

# MODELO ANALÍTICO E PREDIÇÃO DE VIDA DE FADIGA DE JUNTAS DE SOLDA EM MONTAGEM ELETRÔNICA

Alirio Cavalcanti de Brito<sup>1</sup> e Marcelo Lopes de Oliveira e Souza<sup>2</sup>

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,  
Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espaciais,  
São José dos Campos, SP, 12227-010

[alirio@dss.inpe.br](mailto:alirio@dss.inpe.br) e [marcelo@dem.inpe.br](mailto:marcelo@dem.inpe.br)

**Resumo:** Este artigo apresenta o modelo analítico de fadiga em juntas de solda de componentes eletroeletrônicos do tipo sem terminais (*leadless*) submetido às tensões de cisalhamento produzidas por descasamento de coeficientes de expansão térmica durante ciclagem térmica. Também apresenta um método de cálculo de predição da vida média de fadiga cíclica para componentes do tipo sem terminais (*leadless*) baseado no modelo analítico apresentado no artigo.

**Palavras-chaves:** confiabilidade, juntas de solda, fadiga.

## 1. Introdução

A confiabilidade de montagens eletrônicas depende da confiabilidade de seus elementos individuais e constituintes, como por exemplo, circuitos integrados, componentes ativos: *chip carriers* (CC), *small-outline integrated circuits* (SOICs), *small-outline transistors* (SOTs), *dual in-line packages* (DIPs), etc.; componentes passivos (resistores e capacitores tipo chip); placas de circuito impresso (PCIs); conectores; etc., e a confiabilidade das interfaces mecânicas, térmicas e elétricas ou a fixação entre esses elementos. Essas interfaces podem ser contatos de conectores, *thermal shunts*, camada coladas entre placas de circuito impresso e o *heat sink*, terminais soldados em furos passantes de circuito impresso ou juntas de solda de montagem de componentes na superfície (SMD- *Surface Mounted Devices*). A confiabilidade de uma junta de solda é considerada quando os elementos individuais são conectados por meio dessas juntas de solda, considerando ainda, as características desses elementos, o ambiente operacional, a vida do produto e a probabilidade de falha aceitável para a montagem eletrônica. Este artigo apresenta um modelo de fadiga para juntas de solda em montagem eletrônica, considerando as características dos materiais dos elementos individuais e constituintes, referidos acima. Através desse modelo, apresenta uma fórmula que permite prever o número de ciclos para ocorrência da primeira falha sob condições de fadiga termomecânica. Tanto o modelo quanto à fórmula apresentados neste artigo, aplicam-se em componentes do tipo *leadless* (sem terminais) ou que possuem terminais rígidos. Os componentes do tipo *leaded* (com terminais) não são tratados aqui, pois não são tão preocupantes quanto os do tipo *leadless* com relação à confiabilidade por causa da sua capacidade de absorver as tensões de deformação.

## 2. Considerações sobre Fadiga em Juntas de Solda

A confiabilidade da fixação ou soldagem dos elementos individuais, realizadas em superfícies de PCIs por meio de ligas de solda, é estabelecida pela diferença entre a duração da vida requerida pelo projeto e a duração da vida de fadiga cíclica das juntas de solda, determinados por efeitos combinados do projeto do componente, do projeto da montagem, e do ambiente operacional.

A vida de fadiga cíclica de uma junta de solda é determinada pela quantidade do dano de fadiga acumulada. Trincas nas juntas de solda ocorrem quando o dano acumulado total excede a capacidade da junta de solda em sustentar tal dano. A resposta da junta de solda a deslocamento cíclico é caracterizada por uma malha de histereses no plano de deformação-tensão de cisalhamento mostrado na Figura 1 de forma estilizada. A área da malha de histereses representa a densidade de energia de deformação viscoplástico por ciclo ( $\Delta W$ ) e, dessa forma, o dano acumulado de fadiga por ciclo.



Onde:

$c$  = expoente de ductilidade de fadiga.

$\bar{N}_f$  = vida de fadiga média [ $N_f$  (50%)], ciclos para falhar.

$W_f'$  = termo de energia, uma constante do material.

$\Delta W$  = densidade de energia de deformação visco-plástico por ciclo.

O expoente “ $c$ ” situa-se na faixa entre -0,5 e -0,7 para a maioria dos metais. A relação de vida de fadiga por deformação plástica de Manson-Coffin pode ser, diretamente, derivada da função de dano por fadiga generalizada, sendo um caso limitado de tensão especial, e é dado pela Equação (2),

$$\bar{N}_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta \gamma_p}{2 \varepsilon_f'} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (2),$$

Onde:

$\Delta \gamma_p$  = faixa de deformação por cisalhamento plástico cíclico,

$\varepsilon_f'$  = coeficiente de ductilidade de fadiga.

A determinação de  $\Delta W$  ou de  $\Delta \gamma_p$  não é uma tarefa simples para metais empregados nas faixas de temperatura, onde a fluência e o relaxamento da tensão dependem do tempo e da temperatura. Nessas faixas de temperatura (tipicamente acima de 60% da temperatura absoluta de fusão da solda), a fluência e o relaxamento de tensão tornam-se significativos, comparados às deformações plásticas iniciais causadas pelo escoamento (*yielding*).

As deformações plásticas totais aumentam com o tempo na medida em que a energia de deformação elasticamente armazenada no sistema de estrutura (componente-terminal e junta de solda-substrato) é convertida para energia de deformação visco-plástico cumulativo e irrecuperável na junta de solda em que a fluência acaba relaxando. Com o tempo suficiente, que para o material da solda nas temperaturas de operação pode ser muito curto, virtualmente, toda a energia de deformação armazenada, elasticamente, se acumula como energia de deformação visco-plástico nas juntas de solda. Isto maximiza a malha de histereses no plano de deformação e tensão de cisalhamento, aumentando o dano por fadiga cíclica para a junta de solda (veja Figura 1).

A vida de fadiga das juntas de solda não é dependente da frequência do ciclo por si só. A frequência pode, entretanto, ser usada como uma variável de comparação se dados dos testes de ciclagem, com formatos idênticos de perfis de temperaturas (senoidal, dente de serra, trapezoidal, quadrado, etc.), são comparados. Nesses casos o meio período de ciclagem e o tempo disponível para relaxamento de tensão e fluência estão diretamente relacionados.

Em operação, os ciclos consistem, tipicamente, de uma rampa de subida, um período de permanência operacional, uma rampa de descida, e um período de permanência que depende da aplicação. Sobreposto aos ciclos operacionais do sistema pode haver variações cíclicas de temperatura devido às condições ambientais externas; diárias e sazonais. A rampa de subida dependerá da transferência de calor e das condições de dissipação de potência do sistema. Se produzir mudanças rápidas de temperatura poderá ser suficiente para causar choque térmico, sendo preocupante do ponto de vista da confiabilidade. Se for lento, poderá ser suficiente para causar o relaxamento de tensão nas juntas de solda nesses períodos de transição.

Os períodos de permanência operacional e não operacional dependem das características operacionais do sistema, quanto a sua duração e repetição. Sobre ele pode haver mais variações térmicas cíclicas rápidas, devido a flutuações de carga do sistema. A rampa de descida assemelha-se a um caimento próximo do exponencial, dependendo dos parâmetros de transferência de calor do sistema.

Deste modo, a frequência não é necessariamente uma medida do tempo de permanência. Erros significativos podem ser cometidos durante a análise ao empregar a frequência em vez do tempo de permanência ao correlacionar os dados do teste acelerado. A frequência também não fornece nenhuma

indicação da taxa de variação das condições térmicas. Cuidado deve ser tomado, o material da solda é muito sensível à taxa de deformação em altas taxas de variação das condições térmicas.

### 3. Testes Acelerados de Fadiga

Para os testes acelerados de fadiga, os tempos de permanência durante os períodos de meio ciclo são insuficientes para produzir um relaxamento completo de tensão (ver Figura 1); este tempo de permanência reduzido é o que fornece a aceleração ao teste, mas requer que o dano de fadiga cíclica reduzida durante o teste acelerado seja considerado.

A aceleração do teste, pelo aumento do carregamento cíclico térmico, é possível somente, até certo nível, porque as características do material da solda limitam ambas as temperaturas máxima e mínima de teste que podem ser aplicados, sem introduzir mecanismos de danos que não correspondem aos mecanismos encontrados no campo de aplicação. Para componentes do tipo *leadless*, a análise é relativamente simples quando comparada com a resposta da soldagem do componente do tipo *leaded*. Este é complicado por causa do efeito interativo entre a solda e as estruturas dos terminais que proporcionam alívios de tensão.

### 4. Soldagem de Componentes do tipo *Leadless*

A Figura 2 é um gráfico de Manson-Coffin mostrando resultados de testes experimentais em diferentes temperaturas e tempos de permanência  $t_D$  cíclica. Através deste teste, foram obtidos dados experimentais isotérmicos para se estabelecer um modelo para vida média de fadiga cíclica para as juntas de solda de componentes montado em superfície do tipo *Leadless* (ou componentes com terminais muito rígidos). Este modelo é expresso pela seguinte relação na Equação (3):

$$\bar{N}_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta\gamma}{2\varepsilon'_f} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (3)$$

Para liga de solda eutética com 60% de Sn e 40% de Pb, a Equação (4) fornece:

$$2\varepsilon'_f \approx 0,65 \quad (4)$$

e,

$$c = -0,442 - 6 \times 10^{-4} \bar{T}_{SJ} + 1,74 \times 10^{-2} \ln \left( 1 + \frac{360}{t_D} \right) \quad (5)$$

Onde,

$C$  = inverso do expoente da Equação (3) e o seu valor varia entre 1,42 a 2,0.

$\bar{T}_{SJ} = \frac{1}{4} (T_C + T_S + 2T_O)$  (Temperatura média cíclica da junta de solda)

$T_S, T_C$  = Temperatura de operação em regime estacionário para o substrato e o componente. ( $T_C > T_S$  quando existe dissipação de potência no componente).

$T_O$  = Temperatura durante a metade do ciclo desligado.

$t_D$  = tempo de permanência de meio ciclo (em minutos), tempo médio disponível para o relaxamento de tensão ocorrer em  $T_S/T_C$  e  $T_O$ .

$\Delta\gamma$  = faixa de deformação plástica cíclica total de cisalhamento na solda após completo relaxamento de tensão.

$\varepsilon'_f$  = coeficiente de ductilidade a fadiga definida para solda na Equação (4)

As Equações (3) e (5) de acordo com Engelmaier (2007) são baseadas nos trabalhos experimentais clássicos de Roger Wild, na IBM (WILD, 1973). Wild realizou várias experiências isotérmicas com ciclagem térmica, em diferentes temperaturas e formatos de perfis de temperatura, para determinar a dependência da fluência cíclica sobre a fadiga com o tempo e a temperatura.

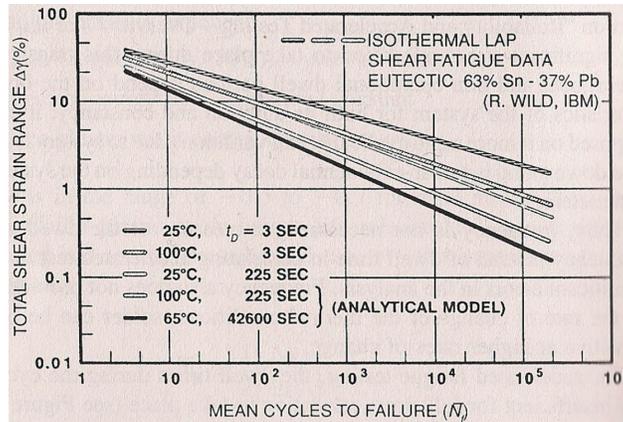


FIGURA 2-Gráfico de Manson-Coffin mostrando os resultados de fadiga cíclica isotérmica de juntas de solda em diferentes temperaturas e tempos de permanência  $t_D$  cíclica e alguns resultados baseados na Equação (3).  
Fonte: Wild (1973)

Enquanto que a Equação (3) tem a mesma forma da Equação (2), ele supera a dificuldade prática de determinar a faixa de deformação plástica de cisalhamento  $\Delta\gamma_p$ , dependente do tempo e da temperatura, usando o deslocamento por cisalhamento máximo disponível e considerando o grau incompleto de relaxamento de tensão e fluência com expoente dependente do tempo e da temperatura.

O efeito do tempo e da temperatura pode ser vista, facilmente, na Figura 3, onde os resultados experimentais de ciclagem de deformação, aplicada mecanicamente, em condição isotérmica são mostrados para temperaturas de 23°C e 81°C. Os tempos de permanência cíclica variam de 3 a 180 segs. O formato do perfil de temperatura para estes dados foi trapezoidal com taxas de deformação constante. Os testes foram realizados com três componentes similares com frequência variando de 480 a 14400 ciclos/dia. Os dados de teste têm os mesmos coeficientes angulares de Weibull, indicando o mesmo mecanismo de falha para todos eles e, mostra ainda, o efeito de diferentes graus de relaxamento de tensão cíclica dependente do tempo e da temperatura nas juntas de solda nas vidas de fadiga cíclicas. A aceleração fornecida pelo teste acelerado de fadiga da junta de solda pode ser constatada pelos dados obtidos nas temperaturas de 23°C e 81°C.

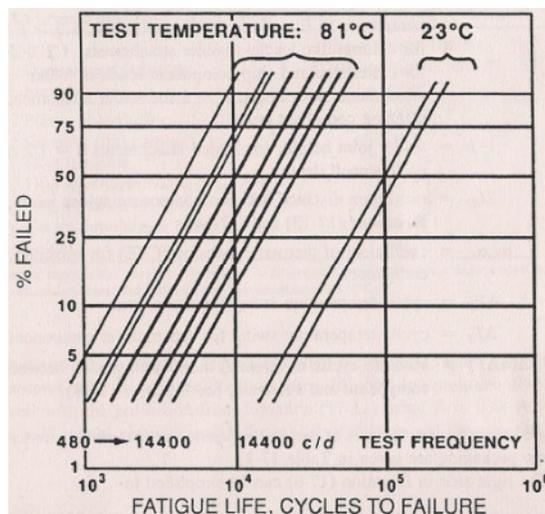


FIGURA 3- Gráfico Estatístico de Weibull dos resultados de teste acelerado de ciclagem mecânico isotérmico de componentes *leaded chip carriers* de encapsulamento plástico, empregando duas temperaturas com ciclos com perfis de temperatura aproximados de uma onda quadrada.  
Fonte: ENGELMAIER (1985)

## 5. Cálculo da Vida Média Cíclica de uma Soldagem *Leadless* em Montagem Superficial

Para se obter a equação que forneça a vida média cíclica de uma soldagem do tipo *leadless* em montagem superficial é necessário definir a faixa de deformação cíclica total:

A faixa de deformação cíclica total é dada pela Equação (6)

$$\Delta\gamma = F \frac{L_D}{h} \Delta(\alpha\Delta T) \quad (6)$$

onde o descasamento de expansão térmica é dado pela Equação (7)

$$\Delta(\alpha\Delta T) = |\alpha_s \Delta T_s - \alpha_c \Delta T_c| \quad (7)$$

$F$  é um fator empírico ou de engenharia, indicativo do desvio da junta de solda real da junta de solda ideal, considerando os efeitos secundários, quase sempre, difíceis de serem tratados, tais como: empenamento cíclico, transientes cíclicos, geometrias de solda não ideais, microestrutura da solda, compostos intermetálicos quebradiços, camadas de fronteiras rico em chumbo e diferenças de expansão de material colado/soldado, como também imprecisões e incertezas nos parâmetros das Equações (6) e (7). O fator  $F$  assume valores entre 1,0 e 1,5 para soldagem de componentes do tipo *leadless*, mas com colunas de solda. Valores de  $F$  entre 0,7 a 1,2 são atribuídos para soldagem de componentes, também do tipo *leadless*, mas com perfis de filetes encastelados e, por último, valor de  $F=1,0$  para componentes com terminais que produzam alívio de tensão.

$h$  é a altura da junta de solda. Para soldagem de componentes com terminais o valor de  $h$  é  $\frac{1}{2}$  da espessura do estêncil de deposição da pasta de solda.

$L_D$  é a máxima distância existente entre juntas de solda de um componente.  $L_D$  também é conhecido como DNP (*Distance Neutral Point*), distância até o ponto neutro que está localizado no centro do componente. A distância máxima  $L_D$  (DNP) entre os centros das juntas de solda para componentes com empacotamento retangular ou quadrado, com uma multiplicidade de juntas de solda (p. ex., *chip carriers*, SOICs; etc.) é, aproximadamente, dado pela seguinte equação:

$$L_D = \frac{1}{2} \sqrt{L^2 + W^2} \quad (8)$$

Onde:

$L$  é a dimensão maior do componente entre as suas extremidades com as juntas de solda.

$W$  é igual a  $L$  para componentes quadrados.  $W$  é a menor dimensão do componente entre as extremidades com juntas de solda ou a sua menor dimensão entre as suas bordas sem as juntas de solda.

Para componentes com duas juntas de solda, tais como, componentes discretos do tipo chip e componentes do tipo *metal electrode face bonded* (MELFs) a equação a seguir é a usada.

$$L_D = \frac{L + L_M}{4} \quad (9)$$

Sendo  $L_M$  a distância entre as metalizações das juntas de solda.

$\alpha_s$ ,  $\alpha_c$  são coeficientes de expansão térmica (CET) para o substrato e para o componente.

$\Delta T_c$  é a variação de temperatura cíclica para o componente.

$\Delta T_s$  é a variação de temperatura cíclica para o substrato (no componente).

$\Delta(\alpha\Delta T)$  é a expansão térmica diferencial cíclica absoluta entre o componente e o substrato (veja a Equação (7)).

Alguns valores para coeficientes de expansão térmica (CET) de alguns materiais empregados em empacotamento eletrônico são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1-Coefficientes de Expansão Térmica Planar e Linear de Materiais de Empacotamento Eletrônico-

Componente, Substrato, Material	Coefficiente de Expansão Térmica Planar e Linear, $\alpha$ (ppm/°C)
Plastic chip carrier	20-23
Ceramic chip carrier	5,4-6,7
Laminado FR-4	12-24
Laminado de Multicamada FR-4	16-24
Placa de Multicamada FR-4 c/ CET modificado	7,2-14
Placa Multicamada de Cerâmica	6,0-8,3
Liga de solda	23-25

Fonte: LAU, 1991

O lado direito na Equação (7) pode ser simplificado para

$$\Delta(\alpha\Delta T) = \Delta\alpha\Delta T_e \quad (10)$$

Onde:

$$\Delta T_e = \left| \frac{\alpha_s \Delta T_s - \alpha_c \Delta T_c}{\Delta\alpha} \right| \quad (11)$$

e, onde:

$\Delta T_e$  é a variação cíclica de temperatura equivalente, considerando os efeitos da dissipação de potência do componente, como também, variações de temperaturas externas.

$\Delta\alpha$  é igual a diferença entre os coeficientes de expansão térmica do componente e do substrato (descasamento do CET,  $\Delta\text{CET}$ )

A Equação (11) pode ser simplificada no caso de não haver dissipação de potência no componente, resultando em,

$$\Delta T_e = \Delta T_s = \Delta T_c \quad (12)$$

Então, combinando as Equações (3), (6) e a (10), e a vida média cíclica de uma soldagem do tipo *leadless* em montagem superficial é obtido a seguinte equação:

$$\bar{N}_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{F}{2\epsilon'_f} \frac{L_D \Delta\alpha \Delta T_e}{h} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (13)$$

Esta Equação (13) contém todos os parâmetros definidos acima, necessários para se determinar o número de ciclos para ocorrência de falhas em juntas de solda.

## 6. Exemplo de Aplicação da Equação (13)

Lau (1991) apresenta através do gráfico de MANSON-COFFIN na Figura 4, os resultados de três diferentes programas de teste que representam bem a predição dada pela Equação (13) usando um fator  $F=1,0$ . Ainda, na mesma Figura 4, pode-se observar que um  $F=1,27$ , casaria melhor, o modelo de predição com os dados obtidos experimentalmente. Para facilitar a comparação, os resultados de teste são normalizados para uma condição comum de  $T_{sj} = 45^{\circ}\text{C}$  e  $t_D = 6,2$  min e frequência de 58 ciclos/dia. O modelo de predição da equação (3) para esta condição comum, indica uma excelente concordância entre o modelo e os dados experimentais com um fator (F) variando de 1,12 a 1,27.

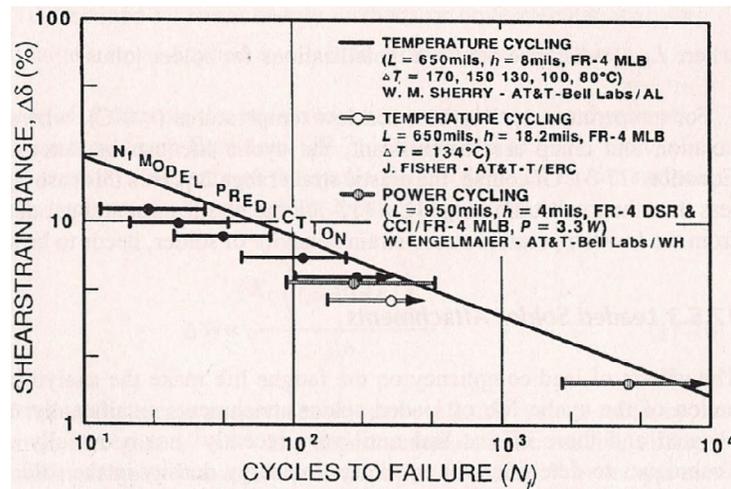


FIGURA 4 - Gráfico de Manson-Coffin mostrando os resultados (média e amplitude) de três programas de teste de ciclagem térmica e funcional para componentes LCCC (*Leadless Ceramic Chip Carrier*) de diferentes tamanhos sobre diferentes substratos e, ainda, submetidos a várias condições de teste.

Fonte: (ENGELMAIER, 1989)

## 7. Conclusão

O presente artigo apresentou o modelo analítico de fadiga das juntas de solda submetido a deformações e tensões de cisalhamento devido ao descasamento do coeficiente de expansão térmica entre a PCI (substrato) e o componente. O artigo mostra, também, como através de testes acelerados é possível desenvolver expressões para se obter o número de ciclos para ocorrência de falhas que a menos do fator F obtêm-se bons resultados de predição. Cuidado deve ser exercido quanto ao estabelecimento dos formatos dos perfis de temperatura dos testes acelerados para que estes não introduzam erros nas referidas predições. As expressões desenvolvidas aqui são dedicadas aos componentes do tipo sem terminais (*Leadless*). Esses componentes são os mais críticos com relação à confiabilidade, mas por outro lado, os componentes do tipo com terminais (*leaded*) são mais complexos de serem estudados devido à natureza dos terminais.

## 8. Referências

CLECH, J. P.; ENGELMAIER, W. Surface mount solder attachment reliability figures of merit - design for reliability tools. Proceeding of the Technical Program of Nepcon West 89, Vols 1 and 2, p.206-224. 1989.

ENGELMAIER, W. Surface mount solder joint long-term reliability: design, testing, prediction. Technical Papers. IPC 32nd Annual Meeting/Technical Papers. IPC 32nd Annual Meeting, p.797/1-50/610. 1989.

LAU, J.H., **Solder joint reliability**: theory and applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

WILD, R. N., Some fatigue properties of solders and solder joints, [s.l.] : IBM, 1973. IBM Tech. Rep. 73Z000421.