

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Uma Investigação da Influência dos
Parâmetros de Pulso em Soldagem com
Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa**

Autora: **Luciana Márcia de Oliveira**

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

**Uma Investigação da Influência dos
Parâmetros de Pulso em Soldagem com
Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa**

Autora: Luciana Márcia de Oliveira

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

MG – Brasil

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Uma Investigação da Influência dos
Parâmetros de Pulso em Soldagem com
Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa**

Autora: **Luciana Márcia de Oliveira**

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

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Yukio Kobayashi – UNESP

Prof. Dr. José Leonardo Noronha – UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa - UNIFEI

À minha família, pelo amor
carinho e esforço dispensado
para me proporcionar uma boa
formação.

Ao meu noivo Rodrigo, pelo
amor, carinho, incentivo,
motivação e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa, pela competência, dedicação, paciência e amizade.

Ao Prof. Dr. Júlio Navarro, pela colaboração e amizade.

Aos funcionários dos laboratórios de engenharia mecânica da UNIFEI, em especial, ao Fernando, ao Marcos, ao Wlamir e ao Toninho.

Às amigas Enedina e Lucilene pelo permanente incentivo, colaboração, amizade e inesquecível convívio profissional.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

À CAPES pelo apoio financeiro através do Programa de bolsa.

À minha família, que sempre me incentivou na formação e no desenvolvimento cultural.

“A alegria é a prova dos nove”
Oswald Andrade

RESUMO

Oliveira, L. M. (2005), *Uma Investigação da Influência dos Parâmetros de Pulso em Soldagem com Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa*, Itajubá, 103p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Neste trabalho, apresenta-se um estudo da soldagem com Eletrodo Tubular pulsado, procurando encontrar as condições adequadas para soldagem com esse processo, além de estudar a influência dos parâmetros de pulso sobre as características da solda. O trabalho, dividido em três partes estudou primeiramente os processos Eletrodo Tubular e MAG procurando compará-los. Posteriormente, outras condições de pulso foram avaliadas, centrando-se as análises no processo Eletrodo Tubular. Para finalizar, analisou-se a dureza e as micrografias de amostras realizadas com os processos Eletrodo Tubular e MAG. Como resultados, encontrou-se que não é possível obter melhores resultados com o processo Eletrodo Tubular, em relação ao MAG, quando processados sob as mesmas condições, pois o processo com arame tubular exige maiores valores de corrente média e velocidade de alimentação do arame. Além disso, encontrou-se que as respostas estudadas no processo Eletrodo Tubular são bastante influenciadas pela corrente média, frequência de pulso e velocidade de alimentação do arame. Em relação à análise metalográfica, encontrou-se que as microestruturas formadas nos cordões produzidos com os processos Eletrodo Tubular e MAG, sob as mesmas condições, foram diferentes.

Palavras-chave: Processo Eletrodo Tubular, corrente pulsada, soldagem.

ABSTRACT

OLIVEIRA, L. M. (2005), *An investigation of the Influence of the Parameters of Pulse in Welding with Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding Process*, 103p. MSc. Dissertation - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

In this work, was introduced a study of the welding with gas-shielded flux arc welding process (FCAW), trying to find the appropriate conditions for the welding with FCAW, besides studying the influence of the pulse parameters on characteristics of the weld. In the first part of the work, the flux cored arc welding process (FCAW) and gas metal arc welding process (GMAW) were studied with the objective of they be compared. In the second part of work, other pulse conditions were investigated, concentrating the analyses on the flux cored arc welding process. To conclude, the hardness and the microstructures of samples produced with both studied processes were analyzed. As results, it was found that it is not possible to obtain better results with the flux cored arc welding process, in relation to gas metal arc welding process, when processed under the same conditions, because the process with tubular wire demands larger values of mean current and of wire feed rate. Besides, it was found that the answers studied in the flux cored arc welding process they are quite influenced by the mean current, pulse frequency and wire feed rate. In relation to the analysis of the microstructures, it was found that the microstructures formed in the weld bead produced with flux cored arc welding process and gas metal arc welding process, under the same conditions, they are different.

Keywords: Flux Cored Arc Welding, Pulsed Current, Welding.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS-----	iii
LISTA DE TABELAS-----	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS-----	ix
CAPÍTULO 1-----	1
INTRODUÇÃO-----	1
CAPÍTULO 2-----	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA-----	4
2.1 - Introdução-----	4
2.2 - Características do Fluxo-----	6
2.3 - Consumíveis-----	8
2.3.1 - Tipos e Formas-----	8
2.3.2 - Classificação-----	11
2.4 - Gases de Proteção-----	12
2.4.1 - Dióxido de Carbono-----	13
2.4.2 - Misturas de Gases-----	13
2.5 - Parâmetros de Soldagem-----	17
2.5.1 - Corrente de Soldagem-----	17
2.5.2 - Tensão de Soldagem-----	19
2.5.3 - Extensão do Eletrodo-----	19
2.5.4 - Vazão do Gás de Proteção-----	22
2.5.5 - Taxa de Deposição e Rendimento-----	22
2.5.6 - Velocidade de Soldagem-----	23
2.6 - Processo Eletrodo Tubular X Processo MAG-----	26
2.7 - Modo Pulsado-----	27
2.7.1 - Fundamentos do Processo-----	27
2.7.2 - Vantagens do Processo-----	29
2.7.3 - Previsão dos Parâmetros de Pulsação-----	32
2.8 - Considerações Finais-----	34
CAPÍTULO 3-----	36
METODOLOGIA EXPERIMENTAL-----	36
3.1 - Introdução-----	36
3.2 - Parte 1: Comparação entre os Processos MAG e Eletrodo Tubular-----	36
3.3 - Parte 2: Análise do Processo Eletrodo Tubular Pulsado-----	42
3.4 - Parte 3: Medidas de Dureza e Análise Metalográfica-----	44
CAPÍTULO 4-----	45
RESULTADOS E DISCUSSÕES-----	45
4.1 - Introdução-----	45
4.2 - Parte 1: Comparação entre os Processos MAG e Eletrodo Tubular-----	46
4.2.1 - Resultados Experimentais-----	46
4.2.2 - Análise da Variância-----	48
4.2.3 - Análise da Influência dos Parâmetros da Geometria do Cordão-----	50
4.2.4 - Análise da Influência dos parâmetros na Produtividade-----	56
4.2.4 - Condições Otimizadas-----	60
4.2.5 - Comentários Finais a Respeito da Comparação entre os Processos-----	62

4.3 -	Parte 2: Análise do Processo Eletrodo Tubular Pulsado-----	64
4.3.1 -	Testes Preliminares-----	64
4.3.2 -	Planejamento Fatorial Completo-----	68
4.3.2.1 -	Análise de Variância-----	69
4.3.2.2 -	Análise da Influência dos Parâmetros na Geometria do Cordão-----	70
4.3.2.3 -	Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade-----	76
4.3.2.4 -	Condições Otimizadas-----	79
4.3.2.5 -	Considerações Finais-----	81
4.4 -	Parte 3: Medidas de Dureza e Análise Metalográfica-----	81
CAPÍTULO 5-----		91
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS-----		91
5.1 -	Conclusões-----	91
5.2 -	Sugestões para Trabalhos Futuros-----	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----		93
APÊNDICE A-----		98
DADOS COLETADOS NO LABORATÓRIO-----		98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 –	Soldagem com Eletrodo Tubular com proteção gasosa.....	4
Figura 2.2 –	Soldagem com Eletrodo Tubular autoprottegido.....	5
Figura 2.3 –	Formas da seção transversal de arames tubulares: a e b – seção simples; c – “multifolder”.....	10
Figura 2.4 –	Efeito do Gás de Proteção no Perfil do Cordão de Solda em DCEP (Bracarense, 2000).....	14
Figura 2.5 –	Efeito da variação do tipo de gás sobre a largura do cordão (Sales, ano).....	15
Figura 2.6 –	Efeito da variação do tipo de gás sobre o reforço do cordão (Sales, ano).....	15
Figura 2.7 –	Depósitos realizados com diferentes arames tubulares e gases de proteção (Im variável de 50 a 300 A de 50 a 50 A, Vsoldagem = 3 mm/s) (Medeiros et al, 1989).....	16
Figura 2.8 –	Influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição para arames do grupo T-1 (Bracarense, 2000).....	17
Figura 2.9 –	Influência da corrente média (Im) na penetração (P) para diferentes diâmetros de arame (Arame E71T-1, Ar + 20 % CO ₂ , CC ⁺ , v = 3 mm/s) (Medeiros et al, 1989).....	18
Figura 2.10 –	Influência do produto Im x v na diluição (D) (E 71T-1, Ar + 20 % CO ₂ , Im/F = 2) (Medeiros et al, 1989).....	19
Figura 2.11 –	Influência da extensão do eletrodo (l) na velocidade de alimentação do arame (W) para o arame E 71T-5 com diâmetro de 1,2 mm (a) e 1,6 mm (b) (Ip = 350 A, Tp = 4 ms, Ar + 20 % CO ₂ , CC ⁺) (Medeiros et al, 1989).....	20
Figura 2.12 –	Efeito do “stickout” sobre: (a) Taxa de deposição (b) Taxa de fusão (Braga et al, 1998).....	21
Figura 2.13 –	Representação gráfica da velocidade de alimentação em função da corrente média para arames diferentes em condições idênticas (Ip = 350 A, tp = 4 ms, Im/F = 2, D = 1,2 mm, Ar + 20 % CO ₂ , CC ⁺ , V = 3 m/s) (Medeiros et al, 1989).....	23
Figura 2.14 –	Influência da velocidade de soldagem (V) na penetração (P) (E71T-1, D = 1,2 mm, Ar-20% CO ₂ , CC ⁺) (Medeiros et al, 1989).....	24
Figura 2.16 –	Influência da velocidade de soldagem na diluição (E 71T-1, 1,2 mm, Ar + 20% CO ₂ , Im/F = 2) (Medeiros et al, 1989).....	25
Figura 2.17 –	Diferenças entre Arame Sólido e Arames Tubulares na Qualidade do Metal Depositado (Araújo, 2004).....	27

Figura 2.18 –	Transferência por Arco Pulsado.....	28
Figura 2.19 –	Limites operacionais para soldagem (a) com arame básico (b) com arame “metal cored” em soldas de filete horizontal/vertical (French et al, 1995).....	30
Figura 2.20 –	Seções de cordões na posição vertical – arame básico, 1,2 mm de diâmetro. A) Cordão produzido no modo convencional. B) e C) Cordão produzido no modo pulsado (French et al, 1995).....	31
Figura 3.1 –	Banco de ensaio.....	37
Figura 3.2 –	Representação da área da seção transversal do cordão de solda.....	40
Figura 4.1 –	Perfil dos cordões na condição: (a) e (c) $I_p = 280$ A, $I_b = 100$ A, $CA = 40$ % e $V_a = 6$ m/min; (b) e (d) $I_p = 350$ A, $I_b = 70$ A, $CA = 50$ % e $V_a = 5$ m/min.	48
Figura 4.2 –	Efeitos dos fatores na penetração para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.....	50
Figura 4.3 –	Efeitos dos fatores na convexidade para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.....	52
Figura 4.4 –	Efeito da interação I_p*CA sobre o IC no processo MAG.....	53
Figura 4.5 –	Efeito da interação I_p*I_b sobre o IC no processo Eletrodo Tubular.....	53
Figura 4.6 –	Efeitos dos fatores na área total para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.....	54
Figura 4.7 –	Efeito da interação I_p*V_a sobre a S_T no processo MAG.....	55
Figura 4.8 –	Efeitos dos fatores na qualidade visual do cordão para processo Eletrodo Tubular.....	56
Figura 4.9 –	Efeitos dos fatores na taxa de deposição para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.....	57
Figura 4.10 –	Efeito da interação I_p*I_b sobre a taxa de deposição no processo MAG.....	58
Figura 4.11 –	Efeitos dos fatores no rendimento para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.....	58
Figura 4.12 –	Interação I_p*I_b no processo MAG.....	59
Figura 4.13 –	Níveis das respostas pretendidas para o processo MAG.....	60
Figura 4.14 –	Níveis das respostas pretendidas para o processo Eletrodo Tubular.....	61
Figura 4.15 –	Efeito do tipo de processo sobre as respostas estudadas.....	63

Figura 4.16 –	Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a penetração.....	66
Figura 4.17 –	Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a convexidade do cordão.....	66
Figura 4.18 –	Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a taxa de deposição.....	67
Figura 4.19 –	Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre o rendimento da soldagem.....	67
Figura 4.20 –	Perfil dos cordões na condição: (a) $F=160$ Hz, $I_m=150$ A e $V_a=8$ m/min; (b) $F=200$ Hz, $I_m=200$ A e $V_a=6$ m/min.....	69
Figura 4.21 –	Efeitos principais dos fatores sobre a penetração.....	71
Figura 4.22 –	Influência da interação $I_m \cdot V_a$ sobre a penetração.....	71
Figura 4.23 –	Influência da interação $F \cdot V_a$ sobre a penetração.....	71
Figura 4.24 –	Efeitos principais dos fatores sobre o índice de convexidade.....	72
Figura 4.25 –	Influência da interação $I_m \cdot F$ sobre o índice de convexidade.....	73
Figura 4.26 –	Influência da interação $F \cdot V_a$ sobre o índice de convexidade.....	73
Figura 4.27 –	Efeitos principais dos fatores sobre a área total.....	74
Figura 4.28 –	Influência da interação $I_m \cdot V_a$ sobre a área total.....	75
Figura 4.29 –	Efeitos principais dos fatores na qualidade visual do cordão.....	75
Figura 4.30 –	Influência da interação $F \cdot V_a$ sobre a qualidade visual do cordão.....	76
Figura 4.31 –	Efeitos principais dos fatores na taxa de deposição.....	77
Figura 4.32 –	Efeitos principais dos fatores no rendimento de deposição.....	77
Figura 4.33 –	Efeito da interação $F \cdot V_a$ sobre o rendimento de deposição.....	78
Figura 4.34 –	Níveis das respostas pretendidas para o fatorial completo.....	79
Figura 4.35 –	Resultados do “Contour Plot” para o fatorial completo.....	80
Figura 4.36 –	Perfil de dureza da amostra produzida com Eletrodo Tubular sob baixa energia.....	82
Figura 4.37 –	Perfil de dureza da amostra produzida com Eletrodo Tubular sob alta energia.....	83
Figura 4.38 –	Perfil de dureza da amostra produzida com MAG sob baixa energia.....	83

Figura 4.39 –	Perfil de dureza da amostra produzida com MAG sob alta energia.....	84
Figura 4.40 –	Regiões micrográficas de uma amostra soldada, aumento: 50X.....	85
Figura 4.41 –	Microestruturas da ZTA - processo MAG, H = 704 J/mm, aumento: 200X.....	86
Figura 4.42 –	Detalhes da Martensita – processo MAG, H = 704 J/mm, aumento 500X.....	86
Figura 4.43 –	Microestruturas da ZTA – processo Eletrodo Tubular, H = 704 J/mm, aumento: 200X.....	87
Figura 4.44 –	Detalhes da perlita fina – processo Eletrodo Tubular, H = 704 J/mm, aumento: 500X.....	87
Figura 4.45 –	Micrografia do cordão feito no processo Eletrodo Tubular sob (a) H = 704 J/mm (b) H = 1195 J/mm, aumento: 50 X.....	88
Figura 4.46 –	Microestruturas da ZTA – processo MAG, H = 1195 J/mm, aumento: 200X.....	89
Figura 4.47 –	Detalhes da martensita grosseira – processo MAG, H = 1195 J/mm, aumento: 500X.....	90
Figura 4.48 –	Microestruturas da ZTA – processo Eletrodo Tubular, H = 1195 J/mm, aumento: 200X.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 –	Propriedades mecânicas requeridas (Scotti, 1986).....	11
Tabela 2.2 –	Condições de operação e composição química especificadas para o metal de solda (Scotti, 1986).....	12
Tabela 2.3 –	Parâmetros de pulso para soldagem com Eletrodo Tubular pulsado.....	33
Tabela 3.1 –	Níveis superiores e inferiores dos parâmetros em estudo.....	38
Tabela 3.2 –	Planejamento experimental.....	39
Tabela 3.3 –	Composição química (%) dos arames e do material base utilizados.....	39
Tabela 3.4 –	Seqüência de testes.....	43
Tabela 3.5 –	Parâmetros e níveis do planejamento fatorial completo.....	43
Tabela 3.6 –	Ordem padrão de testes para o planejamento fatorial completo.....	44
Tabela 3.7 –	Condições dos testes para a análise de dureza e das micrografias.....	44
Tabela 4.1 –	Sequenciamento e resultados dos experimentos para o processo MAG.....	46
Tabela 4.2 –	Sequenciamento e resultados dos experimentos para o processo Eletrodo Tubular.....	47
Tabela 4.3 –	Resultado da análise de variância.....	49
Tabela 4.4 –	Quadro resumo das respostas obtidas pelo “Response Optimizer”.....	61
Tabela 4.5 –	Quadro comparativo entre respostas previstas e obtidas.....	62
Tabela 4.6 –	Testes e resultados complementares.....	65
Tabela 4.7 –	Ordem de testes e resultados do fatorial completo.....	68
Tabela 4.8 –	Resultado da análise de variância para o novo planejamento fatorial.....	69
Tabela 4.9 –	Quadro resumo das respostas obtidas pelo “Response Optimizer”.....	79

Tabela 4.10 –	Resultados de dureza da ZTA, cordão e metal base.....	82
Tabela 1 –	Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos com MAG.....	99
Tabela 2 –	Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos com Eletrodo Tubular.....	100
Tabela 3 –	Grandezas medidas antes e após os ensaios com o processo MAG.....	101
Tabela 4 –	Grandezas medidas antes e após os ensaios com o processo Eletrodo Tubular.....	102
Tabela 5 –	Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos nos testes preliminares para o fatorial completo.....	103
Tabela 6 –	Grandezas medidas antes e após os testes preliminares para o fatorial completo.....	103
Tabela 7 –	Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos no fatorial completo.....	104
Tabela 8 –	Grandezas medidas antes e após os testes para o fatorial completo.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

φ_{el} =	diâmetro do eletrodo [mm]
σ =	desvio padrão
ABNT =	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ar =	argônio
AWS =	American Welding Society
b =	largura da solda [mm]
C =	carbono
CA =	ciclo ativo [%]
CO ₂ =	dióxido de carbono
d =	densidade volumétrica do arame [g/cm ³]
DBCP =	distância do bico de contato à peça [mm]
F =	freqüência de pulso [Hz]
FCAW =	flux cored arc welding
F*Va =	interação entre a freqüência e a velocidade de alimentação do arame
GMAW =	gás metal arc welding
H =	energia de soldagem [J/mm]
Im =	corrente média [A]
Im*F =	interação entre a corrente média e a freqüência
Im*F*Va =	interação entre a corrente média, a freqüência e a velocidade de alimentação do arame
Im*Va =	Interação entre a corrente média e a velocidade de alimentação do arame
Ip =	corrente de pico [A]
Ip*CA =	interação entre a corrente de pico e o ciclo ativo
Ip*Ib =	interação entre a corrente de pico e a corrente de base
Ip*Va =	interação entre a corrente de pico e a velocidade de alimentação do arame
L _{el} =	comprimento do eletrodo [mm]
m _{cf}	massa final do corpo de prova [g]
m _{ci}	massa inicial do corpo de prova [g]
Mn =	manganês
Nb =	nióbio
OP =	ordem padrão
P =	penetração da solda [mm]
P =	fósforo
r =	reforço da solda [mm]
Rend =	Rendimento [%]
S =	enxofre
Si =	silício
Sp =	área de penetração [mm ²]
Sr =	área de reforço [mm ²]
S _T =	área total [mm ²]
t	tempo de soldagem [s]
Tb =	tempo de base [ms]
Tp =	tempo de pico [ms]
Txdep =	taxa de deposição [kg/h]
v =	velocidade de soldagem
Va =	velocidade de alimentação do arame [m/min]
ZTA =	zona termicamente afetada