

# DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM DE CÉLULAS SOLARES DE USO ESPACIAL

*Jaqueline Nunes Vaz<sup>1</sup>, Prof. Dr Viliam Sinka<sup>2</sup>, Dr. Célio Costa Vaz<sup>3</sup>*

<sup>1-2</sup> UNIVAP/FEAU, Av. Shishima Hifumi, 2911 – Urbanova CEP 12244-000 São José dos Campos - SP, [jaqueline.nvaz@gmail.com](mailto:jaqueline.nvaz@gmail.com), [sinka@univap.br](mailto:sinka@univap.br)

<sup>3</sup> Orbital Engenharia Ltda, Av. Dr. João Bta. Soares de Queiroz Jr, 1821 Jd. das Indústrias CEP 12240-000 São José dos Campos - SP, [celiovaz@orbital-eng.com](mailto:celiovaz@orbital-eng.com)

**Resumo** - Este trabalho apresenta a determinação experimental dos parâmetros de soldagem de células solares de mono junção e de tripla junção para uso em geradores fotovoltaicos de satélites artificiais. É utilizado o processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos com fonte de corrente contínua. Inicialmente são abordados os requisitos de qualidade para o processo de soldagem de células solares de uso espacial, seguidos da descrição do dispositivo de soldagem, suas interfaces de controle e procedimentos operacionais. Finalmente, são apresentados os resultados de ensaios experimentais realizados para a determinação dos parâmetros de soldagem de corpos-de-prova fabricados e submetidos a testes funcionais e a testes de qualificação como parte da fabricação dos geradores solares para o Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS-2B) e para a Plataforma Multi-Missão (PMM), ambos em desenvolvimento pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

**Palavras-chave:** soldagem, células solares, geradores fotovoltaicos, satélites artificiais.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Aeroespacial

## Introdução

Os modernos satélites artificiais utilizam nos seus geradores fotovoltaicos, células solares para gerar energia elétrica diretamente da luz solar para manter operacionais todos os seus subsistemas, ou de um sistema espacial, dentro das faixas de consumo especificadas, durante todas as fases da missão, vida útil e condições orbitais.

Para atender a severos requisitos de qualidade, são impostas condições especiais sobre os diversos parâmetros de projeto e de controle da fabricação que influenciam na confiabilidade do gerador fotovoltaico e no perfil de potência elétrica a ser gerada ao longo da missão de um satélite artificial.

Dessa forma, o processo de soldagem das células solares que compõem os circuitos fotovoltaicos é um dos processos críticos de fabricação de um gerador fotovoltaico. Para garantir a qualidade deste processo, faz-se necessário determinar experimentalmente o intervalo em que os parâmetros de soldagem podem variar sem comprometer a qualidade final da solda, em termos de resistência mecânica, contato elétrico e degradação causada ao desempenho da célula solar, o que será analisado neste trabalho.

## Requisitos de qualidade para o processo de soldagem

São impostos uma série de requisitos para o processo de soldagem para a sua utilização em

missões de satélites artificiais:

- Resistência mecânica: a força mínima de ruptura para interconectores de prata com 0,012 mm de espessura é de 150 gf (1,5 N) e para interconectores de kovar com 0,050 mm de espessura é de 300 gf (3,0 N). Ambas aplicadas a 180° na direção do terminal de contato;
- Degradação elétrica: o processo de soldagem não deve degradar a corrente elétrica fornecida pela célula solar, na tensão de máxima potência, em mais que 2%;
- Resistência à fadiga térmica: as interconexões realizadas pelo processo de soldagem devem atender ao requisito de resistência mecânica após terem sido submetidas a 1100 ciclos de temperatura entre -70°C e +70°C;
- Aparência da solda: não devem apresentar evidências de áreas queimadas, delaminação da grade coletora da célula solar e deformações devidas à pressão excessiva dos eletrodos;
- Força de contato dos eletrodos: deve ser ajustável entre 5 N e 20 N. Os eletrodos não devem danificar a superfície de contato da célula solar devido à pressão mecânica exercida durante a soldagem.

Estes requisitos impostos pelo cliente são verificados experimentalmente através de corpos-de-prova que são submetidos a uma seqüência de testes funcionais e testes de qualificação.

## Processo de Soldagem

A solda do interconector na célula solar é feita através do processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos com fonte de corrente contínua. Neste processo, a energia para a fusão dos materiais (interconectores e células solares) provém de um pulso de corrente contínua que possui os seguintes parâmetros ajustáveis no painel do equipamento utilizado neste trabalho:

- Tensão da solda (mV);
- Tempo da rampa de subida da tensão (ms);
- Tempo do patamar de tensão constante (ms);
- Tempo da rampa de descida da tensão (ms).

Uma vez disparado o pulso de soldagem, os seguintes parâmetros medidos, resultantes da execução dos pontos de solda são monitorados:

- Corrente efetiva (A);
- Corrente máxima (A);
- Carga (corrente média x tempo) (A.s.).

Os pulsos de solda são então conduzidos até os eletrodos que se situam no “Dispositivo de Soldagem” e então a solda é realizada.

Os parâmetros medidos (ou monitorados) são utilizados para controlar a qualidade das soldas realizadas e o intervalo de aceitação para cada um deles é determinado experimentalmente.

## Dispositivo de Soldagem

O “Dispositivo de Soldagem” utilizado neste trabalho é uma máquina capaz de realizar de forma autônoma operações de micro soldagem resistiva posicionando os interconectores e células solares precisamente sob o par de eletrodos, executando movimentos segundo programação das coordenadas dos pontos de soldagem através do programa de controle em plataforma Labview® em um microcomputador e acionando a máquina geradora da corrente elétrica necessária para a execução da solda.

Este dispositivo permite controlar a pressão exercida pelos eletrodos; monitorar em tempo real os parâmetros de soldagem; verificar se os mesmos são satisfeitos através do interfaceamento com o monitor da máquina geradora de pulso elétrico; e, permite o monitoramento do processo por meio de um sistema óptico para ampliação do campo visual de soldagem para finalidades de rastreabilidade e garantia da qualidade.

## Metodologia para determinação dos parâmetros de soldagem

Para uma dada seleção de parâmetros de tempo e força dos eletrodos, faz-se variar a tensão

de soldagem num intervalo tal que, nas tensões mais baixas as soldas apresentem falhas provocadas por falta de energia, como por exemplo, “solda fria”, e nas tensões mais altas comecem a apresentar defeitos provocados por excesso de energia “soldas queimadas” ou degradação elétrica excessiva.

A tensão de soldagem é incrementada do menor valor até o maior valor do intervalo, dividindo-se o intervalo de tensão em aproximadamente 10 partes. Para cada tensão são realizados entre 4 a 8 pontos de solda, dependendo do tipo de interconector e da célula solar a serem utilizados.

Posteriormente ao processo de soldagem dos corpos-de-prova é realizada inspeção visual dos pontos de solda, realização de testes destrutivos para verificar a resistência mecânica da solda e testes de desempenho elétrico para verificar a degradação elétrica da corrente de curto-circuito da célula solar.

Através da análise dos resultados experimentais são finalmente selecionados os parâmetros de soldagem a serem efetivamente utilizados e determinados os intervalos aceitáveis de variação dos mesmos.

## Resultados Experimentais

Os parâmetros utilizados para a soldagem dos corpos-de-prova (células solares de mono junção e interconectores de prata de 0,012 mm de espessura) do CBERS-2B foram os seguintes:

- Tensão de soldagem: intervalo de 350 mV a 575 mV, com incrementos de tensão de 25 mV;
- Tempo da rampa de subida de tensão: 80 ms;
- Tempo do patamar de tensão constante: 290 ms;
- Tempo da rampa de descida de tensão: 10 ms;
- Força dos eletrodos: 5N;
- Monitoramento da carga de soldagem: entre 20 A.s e 80 A.s.

As Figuras. 1 e 2 mostram as curvas de tensão x carga x força de ruptura obtidas a partir da soldagem dos corpos-de-prova e da realização do teste destrutivo de resistência mecânica.

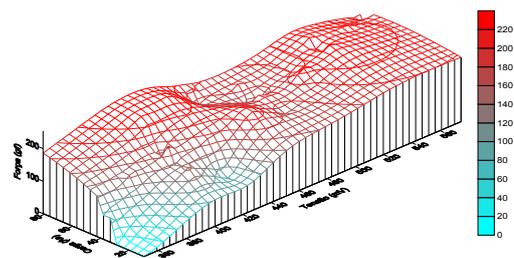


Figura 1: Resultados dos testes destrutivos de soldagem dos corpos-de-prova. Curvas de tensão (mV) x carga (A.s) x força de ruptura (gf).

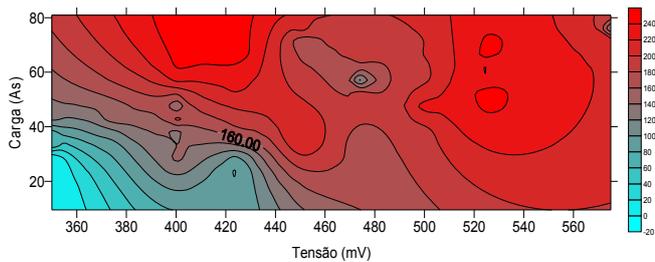


Figura 2: Resultados dos testes destrutivos de soldagem dos corpos-de-prova. Curvas de tensão (mV) x carga (A.s) x força de ruptura (gf).

Os parâmetros utilizados para a soldagem dos corpos-de-prova (células solares de tripla junção e interconectores de kovar com 0,050 mm de espessura) da PMM foram os seguintes:

- Tensão de soldagem: intervalo de 330 mV a 420 mV, com incrementos de tensão de 10 mV;
- Tempo da rampa de subida de tensão: 80 ms;
- Tempo do patamar de tensão constante: 300 ms;
- Tempo da rampa de descida de tensão: 10 ms;
- Força nos eletrodos: 5 N;
- Monitoramento da carga de soldagem: entre 40 A.s e 70 A.s.

As Figuras 3 e 4 mostram as curvas de tensão x carga x força de ruptura obtidas a partir da soldagem dos corpos-de-prova e da realização do teste destrutivo de resistência mecânica.

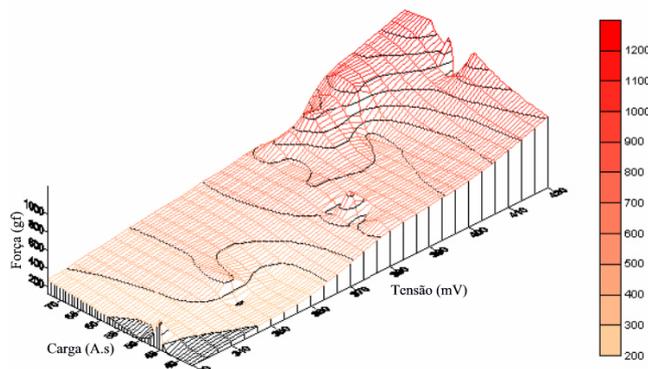


Figura 3: Resultados dos testes destrutivos de soldagem dos corpos-de-prova. Curvas de tensão (mV) x carga (A.s) x força de ruptura (gf).

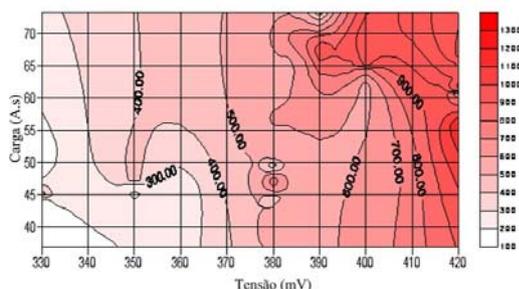


Figura 4: Resultados dos testes destrutivos de soldagem dos corpos-de-prova. Curvas de tensão (mV) x carga (A.s) x força de ruptura (gf).

## Discussão

No tocante a qualidade mecânica das soldagens dos corpos-de-prova do CBERS-2B, pode ser observado a partir dos resultados experimentais apresentados nas Figuras. 1 e 2, que existem vários pontos onde a força de ruptura dos terminais de contato não satisfaz ao requisito de ser maior que 150 gf. Esses pontos encontram-se localizados nas regiões onde a tensão de soldagem é menor que 480 mV.

Forças de ruptura maiores que 150 gf foram obtidas para tensões de soldagem acima de 480 mV (vide Figura 5). Observa-se também, que para tensão de soldagem maior que 540 mV ocorre o início de uma tendência de decréscimo da resistência mecânica das soldas devido ao excesso de energia.



Figura 5: Aparência típica da ruptura as solda do interconector de kovar com 0,050 mm de espessura após o teste destrutivo de resistência mecânica.

Dessa forma, foram selecionados parâmetros de soldagem para a soldagem dos corpos-de-prova do CBERS-2B conforme mostrados na Tabela 1. Também se encontram os de parâmetros de soldagem selecionados para a PMM, que são discutidos posteriormente.

Tabela 1: Parâmetros de soldagem selecionados para a soldagem dos corpos-de-prova do CBERS-2B e da PMM.

Parâmetros de Soldagem	CBERS-2B	PMM
Tensão mínima (mV)	490	370
Tensão máxima (mV)	530	400
Tensão nominal (mV)	510	380
Rampa de subida de tensão (ms)	80	80
Patamar de tensão constante (ms)	300	300
Rampa de descida de tensão (ms)	10	10
Carga mínima (A.s)	40	45
Carga máxima (A.s)	65	60

No tocante a qualidade elétrica, os resultados dos testes de caracterização elétrica (vide Figura 6) realizados nos corpos-de-prova do CBERS-2B fabricados utilizando os parâmetros de soldagem mostram que a degradação provocada na célula solar pelo processo de soldagem dos interconectores foi de 0,5 %, que se encontra em conformidade com o requisito de degradação elétrica especificado ( $\leq 2\%$ ).

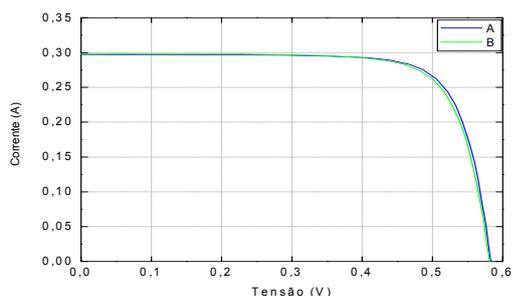


Figura 6: Resultado típico do teste de desempenho elétrico dos corpos-de-prova. Curvas de corrente (A) x tensão (V).

No tocante a qualidade mecânica das soldagens dos corpos-de-prova da PMM, pode ser observado a partir dos resultados experimentais apresentados nas Figuras 3 e 4 que os pontos onde a força de ruptura dos terminais de contato não satisfaz ao requisito de qualidade mecânica, encontram-se localizados nas regiões onde a tensão de soldagem é menor que 360 mV. Forças de ruptura maiores que 300 gf (vide Figura 7) foram obtidas de modo regular para tensões de soldagem acima de 370 mV. Verifica-se um aumento da tensão de ruptura com o aumento da tensão de soldagem. Observam-se reduções pontuais da força de ruptura para tensões da ordem de 410 mV.



Figura 7: Aparência típica dos pontos de solda após o teste destrutivo de resistência mecânica do interconector de kovar com 0,050 mm de espessura.

Da mesma forma que para o CBERS-2B, para a PMM foram também verificadas as características elétricas dos corpos-de-prova fabricados com os parâmetros de soldagem selecionados (mostrados anteriormente na Tabela 1). A Figura 8 mostra o resultado típico da caracterização elétrica das células solares de tripla junção antes (A) e após (B) a soldagem dos interconectores com 0,050 mm de espessura. Também neste caso, a degradação da corrente de curto-circuito da célula solar foi de 0,7 %, encontrando-se, portanto, em conformidade com o requisito especificado.

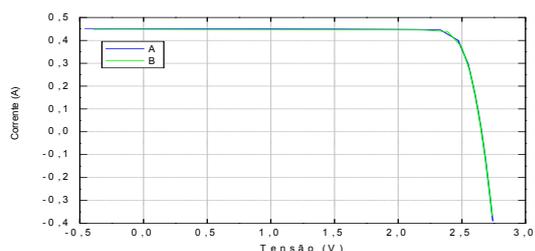


Figura 8: Resultado típico do teste de desempenho elétrico dos corpos-de-prova. Curvas de corrente (A) x tensão (V).

Os parâmetros de soldagem selecionados para o CBERS-2B foram utilizados para a fabricação do cupom de teste Modelo de Qualificação (vide Figura 9) e para o gerador fotovoltaico Modelo de Vão do CBERS-2B. Ambos apresentaram resultados dos testes de qualificação e aceitação conformes. Já os parâmetros de soldagem selecionados para a PMM foram utilizados para a fabricação dos módulos solares Modelo de Engenharia e do cupom de teste Modelo de Qualificação da PMM (vide Figura 10). Ambos passaram com sucesso nos testes funcionais realizados.

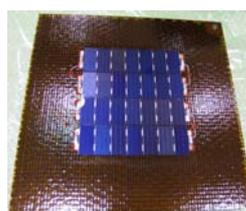


Figura 9: Cupom de teste Modelo de Qualificação do CBERS-2B.



Figura 10: Cupom de teste Modelo de Qualificação da PMM.

Finalmente, vale comentar que apesar dos interconectores do CBERS-2B possuírem espessura menor que os da PMM, a tensão necessária para soldar os interconectores do CBERS-2B é maior que a necessária para soldar os interconectores da PMM. Alguns fatores que podem ter contribuído para esse resultado são: acabamento superficial (rugosidade) das superfícies, oxidação das superfícies, diferenças na composição das ligas de prata da camada de metalização dos contatos da célula solar, e espessura e materiais dos interconectores.

## Conclusão

O procedimento estabelecido para a correta determinação dos parâmetros de soldagem é adequado para ser utilizado tanto para células solares de silício monocristalino com cerca de 14 % de eficiência (utilizadas no CBERS-2B), quanto para células solares de GaInP/GaAs/Ge com cerca de 27 % de eficiência (utilizadas na PMM), pois as soldagens obtidas atendem aos requisitos de qualidade especificados, contribuindo para a melhoria do desempenho e da confiabilidade dos geradores fotovoltaicos.

## Referências

- European Cooperation for Space Standardization (ECSS). Space Product Assurance – Policy and Principles. ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1996. ECSS-Q-00A.
- RAUSCHENBACH, H.S. Solar array design handbook. New York, Litton Educational Publishing, 1980.