

# UM ESTUDO UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS ÓTIMOS EM SOLDAGEM

*José Luiz Fernandes<sup>1</sup>  
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo<sup>2</sup>  
Santiago Ramirez Carvajal<sup>3</sup>*

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo estudar os parâmetros ótimos da soldagem de reparo de um componente do motor G.E. CF6-50, denominado selo dianteiro de ar rotativo (SARD) localizado na turbina de alta pressão. O processo de soldagem empregado para o reparo do SARD (que é de inonel 718 liga, uma liga níquel-baseada) foi Dabber-TIG com arame pulsado. Identificou-se que as variáveis de resposta pertinentes a esta análise eram a altura e a largura do cordão de solda. Na identificação dos parâmetros ótimos de soldagem utilizou-se a técnica estatística de planejamento fatorial com dois níveis considerando somente 16 experimentos e análise de variância (ANOVA) utilizando o programa Statistica 6.0. Foi identificado que para a altura do cordão de solda os efeitos principais significantes são a velocidade de soldagem, velocidade do arame e corrente de soldagem. Para a largura do cordão de solda identificou-se como efeitos principais significantes a corrente de soldagem, a voltagem do arco e a velocidade de soldagem.

**Palavras-chave:** Soldagem de reparo dabber TIG; Planejamento fatorial de experimentos; Inonel 718.

## INTRODUÇÃO

Na indústria aeronáutica os processos de fabricação dos componentes de uma aeronave são muito caros e complexos. Em vista deste fato, em vez de sucatear componentes desgastados ou fraturados em serviço, utiliza-se com muita frequência a soldagem de reparo.

O objeto de estudo deste trabalho é o selo de ar rotativo dianteiro (forward rotating air seal), denominado SARD, do motor G.E. CF6-50 empregado em aeronaves civis e se localiza na turbina de alta pressão deste motor. O SARD, fabricado com inconel 718, uma liga à base de níquel, se destina à refrigeração das palhetas do primeiro e do segundo estágios da turbina de alta pressão do motor aeronáutico G.E. CF6-50. Autores como Anderson (1985 e 1986), Alles (1985), Lopez (1990) e Fernandes (1997) mostram os problemas causados quando o SARD se danifique.

O processo de soldagem empregado no reparo do SARD foi o Dabber TIG com arame pulsado. A soldagem Dabber TIG permite minimizar a extensão da zona afetada pelo calor (ZAC). O procedimento de soldagem para o reparo do SARD encontra-se descrito em Fernandes (1997, 2003 e 2004a).

Fernandes *et al.* (2004b) utilizando a técnica estatística de planejamento fatorial de dois níveis, com 5 variáveis (fatores) e 2 replicações, totalizando 64 ensaios, identificou que os parâmetros ótimos de soldagem de reparo Dabber TIG do SARD, foram a corrente de soldagem (I), a tensão de arco elétrico (V), a frequência de pulsação ou dabber (D), a velocidade de alimentação do arame (A) e a velocidade de soldagem (S) e que as respostas relevantes para esta análise são a altura e a largura do cordão de solda.

O objetivo do presente trabalho é mostrar que somente 16 dos 64 ensaios, ou seja, um número menor de ensaios que os usados por Fernandes (1997 e 2004b) são necessários para caracterizar os parâmetros ótimos de soldagem de reparo Dabber TIG do SARD. Todas as análises estatísticas foram realizadas no aplicativo Statista 6.0.

## METODOLOGIA

Segundo Daniel (1976), a definição e a escolha das variáveis de soldagem, bem como as respostas do planejamento fatorial de experimentos, não fazem parte do conhecimento estatístico e estão relacionadas com a experiência do especialista. Além do mais, quando se realizam experimentos, deseja-se estudar o efeito de um ou mais *fatores* sobre uma *variável de resposta*. Cada *fator* contribui em quantidades ou categorias pré-fixadas chamadas *níveis*. Toda combinação de níveis dos diferentes fatores é chamada de *combinação de tratamentos*. O conjunto das combinações de tratamentos utilizadas determina o planejamento experimental correspondente, que é chamado de *planejamento fatorial*.

No método de planejamento fatorial de experimentos em 2 níveis, quando analisam-se cinco parâmetros, o método é denominado  $2^5$ . Este método utiliza-se de 32 combinações de tratamentos replicadas para estudar os parâmetros. Os valores assumidos por estes parâmetros são dispostos em uma tabela de valores +1 e -1, chamada de Matriz de Yates, como mostrado na tabela 1. Nesta matriz, os sinais (-) e (+) significam, respectivamente, os limites inferior e superior da variável independente na faixa de variação previamente selecionada para o parâmetro em estudo.

De acordo com Montgomery (1997), uma fração completa do planejamento fatorial de experimentos é denominada de planejamento fatorial fracionado. No caso dos 32 experimentos considerou-se uma fração com 16 experimentos e um poder de

resolução de V. Nesta análise consideraram-se as iterações de 3, 4, ou 5 fatores, como sendo desprezíveis. O planejamento fracionário de experimentos considerou todas as combinações de tratamento do planejamento fatorial completo para a qual o produto da coluna de I\*V\*A\*S\*D é igual a +1, como mostrado na Tabela 2.

**Tabela 1.** Matriz de Yates para um planejamento fatorial de experimentos em dois níveis com cinco variáveis (2<sup>5</sup>), totalizando 32 experimentos.

No	Trat.	I	V	A	S	D	IV	IA	IS	VS	IAS	ID	VD	AD	SD	IVA	IVS	IAS	VAS	IVD	IAD	VAD	ISD	VSD	ASD	IVAS	IVAD	IVSD	IASD	VASD	IVASD	RESULT.					
1	(1)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	y1						
2	i	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	y2					
3	v	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	y3					
4	iv	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y4					
5	a	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	y5				
6	ia	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y6				
7	va	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y7				
8	iva	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y8				
9	s	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	y9			
10	is	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y10			
11	vs	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y11			
12	ivs	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y12			
13	as	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y13			
14	ias	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y14		
15	vas	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y15		
16	ivas	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y16		
17	d	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y17		
18	id	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y18		
19	vd	-	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y19	
20	ivd	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y20	
21	ad	-	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y21	
22	iad	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y22	
23	vad	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y23	
24	ivad	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y24	
25	sd	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y25	
26	isd	+	-	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y26	
27	vsd	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y27	
28	ivsd	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y28	
29	asd	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y29	
30	iasd	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y30	
31	vasd	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y31	
32	ivasd	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	y32

**Tabela 2.** Matriz de Yates para um planejamento fatorial fracionado de experimentos em dois níveis com cinco variáveis (2<sup>5</sup>), totalizando 16 experimentos.

Nº	Trat.	I	V	A	S	D	IVASD	Result.
1	i	+	-	-	-	-	+	y1
2	v	-	+	-	-	-	+	y2
3	a	-	-	+	-	-	+	y3
4	iva	+	+	+	-	-	+	y4
5	s	-	-	-	+	-	+	y5
6	ivs	+	+	-	+	-	+	y6
7	ias	+	-	+	+	-	+	y7
8	vas	-	+	+	+	+	+	y8
9	d	-	-	-	-	+	+	y9
10	ivd	+	+	-	-	+	+	y10
11	iad	+	-	+	-	+	+	y11
12	vad	-	+	+	-	+	+	y12
13	isd	+	-	-	+	+	+	y13
14	vsd	-	+	-	+	+	+	y14
15	asd	-	-	+	+	+	+	y15
16	ivasd	+	+	+	+	+	+	y16

O modelo de planejamento fatorial (2<sup>k</sup>) pode ser expresso pela equação 1, onde  $\hat{y}$  é o valor estimado, ou valor ajustado, para cada resposta,  $\hat{\beta}_0$  é a estimativa da média geral do modelo,  $\hat{\beta}_i$  é a metade da estimativa do efeito principal verdadeiro do i-ésimo fator e  $\hat{\beta}_{i,j,...,k}$  é a metade da estimativa do efeito verdadeiro da interação dos fatores  $i, j, \dots, k$ . Cabe frisar que os parâmetros da equação 1 não são conhecidos e, portanto, devem ser estimados a partir dos dados coletados (Draper, 1998).

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \left[ \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j + \dots + \hat{\beta}_{12\dots k} x_1 x_2 \dots x_k \right] \quad (1)$$

O valor  $\hat{\epsilon} = y - \hat{y}$ , ou seja, a diferença entre o valor observado e o valor ajustado, é denominado resíduo. Se o efeito de um  $i$ -ésimo fator não for significativo, então  $\alpha_i$  será igual a zero. Contudo, devido ao erro experimental, a estimativa  $\hat{\alpha}_i$  não será necessariamente nula, assumindo um valor pequeno. Um teste de hipótese, como o teste F da análise de variância (ANOVA), permitirá decidir com alguma margem de erro (geralmente 5%) se  $\hat{\alpha}_i$  é significativo, isto é, diferente de zero ou não.

Para validação da ANOVA, os erros são considerados independentes e normalmente distribuídos com média zero e variância constante  $\sigma^2$ . A verificação dessas suposições é feita através da análise dos resíduos dos modelos pelo gráfico de Probabilidade Normal dos resíduos que permite verificar a condição de normalidade dos erros (Figura 1). A Figura 2 mostra gráficos dos valores pedidos pelos valores residuais e permite analisar possíveis desvios da suposição de variância constante para o modelo.

O gráfico que representa a função de densidade de probabilidade normal para os resíduos permite detectar possíveis desvios da normalidade do modelo. No caso de normalidade, os pontos devem ficar todos próximos de uma reta (Figura 1). A análise dos experimentos será realizada apenas considerando os métodos gráficos de Daniel (Figura 3) e Pareto (Figuras 4 e 5). O gráfico criado por Daniel, consiste em um *gráfico de probabilidade normal dos efeitos fatoriais*, no qual os efeitos são mostrados no eixo horizontal e o valor esperado normal corresponde no eixo vertical. A idéia básica é que os efeitos não significativos se confundem com o erro aleatório e estarão, portanto, distribuídos conforme uma normal com média zero e variância  $\sigma^2$ . No gráfico de probabilidade normal isto corresponde a se ter esses pontos sobre uma reta. Quando testamos a hipótese nula, ou seja, a hipótese de não significância dos efeitos fatoriais, os efeitos não significativos são considerados nulos enquanto que os significativos são aqueles cujo valor absoluto é muito maior do que zero. Assim sendo, os efeitos significativos serão aqueles que aparecem afastados da dita reta. Já o *gráfico de Pareto* mostra os efeitos fatoriais ordenados conforme a sua grandeza (Soong, 1981).

Segundo Draper (1998) para validação da ANOVA, tem-se que os erros são independentes e normalmente distribuídos com média zero e variância constante  $\sigma^2$ . A verificação dessas suposições é feita através da análise dos resíduos dos modelos pelo gráfico de Probabilidade Normal dos resíduos (Figura 3) que permite verificar a condição de normalidade dos erros.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No desenvolvimento do planejamento de experimentos para a identificação dos intervalos dos parâmetros de soldagem de reparo Dabber TIG, que permitem obter uma faca de selo de excelente aspecto (altura e largura do cordão de solda) e isenta de defeitos (trinca a quente de liquação, trinca de envelhecimento, inclusão de tungstênio, sobreposição, etc.), utilizou-se os intervalos de parâmetros de soldagem, mostrados na Tabela 3. Estes parâmetros permitiram reduzir ao máximo altura e a largura do cordão de solda, bem como o seu número de passes.

**Tabela 3.** Intervalos dos parâmetros ótimos de soldagem de reparo Dabber TIG.

<b>Parâmetro de soldagem</b>	<b>Máximo (+)</b>	<b>Mínimo (-)</b>
• intensidade de corrente de soldagem [A]	21,00	14,00
• tensão de arco elétrico [V]	11,20	9,50
• velocidade de soldagem [mm/s]	1,23	1,19
• velocidade de alimentação de arame [mm/s]	2,32	1,40
• frequência de pulsação de arame [pps]	2,12	1,23

O aplicativo Statistica 6.0<sup>®</sup> permitiu analisar como os parâmetros de soldagem Dabber TIG influenciam significativamente na altura e a largura do cordão de solda de reparo. Sendo assim, a Figura 1 verifica-se que tanto no caso da altura quanto na largura do cordão de solda não foram observados desvios acentuados de normalidade. A Figura 3 corresponde aos gráficos de Daniel e mostram os efeitos fatoriais significativos para a altura e largura do cordão de solda, considerando 16 ensaios.

Os modelos que correspondem ao ajuste do planejamento fatorial de experimentos para a altura e a largura do cordão de solda, ajustados à função densidade de probabilidade normal considerando 16 e 32 ensaios podem ser vistos nas equações 1 e 2 e equações 3 e 4, respectivamente.

$$\hat{Y}_{\text{ALTURA}} = 6,07 - 1,43X_S + 1,39X_A - 0,50X_I - 0,89X_A X_S \quad (1)$$

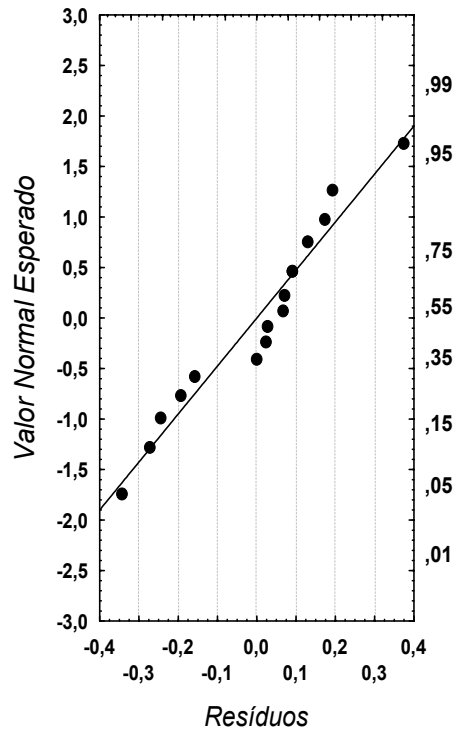
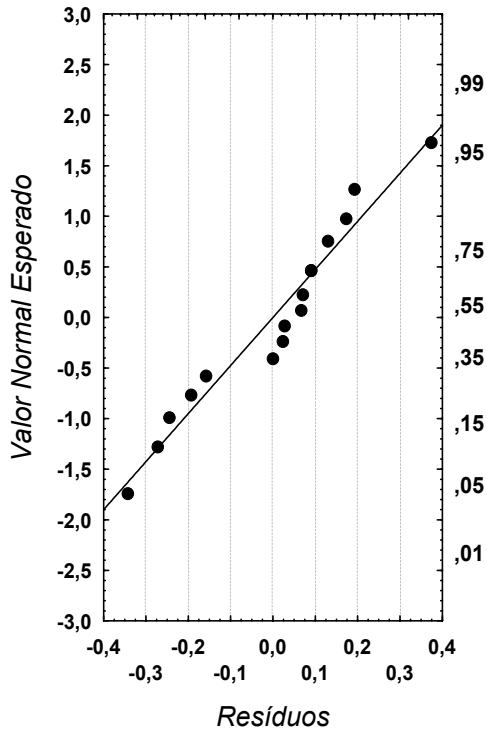
$$\hat{Y}_{\text{LARGURA}} = 2,98 + 0,32X_I - 0,24X_S + 0,16X_V + 0,09X_I X_D \quad (2)$$

$$\hat{Y}_{\text{ALTURA}} = 6,85 + 1,68X_A - 1,50X_S - 0,76X_I - 0,62X_A X_S \quad (3)$$

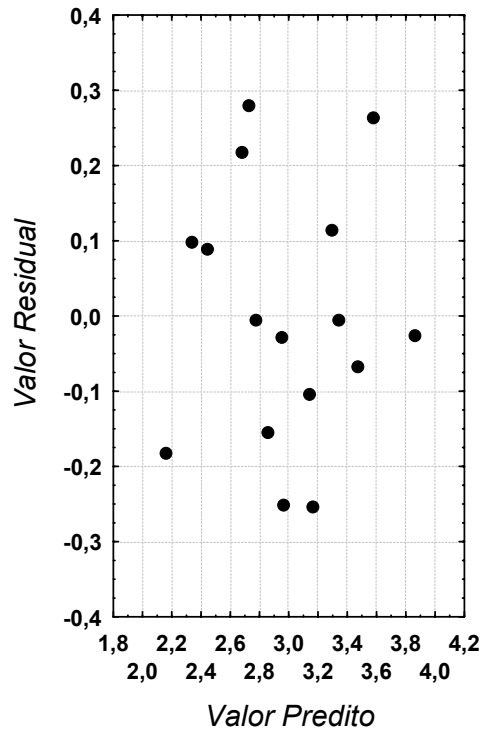
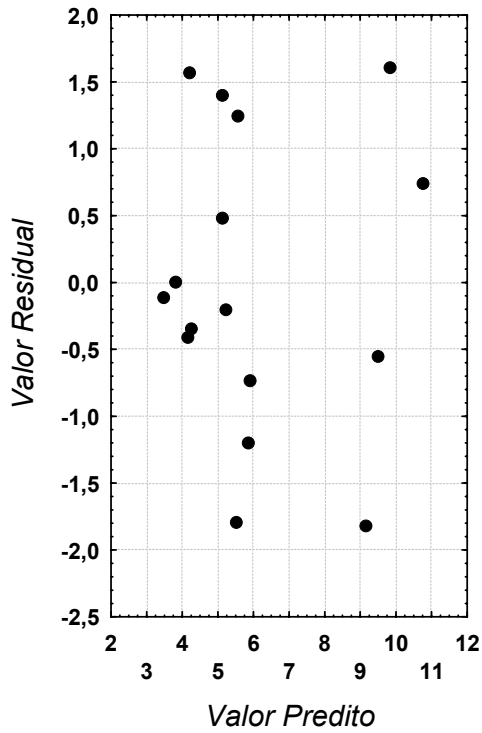
$$\hat{Y}_{\text{LARGURA}} = 2,92 + 0,27X_I - 0,21X_S + 0,09X_V + 0,08X_I X_D \quad (4)$$

A Figura 3 mostra os efeitos fatoriais ordenados segundo gráfico de Pareto para a altura e largura do cordão de solda, considerando 16 ensaios. Uma análise nas figuras 3 a 5, ou seja, nos gráficos de probabilidade para efeitos fatoriais e de Pareto para efeitos normais, mostrou que para 32 e 16 ensaios os efeitos mais importantes para *altura do cordão de solda* são *A* (velocidade de alimentação do arame), *S* (velocidade de soldagem), *I* (corrente) e a interação *AS*, e *para a largura do cordão de solda* os efeitos mais importantes são *I* (corrente), *S* (velocidade de soldagem), *V* (voltage) e a interação *ID*.

Pode-se verificar na Figura 2 que os gráficos dos valores preditos pelos valores residuais permitem analisar os possíveis desvios da suposição de variância constante para o modelo. Para o caso em estudo, a Figura 2 mostra uma situação de variância aproximadamente constante, isto é, a variância não aumenta, ou não diminui, quando os valores ajustados aumentam.



**Figura 1.** Ajuste das respostas altura (a) e largura (b) do cordão de solda à função densidade probabilidade normal para 16 ensaios.



**Figura 2.** Gráfico correspondendo aos valores preditos versus valores residuais dos efeitos fatoriais para altura (a) e largura (b) do cordão de solda considerando 16 ensaios.

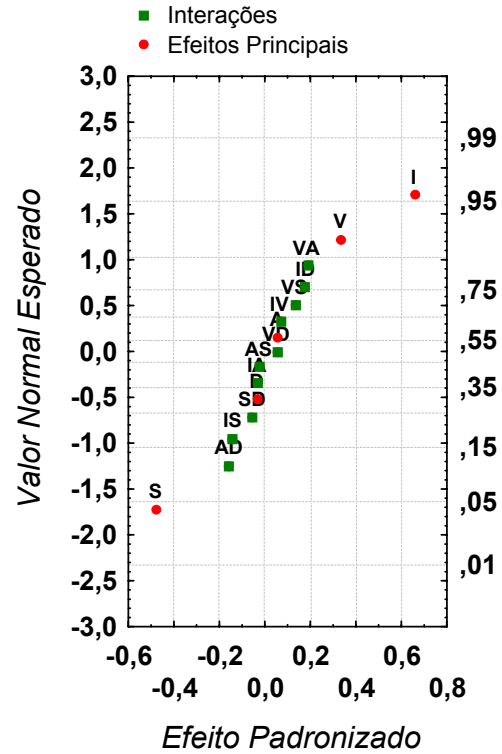
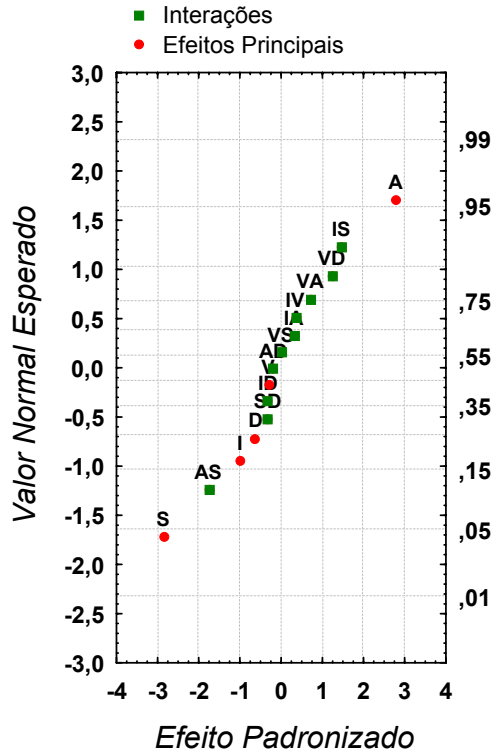


Figura 3. Gráfico de probabilidade normal para os efeitos fatoriais considerando 16 ensaios para altura (a) e largura (b) do cordão de solda.

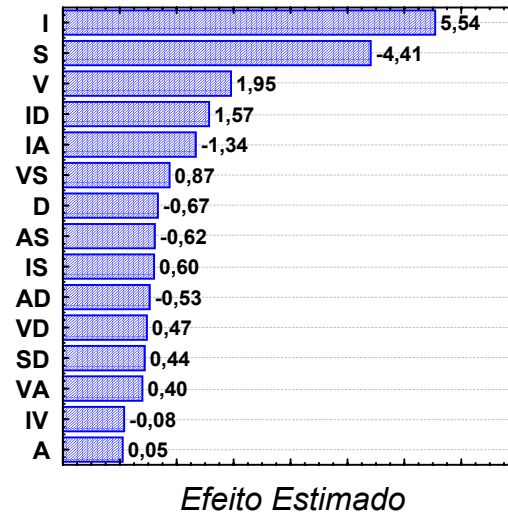
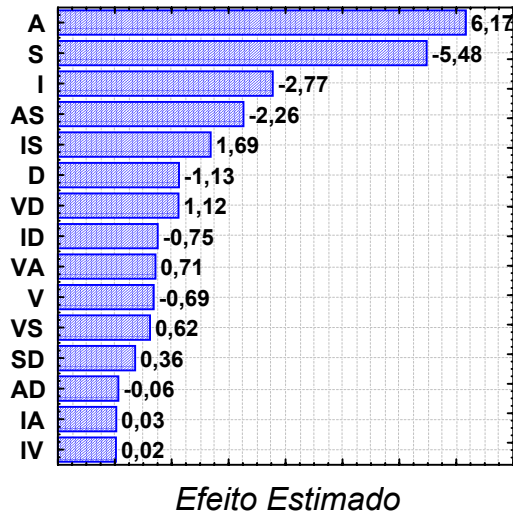
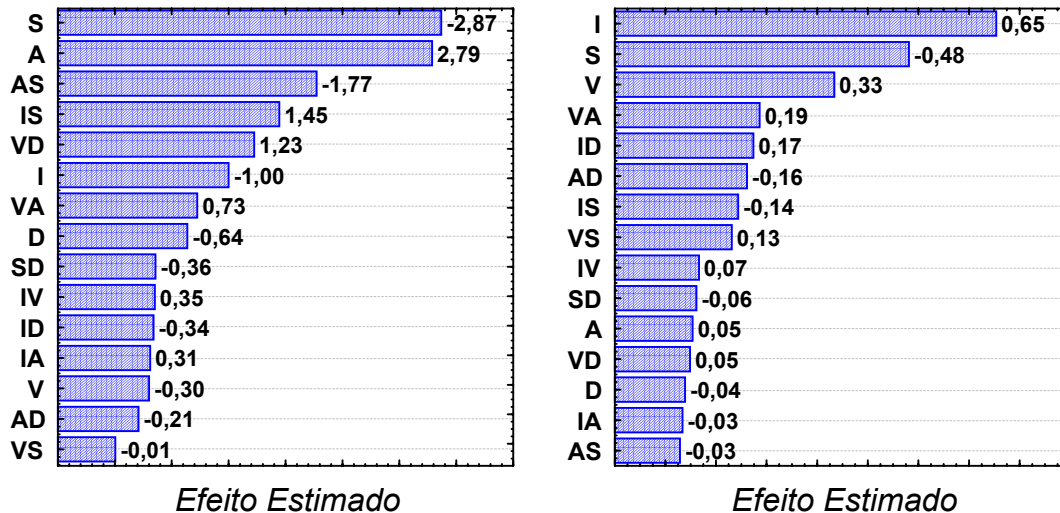


Figura 4. Gráfico de Pareto para efeitos fatoriais considerando 32 ensaios para altura (a) e largura (b) do cordão de solda.



**Figura 5.** Gráfico de Pareto para efeitos fatoriais considerando 16 ensaios para altura (a) e largura (b) do cordão de solda.

Uma comparação entre os modelos apresentados nas equações 1 a 4 mostra que com 16 ensaios, para a variável resposta largura do cordão de solda, a ordem de relevância de  $X_A$  e  $X_S$  mudam. Entretanto este fato não se torna importante porque as ordens de grandezas dos valores absolutos dos coeficientes são muito próximas em todos os casos. Além do mais pode ser observado que para a altura do cordão de solda o sinal do efeito (A) é positivo enquanto os sinais de (S), (I) e (AS) são negativos. Isto significa que para a altura há um aumento do cordão de solda quando (A) vai de um baixo nível (1,40 mm/s) para o nível alto (2,32 mm/s). O sinal negativo da variável (I) indica diminuição da altura do cordão de solda que ocorre quando a corrente é aumentada de 14 A para 21 A. Similarmente (S) reduz a altura do cordão quando aumenta-se a velocidade de soldagem de 1,19 mm/s para 1,23 mm/s.

Porém a análise do sinal negativo da interação não é tão simples, porém nos fornece uma idéia de que o sinal negativo da interação entre (A)(S) causa uma diminuição na altura do cordão de solda. Com relação a largura, o efeito de (I) é positivo mostrando que a largura aumenta quando a corrente é aumentada de 14,0 A a 21,0 A. O efeito de (V) é também positivo, ou seja, o aumento da voltagem conduz a um aumento da largura do cordão de solda. O sinal de (S) é negativo, mostrando que o aumento da velocidade de soldagem (S) implica uma diminuição da largura do cordão de solda. Os valores constantes mostrados nas equações 1 a 4 correspondem aos resultados que seriam obtidos para o caso onde havia efeitos significativos.

Vale ressaltar que os parâmetros ótimos de soldagem Dabber TIG, ou a interação entre eles, não é significativa pelo fato deles poderem assumir quaisquer valores no intervalo especificado no planejamento fatorial de experimentos. Tendo em vista que a tensão de arco elétrico e a frequência de pulsação do arame não influenciam significativamente a altura do cordão de solda, poder-se-ia chegar ao mesmo resultado obtido realizando somente 16 experimentos, de forma a fixar a frequência de pulsação de arame e a tensão de arco elétrico especificadas no planejamento fatorial de experimentos, como mostram as figuras 3 e 4 e equações 1 a 4.

As Tabelas 4 e 5 mostradas abaixo correspondem à análise de variância da altura e largura do cordão de solda para 16 ensaios. Estas tabelas mostram os efeitos significativos da altura e largura do cordão, mostrando que as variáveis em negrito



correspondem a valores de teste F (Distribuição de Snedecor) altos e valor de p (p-value) pequenos.

**Tabela 4.** Tabela correspondendo à análise de variância (ANOVA) para a altura do cordão de solda considerando 16 experimentos.

Fator	SS	G.L.	MS	F	p
I	4.0000	1	4.0000	1.9476	0.1963
V	0.3600	1	0.3600	0.1753	0.6853
A	<b>31.0806</b>	<b>1</b>	<b>31.0806</b>	<b>15.1330</b>	<b>0.0037</b>
S	<b>32.8902</b>	<b>1</b>	<b>32.8902</b>	<b>16.0141</b>	<b>0.0031</b>
D	1.6256	1	1.6256	0.7915	0.3968
AS	<b>12.5670</b>	<b>1</b>	<b>12.5670</b>	<b>6.1188</b>	<b>0.0354</b>
<b>Error</b>	18.4845	9	2.0538		
<b>Total SS</b>	101.0080	15			

**Tabela 5.** Tabela correspondendo à análise de variância (ANOVA) para a largura do cordão de solda considerando 16 experimentos.

Fator	SS	G.L.	MS	F	p
I	<b>1.7096</b>	<b>1</b>	<b>1.7096</b>	<b>36.0957</b>	<b>0.0002</b>
V	<b>0.4456</b>	<b>1</b>	<b>0.4456</b>	<b>9.4075</b>	<b>0.0134</b>
A	0.0116	1	0.0116	0.2440	0.6332
S	<b>0.9264</b>	<b>1</b>	<b>0.9264</b>	<b>19.5602</b>	<b>0.0017</b>
D	0.0060	1	0.0060	0.1268	0.7300
VA	0.1388	1	0.1388	2.9297	0.1211
<b>Error</b>	0.4263	9	0.0474		
<b>Total SS</b>	3.6641	15			

## CONCLUSÕES

A soldagem de reparo de faca de selo de ar rotativo dianteiro (SARD, “forward rotating air seal”), de motor a jato CF6-50, de inconel 718, realizada com o processo Dabber TIG com arame pulsado e empregando a técnica de planejamento fatorial de experimentos em dois níveis, permitiu observar que os parâmetros de soldagem que mais influenciam a altura do cordão de solda são a corrente de soldagem ( $X_I$ ), a velocidade de soldagem ( $X_S$ ), a velocidade de alimentação do arame ( $X_A$ ) e a interação da velocidade de soldagem com a velocidade de alimentação do arame ( $X_A X_S$ ). No caso da largura do cordão de solda, os parâmetros de soldagem que a influenciam mais significativamente são a corrente de soldagem ( $X_I$ ), a tensão de arco elétrico ( $X_V$ ), a velocidade de soldagem ( $X_S$ ) e a interação da corrente de soldagem com a frequência de pulsação do arame ( $X_I X_D$ ). Verificou-se também que o experimento com somente 16 ensaios seria suficiente para se realizar a experiência desenvolvida anteriormente por Fernandes (2003).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALLES, P.H.,(1985) Dabber welding for seal teeth repairs in jet-engine turbines, DVS-Bericht Nr. 98, Welding and Brazing in Aircraft and Spacecraft Construction, **Proceeding, 2<sup>nd</sup> International Conference**, Essen, Sept., pp. 9-14.
- 2 ANDERSON, J.R., (1985) Automatic pulsed TIG welding in fabrication and of jet engine components, **Society of Manufacturing Engineers**, 8 p.
- 3 ANDERSON, J., (1986) Synchronized TIG welding gains status in repairing jet engine components, **Welding Journal**, Vol. 64 (5), pp. 39-40.
- 4 DANIEL, C. (1976), **Applications of statistics to industrial experimentation**, Wiley.
- 5 DRAPER, N.R., (1998), **Applied Regression Analysis**, Ed. Wiley.
- 6 FERNANDES, J.L., (1997) Soldagem de Reparo TIG com Arame Pulsado (DABBER-TIG) em Faca de Selo de Inconel 718 Empregado em Turbina de Alta Pressão do Motor a Jato G.E. CF6-50, **Dissertação de Mestrado**, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ.
- 7 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., PAYÃO, J.C. e CARVAJAL, S.R.O, (2003) O Planejamento de Experimentos Fatorial Aplicado na Determinação de Parâmetros Ótimos de Soldagem, **VII Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos – VII COTEQ**, Santa Catarina, Florianópolis, 9-12 de setembro 10p.
- 8 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., PAYÃO, J.C. e CARVAJAL, S.R.O, (2004a) Soldagem de Reparo TIG com Arame Pulsado (DABBER-TIG) em Inconel 718, **59<sup>o</sup> Congresso Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM)**, São Paulo (SP), Brasil, 19 a 22 de julho de 2004, 10p.
- 9 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., PAYÃO, J.C. e CARVAJAL, S.R.O, (2004b) Comparative Study of Factorial Design Experiments of Optimal Welding parameters for Commercial Aircraft Components, **59<sup>o</sup> Congresso Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM)**, São Paulo (SP), Brasil, 19 a 22 de julho de 2004, 10p.
- 10 LOPEZ, R., (1990) Weld-repair keeps jets flying, **Welding Design and Fabrication** Vol. 63 (4), April 1990, pp.43-44.
- 11 MONTGOMERY, D.C., (1997), **Design and Analysis of Experiments**, Ed. Wiley.
- 12 SOONG, T.T., (1981), **Probabilistic Modeling and Analysis in Science and Engineering**, Ed. Wiley.

# A MODEL OF FRACTIONAL FACTORIAL DESIGN OF EXPERIMENTS IN AIRCRAFT COMPONENTS ENGINE

José Luiz Fernandes<sup>1</sup>  
Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo<sup>2</sup>  
Santiago Ramirez Carvajal<sup>3</sup>

## Abstract

This work aims at studying one component of the G.E. CF6-50 aircraft motor, named Seal (SARD) which it is located in the high-pressure turbine. The welding process employed for repairing this seal (which is made of inconel 718 alloy, a nickel-based alloy) was Dabber-TIG with pulsed wire. It was identified that the relevant answer parameters for the analysis were the height and the width of the fillet weld. In the identification of the welding optimal parameters, the two level fractional factorial statistical technique of experimental designs and variance analysis (ANOVA) was used with 16 runs. For this analysis was used Statistica 6.0 program. It was identified that for the answer parameter height of the weld fillet the significant main effects are the welding speed, wire fire speed and welding current. For the answer parameter width of the fillet weld it was verified that the significant main effects were the welding current, the arc voltage and the welding speed.

**Key-words:** Dabber TIG repair welding; Factorial experimental designs; Inconel 718.

60<sup>th</sup> Nacional Congress of The Brazilian Society of Metallurgy and Materials (ABM), 25-28 July 2005 – Belo Horizonte - MG

<sup>1</sup> Mechanical Engineer, D.Sc., Adjoint Professor, Mechanical Engineering Department, CEFET-RJ, [jlfernandes@cefet-rj.br](mailto:jlfernandes@cefet-rj.br)

<sup>2</sup> Nuclear Engineer, D.Sc., Adjoint Professor, Nuclear Engineering Program, COPPE/UFRJ, [frutuoso@con.ufrj.br](mailto:frutuoso@con.ufrj.br)

<sup>3</sup> Chemical Engineer, D.Sc., Adjoint Professor, Mathematics Department, IM/UFRJ, [ramirez@dme.ufrj.br](mailto:ramirez@dme.ufrj.br)