

TÉCNICA DE PROJETO E DE ANÁLISE DE EXPERIMENTOS APLICADA AO PROCESSO DE SOLDAGEM DE INTERCONECTORES ENTRE CÉLULAS SOLARES DE USO ESPACIAL

Graziela Fernanda de Souza Maia ¹; Alírio Cavalcanti de Brito ²; Marcelo Lopes de Oliveira e Souza ³, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

RESUMO

Este artigo apresenta uma técnica de projeto e de análise de experimentos aplicada ao processo de soldagem de interconectores entre células solares de uso espacial, como parte de uma pesquisa de mestrado em andamento no INPE. Esta é a primeira etapa da otimização de um processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. Esse tipo de processo é utilizado em diversos segmentos industriais (como automotivo, médico, eletroeletrônico, aeroespacial, entre outros) na soldagem de interconexões de células solares, que é a aplicação deste trabalho. Para este estudo, os parâmetros selecionados foram: a tensão de soldagem, o tempo de soldagem, a força de aplicação do eletrodo sobre a peça e a energia. A variável de resposta escolhida foi o teste de resistência à tração exercida no local da soldagem. Com a realização dos experimentos e a análise dos dados preliminares obtidos pelo software MINITAB, verifica-se que o parâmetro mais significativo baseado no banco de dados disponível, foi a tensão de soldagem, já as interações entre parâmetros mais significativas estatisticamente foram a tensão de soldagem *versus* o tempo de soldagem e a tensão de soldagem *versus* a energia. Após estas análises preliminares, foi possível entender como os parâmetros e as suas interações afetam a variável de resposta e, consequentemente, o processo de soldagem. Isto guiará a futura otimização do processo de soldagem a ponto.

1. INTRODUÇÃO

A frequente busca por redução de prazos e custos com aumento da qualidade, pela otimização, ainda nas fases de concepção e desenvolvimento dos processos referentes à fase de fabricação e lançamento, aliada a uma gestão eficaz e eficiente dos processos da fase de desenvolvimento de produtos, têm se tornado fatores essenciais para manter as organizações em um mercado extremamente competitivo. Nas empresas competitivas, o período entre as fases de concepção e de desenvolvimento de produtos e as fases de fabricação e lançamento no mercado é cada vez mais curto, para superar as organizações concorrentes [1]. Os processos da fase de desenvolvimento de produtos são considerados importantes indicadores para medir a competitividade da empresa [2]. Quaisquer falhas nesses itens causarão riscos inaceitáveis.

Assim, uma maneira de alcançar competitividade e atender às necessidades de *stakeholders* é a utilização das Técnicas de Projeto e Análise de Experimentos (do Inglês *Design of Experiments – DoE*) ainda nas fases de concepção e desenvolvimento de produtos, visando a otimização de processos da fase de fabricação. Os conceitos dessa técnica são aplicados nas organizações para melhorar a qualidade de produtos e assegurar a satisfação de *stakeholders*[3].

A Figura 1 ilustra que, nas fases iniciais do projeto, o custo comprometido do projeto é muito maior que o custo despendido, ou seja, quando 20% do custo total do projeto já foram

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

despendidos, 80% do custo total do projeto já estão comprometidos devido a decisões de projeto. Ela se baseia numa análise estatística realizada em projetos no DoD (*Department of Defense*) dos EUA, conforme relatado pela DAU (*Defense Acquisition University*), citado por [4]. Por isso, as melhorias são mais viáveis nas fases iniciais do projeto [4].

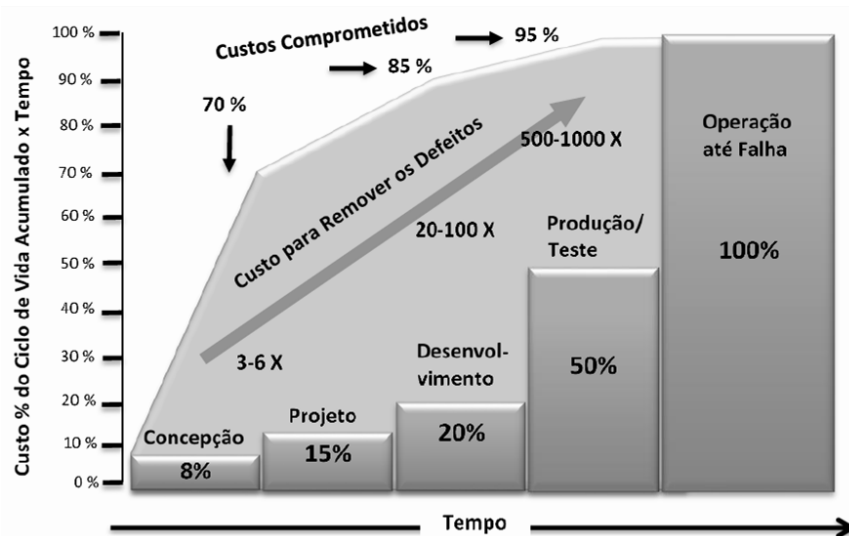


Fig. 1– Custos de um projeto durante o ciclo de vida. Fonte: Adaptada de [4] Tradução nossa.

Com o intuito de atender requisitos rigorosos de qualidade, condições severas são impostas tanto sobre os fatores do projeto como no controle de fabricação do painel solar, afetando: 1) sobretudo a sua confiabilidade; 2) o perfil de potência elétrica que deve ser gerado ao longo da missão do satélite [5].

Na fase de fabricação do painel solar, um dos processos mais críticos é a soldagem dos interconectores nas células solares. Por isso, se faz necessária a determinação dos parâmetros ótimos de soldagem que contribuem para uma solda de boa qualidade, assegurando uma boa fusão entre as partes, sem que haja a degradação do dispositivo semicondutor devido ao processo de soldagem. Isto pode ser verificado por meio do teste de resistência à tração [5]. Isto garantirá o contato elétrico e o desempenho da célula solar após a soldagem.

As interconexões são responsáveis por conduzir a corrente elétrica de uma célula para a próxima e, no final de uma série de células solares, para um terminal ou ponto de interligação. Elas podem ser constituídas simplesmente por fios, mas são tipicamente encontradas no formato de fitas de metal moldadas com espessuras bem finas, podendo chegar a 12 μm [6,7]. Na Figura 2 são mostrados os interconectores soldados a uma célula solar.

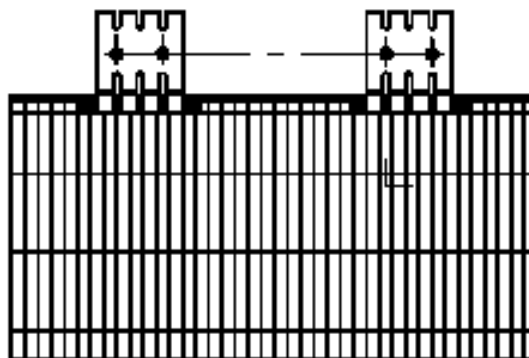


Fig. 2 – Interconectores soldados a uma célula solar. Extraída de [7].

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

Este artigo apresenta uma técnica de projeto e de análise de experimentos aplicada ao processo de soldagem de interconectores entre células solares de uso espacial, como parte de uma pesquisa de mestrado em andamento no INPE. Para isto, utiliza um banco de dados de experimentos realizados, com o objetivo de encontrar os parâmetros do processo de soldagem que interferem na qualidade da solda do interconector à célula solar de uso espacial. Este artigo está assim organizado: a Seção 2 descreve alguns conceitos importantes utilizados para o desenvolvimento deste trabalho; a Seção 3 apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho; a Seção 4 apresenta os resultados preliminares; a Seção 5 faz sua discussão; e a Seção 6 apresenta as considerações finais. Este artigo foi desenvolvido em parceria com uma indústria do setor aeroespacial localizada no Estado de São Paulo.

2. CONCEITOS BÁSICOS

2.1. Interconexões de células solares

As interconexões presentes entre as células solares em geral falham devido à fadiga que ocorre nas soldas, principalmente, devido a esforços mecânicos induzidos pela ciclagem de temperatura. E esse tipo de falha afeta de forma direta a qualidade, sobretudo a confiabilidade, do painel solar em sua fase de operação [8].

As falhas das juntas soldadas nas interconexões entre células solares podem comprometer ou até mesmo incapacitar o painel solar de fornecer energia aos subsistemas que mantêm o satélite ou veículo espacial operacional [9].

Um dos fatores que determinam a qualidade, especialmente a confiabilidade, dos painéis solares usados em aplicações espaciais é a soldagem das interconexões existentes entre células solares adjacentes. A disposição dessas células determina a capacidade do painel de converter a energia solar em energia elétrica. Portanto, sob o ponto de vista da confiabilidade uma das principais preocupações dos fabricantes de painéis solares é a qualidade das soldas existentes nas interconexões das células. Uma maneira de se obter o aumento da confiabilidade é por meio da realização de um projeto de experimentos e de uma análise minuciosa do processo de soldagem. Com essas duas ferramentas da qualidade pretende-se guiar a otimização do processo de soldagem [10].

A qualidade da solda é verificada por meio de testes de resistência à tração de ruptura realizados em corpos de prova. Os valores de resistência máxima de ruptura são considerados um importante índice utilizado na avaliação da qualidade do processo de soldagem por resistência elétrica, além de ser comumente aplicado na indústria para avaliação do processo [11].

2.2. Processo de soldagem

O processo de soldagem a ponto por resistência é um método de soldagem moderno, que é comumente encontrado na indústria de produtos aeroespaciais, de eletrodomésticos e no setor automotivo [12,13]. No segmento automotivo se destaca devido a: alta produtividade; baixa exigência de experiência do operador; baixo custo operacional; adaptabilidade para automação em montagem de linhas de fabricação, quando equiparado a outros processos de união; não há metal de adição, pois o ponto é gerado por meio da fusão das peças, não agregando peso ao produto; facilidade de soldar formas complexas; menor Zona Termicamente Afetada – ZTA em relação a outros processos de soldagem [14].

O processo de soldagem a ponto por resistência elétrica consiste na união de duas peças metálicas por meio da aplicação de uma corrente elétrica através de eletrodos, com objetivo de

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

gerar calor suficiente no ponto de pressão dos eletrodos, para que o material metálico atinja seu ponto de fusão. Neste instante a lente de solda (ou lentilha) se forma e, quando a corrente é cessada, a mesma se solidifica produzindo a junção das peças [12].

Para soldagem de interconexões em células solares é utilizado o processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos, de acordo com [6] este é o único processo de soldagem por resistência capaz de soldar estes componentes. Na Figura 3 é apresentado o referido processo.

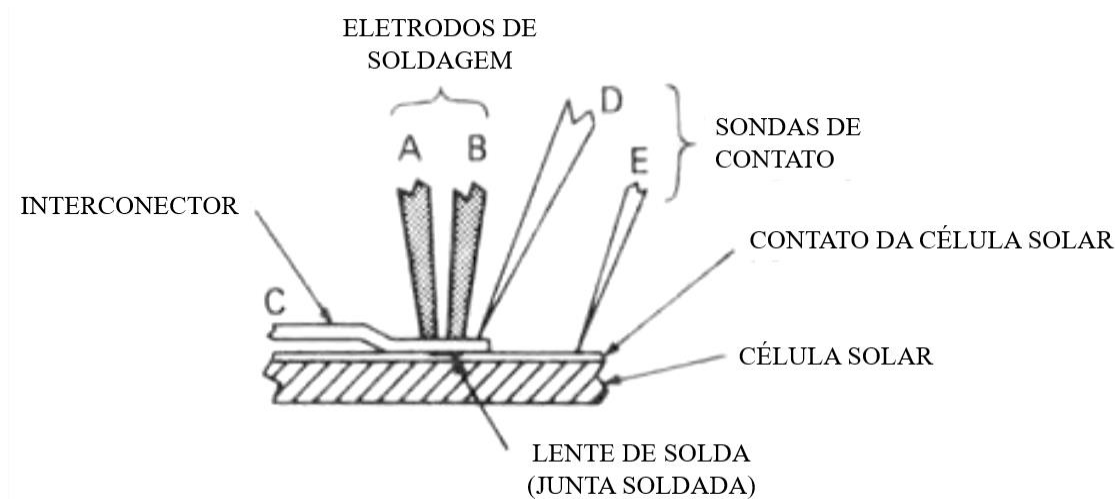


Fig. 3 – Processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos. Adaptada de [6].

O processo de soldagem da Figura 3 consiste em: um par de eletrodos espaçados por uma distância pré-determinada que entra em contato com a peça (interconector da célula solar); a corrente elétrica flui através dos eletrodos e parte da interconexão que está logo abaixo e no centro dos eletrodos; o calor gerado na resistência oferecida pela peça de trabalho eleva a temperatura da peça a ser soldada até a temperatura de soldagem (ponto de fusão ou acima); a pressão exercida pelos eletrodos na peça de trabalho facilita a junção. [6;15]. Este é o único processo de soldagem prático para interconexões de células solares [6].

Os eletrodos são presos em dispositivos ajustáveis. A largura da abertura entre eles, depende do material usado e varia de 0,025 a 1,00 mm. Já a corrente de soldagem varia entre 100 a 1000 A. O tempo de soldagem tem uma faixa de 1 a 100 ms. E a força do eletrodo sobre as peças a serem soldadas varia de 0,2 a 100 N [16].

2.3. Projeto de Experimentos

Projeto de Experimentos é uma técnica que se refere ao processo de planejar experimentos de maneira que os dados adequados possam ser obtidos e analisados por meio de métodos estatísticos, que resultam em conclusões válidas e objetivas [17]. Assim, o principal objetivo desta técnica é avaliar como as alterações em fatores de entrada afetam os resultados, ou respostas do experimento.

De acordo com [17], as diretrizes que devem ser seguidas nesta metodologia para alcançar o sucesso são apresentadas na Figura 4:

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

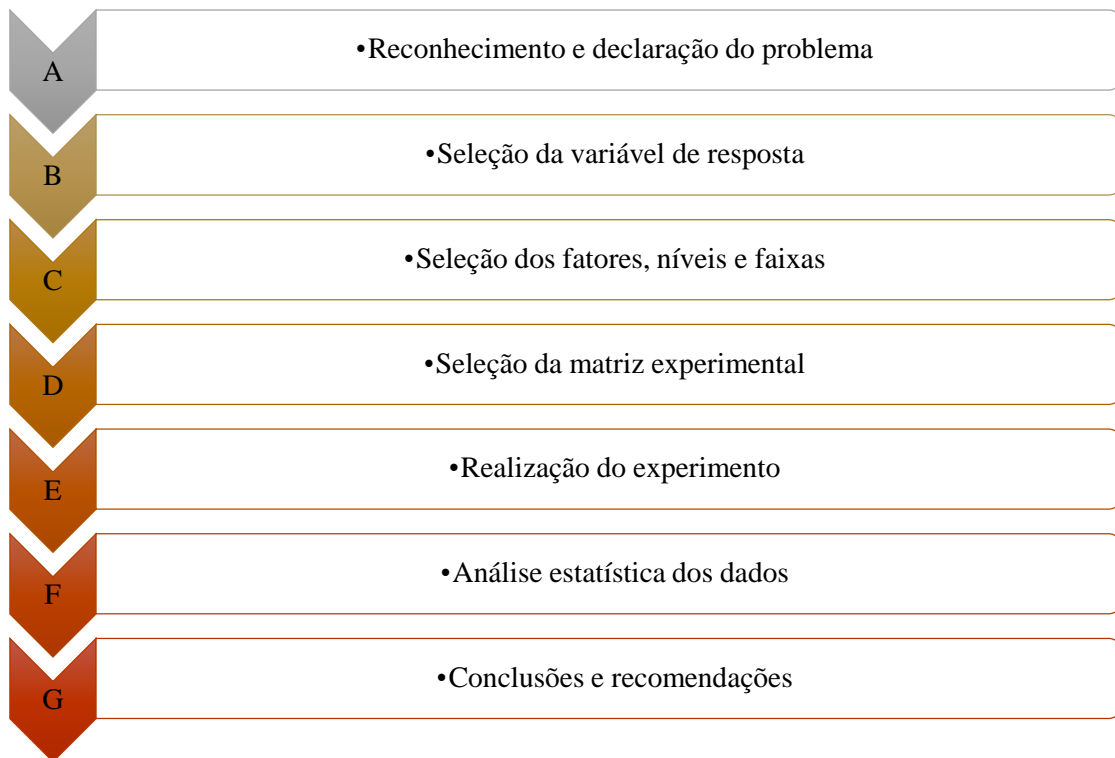


Fig. 4– Diretrizes para um Projeto de Experimentos. Adaptada de [17].

Cada uma das diretrizes da técnica de Projeto de Experimentos apresentadas na Figura 4 é descrita brevemente a seguir, de acordo com [17].

A. Reconhecimento e declaração do problema: é necessário solicitar as informações de todos os *stakeholders* envolvidos no problema a ser analisado. Em geral, uma afirmação de forma clara sobre o problema, contribui grandemente para uma melhor compreensão do fenômeno em estudo e da solução final do problema.

B. Seleção da variável de resposta: é necessário saber se a variável de resposta escolhida fornece informações úteis sobre o processo em estudo. Também é necessário determinar como ela será medida e se o instrumento utilizado nesta medição está calibrado.

C. Seleção dos fatores, níveis e faixas: ao selecionar os fatores que podem influenciar o desempenho de um processo ou de um sistema, o pesquisador terá os fatores potenciais (que poderão ser variados ou mantidos constantes nos experimentos) e os fatores chamados comumente de ruídos.

D. Seleção da matriz experimental: quando as etapas anteriores são realizadas da maneira correta, a seleção da matriz experimental é facilmente executada. Este passo é baseado no tamanho da amostra, na ordem de execução dos experimentos e se há ou não randomização. Normalmente são utilizados softwares estatísticos nesta etapa.

E. Realização dos experimentos: a execução dos experimentos é a etapa essencial e deve ser monitorada de forma cuidadosa para garantir que os experimentos saiam conforme o planejado. Por isso, as três primeiras etapas são cruciais para o sucesso da otimização. É recomendado fazer alguns testes a fim de validar as etapas apresentadas de A a D.

F. Análise estatística dos dados: a ferramenta estatística é utilizada para analisar os dados, assim, os resultados e as conclusões serão objetivos, e não julgados. Várias perguntas do

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

analista que busca respostas podem ser alcançadas em uma estrutura de testes de hipóteses, os procedimentos de teste de hipóteses e a estimativa de intervalo de confiança são de grande utilidade na análise de dados de um experimento planejado. É comum ainda, apresentar os resultados dos testes na forma de equação que deriva dos dados que demonstram a relação entre a variável de resposta e os fatores importantes. A análise residual e a verificação de adequação do modelo também são importantes na análise.

G. Conclusões e recomendações: assim que o pesquisador analisa os dados é necessário inferir conclusões práticas a respeito dos resultados e assim fazer recomendações sobre qual ação deve ser tomada. Em geral, os métodos gráficos são úteis para apresentar os resultados às demais pessoas, envolvidas ou não no processo. Também devem ser realizados teste e acompanhamentos afim de validar as conclusões e recomendações do experimento.

3. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo foi adaptada da apresentada na Figura 4, de acordo com o cenário atual, ou seja, ainda não era possível, nesta etapa do trabalho, realizar experimentos; então foram levantados, em um banco de dados, os fatores, seus níveis e faixas de acordo com o desejado. Esta metodologia adaptada é apresentada no fluxograma da Figura 5, ilustrando as etapas seguidas.

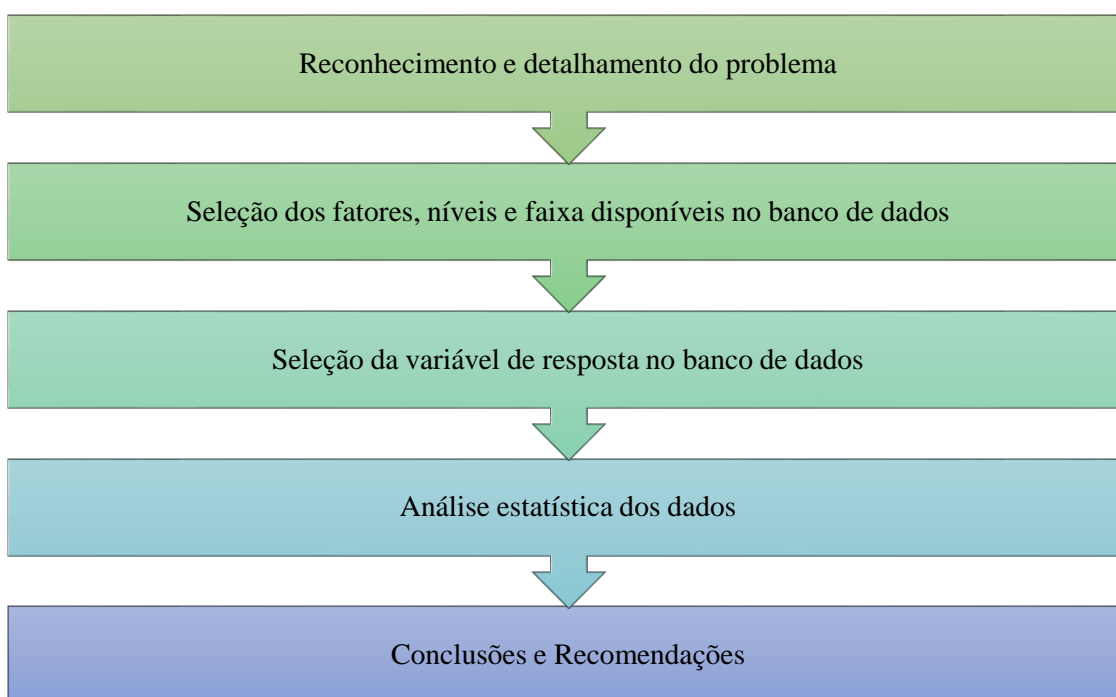


Fig. 5– Metodologia aplicada neste trabalho.

4. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

De acordo com a metodologia apresentada anteriormente, as informações referentes ao processo de soldagem foram coletadas no banco de dados e analisadas com o auxílio do software MINITAB® 17. O extrato dos dados analisados está apresentado na Figura 6.

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	9	12,7992	1,42213	12,11	0,000
Linear	4	1,7721	0,44302	3,77	0,017
Força	1	0,1325	0,13253	1,13	0,300
Tensão	1	0,4599	0,45989	3,92	0,060
Tempo de Solda	1	0,1802	0,18024	1,54	0,228
Energia	1	0,2395	0,23952	2,04	0,167
Interações de 2 fatores	5	3,3290	0,66580	5,67	0,002
Força*Tensão	1	0,0063	0,00632	0,05	0,819
Força*Energia	1	0,0969	0,09689	0,83	0,373
Tensão*Tempo de Solda	1	1,3357	1,33571	11,38	0,003
Tensão*Energia	1	0,4824	0,48236	4,11	0,055
Tempo de Solda*Energia	1	0,0965	0,09648	0,82	0,374

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,342652	83,21%	76,34%	0,00%

Fig. 6 – Análise dos dados. Fonte: Extraído do MINITAB® 17.

Analisando os dados e os conceitos relacionados às variáveis S [erro aleatório] e R2(Aj) [R-quadrado ajustado] apresentadas na Figura 6, têm-se baseado em [12] que:

- ❖ O erro aleatório demonstra a variabilidade média sobre a linha de regressão; assim, quanto mais próximo de zero é o seu valor, mais adequado é o modelo matemático obtido para a variável de resposta;
- ❖ O R-quadrado ajustado demonstra se os dados de regressão podem ser utilizados, sendo estes somente utilizados quando o valor desta variável é maior que 70%; assim, pode-se concluir que o R2(Aj) mede o quão bom é o modelo matemático.

Baseado nos conceitos acima e nos dados da Figura 6, pode-se dizer que o modelo matemático obtido por meio do experimento fatorial completo é aceitável, pois obteve para o erro aleatório um valor de 0,1342652 e para o R-quadrado ajustado 76,34%.

O Gráfico de Pareto dos efeitos apresentado na Figura 7 mostra quais fatores e interações entre fatores são mais significativos para a variável de resposta, ou seja, as barras que se cruzam a linha de referência são estatisticamente significativas.

O Gráfico de Pareto dos efeitos deve ser analisado em conjunto com o Gráfico *Half Normal* dos efeitos, apresentado na Figura 8, que tem por objetivo determinar a magnitude e a importância dos efeitos, assim, os efeitos que estão mais afastados da linha de referência, são estatisticamente significativos. A cor e a forma dos pontos diferem entre os efeitos estatisticamente significativos e estatisticamente não significativos.

Assim, é possível identificar que a tensão de soldagem foi o parâmetro mais significativo para o teste de resistência à tração, baseado nos gráficos e no banco de dados disponível.

Já as interações entre parâmetros que se destacaram em relação a variável de resposta, foram: tempo de soldagem *versus* a tensão de soldagem; tensão de soldagem *versus* a energia.

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

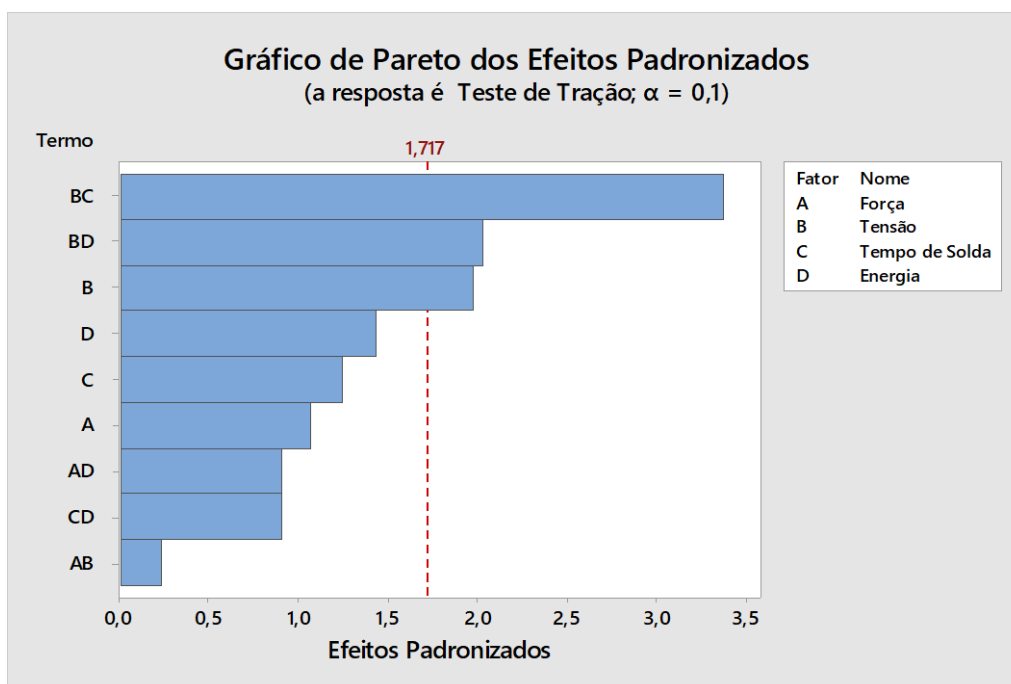


Fig. 7 – Gráfico de Pareto dos Efeitos. Fonte: Extraído do MINITAB® 17.

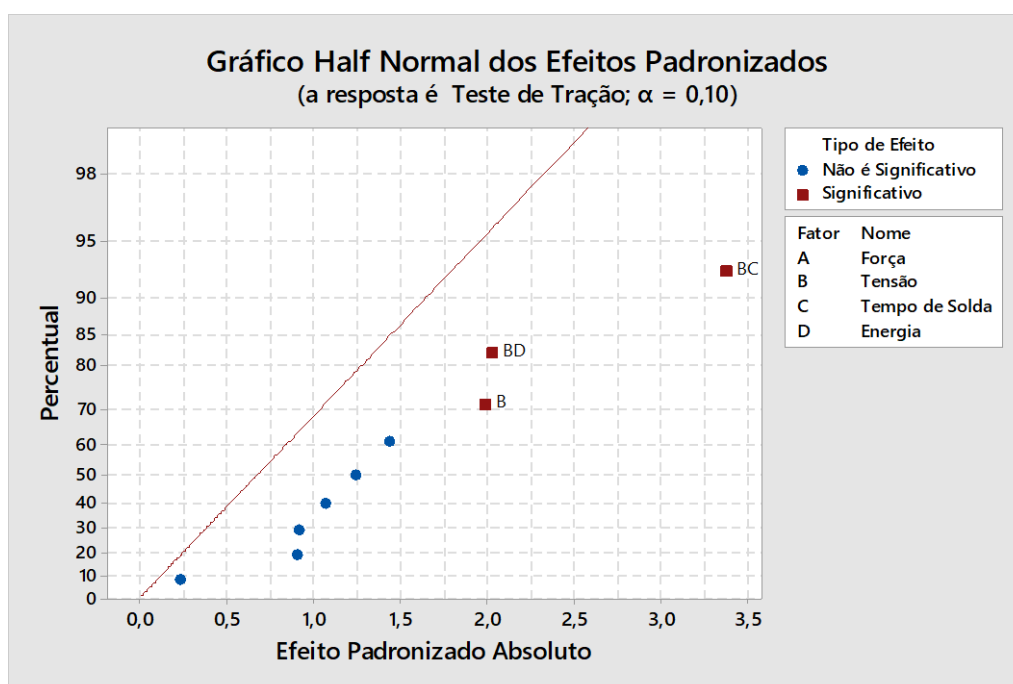


Fig. 8 – Gráfico Half Normal dos Efeitos. Fonte: Extraído do MINITAB® 17.

A análise dos gráficos apresentados na Figura 9 é realizada com base na variação que a mudança do nível mínimo para o máximo promove na variável de resposta; portanto, quanto maior for a variação na resposta, mais significativo é o fator em análise.

De acordo com o gráfico dos efeitos principais de cada fator para o teste de tração, apresentado na Figura 9, é possível verificar os fatores que mais se destacam são: energia, tensão

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

de soldagem e tempo de solda; a força que o eletrodo exerce sobre a peça também se destacou, porém com uma intensidade menor.

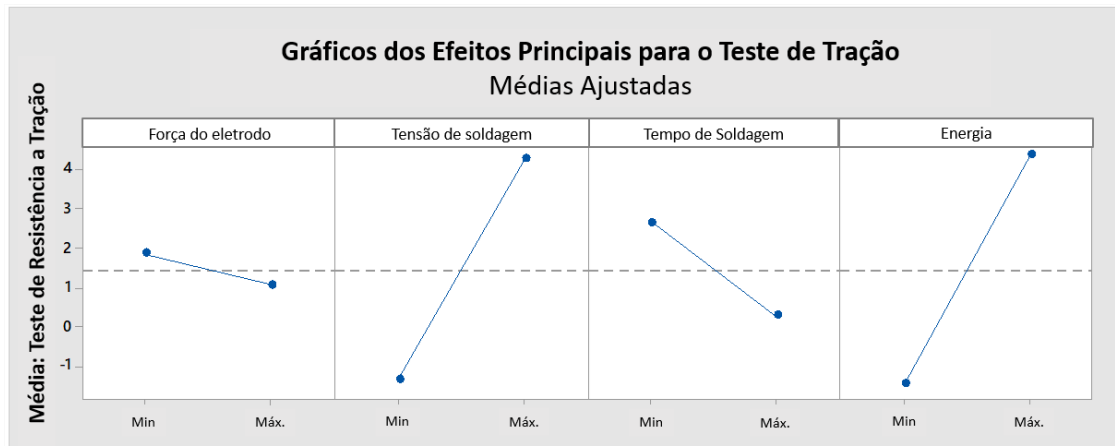


Fig. 9 – Gráficos dos efeitos principais de cada parâmetro para o teste de resistência à tração.
Fonte: Extraído do MINITAB® 17.

Para analisar os gráficos dos efeitos principais em relação à resistência à tração, apresentados na Figura 10, entende-se que, quanto mais inclinadas as retas estão uma em relação à outra, maior é a influência das interações dos fatores na variável de resposta.

Observa-se então que as interações entre fatores que se destacam em relação à variável de resposta são: a tensão de soldagem *versus* o tempo de soldagem; e a tensão de soldagem *versus* a energia; tempo de soldagem *versus* energia.

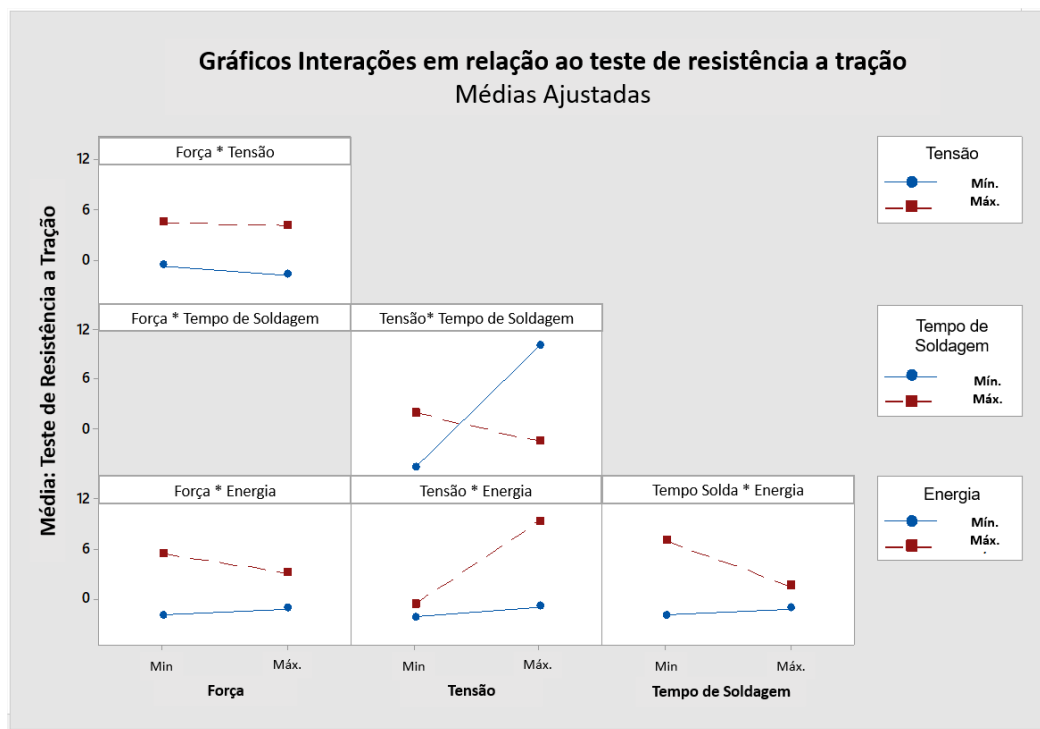


Fig. 10 – Gráficos dos efeitos principais das interações para o teste de resistência a tração.
Fonte: Extraído do MINITAB® 17.

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE
2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE
3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

A técnica de projeto de experimentos utilizada para esta análise preliminar do processo de soldagem revelou que o parâmetro mais significativo para esta análise preliminar baseada nos gráficos de Pareto dos efeitos e gráfico *Half* normal dos efeitos, foi a tensão de soldagem.

Já as interações entre parâmetros mais significativas baseadas nas análises e gráficos de efeitos foram: a tensão de soldagem *versus* o tempo de soldagem e a tensão de soldagem *versus* a energia, conforme pode ser observado nos gráficos apresentados anteriormente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica de projeto de experimentos aplicada ao processo de soldagem por resistência elétrica com eletrodos paralelos artigo revelou que, o parâmetro mais significativo foi a tensão de soldagem. E as interações entre parâmetros mais significativas foram: a tensão de soldagem *versus* o tempo de soldagem e a tensão de soldagem *versus* a energia.

Diante dos resultados encontrados, será realizado, em breve, um levantamento com os fatores, seus níveis e faixas combinados a fim de comparar esta nova pesquisa baseada em um planejamento de experimentos, com análises semelhantes encontradas na literatura.

Após essa comparação entre os novos dados, realizar a aplicação da metodologia de superfície de resposta, que é uma técnica estatística utilizada para a modelagem e análise de problemas nos quais a variável resposta é influenciada por vários fatores, cujo objetivo é a otimização dessa resposta e consequentemente a otimização do processo e melhorando a confiabilidade do painel solar.

REFERÊNCIAS:

- [1] MOURA, M. J. C., DROGUETT, E. L., JACINTO, C. M. C. “Testes Acelerados de Vida para o crescimento da Confiabilidade de produtos em desenvolvimento”. XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de outubro. (2006);
- [2] ARAÚJO, J. G. P., COSTA, M. A. B. “Gestão do processo de desenvolvimento de produtos: práticas e desafios” III Congresso Internacional de Logística e Operações. Tema: Gestão estratégica e competitividade. Suzano – SP, 25 e 26 de outubro. Vol. 3. p.722-742. Serviço de Biblioteca e Informação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Suzano. (2017). ISBN: 978-85-5790-003-5;
- [3] GALDÁMEZ, E. V. C., CARPINETTI, L. C. R. “Aplicação das Técnicas de Planejamento e Análise de Experimentos no Processo de Fabricação de Produtos Plásticos”. Gestão & Produção [online], São Carlos, v. 11, n. 1, p. 121-134, Apr. (2004);
- [4] INCOSE. “Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities”. Fourth Edition. INCOSE-TP-2003-002-04 2015 John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 290p. (2015);
- [5] VAZ, J. N.; SINKA, V.; VAZ, C. C. “Determinação Experimental dos Parâmetros de Soldagem de Células Solares de Uso Espacial”. XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. p. 501-504. 11º INIC (2007). São José dos Campos – SP;

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT

- [6] RAUSCHENBACH, H. S. "Solar cell array design handbook the principles and technology of photovoltaic energy conversion". New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 549p. (1980). ISBN 0-442-26842-4;
- [7] VAZ, C. C., MAIOLINO, J. V. Manufacturing And Testing Of The Electrical Part Of Solar Array For The China-Brazil Earth Resources Satellite – CBERS 2B. 19th International Congress of Mechanical Engineering. November 5-9, 2007, Brasília, DF;
- [8] FERRO, R. J., FRANCIS, R.W., FRASCO, E.B., PAN, R.B., PIERRE-LOUIS, E., SVE, C., BERGHAUS, M., 1997. "Novel techniques for evaluation of interconnections in solar cells used for spacecraft power generation". Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference – 1997. 29 Sept. -3 Oct. (1997). Anaheim, CA, USA, USA. DOI: 10.1109/PVSC.1997.654246;
- [9] BRENNAN, P. S., JAMIESON, R. A., GARCIA, A., MALACHESKY, P. A., SIMBURGER, E. J., 1994. "Evaluation of welded interconnects on thermally cycled silicon solar cells". Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC). IEEE. Waikoloa, HI, USA. (1994) DOI: 10.1109/WCPEC.1994.520767;
- [10] MAIA, G. F. S.; BRITO, A. C.; SOUZA, M. L. O. "Análise Preliminar dos Parâmetros e Interações do Processo de Soldagem de Interconexões entre Células Solares Empregando Projeto de Experimentos Visando sua Futura Otimização". II Congresso Aeroespacial Brasileiro. Santa Maria – RS. (2019): No prelo;
- [11] SREENU. S., KISHORE. N., RAMACHANDRAN. N., ALLESU. K. "Regression Modeling and Process Analysis of Resistance Spot Welded Joints". 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, (2014), IIT Guwahati, Assam, Índia;
- [12] SOUZA, M. T. S., FERNANDES, M. M. e MIRANDA, R. C. "Otimização dos parâmetros de soldagem a ponto por resistência em uma indústria automotiva por meio da análise de experimentos e metodologia de superfície de resposta". Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal). V. 22 (2): 131 – 140, Jul. – dez. (2013). ISSN 1983-4071;
- [13] LIU, J. "A Study on the Influence Factors of Parallel-Gap Welding Heat". 18th International Conference on Electronic Packaging Technology. August 16 to 19, 2017 (ICEPT 2017). IEEE. Harbin, China. (2017). Electronic ISBN: 978-1-5386-2972-7;
- [14] ÁVILA, T. L. D. e BRACARENSE, A. Q. "Influência dos Parâmetros de Soldagem no Ensaio de Torção de Solda a Ponto em um Dispositivo Automatizado Recém Desenvolvido". Soldagem & Inspeção. Vol. 22 (2): 228-237. (2017);
- [15] STEINMEIER, D. "Resistance Welding –Parallel Gap Welding Basics" 04. Arcádia, CA 91007. Micro Joining Solutions – micro Tips TM. (2010). Disponível em: <http://www.microjoining.com/docs/1352551414_microtip_resistance_parallel_gap_welding.pdf>. Acesso em: 21 de agosto de 2018 às 15h45;
- [16] GROTE, H-K, ANTONSSON, E. K. "Springer Handbook of Mechanical Engineering". New York, USA. Springer. 1576p. (2009). E-ISBN: 978-3-540-30738-9;
- [17] MONTGOMERY, D. C. "Design and Analysis of Experiments". Ninth Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. (2017). ISBN 9781119299363 (pdf).

1 Mestranda em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

2 Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE

3 Ph.D. em Aeronáutica e Astronáutica pelo MIT