e os materiais com os quais estão unidos.
- h) Variação cíclica de temperatura: a variação cíclica de temperatura (ΔT) de componentes e substrato é a diferença entre o máximo e o mínimo de temperatura estacionária em que são submetidos, diariamente, durante as variações de temperatura impostas

externamente ou impostas operacionalmente (liga/desliga, flutuações de carga, etc.). A variação tratada aqui não é a mesma da variação de temperatura do substrato devido à dissipação de potência nos dispositivos ativos.

- i) Descasamento de expansão cíclica: o descasamento de expansão cíclica ($\Delta\alpha \Delta T_e$) resulta da diferença na expansão térmica dos componentes e substrato que são determinados pelos respectivos CETs e variações cíclicas de temperaturas (ΔT). Descasamentos menores de expansão resultam em melhoria na confiabilidade.

A IPC-SM-785 também estabelece 7 parâmetros de projeto que apresentam efeitos secundários (de segunda ordem) de importância. A contribuição de seus efeitos pode ser importante em algumas situações. O efeito de alguns desses parâmetros de segunda ordem pode ser diferente em testes acelerados e em uso operacional.

Os parâmetros de projeto tendo efeitos de segunda ordem são os seguintes de acordo com a IPC-SM-785:

- j) Descasamento do CET entre a solda e o material-base: o descasamento CET ($\Delta\alpha$) entre a solda e alguns materiais base (cerâmica, Liga 42, Kovar, silício) pode contribuir para o dano cíclico de fadiga.
- k) Formato/Filete/Volume da Junta de Solda-evidências experimentais indicam que o formato, o filete e o volume da junta de solda podem afetar a confiabilidade. Segundo a IPC-SM-785 em alguns testes de vida altamente acelerados foram obtidas melhorias na confiabilidade, mas não ficou claro se essas melhorias prevaleceriam na maioria das operações em condições menos severas de teste. A melhoria resulta do tempo necessário para propagação da trinca através do filete.
- l) Uniformidade na Junta de solda: alguns experimentos em que as juntas de solda foram carregadas inicialmente com fatores altamente estressantes mostraram necessidades de se obter extrema uniformidade de todas as juntas de solda do componente para se evitar tensões desiguais; já com testes acelerados, utilizando-se condições de teste próximas das condições de uso do produto real, não necessitaram de muita uniformidade nas juntas de solda.
- m) Estrutura inicial do grão da junta de solda: uma estrutura fina de grãos nas juntas de solda resulta numa melhoria na vida cíclica de aproximadamente duas vezes em testes altamente acelerados. A estrutura de grãos da solda é inerentemente instável e cresce com o tempo. Temperaturas elevadas e grandes carregamentos cíclicos aceleram o crescimento de grãos. Portanto, para a maioria das aplicações do produto, uma estrutura inicial fina de grãos não resultará numa melhoria significativa da vida em fadiga. As juntas de solda em espécimes de teste acelerado devem ser artificialmente envelhecidas para iniciar os testes com a estrutura dos grãos mais relacionada ao produto.
- n) *Conformal coating* ou cobertura conforme: o material do *conformal coating* pode agir de várias

maneiras e ter diferentes efeitos durante a ciclagem térmica. A vantagem do *conformal coating* é que ele diminui a absorção de água e oxigênio nas superfícies das trincas. A presença de óxidos nas superfícies das trincas pode acelerar a sua propagação. A desvantagem é que ele pode adicionar outro material com muito alto CET que poderia influenciar na confiabilidade. Esta adição pode ser muito significativa se o material do *conformal coating* escorregar para debaixo do componente, preenchendo o espaço existente entre a PCI e o componente. Por causa da grande variação nas propriedades, na espessura aplicada e no método de aplicação do material do *conformal coating*, o seu efeito, em geral, deve ser avaliado empiricamente para cada aplicação.

- o) Camadas acomodantes superficiais de substrato: camadas acomodantes em superfícies de substratos podem fornecer margens adicionais de confiabilidade, mas por outro lado elas não são adequadas para agir contra os efeitos de grandes descasamentos de expansão térmica.
- p) Composição da solda: as composições de solda mais conhecidas são ligas eutéticas e variantes da liga de solda SnPb. Outras composições de solda tanto de SnPb quanto *leadfree* podem apresentar maior ou menor confiabilidade quanto à fadiga, necessitando de serem melhores caracterizadas.

IV. PREDIÇÃO DA CONFIABILIDADE EM NÚMEROS DE CICLOS PARA FALHAR

A necessidade de avaliar a confiabilidade de empacotamentos de componentes contendo matriz de esferas em substratos cerâmicos (CBGA) e em substratos plásticos *Plastic Ball Grid Array* (PBGA) em ambientes agressivos, tais como o espacial e o militar, permanece, enquanto que a tecnologia de circuitos integrados está sempre a exigir maiores tamanhos de substratos, maior densidade de interconexão e maior complexidade geométrica e de propriedades de materiais. Estes fatores tornam cada vez mais difícil o desenvolvimento de equações preditivas para confiabilidade das interconexões.

Modelos analíticos são normalmente rápidos e fáceis de serem implementados e usados, mas não são capazes de capturar geometrias e comportamentos complexos dos materiais envolvidos. Normalmente necessitam mais que uma compreensão básica dos mecanismos. Geralmente desprezam a flexão da placa e o comportamento da solda quanto à fluência, sendo esta característica dependente do tempo.

Os modelos numéricos são normalmente usados quando o comportamento e a geometria dos materiais e/ou as condições de carregamento são complexos. No entanto, eles requerem conhecimento em representação geométrica e discretização de elementos, modelos de materiais, aplicação de condições de contorno e de carregamento, singularidades, critério de convergência, etc. De acordo com Perkins [4], os modelos criados por diferentes pesquisadores quase sempre produzem resultados bem diferentes.

Para solucionar estes problemas, Hariharan [5] empregou técnica de regressão linear múltipla (RLM) para montagem do modelo de predição de confiabilidade do empacotamento CBGA. Ele demonstrou a convergência de modelos estatísticos usando estudos de projetos experimentais para cada um dos parâmetros de projeto do CBGA com dados experimentais.

Apesar de Hariharan ter obtido a adequação do modelo de predição por meio do teste de hipótese com valores de p menores de 0,05 significando a rejeição da hipótese nula, isto é, que pelo menos um parâmetro preditor contribui, significativamente, com o coeficiente de determinação de $R^2=92\%$ da predição do número de ciclos para falhar. No entanto, eles indicam um alto fator de inflação de variância conhecido como *Variance Inflation Factor* (VIF). O VIF elevado indica quanto a variância de um parâmetro ou de uma variável preditora foi elevada ou inflacionada devido à correlação ou a colinearidade existente entre as variáveis predictoras do modelo. Para que não haja colinearidade é preciso que o VIF seja ≤ 1 , do contrário os preditores poderão estar correlacionados. O VIF para cada parâmetro no modelo mede o efeito combinado das dependências entre os regressores na variância daquele termo. Montgomery [6] ressalta que se um VIF estiver na faixa de 5 a 10, os coeficientes de regressão serão estimados incorretamente.

Para solucionar este problema este artigo emprega a técnica de Regressão dos Mínimos Quadrados Parciais (Partial Least Square-PLS) desenvolvida por Herman Wold nos anos 60 e que difere da técnica de RLM, não considerando os preditores fixos. Isto significa que os preditores podem ser medidos com erros, tornando o PLS mais robusto para medidas com incertezas. De acordo com Tobias [8], a técnica RLM poderia ser usada com muitos fatores (preditores). No entanto, se a quantidade de fatores começa a crescer (por exemplo, ficando maior que a quantidade de observações) provavelmente o modelo se ajustará perfeitamente aos dados amostrados, mas irá falhar nas predições de novos dados. Este fenômeno é conhecido como *over-fitting*. Outra característica do PLS que o distingue das demais técnicas de regressão é que ele não testa se os preditores individualmente são significantes. Em vez disso, o PLS calcula uma combinação linear de todos os preditores (também conhecidos como componentes) que descreve a máxima correlação entre os preditores e as variáveis respostas.

Depois que os componentes são calculados, eles são empregados para calcular os coeficientes típicos e os padronizados dos preditores originais. Os preditores que tiverem os maiores coeficientes positivos padronizados têm os maiores impactos positivos na resposta. Os coeficientes obtidos poderão ser usados para calcular os valores ajustados para um dado preditor.

A técnica de Regressão PLS é similar à técnica de Regressão dos Componentes Principais onde a matriz de preditores é usada para encontrar os componentes principais e estes são correlacionados com a resposta da predição. Apesar de esses componentes serem escolhidos para explicar os preditores em vez da resposta, não há garantia deles serem relevantes para a resposta. Para evitar este tipo de problema, o PLS calcula

componentes dos preditores que também são relevantes para a resposta, procurando, simultaneamente, nos dois conjuntos; o de preditores e o de respostas.

A técnica de Regressão PLS é especialmente útil quando os preditores estão altamente correlacionados ou quando se tem mais preditores do que observações e, ainda quando regressões que usam mínimos quadrados comuns falham ou produzem coeficientes com altos erros padrões. Em vez de reduzir o número de preditores, PLS foca em achar um conjunto de componentes ortogonais e realiza a regressão com mínimos quadrados com esses componentes. A ênfase no PLS está no desenvolvimento de modelos preditivos. PLS não é útil em remover preditores que não ajudam na explicação da variável resposta.

V. METODOLOGIA EMPREGADA

Parâmetros de Projeto que influenciam na Confiabilidade do CBGA

Inicialmente foram identificados os parâmetros (fatores) que influenciam na confiabilidade (ou vida média) do empacotamento CBGA seguindo orientação da IPC-SM-785. Os parâmetros estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de Projeto do Encapsulamento de CBGA

	Parâmetros de Projeto	Faixa de Variação dos Parâmetros
1	Comprimento da pastilha*	4 a 42 mm
2	Largura da pastilha*	16 a 42 mm
3	Área do empacotamento*	64 a 1764 mm ²
4	Comprimento da diagonal do componente (CompDia)	16,5 a 59,4 mm
5	Quantidade das esferas de solda (ContEsf)	64 a 1657
6	Pitch das esferas*	1 a 1,27 mm
7	Diâmetro das esferas de solda	0,508 a 0,890 mm
8	Composição da liga de solda*	SnPbAg e SnAgCu
9	Módulo de Elasticidade da Solda*	31,6 a 38 GPa
10	CTE da liga de Solda (CET/Sol)	17,6 a 25,5 ppm/°C
11	CET do substrato cerâmico (CET/Cer)	6,8 a 12,3 ppm/°C
12	Módulo de Elasticidade do <i>underfill</i> (ModE/U)	2,6 a 8,5 GPa e zero para ausência de
13	CET do <i>underfill</i> (CET/Und)	26 a 75 ppm/°C e zero para ausência de

	Parâmetros de Projeto	Faixa de Variação dos Parâmetros
14	Espessura do substrato cerâmico (EspSubst)	0,635 a 2,9 mm
15	Espessura da PCI (EspPCI)	1,27 a 2,8 mm
16	Faixa de Temperatura (ΔT)	100 a 165°C

Esse conjunto inclui todas as seguintes propriedades geométricas dos materiais e das condições de ciclagem térmica, a saber:

- Comprimento e largura da pastilha;
- Tamanho da diagonal;
- Área do empacotamento;
- A quantidade, o diâmetro, o módulo de elasticidade da solda e o CET das esferas de solda;
- Módulo de elasticidade e o CET do material do *underfill*;
- Espessura da PCI;
- CET e a espessura do substrato cerâmico e,
- Perfil da ciclagem térmica.

Em seguida, foi realizado um projeto de experimento fatorial fracionado 2^k sendo de k fatores igual a 6, fornecendo 64 observações para obter os parâmetros de projeto do empacotamento do CBGA que mais influenciam na confiabilidade do empacotamento traduzidos em números de ciclos para falhar ($N_{50\%}$).

Cada observação constituiu-se num experimento realizado com componentes CBGA com os parâmetros variando de acordo com a Tabela 1. Os parâmetros indicados por um * não foram incluídos no projeto de experimentos.

Predição da Confiabilidade em Número de Ciclos para Falhar

Para o cálculo do número de ciclos para falhar foi feita uma comparação entre as técnicas de Regressão Linear Múltipla e a dos Mínimos Quadrados Parciais (PLS).

Inicialmente foi aplicada a técnica de Regressão RLM com as 95 observações e obtida a equação de regressão correspondente. Em seguida empregando esta equação, foi obtida uma nova observação com este modelo. As 95 observações estão listadas no Apêndice e foram extraídas de dados de testes acelerados de ciclagem térmica de Patel [7].

Novamente foi aplicada a técnica de Regressão RLM, desta vez com menos observações (15 observações) e assim, uma nova observação foi obtida.

O mesmo procedimento foi feito com a técnica de Regressão PLS, com a exceção que foi empregada somente 15 observações extraídas do mesmo conjunto de dados de observações empregado anteriormente. (veja APENDICE).

Finalmente, os dois resultados foram comparados com relação aos valores obtidos e à robustez das técnicas de regressão analisadas.

VI. RESULTADOS

Parâmetros de Projeto que influenciam na Confiabilidade do CBGA

Os resultados do projeto de experimentos foram obtidos por meio do aplicativo Minitab versão 16. O gráfico da Figura 3 indica os parâmetros significantes D, G e B que mais influenciam na resposta $N_{50\%}$ sendo o parâmetro D (CET da cerâmica) o mais influente deles. Quanto mais afastado o parâmetro da reta mais influente ele o é, sendo positivamente influente para o lado direito da reta e negativamente influente para o lado esquerdo da mesma reta. Em seguida aparece o B (espessura do substrato) (pois está mais próximo da reta) sendo que ele influencia no sentido inverso, ou seja, aumentando a espessura do substrato a confiabilidade diminui e, por último o parâmetro G (módulo de elasticidade do *underfill*) que aparece do lado direito da reta influenciando de modo positivo, ou seja, quanto maior o módulo de elasticidade do *underfill* maior é a confiabilidade. Os demais parâmetros considerados no projeto têm pouca influência.

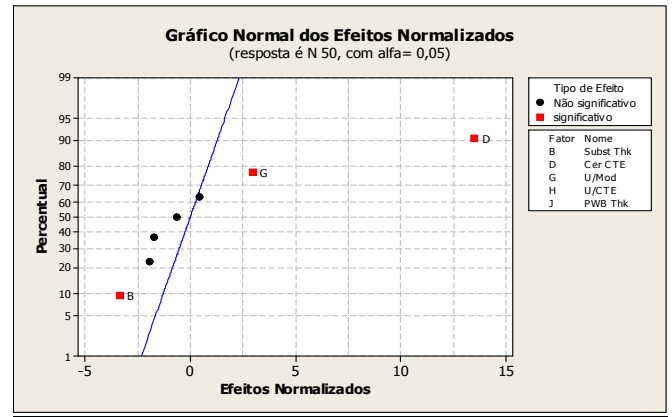


Figura 3. Gráfico Normal dos Efeitos Normalizados

O gráfico da Figura 4 (Gráfico de Pareto) é outra forma de mostrar os parâmetros mais influentes. Os parâmetros abaixo da linha de Lenth de 1,99 não têm significância estatística.

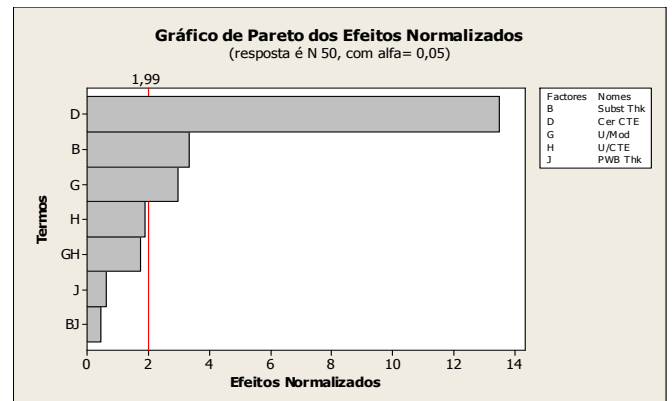


Figura 4. Gráfico de Pareto dos Efeitos Normalizados

O gráfico da Figura 5 mostra os principais efeitos no número de ciclos para falhar ($N_{50\%}$) em função dos parâmetros do projeto de experimento. A inclinação das retas informa o grau de influência sobre a resposta $N_{50\%}$. Quanto maior a inclinação maior será a influência. Portanto, observando-se a Figura 5 pode-se concluir que a confiabilidade aumenta com o aumento dos seguintes parâmetros:

- 1) Coeficiente de Expansão Térmica (CET) do substrato cerâmico aumentando de 6,8 para 12,3 ppm/°C aumenta a confiabilidade da montagem;
- 2) CET da solda aumentando de 17,5 para 25,5 ppm/°C aumenta a confiabilidade da montagem;
- 3) Módulo de Elasticidade do material do *underfill* aumentando de 0 para 8,5 ou seja, a presença de *underfill* aumenta a confiabilidade da montagem significativamente;
- 4) CET do material do *underfill* aumentando de 0 a 75 ppm/°C aumenta levemente a confiabilidade da montagem;
- 5) Espessura da PCI onde está montado o componente aumentando de 1,27 para 2,8 mm aumenta levemente a confiabilidade da montagem.

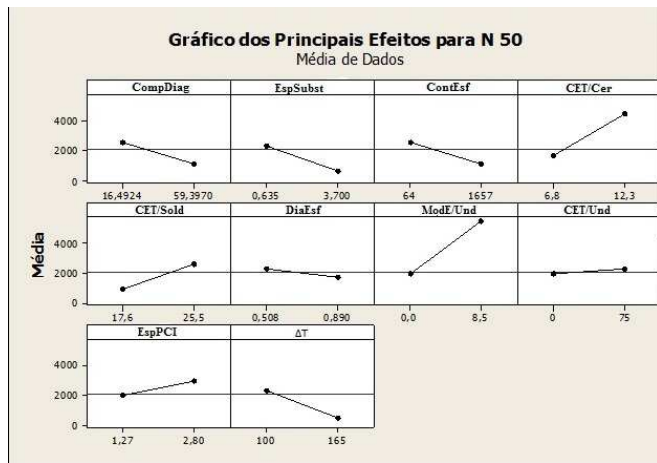


Figura 5. Gráfico dos Principais Efeitos para $N_{50\%}$

Do mesmo modo, pode-se observar que a confiabilidade da montagem diminui com o aumento dos seguintes parâmetros:

- 1) Comprimento da diagonal do componente aumentando de 16,50 para 59,40 mm diminui a confiabilidade da montagem. Em outras palavras, componentes com alta contagem de entradas e saídas (I/Os) têm confiabilidades menores comparados com os de baixas contagens, pois necessitam de mais área para instalação de terminais ou esferas de solda;
- 2) Espessura do substrato cerâmico aumentando de 0,635 para 3,7 mm diminui a confiabilidade da montagem;
- 3) Contagem de esferas de solda aumentando de 64 para 1657 esferas de solda diminui a confiabilidade da montagem;
- 4) Diâmetro das esferas de solda aumentando de 0,508 para 0,890 mm diminui a confiabilidade da montagem;
- 5) Faixa de temperatura (ΔT) do teste acelerado de ciclagem térmica aumentando de 100°C para 165°C, diminui a confiabilidade ou o tempo de vida em fadiga termomecânica enquanto estando em teste acelerado.

Predição da Confiabilidade em Número de Ciclos para Falhar

A equação de regressão obtida com a técnica de Regressão RLM por meio de 95 observações para predição do número ($N_{50\%}$) de ciclos para falhar é apresentada na Equação 2:

$$(RLM - 95)^1 \rightarrow N_{50\%} = -1694,9 - 71,06 \times \text{CompDiag} - 582,87 \times \text{EspSubst} + 1,6131 \times \text{ContEsf} + 478,96 \times \text{CET/Cer} + 125,86 \times \text{CET/Sold} + 2594,6 \times \text{DiaEsf} + 547,33 \times \text{ModE/Und} - 19,697 \times \text{CET/Und} - 245,4 \times \text{EspPCI} - 16,458 \times \Delta T \quad (2)$$

Esta técnica de regressão apresentou colinearidade nos seguintes parâmetros com valores de $VIF \geq 1$ apresentado na Tabela 2. Os valores de t na Tabela 2 são maiores em valores absolutos que 0,05, portanto, pode-se dizer que os preditores são significantes com 95% de confiança.

Tabela 2. Resultados da Técnica de Regressão RLM

Preditor	(1) Coef	(2) Erro Padrão do Coef	(3) Valores de t	(4) Valores de p	(5) VIF
Constante	-1694,9	766,6	-2,21	0,030
CompDia	-71,06	18,00	-3,95	0,000	(10,78)
EspSubst	-582,87	64,32	-9,06	0,000	(1,63)
ContEsf	1,6131	0,42	3,76	0,000	(6,96)
CET/Cer	478,96	27,2	17,61	0,000	(1,31)
CET/Sol	125,86	20,09	6,26	0,000	(2,26)
DiaEsf	2594,2	784,7	3,31	0,001	(2,86)
ModE/Und	547,33	65,26	8,39	0,000	(2,57)
CET/Und	-19,697	7,798	-2,53	0,013	(2,57)
EspPCI	-245,4	116,6	-2,11	0,038	(1,19)
ΔT	-16,458	2,240	-7,35	0,000	(1,18)

A equação de regressão obtida com a técnica RLM empregando somente 15 das 95 observações para predição do número ($N_{50\%}$) de ciclos para falhar é apresentada na Equação 3:

$$(RLM - 15/95) \rightarrow N_{50\%} = 35520 - 765,117 \times \text{CompDiag} - 571,786 \times \text{EspSubst} + 2,20942 \times \text{ContEsf} - 343,297 \times \text{CET/Cer} + 2108,33 \times \text{DiaEsf} - 151,22 \times \text{ModE/Und} - 114,634 \times \text{CET/Und} - 543,699 \times \text{EspPCI} \quad (3)$$

As 15 observações foram extraídas da Tabela do Apêndice (Observações 9 a 11, 29 a 32, 37 a 39, 49, 55, 61, 64, 67).

A equação de regressão obtida com a técnica PLS empregando somente 15 das 95 observações para predição do número ($N_{50\%}$) de ciclos para falhar é apresentada na Equação 4:

$$(PLS - 15/95) \rightarrow N_{50\%} = -5704,80 - 77,05 \times \text{CompDiag} - 801,70 \times \text{EspSubst} - 1,69 \times \text{ContEsf} + 265,34 \times \text{CET/Cer} + 172,19 \times \text{CET/Sold} - 1231,74 \times \text{DiaEsf} + 178,31 \times \text{ModE/Und} - 28,19 \times \text{CET/Und} - 243,10 \times \text{EspPCI} - 20,93 \times \Delta T \quad (4)$$

Para avaliar e comparar as duas técnicas de regressão foi empregado o aplicativo Minitab para encontrar os valores do número de ciclos de falhas dados pelas equações de regressão RLM e PLS para os seguintes parâmetros de projeto apresentado na Tabela 3.

¹ Equação de Regressão Linear Múltipla empregando 95 observações.

Tabela 3. Valores dos Preditores para Estudo de Comparação das Técnicas de Regressão RLM e PLS

Preditores	Valores
CompDia	35,35 mm
EspSubst	0,8 mm
ContEsf	361
CET/Cer	12,3 ppm/°C
CET/Sol	25,5 ppm/°C
DiaEsf	0,89 mm
ModE/Und	0
CTE/Und	0
EspPCI	1,57 mm
ΔT	100°C

Para os parâmetros de projeto da Tabela 3 o valor de $N_{50\%}$ apresentado na Tabela do Apêndice é de 5993 ciclos (Observação 32).

Tabela 4. Tabela Comparativa entre as Técnicas de Regressão RLM e PLS

Téc. Regressão	Equação de Regressão	Parâmetros/fatores empregados	R^2 (pred)	$N_{50\%}$
RLM	(3)	10/10	* %	5609,5
PLS	(4)	3/10	79,18%	5812,13

Os valores apresentados na Tabela 4 confirmam que o desempenho apresentado pela técnica de Regressão PLS, empregando somente 3 parâmetros dos 10 disponíveis, forneceu resultado mais próximo da observação 32, comparado com a técnica de Regressão RLM.

Um valor de R^2 predito de aproximadamente 80% indica que com o modelo desenvolvido com a Técnica de Regressão PLS foi possível encontrar um ajuste com os dados, diferentemente com a técnica de Regressão RLM, mesmo empregando os 10 preditores.

VII. RESUMO/CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma visão geral da confiabilidade do empacotamento do CBGA de componentes eletrônicos no que diz respeito aos parâmetros de projeto que influenciam na sua vida em fadiga. O artigo, ainda apresentou um resumo do documento IPC-SM-785 que trata dos parâmetros de projeto que têm efeitos de primeira e segunda ordem na confiabilidade. Para o caso particular do empacotamento CBGA, o artigo discutiu o emprego do Projeto de Experimentos para identificar com mais refinamento os parâmetros que mais influenciam e de que forma influenciam na confiabilidade do empacotamento CBGA, dado em número de ciclos para falhar. Por último, o artigo mostrou que a Técnica de Regressão utilizando os mínimos quadrados parciais, conhecido por PLS, é uma técnica interessante para casos quando se têm muitos preditores ou parâmetros preditores e limitado em poucas observações ou experimentos.

REFERÊNCIAS

- [1] Lau, JH. 1995. "Ball Grid Array Technology." *Ball Grid Array Technology*: 363. <http://www.getcited.org/pub/103202794>.
- [2] Association Connecting Electronics Industries. 1992. "Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments-IPC-SM-785". Bannockburn, IL.
- [3] Engelmaier, W., Attarwala. 1989. "Surface-mount Attachment Reliability of Clip-leded Ceramic Chip Carriers on FR-4 Circuit Boards." *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology* 12 (2) (June): 284–296. doi:10.1109/33.31435. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=31435>.
- [4] Perkins, Andy, and SK Sitaraman. 2007. "Universal Fatigue Life Prediction Equation for Ceramic Ball Grid Array (CBGA) Packages." *Microelectronics Reliability* 47 (12) (December): 2260–2274. doi:10.1016/j.microrel.2006.12.004. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271407000066>.
- [5] Hariharan, G. 2007. "Models for Thermo-mechanical Reliability Trade-offs for Ball Grid Array and Flip Chip Packages in Extreme Environments." <http://etd.auburn.edu/etd/handle/10415/820>.
- [6] Montgomery, DC, EA Peck, and GG Vining. 2012. *Introduction to Linear Regression Analysis*. <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=0yR4KUL4VDkC&oi=fnd&pg=PR13&dq=Introduction+to+Linear+Regression+Analysis&ots=p3qoElhRDj&sig=CxxcBfcwMEtLwxY5iCAsdZsJjs0>.
- [7] Patel, K. 2009. "CBGA model validation.xls". University of Auburn, Excel spreadsheet. <ftp://ftp.eng.auburn.edu/pub/patelks/Data%20sets/>.

- [8] Tobias, R.D. 1995. "An Introduction to Partial Least Squares Regression." *Proc. Ann. SAS Users Group Int. Conf., 20th, ...*: 1250–1257.
<http://www.sascommunity.org/sugi/SUGI95/Sugi-95-210Tobias.pdf>.

VIII. DEFINIÇÕES/ABREVIATURAS

CBGA	Ceramic Ball Grid Array
CET/Sold	Coefficiente de expansão térmica da liga de solda
CET/und	Coefficiente de expansão térmica do material do <i>underfill</i>
CompDiag	Comprimento da diagonal
ContEsf	Contagem de esferas de solda
Conformal Coating	Material empregado para proteção de componentes eletrônicos em PCIs.
CET/Cer	Coefficiente de expansão térmica do substrato cerâmico
DiaEsf	Diâmetro da esfera de solda
ΔT	Faixa de temperatura do teste de ciclagem térmica.
Eutética	Composição ou liga eutética
EspPCI	Espessura da Placa de Circuito Impresso.
PCI	Placa de Circuito Impresso
RLM	Regressão Linear Múltipla
SnPb	Liga de estanho e chumbo
SnAgCu	Liga de estanho prata e cobre
Pitch	Distância entre as esferas de solda no caso de componentes BGA.
Liga eutética	é uma mistura de compostos ou elementos químicos, inclusive metálicos em uma determinada proporção na qual o ponto de fusão é o mais baixo possível.

APÊNDICE

TABELA DE OBSERVAÇÕES DE $N_{50\%}$ OBTIDAS NOS TESTES ACELERADOS DE CICLAGEM TÉRMICA DE COMPONENTES CBGA²

Observ	CompDiag	EspSubst	ContEsf	CET/Cer	CET/Sold	DiaEsf	ModE/Und	CET/Und	EspPCI	AT	$N_{50\%}$
1	16,4924	0,635	64	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	3360
2	16,4924	0,635	64	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	1697
3	24,3311	0,635	96	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	2915
4	24,3311	0,635	96	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	1483
5	17,8885	0,635	104	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	2930
6	17,8885	0,635	104	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	1434
7	25,2982	0,635	192	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	2905
8	25,2982	0,635	192	6,8	25,5	0,508	0	0	1,57	105	1477
9	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	2,6	75	1,57	100	2320
10	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	5,6	44	1,57	100	5420
11	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	8,5	40	1,57	100	5440
12	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	5,5	26	1,57	100	6000
13	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	100	2490
14	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	100	2697
15	29,6985	1	256	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	165	1103
16	35,3553	0,8	256	6,8	25,5	0,89	0	0	1,27	165	1320
17	29,6985	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	1944
18	29,6985	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	712
19	29,6985	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	165	907
20	29,6985	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	165	819
21	29,6985	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	165	456
22	35,3553	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,27	100	1848
23	35,3553	1,2	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,27	100	2462
24	35,3553	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	2,8	100	1263
25	35,3553	2,9	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	1511
26	35,3553	0,8	361	6,8	25,5	0,89	0	0	2,8	100	2625
27	35,3553	0,8	361	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	3781
28	35,3553	2,9	361	12,3	25,5	0,89	0	0	2,8	100	3977
29	35,3553	2,9	361	12,3	25,5	0,89	0	0	1,57	100	4091
30	35,3553	2,9	361	12,3	25,5	0,8	0	0	1,57	100	4219
31	35,3553	0,8	361	12,3	25,5	0,89	0	0	2,8	100	4875
32	35,3553	0,8	361	12,3	25,5	0,89	0	0	1,57	100	5993
33	35,3553	2,9	552	6,8	25,5	0,8	0	0	2,8	100	1415
34	35,3553	2,9	552	6,8	25,5	0,8	0	0	1,57	100	1567
35	35,3553	0,8	552	6,8	25,5	0,8	0	0	2,8	100	2599
36	35,3553	0,8	552	6,8	25,5	0,8	0	0	1,57	100	3065
37	35,3553	2,9	552	12,3	25,5	0,8	0	0	2,8	100	4290
38	35,3553	0,8	552	12,3	25,5	0,8	0	0	2,8	100	4921
39	35,3553	0,8	552	12,3	25,5	0,8	0	0	1,57	100	5776
40	35,3553	1,65	552	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	165	540
41	35,3553	1,65	552	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	100	1870

² Os valores da presente tabela foram extraídos de bases de dados de testes acelerados de confiabilidade de componentes CBGA dos pesquisadores do *NSF Center for Advanced Vehicle Electronics (CAVE)* Universidade de Auburn nos EUA.

Observ	CompDiag	EspSubst	ContEsf	CET/Cer	CET/Sold	DiaEsf	ModE/Und	CET/Und	EspPCI	AT	N _{50%}
42	35,3553	1,65	552	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	100	2240
43	45,2548	0,8	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,27	100	2700
44	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1408
45	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1012
46	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	455
47	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1164
48	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	982
49	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	392
50	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1212
51	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1108
52	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	446
53	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1200
54	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1054
55	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	384
56	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1212
57	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	953
58	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	407
59	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1130
60	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	934
61	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	376
62	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1224
63	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1188
64	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	372
65	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1064
66	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	100	1012
67	45,2548	0,8	625	6,8	17,6	0,89	0	0	1,8	165	384
68	45,9619	2,9	625	6,8	25,5	0,89	0	0	2,8	100	1083
69	45,9619	2,9	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	1219
70	45,9619	0,8	625	6,8	25,5	0,89	0	0	2,8	100	2290
71	45,9619	0,8	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	2676
72	45,9619	2,9	625	12,3	25,5	0,89	0	0	2,8	100	3194
73	45,9619	2,9	625	12,3	25,5	0,89	0	0	1,57	100	3305
74	45,9619	0,8	625	12,3	25,5	0,89	0	0	2,8	100	3963
75	45,9619	0,8	625	12,3	25,5	0,89	0	0	1,57	100	5328
76	45,9619	2,9	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	514
77	45,9619	2,9	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	869
78	45,9619	2,9	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	1347
79	45,9619	2,9	625	6,8	25,5	0,89	0	0	1,57	100	1547
80	45,9619	2,4	625	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	165	260
81	45,9619	2,9	937	6,8	25,5	0,8	0	0	2,8	100	1259
82	45,9619	2,9	937	6,8	25,5	0,8	0	0	1,57	100	1375
83	45,9619	0,8	937	6,8	25,5	0,8	0	0	2,8	100	2302
84	45,9619	0,8	937	6,8	25,5	0,8	0	0	1,57	100	2654
85	45,9619	2,9	937	12,3	25,5	0,8	0	0	1,57	100	3474
86	45,9619	2,9	937	12,3	25,5	0,8	0	0	2,8	100	3754
87	45,9619	0,8	937	12,3	25,5	0,8	0	0	2,8	100	4304
88	45,9619	0,8	937	12,3	25,5	0,8	0	0	1,57	100	5374
89	45,9619	2,4	937	6,8	25,5	0,81	0	0	1,57	100	719
90	45,9619	2,4	937	6,8	25,5	0,81	0	0	1,8	100	740

Observ	CompDiag	EspSubst	ContEsf	CET/Cer	CET/Sold	DiaEsf	ModE/Und	CET/Und	EspPCI	AT	N _{50%}
91	45,9619	1,5	937	6,8	17,6	0,81	0	0	1,8	100	1860
92	45,9619	2,4	937	6,8	17,6	0,81	0	0	1,8	100	1310
93	59,397	1,5	1657	6,8	17,6	0,81	0	0	1,5	100	1628
94	59,397	2,55	1657	6,8	17,6	0,81	0	0	1,5	100	946
95	59,397	3,7	1657	6,8	17,6	0,81	0	0	1,5	100	653