

# AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE SOLDAGEM DO AÇO API 5L X60 USANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS FATORIAL COM DOIS NÍVEIS<sup>1</sup>

*José Renato de Oliveira e Silva Neto<sup>2</sup>  
José Luiz Fernandes<sup>3</sup>  
Vitor André Ferreira Caldas<sup>4</sup>  
Santiago Ramirez Carvajal<sup>5</sup>*

## **Resumo**

O objetivo deste trabalho é identificar os parâmetros ótimos do processo de soldagem do aço API 5L X60, utilizado pelas companhias de petróleo, no transporte de petróleo e gás. O processo empregado foi o Eletrodo Revestido (SMAW) sendo que a soldagem ocorreu na posição plana. Identificou-se que as variáveis resposta referentes a esta análise a altura, a largura, a penetração e a largura da raiz do cordão de solda. Na identificação dos parâmetros ótimos de soldagem utilizou-se a técnica estatística de planejamento de experimentos fatorial com dois níveis e quatro parâmetros, totalizando 16 experimentos.

**Palavras-chave:** Soldagem; API 5L X60; Planejamento de experimentos fatorial de dois níveis.

## **EVALUATION OF THE RELIABILITY OF THE OPTIMAL PARAMETRES IN WELDING OF STEEL API 5L X60 USING FACTORIAL PLANNING OF EXPERIMENTS WITH TWO LEVELS**

## **Abstract**

The objective of this work it is to identify to the excellent parameters of the process of welding of steel API 5L X60, used for the oil company, in the transport of oil and gas. The employed process was SMAW being that the welding occurred in the plain position. It was identified that the response variable to the height, the width, the penetration and the width of the root of the weld lace. In the identification of the excellent parameters of welding it was used technique statistics of planning of experiments factorial with two levels and four parameters, totalizing 16 experiments.

**Key words:** Welding; API 5L X60; Factorial planning of experiments in two levels

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Departamento de Pesquisa e Pós-graduação, CEFET-RJ*

<sup>3</sup> *Engenheiro Mecânico, D.Sc., Professor Adjunto, Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação – CEFET-RJ*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, M.Sc., Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem – FBTS*

<sup>5</sup> *Engenheiro Químico, D.S.c, Professor Associado, Departamento de Matemática - UFRJ*

## 1 INTRODUÇÃO

A montagem e a manutenção de equipamentos e dutos da indústria petrolífera são, comprovadamente, os maiores responsáveis pelos altos custos desse setor. Unir produtividade, qualidade e confiabilidade a baixos custos é tarefa que requer pesquisa e desenvolvimento. O processo de soldagem por eletrodo revestido é o processo de união mais utilizado em montagem e na soldagem de reparo, devido à facilidade de execução, rapidez e eficiência do processo.

Com objetivo de minimizar as perdas referentes aos reparos utilizados em manutenção, Fernandes<sup>(1-4)</sup> utilizou a técnica estatística de planejamento fatorial, descrita em Box,<sup>(5-6)</sup> para otimizar os parâmetros do processo de soldagem de reparo do selo de ar rotativo dianteiro (SARD) do motor GE CF6-50, empregado em aeronaves civis. Silva Neto<sup>(7)</sup> apresentou um trabalho que identificava os parâmetros ótimos na soldagem do aço API 5L X60 usando planejamento de experimentos fatorial com dois níveis, considerando somente a altura e largura do cordão de solda. O objetivo deste estudo é otimizar a soldabilidade do aço API 5L X 60, utilizado nas indústrias de petróleo e de gás natural. Este aço pertence a série, também denominada ARBL (alta resistência e baixa liga), microligada ao Nb para dificultar o crescimento de grão, também responde com boa soldabilidade (baixo carbono equivalente) e alta tenacidade, devido ao processo de laminação controlada e ao refino de grão), garantindo maior resistência à propagação de trincas.

Objetivando otimizar os parâmetros no processo de soldagem por eletrodo revestido do aço API 5L X 60, realizou-se um planejamento fatorial de dois níveis e quatro fatores. Todas as análises estatísticas foram realizadas no programa STATISTICA 7.0.

## 2 METODOLOGIA

Segundo Daniel<sup>(8)</sup> e Montgomery,<sup>(9)</sup> a definição e a escolha das variáveis controláveis (independentes) de soldagem, bem como as respostas do planejamento fatorial de experimentos, não fazem parte do conhecimento estatístico, ficando assim relacionadas à experiência do especialista. Além disso, na realização de um experimento, deseja-se estudar o efeito de um ou mais fatores sobre uma variável resposta. Cada fator contribui em quantidades ou categorias pré-fixadas denominadas níveis. Cada combinação de nível versus fatores é chamada de tratamento e, o conjunto de todas as combinações prováveis determina o planejamento experimental correspondente, conhecido como planejamento fatorial.

O método do planejamento fatorial utilizado foi o  $2^4$ , gera 16 combinações (tratamentos) que podem ser expostos na Matriz de Yates, conforme apresentado na Tabela 1. Na matriz, os sinais (+) e (-) indicam os níveis superior e inferior, respectivamente, dos fatores em estudo. Na Tabela 1, tem-se que I significa corrente de soldagem (Amperes), V a voltagem (Volts), Vs a velocidade de soldagem (mm/s) e De o diâmetro do eletrodo (mm). A variável  $y_{ri}$  representa a variável resposta associada ao tratamento i. A Tabela 1, também mostra como os experimentos foram realizados considerando a aleatoriedade dos tratamentos, para que se possa evitar a tendenciosidade da análise dos resultados.

**Tabela 1** Matriz de Yates para um planejamento fatorial de experimentos em dois níveis e quatro fatores, totalizando 16 tratamentos.

Nº	Tratamento Aleatório	I	V	Vs	De	Resposta
1	7	-	+	+	-	$y_{r1}$
2	8	+	+	+	-	$y_{r2}$
3	4	+	+	-	-	$y_{r3}$
4	16	+	+	+	+	$y_{r4}$
5	15	-	+	+	+	$y_{r5}$
6	2	+	-	-	-	$y_{r6}$
7	10	+	-	-	+	$y_{r7}$
8	14	+	-	+	+	$y_{r8}$
9	6	+	-	+	-	$y_{r9}$
10	5	-	-	+	-	$y_{r10}$
11	13	-	-	+	+	$y_{r11}$
12	11	-	+	-	+	$y_{r12}$
13	3	-	+	-	-	$y_{r13}$
14	9	-	-	-	+	$y_{r14}$
15	1	-	-	-	-	$y_{r15}$
16	12	+	+	-	+	$y_{r16}$

Segundo Drapper<sup>(10)</sup> o modelo de planejamento fatorial ( $2^k$ ) 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  $\hat{\beta}_{i,j,\dots,k}$  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

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

A diferença entre o valor observado e o valor predito é denominado resíduo. Se o efeito de um  $i$ -ésimo fator não for significativo, então  $\beta_i$  será igual a zero. Contudo, devido ao erro experimental, a estimativa  $\beta_i$  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  $\alpha_i$  é significativo, isto é, diferente de zero ou não.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No desenvolver do planejamento dos experimentos foram identificados os limites (inferior e superior) dos parâmetros de soldagem do aço API 5L X 60, que permitiram obter uma junta soldada de excelente aspecto e acabamento, com redução máxima de altura e largura do cordão de solda, isenta de defeitos e imperfeições que possam acarretar mecanismo de falha. Esses limites encontram-se nas Tabelas 2 e 3.

**Tabela 2.** Limites dos parâmetros ótimos de soldagem do aço API 5L X 60, utilizando consumível de 3,25mm de diâmetro.

<b>Parâmetro de Soldagem</b>	<b>Mínimo (-)</b>	<b>Máximo (+)</b>
Corrente de soldagem (Amper)	119,0	124,0
Tensão do arco (Volts)	21,0	24,0
Velocidade de soldagem (mm/s)	2,0	2,4

**Tabela 3.** Limites dos parâmetros ótimos de soldagem do aço API 5L X 60, utilizando consumível de 4,00mm de diâmetro.

<b>Parâmetro de Soldagem</b>	<b>Mínimo (-)</b>	<b>Máximo (+)</b>
Corrente de soldagem (Amper)	168,0	173,0
Tensão do arco (Volts)	22,0	24,0
Velocidade de soldagem (mm/s)	2,2	2,5

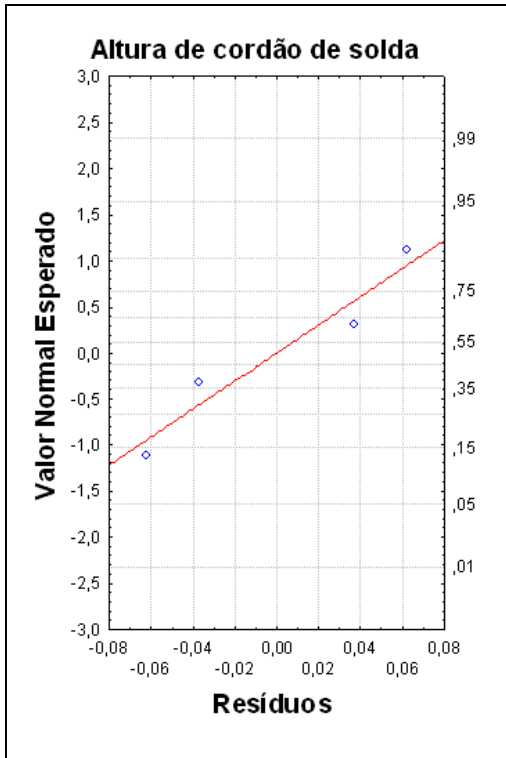
Para validar a análise de variância, os erros devem ser considerados independentes e com distribuição normal, com média zero e variância constante  $\sigma^2$ . A verificação dessas suposições é feita através da análise dos resíduos dos modelos, através dos gráficos de probabilidade normal de resíduos, os quais permitem verificar a condição de normalidade dos erros, conforme as Figuras 1 (a-d). Nestas Figuras pode-se avaliar que as variáveis de controle apresentam valores que podem ser considerados ajustados segundo uma função densidade de probabilidade normal.

Esta afirmação se justifica pelo fato de que nas Figura 1a ate 1d, 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 colocar-se próximos à reta imaginária.

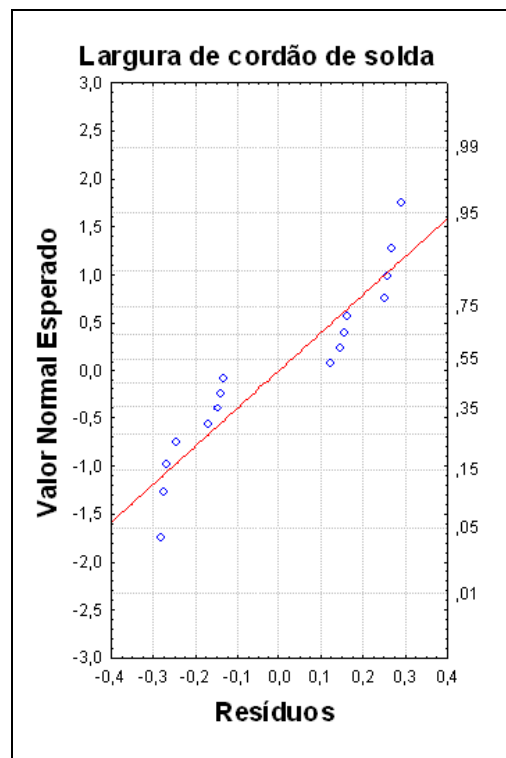
A análise dos experimentos realizou-se considerando apenas os gráficos de Daniel e Pareto, conforme Figuras 2 (a-d) e Figuras 3 (a-d), respectivamente. O gráfico de Daniel (Figuras 2) consiste em um gráfico de probabilidade normal dos efeitos fatoriais, no qual estes efeitos são plotados no eixo horizontal e os valores normais esperados no eixo vertical.

Segundo Fernandes et al.<sup>(4)</sup> a idéia básica é que os efeitos não significativos confundem-se com o erro aleatório e distribuem-se 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 relevância.

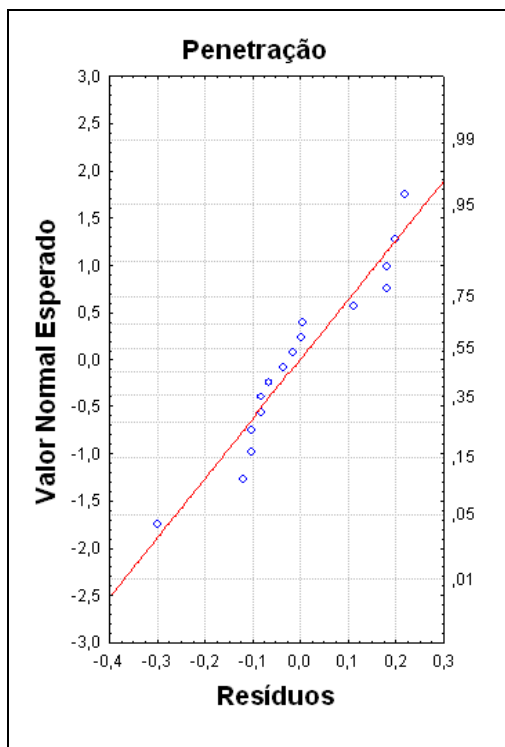
Segundo Fernandes et al.,<sup>(2-3)</sup> para a validação da análise de variância, tem-se que os erros são independentes e normalmente distribuídos com média zero e variância constante  $\sigma^2$ . A verificação dessas suposições é feita através da análise de resíduos do modelo, pelo gráfico de probabilidade normal dos resíduos, conforme Figura 3, que permite verificar a condição de normalidade dos erros.



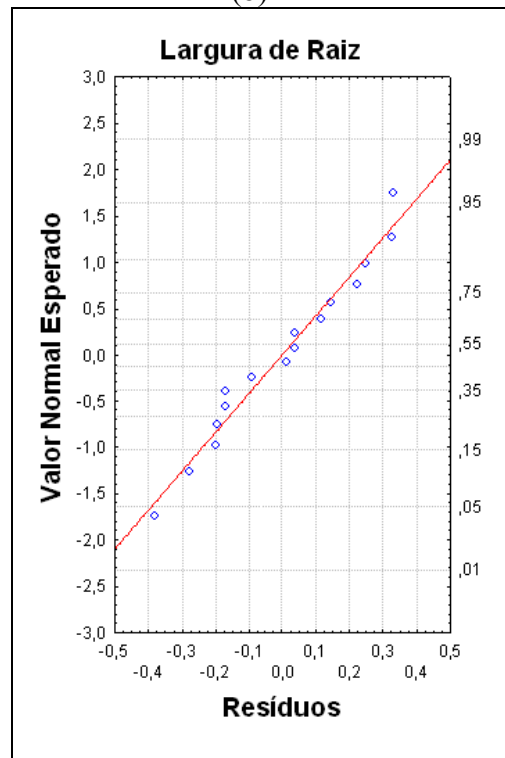
(a)



(b)

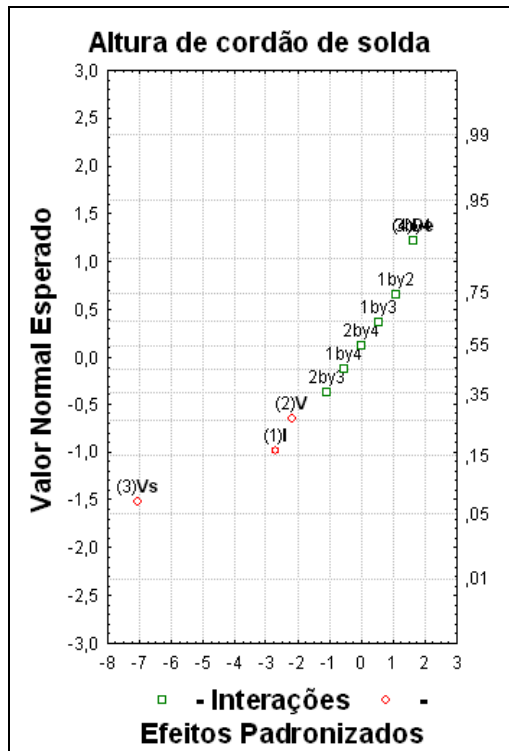


(c)

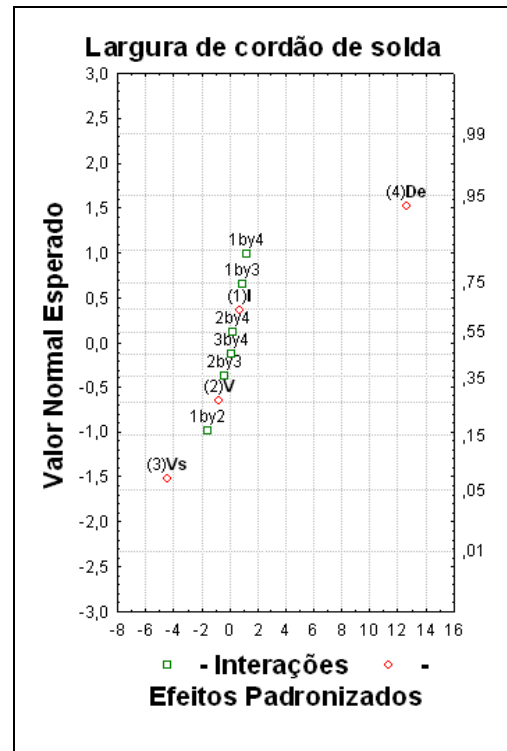


(d)

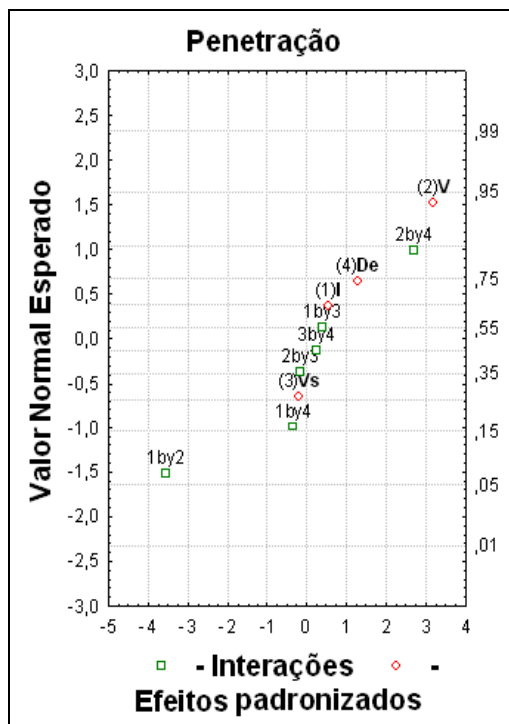
**Figura 1.** Ajuste das respostas de altura (a), largura (b), (c) penetração e (d) largura da raiz de cordão de solda à função densidade probabilidade normal, considerando 16 experimentos.



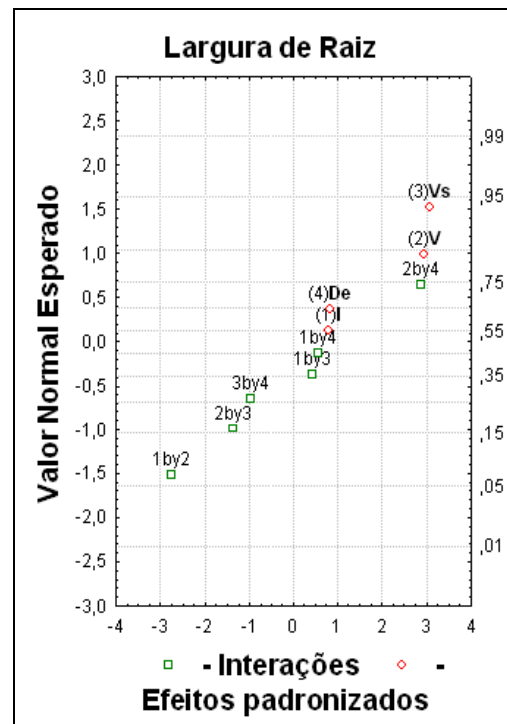
(a)



(b)

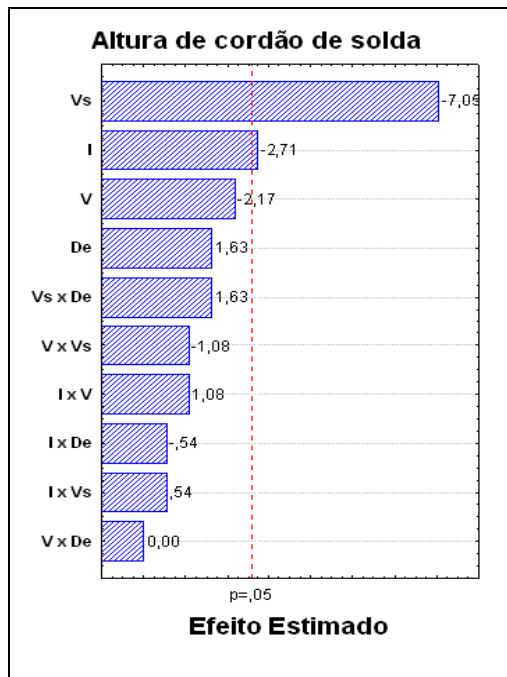


(c)

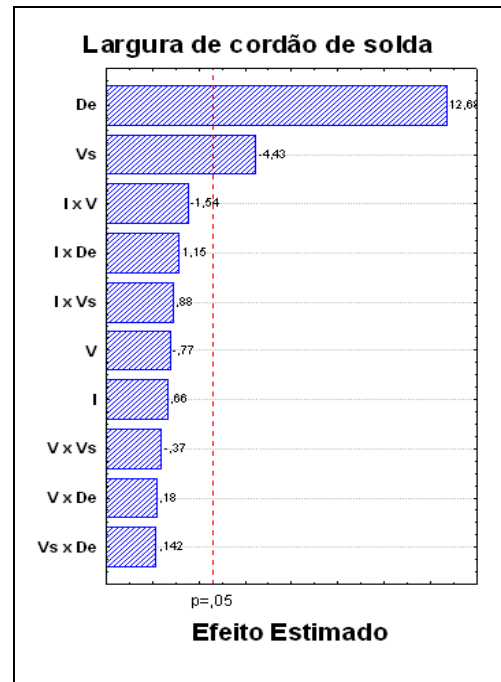


(d)

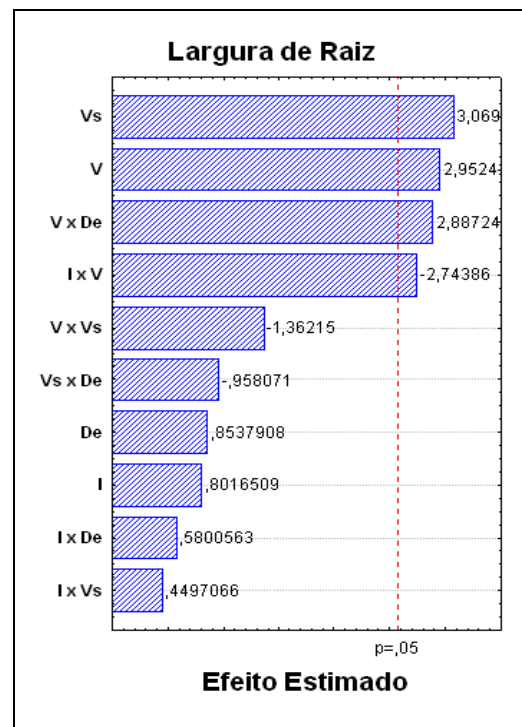
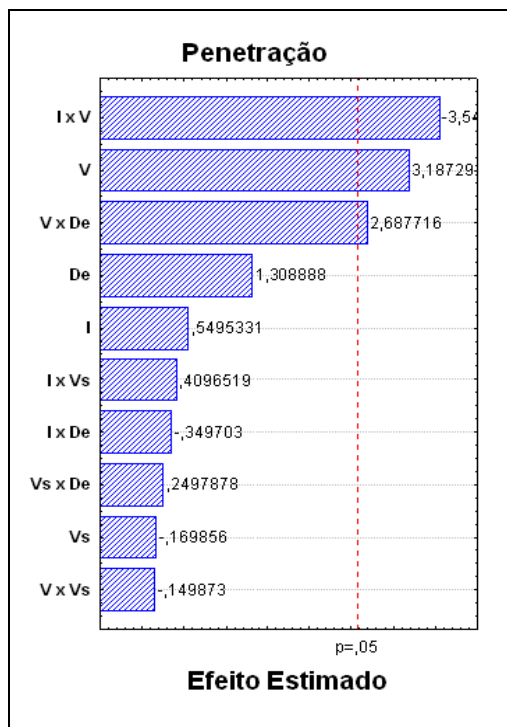
**Figura 2.** Gráfico de probabilidade normal correspondendo aos valores padronizados dos efeitos fatoriais, para altura (a), largura (b), (c) penetração e (d) largura da raiz de cordão de solda, considerando 16 experimentos.



(a)



(b)



**Figura 3.** Gráfico de Pareto dos efeitos fatoriais na altura (a), largura (b), (c) penetração e (d) largura da raiz de cordão de solda, considerando 16 experimentos.

O aplicativo Statistica 7.0 permitiu analisar a significância dos parâmetros de soldagem eletrodo revestido na altura e na largura do cordão de solda. Conforme o gráfico de função densidade de probabilidade normal, mostrado nas Figuras 1 a-d, não foram observados desvios acentuados de normalidade. O gráfico de Daniel, mostrado nas Figuras 3 a-d, evidencia os efeitos fatoriais significantes na altura e na largura do cordão de solda, considerando um planejamento fatorial de 16 experimentos.

Os modelos correspondentes ao ajuste do planejamento fatorial de experimentos para a altura, largura, penetração e largura da raiz do cordão de solda, ajustados à função densidade de probabilidade normal, considerando 16 experimentos, podem ser vistos na Tabela 4.

**Tabela 4.** Equações de ajuste dos modelos das variáveis respostas.

RESPOSTA	FUNÇÃO
Altura de Cordão	$Y_{Hc} = 2,563 - 0,063 \times I - 0,163 \times V_s$
Largura de Cordão	$Y_{Lc} = 9,260 - 0,429 \times V_s + 1,228 \times De$
Penetração	$Y_{Pt} = 1,226 + 0,199 \times V - 0,222 \times I \times V + 0,168 \times V \times De$
Largura de Raiz	$Y_{Lr} = 4,836 + 0,283 \times V + 0,294 \times V_s - 0,263 \times I \times V + 0,277 \times V \times De$

Uma análise nas Figuras 2 e 3 que representam os gráficos de Daniel e Pareto revelou que, para a altura do cordão de solda, os efeitos relevantes foram I (corrente) e  $V_s$  (velocidade de soldagem). Para a largura do cordão de solda, os efeitos relevantes foram  $V_s$  (velocidade de soldagem) e De (diâmetro do eletrodo). Para a penetração foram V (voltagem) e as interações entre a I.V (Corrente e voltagem) e V.De (voltagem e diâmetro do eletrodo). Para a largura da raiz de solda, os efeitos relevantes são a V (voltagem), a  $V_s$  (velocidade de soldagem), as interações entre I.V (corrente e voltagem) e V.De (voltagem e diâmetro do eletrodo).

#### 4 CONCLUSÕES

A soldagem do aço API 5L X 60, realizada com o processo SMAW (eletrodo revestido) e empregou-se a técnica de planejamento fatorial de experimentos em dois níveis e quatro fatores, permitiu observar que o parâmetro de soldagem que mais influencia a altura do cordão de solda é a velocidade de soldagem ( $V_s$ ). Para a largura do cordão de solda, o parâmetro de soldagem que mais influenciou foi o diâmetro do eletrodo. Para a variável resposta penetração pode-se dizer que os parâmetros voltagem (V), corrente (I) e diâmetro do eletrodo (De) tiveram os mesmos fatores de influência. Para a variável resposta largura da raiz tem-se que as variáveis voltagem (V), velocidade de soldagem ( $V_s$ ), corrente (I) e diâmetro do eletrodo (De) tiveram praticamente o mesmo tipo de influência.

#### REFERÊNCIAS

- 1 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., PAYÃO, J.C. e CARVAJAL, S.R., 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 a 12 de setembro, 2003.



- 2 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., PAYÃO, J.C. e CARVAJAL, S.R., Soldagem de Reparo TIG com Arame Pulsado (DABBER-TIG) em Inconel 718, 59º Congresso Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo (SP), Brasil, 19 a 22 de julho. 2004.
- 3 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., PAYÃO, J.C. e CARVAJAL, S.R., Comparative Study of Factorial Design Experiments of Optimal Welding Parameters for Commercial Aircraft Components, 59º Congresso Internacional da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), São Paulo (SP), Brasil, 19 a 22 de julho, 2004.
- 4 FERNANDES, J.L., MELO, P.F.F., e CARVAJAL, S.R, A model of fractional design experiments in aircraft components engine, 18th International Congress of Mechanical Engineering, November 6-11, Ouro Preto, MG, 2005.
- 5 BOX, G. E. P. Statistics for Experimenters, Wiley, 1978.
- 6 BOX, G. E. P., Empirical Mode-Building and Response Surfaces, Wiley; 1987.
- 7 SILVA NETO, J. R. O. Determinação dos Parâmetros Ótimos de Soldagem do Aço API 5L X60 Usando Planejamento de Experimentos Fatorial com Dois Níveis, IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-PE, 22 a 25 de Agosto, 2006
- 8 DANIEL, C., 1976, Applications of statistics to industrial experimentation, Wiley, 1976.
- 9 MONTGOMERY, D.C., Design and Analysis of Experiments, Wiley, 1997.
- 10 DRAPER, N.R., Applied Regression Analysis, Wiley, 1998.