

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS  
NA SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR**

**Autor: Lucilene de Oliveira Rodrigues**  
**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa**

Itajubá, Setembro de 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS  
NA SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR**

**Autor: Lucilene de Oliveira Rodrigues**  
**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa**

**Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica**  
**Área de Concentração: Projeto e Fabricação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Setembro de 2005  
M.G. – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS  
NA SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR**

**Autor: Lucilene de Oliveira Rodrigues**

**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa**

Composição da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Yokio Kobayashi – UNESP**

**Prof. Dr. João Roberto Ferreira - IEM/UNIFEI**

**Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa - IEM/ UNIFEI**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais,  
José e Nevir, e a meus irmãos,  
Geovani e Silas.

**Sonho e luta se convertem em realidade. Sonhe! Lute! Realize!**

## AGRADECIMENTOS

Manifesto meus sinceros agradecimentos:

- Primeiramente a Deus, pela força e perseverança;
- Aos meus pais, pelo incentivo na realização de mais uma etapa da vida acadêmica;
- Ao professor *Sebastião Carlos da Costa*, pela valiosa orientação e amizade, a qual tornou possível a realização deste trabalho;
- Aos funcionários da oficina mecânica, pelo apoio e participação durante a fase de realização dos ensaios;
- Aos meus irmãos que me acolheram e me ajudaram nas horas difíceis;
- Ao meu namorado que tornou as dificuldades mais suaves;
- Ao amigo Anderson Paiva, pela valiosa ajuda estatística;
- Às amigas Luciana, Enedina e Mayra, pela amizade, apoio e confiança;
- À Universidade Federal de Itajubá, através do Instituto de Engenharia Mecânica, que mais uma vez tornou possível minha realização profissional.

## SUMÁRIO

Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	v
Resumo	viii
<i>Abstract</i>	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de símbolos	xiv
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>2</b>
1.1. Importância do tema.	2
1.2. Objetivos.	2
1.3. Estrutura da dissertação.	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1. Fundamentos do Processo de Soldagem FCAW.	5
2.2. Arames Tubulares.	6
2.3. Classificação de Arames Tubulares.	6
2.4. Soldagem Com Gás de Proteção (FCAW-G).	7
2.4.1. Gás de Proteção.	9
2.4.1.1. Mistura de gases.	11
2.5. Soldagem Sem Gás de Proteção (FCAW-S).	12
2.6. Taxa de Deposição no Processo FCAW.	13
2.7. Tipos de Transferência Metálica.	14
2.7.1. Transferência por curto-circuito.	15
2.7.2. Transferência globular.	16
2.7.3. Transferência por spray.	17
2.7.4. Transferência por arco pulsado.	18
2.8. Hidrogênio Difusível.	19
2.9. Qualidade da Solda.	20
2.10. Características da Soldagem com Eletrodo Tubular.	21
2.10.1. Vantagens.	22
2.10.2. Limitações.	22

2.11. Variáveis do Processo.	23
2.12. Delineamento de Experimento.	26
2.12.1. Estimativa do erro experimental.	27
2.12.2. Teste de significância dos efeitos.	27
2.12.3. Metodologia da Superfície de Resposta.	28
2.12.4 Otimização das respostas.	29
2.13. Considerações Finais	31
<b>3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
3.1. Banco de Ensaios e Montagem Experimental.	32
3.2. Fase Inicial – Fatorial Fracionário.	34
3.2.1. Definição dos fatores e respostas.	35
3.2.2. Preparação dos corpos de prova.	37
3.2.3. Determinação da seqüência de realização dos ensaios.	38
3.2.4. Determinação das respostas.	39
3.3. Experimento Principal.	40
3.4. Modelamento e Otimização do Processo.	40
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>42</b>
4.1. Fase Inicial.	42
4.1.1. Resultados obtidos dos ensaios.	44
4.1.2. Análise dos resultados.	47
4.2. Experimento Principal – Fatorial Completo.	51
4.3. Modelamento e Otimização.	53
4.3.1. Efeitos dos parâmetros de entrada.	61
4.3.1.1. Efeitos dos parâmetros na penetração.	61
4.3.1.2. Efeitos dos parâmetros na taxa de deposição.	63
4.3.1.3. Efeitos dos parâmetros no rendimento.	65
4.3.1.4. Efeitos dos parâmetros no índice de convexidade.	67
4.3.1.5. Efeitos dos parâmetros na diluição.	69
4.3.2. Otimização geral do processo.	71
4.3.3. Confirmação dos resultados obtidos.	75
4.4 – Considerações finais.	76
	77

**5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

5.1 Conclusões gerais.

77

5.2 Recomendações para trabalhos futuros.

78

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

79

## RESUMO

Este trabalho tem por finalidade a análise e otimização de parâmetros de soldagem do processo com arame tubular (FCAW – Flux Cored Arc Welding) sobre as características geométricas do cordão e de produção do cordão. As variáveis do processo analisadas inicialmente foram tensão, velocidade de alimentação do arame, distância bico de contato peça, tipo de gás de proteção, ângulo de inclinação da tocha e velocidade de soldagem. Como características geométricas foram avaliadas a penetração, a convexidade do cordão e a diluição e como características de produção a taxa de deposição e o rendimento da soldagem. Para tal finalidade utilizou-se técnicas estatísticas como ferramentas de análise sendo, numa primeira fase, empregado o planejamento fatorial fracionário, para a seleção dos parâmetros mais influentes, e numa segunda fase, o fatorial completo, baseado nos parâmetros mais significativos da etapa anterior, seguido do modelamento e otimização desses parâmetros associado a proposição de regiões de adequação do processo para o conjunto de respostas. Baseado nos resultados gerados percebeu-se que a velocidade de alimentação do arame foi claramente significativa no processo, seguida pela tensão e com menos intensidade pela distância bico de contato peça. A velocidade de soldagem foi, dentre os parâmetros analisados, o menos significativo.

**Palavras chave:** Experimento, tubular, modelos, otimização.

## **ABSTRACT**

This work has the aim to analyse and optimise the influence of welding parameters on the geometric characteristics and production of a weld bead applied in a Flux Cored Arc Welding – FCAW- process. The process parameters investigated were welding voltage, wire feed rate, nozzle-to-plate distance, shielding gas, torch angle, and welding speed. As responses the penetration, convexity weld bead index and dilution were evaluated as the main geometric characteristics and the deposition rate and efficiency of the welding as production characteristics of the process. For this purpose statistical techniques were used to design the experiments runs and process the analysis. In the first phase, a Fractional Factorial was designed to select the most significant parameters influencing the process and in the second phase, a Full Factorial Design followed by a Response Surface Methodology in order to delineate the mathematical models and the influence of the main parameters on the response of the process. The results showed that wire feed rate had the most significant effect in the responses, followed by the welding voltage and the nozzle-to-plate distance. The welding speed was, among the parameters assessed, the least significant.

**Keywords:** Experiments, cored, models, optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Soldagem com proteção gasosa.	7
Figura 2.2	Efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda com eletrodo tubular, Bracarense (2000).	12
Figura 2.3	Soldagem sem gás de proteção.	12
Figura 2.4	Seção transversal de arames sólidos e tubulares.	13
Figura 2.5	Taxas de deposição de arames tubulares e sólidos.	14
Figura 2.6	Transferência por curto-circuito.	15
Figura 2.7	Transferência globular.	16
Figura 2.8	Transferência por spray.	18
Figura 2.9	Esquema de uma onda pulsada.	19
Figura 2.10	Transferência de gotas de arames sólidos/tubulares, Araújo (2004)	21
Figura 2.11	Influência da distância bico de contato peça na corrente de soldagem.	24
Figura 2.12	Efeito da distância bico de contato peça na corrente de soldagem e na taxa de deposição.	25
Figura 2.13	Ângulos de soldagem recomendados para juntas em ângulo e de topo.	26
Figura 2.14	Exemplo de resultado da ferramenta “Response Optimizer”.	30
Figura 3.1	Banco de ensaios – Laboratório de soldagem-UNIFEI.	33
Figura 3.2	Definição de distância bico de contato peça.	37
Figura 3.3	Representação da área da seção transversal do cordão de solda.	39
Figura 4.1	Comparação dos oscilogramas de corrente utilizando gases diferentes.	43
Figura 4.2	Cordões de solda obtidos no fatorial fracionário.	43
Figura 4.3	Defeito superficial representado por uma porosidade alongada.	44
Figura 4.4	Efeitos principais no índice de convexidade.	48
Figura 4.5	Perfis dos cordões da superfície de resposta.	55
Figura 4.6	Efeitos dos parâmetros principais na penetração.	61
Figura 4.7	Superfície de resposta para a interação $V \times V_a$ para a penetração.	62
Figura 4.8	Efeito da interação $V \times V_a$ na penetração, $d=17,5$ mm.	63
Figura 4.9	Efeitos dos parâmetros principais na taxa de deposição.	64
Figura 4.10	Superfície de resposta $V \times d$ para a taxa de deposição.	64
Figura 4.11	Efeito da interação $V \times d$ na taxa de deposição, $V_a=12$ m/min.	65
Figura 4.12	Efeitos dos parâmetros principais no rendimento.	66

Figura 4.13	Superfície de resposta para o rendimento.	66
Figura 4.14	Efeito da interação $V_a*d$ no rendimento, $V=32,5$ V.	67
Figura 4.15	Efeitos principais dos parâmetros no índice de convexidade.	68
Figura 4.16	Efeito da interação $V*V_a$ no índice de convexidade, $d=17,5$ mm.	68
Figura 4.17	Efeito da interação $V*d$ no índice de convexidade, $V_a=12$ m/min.	69
Figura 4.18	Efeito da interação $V_a*d$ no índice de convexidade, $V=32$ V.	69
Figura 4.19	Efeitos principais dos parâmetros na diluição.	70
Figura 4.20	Superfície de resposta para a diluição.	70
Figura 4.21	Efeitos da interação $V*V_a$ na diluição, $d=17,5$ mm.	71
Figura 4.22	Linhas de contorno das respostas combinadas, $d=13,4$ mm.	74
Figura 4.23	Linhas de contorno das respostas combinadas, $d=20$ mm.	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Parâmetros de soldagem para arames rufílicos, Fortes (2004).	23
Tabela 2.2	Descrição das funções para modelos de primeira e segunda ordem.	28
Tabela 3.1	Composição química e propriedades mecânicas.	34
Tabela 3.2	Níveis operacionais para os testes iniciais.	36
Tabela 3.3	Planejamento Fatorial Fracionário.	38
Tabela 4.1	Resultados obtidos no ensaio.	42
Tabela 4.2	Classificação para remoção de escória e qualidade superficial.	45
Tabela 4.3	Parâmetros geométricos dos cordões de solda.	46
Tabela 4.4	Respostas a serem analisadas.	46
Tabela 4.5	Análise de significância dos parâmetros nas respostas.	47
Tabela 4.6	Faixas desejadas e previsão das respostas.	49
Tabela 4.7	Solução Global.	49
Tabela 4.8	Comparação da utilização de diferentes gases.	50
Tabela 4.9	Comparação da variação das inclinações positiva e negativa.	50
Tabela 4.10	Resultados Obtidos – Fatorial Completo.	52
Tabela 4.11	Análise significância para as respostas analisadas.	52
Tabela 4.12	Parâmetros de controle do processo e seus níveis.	53
Tabela 4.13	Matriz de experimentos e resultados obtidos.	54
Tabela 4.14	Coefficientes calculados através da análise de regressão.	56
Tabela 4.15	Modelos matemáticos completos.	57
Tabela 4.16	Adequação do modelo matemático completo.	57
Tabela 4.17	Significância dos coeficientes dos modelos completos.	58
Tabela 4.18	Valores de $R^2$ , $R^2$ (ajustado) e erro padrão para modelos completos.	58
Tabela 4.19	Coefficientes calculados para os modelos reduzidos.	59
Tabela 4.20	Modelos matemáticos reduzidos em suas formas finais.	59
Tabela 4.21	Adequação dos modelos matemáticos reduzidos.	60
Tabela 4.22	Valores de $R^2$ , $R^2$ (adj) e erro padrão para os modelos completo e reduzido.	60
Tabela 4.23	Faixas de respostas pré-estabelecidas.	72
Tabela 4.24	Solução global final.	72
Tabela 4.25	Resultado final da combinação ótima de parâmetros.	73
Tabela 4.26	Ensaio de confirmação para a região encontrada.	75
Tabela 4.27	Resultados obtidos, esperados e erros dos ensaios de confirmação.	75

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Ângulo de inclinação da tocha, [°]
b	Largura do cordão, [mm]
D	Diluição, [%]
d	Distância bico de contato peça, [mm]
DOE	Design Of Experiment
dens	Densidade, [g/cm <sup>3</sup> ]
FCAW	Flux Cored Arc Welding
H	Aporte térmico, [W]
I	Corrente de soldagem, [A]
IC	Índice de convexidade, [%]
IP	Índice de perdas, [%]
K,n	Número de fatores
L	Comprimento do eletrodo, [mm]
l	Comprimento de arame fornecido, [mm]
MGAW	Metal Gas Arc Welding
mf	Massa do corpo de prova após a soldagem, [g]
mi	Massa inicial do corpo de prova, [g]
N	Número total de repetições do experimento
OP	Ordem padrão
p	Penetração do cordão, [mm]
PC	Ponto central
r	Reforço do cordão, [mm]
η	Rendimento
Sp	Área de penetração do cordão, [mm <sup>2</sup> ]
Sr	Área de reforço do cordão, [mm <sup>2</sup> ]
St	Área total do cordão, [mm <sup>2</sup> ]
TD	Taxa de deposição, [%]
V	Tensão de soldagem, [V]
Va, V <sub>arame</sub>	Velocidade de alimentação do arame, [m/min]
Vs	Velocidade de soldagem, [cm/min]
φ	Diâmetro do eletrodo, [mm]