

PREDIÇÃO DE VIDA DE JUNTAS DE SOLDA COM PROJETO DE EXPERIMENTOS

Alirio Cavalcanti de Brito¹

Marcelo Lopes de Oliveira e Souza²

Idécio Alexandre Palheta Cardoso³

^{1,2}Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE

Coordenadoria de Engenharia e Tecnologia Espaciais-ETE

São José dos Campos, SP, 12227-010

³INdT – Instituto Nokia de Tecnologia

Rod. Torquato Tapajós 7200, Tarumã, 69093-415, Manaus-AM-Brasil

alirio@dss.inpe.br, marcelolopes@dem.inpe.br, idelcio.cardoso@indt.org.br

Resumo: A predição de vida em fadiga de juntas de solda de componentes eletrônicos empregados em sistemas eletrônicos espaciais é uma ferramenta de suma importância para os projetistas escolherem corretamente o tipo de empacotamento que mais atende aos requisitos de confiabilidade da missão espacial. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo preditivo de vida em fadiga de junta de solda de componente eletrônico para o tipo Ball Grid Array (BGA), baseado em parâmetros de projeto empregando experimentos fatoriais com análises estatísticas. Na literatura técnica é possível encontrar simulações com elementos finitos em combinação com dados experimentais para prever a vida em fadiga de juntas de solda. Essas simulações frequentemente requerem uma boa compreensão do modelamento com elementos finitos, dos modelos de falha, baseados na física, no tempo, na temperatura, na direção de propagação da falha e são dependentes do comportamento constitutivo dos materiais envolvidos. Além disso, as simulações são realizadas por softwares caros e de longo tempo de processamento. O projetista do empacotamento, na prática, não tem o tempo e nem a experiência necessária para realizar tais simulações. Por essa razão, este trabalho tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento da obtenção de equações preditivas por meio de regressão linear múltipla empregando o software Minitab. O resultado obtido é uma equação preditiva polinomial para prever a vida em fadiga da junta de solda de um empacotamento feito de material cerâmico de um componente eletrônico do tipo BGA. A mesma metodologia pode ser aplicada para desenvolver equações similares para outros tipos de empacotamento de componentes.

Palavras-chaves: confiabilidade, projeto de experimentos, fadiga, juntas de solda, modelo de predição

1. Introdução

Este artigo apresenta um modelo preditivo de vida em fadiga térmica de juntas de solda de componentes eletrônicos soldados em superfície de placas de circuito impresso (PCI) representando o número de ciclos para a ocorrência da primeira falha na referida junta de solda. O modelo tratado aqui aplica-se somente nos componentes do tipo *Ceramic Ball Grid Array* (CBGA). A confiabilidade desses componentes é na prática ditada pelo número de ciclos para ocorrência da primeira falha na junta de solda. Essa falha se caracteriza desde uma pequena trinca até uma ruptura completa do sinal elétrico. Esse modelo é apresentado nos artigos de Perkins e Sitaraman (2004) e (2007). Nesses artigos são desenvolvidos modelos preditivos de vida em fadiga térmica de juntas de solda por meio de experimentos fatoriais (projetos de experimentos) a partir de parâmetros de projeto de empacotamento de componentes com pequena margem de erro de predição. A vantagem desse modelo é a simplicidade de seu uso por quem não domina simulações realizadas com elementos finitos. Esse mesmo modelo pode vir a ser adaptado e aplicado em outros tipos de empacotamento de componentes eletrônicos.

2. Objetivo

Apresentar um modelo preditivo de vida em fadiga de junta de solda para empacotamentos de componentes *Ceramic Ball Grid Array* (CBGA) considerando os parâmetros de projeto. O modelo é baseado na física de falha e em dados experimentais obtidos da literatura.

3. Método de Desenvolvimento do Modelo de Predição

Perkins e Sitaraman (2004) desenvolveram seus modelos em quatro passos:

1. Usando dados experimentais de ciclagem térmica acelerada (CTA). Uma equação do tipo não linear de Coffin- Manson (C-M) é empregada e relaciona a deformação inelástica com a vida em fadiga da junta de solda.
2. Estabelecendo cinco parâmetros de interesse para componentes CBGA empacotados em material cerâmico foram identificados juntamente com as suas faixas de variação:
 - A) Tamanho do substrato do componente CBGA (25 a 32,5 mm);
 - B) Descasamento do coeficiente de expansão térmica (CET) entre o substrato do componente CBGA e a placa de circuito impresso (PCI) (de 5,7 a 11,2 ppm/°C);
 - C) Espessura do substrato do componente CBGA (de 0,8 a 2,9 mm);
 - D) Espessura da PCI (de 1,57 a 2,8 mm);
 - E) Distância entre as esferas de solda conhecido como *pitch* (de 1,0 a 1,27 mm).
3. Realizando um projeto de experimentos para os cinco parâmetros estabelecidos no item 2. A deformação inelástica foi identificada, e a vida em fadiga foi calculada usando a Equação 1 do passo 1.
4. Realizando uma análise de variância (ANOVA) e uma análise de regressão linear para desenvolver uma equação polinomial entre a vida em fadiga e os parâmetros do projeto.

Tal equação preditiva polinomial possibilita aos projetistas com ou sem experiência em análise de elementos finitos (AEF), avaliar rapidamente os vários cenários do projeto do ponto de vista da vida em fadiga da junta de solda.

3.1 Primeiro Passo: Cálculo da Vida em Fadiga da Deformação Inelástica

Nesse primeiro passo é calculada a vida em fadiga da junta de solda devido a deformação inelástica. A Equação 1 é uma equação do tipo C-M que relaciona a faixa de deformação inelástica por ciclo, $\Delta\epsilon_{in}$, aos dados de vida de fadiga experimental. N_{50} é o número de ciclos para ocorrências de falhas em 50% das amostras baseado no critério de aumento de 300Ω ou em 10% do aumento da resistência elétrica monitorada durante os testes de ciclagem térmica.

$$N_{50} = 82,4(\Delta\epsilon_{in})^{-0,863} \quad (1)$$

O artigo de Perkins (2003) apresenta os detalhes de como as constantes na Equação 1 são encontradas. Essas constantes são aplicadas somente para a liga 63Sn37Pb. Elas não se aplicam para ligas de solda *lead-free*.

Os dados da Tabela 1 foram extraídos do artigo de Perkins e Sitaraman (2004) e apresenta quatro casos tirados de dados experimentais que foram simulados com análise de elementos finitos (AEF) e em seguida foi realizada uma análise de regressão para se obter as duas constantes da Equação 1.

Tabela 1. Dados de CBGA extraídos da Literatura

Tamanho do Substrato em mm	Fatores	mm	N_{50} Dado pela Equação 1	$\Delta\epsilon_{in}$ Dado por AEF
25 X 25 (Master, 1998)	Espessura do Substrato	2,9	1510	0,0344
	Espessura da PCI	1,57		
	Pitch	1,27		
32,5 X 32,5 (Master, 1998)	Espessura do Substrato	0,8	2679	0,0177
	Espessura da PCI	1,57		
	Pitch	1,27		
25 X 25 (Master, 1998)	Espessura do Substrato	2,9	4091	0,0119
	Espessura da PCI	1,57		
	Pitch	1,27		
25 X 25 com substrato de alto CET (Master, 2000)	Espessura do Substrato	0,8	5993	0,007
	Espessura da PCI	1,57		
	Pitch	1,27		

Fonte: Master (1998 e 2000) citado por Fonte: PERKINS E SITARAMAN (2004)

Embora a Equação 1 seja útil na predição da vida em fadiga das juntas de solda de componentes CBGA, ela requer que o usuário crie um modelo de elementos finitos para se determinar a deformação inelástica. Mesmo que o usuário fosse capaz de fazer uma análise de elementos finitos, a deformação inelástica obtida, normalmente, dependeria da densidade de malha, das propriedades do material usado e das considerações de modelagem. Portanto, há necessidade de se reformular a Equação 1 para diferentes formatos que não exija do usuário a realização de uma análise detalhada de elementos finitos e que ao mesmo tempo possa ser usada numa análise de projeto para vários cenários.

Neste trabalho são estudados os efeitos dos seguintes fatores: tamanho do substrato do componente (A), descasamento entre o coeficiente de expansão térmica CET do substrato cerâmico do componente e o da PCI (B), a espessura do substrato do componente (C), a espessura da PCI (D) e o espaçamento entre as esferas de solda, *pitch*, (E) sobre a vida em fadiga das juntas de solda.

Outros parâmetros podem ser incluídos, o da ciclagem térmica que são: a faixa de temperatura (ΔT) em graus Kelvin, a temperatura de pico (T_{peak}) em graus Kelvin, e a frequência (f) da ciclagem térmica em ciclos por hora (cph). Estes parâmetros são empregados na equação de Norris-Landzberg quando se deseja determinar o N_{50} (número de ciclos para 50% da população falhar) em ciclagem térmica acelerada com valores diferentes de ΔT , T_{peak} e frequência, obtidos anteriormente. Então, equação preditiva final será da seguinte forma:

$$N_{50} = g(A, B, C, D, E, \Delta T, T_{pico}, f) \quad (2)$$

Os três últimos parâmetros da Equação 2 serão tratados nesse presente trabalho na seção 5.

3.2 Segundo e Terceiro Passos – Realização do Projeto de Experimentos e Simulação com Elementos Finitos

Os dados da Tabela 2 foram extraídos do artigo de Perkins e Sitaraman (2004) e permitem a realização de um projeto de experimento completo com 2 níveis e 5 fatores fornecendo um total de $2^5 = 32$ experimentos e a Tabela 3 apresenta para cada fator a faixa de valores empregada nos experimentos. Para cada caso foi realizada uma simulação com elementos finitos. A deformação inelástica por ciclo foi determinada e N_{50} foi então encontrado, aplicando-se a Equação 1. Os valores de N_{50} são apresentados na última coluna da Tabela 2.

Tabela 2. Projeto de Experimentos com 5 fatores (A, B, C, D e E) e 2 níveis

Experi- mento	Tamanho do Substrato do Componente (A)	Descasamento do CET (B)	Espessura do Subst (C)	Espessura da PCI (D)	Pitch (E)	N ₅₀
1	25,0	5,7	0,8	1,57	1,00	5776
2	32,5	5,7	0,8	1,57	1,00	5374
3	25,0	11,2	0,8	1,57	1,00	3065
4	32,5	11,2	0,8	1,57	1,00	2654
5	25,0	5,7	2,9	1,57	1,00	4219
6	32,5	5,7	2,9	1,57	1,00	3474
7	25,0	11,2	2,9	1,57	1,00	1567
8	32,5	11,2	2,9	1,57	1,00	1375
9	25,0	5,7	0,8	2,80	1,00	4921
10	32,5	5,7	0,8	2,80	1,00	4304
11	25,0	11,2	0,8	2,80	1,00	2599
12	32,5	11,2	0,8	2,80	1,00	2302
13	25,0	5,7	2,9	2,80	1,00	4290
14	32,5	5,7	2,9	2,80	1,00	3754
15	25,0	11,2	2,9	2,80	1,00	1415
16	32,5	11,2	2,9	2,80	1,00	1259
17	25,0	5,7	0,8	1,57	1,27	5993
18	32,5	5,7	0,8	1,57	1,27	5328
19	25,0	11,2	0,8	1,57	1,27	3781
20	32,5	11,2	0,8	1,57	1,27	2676
21	25,0	5,7	2,9	1,57	1,27	4091
22	32,5	5,7	2,9	1,57	1,27	3305
23	25,0	11,2	2,9	1,57	1,27	1511
24	32,5	11,2	2,9	1,57	1,27	1219
25	25,0	5,7	0,8	2,80	1,27	4875
26	32,5	5,7	0,8	2,80	1,27	3963
27	25,0	11,2	0,8	2,80	1,27	2625
28	32,5	11,2	0,8	2,80	1,27	2290
29	25,0	5,7	2,9	2,80	1,27	3977
30	32,5	5,7	2,9	2,80	1,27	3194
31	25,0	11,2	2,9	2,80	1,27	1263
32	32,5	11,2	2,9	2,80	1,27	1083

Fonte: PERKINS E SITARAMAN (2004)

Tabela 3- Faixa de Variação dos Parâmetros de Projeto empregado neste estudo

Fator	Descrição do Parâmetro (Fator)	Faixa de Variação do Parâmetro
A	Tamanho do substrato do componente	25 a 32,5 mm
B	Descasamento do CET	5,7 a 11,2 ppm/K
C	Espessura do substrato do componente	0,8 a 2,9 mm
D	Espessura da PCI	1,57 a 2,8 mm
E	Espaçamento (<i>Pitch</i>) das esferas de solda	1,0 a 1,27 mm

3.3 Quarto Passo- Análise de Variância (ANOVA) e Regressão Linear

Uma análise de variância ANOVA ajuda a determinar os preditores e a combinação entre eles que têm efeito significativo na resposta. N_{50} é a resposta e os preditores são os fatores A, B, C, D e E referidos anteriormente. O aplicativo MINITAB foi usado para toda a análise de regressão apresentada neste trabalho.

A Figura 2 apresenta a representação gráfica da probabilidade normal dos efeitos padronizados com intervalo de confiança de 90%. Os preditores mais influentes são encontrados e estão na seguinte ordem de importância: B, C, A, D, CD, BCD. Os preditores mais afastados da reta são os mais influentes. Os demais não são considerados.

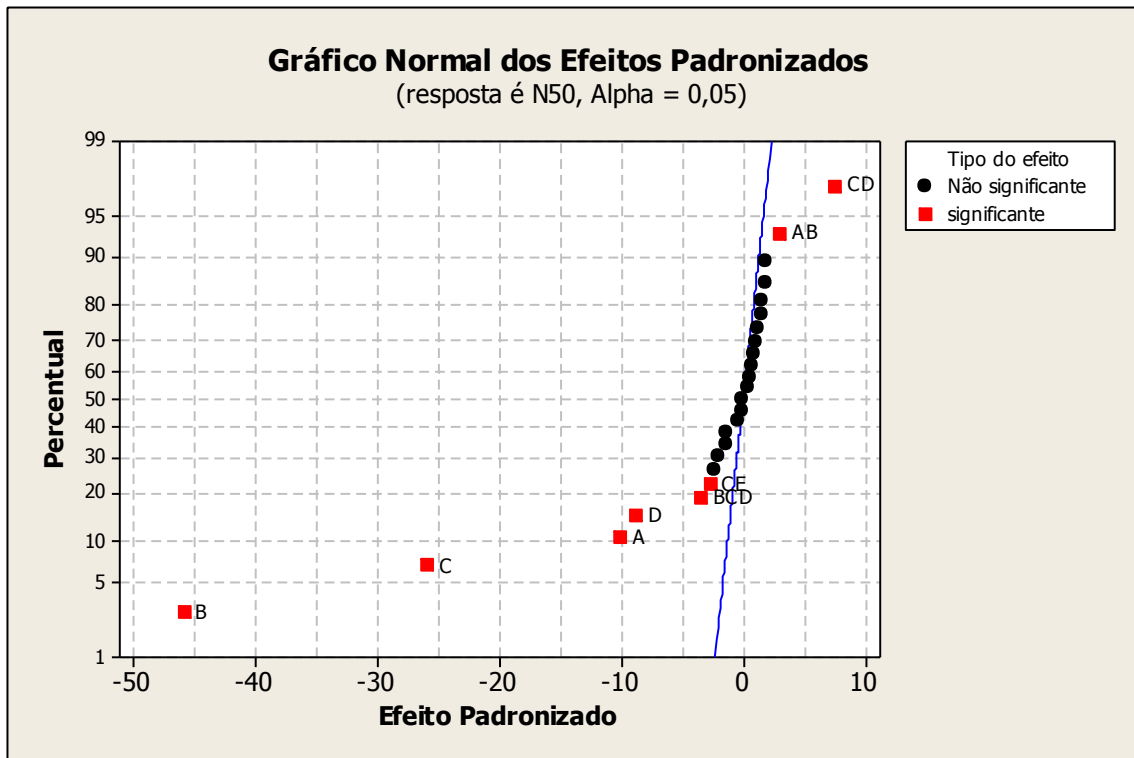


Figura 2- Gráfico de Probabilidade Normal dos Efeitos Padronizados

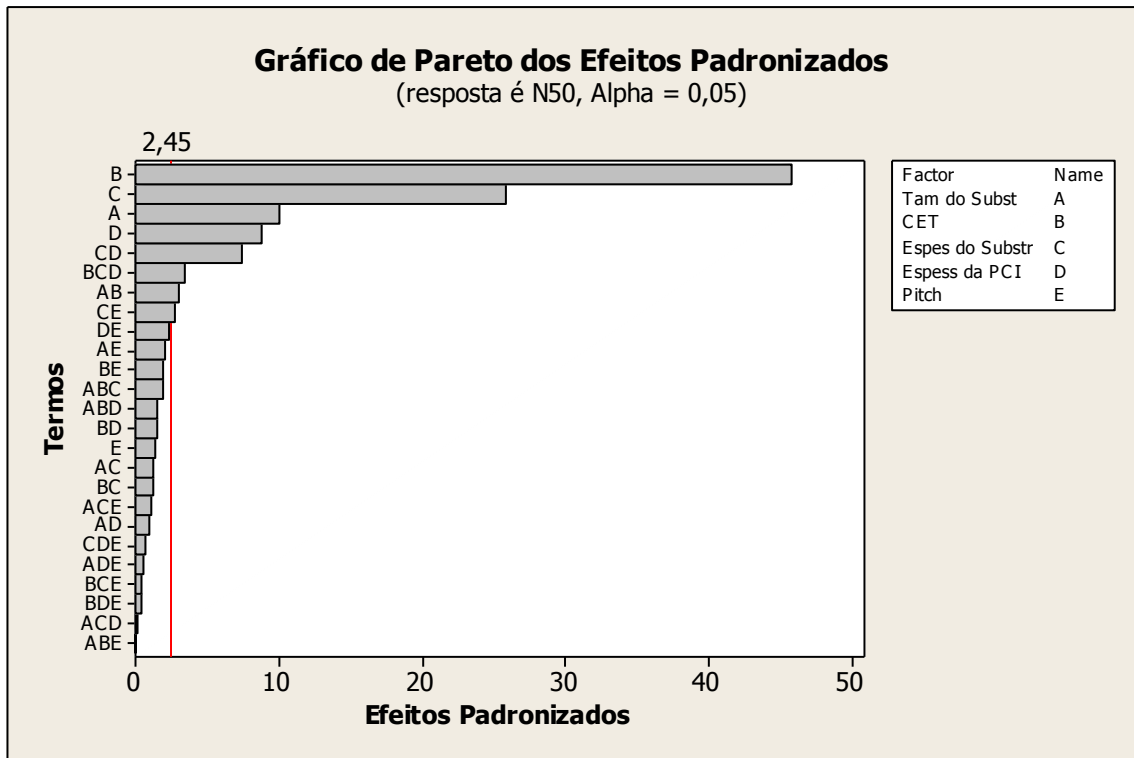


Figura 3- Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados

A Figura 3 apresenta o Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Os fatores e interações acima da linha de referencia do método de Lenth (2,45) são significativos para o presente estudo.

Pode-se observar que o preditor E, *pitch*, não é considerado um fator significativo. Isto pode ser observado, olhando-se a representação gráfica dos efeitos principais mostrado na Figura 3 e 4 e a representação gráfica dos efeitos interativos mostrado na Figura 5. Na figura 4 quanto maior for a inclinação do segmento de reta, maior é a influência do fator. A interação mais influente é mostrada na Figura 5 como sendo a interação dos fatores C (espessura do substrato) com o D (espessura da PCI). As interações são mostradas pelas linhas não paralelas na representação gráfica da matriz de interação (Figura 5). Quanto menos paralelas maiores são as interações.

Gráfico dos Efeitos Principais

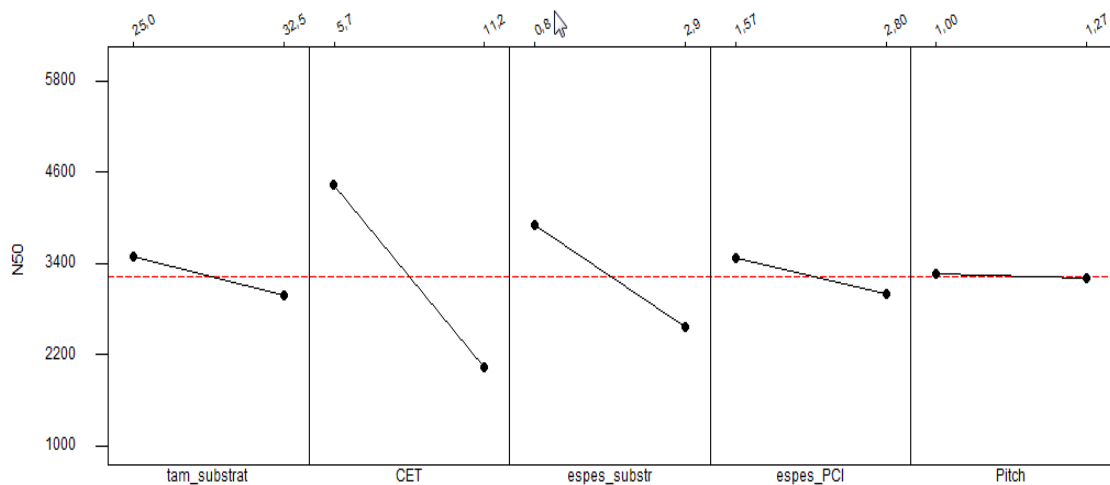


Figura 4 - Gráfico dos Efeitos Principais

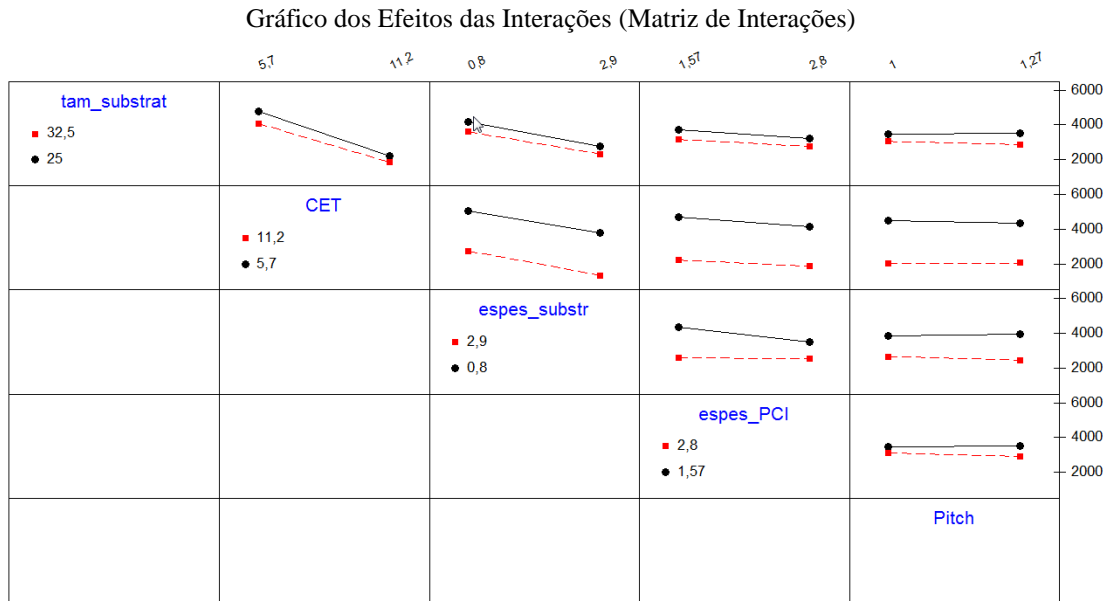


Figura 5 - Gráfico dos Efeitos das Interações

Os resultados de uma análise de regressão baseados em A, B, C, D e E é apresentado na Figura 6.

The regression equation is

$$N_{50} = 11218 - 70,1 A - 434 B - 641 C - 371 D - 272 E$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	11218,3	691,9	16,21	0,000	
A	-70,12	14,79	-4,74	0,000	1,0
B	-433,57	20,17	-21,50	0,000	1,0
C	-640,77	52,82	-12,13	0,000	1,0
D	-370,63	90,18	-4,11	0,000	1,0
E	-271,8	410,8	-0,66	0,514	1,0

S = 313,7
PRESS = 3876265

R-Sq = 96,1%
R-Sq(pred) = 94,17%

R-Sq(adj) = 95,4%

$$N_{50} = 11218 - 70,1A - 434B - 641C - 371D - 272E \quad (3)$$

Figura 6- Resultado da Análise de Regressão sobre A, B, C, D e E (extraído do aplicativo Minitab)

Este modelo é adequado e baseado na R² ajustado de 95,4% e desvio padrão S=313,7 ciclos. Pode-se observar que o preditor E tem o valor de p acima de 0,05 que é o valor limite e que acima dele os preditores passam a ter pouca significância para o modelo. Portanto, pode-se aperfeiçoar ou modificar mais ainda o modelo excluindo o fator E (*pitch*), pois ele influencia pouco no resultado. Ao mesmo tempo, conforme visto anteriormente, é recomendável incluir o termo de segunda ordem CD, pois este apresenta uma razoável influência no resultado, como pode ser visto nas Figuras 2 e 3.

Os resultados da análise de regressão baseados nos fatores A, B, C, D e CD são apresentados na Figura 7. Como visto este modelo inclui todos os preditores e o efeito da interação da espessura do substrato e da PCI.

Estimated Effects and Coefficients for N50 (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		3235	40,79	79,31	0,000
A	-526	-263	40,79	-6,45	0,000
B	-2385	-1192	40,79	-29,23	0,000
C	-1346	-673	40,79	-16,49	0,000
D	-456	-228	40,79	-5,59	0,000
C*D	390	195	40,79	4,78	0,000

S = 230,754 PRESS = 2097127
 R-Sq = 97,92% R-Sq(pred) = 96,84% R-Sq(adj) = 97,52%

Estimated Coefficients for N50 using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	12130,9
A	-70,1167
B	-433,568
C	-1300,80
D	-929,462
C*D	302,071

Figura 7- Resultado da Análise de Regressão sobre A, B, C, D e CD (extraído do aplicativo Minitab)

O desvio padrão deste último modelo é S = 231 ciclos, valor menor que o do anterior. O poder preditivo desse modelo como indicado pelo *Prediction sum of squares* (PRESS= 2097127) que avalia a capacidade de predição é menor que o anterior e quanto menor, melhor. O R-Sq (pred) de 96,8% é equivalente ao modelo contendo os termos A, B, C, D, CD e BCD apresentado no artigo de Perkins e Sitaraman (2004). Muitos outros modelos são possíveis de serem elaborados, no entanto esse modelo atende melhor o critério e é de forma mais simples e está apresentado na Equação 4.

$$N_{50} = 12131 - 70,1A - 434B - 1301C - 930D + 302CD \quad (4)$$

4.0 Comentários gerais sobre os Preditores

Esta seção apresenta comentários gerais sobre os preditores; o tamanho do substrato do componente, o descasamento do CET, os *pitches* com o intuito de compreender como usar o modelo de regressão.

4.1 Tamanho do Substrato do Componente (A)

Foi assumido que o formato do empacotamento, consequentemente, do substrato do CBGA era quadrado. No entanto, quando o tamanho do substrato do componente (A) e do *pitch* (E) são dados, o número de interconexões é uma quantidade decorrente, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. I/Os disponíveis para tamanhos de substratos e *pitches*

Tamanho do Substrato do Componente (mm)	Pitch (mm)	Pitch (mm)	Pitch (mm)	Pitch (mm)
	1,27	1,27	1,00	1,00
	Matriz	I/Os	Matriz	I/Os
52,5 X 52,5	-	-	51 X 51	2577
42,5 X 42,5	33 X 33	1088	41 X 41	1657
32,5 X 32,5	25 X 25	624	31 X 31	937
25 X 25	19 X 19	360	25 X 25	600

Fonte: PERKINS E SITARAMAN (2007)

4.2 Descasamento de Coeficiente de Expansão Térmica (CET) entre Materiais Empregados

Diferentes materiais usados no substrato do CBGA e na PCI produz descasamento do CET (B) entre o substrato e a PCI. A Tabela 5 mostra as propriedades de dois materiais usados nos substratos de CBGA.

Tabela 5. Propriedades de Materiais de Substratos

Material	Temperatura (K)	Módulo de Young (GPa)	Razão de Poisson	CET (ppm/K)
Alumina (cerâmica)	298	241	0,25	6,8
Vidro cerâmico de alto CET	298	74	0,25	12,3

Fonte: PERKINS E SITARAMAN (2007)

Pode-se observar na Tabela 5 que quando o material do substrato é diferente, além do CET, o módulo de Young é também diferente. No entanto, dentro da classe de substratos cerâmicos, a mudança no módulo é considerado ou assumido ter um efeito de segunda ordem sobre a vida em fadiga da esfera de solda segundo Master (2000).

O CET das PCIs varia em função da quantidade de cobre presente na PCI, da presença de vias de passagem e da construção da estrutura do laminado. Por este motivo, o fator B de descasamento do CET deve ser cuidadosamente representado.

4.3 O *Pitch* e a Geometria da Esfera de Solda

Quando o *pitch* varia, o tamanho das esferas de solda varia e, portanto, também a sua geometria. A equação de regressão da Equação 3 não leva, explicitamente, em consideração vários parâmetros da esfera de solda tais como: diâmetro da esfera de solda, diâmetro do *pad* do substrato, diâmetro do *pad* da PCI, etc. A determinação da deformação inelástica para diferentes casos usam os parâmetros de projeto mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros de Projeto para Esferas de Solda de CBGA

<i>Pitch</i> (mm)	Diâmetro de Junta de solda (mm)	Diâmetro do <i>pad</i> da PCI (mm)	Diâmetro do <i>pad</i> do Substrato (mm)	Volume da pasta de solda no lado da PCI (mm ³)
1,27	0,89	0,72	0,86	0,10-0,12
1,00	0,80	0,68	0,80	0,05-0,07

Fonte: PERKINS E SITARAMAN (2007)

As implicações de mudar o *pitch* são como segue:

Um *pitch* de 1,00 mm requer uma redução no diâmetro da esfera reduzindo a altura, conhecida como *stand-off*. Isto leva normalmente a uma diminuição na vida em fadiga. No entanto, 2 casos precisam ser considerados:

- Quando o tamanho do substrato permanece inalterado, o menor *pitch* terá mais números de esferas de I/Os (entradas e saídas do componente) e efetivamente reduzirá a carga para cada esfera de solda. A redução na carga para cada esfera de solda aumenta a vida em fadiga, contrabalançando o efeito da redução na altura das esferas de solda (*stand-off*);
- Quando o número de I/Os permanece inalterado, um *pitch* menor produzirá um tamanho menor de substrato, e, portanto reduzirá a distância do ponto neutro a junta de solda mais afastada na borda do empacotamento, conhecida como *Distance Neutral Point (DNP)*. Desta forma, a vida em fadiga é aumentada, contrabalançando o efeito da redução na altura (*stand-off*) das esferas de solda.

Um CBGA com *pitch* de 1,27 mm possui normalmente uma rede completa de colunas e linhas de esferas de solda. Já uma rede com *pitch* de 1,00 mm não possui as seis esferas dos 4 cantos do empacotamento, por razões de transporte e manuseio do componente. Isto reduz, efetivamente, a distância entre a esfera mais afastada até o DNP e ajuda a explicar a pequena variação na vida em fadiga em relação ao CBGA com *pitch* de 1,27 mm.

4.4 Espessura do Substrato e da Placa

A influência dos dois fatores restantes, a interação CD, espessura do substrato e da PCI são diretas e não requerem maiores explicações. No entanto, vale a pena notar que de acordo com a Equação 4 o efeito da interação das espessuras do substrato e da PCI aumenta a vida em fadiga térmica da junta de solda.

5.0 Faixa de Utilização do Modelo da Equação Preditiva

O modelo é aplicável dentro das faixas de cada fator. O uso do modelo fora das faixas de cada fator não é aconselhável. Em algum ponto ocorrerá a não linearidade da resposta.

A Equação 4 não pode prever onde isso ocorrerá porque ela é baseada somente em 2 níveis para cada fator. Um projeto de experimento de três níveis é recomendado para se determinar a não linearidade.

Para se comparar testes de vida em fadiga em duas condições diferentes de ciclagem térmica é necessário calcular o fator de aceleração FA dado pela Equação 5 que é a relação entre os números médios de ciclos para falhar de duas condições de ciclagem térmica acelerada (CTA). Para se calcular o N_{50} para condições diferentes do projeto de experimentos apresentado neste artigo aplica-se a Equação 4, vista anteriormente, e depois multiplica-se pelo FA, encontrada, respectivamente, por meio das Equações 5 e 6 de Norris-Landzberg para ligas de Sn-Pb e ligas isentas de chumbo (lead-free) (PAN et al., 2005). No presente trabalho foi tratado somente para o caso da liga 63Sn37Pb, portanto, os dados gerados aplicam-se somente para a referida liga.

$$FA = \frac{N50a}{N50b} = \left(\frac{\Delta Tb}{\Delta Ta}\right)^{1,9} \left(\frac{fa}{fb}\right)^{0,333} e^{1414\left(\frac{1}{T_{pico,a}} - \frac{1}{T_{pico,b}}\right)} \quad (5)$$

$$FA = \frac{N50a}{N50b} = \left(\frac{\Delta Tb}{\Delta Ta}\right)^{2,65} \left(\frac{fa}{fb}\right)^{0,136} e^{2185\left(\frac{1}{T_{pico,a}} - \frac{1}{T_{pico,b}}\right)} \quad (6)$$

Onde:

FA- Fator de Aceleração

N_{50a} - Número de ciclos térmicos na condição a para a metade da população falha,

N_{50b} - Número de ciclos térmicos na condição b para a metade da população falha,

ΔTb - faixa de temperatura da ciclagem térmica na condição b,

ΔTa - faixa de temperatura da ciclagem térmica na condição a,

fa - número de ciclos por hora na condição a,

fb - número de ciclos por hora na condição b,

$T_{pico,a}$ – temperatura de pico na condição a,

$T_{pico,b}$ – temperatura de pico na condição b.

As equações 4 e 5 ou 6 podem ser usadas e validadas para parâmetros de projetos fora da faixa de utilização do projeto apresentado neste artigo, mas é recomendado tomar todo o cuidado ao fazê-lo.

6. Conclusões

Este artigo apresentou o desenvolvimento de uma equação preditiva de vida em fadiga para empacotamentos CBGA baseados nos 5 parâmetros de projeto. A equação preditiva de vida em fadiga é baseada na física da falha e nos modelos de elementos finitos validados. A vantagem é que o modelo é fácil de ser usado, não requer muito tempo e nem conhecimentos mecânicos e de análise de elementos finitos avançados e pode então ser usado por qualquer projetista na fase inicial do projeto. A equação desenvolvida pode ser ainda ampliada para incluir outros parâmetros de interesse. Equações similares podem ser desenvolvidas também para outras classes de empacotamento.

7. Próximos trabalhos

Outros parâmetros de projeto tais como a presença de dissipadores de calor, do underfill e de diferentes substratos etc. podem ser incorporados nos modelos, quando for o caso. Os projetos fatoriais fracionais tornam-se necessários com o aumento da quantidade de preditores.

Embora este artigo tenha usado a deformação inelástica para determinar a vida em fadiga, outras métricas de dano tais como a densidade de energia de deformação por ciclo pode também ser empregada no desenvolvimento das equações de regressão.

Um trabalho interessante a ser realizado é o de empregar diferentes métricas de danos e observar as diferentes equações de regressão obtidas para as mesmas classes de empacotamento.

Por último, sugere-se o emprego da simulação de Monte Carlo para o refinamento do modelo de predição usando a equação de regressão apresentada neste artigo considerando a variação dos parâmetros de projeto.

Referências

- MASTER, R. N.; DOLBEAR, T. P.; COLE, M. S.; MARTIN, G. B. Ceramic ball grid array for AMD K6 microprocessor application. **1998 Proceedings, 48th Electronic Components and Technology Conference** (Cat. No.98CH36206), p. 702-706, 1998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=678775&contentType=Conference+Publications>>. Acesso em: 12 abr. 2012
- MASTER, R. N.; ONG, O. T.; DOLBEAR, T. HIGH TCE BALL GRID ARRAY FOR SINGLE CHIP CERAMIC PACKAGING Masanari Kokubu Kyocera Corporation. [S.d.]. Disponível em:<http://www.smta.org/knowledge/proceedings_abstract.cfm?PROC_ID=169&RENEWAL_DATE=05/01/2016&MEM_TYPE_ID=8&CFID=5262705&CFTOKEN=28901892>. Acesso em: 15 jan. 2012.
- PAN, N.; HENSHALL, G. A.; BILLAUT, F. *et al.* AN ACCELERATION MODEL FOR Sn-Ag-Cu SOLDER JOINT RELIABILITY UNDER VARIOUS THERMAL CYCLE CONDITIONS. **SMTAI**, 2005.
- PERKINS, A.; SITARAMAN, S. K. Universal fatigue life prediction equation for ceramic ball grid array (CBGA) packages. **Microelectronics Reliability**, v. 47, n. 12, p. 2260-2274, dez 2007. Disponível em:<http://ac.els-cdn.com/S0026271407000066/1-s2.0-S0026271407000066-main.pdf?_tid=e37e8de0c27709aa6f4f90a89cfbca3c&acdnat=1337888526_d7c163363bc71e9fe3ffb179c81d63a5>. Acesso em: 15 jan. 2012.
- PERKINS, A. Predictive Fatigue Life Equation for CBGA Electronic Packages based on Design Parameters. **Mechanical Engineering**, p. 253-258, 2004. Disponível em:<<ftp://ftp.eng.auburn.edu/pub/patelks/Data%20sets/data/CBGA/Reference/R-Completed/Siresh.K.Sitaraman.pdf>>. Acesso em 3 mar. 2012.
- PERKINS, A.; SITARAMAN, S. K. Thermo-mechanical failure comparison and evaluation of CCGA and CBGA electronic packages. **53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings.**, p. 422-430, 2003.