

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

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, devido a incessante busca de se manterem competitivas, as indústrias estão interessadas na obtenção de processos de soldagem que conjuguem a versatilidade, produtividade, qualidade e baixos custos.

Nesse contexto, a soldagem com Eletrodo Tubular tem se destacado devido as suas vantagens em relação a outros processos, principalmente no que se refere a sua alta produtividade e excelente qualidade dos cordões.

Nesse trabalho, visando possibilitar a soldagem de chapas finas e fora da posição plana, foram realizadas soldas com os processos Eletrodo Tubular e MAG utilizando o modo pulsado de soldagem. Este modo de soldagem apresenta vantagens em relação ao modo convencional, pois permite um aporte térmico muito reduzido utilizando-se o modo de transferência por spray. Neste modo de soldagem, a corrente oscila entre dois níveis, um baixo, a corrente de base, e um alto, a corrente de pico, de modo, que a corrente média resultante, seja inferior a corrente de transição, impondo, desta forma, uma pequena quantidade de energia ao processo.

A utilização do modo pulsado, no entanto, apresenta algumas limitações, que causam a sua pequena popularidade entre os fabricantes. A dificuldade operacional do modo pulsado é causada pelo grande número de variáveis a serem controladas. Na prática, é difícil estabelecer as condições de pulso, o que, normalmente, é feito por tentativa e erro. Esse procedimento, no entanto, na maioria das vezes, não permite que a máxima capacidade do processo seja utilizada.

Por outro lado, o processo Eletrodo Tubular pulsado é ainda hoje um processo pouco conhecido no Brasil, sendo seus limites operacionais ainda não muito bem definidos. Por isto, apesar das muitas vantagens citadas sobre este processo, na prática, muitas vezes o processo não corresponde às expectativas.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é ampliar o conhecimento sobre a soldagem com Eletrodo Tubular pulsado através de uma investigação dos limites adequados para a operação deste processo, procurando entender a influência dos parâmetros de pulso sobre as respostas desejadas dentro dos limites investigados.

O estudo da influência dos parâmetros é importante porque permite extinguir os já citados empecilhos à utilização do modo pulsado, possibilitando encontrar os parâmetros adequados para obter as características de interesse, de acordo com uma aplicação desejada. Isto é possível, porque através desse tipo de estudo pode-se descobrir quais variáveis são mais influentes nos resultados,

atribuindo valores e concentrando-se o estudo nestas, de modo a otimizar os resultados e minimizar a variabilidade dos mesmos.

Contudo, para atingir o objetivo principal deste trabalho foi necessário dividi-lo em etapas a serem seguidas constituindo os objetivos intermediários, assim definidos:

- **Primeiro objetivo intermediário:** estudar a influência dos parâmetros de pulso sobre as características geométricas e produtivas do processo MAG, visando uma comparação deste processo com o Eletrodo Tubular. Esta comparação, inicialmente idealizada, teve a finalidade de observar as semelhanças entre as influências dos fatores analisados em ambos os processos e avaliar as possíveis vantagens do Eletrodo Tubular sobre o MAG, notadamente citadas na literatura.
- **Segundo objetivo intermediário:** encontrar parâmetros operacionais mais adequados para o processo Eletrodo Tubular, visto que os parâmetros inicialmente utilizados visavam uma comparação entre os processos, prejudicando, de uma certa forma, análises centradas no Eletrodo tubular. O objetivo em questão, foi atingido através de novos testes, realizados no decorrer do trabalho, que permitiram que uma nova fase do trabalho fosse iniciada, concentrando-se exclusivamente no estudo do processo Eletrodo Tubular.
- **Terceiro objetivo intermediário:** observar as diferenças de dureza e microestruturais resultantes em amostras soldadas com os processos Eletrodo Tubular e MAG sob diferentes condições.

Em soldagem e em várias outras áreas da engenharia, a fim de se determinar parâmetros e, conseqüentemente, verificar a influência dos mesmos nas características dos processos, técnicas estatísticas têm sido utilizadas com bastante freqüência. Nesse trabalho, utiliza-se o Projeto e Análise de Experimentos (DOE – Design of Experiments), que é uma técnica baseada em conceitos estatísticos, e tem sido muito abordada, por permitir identificar o efeito de determinadas variáveis em uma superfície de contorno preestabelecida, utilizando um número reduzido de experimentos.

Para atingir de forma mais rápida e objetiva as propostas do trabalho e facilitar a compreensão do seu desenvolvimento, este foi dividido em cinco capítulos, abordando os seguintes assuntos:

Capítulo 1: no capítulo 1 é apresentada uma introdução do trabalho, onde se mostra uma idéia do que, como e porque se optou por uma determinada linha de ação;

Capítulo 2: no capítulo 2 fez-se uma revisão da literatura específica, buscando informações técnicas que permitissem maior agilidade no desenvolvimento da fase experimental. Nesse capítulo foram abordados assuntos referentes às características dos fluxos introduzidos no eletrodo tubular, aos tipos e formas de consumíveis, suas classificações, aos tipos de gases de proteção, aos parâmetros de soldagem e ao modo de soldagem pulsado.

Capítulo 3: o capítulo 3 apresenta os métodos, os materiais e os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios, além de dados colhidos em laboratório.

Capítulo 4: no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos dos experimentos, além das discussões a cerca destes. São apresentados, primeiramente, os resultados oriundos da comparação entre os processos MAG e Eletrodo Tubular. Posteriormente, são apresentados os resultados da definição de um novo planejamento fatorial, através de testes exploratórios e os resultados da análise da influência dos fatores de pulso sobre as características geométricas e produtivas do processo Eletrodo Tubular, através do planejamento fatorial completo definido. Finalizando o capítulo 4, apresenta-se um estudo da dureza e da micrografia das soldas realizadas com os processos MAG e Eletrodo Tubular sob diferentes condições.

Capítulo 5: o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros;

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

O processo Eletrodo Tubular é um processo de soldagem, cujo arco é estabelecido entre a peça e o eletrodo, sendo protegido pela ação de um gás externo e pela decomposição do fluxo alojado no interior do arame (Welding Handbook, 1963; Mota, 1998; Braga, Mota e Farias, 1998). Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais, a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, a proteção do banho de fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (Mota, 1998).

Existem duas variações para o processo; uma com proteção adicional de gás (**Figura 2.1**) e a outra, sem a proteção externa de gás ou autoprotégido (**Figura 2.2**). Na soldagem com arame tubular autoprotégido o metal fundido é protegido por uma camada de escória, pelos gases e pelos elementos desoxidantes/desnitretantes resultantes da decomposição do fluxo (Braga, Mota e Farias, 1998).

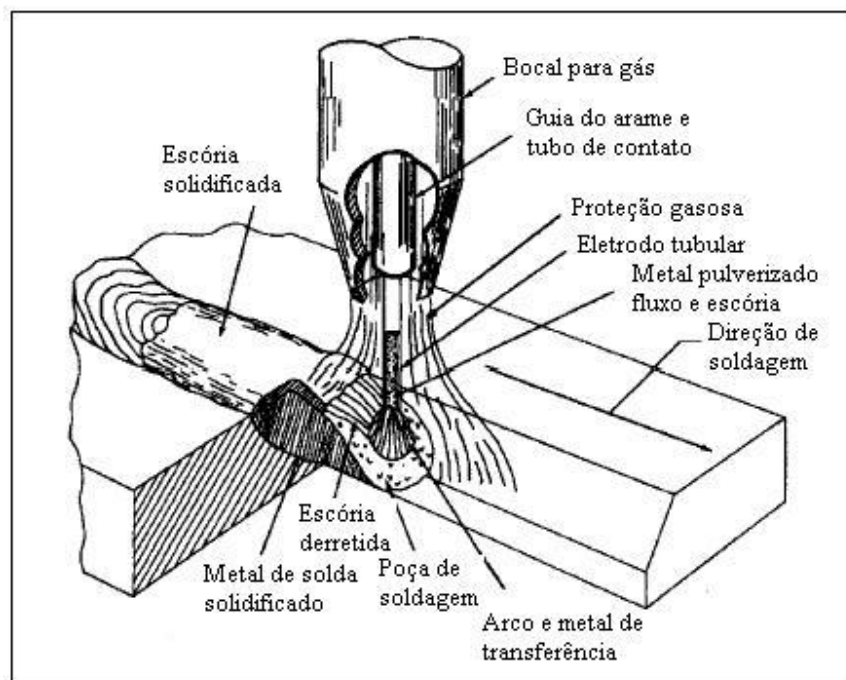


Figura 2.1 – Soldagem com Eletrodo Tubular com proteção gasosa.

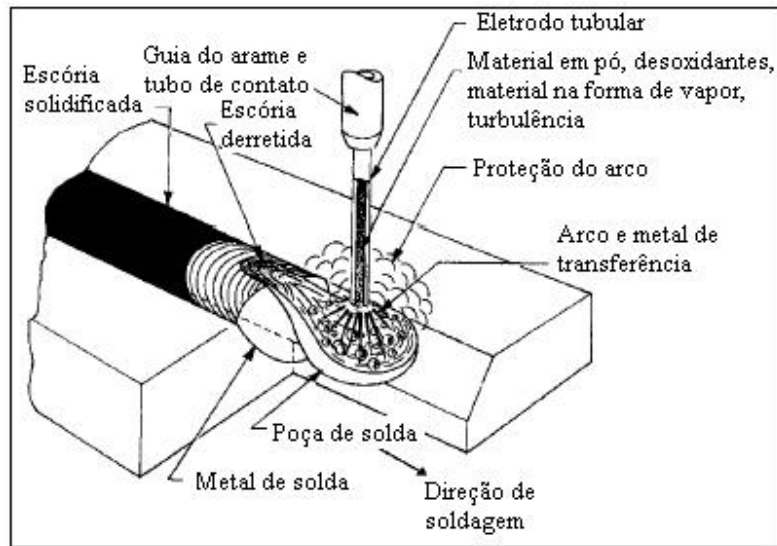


Figura 2.2 – Soldagem com Eletrodo Tubular autoprottegido.

Apesar da similaridade entre os processos Eletrodo Tubular com proteção gasosa e MAG, aquele apresenta algumas vantagens e limitações em relação a este. Assim sendo o processo Eletrodo Tubular se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual, além de soldar vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras, apresentar alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente, apresentar alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas, possuir relativamente alta eficiência de deposição e alta produtividade (Araújo, 2004). Em virtude dessas características, pode-se concluir que o processo Eletrodo Tubular é uma excelente opção quando o objetivo é qualidade, produtividade e facilidade operacional. Por outro lado, o processo Eletrodo Tubular limita-se por apresentar um alto custo do arame tubular na base de peso em relação ao arame de eletrodo sólido (Araújo, 2004). No entanto, segundo Stridh (2000), o custo total de produção de um componente de carro fabricado com soldagem robotizada, utilizando-se um arame tubular tipo “metal cored” com 1,4 mm de diâmetro é menor que com o uso de arame sólido de 1,0 mm de diâmetro, embora não tenham sido informados os parâmetros de soldagem, nem as composições de gases de proteção utilizados.

A proteção gasosa nas operações de soldagem teve início de utilização na década de 30, para resolver problemas da contaminação atmosférica nas soldas de materiais reativos (alumínio, titânio e ligas de magnésio), tendo sua origem com o processo TIG (Tungsten Inert Gas). Em 1948, surge o processo MIG, que possui o mesmo princípio de funcionamento do TIG, ou seja, um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça, envolto por uma atmosfera protetora de gás inerte; e que difere do anterior por utilizar um eletrodo consumível de alimentação contínua. Inicialmente foi utilizado para

ligas altamente reativas, pois a utilização de gases inertes tornava seu custo elevado para utilização em aços carbono e baixa liga. No entanto, com a introdução do CO₂ como gás de proteção, revelou-se um processo bem aceito para soldagem dos referidos materiais, tendo barateado o custo do processo. Porém, o processo MIG/MAG ainda apresentava a dificuldade de se evitar porosidade e falta de fusão nas soldagens de aços comuns ao carbono (Mota, 1998).

Assim sendo, por volta dos anos 50, com a comprovação das vantagens da utilização do semi-automatismo do MIG/MAG e com a possibilidade de produzir soldas sem poros devido a ação desoxidante do recheio (Mota, 1998), iniciam-se os estudos para a utilização do arame tubular, com a ajuda de proteção externa gasosa.

A utilização de arame tubular deu uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de soldar em todas as posições, tendo ganho popularidade para soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de espessura grossa e fina (Mota, 1998). Devido à versatilidade dos arames, possibilitou-se a obtenção de um melhor nível de resistência mecânica e melhor tenacidade com uma maior taxa de deposição (Mota, 1998; Machado, 1997). Além disso, ainda, foi utilizado em grandes espessuras onde a geometria de junta e posição de soldagem não permitia a aplicação de outros processos de alto rendimento tal como o arco submerso (Mota, 1998).

Em 1956 a aplicação comercial do processo com proteção gasosa crescia rapidamente nos EUA, e de 1960 a 1980 o consumo anual passou de 500 para mais de 60000 toneladas por ano (Scotti e Silva, 1986). Mas, a popularidade, versatilidade e simplicidade do eletrodo revestido fez estimular também o desenvolvimento dos tubulares sem proteção gasosa. Os mesmos foram introduzidos no final da década de 50 quase que simultaneamente pelo instituto Patton (URSS) e pela firma LINCOLN (EUA), esta última denominando o processo de “Innershield” (Scotti e Silva, 1986).

As maiores limitações encontradas para o uso deste processo, com ou sem proteção externa, eram a impossibilidade de soldar fora de posição e a baixa resistência ao impacto do cordão de solda. O desenvolvimento de novos consumíveis, principalmente nos EUA, fez com que estas deficiências fossem bem diminuídas, e o processo passou a ser largamente utilizado neste país.

Apesar de, inicialmente, a aceitação pelos europeus ter sido menor, as evidências dos méritos do processo fizeram com que sua utilização crescesse no mundo todo.

2.2 - Características do Fluxo

Como já mencionado, o processo de soldagem com arame tubular consiste na utilização de um arame-eletrodo de alimentação contínua, cujo núcleo é preenchido por um fluxo fusível de composição química definida. A mistura deste fluxo pode incluir pó metálico, compostos minerais, sinterizados, compostos químicos, dentre outros. As principais funções cumpridas pelo fluxo são relacionadas à presença e ao teor dos elementos formadores de gás, de escória, dos estabilizadores do arco voltaico, dos desoxidantes e desnitretantes e de elementos de liga. E com os diversos tipos de metal e de fluxo, dispõe-se de muitas possibilidades para diversificar os métodos de desoxidação e desnitretação e de adição de elementos de liga na composição química final da solda. A capa metálica pode ser de aço baixo carbono ou de um material similar àquele que será soldado, como por exemplo, um aço inoxidável (Mota, 1998).

Além disso, a presença do fluxo torna os consumíveis mais tolerantes às variações inerentes as condições de operação, tais como a velocidade de alimentação do arame e a tensão do arco elétrico, minimizando seus efeitos na qualidade da junta soldada.

Portanto, a principal característica do processo é a presença do fluxo, que é uma mistura de materiais cuja composição química é projetada para garantir, além das características metalúrgicas, outras características que definem a proposta do consumível. Isto torna este processo de relevante importância tecnológica, uma vez que alia a possibilidade de aumentos consideráveis na taxa de deposição através da alta produtividade dos processos de arame contínuo com as vantagens metalúrgicas dos processos com fluxos.

O percentual de fluxo no interior do arame pode variar de 15 a 50% do seu peso. Este percentual vai depender, entre outros fatores, das funções a serem desempenhadas pelo fluxo. Arames tubulares autoprotégidos possuem percentuais de fluxo consideravelmente superiores aos que utilizam proteção gasosa (Mota, 1998).

No entanto, o balanceamento da composição química do fluxo, torna-se uma tarefa muito complexa pela grande quantidade dos ingredientes envolvidos, pela diversidade de suas funções, pelas suas interações e pelo reduzido espaço disponível no núcleo do arame que limita bastante a relação fluxo/metal. Além do mais, é difícil de precisar o papel específico para um ingrediente isolado, uma vez que pequenas modificações podem significar profundas e inesperadas alterações nos resultados pretendidos. Desta forma, teores inadequados de desoxidantes e desnitretantes podem aumentar a incidência de porosidade e/ou reduzir a tenacidade da solda (Ferree, 1996).

Neste sentido, diversas pesquisas têm sido realizadas como forma de melhor adequar o processo a determinadas características específicas da solda, como na melhoria das propriedades mecânicas através de alterações no sistema ligante do fluxo (Mota, 1998; French e Bosworth, 1997; Lee, 2001), na relação fluxo/formação da escória ou de seus reflexos frente à presença de contaminantes (Bauné, 2000; Atkins, 2002). Assim sendo, algumas pesquisas têm sido realizadas no sentido de desenvolver eletrodos que proporcionem à solda características específicas. Mota (1998), por exemplo, num estudo do desempenho de oito tipos de arames derivados do arame tubular da classe AWS E 71T-7, alterando apenas o sistema ligante com substituição de teores de manganês e de níquel por ferro, buscou melhorar a tenacidade da solda em baixas temperaturas; French e Bosworth (1997) também fizeram uma investigação, buscando encontrar uma fórmula para o arame tubular básico que permitisse que tal arame pudesse realizar soldas em todas as posições utilizando o modo pulsado. Para isto desenvolveram, a partir de um arame padrão, uma série de arames cujos componentes formadores de escória foram reduzidos.

2.3 - Consumíveis

2.3.1 - Tipos e Formas

Os eletrodos para soldagem com arame tubular protegido externamente, em geral, podem ser divididos em três classes de acordo com o tipo de escória formada. Estas classes são: arames com fluxo rutílico, com fluxo básico e com fluxo metálico ou “metal cored” (French e Bosworth, 1995).

Os arames com fluxo rutílico, geralmente, são de uso mais “amigável”. Formam arco mais estável e cordão de boa aparência, apresentam um limite mais extenso de valores de corrente, em que operam satisfatoriamente e podem ser soldados em todas as posições. Entretanto, não produzem soldas com boas propriedades de impacto a baixa temperatura ou valores muito baixos de hidrogênio depositado na solda (menores que 5 ml/100 g de metal depositado) (French e Bosworth, 1995). Suas vantagens operacionais incentivaram o uso deste eletrodo no presente trabalho.

Os arames com fluxo básico são usados quando se necessita de melhores propriedades mecânicas e baixos níveis de hidrogênio depositados na solda; segundo Melton et al (1992), arames tubulares com fluxo básico produzem soldas com excelente qualidade, boas propriedades mecânicas a baixas temperaturas e níveis de hidrogênio difusível menores que 5 ml/100g de metal depositado. O grande problema desses arames é o seu comportamento operacional. Comparados com os eletrodos

com fluxo rutilico, eles apresentam arco instável, produzem cordão de solda mais convexo e muitos respingos (French e Bosworth, 1995; Blackman e Norrish, 1988). No entanto, utilizando o modo pulsado, a soldagem pode ser controlada da mesma maneira que com arames sólidos em soldagem MIG pulsada (Blackman e Norrish, 1988).

Os arames com fluxo metálico ou “metal cored” promovem uma alta taxa de deposição e uma pequena camada de escória formada, devido a natureza de seu núcleo, que é preenchido basicamente com pó metálico. Esta característica dos arames “metal cored” faz com que sua densidade total volumétrica seja muito próxima a de arames maciços de aço carbono; diferentemente dos arames rutilicos e básicos, que devido aos diferentes tipos de óxidos presentes em seus fluxos, apresentam densidade total volumétrica inferior a de arames maciços de aço carbono (Starling et al, 2003). Os arames “metal cored” normalmente operam com argônio puro como gás de proteção e com uma densidade de corrente e tensão para facilitar o tipo de transferência por spray (French e Bosworth, 1995).

O tipo de arame tubular também influencia na transferência metálica, sendo que, em arames com fluxo rutilico, o fluxo forma uma coluna que toca a poça de fusão e que se quebra imediatamente antes da transferência da gota de metal fundido para a poça de fusão (Bracarense et al., 2002). Nos arames com fluxo básico e “metal cored” a transferência metálica, geralmente necessita da influência da gravidade, já que os valores de correntes usados são baixos. Portanto, o seu uso também não é muito adequado para soldagem fora de posição (French e Bosworth, 1995).

Logo, pode-se dizer que os arames rutilicos são utilizados para soldas fora de posição e os eletrodos básicos e “metal cored” possuem vantagens em relação às propriedades mecânicas, níveis de hidrogênio depositados na solda, taxa de deposição e eficiência. As principais desvantagens dos eletrodos básicos e “metal cored” são a restrição ao uso de altos valores de corrente e a impossibilidade de soldar fora de posição (French e Bosworth, 1995).

Além do tipo de fluxo contido no arame tubular, deve-se levar em consideração na escolha do tipo de eletrodo o formato e o método de construção do arame tubular, pois estes fatores têm uma correlação muito grande com o desempenho dos eletrodos (Scotti e Silva, 1986; Mota, 1998); por isso existem variadas formas geométricas para os mesmos. Assim sendo, a configuração metal/fluxo na seção do arame, pode apresentar-se como tubular simples ou multifolder, conforme é ilustrado na **Figura 2.3**.

Geralmente as formas simples (**Figura 2.3(a, b)**) são de fácil fabricação e mais baratas. Nas seções mais complexas (**Figura 2.3(c)**), projetadas para arame de maior diâmetro, as características operacionais (estabilidade) do arco são superiores e propiciam melhor soldabilidade (Scotti e Silva,

1986; Huisman, 1996), o que se justifica pela maior homogeneidade do aquecimento do recheio, devido ao melhor contato térmico entre o metal e o recheio e conseqüentemente mais uniformidade de aquecimento e fusão do fluxo investido no interior; no entanto, têm dificuldades para a soldagem fora da posição plana (Huisman, 1996).

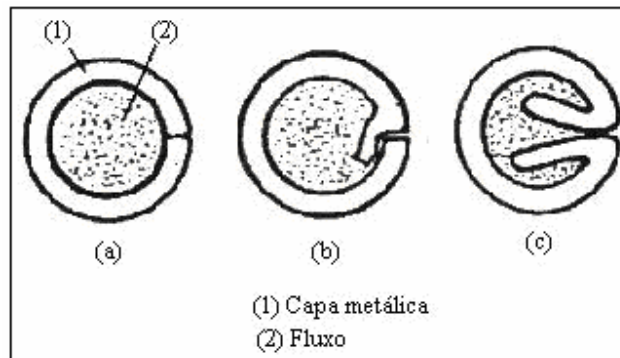


Figura 2.3 - Formas da seção transversal de arames tubulares: a e b – seção simples; c – “multifolder”.

As características de fusão simultânea da capa metálica e do fluxo são importantes no estudo de mecanismos de fusão dos arames tubulares. A fusão de um arame tubular apresenta diferenças com relação aos arames maciços, pois a condutibilidade térmica do fluxo depende das composições químicas da parte metálica e da parte mineral, sendo menor com o aumento da temperatura e maior com o aumento do tamanho de suas partículas (Mota, 1998).

Isto ocorre porque o fluxo reduz o grau de “aquecimento ôhmico” (efeito Joule) do arame durante a passagem de corrente. A taxa de aquecimento da capa metálica é então menor devido ao consumo de calor requerido para a fusão do fluxo. A área do fluxo adjacente à capa metálica fundida é um sistema não homogêneo com uma resistência térmica adicional, dependente não somente dos parâmetros geométricos, mas também de propriedades térmicas desta camada superficial, da distribuição e do tamanho das partículas, da concentração dos componentes e de suas interações. Desta maneira, a condutibilidade térmica de um arame tubular aumenta com o incremento da transferência de calor através do fluxo e da capa metálica, afetando o seu consumo (Mota, 1998). O processo de fusão dos arames tubulares, além da troca de calor e de massa entre o fluxo e a capa metálica, inclui também os processos de formação de escória, a evolução de produtos gasosos e a evolução de reações químicas, o que o torna extremamente complexo (Mota, 1998).

2.3.2 – Classificação

Os Eletrodos Tubulares para soldagem de aço comum ao carbono e aço baixa liga estão classificados pela AWS nas especificações AWS A-5-20 e AWS A-5-29 (AWS, 1979; AWS, 1980) . Estas classificações se baseiam na aplicabilidade do arame, quanto à utilização ou não do gás de proteção e quanto a adequabilidade para simples ou múltiplos passes. Também leva em consideração o tipo de corrente e posição de soldagem recomendada e propriedades mecânicas do metal de solda. O sistema de classificação usa o seguinte modelo:

EXYT – Z – K

onde:

E – Eletrodo a arco elétrico; X – Resistência mínima à tração, em 10000 Psi; Y – Indica a posição de soldagem recomendada, sendo “0” para posição plana e horizontal e “1” para todas as posições; T – indica ser arame tubular; Z – Indica a aplicabilidade e desempenho, dividindo os eletrodos em grupos de 1 a 8, além dos números 10, 11, G, Gs; K – Indica a composição química do metal de solda, necessário para os eletrodos de aço liga.

As **Tabelas 2.1 e 2.2** ilustram requisitos de propriedades mecânicas e composição química dos eletrodos para aço comum ao carbono.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas requeridas (Scotti e Silva, 1986).

Classificação	Lim. Res.	Lim. Esc.	Elongamento	Impacto
AWS	(Kgf/mm²)	(Kgf/mm²)	(%)	Charpy-V
E6XT-1	43,6	35,2	22	27 J a 18 °C
E6XT- 4/7/11/G	43,6	35,2	22	não requerido
E6XT- 5/6/8	43,6	35,2	22	27 J a 29 °C
E6XT- GS	43,6	não requerido	não requerido	não requerido
E7XT- 1	50,7	42,2	22	27 J a 18 °C
E7XT- 2/3/10/GS	50,7	não requerido	não requerido	não requerido
E7XT- 4/7/11/G	50,7	42,2	22	não requerido
E7XT- 5/6/8	50,7	42,2	22	27 J a 29 °C

Tabela 2.2 - Condições de operação e composição química especificadas para o metal de solda (Scotti e Silva, 1986).

Classificação AWS	Meio de Proteção	Nº de passes e Polaridade	Composição Química (%) - Valores máximos									
			C ⁽²⁾	P	S	V	Si	Ni	Cr	Mo	Mn	Al ⁽¹⁾
EXXT-1	CO2	Multi, CC+		0,004	0,03	0,08	0,90	0,50	0,20	0,30	1,75	1,80
EXXT-4	Auto Prot.	Multi, CC+										
EXXT-5	CO2	Multi, CC+										
EXXT-6	Auto Prot.	Multi, CC+										
EXXT-7	Auto Prot.	Multi, CC-										
EXXT-8	Auto Prot.	Multi, CC-										
EXXT-11	Auto Prot.	Multi, CC-										
EXXT-G		Multi										
EXXT-GS		Único										
EXXT-2	CO2	Único, CC+	Não requerida, pois a análise do metal de solda não é									
EXXT-3	Auto Prot.	Único, CC+	significativa, uma vez que são eletrodos para alta diluição									
EXXT-10	Auto Prot.	Único, CC-										

1- Somente para eletrodos autoprotetidos

2- Deve ser determinado, mas não é especificado

Nesse trabalho utilizou-se o arame AWS E71T-1. O desempenho e a aplicabilidade do grupo, referenciado por T-1 podem ser resumidos por serem classificados para uso com CO₂, mas pode ser utilizado com mistura argônio-CO₂, especialmente, quando necessitar de soldagem fora de posição. Quanto maior a proporção de argônio na mistura, maior poderá ser a resistência ao impacto, devido ao crescimento do Mn e Si na solda. Diâmetros maiores que 1,6 mm são recomendados fora de posição. O tipo de transferência é “spray” com poucos respingos e escória de boa destacabilidade (Scotti e Silva, 1986). A maioria dos fluxos é de alto rutilo, que produz um cordão plano e de ótima configuração, e de boa penetração. Existem também fluxos à base de calcário e misto calcário-rutilo. O fluxo quanto mais básico, proporciona pior aspecto do cordão, aumentando a convexidade, mas melhora as propriedades ao impacto, conforme já foi mencionado (Scotti e Silva, 1986).

2.4 - Gases de Proteção

Os gases utilizados para soldagem com arame tubular são basicamente os mesmos utilizados na soldagem MAG com arame sólido, sendo os mais utilizados o dióxido de carbono como gás ativo e

argônio e ou hélio como gases inertes, podendo também se utilizar a mistura de dióxido de carbono com argônio ou com hélio, de acordo com as especificações do fabricante de consumível.

De acordo com Miranda (1999), a mudança do tipo de gás influi na geometria do arco voltaico, gerando mudanças na forma do cordão.

2.4.1 - Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (CO_2) é muito usado para proteção durante a soldagem com arames tubulares. Duas vantagens deste gás são o baixo custo e alta penetração. A alta penetração obtida se dá porque CO_2 apresenta uma maior condutibilidade térmica, provocando arcos mais estreitos e uma transferência de calor maior para a peça. Além disso, o arco elétrico sob a proteção de CO_2 assegura elevadas pressões na poça de fusão promovendo uma influência marcante na geometria da solda, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão (Sales et al, 2001).

Apesar de o processo de soldagem com arames sólidos não permitir o alcance da transferência por “spray” utilizando-se o CO_2 puro, um aspecto interessante a ser observado em soldagens com arame tubular, é que este processo, mesmo utilizando 100% de CO_2 como gás de proteção, permite que se alcance a transferência metálica do tipo “spray” (Nascimento et al, 2003).

O dióxido de carbono é relativamente inativo na temperatura ambiente. Quando ele é aquecido a altas temperaturas pelo arco elétrico, dissocia-se formando o monóxido de carbono (CO) e o oxigênio. O oxigênio proveniente desta dissociação irá reagir com os elementos do metal fundido oxidando-os. Assim, materiais desoxidantes são adicionados ao fluxo do eletrodo para compensar os efeitos oxidantes do CO_2 (Bracarense, 2000).

2.4.2 - Misturas de Gases

O uso da mistura de gases na soldagem com arames tubulares pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases. O aumento de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração será reduzida. O Argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com CO_2 (100%)

(Bracarense, 2000). A **Figura 2.4** apresenta um comparativo do efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda em soldagem com Eletrodo Tubular.

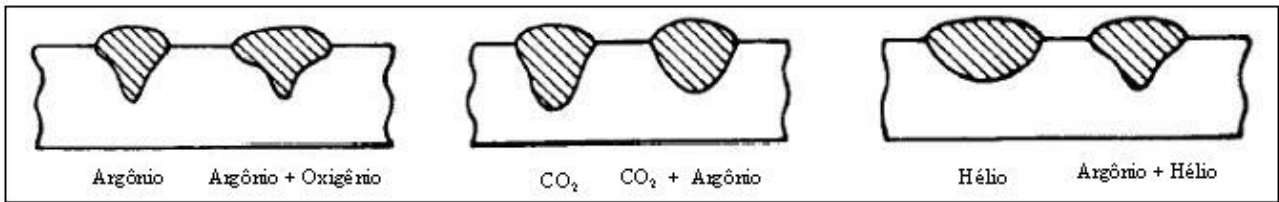


Figura 2.4 - Efeito do Gás de Proteção no Perfil do Cordão de Solda (Bracarense, 2000).

Alguns resultados da influência benéfica da mudança do gás CO₂ para uma mistura de Argônio e CO₂ são verificadas através da obtenção de melhores propriedades metalúrgicas (Surian e Rissone, 1998).

Atualmente, diversos tipos de mistura de gases estão disponíveis no mercado. A mistura de gases mais usada em soldagem com Eletrodo Tubular é 75% de Argônio e 25% de CO₂. O metal de solda depositado com esta mistura tem alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com o metal depositado com 100% de proteção com CO₂ (Bracarense, 2000).

Segundo Melton et al (1992), os gases mais adequados para soldagens com arame tubular básico, no modo pulsado, são as misturas de argônio com 12–15% de CO₂. Altas concentrações de CO₂ ocasionam soldagens com muitos respingos, ao passo que baixas concentrações de CO₂ (aproximadamente 5 %) permite gerar uma melhoria na forma da transferência metálica. Também Blackman e Norrish (1988), num estudo sobre soldagem com arames tubulares no modo pulsado, realizaram uma investigação com vários tipos de gases, incluindo argônio + 5-20% CO₂ e misturas de hélio, argônio e CO₂; e observaram que a mistura de argônio + 5% de CO₂ proporcionou uma maior estabilidade do arco.

Outros resultados em soldagem no modo pulsado (Sales et al, 2001), utilizando-se uma mistura de gases no lugar do CO₂ puro mostraram que a mistura afetou significativamente o reforço e a largura do cordão de solda. Observou-se que as soldas realizadas com Ar + CO₂ tendem a possuir um menor reforço e uma maior largura, como se observa nas **Figuras 2.5 e 2.6**, onde se analisa também a influência de dois níveis de distância do bico de contato à peça, DBCP (20 mm e 25 mm) . Isto indica que as soldas com a mistura Ar + CO₂ possuem um aspecto mais tênue, com uma melhor conformação do cordão, reduzindo a formação de pontos de concentração de tensão e melhorando o aspecto do depósito.

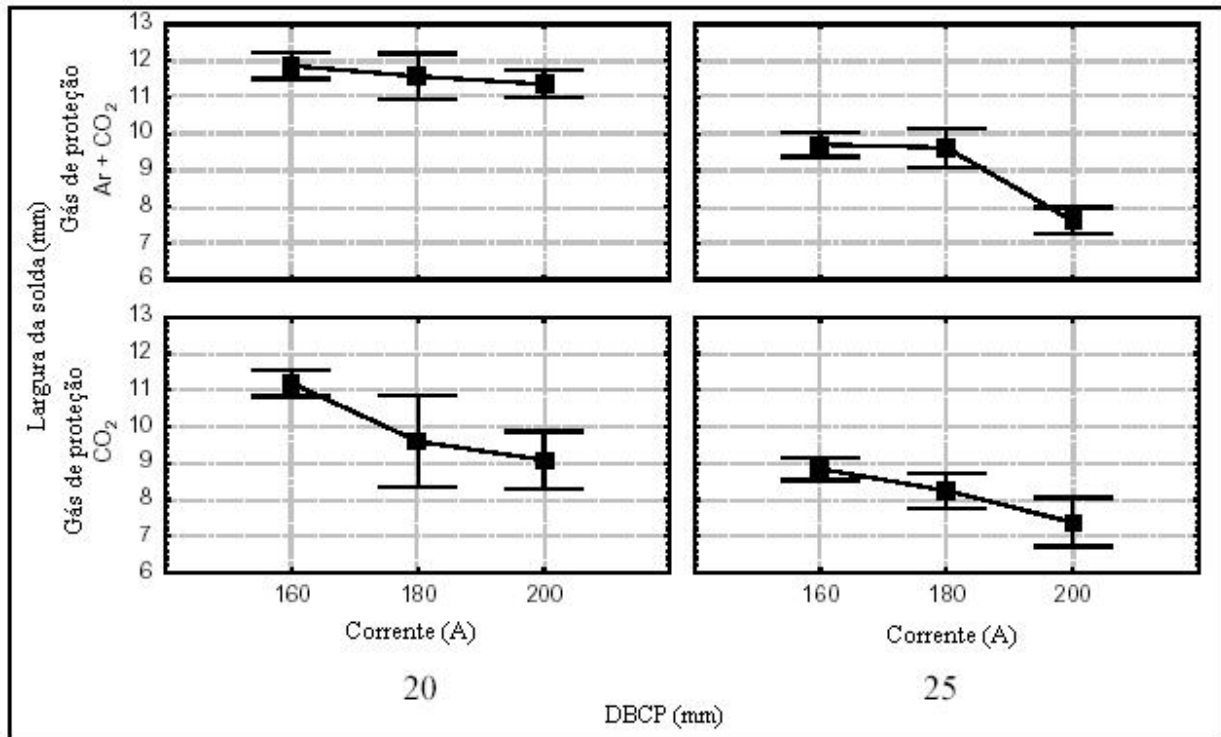


Figura 2.5 – Efeito da variação do tipo de gás sobre a largura do cordão (Sales et al, 2001).

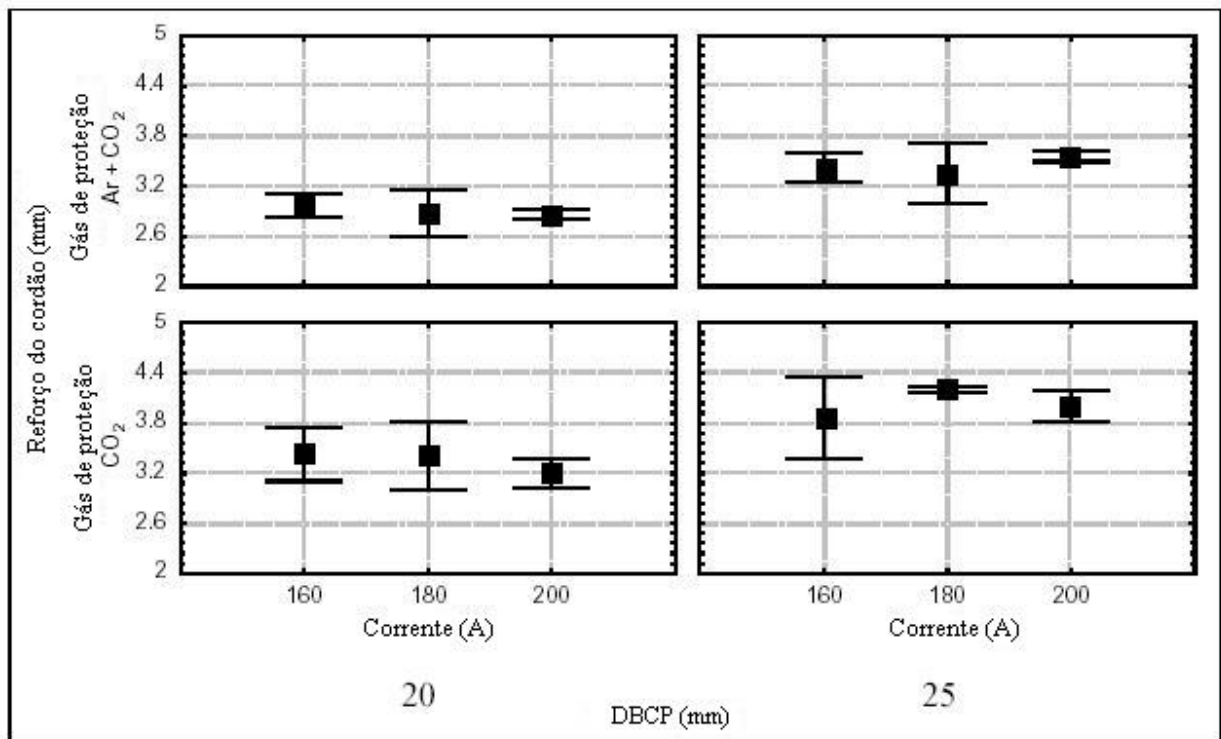


Figura 2.6 – Efeito da variação do tipo de gás sobre o reforço do cordão (Sales et al, 2001).

Estas características também foram observadas por Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989). Em ensaios com arames tubulares E 71T-5 e E 71T-1 utilizando-se os gases CO_2 e Ar + 20 % CO_2 , no modo pulsado, perceberam que os arcos foram mais estáveis com Ar + 20 % CO_2 comparativamente ao CO_2 , conforme pode ser observado na **Figura 2.7**. Notaram que praticamente não houve salpicos para ambos os arames protegidos por atmosfera de Ar + 20 % CO_2 . Com a proteção de CO_2 puro, verificaram a formação de gotas grandes, aumentando com o aumento do diâmetro do consumível, originando uma transferência assimétrica e acompanhada de bastantes salpicos. Este comportamento foi observado com arames de 1,2 e 1,6 mm de diâmetro.

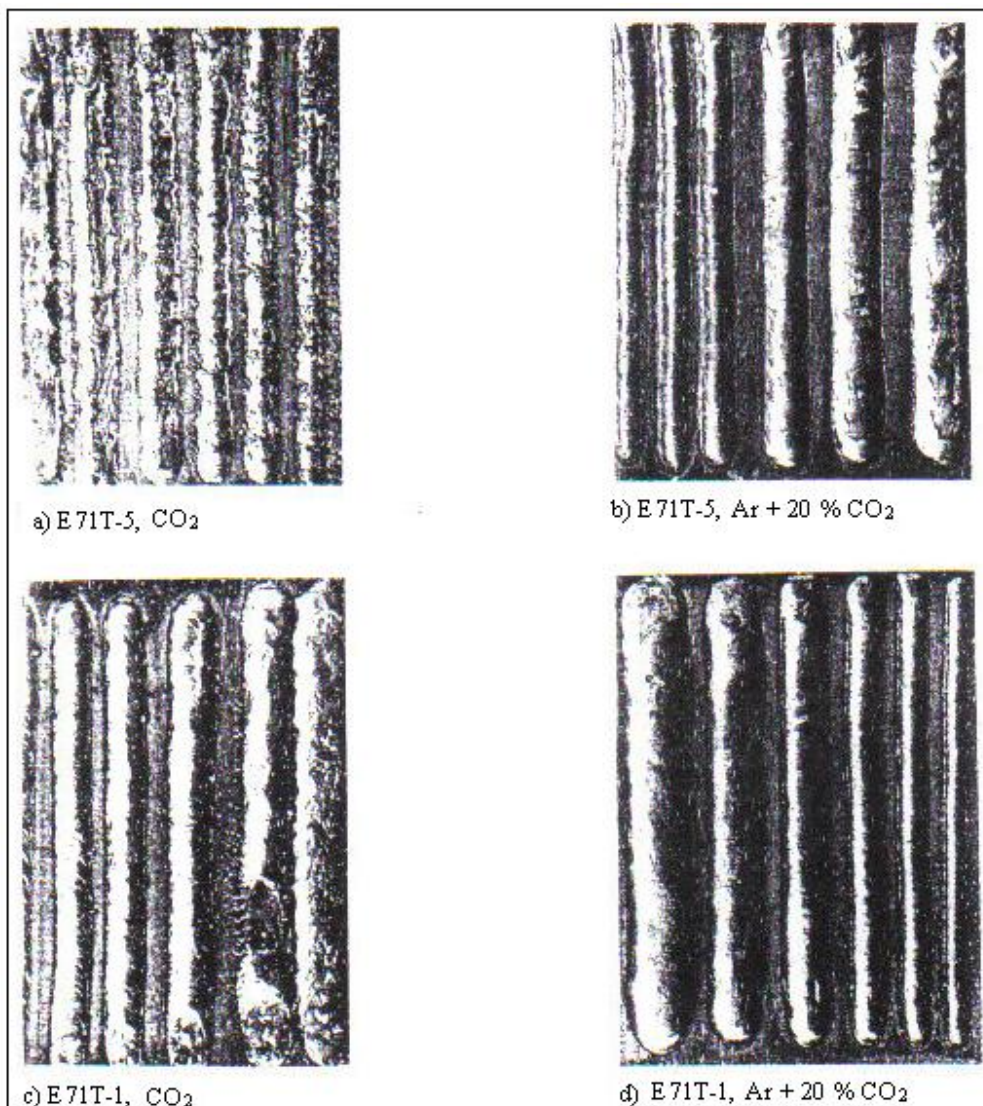


Figura 2.7 – Depósitos realizados com diferentes arames tubulares e gases de proteção (Im variável de 50 a 300 A de 50 a 50 A, $v = 3$ mm/s) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Neste trabalho utilizou-se a mistura de gases Ar + 25% CO₂ devido às vantagens aqui citadas.

2.5 - Parâmetros de Soldagem

2.5.1 - Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo, sendo que a taxa de deposição e penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem (Poepcke, 1997; Sales et al, 2001). A **Figura 2.8** mostra a influência da intensidade de corrente para arames do grupo T-1 sobre a taxa de deposição (Bracarense, 2000). Além disso, o aumento da corrente de soldagem causa também, uma diminuição na quantidade de salpicos, porosidades, e diâmetro da gota, bem como, na formação excessiva de nitretos e má aparência do cordão (Poepcke, 1997).

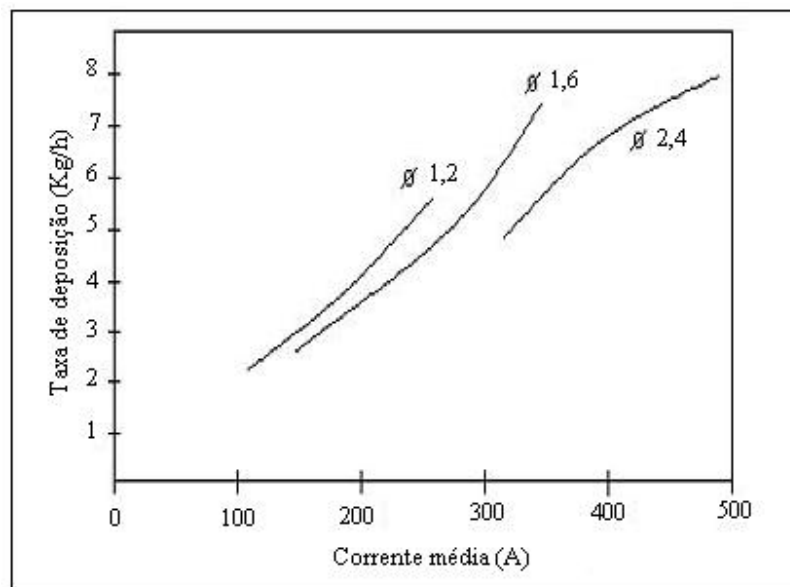


Figura 2.8 – Influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição para arames do grupo T-1 (Bracarense, 2000).

Tratando-se do modo pulsado, Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989) também observaram que a penetração teve um acréscimo com o aumento da intensidade da corrente média, sendo essa relação linear conforme pode ser observado na **Figura 2.9**.

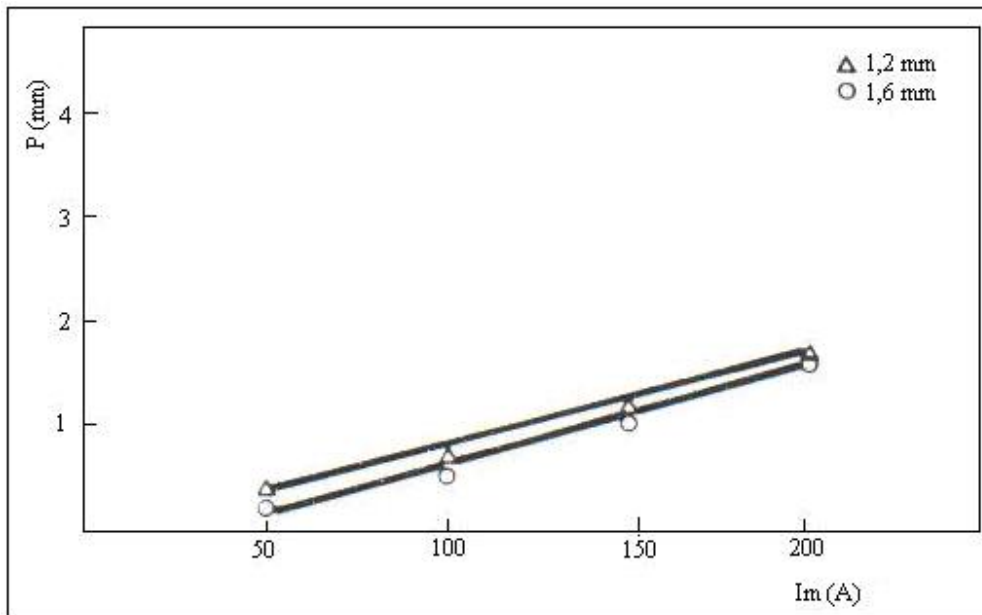


Figura 2.9 – Influência da corrente média (I_m) na penetração (P) para diferentes diâmetros de arame (Arame E71T-1, Ar + 20 % CO_2 , CC^+ , $v = 3$ mm/s) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Uma das atrações dos arames tubulares é o fato de ser possível a utilização de intensidades de correntes mais elevadas do que para arames sólidos, em qualquer posição. Em termos de características de fusão, com intensidades elevadas de corrente há aumentos de diluição e, conseqüentemente, redução da susceptibilidade de ocorrência de defeitos de soldagem, sendo o mesmo efeito observado em corrente pulsada (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Estudos feitos para arames sólidos (Allum e Quintino, 1985; Allum, 1985; Oliveira Santos e Allum, 1986) indicam que o produto da intensidade da corrente média (I_m) pela velocidade de soldagem (v) é a relação determinante no comportamento da diluição. Para arames tubulares essa relação é semelhante, sendo verificado, entretanto, o crescimento da diluição com o produto $I_m \times v$ até um determinado valor (que depende do tipo de arame tubular e do seu diâmetro) e a tendência para estabilizar por volta de 45% para valores de $I_m \times v$ elevados, o que pode ser observado na **Figura 2.10** (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Com o uso de correntes excessivamente altas o cordão torna-se convexo e de morfologia deteriorada, enquanto que baixas intensidades de corrente tem como conseqüência uma transferência globular com gotas grandes e excessivos respingos (Bracarense, 2000) .

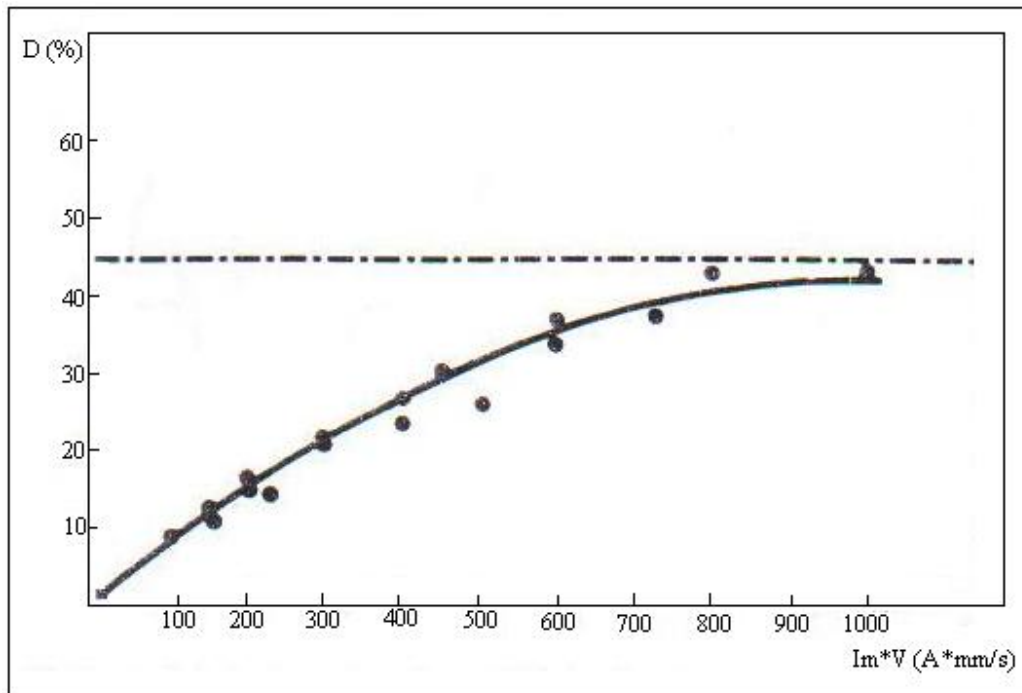


Figura 2.10 – Influência do produto $I_m \times v$ na diluição (D) (E 71T-1, Ar + 20 % CO_2 , $I_m/F = 2$) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

2.5.2 - Tensão de Soldagem

A tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados. A aparência, penetração e propriedades do cordão de solda obtido através do processo Eletrodo Tubular podem ser afetadas pela tensão do arco. Altas tensões (comprimento de arco maior) podem resultar em respingos excessivos, contorno irregular do cordão de solda e porosidades (Poepcke, 1997). Em eletrodos autoprottegidos, o aumento da tensão pode provocar aumento na absorção de hidrogênio. Com eletrodo de aço baixo carbono pode causar porosidade. Tensões baixas (arco menor) podem resultar em uma superfície estreita, em excesso de respingos e em redução de penetração (Bracarense, 2000; Poepcke, 1997).

2.5.3 - Extensão do Eletrodo

Extensão do eletrodo é seu comprimento não fundido a partir do bico de contato. Um aumento na extensão do eletrodo tende a aumentar a temperatura do mesmo devido ao efeito Joule, influenciando na fusão do arame e no aquecimento do fluxo interno. Grande extensão do eletrodo pode causar salpicos, cordões convexos, falta de penetração e aumento na taxa de fusão; já uma extensão

muito pequena, pode ocasionar porosidades, excesso de salpicos e oxidação da poça de fusão (Saito, 2001).

Em corrente pulsada, Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989) verificaram que o aumento da extensão do eletrodo provoca um incremento na velocidade de alimentação, pois se aumenta a fusão do mesmo devido ao aumento da energia gerada pelo efeito Joule. Em conseqüência, a taxa de deposição também é elevada, conforme se verifica na **Figura 2.11**.

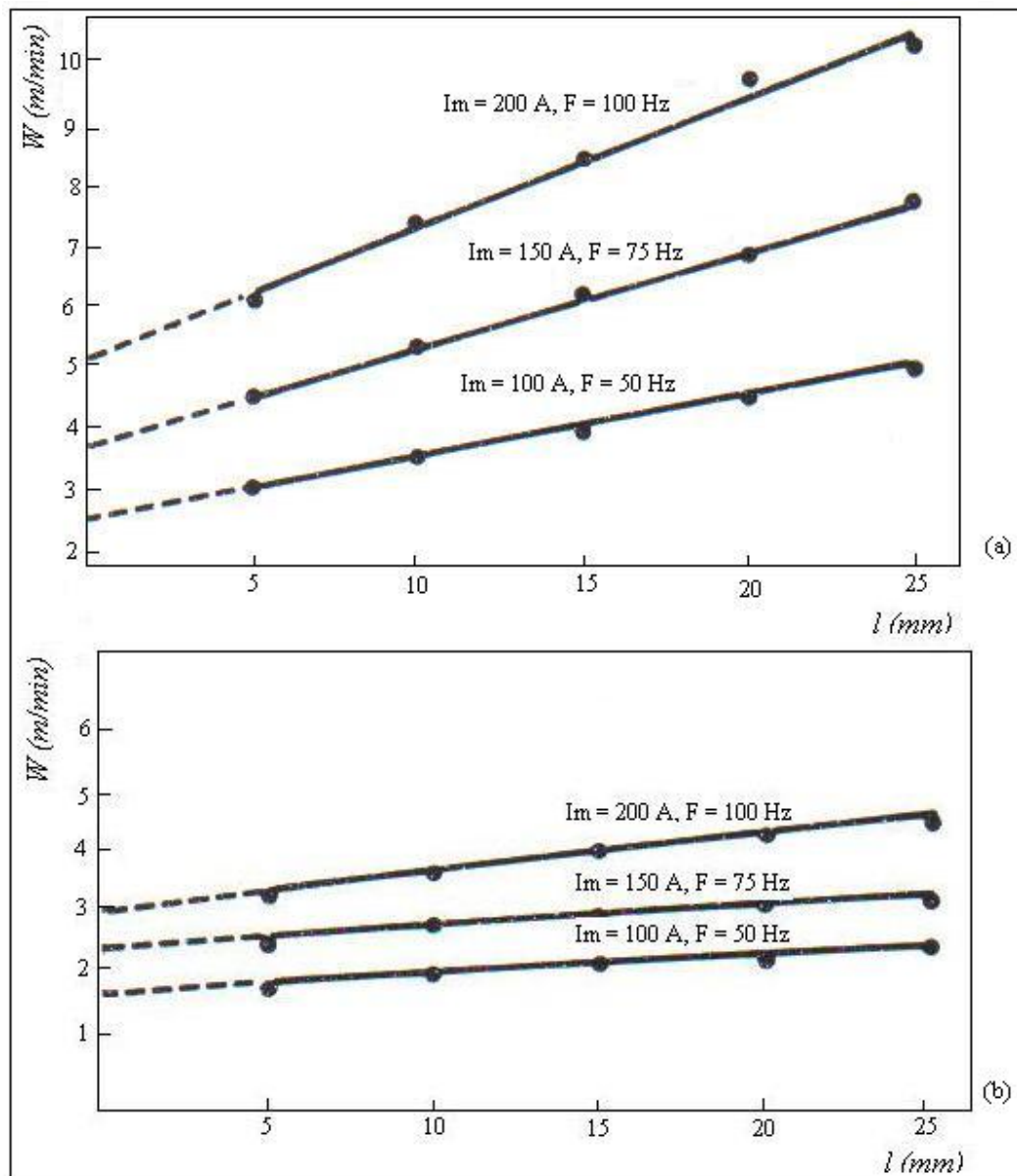


Figura 2.11 – Influência da extensão do eletrodo (l) na velocidade de alimentação do arame (W) para o arame E 71T-5 com diâmetro de 1,2 mm (a) e 1,6 mm (b) ($I_p = 350$ A, $T_p = 4$ ms, Ar + 20 % CO_2 , CC^+) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Braga, Mota e Farias (1998), trabalhando com arame autoprotetido, no modo pulsado, também notaram que o aumento da extensão do eletrodo provocou o aumento da taxa de deposição e de fusão, conforme pode ser observado na **Figura 2.12**.

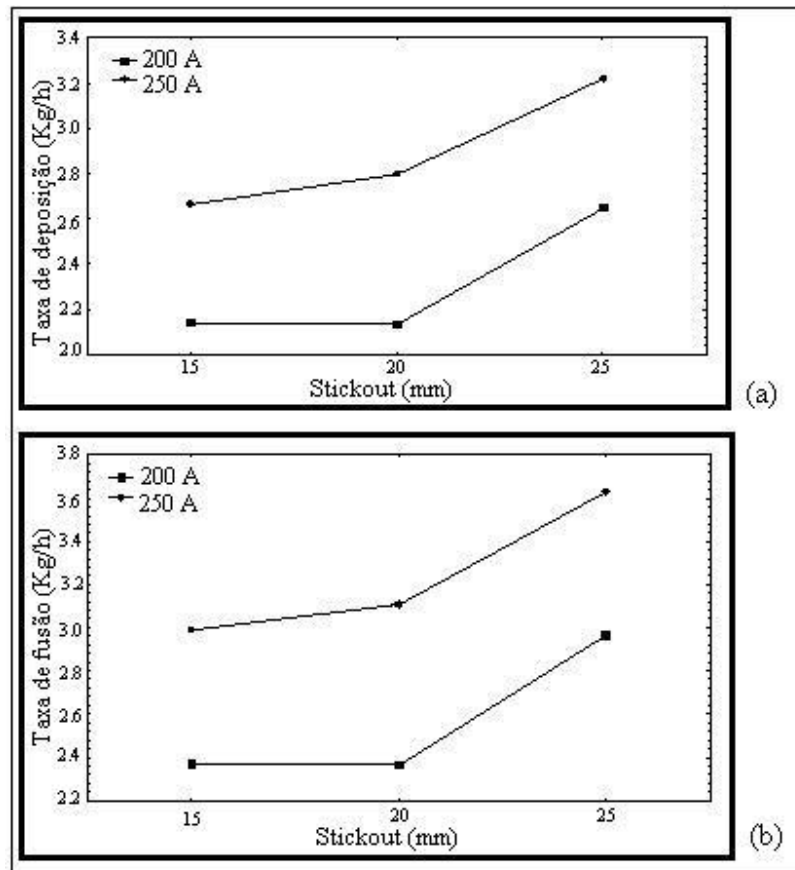


Figura 2.12 – Efeito do “stickout” sobre: (a) Taxa de deposição (b) Taxa de fusão (Braga, Mota e Farias, 1998).

No modo convencional de soldagem, Sales et al (2001), num estudo onde variaram a extensão do eletrodo, encontraram que este parâmetro afeta a largura e o reforço do cordão. Dependendo do gás utilizado (se CO₂ puro) o aumento da extensão do eletrodo provoca um aumento significativo do reforço do cordão de solda. Já em relação à largura do cordão, utilizando-se uma corrente de 160 A, notaram que um aumento da extensão do eletrodo causou a sua diminuição. No modo pulsado, Sales et al (2001) encontraram que a variação da extensão do eletrodo afeta a largura, o reforço do cordão de solda. O aumento da extensão do eletrodo tende a diminuir a largura e aumentar o reforço.

Os fabricantes recomendam a extensão de 19 a 38 mm para eletrodos com proteção gasosa e 19 a 95 mm com eletrodos autoprotetidos, dependendo da aplicação (Bracarense, 2000) .

2.5.4 - Vazão do Gás de Proteção

Na soldagem com proteção gasosa, a vazão do gás é uma variável que afeta diretamente na qualidade do metal depositado. Uma vazão inadequada propiciará pouca proteção da poça de fusão e conseqüentemente ocorrência de poros e oxidação no material fundido e na ponta do arame (Saito, 2001). Vazão excessiva de gás resultará em turbulência e aumento de impurezas no metal depositado. A escolha correta da vazão do gás dependerá do tipo e diâmetro do bocal da tocha, distância do bocal até a peça de trabalho e correntes de ar durante a soldagem (Bracarense, 2000).

2.5.5 - Taxa de Deposição e Rendimento

Nos processos de soldagem, freqüentemente necessita-se avaliar algumas características de desempenho objetivando a análise do comportamento produtivo, sendo, nesse trabalho, retratadas como taxa de deposição e rendimento do processo.

Taxa de deposição é a quantidade de eletrodo (em massa ou peso) depositado por unidade de tempo. Os fatores principais que governam a taxa de fusão são o tipo e estabilidade da transferência metálica, e ainda as características do fluxo que podem conter elementos de adição. Essa estabilidade pode ser influenciada pela tensão do arco e tipo de gás de proteção. Valores muito baixos de tensão podem provocar interrupções no arco ocasionando falhas na transferência do metal de adição. Conforme o tipo de gás de proteção utilizado no processo ocasiona instabilidades na transferência podendo provocar uma grande formação de salpicos. O tipo de transferência metálica determina a quantidade de material levado à peça para um determinado período de tempo, sendo o tipo por spray o que promove melhores resultados e a corrente elétrica o principal parâmetro de soldagem que determina o tipo de transferência do metal fundido (Saito, 2001). Além desses fatores, outros como diâmetro, composição e extensão do eletrodo também influenciam a taxa de deposição. Em soldagem com arames tubulares, relativamente à soldagem com arames sólidos, a taxa de deposição é significativamente maior. Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989), observaram que é possível obter taxas de fusão 30 a 35% superiores utilizando arames tubulares (**Figura 2.13**), possivelmente provocadas pela maior resistividade apresentada por estes consumíveis, devido a sua alma de fluxo. Perceberam, ainda, que o tipo de gás de proteção não influencia na taxa de fusão.

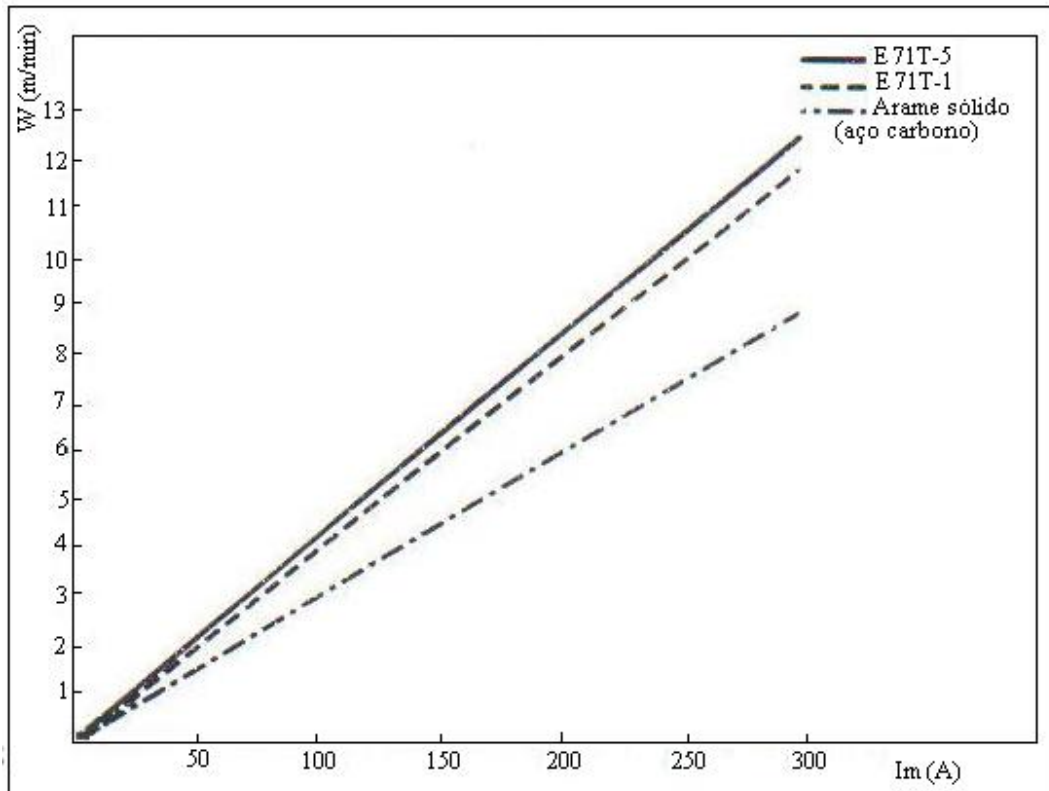


Figura 2.13 - Representação gráfica da velocidade de alimentação em função da corrente média para arames diferentes em condições idênticas ($I_p = 350$ A, $t_p = 4$ ms, $I_m/F = 2$, $D = 1,2$ mm, Ar + 20 % CO_2 , CC^+ , $V = 3$ m/s) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

O rendimento do processo é uma característica importante na análise de um processo de soldagem, pois influencia diretamente no aporte de calor e nos custos de soldagem. Os fatores que levam ao decréscimo no rendimento são, normalmente, as perdas na formação de respingos (Saito, 1997).

Machado (1995), acrescenta que a eficiência aliada com taxa de deposição e a massa do metal de solda a ser depositado podem ser alterados e melhor estabelecidos, a fim de aumentar a produtividade e reduzir custos nos diversos processos de soldagem.

2.5.6 - Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem influencia na penetração e contorno do cordão. Para altas velocidades de soldagem a penetração é baixa (Bracarense, 2000). Baixas velocidades e altas correntes podem resultar na ocorrência de inclusões de escórias e fusão do metal de base (Bracarense, 2000).

Um aspecto interessante foi observado por Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989) sobre a influência da velocidade de soldagem sobre a penetração em soldagem pulsada com arame tubular. Segundo os autores, ocorre uma diminuição da penetração para velocidades crescentes de soldagem entre 1 e 2 mm/s. Deste modo, a penetração apresenta um valor mínimo para velocidades de soldagem próximas de 2 mm/s seja qual for a intensidade média de corrente, e após este mínimo apresenta uma tendência para crescer com a velocidade, estabilizando logo em seguida, mantendo-se praticamente constante com o aumento da velocidade de deslocamento. Este comportamento pode ser observado na **Figura 2.14**.

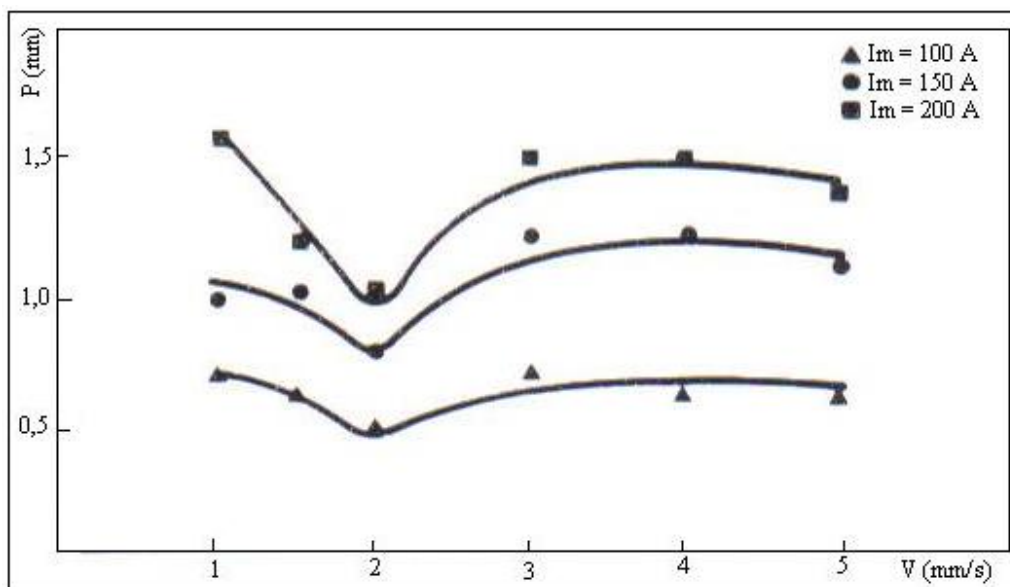


Figura 2.14 - Influência da velocidade de soldagem (V) na penetração (P) (E71T-1, D = 1,2 mm, Ar-20% CO₂, CC⁺) (Medeiros et al, 1989).

Ainda, de acordo com Medeiros, Quintino e Oliveira Santos (1989), a área de penetração, a área de reforço e a área total que é a soma das duas anteriores são influenciadas pela velocidade de soldagem. Segundo eles, a área de reforço apresenta tendência para decrescer com o aumento da velocidade de soldagem, o que, aliás, já era de se esperar. A área de penetração apresenta um resultado semelhante, mas menos pronunciado e que se torna mais significativo com o aumento da intensidade média de corrente. A área total, como era de se esperar, apresenta um comportamento decrescente com o aumento da velocidade de soldagem. Esses comportamentos podem ser observados na **Figura 2.15**.

Em relação a diluição, a influência da velocidade de soldagem pode vista na **Figura 2.16**, que indica que, independentemente da corrente média, a tendência dos resultados é a mesma, a diluição

assume uma distribuição de valores mais ou menos crescentes com o aumento da velocidade de soldagem, não apresentando esta relação, no entanto, uma forma clara (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

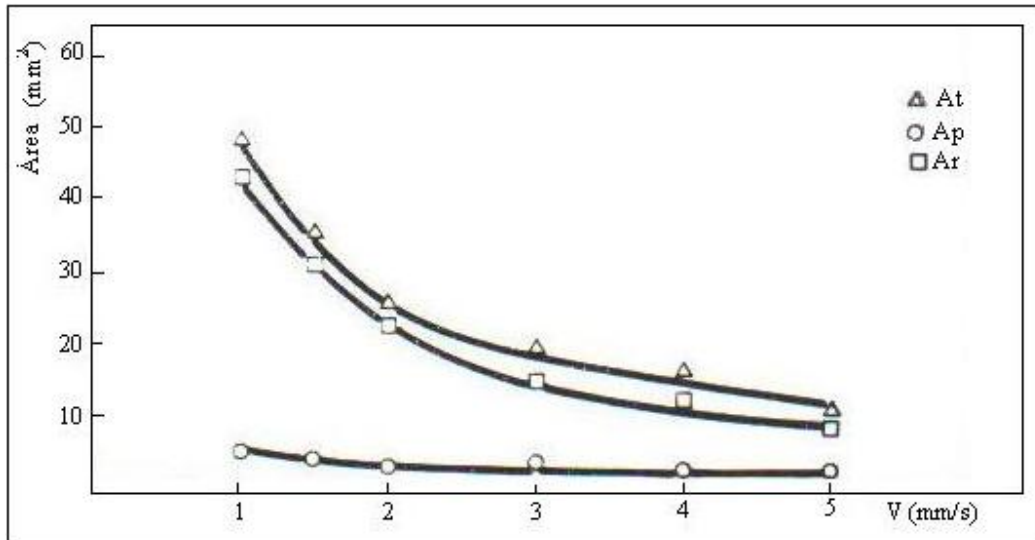


Figura 2.15 – Influência da velocidade de soldagem na área de reforço, na área de penetração, e na área total (E 71T-1, $D = 1,2$ mm, Ar + 20 % CO_2 , $I_m = 100$ A, $F = 50$ Hz, CC^+) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

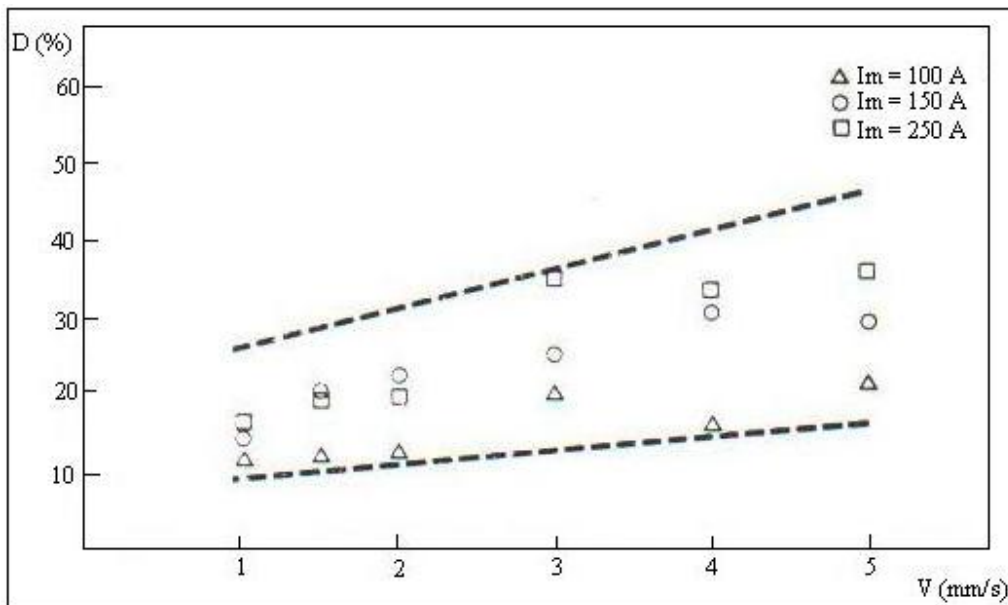


Figura 2.16 – Influência da velocidade de soldagem na diluição (E 71T-1, 1,2 mm, Ar + 20% CO_2 , $I_m/F = 2$) (Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

2.6 – Processo Eletrodo Tubular x Processo MAG

Em função da similaridade entre os processos Eletrodo Tubular e MAG muitas vezes se torna interessante um comparativo entre os processos, de modo a avaliar as vantagens, principalmente, do processo Eletrodo Tubular sobre o MAG, devido ao seu alto custo.

Uma diferença essencial entre os arames sólidos (MAG) e os arames tubulares (Eletrodo Tubular) para soldagem com gás de proteção é o modo de transferência do metal de solda em uma soldagem ao arco aberto. Arames sólidos, que necessitam de misturas Ar + CO₂ para a soldagem ao arco aberto, produzem um arco pequeno e uma transferência de metal muito localizada. As gotas atravessam o arco ao longo de uma linha de centro, uma após outra a uma alta frequência, sendo que isso pode ser visto no cone característico do arco. Por causa dessa transferência axial, as gotas penetram na poça de fusão dentro de uma área de projeção relativamente pequena. Conseqüentemente, toda a energia contida nas gotas fica concentrada nessa área (Araújo, 2004).

Arames tubulares possuem um arco mais largo. As gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo, portanto, toda a energia de soldagem mais uniformemente. Essa diferença nas características do arco entre os arames sólidos e os arames tubulares tem um efeito significativo na qualidade do metal de solda. Tipicamente, a penetração de arames sólidos é pequena e estreita, ou seja, é uma penetração característica no formato dediforme - *fingerform* - (**Figura 2.17**) (Araújo et al, 2001; Araújo, 2004; Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989).

Embora o arco do arame sólido tenda a escavar profundamente o metal de base, há um risco de defeitos de falta de fusão por causa da penetração em forma de dedo. O menor desalinhamento da tocha pode causar uma falta de fusão lateral para uma junta em ângulo. A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância muito maior para desalinhamentos da tocha e, adicionalmente, reduzindo os riscos de defeitos de falta de fusão. Esse efeito é ainda mais pronunciado quando o CO₂ é usado como gás de proteção em vez de misturas Ar + CO₂. Já que o CO₂ tem uma condutibilidade térmica maior, a energia térmica do arco espalha-se sobre uma área maior, o que favorece uma penetração na forma circular (**Figura 2.17**) (Araújo, 2004).

Algumas diferenças adicionais são encontradas na aparência do cordão, especialmente em correntes de soldagem maiores, onde a transferência axial de gotas dos arames sólidos cria uma poça de fusão turbulenta e ondulada. Como resultado, os cordões de solda podem não ser planos, podendo exibir um aspecto rugoso e uma molhabilidade irregular nas laterais. O arco mais largo dos arames tubulares produz uma poça de fusão calma e plana que forma um cordão de solda de aspecto liso e com

boa molhabilidade. Uma quantidade reduzida de respingos é outra vantagem freqüentemente oferecida pelos arames tubulares. Por exemplo, os arames tubulares rutílicos são praticamente livres de respingos no modo de transferência por “spray”, especialmente quando soldados com mistura como gás de proteção. Arames sólidos produzem níveis de respingos significativamente maiores, especialmente quando soldados no modo de transferência por curto-circuito ou globular. Arames tubulares oferecem maior facilidade de evitar o modo de transferência globular através de um aumento da tensão do arco (Araújo, 2004).

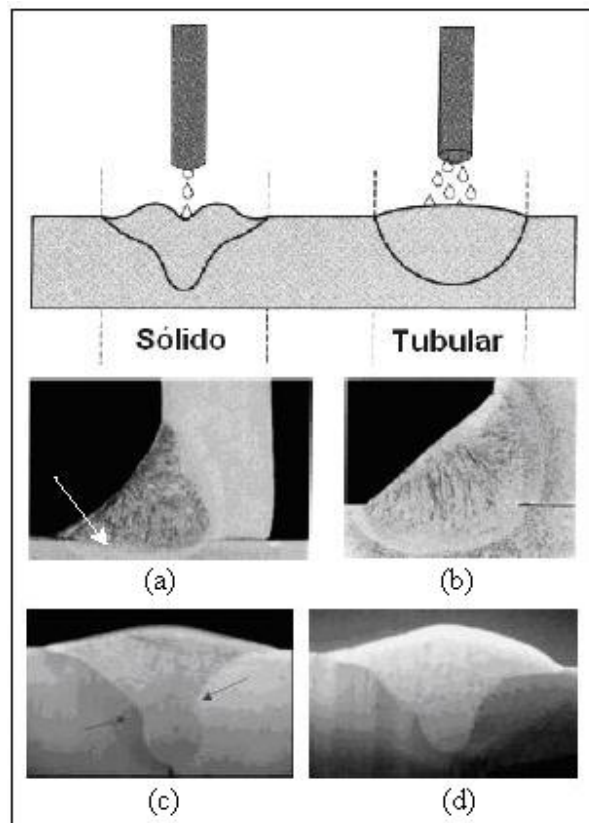


Figura 2.17 - Diferenças entre Arame Sólido e Arames Tubulares na Qualidade do Metal Depositado.

(a) Mistura Ar + CO₂, (b) 100 % CO₂, (c) e (d) 92 % Ar 8 % CO₂ (Araújo, 2004).

2.7 - Modo Pulsado

2.7.1 – Fundamentos do Processo

Conforme Amin (1983) e Alcan (1992), na operação em corrente contínua consegue-se obter a igualdade da velocidade de alimentação/taxa de fusão para toda faixa de corrente, porém a transferência por spray é obtida para correntes elevadas (acima de valor crítico) com grandes aportes de calor, pois para densidades de corrente menores ocorre transferência do tipo globular, que vem dificultar a soldagem fora de posição plana e horizontal.

A corrente pulsada põe fim às limitações impostas pela transferência globular, pois neste caso uma densidade de corrente que normalmente proporcionaria uma transferência globular é modulada para gerar uma onda de corrente com um nível alto (corrente de pico) e um nível baixo (corrente de base).

No modo pulsado, mecanismos de destacamento da gota metálica são principalmente ativados devido a rápida elevação da corrente de base aos níveis da corrente de pulso, que intensificam a ação das forças eletromagnéticas causadoras da constrição do filamento metálico que sustenta a gota à extremidade livre do arame em processo de fusão sob a ação do calor do arco voltaico (Subramaniam et al, 1998). Esta gota se destaca com um diâmetro, preferencialmente, próximo ao diâmetro do arame eletrodo, caracterizando, geralmente, um arco suave e estável.

Deste modo, transfere-se pequenas gotas com baixa entrega térmica. O esquema do processo apresenta-se na **Figura 2.18**.

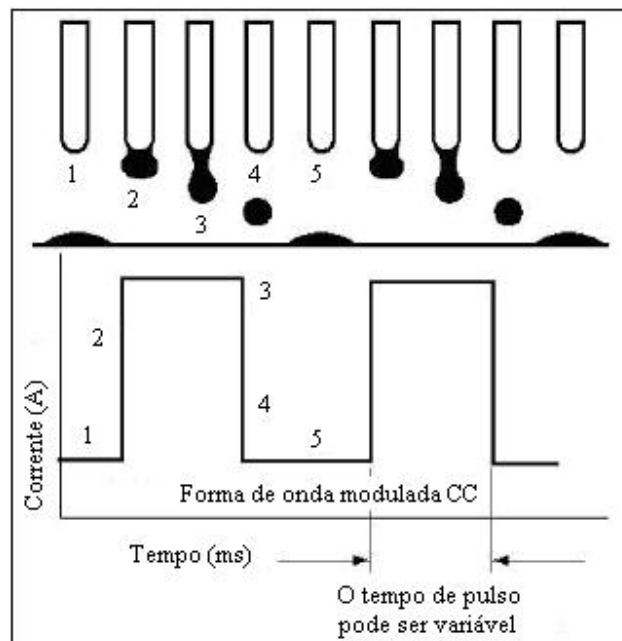


Figura 2.18 – Transferência por Arco Pulsado

A corrente de base serve, principalmente para manter o arco aberto, mas insuficiente para promover a transferência metálica. Já a corrente de pico é estabelecida para exceder o valor crítico, e assim proporcionar a transferência do metal em gotas pequenas. Além disso, o seu valor e o tempo de duração é tal que, a cada pulso, ocorre o destacamento de uma discreta gota de diâmetro igual ou menor que o eletrodo. Portanto, a técnica produz uma série de gotículas que resulta numa transferência do tipo spray, que se dá por meio de uma corrente média que normalmente produziria uma transferência do tipo globular, promovendo a formação de cordões de solda uniformes com mínimos defeitos.

Vários aspectos da soldagem pulsada tem sido apresentados na literatura. Borsworth (1991), por exemplo, acrescenta que utilizando corrente pulsada, a mesma eficiência térmica da corrente contínua é obtida, ou seja, em torno de 85%, com exceção da transferência por curto-circuito (95%). Ferree (1995), ainda ressalta que, operando com corrente pulsada, ocorre uma formação de salpicos pequena e uma menor formação de fumos.

Alcan (1992) destaca que a obtenção do tipo de transferência ideal depende dos corretos parâmetros de pulso: corrente de pico (I_p), corrente de base (I_b), tempo de pico (T_p) e tempo de base (T_b), sendo que os tempos de pico e de base definem a frequência de pulso (F). Relata também, que a relação entre a taxa de alimentação do arame (V_a), conseqüentemente, a corrente média (I_m), e a frequência de pulso, é proporcional ao volume de gota destacada por pulso. Como a relação entre I_p e T_p só influenciam a frequência de destacamento da gota por pulso, a única forma de se manter uma dimensão de gota constante (estabilidade do processo) é a possibilidade de se variar continuamente a frequência, mantendo a relação entre velocidade de alimentação do arame e frequência constante. Assim, a dimensão da gota manter-se-á constante se a velocidade de alimentação do arame e a frequência de pulso forem aumentando na mesma proporção, uma vez que o comprimento do arame consumido por pulso será o mesmo.

2.7.2 - Vantagens do Processo

A grande vantagem na utilização do modo pulsado é que, devido a pequena energia fornecida ao processo, é possível executar soldas de pequenas espessuras e fora da posição plana utilizando-se o modo de transferência por spray.

Além disso, o processo Eletrodo tubular em corrente pulsada apresenta outras vantagens como a capacidade de produzir soldas automatizadas com maior estabilidade e produtividade do que quando se utiliza o modo convencional (Braga, Mota e Farias, 1998); um maior limite de valores de corrente, nos

quais esses arames podem ser processados satisfatoriamente, como pode ser observado na **Figura 2.19**, além da possibilidade de se soldar fora da posição plana (French e Bosworth, 1995; French e Bosworth, 1997; Blackman e Norrish, 1988).

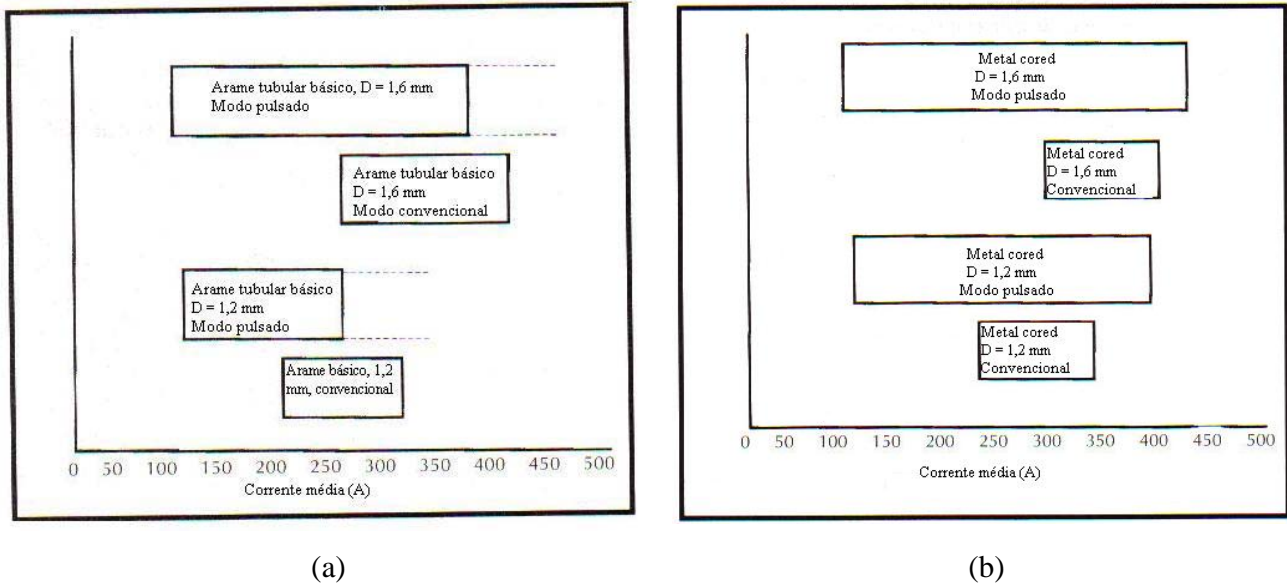


Figura 2.19 – Limites operacionais para soldagem (a) com arame básico (b) com arame “metal cored” em soldas de filete horizontal/vertical (French e Bosworth, 1995).

Ainda, French e Bosworth (1995) mostraram que a soldagem com arame tubular no modo pulsado é capaz de produzir soldas de maior qualidade que o modo convencional. A **Figura 2.20** apresenta seções de cordões de solda realizados com um arame tubular de fluxo básico de 1,2 mm de diâmetro no modo convencional e pulsado. Como pode ser visto, o cordão confeccionado no modo convencional (**Figura 2.20 A**) apresenta uma convexidade excessiva associada a uma ineficiente penetração de raiz. Já no modo pulsado (**Figura 2.20 B** e **Figura 2.20 C**), os cordões são, relativamente, planos e apresentam maior penetração de raiz.

No mesmo trabalho French e Bosworth (1995) notam as vantagens da soldagem no modo pulsado também com arame “metal cored”. Nas **Figuras 2.21 A** e **2.21 C**, onde são apresentadas as seções de dois cordões de solda realizados com arames de 1,6 mm e 1,2 mm de diâmetro, respectivamente, ambos com “metal cored” e no modo pulsado apresentaram cordões relativamente planos e com boa penetração de raiz. Por outro lado, na **Figura 2.21 B**, que apresenta a seção de um cordão de solda realizado com arame “metal cored” de 1,2 mm de diâmetro no modo convencional, nota-se a grande convexidade e a pequena penetração de raiz.

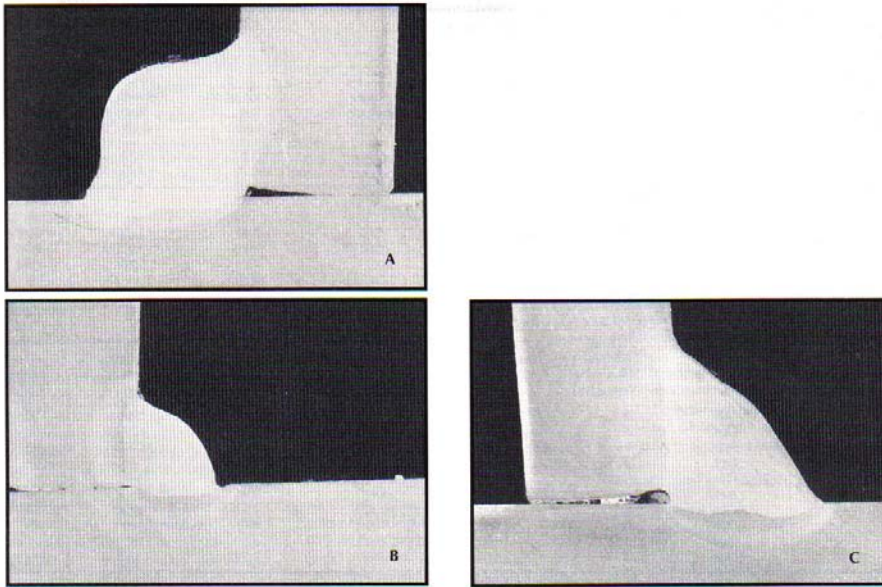


Figura 2.20 – Seções de cordões na posição vertical – arame básico, 1,2 mm de diâmetro. A) Cordão produzido no modo convencional. B) e C) Cordão produzido no modo pulsado (French e Bosworth, 1995)

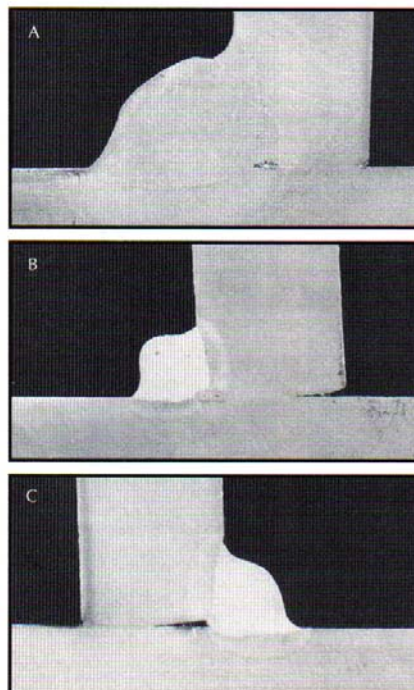


Figura 2.22 – Seções de cordões na posição vertical – arame “metal cored”. A) Cordão com 1,6 mm de diâmetro e modo pulsado. B) Cordão com 1,2 mm de diâmetro e modo convencional. C) Cordão com 1,2 mm de diâmetro e modo pulsado (French e Bosworth, 1995).

Por isto, pesquisas têm se concentrado na adequação do processo através da utilização do modo pulsado de soldagem o que permitiria sobrepor algumas dificuldades de utilização do mesmo, principalmente no que se refere à soldagem “fora de posição” ou ainda de chapas finas (French e Bosworth, 1995; Medeiros, Quintino e Oliveira Santos, 1989)

No entanto, são poucos os trabalhos publicados sobre este assunto, sendo escassas as fontes de pesquisas. Além disto, neste modo de soldagem são muitos os fatores variáveis responsáveis pela manutenção da operação de soldagem, devido a sua complexa natureza, o que exige um alto grau de habilidade por parte dos soldadores, na correta seleção dos parâmetros operacionais.

2.7.3 – Previsão dos Parâmetros de Pulsação

De acordo com Amin (1983) e Alcan (1992), na prática é um pouco difícil estabelecer as condições de pulso aplicáveis a um dado trabalho, o que normalmente é feito por tentativa e erro. Isso porque para uma dada velocidade de alimentação do arame, tanto a corrente de pico como o tempo de pico (magnitude do pulso) devem ser ajustados de tal forma que ocorra o destacamento de uma gota por pulso. Além disso, a corrente média calculada, utilizando-se todos os parâmetros juntos, deve fornecer uma taxa de fusão que se equipare com a velocidade de alimentação do arame de forma a manter o comprimento do arco constante. Caso a magnitude seja insuficiente, não ocorrerá concordância entre o destacamento e os pulsos, acarretando instabilidade na transferência, e conseqüentemente, defeitos de solda, tais como penetração irregular, falta de fusão e mordeduras.

Allum (1985) sugere em seu trabalho a utilização de arco pulsado com eletrodos tubulares, pois proporciona menores aportes térmicos, melhor formação e destacamento das gotas de metal fundido, promovendo melhorias nas propriedades mecânicas da junta através do controle das taxas de resfriamento e reações químicas, proporcionadas pelo fluxo dos eletrodos.

Estes fatos têm motivado as pesquisas sobre a influência dos parâmetros operacionais sobre as características da soldagem com arame tubular. Nascimento et al (1998), por exemplo, realizaram um procedimento experimental para seleção de parâmetros de pulso para soldagem com arame tubular, através do qual desenvolveram um pacote operacional, de acordo com uma velocidade de alimentação do arame de referência, o qual está apresentado na **Tabela 2.3**. O desenvolvimento desses pacotes operacionais em corrente pulsada para diferentes tipos de metal de adição e em vários diâmetros de eletrodos é muito importante porque contribui para a formação de um banco de dados que, conseqüentemente, auxilia na extinção das já mencionadas limitações sofridas pelo processo pulsado.

Tabela 2.3 – Parâmetros de pulso para soldagem com Eletrodo Tubular pulsado (Nascimento et al, 1998).

Va	Tpico	Ipico	Tbase	Ibase
(m/min)	ms	A	ms	A
5,5	1,8	278	2,7	33
6,5	1,5	299	2,3	58
7,5	1,3	319	2,0	85
8,5	1,2	336	1,7	113
9,5	1,0	353	1,6	142
10,5	0,9	369	1,4	171

Com o mesmo intuito, Braga, Mota e Farias (1998), estudaram o efeito da combinação da corrente média com níveis de variação da frequência de pulso e do “stickout” (distância tocha-peça), sobre a estabilidade do arco, as características econômicas do processo e a geometria do cordão de solda. Segundo eles, o aumento do “stickout” proporciona uma redução na estabilidade do arco, um aumento nas taxas de fusão e deposição e uma redução na penetração lateral e de raiz, que pode ser causada pela diminuição da energia de soldagem e, conseqüentemente, diminuição da diluição do metal de base, e um aumento na largura do cordão. O aumento da corrente média também ocasiona o crescimento na largura do cordão. Blackman e Norrish (1988), afirmam que o efeito da corrente média sobre a geometria do cordão, para soldagem com Eletrodo tubular, é o mesmo que para soldagem com arame sólido. Assim sendo, com o aumento da corrente média, o reforço e a penetração aumentam linearmente, e a diluição também aumenta. Portanto, melhores perfis de solda seriam encontrados utilizando-se altas correntes médias, o que, no entanto, na prática, é limitado pela posição de soldagem e energia fornecida ao processo.

Em relação a velocidade de soldagem, Blackman e Norrish (1988), afirmam que seu efeito é o mesmo sobre ambos os processos (com arame sólido e tubular), porém com limites diferentes. Com o aumento da velocidade de soldagem a penetração aumenta e o reforço diminui rapidamente. Porém com arames sólidos, isto ocorre até uma velocidade de soldagem limite de 12 cm/min; e com arames tubulares este limite aumenta para 24 cm/min (Blackman e Norrish, 1988).

Saito (2001) trabalhando com Eletrodo Tubular pulsado utilizando a mistura gasosa Ar + 25 % CO₂ e CO₂ puro observou que:

- a corrente média exerce grande influência sobre as características geométricas da solda e taxa de deposição, pois foi observado que o decréscimo da corrente média provocou a redução da área de reforço, do reforço, da largura e da área de deposição do cordão de solda; e que o aumento da corrente média provocou um incremento na penetração e na área de diluição do cordão e nas taxas de fusão e deposição.

- nas soldas utilizando o CO₂ como gás de protetor, mantendo-se os demais parâmetros de pulso constantes, os aumentos mais significativos no rendimento de deposição, largura do cordão e penetração da solda foram proporcionados pelo acréscimo na frequência de pulso; os maiores crescimentos na taxa de deposição, áreas de reforço e diluição foram provocados pelo aumento da corrente de base; o maior crescimento da altura do reforço foi provocado pelo aumento da corrente de pico;

- nos ensaios utilizando a mistura gasosa 75% Ar + 25% CO₂ como gás protetor, mantendo-se os demais parâmetros de pulso constantes, os maiores acréscimos no rendimento de deposição foram decorrentes de um incremento no tempo de pico; os maiores aumentos na taxa de deposição, áreas de reforço e de diluição, e ainda da largura do cordão, foram ocasionados pelo aumento da frequência de pulso; os maiores crescimentos na penetração da solda foram notados com o incremento na corrente de base; o aumento de qualquer parâmetro de pulso não provocou alterações expressivas na altura do reforço;

- no que se refere à influência dos dois gases, Saito (2001) verificou que, com a mistura gasosa, foram obtidos maiores valores de rendimento de deposição, largura do cordão, altura e área do reforço. Operando com o CO₂, foram conseguidos os maiores valores de penetração e área de diluição. Para a mesma corrente média, na maioria dos casos, utilizando o CO₂ obteve maiores valores de taxa de deposição, largura do cordão, penetração da solda, altura do reforço, áreas de reforço e diluição. O rendimento de deposição, na maioria dos casos, não sofreu alteração com a variação dos parâmetros de pulso.

2.8 – Considerações Finais

A revisão bibliográfica aqui apresentada abordou vários aspectos da soldagem com Eletrodo Tubular pulsada. No entanto, as informações aqui reunidas não se contentaram apenas em apresentar questões pertinentes às condições específicas estabelecidas neste trabalho; ao contrário tiveram como meta fornecer informações sobre o assunto, em geral. Isto porque, apesar da soldagem com o processo

Eletrodo Tubular ter ganho popularidade entre os fabricantes nos últimos anos, as fontes de pesquisa sobre o assunto ainda são escassas, como já mencionado em outras ocasiões. Como, provavelmente, pôde ser notado, muitas são as informações sobre a soldagem com arames tubulares básico e “metal cored” em relação às informações sobre a soldagem com arame rutilico, que é utilizado neste trabalho. Este é um exemplo dos reflexos da falta de fontes de pesquisas. No entanto, ao elaborar esta revisão, o pensamento era de que muitas das informações fornecidas sobre a soldagem com outros arames poderiam ser utilizadas para auxiliar nas análises realizadas no decorrer do trabalho, de modo que todas as informações aqui reunidas poderiam ser úteis ao desenvolvimento deste, e muitas realmente foram. Falou-se também, resumidamente, do processo Eletrodo Tubular em relação ao processo MAG; apesar de as informações sobre esta comparação parecerem inadequadas, vale ressaltar que a primeira parte do capítulo de resultados e discussões deste, procurou, justamente, comparar os dois processos; daí a importância dessas informações na elaboração da revisão bibliográfica.

Em adição, pode-se mencionar, que esta revisão procurou reunir o máximo de informações possível como forma de também contribuir para que o objetivo principal deste, que é ampliar o conhecimento sobre a soldagem com Eletrodo Tubular Pulsado, fosse atingido, fazendo com que este trabalho servisse de referência e fonte de pesquisa para outros.

Por fim, é importante ressaltar, que com esta revisão bibliográfica também foi possível conhecer os parâmetros e respostas considerados mais importantes e que têm sido estudados, ajudando a definir algumas condições aqui utilizadas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 - Introdução

Neste capítulo será descrito a metodologia experimental para a realização do presente trabalho. Para a concretização dos objetivos, este trabalho foi basicamente dividido em três partes. Na primeira, foi realizado um planejamento fatorial fracionário para o estudo dos processos MAG e Eletrodo Tubular, de modo que se pudesse comparar esses processos quando operados nas mesmas condições. Na segunda parte, focada no processo com Eletrodo Tubular e baseada nos resultados anteriormente obtidos, novos testes exploratórios foram realizados com o intuito de melhor se adequar o processo e definir novos níveis para um novo planejamento fatorial. Assim, um planejamento fatorial completo foi idealizado para verificar a influência de alguns parâmetros sobre as características geométricas e produtivas do processo com eletrodo tubular. Finalmente, na terceira parte, algumas investigações das alterações metalográficas e de durezas provocadas pela utilização de diferentes condições de soldagens foram realizadas. A descrição dos métodos e materiais utilizados para a realização dos experimentos serão detalhadamente apresentados nos itens seguintes.

Para a concretização do trabalho, utilizou-se o laboratório de soldas (LSO) da UNIFEI, contando, ainda, com o apoio do laboratório de Metrologia Dimensional, de onde se utilizou o projetor de perfis e do laboratório de Metalografia, o qual possibilitou ensaios de dureza e análise de micrografias.

3.2 – Parte 1: Comparação entre os Processos MAG e Eletrodo Tubular

Nesta parte do trabalho, conforme já comentado, realizou-se testes com os processos MAG e Eletrodo Tubular, utilizando as mesmas condições para ambos, com a finalidade de compará-los. Para realizar os testes desta etapa, utilizou-se um trabalho, anteriormente realizado, sobre a análise da influência dos parâmetros de pulso sobre as características do processo MAG (Dantas, 2002), cujos testes já haviam sido realizados. Portanto, realizou-se apenas os experimentos referentes à análise do processo Eletrodo Tubular, utilizando as mesmas condições do trabalho realizado com o processo MAG.

Para a realização dos testes, utilizou-se o banco de ensaio apresentado na **Figura 3.1**, que é composto por uma fonte de soldagem Universal 300, operando na condição de imposição de corrente no modo pulsado, a qual possibilitou flexibilidade no ajuste dos parâmetros, associada a um sistema guia com velocidade controlada, permitindo o deslocamento da tocha durante a realização das soldagens. O modo de operação da fonte com imposição de corrente permitiu a regulagem da velocidade de alimentação do arame durante a soldagem, sendo a tensão variável durante o processo.

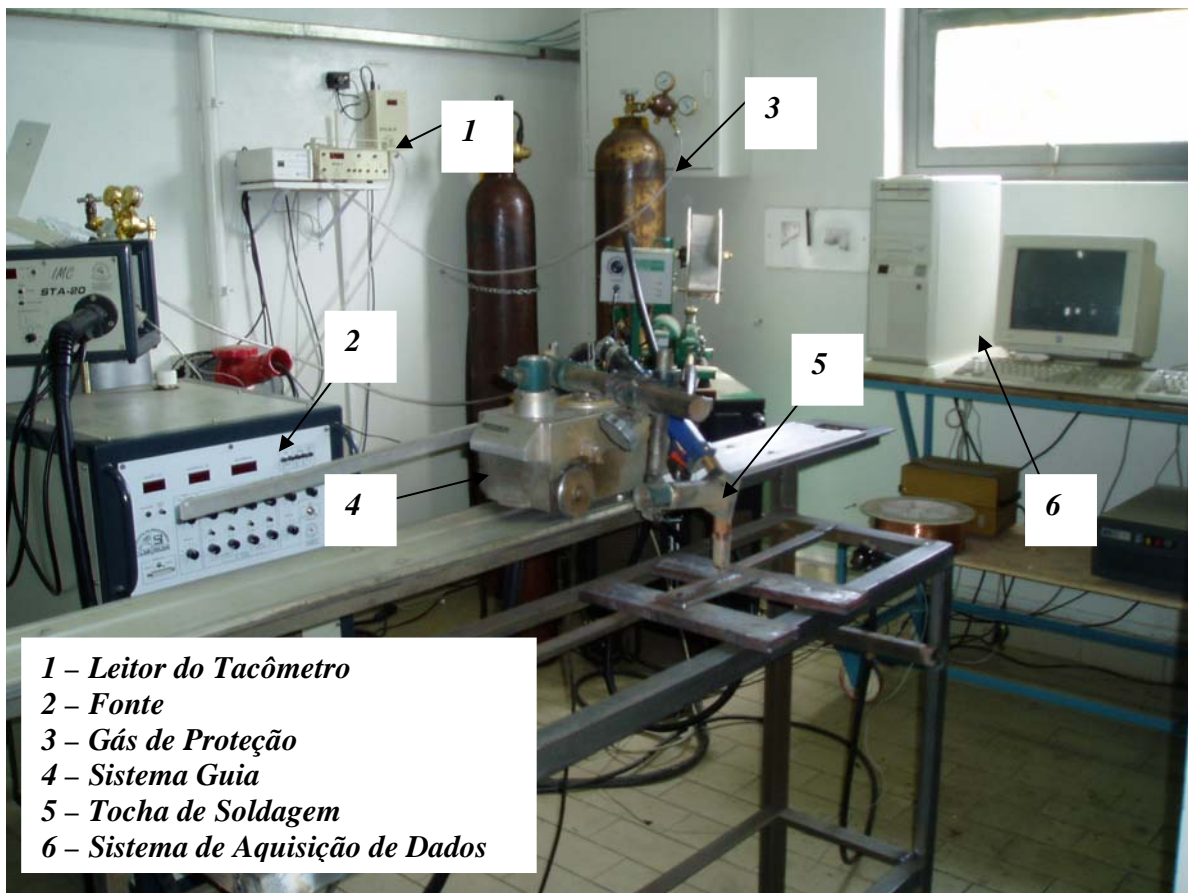


Figura 3.1 - Banco de ensaio.

Foi utilizado também um tacômetro associado ao sistema de alimentação do arame para se avaliar o comprimento de arame consumido em cada cordão e, desta forma, avaliar as perdas durante a execução dos cordões. Além disso, um sistema de medição de gás também foi acoplado ao banco, permitindo que a vazão do mesmo fosse determinada de modo flexível.

Ainda, o banco de ensaio contou com um sistema de aquisição de dados (Oscilos 4), que permitiu que os valores instantâneos de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame fossem aquisitados e processados.

Como ferramenta para idealização dos experimentos e posterior análises utilizou-se a técnica estatística do Projeto e Análise de Experimentos (DOE) e mais especificamente do Planejamento Fatorial Fracionário em Dois Níveis, onde cada fator assume um valor superior e um inferior. Combinando-se esses níveis entre todos os fatores obtém-se 2^{n-1} experimentos, onde n é o número de fatores analisados. Para tanto utilizou-se o software estatístico MINITAB. Os valores assumidos para os níveis encontram-se na **Tabela 3.1**.

Os fatores analisados foram a corrente de pico (I_p), a corrente de base (I_b), o ciclo ativo (CA), que é determinado pela **Equação 1** e a velocidade de alimentação do arame (V_a). O tempo de pico (T_p) foi mantido constante em 4 ms e o tempo de base (T_b) oscilou entre os valores de 4 ms e 6 ms de acordo com o ciclo ativo (CA) pretendido.

$$CA = \frac{T_p}{(T_p + T_b)} \quad (3.1)$$

onde:

CA = ciclo ativo (%)

T_p = tempo de pico (ms)

T_b = tempo de base (ms)

Tabela 3.1 – Níveis superiores e inferiores dos parâmetros em estudo.

Fatores Analisados	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente de pico, I_p	A	280	350
Corrente de base, I_b	A	70	100
Ciclo ativo, CA	%	40	50
Vel. de alim., V_a	m/min	5	6

A seqüência de combinação dos fatores foi definida segundo a ordem padrão OP descrita na **Tabela 3.2**, sendo os experimentos realizados com três replicagens. É importante mencionar aqui, que os testes realizados por Dantas (2002) referentes ao processo MAG, foram processados com duas replicagens. Entretanto, decidiu-se realizar três replicagens nos experimentos com Eletrodo Tubular objetivando minimizar a incerteza das medidas.

Tabela 3.2 – Planejamento experimental.

OP	Ip	Ib	CA	Va
-	(A)	(A)	(%)	(m/min)
1	280	70	40	5
2	350	70	40	6
3	280	100	40	6
4	350	100	40	5
5	280	70	50	6
6	350	70	50	5
7	280	100	50	5
8	350	100	50	6

As demais variáveis do processo foram mantidas constantes, sendo as soldagens realizadas com:

- Arame tubular: AWS E71T-1.
- Diâmetro do eletrodo: 1,2 mm.
- Tipo de gás: Argônio + 25% CO₂.
- Vazão de gás: 15 l/min.
- Velocidade de soldagem: 40 cm/min.
- Distância tocha-peça: 17,5 mm.
- Recuo do bico de contato: 5 mm

As soldas processadas com MAG foram feitas utilizando o Arame sólido ER 70S-6, cuja composição química encontra-se na **Tabela 3.3**.

Como material de base para este estudo, utilizou-se o aço ABNT 1045, cuja composição química é mostrada na **Tabela 3.3**, juntamente com as composições químicas dos arames utilizados neste trabalho. Vale ressaltar que este material foi escolhido com o intuito de permitir analisar também a influência metalúrgica dos parâmetros utilizados no trabalho sobre o material a ser soldado. Os corpos de prova foram preparados nas dimensões de 120x40x6 mm.

Tabela 3.3- Composição química (%) dos arames e do material base utilizados (Fonte ESAB (2004)).

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Cr (%)	S (%)	Nb (%)
Material base	0,46	0,78	0,20	0,026	0,020	0,014	0,003
Arame tubular	0,05	1,40	0,50	-	-	-	-
Arame sólido	0,10	1,60	-	-	-	-	-

Com todas as condições definidas, testes de simples deposição e na posição plana, com a tocha posicionada perpendicularmente em relação ao metal de base foram realizados. Posteriormente, os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente com nital 2%. A seguir, com o auxílio de um projetor de perfis e de um planímetro, registrou-se as áreas de penetração (S_p) e de reforço (S_r), bem como a penetração do cordão (P), sua largura (b) e reforço (r), conforme esquema mostrado na **Figura 3.2**. Esses valores encontram-se na **Tabela 1, 2 e 3 do Apêndice A**.

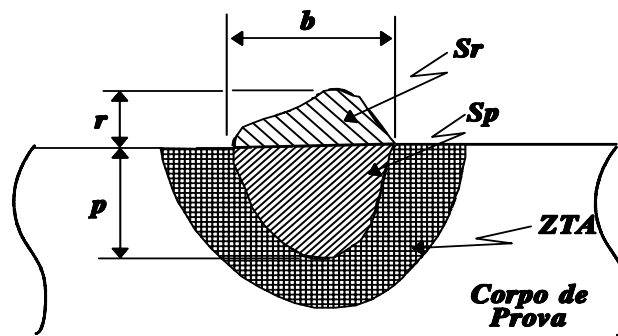


Figura 3.2 - Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

As análises realizadas neste trabalho referem-se à geometria do cordão de solda e à produtividade do processo. As respostas referentes à geometria são:

- a penetração (P);
- o índice de convexidade (IC);
- a área total (S_T);
- a qualidade do cordão de solda (Qualidade) (que não foi analisada no estudo do processo MAG, pois esta avaliação não foi feita por Dantas (2002));

As respostas referentes a produtividade são:

- a taxa de deposição (T_{xdep});
- o rendimento do processo ($Rend$).

Portanto, de posse dos resultados dos parâmetros acima descritos determinou-se o índice derivativo índice de convexidade (IC), dado em %, conforme a **Equação 3.2**:

$$IC = \frac{r}{b} * 100 \quad (3.2)$$

onde:

r = reforço do cordão de solda (mm).

b = largura do cordão de solda (mm).

Como orientação, procurou-se estabelecer padrões de qualidade aceitáveis, onde índices de convexidade próximos de 30% são considerados adequados (Silva et al, 2000). Um índice de convexidade superior a 30% gera excessivo reforço com pequena penetração. Logo, considerou-se nesse trabalho, que índices de convexidade entre 20 % e 30 % são adequados.

Para a avaliação da taxa de deposição, determinou-se a massa do corpo de prova antes da soldagem e após a soldagem, eliminado qualquer traço de respingo e escória remanescente. Os valores dos dados coletados, antes e após, a soldagem estão mostrados na **Tabelas 4 e 5 do Apêndice A**. Desta forma, a taxa de deposição foi avaliada pela **Equação 3.3**:

$$Txdep = \frac{3,6 * (m_{cf} - m_{ci})}{t} \quad (3.3)$$

onde:

$Txdep$ = Taxa de deposição (kg/h);

m_{cf} = Massa final do corpo de prova (g);

m_{ci} = Massa inicial do corpo de prova (g);

t = Tempo de soldagem (s).

O rendimento do processo foi avaliado através da **Equação 3.4**:

$$Rend = \frac{4 * (m_{cf} - m_{ci})}{\pi * \varphi_{el}^2 * L_{el} * d} * 100 \quad (3.4)$$

onde:

$Rend$ = Rendimento (%);

m_{cf} = Massa final do corpo de prova (g);

m_{ci} = Massa inicial do corpo de prova (g);

d = Densidade volumétrica do arame (6,47g/cm³);

φ_{el} = Diâmetro do eletrodo (mm);

L_{el} = Comprimento do eletrodo (mm).

Vale ressaltar que a diferença entre a massa depositada e a massa consumida ($m_{cf}-m_{ci}$), no processo MAG, é decorrente da quantidade de respingos produzida para uma determinada combinação

de fatores, e para o processo Eletrodo Tubular decorre não somente da quantidade de respingos, mas também da escória produzida.

3.3 – Parte 2: Análise do Processo Eletrodo Tubular Pulsado

Nesta parte do trabalho, como já mencionado, foi definido um planejamento fatorial completo focado no estudo do processo Eletrodo Tubular. No entanto, primeiramente foram realizados testes exploratórios para definir os níveis utilizados no referido planejamento fatorial. É importante lembrar que todas as outras condições de soldagem não mencionadas aqui foram mantidas as mesmas da primeira parte, assim como a metodologia de preparação dos corpos de prova e execução das soldas.

Primeiramente, foram realizados testes preliminares com o objetivo de avaliar a influência da corrente média, da frequência e da velocidade de alimentação do arame sobre o processo Eletrodo Tubular. As condições utilizadas nesta parte foram derivadas da condição, chamada neste trabalho de “condição ótima”. Esta condição foi obtida na primeira parte do trabalho, conciliando todas as respostas analisadas na obtenção de uma condição que permitisse uma solda adequada. Também foram realizados testes derivados de sugestões da literatura (Nascimento, 2003).

Tabela 3.4 – Sequência de testes.

Testes	Ip (A)	Ib (A)	Tp ms	Tb ms	Va (m/min)
1	280	100	4	4	5
2	280	100	4	4	6
3	280	100	4	4	7
4	280	100	4	6	5
5	280	100	4	6	6
6	280	100	4	6	7
7	280	100	4	8	5
8	280	100	4	8	6
9	280	100	4	8	7
10	280	100	4	6	7
11	280	100	2	2	7
12	280	100	2	3	7
13	319	85	1,3	2	7,5
14	353	142	1	1,6	9,5

Portanto, conforme observado na **Tabela 3.4**, manteve-se, da condição ótima, nos primeiros doze testes, a corrente de pico (Ip) em 280 A, a corrente de base (Ib) em 100 A e variou-se o tempo de

pico (T_p) e o tempo de base (T_b) para produzir valores de corrente média e de frequência desejados. Nos dois últimos testes, valores diferentes de corrente de pico e de base também foram testados, de acordo com sugestões da literatura. A velocidade de alimentação do arame (V_a) também foi variada, procurando utilizar níveis superiores aos testados na primeira parte do trabalho, com o objetivo de obter maiores taxas de deposição. É importante mencionar aqui, que níveis de velocidade de alimentação do arame superiores a 7 m/min foram testados com as condições de pulso dos doze primeiros testes, mas não foi obtido sucesso. Os valores dos parâmetros variados e a seqüência de testes encontram-se na **Tabela 3.4**.

Após esses testes, o novo planejamento fatorial foi, finalmente, definido, como sendo um fatorial completo com dois níveis e duas replicagens. Os fatores estudados, bem como seus respectivos níveis encontram-se na **Tabela 3.5**. A **Tabela 3.6** apresenta a ordem padrão (OP) de testes definida para o referido planejamento fatorial.

Tabela 3.5 – Parâmetros e níveis do planejamento fatorial completo.

Parâmetro	Unidade	Nível Inferior	Nível Superior
Corrente Média, I_m	A	160	200
Frequência, F	Hz	150	200
Vel. de alim., V_a	m/min	6	8

Tabela 3.6 – Ordem padrão de testes para o planejamento fatorial completo.

OP	I_m	F	V_a
-	(A)	(Hz)	(m/min)
1	160	150	6
2	200	150	6
3	160	200	6
4	200	200	6
5	160	150	8
6	200	150	8
7	160	200	8
8	200	200	8

Os valores de área de reforço, de área de penetração, de penetração, de reforço, de largura e da qualidade visual do cordão medidos nos corpos de prova realizados nesta parte do trabalho encontram-se nas **Tabelas 5 e 7 do Apêndice A**. Os dados de massas do corpo de prova coletados antes e após os ensaios, de comprimento do arame utilizado na soldagem e de tempo de soldagem encontram-se nas **Tabelas 6 e 8 do Apêndice A**.

3.4 – Parte 3: Medidas de Dureza e Análise Metalográfica

Nesta parte do trabalho, foram realizadas medidas de dureza e análise da micrografia de corpos de prova produzidos com os processos Eletrodo Tubular e MAG.

Os corpos de prova analisados foram produzidos com os processo Eletrodo Tubular e MAG sob as condições dos testes 2 e 8 da **Tabela 3.4**, que são transcritas na **Tabela 3.7**. Esses testes foram escolhidos de modo que se permitisse comparar também os reflexos dos diferentes aportes térmicos.

Tabela 3.7 – Condições dos testes para a análise de dureza e das micrografias.

Teste	Tb	Im	Va	Energia
-	(ms)	(A)	(m/min)	(J/mm)
2	4	190	6	1195
8	8	160	6	704

Realizado os ensaios, os corpos de prova foram seccionados, polidos e atacados quimicamente com nital 2%. Posteriormente, os corpos de prova foram embutidos e levados à máquina de ensaio de microdureza, onde foram realizados vários ensaios de dureza Vickers com carga de 5 kg. As impressões de dureza foram feitas nas três regiões dos corpos de prova: cordão, zona termicamente afetada (ZTA) e metal base. Para finalizar, os corpos de prova foram levados ao microscópio óptico, onde várias fotografias das microestruturas, com diversos aumentos, foram realizadas para posterior análise.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Introdução

Neste capítulo serão exibidas e discutidas as respostas obtidas a partir dos ensaios realizados. A análise dos resultados será abordada em três agrupamentos de resultados, sendo este capítulo dividido em três partes. Na primeira parte, foi realizado um estudo sobre a influência dos parâmetros de pulso no processo MAG e no processo Eletrodo Tubular, através de um planejamento fatorial fracionário, com a finalidade de comparar os processos. Esta comparação pretendeu avaliar semelhanças quanto as variáveis influentes e as possíveis vantagens do processo Eletrodo Tubular sobre o MAG, que compense o maior custo do arame tubular em relação ao arame sólido. As observações e resultados provenientes desta comparação serão apresentados juntamente com as análises dos processos, à medida que essas estiverem sendo desenvolvidas. Na segunda parte, um novo planejamento fatorial foi definido, levando em consideração a necessidade encontrada no desenvolver do trabalho e a importância de uma variável adicional, a frequência de pulso. Esta variável é citada por vários autores como de grande importância no estudo do processo Eletrodo Tubular pulsado, mas a princípio não pôde ser explorada devido ao objetivo inicial deste trabalho, que é a comparação dos processos e que limitou a análise do processo Eletrodo Tubular à mesma análise do processo MAG (realizada anteriormente, conforme já mencionado no **Capítulo 3**). Maiores detalhes sobre essas mudanças, no entanto, serão explorados na ocasião dessas discussões. Para se definir este novo planejamento fatorial foram realizados testes preliminares para estabelecer os níveis dos fatores em estudo. Nesses testes variou-se a velocidade de alimentação do arame, cuja influência apresentou-se como a mais significativa na primeira parte do trabalho em ambos os processos estudados, e variou-se os parâmetros de pulso de modo a produzir uma corrente média e uma frequência desejadas. A última parte refere-se a uma análise de dureza e metalográfica em amostras produzidas com os dois processos, objetivando observar as diferentes microestruturas produzidas sob as mesmas condições, mas com processos diferentes e com o mesmo processo, mas sob diferentes condições.

É importante ressaltar que, apesar do estudo realizado sobre o processo MAG, as análises deste trabalho concentrar-se-ão no processo Eletrodo Tubular, que é de maior interesse neste, devido à escassez de fontes de pesquisa sobre a soldagem com Eletrodo Tubular no modo pulsado.

4.2 – Parte 1: Comparação entre os Processos MAG e Eletrodo Tubular

4.2.1 – Resultados Experimentais

Os valores das respostas medidas e calculadas, na parte 1 deste trabalho, conforme relatado no **Capítulo 3** estão apresentados na **Tabela 4.1** para o processo MAG e na **Tabela 4.2** para o processo Eletrodo Tubular.

Tabela 4.1 - Sequenciamento e resultados dos experimentos para o processo MAG.

Teste	Fatores				Respostas				
	Ip	Ib	CA	Va	P	IC	S _T	Txdep	Rend
-	A	A	%	m/min	mm	%	mm ²	kg/h	%
1	280	70	40	5	1,5	26,3	21,9	2,3	88,8
2	350	70	40	6	1,7	24,9	29,0	3,1	97,9
3	280	100	40	6	2,2	43,1	25,0	3,1	98,8
4	350	100	40	5	0,9	25,9	17,8	2,3	87,4
5	280	70	50	6	2,6	26,5	29,1	2,8	90,3
6	350	70	50	5	1,2	24,9	20,9	2,3	88,7
7	280	100	50	5	1,2	21,4	19,7	2,3	86,6
8	350	100	50	6	1,1	23,5	24,7	2,4	75,5
9	280	70	40	5	1,9	27,4	24,8	2,4	93,3
10	350	70	40	6	2,0	25,9	30,3	3,0	96,4
11	280	100	40	6	2,1	33,7	27,1	3,0	94,7
12	350	100	40	5	0,6	13,1	14,1	2,2	84,2
13	280	70	50	6	2,0	28,1	28,2	2,9	91,2
14	350	70	50	5	1,3	22,7	21,9	2,4	92,3
15	280	100	50	5	0,9	18,4	20,5	2,4	92,3
16	350	100	50	6	0,9	22,0	27,1	2,7	86,2

Tabela 4.2 – Sequenciamento e resultados dos experimentos para o processo Eletrodo Tubular.

Teste	Fatores				Respostas					
	Ip	Ib	CA	Va	P	IC	S _T	Qualidade	Txdep	Rend
-	A	A	%	m/min	mm	%	mm ²	-	kg/h	%
1	280	70	40	5	0,6	22,1	14,5	9,0	2,0	86,7
2	350	70	40	6	1,3	19,0	19,4	9,0	2,6	86,7
3	280	100	40	6	1,0	18,2	22,1	9,7	2,5	86,1
4	350	100	40	5	0,7	16,7	14,7	5,5	1,8	78,3
5	280	70	50	6	0,9	10,6	19,9	8,5	2,3	80,4
6	350	70	50	5	1,0	23,8	18,5	6,0	2,1	83,6
7	280	100	50	5	0,9	21,0	20,0	3,9	2,0	81,7
8	350	100	50	6	0,6	17,9	16,8	6,5	2,4	82,2
9	280	70	40	5	0,6	20,7	12,5	8,0	2,0	86,0
10	350	70	40	6	0,7	20,2	21,4	9,4	2,3	84,6
11	280	100	40	6	1,0	15,3	21,2	9,0	2,5	86,9
12	350	100	40	5	0,5	20,5	16,5	7,5	1,9	79,6
13	280	70	50	6	0,8	17,3	20,9	9,0	2,5	85,6
14	350	70	50	5	0,7	25,0	11,4	5,0	2,1	80,3
15	280	100	50	5	0,8	19,8	15,9	5,7	1,9	71,0
16	350	100	50	6	1,2	13,3	21,5	7,3	2,2	78,3
17	280	70	40	5	0,6	20,6	15,1	8,0	1,8	84,5
18	350	70	40	6	0,7	18,6	20,5	7,0	2,3	87,6
19	280	100	40	6	1,0	17,5	22,0	9,0	2,2	89,3
20	350	100	40	5	0,5	17,2	12,5	5,0	1,7	73,9
21	280	70	50	6	0,8	17,8	20,2	9,0	2,2	77,5
22	350	70	50	5	0,7	18,0	17,5	5,0	1,8	78,6
23	280	100	50	5	0,8	18,2	13,6	4,0	1,7	71,6
24	350	100	50	6	1,2	15,7	22,6	6,0	2,2	77,2

A **Figura 4.1** ilustra o perfil de alguns cordões de solda obtidos a partir de condições extremas do planejamento fatorial utilizado.

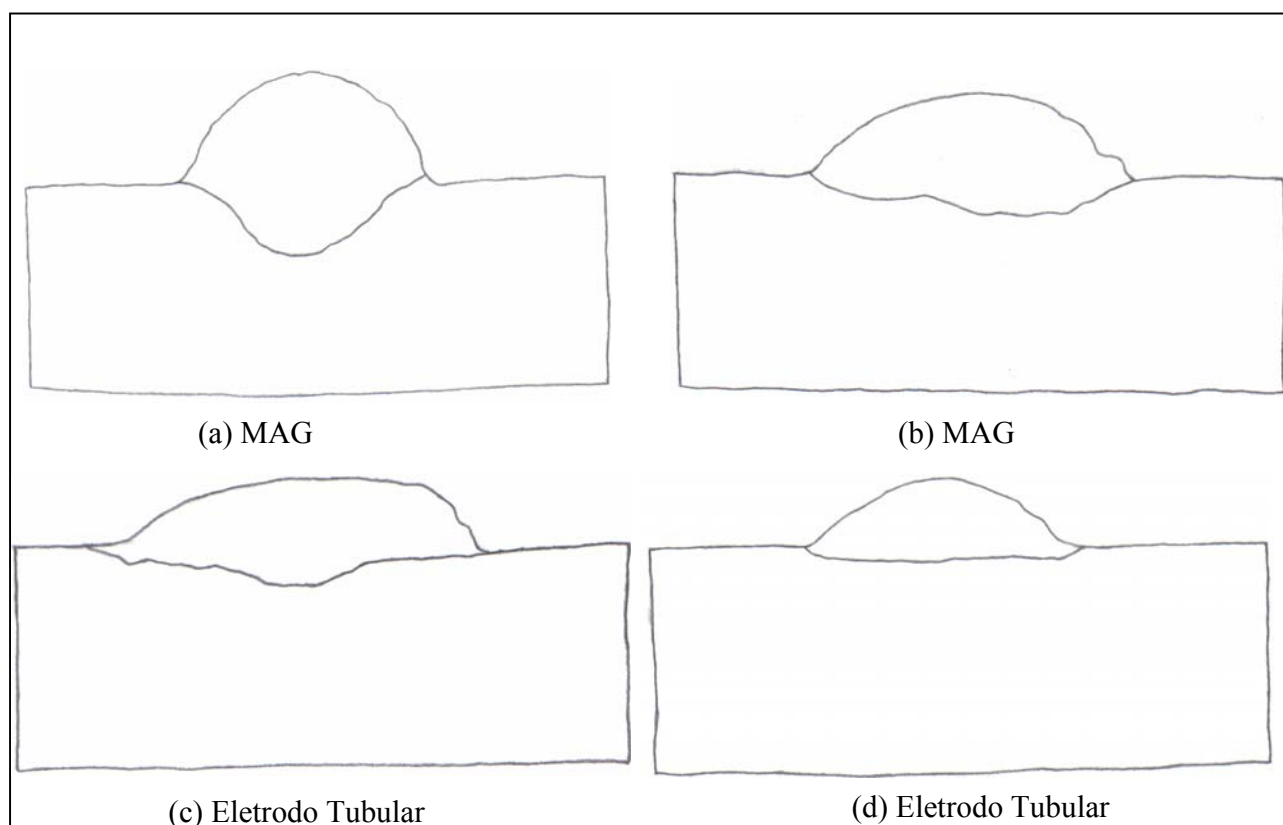


Figura 4.1 – Perfil dos cordões na condição: (a) e (c) $I_p = 280$ A, $I_b = 100$ A, $CA = 40\%$ e $V_a = 6$ m/min; (b) e (d) $I_p = 350$ A, $I_b = 70$ A, $CA = 50\%$ e $V_a = 5$ m/min.

4.2.2 – Análise da Variância

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores empregados sobre as respostas observadas, estas foram submetidas à análise de variância. Neste trabalho, considerou-se como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o nível α obtido for inferior a 5%, ou seja, uma confiabilidade estatística de 95%.

A **Tabela 4.3** mostra os valores do nível α para as respostas referentes aos parâmetros estudados e interações entre parâmetros. Os números em negrito, nesta tabela, indicam que os valores médios das respostas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle com 95% de confiabilidade.

Pela análise, verifica-se, no processo MAG, que a velocidade de alimentação (V_a) é o fator mais influente na penetração (P), seguida pelas correntes de pico (I_p) e de base (I_b), que apresentam a mesma influência. O índice de convexidade é influenciado, pela ordem de significância, pela velocidade de alimentação do arame (V_a), pela corrente de pico (I_p) e pela interação da corrente de pico com o ciclo ativo ($I_p \cdot CA$). A área total (S_T) é influenciada, primeiramente, pela velocidade de

alimentação (Va), seguida da corrente de base (Ib) e da interação da corrente de pico com a velocidade de alimentação (Ip*Va). A taxa de deposição (Txdep) é influenciada, pela ordem de significância, pela velocidade de alimentação (Va), pela interação entre a corrente de pico e a corrente de base (Ip*Ib) e pelo ciclo ativo (CA). E o rendimento (Rend) é influenciado primeiramente, pela interação entre a corrente de pico e a corrente de base (Ip*Ib), seguida do ciclo ativo (CA).

No processo Eletrodo Tubular, como pode ser observado na **Tabela 4.3**, todas as respostas foram fortemente influenciadas pela velocidade de alimentação do arame (Va). Além deste fator, a qualidade visual do cordão (Qualidade) foi influenciada, também, pela ordem de significância, pelo ciclo ativo (CA), pela corrente de base (Ib) e pela corrente de pico (Ip); e o rendimento (Rend) foi influenciado, primeiramente, pela corrente de base (Ib), seguida do ciclo ativo (CA). Nota-se ainda, que nenhuma interação entre os fatores influenciou significativamente as respostas. Entretanto, as interações da corrente de pico com a corrente de base (Ip*Ib) e da corrente de pico com o ciclo ativo (Ip*CA) situaram-se praticamente no limite de significância para as respostas índice de convexidade (IC) e rendimento (Rend), respectivamente. Por isto, serão consideradas significativas para efeitos de análises.

Tabela 4.3 – Resultado da análise de variância.

Resposta	Processo	Ip	Ib	CA	Va	Ip*Ib	Ip*CA	Ip*Va
P	MAG	0,001	0,001	0,088	0,000	0,217	0,846	0,064
	Eletrodo Tubular	0,502	0,631	0,502	0,018	0,297	0,631	0,923
IC	MAG	0,034	0,733	0,083	0,021	0,214	0,044	0,125
	Eletrodo Tubular	0,571	0,073	0,505	0,002	0,055	0,347	0,447
ST	MAG	0,120	0,001	0,738	0,000	0,305	0,451	0,048
	Eletrodo Tubular	0,688	0,509	0,577	0,000	0,179	0,986	0,753
Qualidade	MAG	-	-	-	-	-	-	-
	Eletrodo Tubular	0,005	0,004	0,000	0,000	0,132	0,247	0,306
Txdep	MAG	0,093	0,052	0,020	0,000	0,007	0,451	0,402
	Eletrodo Tubular	0,921	0,164	0,562	0,000	0,347	0,362	0,989
Rend	MAG	0,095	0,051	0,029	0,264	0,008	0,591	0,482
	Eletrodo Tubular	0,102	0,031	0,003	0,029	0,087	0,057	0,607

Nota-se que para ambos os processos estudados a velocidade de alimentação do arame tem uma grande importância, pois é um fator muito influente nos dois processos, não apresentando significância apenas para o rendimento no processo MAG, conforme observado.

Uma diferença notória observada entre os processos é o número de fatores que os influenciam: enquanto o processo MAG é influenciado por vários fatores e interações o processo Eletrodo Tubular mostrou-se influenciado basicamente pela velocidade de alimentação do arame.

4.2.3 – Análise da Influência dos Parâmetros na Geometria do Cordão

a) Análise da Penetração

A penetração da solda é uma resposta muito importante, pois ela está diretamente ligada com a qualidade da solda. Uma penetração muito pequena pode resultar em um cordão sem resistência, comprometendo completamente a junta soldada. Por outro lado, uma solda com uma penetração excessiva torna-se crítica, principalmente em soldagem de chapas finas, podendo furar as mesmas. Entretanto, considera-se, neste trabalho, que uma resposta adequada é aquela que maximize a penetração. Este fato leva em consideração que os resultados obtidos dos testes não representam penetrações excessivas, mas apropriadas para permitir soldagens de chapas finas, conforme o objetivo principal do processo pulsado.

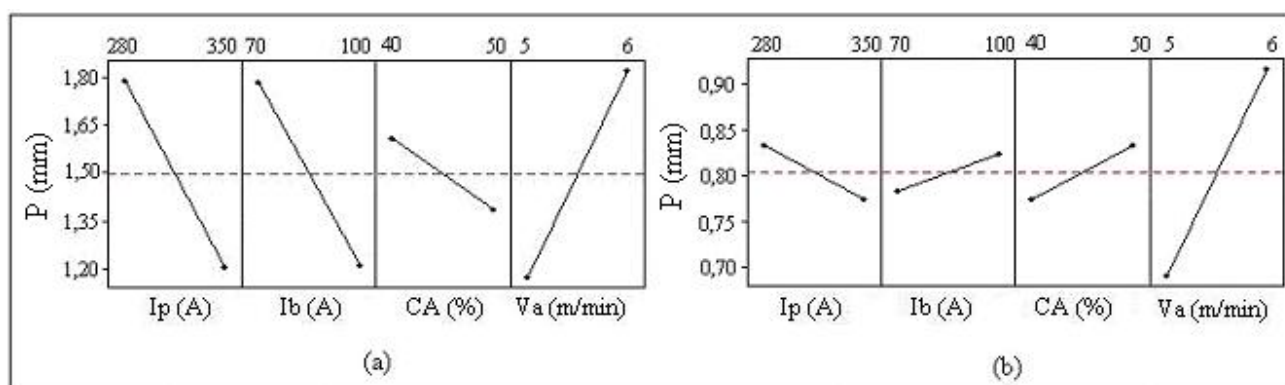


Figura 4.2 – Efeitos dos fatores na penetração para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

A **Figura 4.2** apresenta o gráfico dos efeitos principais dos fatores na penetração para os processos MAG e Eletrodo Tubular. Observando esta figura nota-se que a penetração alcançada com o

processo MAG foi superior à do eletrodo tubular em todas as condições de soldagem. A velocidade de alimentação foi o fator mais influente em ambos os processos e mostrou similaridade de comportamento, ou seja, o seu aumento provocou o aumento da penetração, conforme o esperado, pois, em função da provável diminuição do comprimento do arco e da melhor abrangência do cordão de solda, houve uma atuação mais efetiva do arco provocando o aumento da penetração.

No processo MAG, influenciou ainda no a corrente de pico e a corrente de base, sendo que ambas, neste caso, favorecem o aumento da penetração quando utilizado em seus níveis mínimos. O aumento desses parâmetros promove o aumento da corrente média e, conseqüentemente, da energia fornecida, o que, teoricamente, provocaria uma elevação na energia imposta à peça. Entretanto, foi observado um comportamento contrário, havendo uma redução na penetração. O que pode ter havido, neste caso, é que o aumento da corrente média provocou um aumento na fusão do eletrodo, aumentando a quantidade de material de adição fundido, entre a ponta do arame e o material de base, provocando interferência na ação do jato plasma, que conforme Kobayashi (1987), pode prejudicar a penetração da solda.

Para o processo MAG, considerando os efeitos individuais de cada parâmetro, uma condição de máxima penetração pode ser obtida utilizando-se a corrente de pico, a corrente de base e o ciclo ativo em seus níveis inferiores associados à velocidade de alimentação do arame em seu nível superior. Já para o processo Eletrodo Tubular, a manutenção da corrente de pico em seu nível inferior, juntamente com os outros fatores em seus níveis superiores proporciona a maximização da penetração.

b) Análise da Convexidade do Cordão

A convexidade do cordão de solda é um parâmetro que está ligado à qualidade do cordão. Um cordão com uma convexidade inadequada pode ser causa de defeitos na solda. Caso a convexidade seja excessiva, pode ser um concentrador de tensões facilitando o aparecimento de trincas. Entretanto uma convexidade muito pequena muitas vezes também é considerado inadequado. Uma relação entre reforço e largura do cordão (índice de convexidade) inferior a 30% tem sido considerado como valores aceitáveis para este índice (Silva, 2000). Para efeitos deste trabalho relações entre 20 a 30% foram considerados como resultados aceitáveis.

Observando os efeitos principais obtidos para os dois processos, **Figura 4.3**, nota-se que a convexidade da solda gerada com o processo Eletrodo Tubular foi menor que à do processo MAG em

todas as condições. De forma geral em ambos os processos a convexidade se situou entre 17 a 28%, condição esta que satisfaz os requisitos de qualidade.

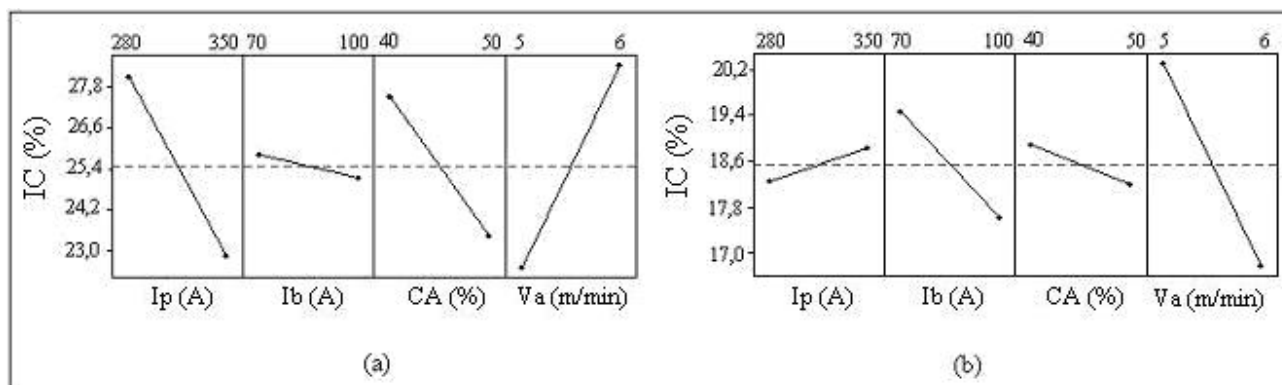


Figura 4.3 – Efeitos dos fatores na convexidade para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

A velocidade de alimentação do arame se mostrou como sendo o parâmetro mais significativo em ambos os processos, e apresentou comportamento oposto com relação aos dois processos. No caso do MAG, o aumento da alimentação do arame gerou, como consequência, aumento na convexidade; porém no processo com Eletrodo Tubular este comportamento foi o oposto. O aumento da velocidade de alimentação do arame provoca a diminuição do comprimento do arco e conseqüentemente diminuição da largura do cordão. Como é provável que o reforço sofra menor influência, é portanto, de se esperar que a convexidade do cordão neste caso aumente, como ocorreu com o processo MAG. No processo com Eletrodo Tubular, talvez devido às características do arame, que segundo Araújo (2004), apresenta um arco mais largo, sendo que as gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo, portanto, toda a energia de soldagem mais uniformemente, o aumento da velocidade do arame pode ter resultado na formação de um cordão mais plano, e com convexidade menor. A menor convexidade dos cordões soldados com arame tubular comparativamente ao MAG pode ter sua explicação baseada na utilização de uma velocidade do arame não adequada ao processo, já que devido a presença do fluxo, a área metálica inferior ao arame sólido (Wang, 1995) conduz a necessidade de velocidades de alimentação maiores.

A corrente de pico influenciou significativamente o processo MAG sendo verificado que o seu aumento resultou em diminuição da convexidade do cordão, fato este esperado em função do aumento da taxa de fusão do arame e, conseqüentemente, do comprimento do arco.

Considerando as interações entre os fatores, observou-se no processo MAG que a corrente de pico interagiu significativamente com o ciclo ativo na convexidade do cordão, conforme mostrado na

Figura 4.4. Observa-se ainda, desta figura, que, para a minimização da convexidade, mantendo-se a corrente de pico em 350 A o ciclo ativo poderia ser fixado em 40%. No processo com eletrodo tubular, a interação da corrente de pico com a de base, praticamente, se situou no limite de significância, sendo por isto considerada significativa. Observa-se na **Figura 4.5** que a obtenção de uma convexidade mínima é favorecida pela utilização da corrente de pico e de base em seus níveis máximos.

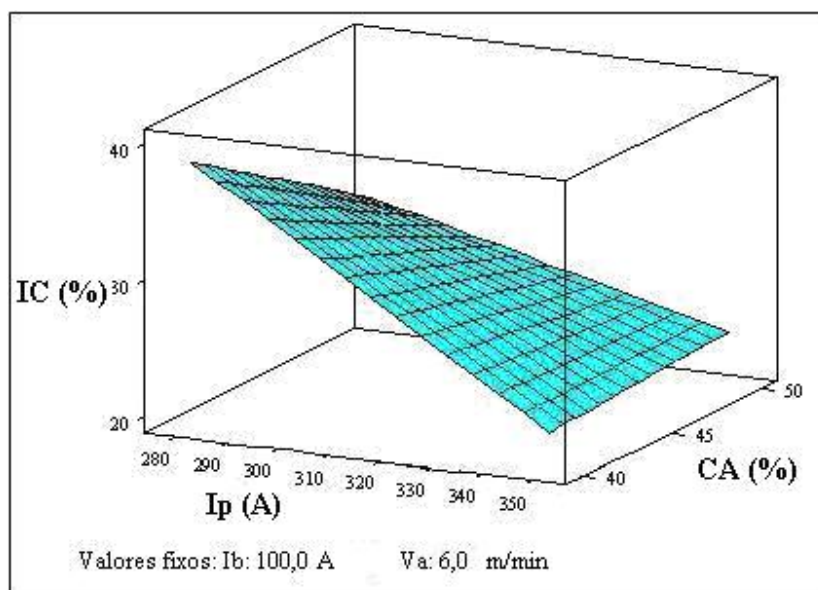


Figura 4.4 – Efeito da interação I_p *CA sobre o IC no processo MAG.

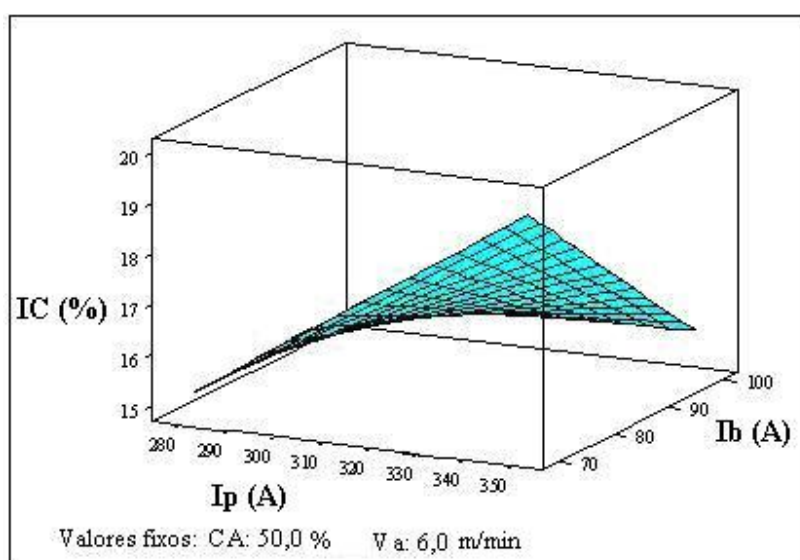


Figura 4.5 – Efeito da interação I_p * I_b sobre o IC no processo Eletrodo Tubular.

c) Análise da Área Total

A área total é a área depositada, ou seja, a área de penetração mais a área de reforço do cordão de solda. A sua importância na soldagem se dá tanto para a geometria do cordão, uma vez que ela determina o perfil da solda, quanto para a produtividade do processo, já que a área total pode medir o quanto do arame eletrodo foi utilizado para produzir o cordão.

Conforme pode ser visto na **Figura 4.6**, a área total do cordão de solda para o processo MAG foi superior à do eletrodo tubular em todas as condições de teste. Novamente a velocidade de alimentação do arame foi a mais significativa e mostrou comportamento similar em ambos os processos, ou seja, o seu aumento resultou em aumento da área total, como era de se esperar.

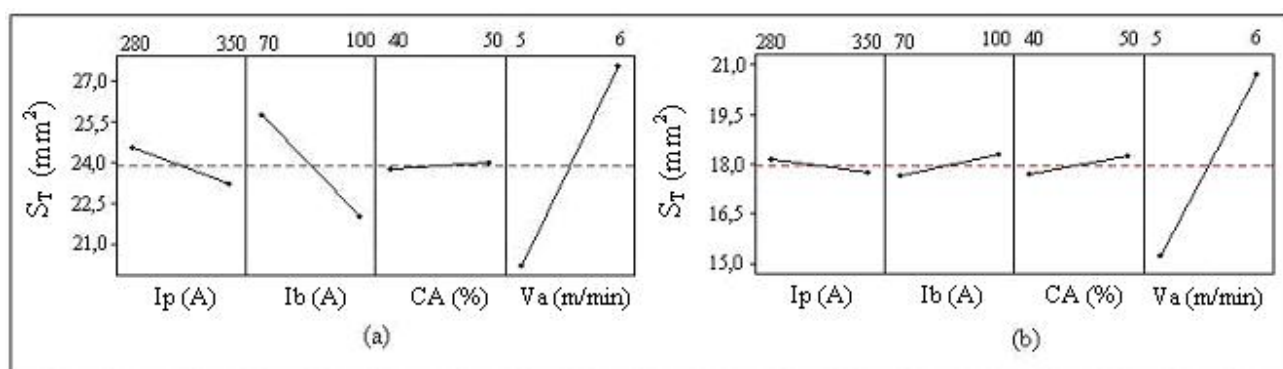


Figura 4.6 – Efeitos dos fatores na área total para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

A corrente de base também influenciou esta resposta no processo MAG, sendo que seu aumento promoveu a redução da resposta em estudo. Considerando que o aumento da I_b provoca uma elevação na corrente média, e em consequência, um aumento na fusão do eletrodo, há, portanto, uma diminuição do comprimento do eletrodo, já que a velocidade de alimentação está mantida constante e consequentemente, da energia gerada pelo efeito Joule. Esses fenômenos podem causar uma redução da penetração e, principalmente, do reforço do cordão, provocando uma diminuição da área total.

Observando a **Figura 4.6 (a)**, que mostra os efeitos dos fatores para o processo MAG, nota-se que a utilização da corrente de pico em seu nível inferior seria o adequado para maximizar a resposta em questão. No entanto, analisando a interação $I_p \cdot V_a$ (**Figura 4.7**), nota-se que a utilização deste fator em seu nível superior associado à alimentação do arame também em seu nível superior permite que seja obtido o máximo de área depositada, dentro da superfície estudada. Logo, os resultados indicam que a

maior S_T pode ser obtida mantendo-se a I_b em seu nível inferior e todos os outros fatores em seus níveis superiores.

No processo Eletrodo Tubular, já que não foram observadas interações significativas, os resultados observados na **Figura 4.6 (b)** sugerem que a manutenção da I_p em seu nível inferior associada a todos os outros fatores em seus níveis superiores resultará no melhor resultado para a S_T .

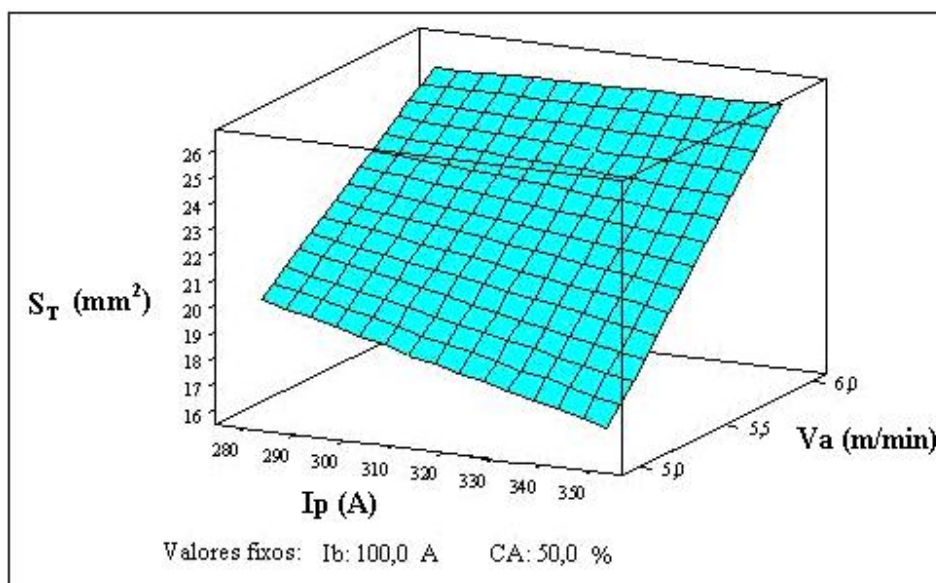


Figura 4.7 – Efeito da interação $I_p \cdot V_a$ sobre a S_T no processo MAG.

d) Análise da Qualidade Visual do Cordão

A qualidade visual do cordão é uma resposta importante para a adequação do processo e é resultante de uma inspeção visual do cordão de solda. Observou-se dos testes realizados que esta qualidade oscilou de forma bastante significativa, desde cordões com aspecto excelente até cordões de aspecto razoável.

Como pode ser observado na **Figura 4.8**, a diminuição do ciclo ativo (CA) e o aumento da velocidade de alimentação do arame (V_a) promovem uma melhor qualidade visual do cordão (Qualidade). Isto talvez ocorra, porque, com estas tendências há uma constância na relação entre a frequência e a velocidade de alimentação do arame, o que segundo (Alcan, 1992), promove a estabilidade do processo através da manutenção do tamanho da gota.

Por outro lado, o uso de corrente de pico (I_p) e corrente de base (I_b) em seus níveis maiores resultam em uma qualidade inferior. Isto se deve, provavelmente, a incorreta regulagem de parâmetros

que não proporciona uma manutenção da relação entre a velocidade de alimentação do arame e, conseqüentemente, da corrente média e a freqüência, promovendo instabilidades no processo, já que o aumento da I_m (através dos aumentos da I_p e I_b) não implica em um aumento proporcional da freqüência.

Na análise dos efeitos principais de cada parâmetro sobre a resposta analisada observa-se que a melhor qualidade do cordão pode ser obtida trabalhando-se com a V_a em seu nível superior e os outros fatores em seus níveis inferiores.

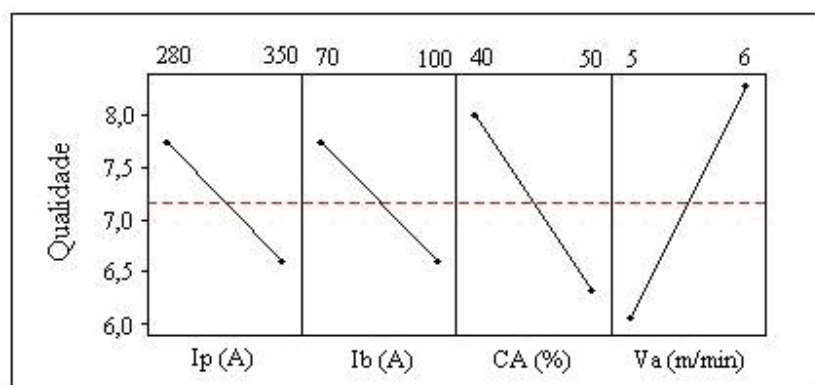


Figura 4.8 – Efeitos dos fatores na qualidade visual do cordão para processo Eletrodo Tubular.

4.2.4 – Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade

Na avaliação das características de desempenho dos processos é fundamental a análise da taxa de deposição e do rendimento do processo. Este último, aliás, influencia diretamente nos custos de soldagem. As perdas decorrentes da formação de respingos ou escórias são os fatores que, geralmente, levam esses índices ao decréscimo.

Observando os efeitos principais obtidos para os dois processos, **Figura 4.9**, nota-se que a taxa de deposição gerada com o processo Eletrodo Tubular foi menor que a do processo MAG em todas as condições. Tal resultado já era esperado, pois como a velocidade de alimentação do arame foi a mesma para ambos os processos estudados, e como o Eletrodo Tubular apresenta uma menor densidade volumétrica que o arame sólido, soldados nas mesmas condições é de se esperar uma menor deposição para o Eletrodo Tubular.

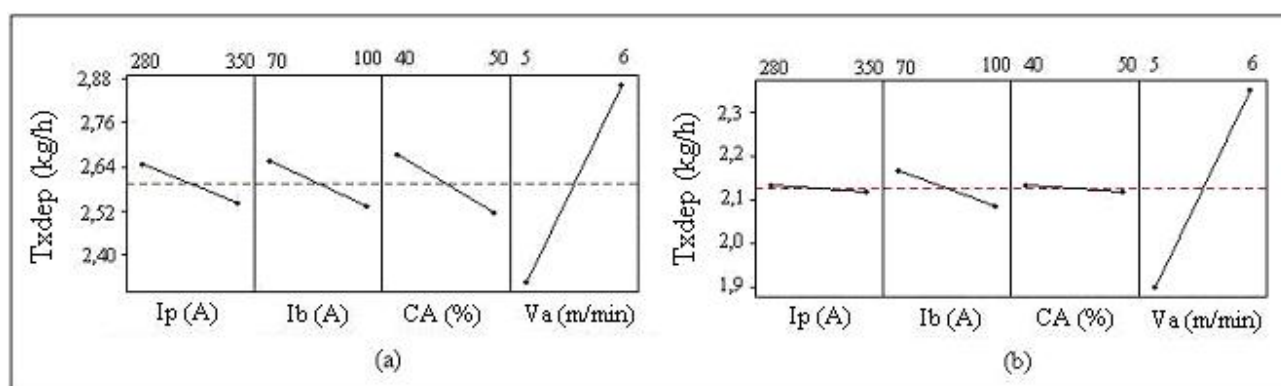


Figura 4.9 – Efeitos dos fatores na taxa de deposição para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

Com relação aos efeitos dos parâmetros, novamente a velocidade de alimentação foi a mais significativa para ambos os processos, mostrando um comportamento crescente com a taxa de deposição. O aumento da velocidade de alimentação gera, em consequência, um aumento do comprimento livre do eletrodo e, conseqüentemente, do aquecimento por efeito Joule. Desta maneira o aumento da energia gerada resulta numa maior fusão do arame e numa maior taxa de deposição em ambos os processos.

Os demais parâmetros estudados apresentaram basicamente o mesmo comportamento para os dois processos e se mostraram isoladamente pouco influentes na taxa de deposição.

De importante, ainda, na taxa de deposição se destaca a interação significativa $I_p \cdot I_b$ no processo MAG, representada na **Figura 4.10**. De acordo com esta interação a utilização da corrente de pico em seu nível superior em conjunção com a corrente de base em seu nível inferior permite maximizar a taxa de deposição, muito embora, a utilização de uma corrente de pico em seu nível mínimo com um corrente de base em seu nível máximo permite praticamente obter a mesma taxa de deposição. Considerando a influência de todos os parâmetros para o processo MAG, a condição mais adequada que permite maximizar a taxa de deposição poderia ser a utilização da corrente de pico e velocidade de alimentação do arame em seus níveis superiores e a corrente de base e o ciclo ativo em seus níveis inferiores.

Para o processo Eletrodo Tubular a utilização da velocidade de alimentação em seu nível superior e dos outros fatores em seus níveis inferiores se mostrou como sendo a mais adequada para a maximização da taxa de deposição.

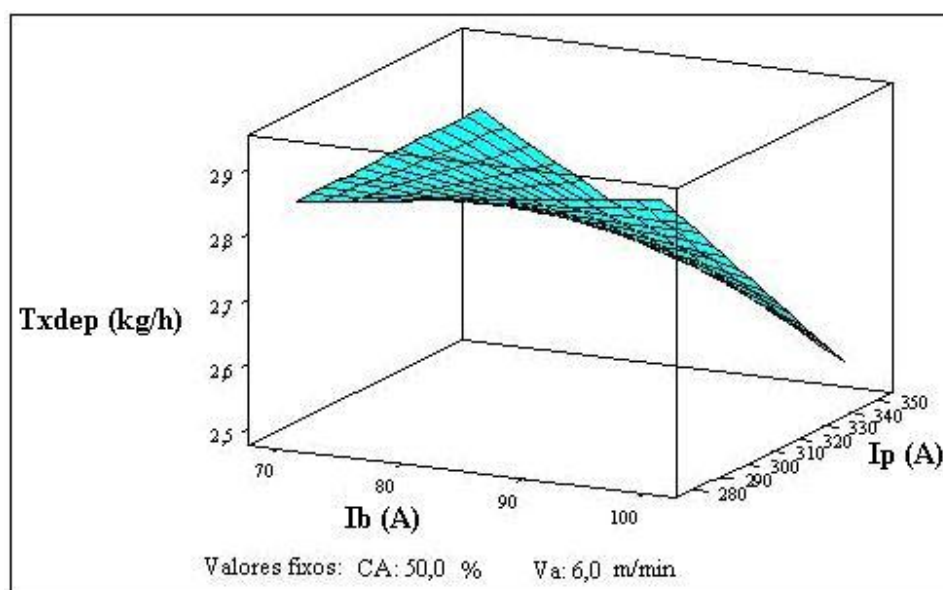


Figura 4.10 – Efeito da interação $I_p \cdot I_b$ sobre a taxa de deposição no processo MAG.

Em relação ao rendimento do processo, a **Figura 4.11** mostra os efeitos principais dos fatores, e percebe-se a mesma tendência dos resultados anteriores, ou seja, o rendimento do processo MAG foi superior ao processo com eletrodo tubular em todas as condições de soldagem. Tal resultado era esperado, pois este último é influenciado pela formação de respingos e escórias oriundas do fluxo interno.

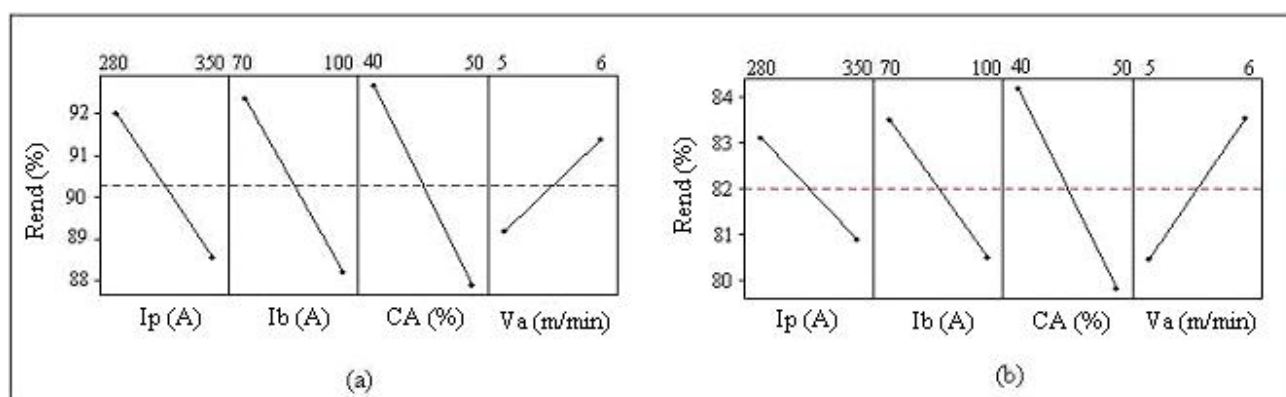


Figura 4.11 – Efeitos dos fatores no rendimento para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

No processo MAG o único fator que se mostrou influente no rendimento foi o ciclo ativo, sendo que o seu aumento provoca a redução da resposta. Isto provavelmente pode ter ocorrido devido a uma regulagem incorreta dos parâmetros, que não manteve constante a relação entre a frequência e a velocidade de alimentação do arame que, segundo Alcan (1992) é necessária para manter a estabilidade

do processo. Neste caso, como não há a manutenção da referida relação, o aumento do ciclo ativo promove o aumento da frequência, mas não da velocidade de alimentação do arame. Em consequência, gotas de tamanhos diferentes em cada pulso podem ser formadas, provocando o aumento de respingos.

Em relação ao processo com Eletrodo Tubular, a **Figura 4.11** mostra que o aumento da corrente de base causa a redução do rendimento, provavelmente, gerada pela não proporcionalidade entre corrente média e frequência que pode causar instabilidades no processo através da produção de gotas de tamanhos variados provocando transferências com muitos respingos. Além disso, para a regulação dos parâmetros de pulso utilizada neste trabalho, não se sabia com certeza se estava garantida a condição de uma gota por pulso, podendo estar, inclusive, acontecendo destacamentos de mais de uma gota por pulso, o que provoca instabilidades e aumento de respingos.

Observa-se ainda que o rendimento é influenciado pelo ciclo ativo e a alimentação do arame, sendo que a utilização de um menor ciclo ativo e uma maior velocidade de alimentação do arame aparentemente favorecem o rendimento da soldagem com o eletrodo tubular. O aumento do ciclo ativo resulta em aumento da frequência. Logo, com essas tendências de variação (da frequência através do CA e da Va) há de uma certa forma uma manutenção da relação entre esses parâmetros o que provoca certa estabilidade no processo, diminuindo, portanto, a formação de respingos e aumentando o rendimento.

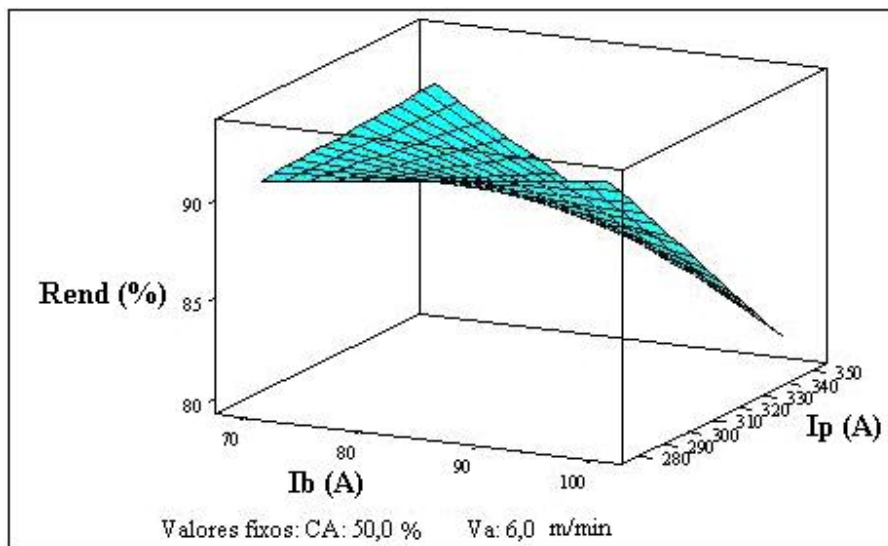


Figura 4.12 – Interação $I_p \cdot I_b$ no processo MAG.


Considerando a interação significativa $I_p \cdot I_b$, mostrada na **Figura 4.12**, para o processo MAG a condição de corrente de pico e da alimentação do arame em seus níveis superiores associados a corrente de base e o ciclo ativo em seus níveis inferiores resultará no maior rendimento.

No processo com eletrodo tubular, o maior rendimento possível pode ser obtido utilizando a alimentação do arame em seu nível superior e os outros fatores em seus níveis inferiores.

4.2.4 – Condições Otimizadas

Nas análises anteriores se procurou encontrar uma condição que permitisse otimizar uma resposta isoladamente. No entanto, o mais interessante e necessário, na prática, é encontrar uma resposta que permita conjugar todos os fatores na obtenção de uma geometria e de uma produtividade adequadas, ou seja, a condição ótima. Com este intuito utilizou-se a ferramenta “Response Optimizer” do software MINITAB para encontrar esta condição para os processos estudados. A **Figura 4.13** e a **Figura 4.14** mostram o campo da ferramenta “Response Optimizer”, onde se entra com os níveis das respostas pretendidas, já com os níveis estabelecidos para o processo MAG e Eletrodo Tubular, respectivamente. A **Tabela 4.4** mostra os resultados obtidos.

Observando a simulação delineada pelo “Response Optimizer” (**Tabela 4.4**) nota-se que as condições ótimas obtidas para os dois processos em estudo são diferentes, mas ambas sugerem o uso da corrente de pico em seu nível inferior. Nota-se também que a condição ótima obtida para o processo Eletrodo Tubular corresponde aos testes 3, 11 e 19 da **Tabela 4.2**. A **Tabela 4.5** mostra os resultados obtidos nestes testes, juntamente com as respostas previstas pelo “Response Optimizer”, mostrando que os resultados dos testes 3, 11 e 19 da **Tabela 4.2** aproximam-se do previsto pelo software, validando as análises realizadas.



Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C9 P	Maximize	1	2	2	1	1
C11 IC	Target	20	26	30	1	1
C12 ST	Maximize	10	29	29	1	1
C14 Txdep	Maximize	1,0	2,9	2,9	1	1
C16 Rend	Target	85	90	95	1	1

Figura 4.13 – Níveis das respostas pretendidas para o processo MAG.

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C9 P	Maximize	0,5	1,0	1,0	1	1
C11 IC	Minimize	20	20	30	1	1
C12 St	Maximize	15	20	22	1	1
C13 Qualidade	Maximize	6	9	9	1	1
C15 Txdep	Maximize	1,8	2,3	2,3	1	1
C17 Rend	Maximize	75,0	83	83	1	1

Figura 4.14 – Níveis das respostas pretendidas para o processo Eletrodo Tubular.

Tabela 4.4 – Quadro resumo das respostas obtidas pelo “Response Optimizer”.

	Condição ótima	Respostas Previstas	Desejabilidade
MAG	$I_p = 280 \text{ A}$ $I_b = 70 \text{ A}$ $CA = 50 \%$ $V_a = 5,7 \text{ m/min}$	$P = 2,2 \text{ mm}$	1,00
		$IC = 26,0 \%$	1,00
		$S_T = 27,9 \text{ mm}^2$	0,94
		$Txdep = 2,8 \text{ kg/h}$	0,93
		$Rend = 90,3 \%$	0,94
	Coeficiente de desejabilidade global = 0,96		
Eletrodo Tubular	$I_p = 280 \text{ A}$ $I_b = 100 \text{ A}$ $CA = 40\%$ $V_a = 6 \text{ m/min}$	$P = 0,9 \text{ mm}$	0,93
		$IC = 16,9 \%$	1,00
		$S_T = 21,8 \text{ mm}^2$	1,00
		Qualidade = 9,2	1,00
		$Txdep = 2,4 \text{ kg/h}$	1,00
	$Rend = 87,4 \%$	1,00	
Coeficiente de desejabilidade global = 0,99			

Tabela 4.5 – Quadro comparativo entre respostas previstas e obtidas.

Respostas Analisadas	Resultados Previstos	Teste 3	Teste 11	Teste 19
P (mm)	0,9	1,0	1,0	1,0
IC (%)	16,9	8,2	15,3	17,5
S _T (mm ²)	21,8	22,1	21,2	22,0
Qualidade	9,2	9,7	9,0	9,0
Txdep (Kg/h)	2,4	2,5	2,5	2,2
Rend (%)	87,4	86,1	86,9	89,3

4.2.5 – Comentários Finais a Respeito da Comparação entre os Processos

A **Figura 4.15** apresenta a influência do tipo de processo estudado sobre as respostas analisadas. Através da análise desta figura é observado que, em relação ao processo MAG (GMAW), o processo Eletrodo Tubular (FCAW) apresenta menor penetração, índice de convexidade, área total, taxa de deposição e rendimento.

Portanto, aparentemente, o processo MAG apresenta um potencial elevado em relação ao processo Eletrodo Tubular, já que todas as respostas estudadas apresentam melhor resultado quando obtidas através do processo MAG, com exceção apenas do índice de convexidade. No entanto, este resultado não descreve precisamente a realidade. Segundo a literatura, a fusão do arame tubular apresenta diferenças em relação aos arames sólidos. Segundo Wang (1995), a área metálica do arame tubular é muito menor que a do arame maciço (com o mesmo diâmetro). Por isto, o processo com arame tubular apresenta uma densidade de corrente muito maior que a do processo com arame sólido, o que, provavelmente, implicaria na necessidade de utilização de uma maior velocidade de alimentação do arame. Por outro lado, Mota (1998) ressalta que o fluxo reduz o grau de “aquecimento ôhmico” (efeito Joule) do arame, durante a passagem da corrente. A taxa de aquecimento da capa metálica seria então menor devido ao consumo de calor requerido para a fusão do fluxo. Desta forma a energia necessária para fundir o arame tubular seria maior do que a necessária para fundir um arame maciço, precisando então, a soldagem com aquele, de níveis de energia maiores.

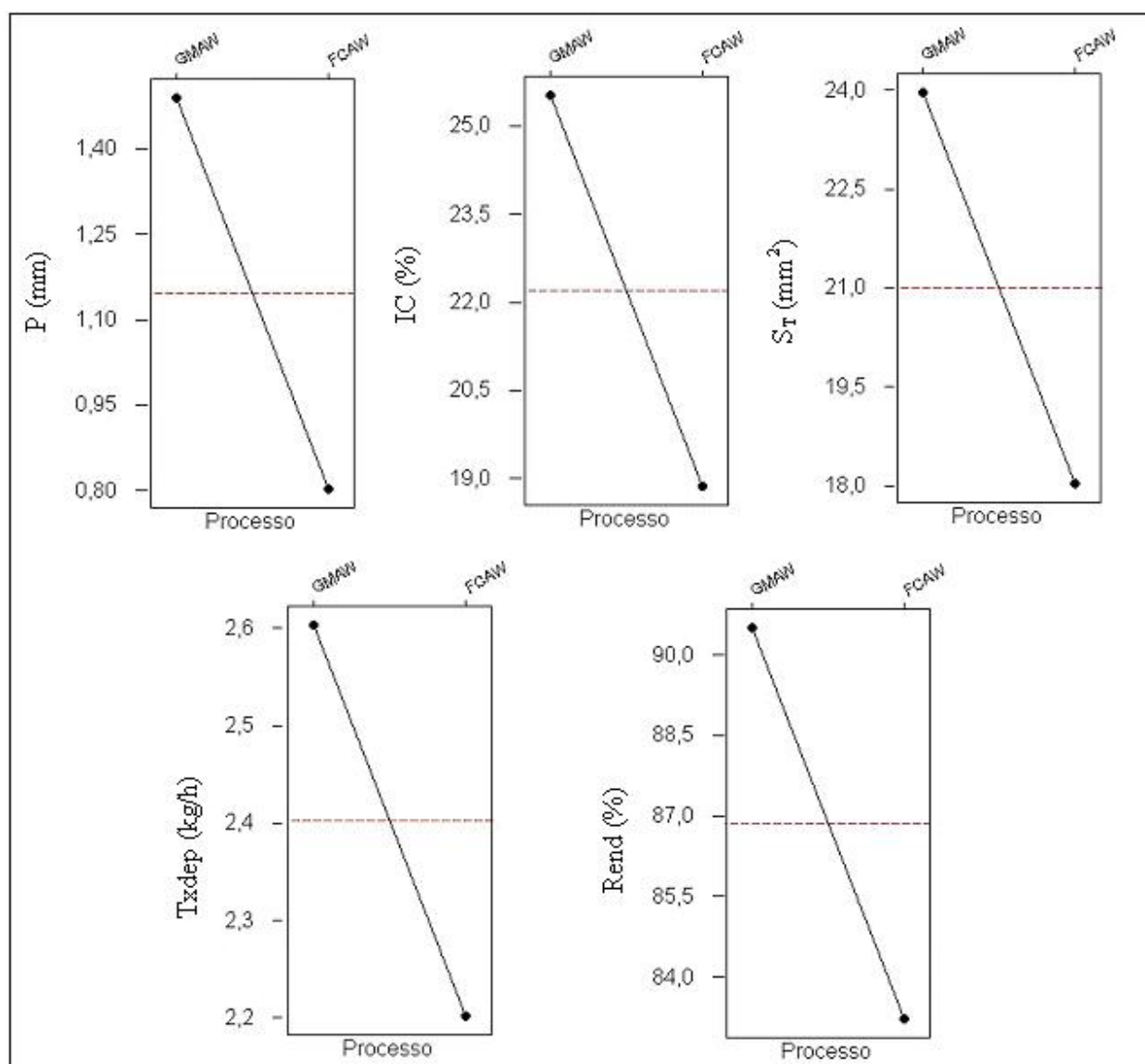


Figura 4.15 – Efeito do tipo de processo sobre as respostas estudadas.

Desta forma, as condições utilizadas neste trabalho até aqui não se mostraram muito adequadas à soldagem com arame tubular. Notou-se que não é possível conseguir as características das soldas produzidas com MAG nas soldas produzidas com Eletrodo Tubular, utilizando as mesmas condições de pulso daquele.

Como o objetivo principal deste trabalho é ampliar o conhecimento sobre a soldagem com Eletrodo Tubular, sentiu-se a necessidade de se estudar um pouco mais o processo através de outros testes, deixando de lado a comparação com o processo MAG, o que deixaria a pesquisa mais flexível e não dependente das condições utilizadas para o processo MAG. Essas considerações levaram a necessidade de novos testes, através dos quais se pudesse avaliar a influência da corrente média e

velocidade de alimentação do arame, cuja importância para o processo se mostrou muito grande, devido a sua grande e quase exclusiva influência sobre o processo Eletrodo Tubular. Além disso, sabe-se da literatura (Medeiros et al, 1989; Araújo, 2004, Saito, 2001), que o processo Eletrodo Tubular se sobressai em relação ao processo MAG, dentre outros aspectos, devido a maior taxa de deposição, o que, se pretende avaliar utilizando um nível adicional para a velocidade de alimentação.

Como esta parte do trabalho representa uma nova fase da pesquisa em questão, resolveu-se analisar também a influência de uma outra variável, a frequência, pois este é um parâmetro frequentemente analisado em trabalhos que avaliam as potencialidades da utilização do processo Eletrodo Tubular pulsado (Braga et al, 1998; Norrish et al, 1995; Medeiros et al, 1989). Assim sendo, um novo Planejamento Fatorial Completo foi definido para o estudo da influência dos parâmetros de pulso corrente média e frequência e da velocidade de alimentação do arame sobre as características geométricas e produtivas do processo Eletrodo Tubular. A definição dos níveis utilizados no fatorial completo foi estabelecida a partir de testes preliminares, que são apresentados, juntamente com o fatorial completo, no item seguinte.

4.3 – Parte 2: Análise do Processo Eletrodo Tubular Pulsado

4.3.1 – Testes Preliminares

Esta parte do trabalho tem o objetivo de definir um novo planejamento fatorial para o processo Eletrodo Tubular, com níveis de fatores mais apropriados para o processo, de modo que informações mais precisas possam ser obtidas a respeito do processo Eletrodo Tubular Pulsado.

Considerando o anteriormente exposto, verificou-se a necessidade de se fazer uma investigação preliminar da influência da velocidade de alimentação do arame associado à corrente média e frequência de pulsação. Estes novos testes seguiram a mesma metodologia de preparação e realização anteriormente descritas cujos detalhes encontram-se no **Capítulo 3**. Procurou-se ainda manter os valores de corrente de pico e base constantes nos doze primeiros testes e variar apenas os tempos de pico e de base de acordo com a corrente média e frequência pretendidas. É importante mencionar que esses testes foram derivados da condição ótima obtida na primeira parte do trabalho. Os dois últimos testes referem-se a condições sugeridas na literatura (Nascimento, 2003). A sequência de testes, bem como os parâmetros avaliados e os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 4.6**. Nota-se que apenas nos testes 13 e 14 utilizou-se valores de corrente de pico e de base diferentes dos anteriores.

Tabela 4.6 - Testes e resultados complementares.

Testes	Ip	Ib	Tp	Tb	Va	Im	F	P	IC	Txdep	Rend
-	(A)	(A)	ms	ms	(m/min)	(A)	(Hz)	(mm)	(%)	(kg/h)	(%)
1	280	100	4	4	5	190	125,0	0,9	21,0	2,0	81,7
2	280	100	4	4	6	190	125,0	1,1	17,7	2,2	81,1
3	280	100	4	4	7	190	125,0	1,2	17,3	2,5	86,6
4	280	100	4	6	5	172	100,0	0,5	21,9	1,7	70,4
5	280	100	4	6	6	172	100,0	1,1	18,2	2,5	86,1
6	280	100	4	6	7	172	100,0	1,0	39,6	3,5	90,5
7	280	100	4	8	5	160	83,3	1,0	18,4	2,1	84,3
8	280	100	4	8	6	160	83,3	1,0	22,2	2,0	86,6
9	280	100	4	8	7	160	83,3	0,5	42,9	2,8	97,5
10	280	100	4	6	7	172	100	1,2	23,8	3,1	87,0
11	280	100	2	2	7	190	250	1,2	21	3,1	88,5
12	280	100	2	3	7	172	200	1	27,6	3,1	85,6
13*	319	85	1,3	2	7,5	177,2	303	0,7	29,5	3,3	83,4
14*	353	142	1	1,6	9,5	223,2	385	1,3	25,2	4,6	81,1

* Testes sugeridos pela literatura

Considerando os resultados obtidos na **Tabela 4.6**, a **Figura 4.16** apresenta o comportamento da penetração frente às influências isoladas da corrente média, velocidade de alimentação e frequência de pulsação. Nota-se uma tendência de aumento da penetração para o crescimento de todos os parâmetros analisados, entretanto, este crescimento não foi muito significativo, variando de aproximadamente 0,8 mm até 1,3 mm. Entretanto, ao observar-se o comportamento da convexidade do cordão (**Figura 4.17**) nota-se que a frequência praticamente não influenciou no seu formato, ao passo que o aumento da velocidade de alimentação do arame provocou uma tendência de crescimento da convexidade, sendo este parâmetro o mais influente nesta resposta. O aumento da corrente média por sua vez provocou uma leve tendência de diminuição da convexidade. Tais resultados apresentam coerência com o esperado.

Considerando os resultados obtidos para a taxa de deposição, **Figura 4.18**, observa-se uma tendência de crescimento da taxa de deposição com os aumentos da corrente média, velocidade de alimentação e frequência de pulsação. Observa-se ainda que de acordo com os testes realizados a taxa de deposição variou de aproximadamente 2 kg/h até 4,5 kg/h. Como o processo com eletrodo tubular exige taxas de deposições maiores para compensar o maior custo do arame frente ao processo MAG aparentemente tais resultados indicam a necessidade de se trabalhar com valores superiores de frequência de pulsação, de alimentação do arame e corrente média.

Entretanto, nota-se da **Figura 4.19** que o rendimento da solda é influenciado significativamente por tais condições. No caso da alimentação do arame fica nítido pelos resultados obtidos que velocidades superiores a 7 m/min diminuíram o rendimento da soldagem devido provavelmente a instabilidade do arco e instabilidade na transferência metálica, ocasionando maiores formações de respingos. O mesmo se observa para frequências de pulsação superiores a 250 Hz e corrente média superior a 190 A.

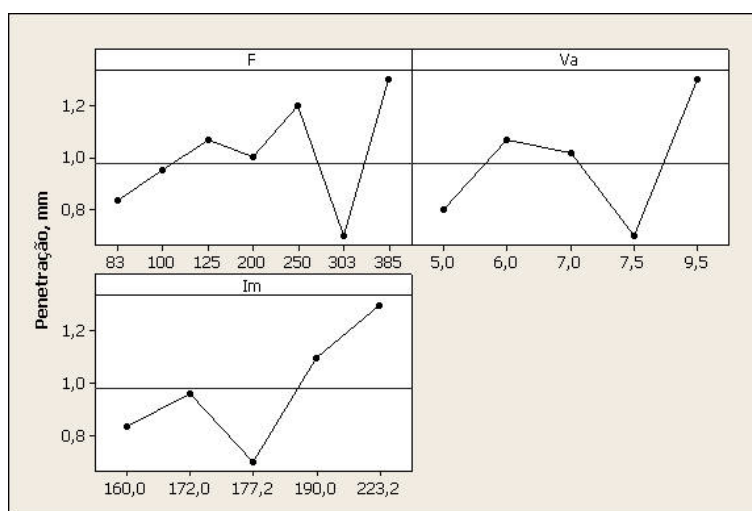


Figura 4.16 - Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a penetração.

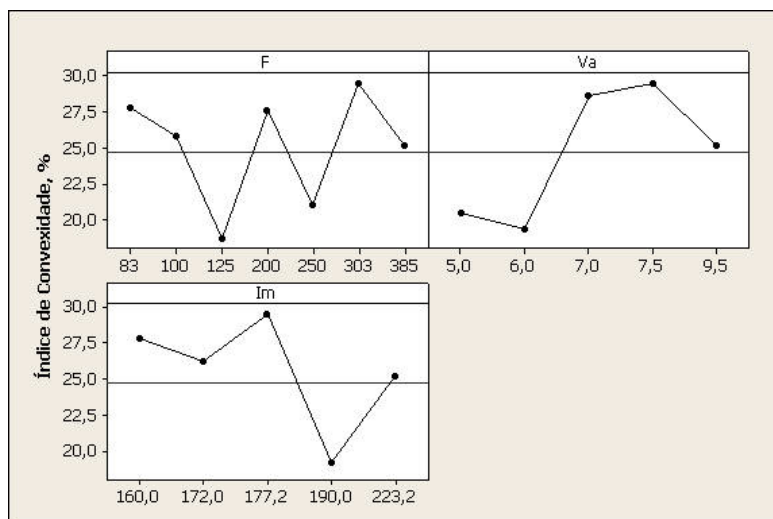


Figura 4.17- Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a convexidade do cordão.

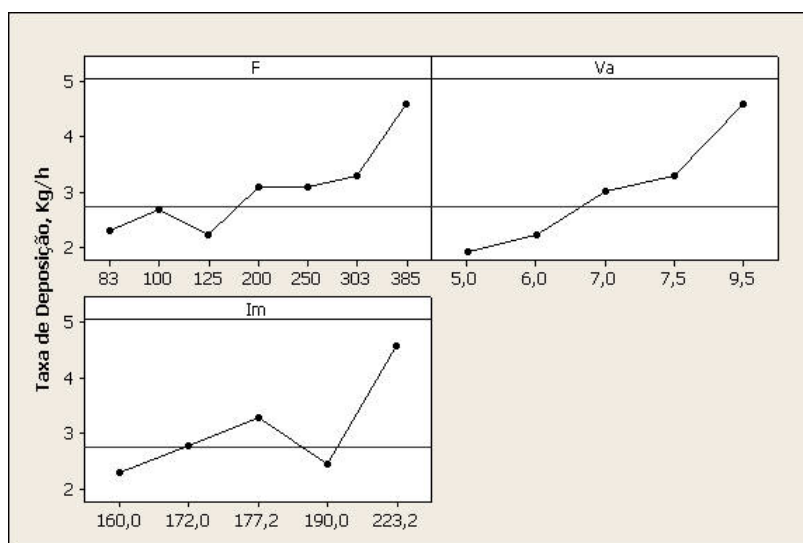


Figura 4.18 - Influência da freqüência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a taxa de deposição.

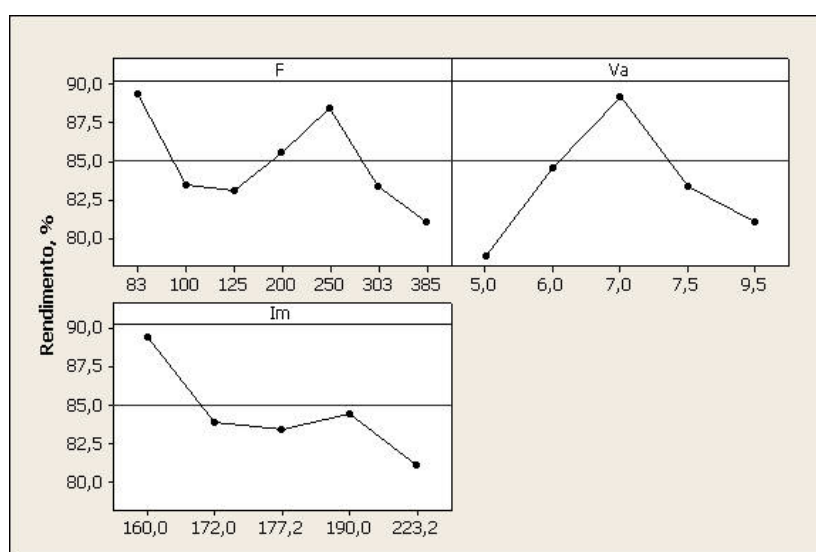


Figura 4.19 - Influência da freqüência, velocidade de alimentação e corrente média sobre o rendimento da soldagem.

Com essas análises definiu-se os níveis das respostas a serem estudadas no planejamento fatorial completo. Escolheu-se para a corrente média o nível inferior de 160 A e o superior de 200 A; para a freqüência escolheu-se 150 Hz e 200 Hz como nível inferior e superior e escolheu-se 6 m/min como sendo o nível inferior da velocidade de alimentação e 8 m/min como o nível superior. A escolha desses níveis foi baseada nos testes preliminares, com o intuito de obter principalmente, maiores

penetrações e taxas de deposição em relação a primeira parte do trabalho, de modo a compensar o maior custo do arame tubular, comparativamente, ao arame sólido, conforme comentado anteriormente.

4.3.2 – Planejamento Fatorial Completo

A ordem de testes, bem como os valores das respostas medidas e calculadas para o fatorial completo estão apresentados na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 – Ordem de testes e resultados do fatorial completo.

OP	Im	F	Va	P	IC	S _T	Qualidade	Txdep	Rend
-	(A)	(Hz)	(m/min)	mm	%	mm ²	-	(Kg/h)	%
1	160	150	6	1,1	20,4	17,5	9	2,4	82,0
2	200	150	6	1,2	17,6	18,9	7	2,2	82,9
3	160	200	6	0,9	27,6	18,1	10	2,5	85,2
4	200	200	6	1,0	16,0	18,5	8	2,3	82,6
5	160	150	8	0,8	30,2	20,3	8	2,9	85,9
6	200	150	8	1,2	24,5	27,9	7	3,2	82,2
7	160	200	8	0,7	27,8	19,1	10	3,0	87,2
8	200	200	8	1,3	20,0	26,5	9	3,2	86,0
9	160	150	6	1,0	22,7	16,2	8	2,4	82,8
10	200	150	6	1,2	21,1	17,3	7	2,4	81,6
11	160	200	6	0,9	22,7	17,4	9	2,3	85,0
12	200	200	6	1,1	15,1	19,2	8	2,3	82,4
13	160	150	8	0,9	30,2	19,1	8	3,1	83,1
14	200	150	8	1,2	24,5	25,2	7	3,0	82,3
15	160	200	8	0,8	26,4	18,2	10	3,8	87,7
16	200	200	8	1,3	18,8	25,2	9	3,1	86,3

A **Figura 4.20** mostra o perfil de solda para as duas condições extremas do planejamento fatorial completo.

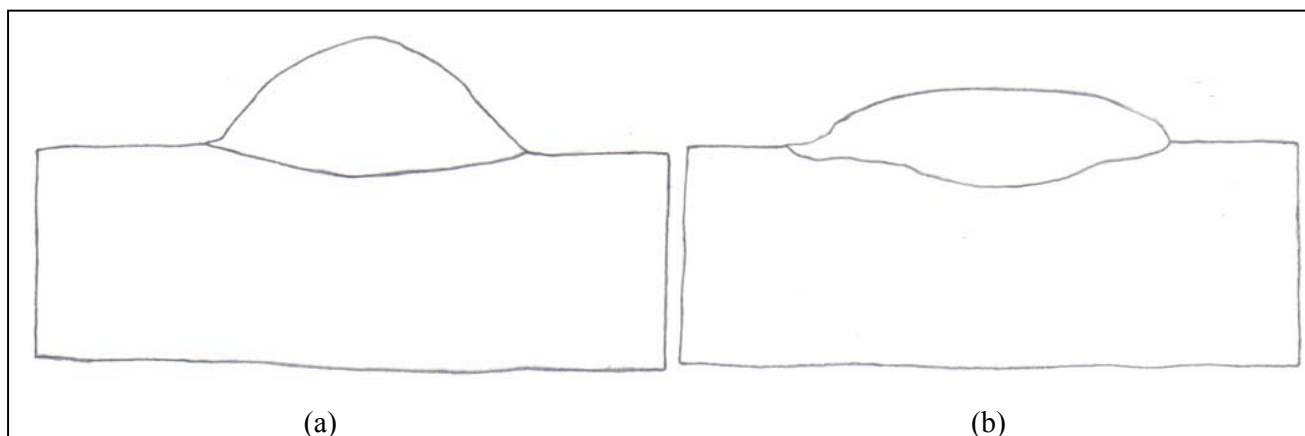


Figura 4.20 - Perfil dos cordões na condição: (a) $F=160$ Hz, $I_m=150$ A e $V_a=8$ m/min; (b) $F=200$ Hz, $I_m=200$ A e $V_a=6$ m/min.

4.3.2.1 - Análise de Variância

Para que os resultados destes experimentos pudessem ser avaliados consistentemente, utilizou-se novamente a análise de variância, através do software MINITAB. Utilizando uma confiabilidade estatística de 95%, para que uma variável seja considerada estatisticamente significativa no processo, o nível α obtido deve ser inferior a 5% (0,05).

A **Tabela 4.8** mostra os valores do nível α para as respostas referentes aos parâmetros estudados considerando interações de até 3ª ordem. Os números em negrito, nesta tabela, indicam que os valores médios das respostas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle com 95% de confiabilidade.

Tabela 4.8 – Resultado da análise de variância para o novo planejamento fatorial.

Resposta	I_m	F	V_a	$I_m * F$	$I_m * V_a$	$F * V_a$	$I_m * F * V_a$	R^2	R^2_{adj}
P	0,000	0,017	0,347	0,081	0,000	0,017	0,081	96,28	93,02
IC	0,000	0,038	0,000	0,024	0,649	0,046	0,149	93,30	87,43
S_T	0,000	0,962	0,000	0,924	0,000	0,132	0,812	95,98	92,47
Qualidade	0,000	0,000	0,195	1,000	0,195	0,022	1,000	94,37	89,44
Txdep	0,459	0,347	0,000	0,459	0,914	0,347	0,459	87,50	76,56
Rend	0,005	0,000	0,001	0,384	0,636	0,043	0,070	91,59	84,24

Os resultados da análise de variância mostram que, ao contrário do que foi observado na parte 1 deste capítulo, onde, praticamente, somente a velocidade de alimentação do arame (V_a) se mostrou

influyente no processo Eletrodo Tubular, este planejamento fatorial mostrou que a corrente média (I_m), a frequência de pulso (F) e as interações entre parâmetros também são muito influentes no processo. Além disso, o coeficiente de correlação (R^2) foi muito alto em todas as respostas indicando um resultado muito bom.

Os resultados mostraram que, pela ordem de significância:

- a penetração foi influenciada pela corrente média, pela interação da corrente média com a velocidade de alimentação do arame ($I_m \cdot V_a$), pela frequência de pulso e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação do arame ($F \cdot V_a$);
- a convexidade do cordão foi influenciada pela corrente média, pela velocidade de alimentação, pela interação $I_m \cdot F$ e pela interação $F \cdot V_a$;
- a S_T foi influenciada pela corrente média, pela velocidade de alimentação e pela interação da corrente média com a velocidade de alimentação ($I_m \cdot V_a$);
- a Qualidade foi influenciada pela corrente média, pela frequência e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação ($F \cdot V_a$);
- a taxa de deposição foi influenciada somente pela velocidade de alimentação do arame;
- o rendimento foi influenciado pela corrente média, pela frequência, pela velocidade de alimentação e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação ($F \cdot V_a$).

4.3.2.2 - Análise da Influência dos Parâmetros na Geometria do Cordão

a) Análise da Penetração

Observando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 4.21**, nota-se que o aumento da corrente média (parâmetro mais significativo) provoca o aumento da penetração. Este fato já era esperado, pois o aumento deste parâmetro provoca o aumento da energia que, segundo Miills e Keene (1990) provoca uma maior pressão no arco, determinando um aumento na penetração.

Quanto à frequência de pulsação, outro fator significativo na penetração, observa-se na **Figura 4.21** que o seu aumento provocou uma redução na resposta. Isto se deve ao fato de que, nesta condição, o comprimento livre do eletrodo é menor (Miller, 1994), e, portanto, a energia gerada pelo efeito Joule também. Além disso, com o comprimento do eletrodo menor, ou seja, com um maior comprimento do arco não há uma adequada abrangência do cordão de solda, resultando em uma redução da penetração.

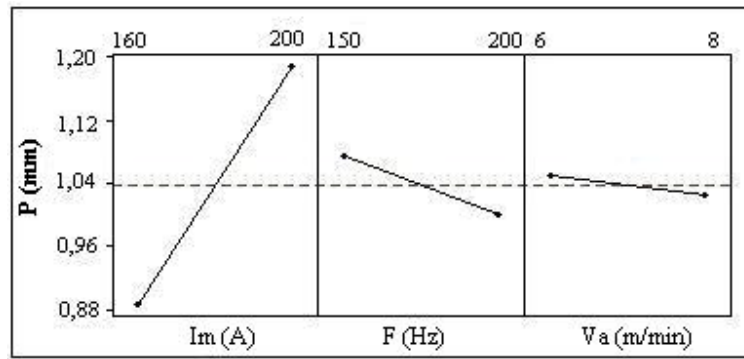


Figura 4.21 – Efeitos principais dos fatores sobre a penetração.

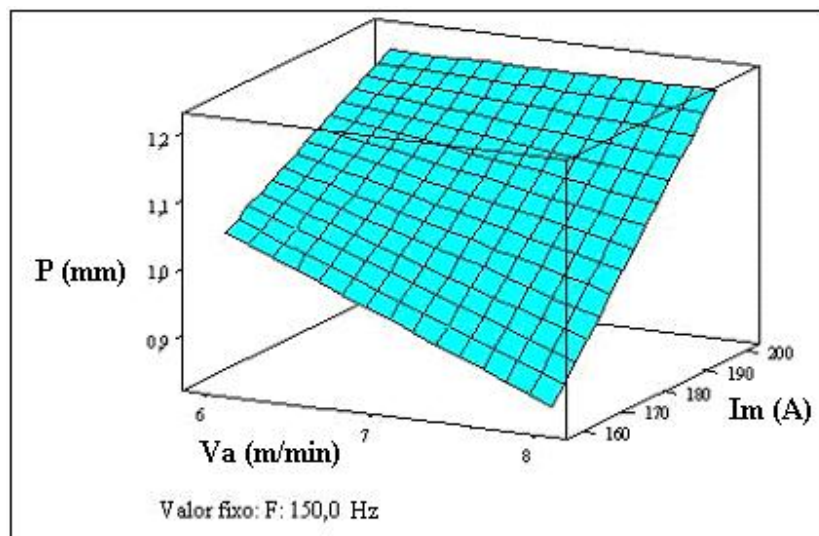


Figura 4.22 – Influência da interação $Im \cdot Va$ sobre a penetração.

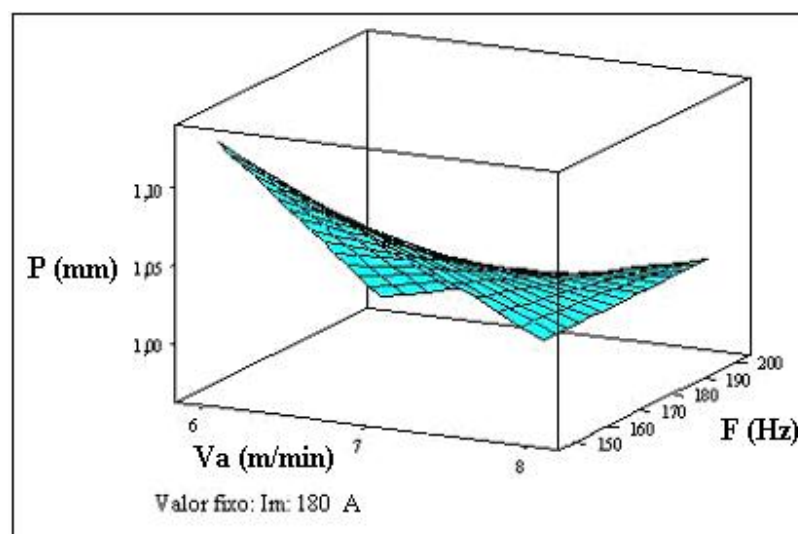


Figura 4.23 – Influência da interação $F \cdot Va$ sobre a penetração.

Para se obter uma combinação de parâmetros que maximize a penetração deve-se levar em consideração, tanto o efeito individual de cada parâmetro, quanto o efeito das interações significativas observadas na análise de variância. Na **Figura 4.22**, que representa o comportamento da interação da corrente média com a alimentação do arame, observa-se que a maximização da penetração foi obtida quando a corrente média se situou em seu nível superior (200 A) associada à velocidade de alimentação também em seu nível superior (8 m/min), muito embora se observa que a utilização de velocidade de alimentação do arame com 6 m/min pode também gerar uma penetração adequada com uma pequena redução na penetração em relação a condição anterior. Já na **Figura 4.23**, que representa a interação da frequência com a alimentação do arame, nota-se que para esta condição de V_a de 8 m/min a frequência pode ser utilizada em qualquer nível sem influenciar significativamente na penetração. Desta forma a condição que, aparentemente, permite obter o melhor resultado para a penetração foi aquela na qual a corrente média e a alimentação do arame foram mantidas em seus níveis superiores conjuntamente com a frequência em seu nível inferior, muito embora a velocidade de alimentação possa também ser usada em seu nível inferior sem praticamente afetar significativamente o resultado.

b) Análise da Convexidade do Cordão

Com relação aos efeitos principais, **Figura 4.24**, nota-se pelos resultados que a convexidade de forma geral se situou em níveis considerados adequados para todos os testes. De forma particular observa-se que o aumento da corrente média (parâmetro mais significativo) provocou a redução da convexidade do cordão, fato este esperado, pois o aumento da energia do processo provoca um aumento na taxa de fusão do eletrodo. Entretanto, como a velocidade de alimentação do arame está constante, reduz-se o comprimento do eletrodo, e, portanto, a energia gerada pelo efeito Joule, diminuindo a deposição e provocando uma redução na convexidade do cordão.

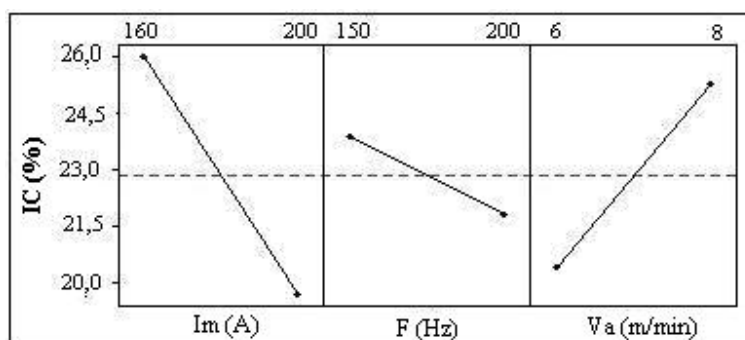


Figura 4.24 – Efeitos principais dos fatores sobre o índice de convexidade.

Em relação à alimentação do arame (segundo parâmetro mais significativo), a mesma figura mostra que o seu aumento provoca uma elevação no índice de convexidade, resultado este também esperado. Isto se deve ao aumento do comprimento do eletrodo e, portanto, da energia gerada pelo efeito Joule, causando o aumento da fusão do eletrodo e da taxa de deposição. O aumento da frequência de pulsação também resultou em uma redução da convexidade (**Figura 4.24**). Isto ocorre porque com o aumento da frequência há uma redução do comprimento do eletrodo, diminuindo a deposição, e, conseqüentemente, a convexidade do cordão.

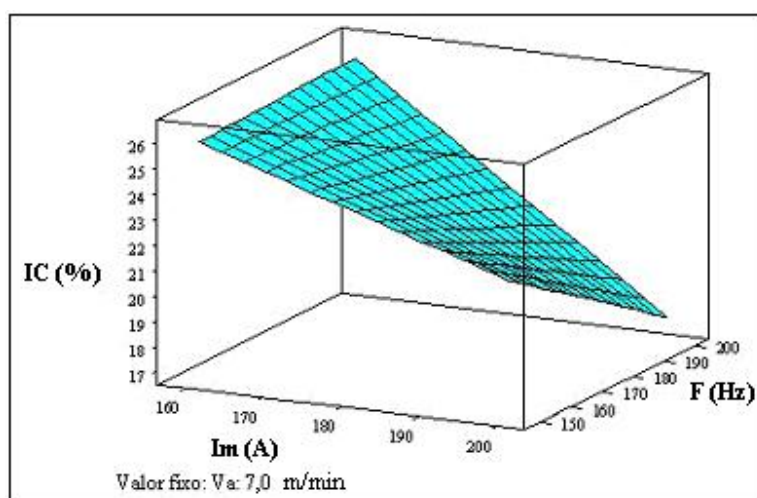


Figura 4.25 – Influência da interação $I_m \cdot F$ sobre o índice de convexidade.

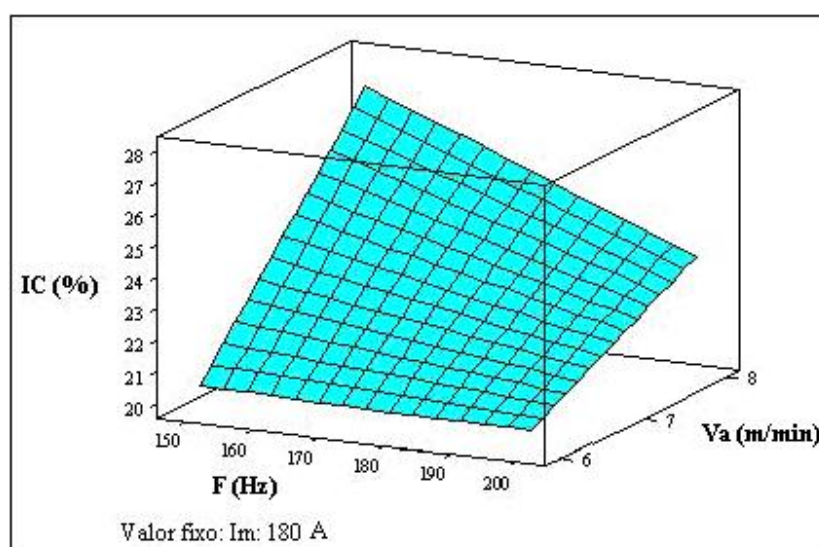


Figura 4.26 – Influência da interação $F \cdot V_a$ sobre o índice de convexidade.

Ainda de importante para a análise do índice de convexidade têm-se as interações significativas apresentadas na **Figura 4.25** e na **Figura 4.26**. Nelas é possível observar que para se obter o cordão mais plano possível deve-se trabalhar com a corrente média e a frequência em seus níveis superiores, 200 A e 200 Hz, respectivamente, e com a velocidade de alimentação do arame em seu nível inferior, 6 m/min. Entretanto, outras opções também se mostram possíveis já que de forma geral a convexidade obtida se situou em níveis considerados adequados para aplicações práticas.

c) Análise da Área Total

A **Figura 4.27** mostra que o aumento da corrente média provoca o aumento da área de depósito, fato esperado, pois com maior corrente uma maior energia é fornecida ao processo, o que resulta em um incremento na geometria do cordão, resultando em um aumento da área total.

O aumento da velocidade de alimentação, outro fator influente na área total, também promove o aumento da resposta em questão (**Figura 4.27**), o que ocorre devido ao aumento da energia gerada no processo, causado pela elevação do comprimento do eletrodo.

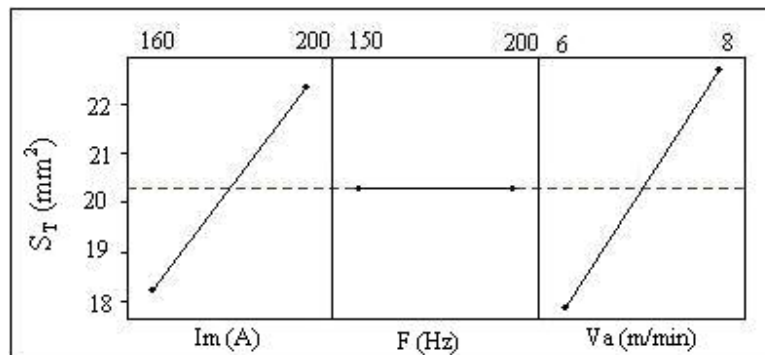


Figura 4.27 – Efeitos principais dos fatores sobre a área total.

Observando a interação significativa da corrente média com a velocidade de alimentação, apresentada na **Figura 4.28**, nota-se que a condição que torna a área total a maior possível é a da I_m e da V_a em seus níveis superiores, isto é, 200 A e 8 m/min, respectivamente. A **Figura 4.28** mostra que a frequência não exerce influência alguma sobre a S_T , o que, aliás, já havia sido observado na análise de variância. Para maximizar a resposta, visto que esta condição pode conduzir a condição mais produtiva do processo em estudo, portanto, pode-se usar qualquer um dos níveis de frequência estudados. Portanto, será sugerido aqui que se use a frequência em seu nível maior, pois nesta condição, a energia

gerada no processo é menor. Portanto, a utilização dos fatores estudados em seus níveis superiores resultará na maximização da S_T , dentro da superfície estudada.

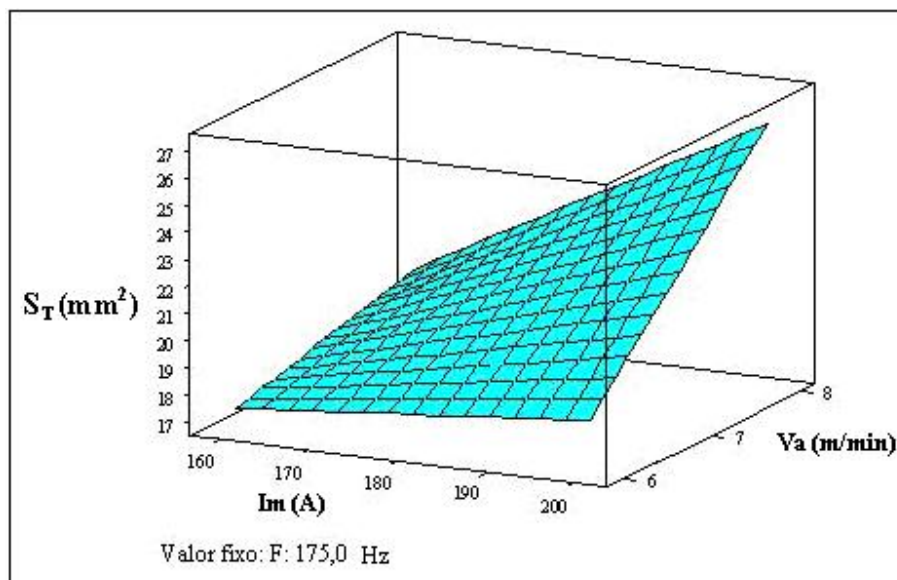


Figura 4.28 – Influência da interação $Im*Va$ sobre a área total.

d) Análise da Qualidade Visual do Cordão

Na análise da qualidade visual do cordão foram levados em consideração aspectos como o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão, sendo que de forma geral a qualidade foi considerada muito boa em todas as condições soldadas.

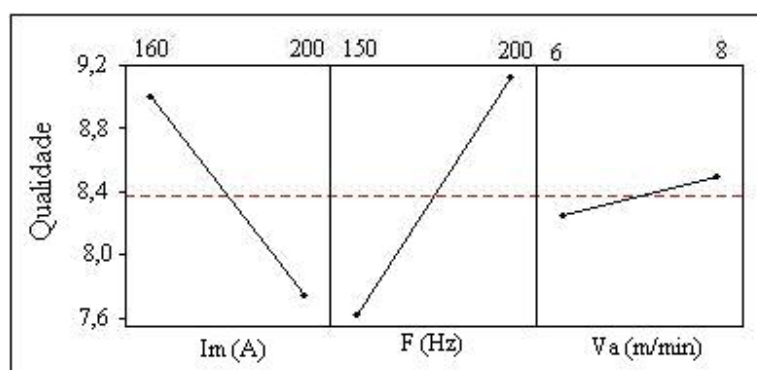


Figura 4.29 – Efeitos principais dos fatores na qualidade visual do cordão

Observando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 4.29**, nota-se que o aumento da corrente média causa a diminuição da qualidade visual do cordão, talvez provocada por uma instabilidade do arco. O aumento da frequência por sua vez provoca uma melhora na qualidade do cordão. Isto se deve ao fato de nesta condição o comprimento do eletrodo diminuir e, portanto, a convexidade do cordão também, resultando em um cordão mais plano e de melhor aspecto.

De importante, ainda, na qualidade, também se destaca a interação significativa da frequência com a velocidade de alimentação (**Figura 4.30**), que mostra que para se maximizar esta resposta deve-se trabalhar com a frequência e a velocidade de alimentação do arame em seus maiores níveis, ou seja, 200 Hz e 8 m/min, respectivamente. Portanto a manutenção da corrente média em seu nível inferior, associada a frequência e a velocidade de alimentação em seus níveis superiores resultará na maximização da qualidade visual do cordão.

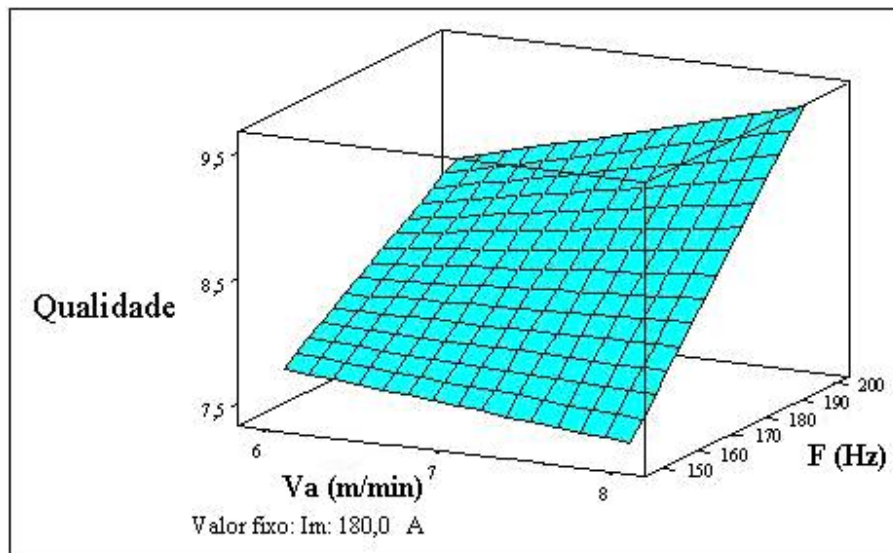


Figura 4.30 – Influência da interação F*Va sobre a qualidade visual do cordão.

4.3.2.3 - Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade

A análise de produtividade do processo com eletrodo tubular é de fundamental importância na viabilidade de utilização deste processo frente a outros. Desta forma a análise da taxa de deposição e rendimento da soldagem permitirá determinar condições de tal forma a torná-lo mais competitivo.

Considerando os efeitos principais dos fatores na taxa de deposição, **Figura 4.31**, nota-se que o aumento da alimentação do arame provoca o aumento da deposição, fato este esperado, pois se sabe que o aumento da velocidade de alimentação provoca o aumento da fusão do arame, devido ao aumento

do comprimento do eletrodo. Logo, apesar de outros fatores, bem como suas interações não se mostrarem significativos dentro da superfície de estudo, os resultados sugerem que a obtenção da maior taxa de deposição possível seja possibilitada pela utilização da corrente média em seu nível inferior e da frequência de pulsação e velocidade de alimentação do arame em seus níveis superiores.

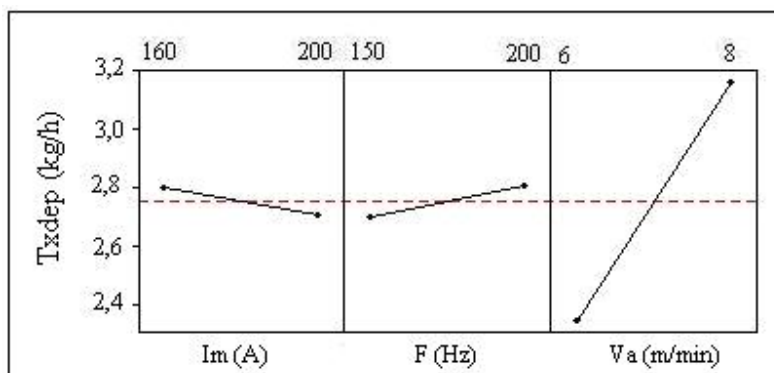


Figura 4.31 – Efeitos principais dos fatores na taxa de deposição.

Obviamente que quando se analisa a produtividade do processo deve-se levar em conta não apenas a deposição do processo, mas também o rendimento de deposição auferido pelo mesmo.

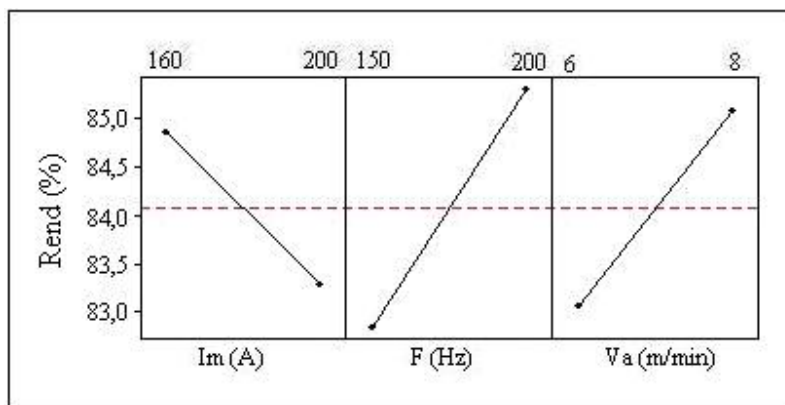


Figura 4.32 – Efeitos principais dos fatores no rendimento de deposição.

Assim sendo, considerando os efeitos principais dos fatores sobre o rendimento (**Figura 4.32**), em relação à frequência e à velocidade de alimentação do arame, observa-se que o aumento desses fatores promove o aumento do rendimento. Apesar de se encontrar na literatura (Alcan, 1992) que para manter a estabilidade do processo é necessário estabelecer uma relação constante entre a Va e a F, notou-se nesses testes que não ocorreram muitos respingos, o que, aliás, é uma característica da soldagem com arames rutilicos. Com o aumento da frequência aumentam-se os ciclos de pulso, e,

portanto, a deposição. O mesmo ocorre com o aumento da alimentação do arame que, por sua vez, aumenta a deposição. Logo, com poucos respingos e com o aumento da deposição é correto que se obtenha um aumento do rendimento. Em relação à corrente média, observa-se na **Figura 4.32**, que o seu aumento promove a redução do rendimento da soldagem.

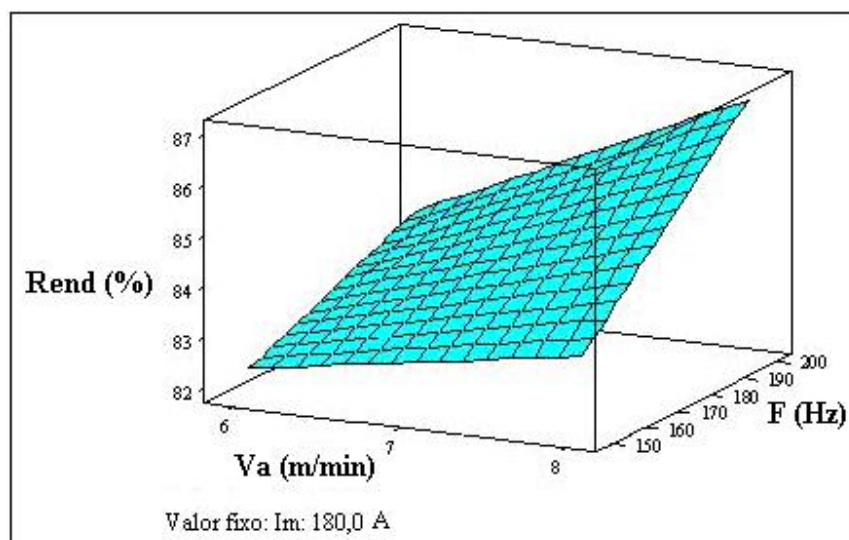


Figura 4.33 – Efeito da interação $F \cdot Va$ sobre o rendimento de deposição.

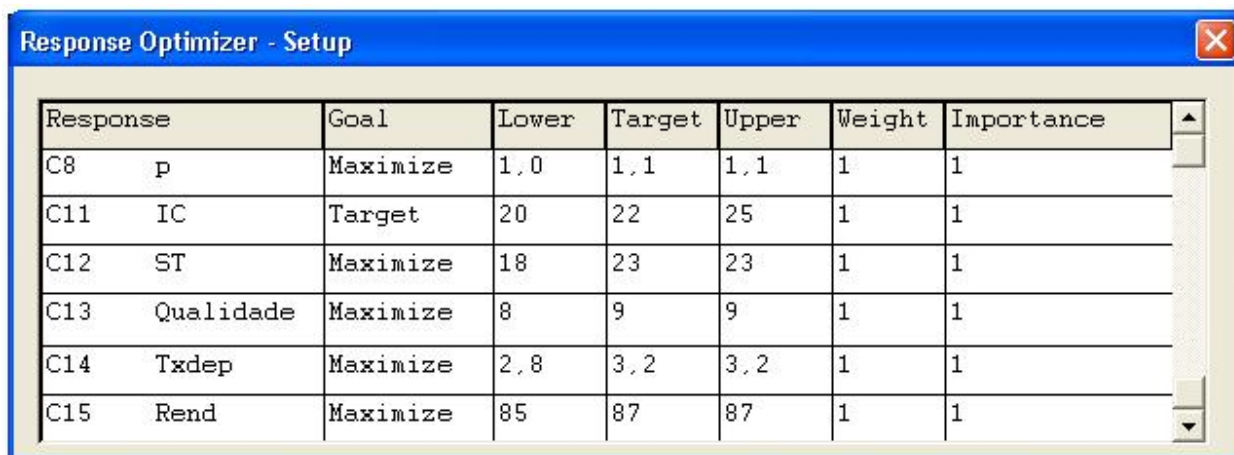
De importante ainda na análise do rendimento, se mostrou a interação significativa da frequência com a velocidade de alimentação do arame. Nota-se na **Figura 4.33**, que para obter o rendimento máximo deve-se utilizar os níveis superiores da frequência e da velocidade de alimentação, isto é, 200 Hz e 8 m/min, respectivamente.

Logo, em função dos resultados e análises sugere-se que a melhor condição de rendimento para o processo com eletrodo tubular, dentro da superfície de estudo, é aquela na qual a corrente média é mantida em seu nível inferior associado à frequência e alimentação do arame em seus níveis superiores, condição esta coincidente com aquela que permite a maximização da taxa de deposição.

4.3.2.4 - Condições Otimizadas

Como se viu anteriormente é possível obter condições otimizadas individualmente. Entretanto, a grande dificuldade consiste em se obter uma condição que permita conciliar todas as respostas de tal forma que um critério único de otimização possa ser obtido. Através do software MINITAB e utilizando a ferramenta “Response Optimizer” procedeu-se a otimização global do processo, cujas condições estabelecidas estão apresentadas na **Figura 4.34**. A **Tabela 4.9** mostra os resultados, que

sugerem a utilização da corrente média em 186,5 A, a frequência em 200 A e a velocidade de alimentação em 8 m/min para produzir um resultado próximo ao previsto.



Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C8 p	Maximize	1,0	1,1	1,1	1	1
C11 IC	Target	20	22	25	1	1
C12 ST	Maximize	18	23	23	1	1
C13 Qualidade	Maximize	8	9	9	1	1
C14 Txdep	Maximize	2,8	3,2	3,2	1	1
C15 Rend	Maximize	85	87	87	1	1

Figura 4.34 – Níveis das respostas pretendidas para o fatorial completo.

Tabela 4.9 - Quadro resumo das respostas obtidas pelo “Response Optimizer”.

Condição Ótima	Resultados Previstos	Desejabilidade
Im = 186,5 A F = 200,0 Hz Va = 8,0 m/min	P = 1,1 mm	1,00
	IC = 22,0 %	1,00
	$S_T = 23,4 \text{ mm}^2$	1,00
	Qualidade = 9,3	1,00
	Txdep = 3,2 kg/h	1,00
	Rend = 86,6	0,79
Coeficiente de desejabilidade global = 0,96		

Com o auxílio do software MINITAB, através da ferramenta “Contour Plot“, é possível encontrar também uma região otimizada, onde certa flexibilidade pode ser obtida na escolha dos valores de dois fatores, conforme pode ser observado na **Figura 4.35**. Nesta figura, a região branca é a região otimizada, dentro da qual deve-se escolher os valores dos fatores variados para um fator fixo. Note que os valores dos fatores mantidos fixos em cada caso são os sugeridos pela condição ótima obtida no “Response Optimizer”. Além disso, os limites das respostas requeridas estão dentro dos limites estabelecidos no “Response Optimizer” para a obtenção da condição ótima.

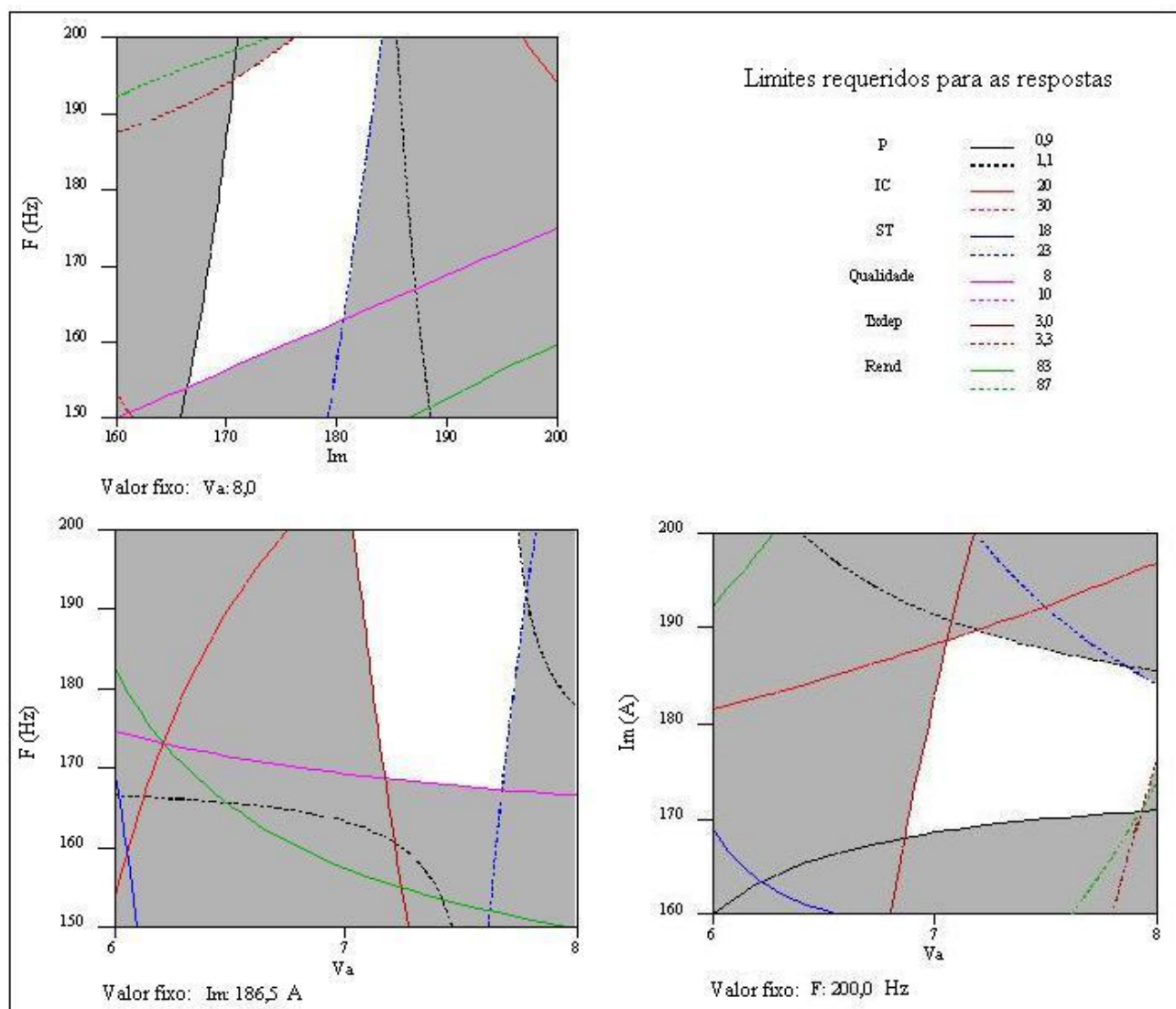


Figura 4.35 – Resultados do “Contour Plot” para o fatorial completo.

4.3.2.5 - Considerações Finais

Comparando os resultados da otimização para o processo Eletrodo Tubular frente aos anteriores obtidos tanto para o processo Eletrodo Tubular, quanto para o processo MAG, nota-se que a penetração obtida pelo processo MAG continua maior do que a obtida pelo processo Eletrodo Tubular. No entanto, com a análise do novo fatorial houve um pequeno aumento desta resposta. Em relação à taxa de deposição, nota-se que, nesta nova condição, esta resposta melhora sensivelmente, sendo inclusive maior do que a resposta obtida pelo MAG. O índice de convexidade também apresenta uma melhora, sendo que na condição anteriormente analisada, ele apresentou um resultado inferior ao

mínimo considerado adequado neste trabalho. As outras respostas continuam adequadas e de acordo com o esperado, conforme verificado anteriormente.

4.4 – Parte 3: Medidas de Dureza e Análise Metalográfica

Esta parte do trabalho tem o objetivo de apenas observar as diferenças de dureza atingida nas várias regiões da solda e também as diferenças entre as microestruturas formadas nas amostras soldadas com os processos MAG e Eletrodo Tubular sob as mesmas condições e nas amostras soldadas com o mesmo processo, mas sob condições diferentes. Portanto, não é foco deste trabalho uma análise profunda das microestruturas formadas, mas apenas lembrar de que as microestruturas e, conseqüentemente, a dureza na zona termicamente afetada (ZTA) são fatores que devem ser considerados na prática, quando se tratar de soldagem de materiais propícios a formação de microestrutura de elevada dureza e baixa tenacidade, como é o caso do aço ABNT 1045, aqui utilizado.

Logo, foram realizados ensaios de dureza Vickers com carga de 5 kg em cordões produzidos com o processo MAG e com o processo Eletrodo Tubular, com dois níveis de aporte térmico (H). Os resultados estão mostrados na **Tabela 4.10** e representam a média de várias medições. O desvio padrão (σ) das medidas também se encontra na **Tabela 4.10**.

Nota-se que não houve variações de dureza nas ZTA's entre os processos ou entre os dois níveis de energia estudados. Apesar de ter-se observado níveis ligeiramente maiores de dureza utilizando o processo Eletrodo Tubular e a energia maior, a análise do desvio padrão (σ) mostra que essas diferenças não são significativas. As durezas do metal depositado (cordão) e do metal base também não apresentaram grandes variações, como já era de se esperar.

Tabela 4.10 – Resultados de dureza da ZTA, cordão e metal base.

Processo	H (J/mm)	Im (A)	F (Hz)	Localização	Dureza (Hv)	σ
MAG	1195	190	125	ZTA	302	27
				cordão	213	15
				Metal base	200	12
	704	160	83	ZTA	282	31
				cordão	210	6
				Metal base	201	4
Eletrodo Tubular	1195	190	125	ZTA	316	50
				cordão	189	7
				Metal base	213	11
	704	160	83	ZTA	292	20
				cordão	210	19
				Metal base	208	15

Os resultados de dureza estão relacionados com as microestruturas formadas, as quais têm uma relação com aporte térmico da solda e com a velocidade de resfriamento da peça soldada.

As **Figuras 4.36 e 4.37** apresentam os perfis de dureza obtidos em diferentes níveis de energia para a soldagem com Eletrodo Tubular e as **Figuras 4.38 e 4.39** para a soldagem com MAG.

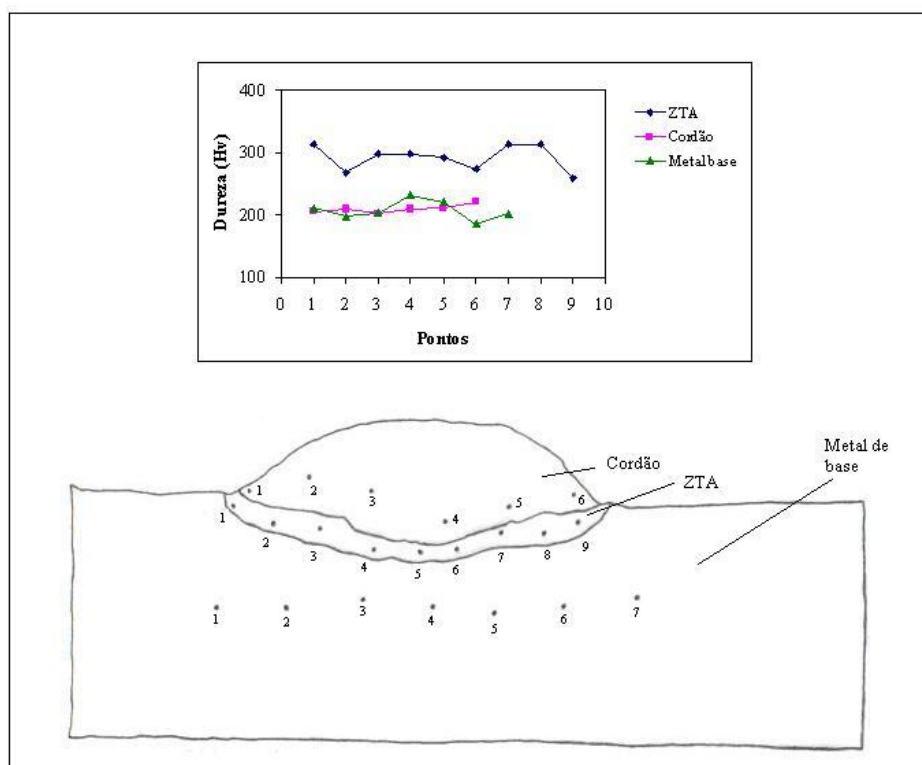


Figura 4.36 – Perfil de dureza da amostra produzida com Eletrodo Tubular, $H = 704 \text{ J/mm}$.

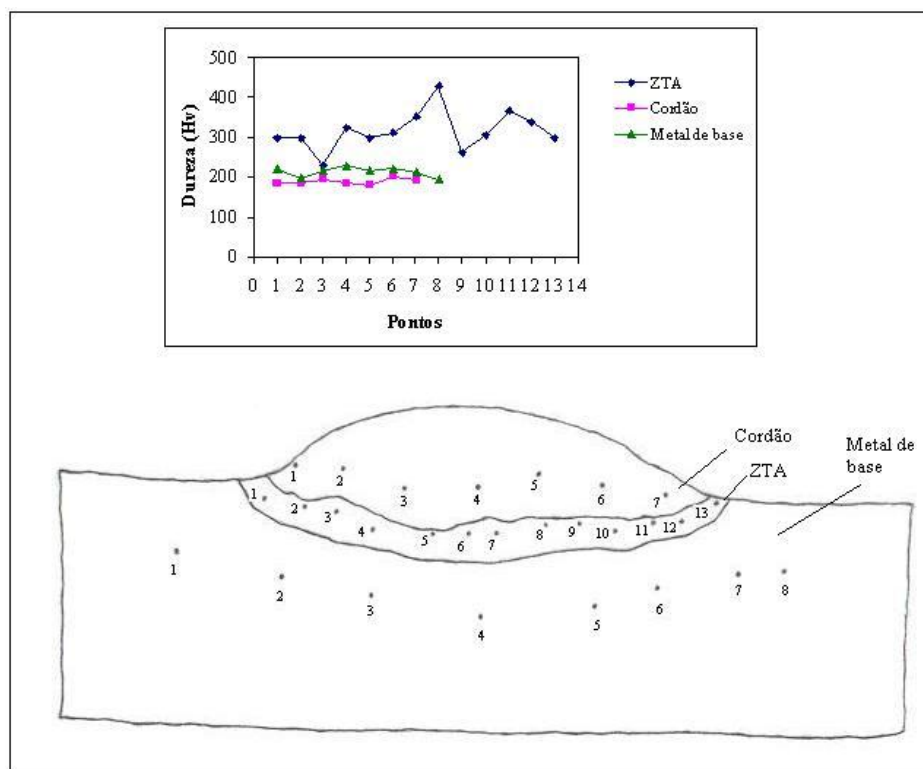


Figura 4.37 – Perfil de dureza da amostra produzida com Eletrodo Tubular, $H = 1195 \text{ J/mm}$.

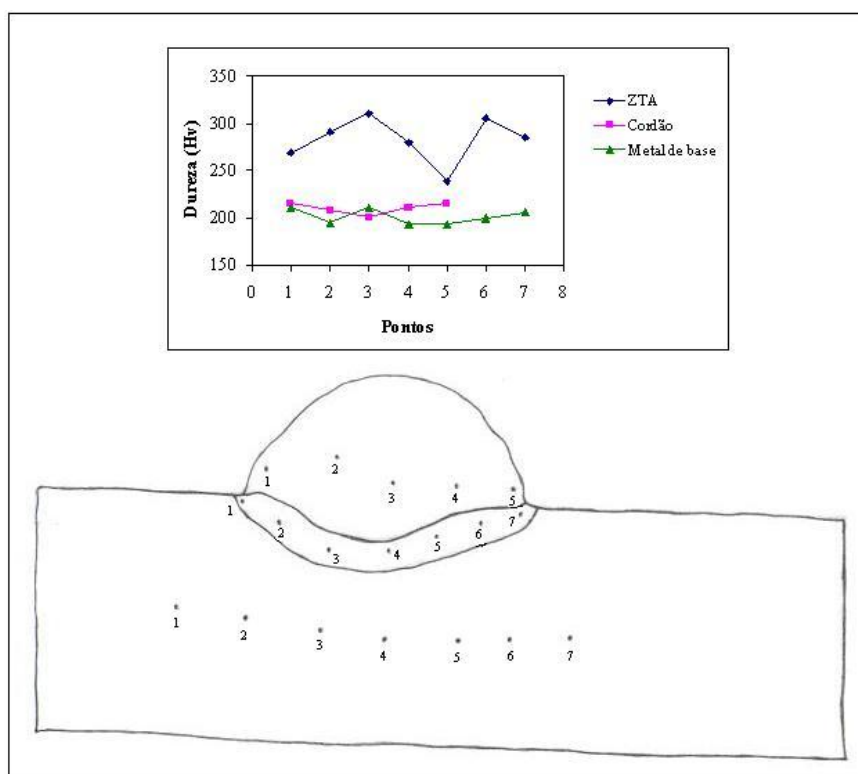


Figura 4.38 – Perfil de dureza da amostra produzida com MAG, $H = 704 \text{ J/mm}$.

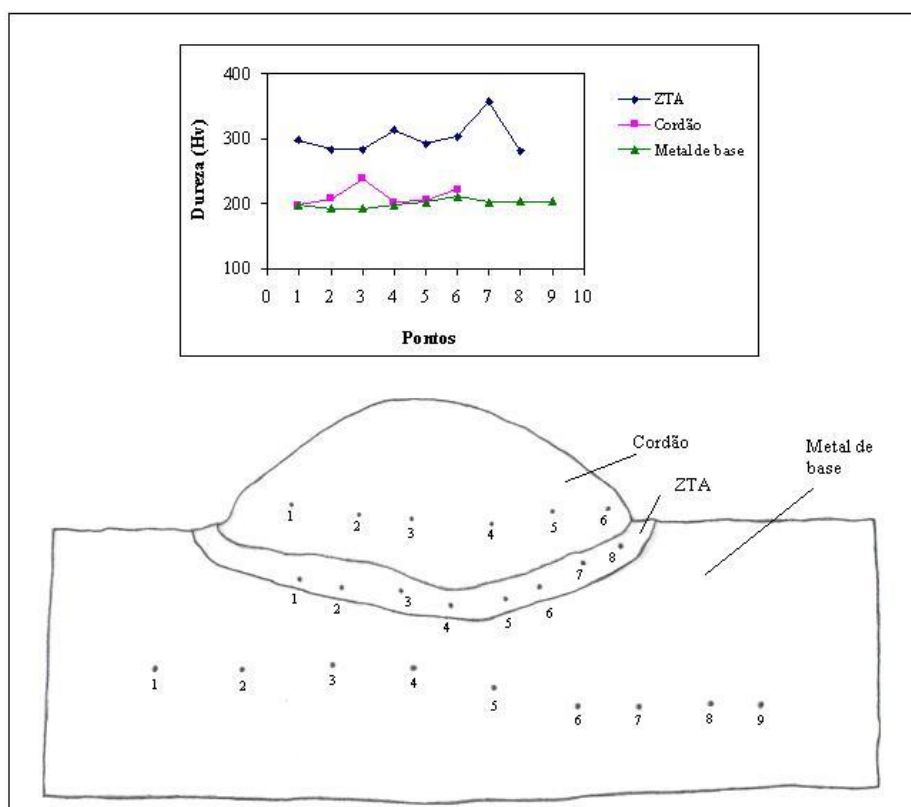


Figura 4.39 – Perfil de dureza da amostra produzida com MAG, $H = 1195 \text{ J/mm}$.

A **Figura 4.40** apresenta as microestruturas do cordão de solda produzido com o processo Eletrodo Tubular utilizando a condição de energia de 704 J/mm . Esta figura mostra todas as regiões do cordão, sendo possível perceber as diferenças entre elas. Nota-se na parte superior da figura a estrutura bruta de solidificação do metal de adição, caracterizado por uma estrutura colunar. Abaixo desta, encontra-se a linha de fusão, abaixo da qual inicia-se a zona termicamente afetada (ZTA). Nota-se que esta região pode ser dividida em duas: a primeira trata-se da região mais próxima à linha de fusão, que é mais afetada pela energia de soldagem e se caracteriza por apresentar grandes mudanças metalúrgicas. Abaixo desta, encontra-se uma região não muito afetada pelo calor por se localizar a uma maior distância da linha de fusão. A última região, na parte inferior da figura, mostra o metal de base, que não foi afetado pelo calor e, portanto, não apresenta estrutura refinada.

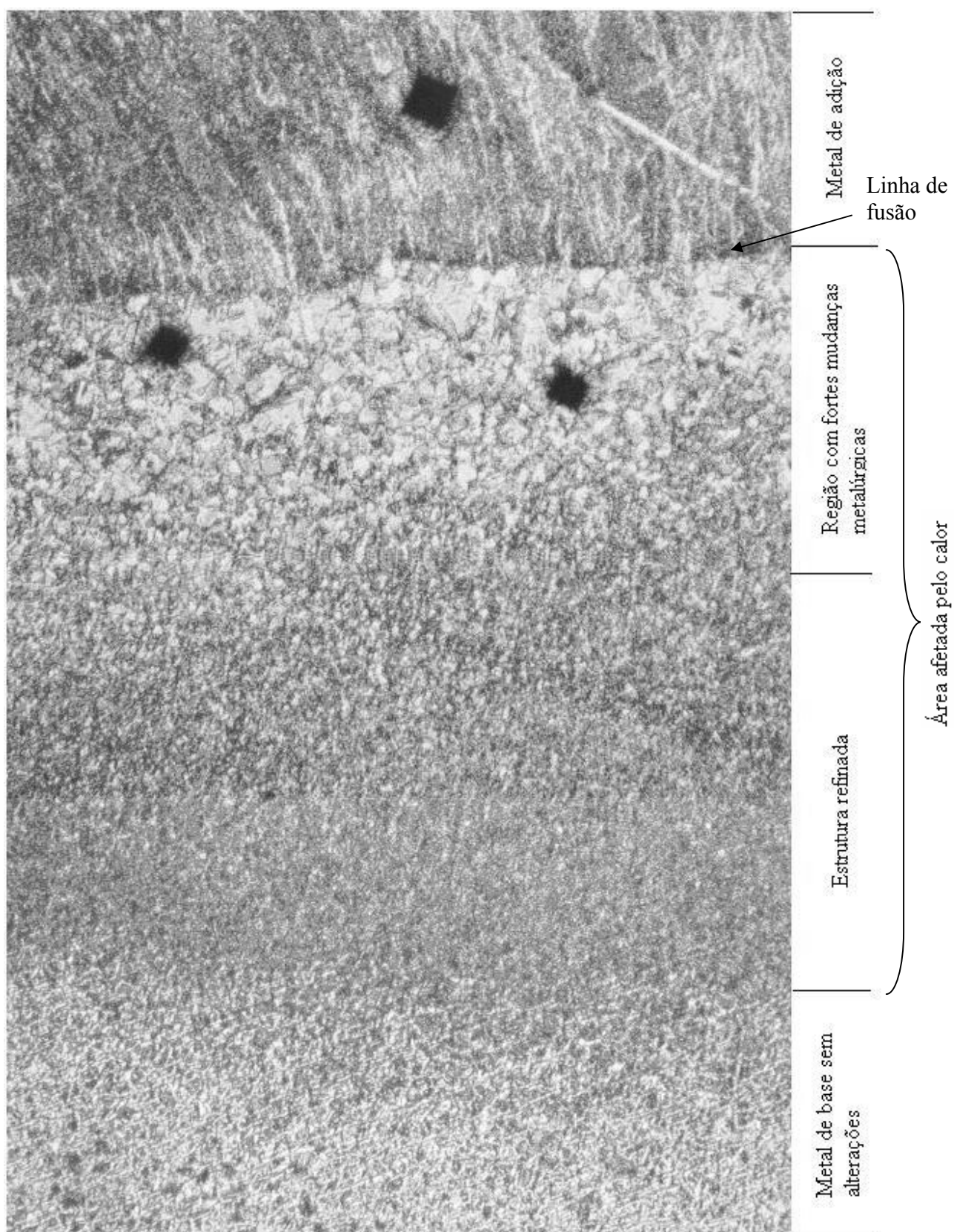


Figura 4.40 – Regiões micrográficas de uma amostra soldada, aumento: 50X.

A **Figura 4.41** apresenta as microestruturas formadas na ZTA da amostra soldada sob a condição de menor energia com o processo MAG, onde se observa a presença de uma grande quantidade de martensita, envolta da qual se esboçam contornos formados de troostita/bainita (perlita muito fina), caracterizados pelas regiões escuras, indicando possibilidades de alívio de tensões para deformações plásticas. A **Figura 4.42** apresenta uma ampliação da martensita observada na **Figura 4.41**, onde é possível observar mais claramente os planos octaedrais característicos desta estrutura.

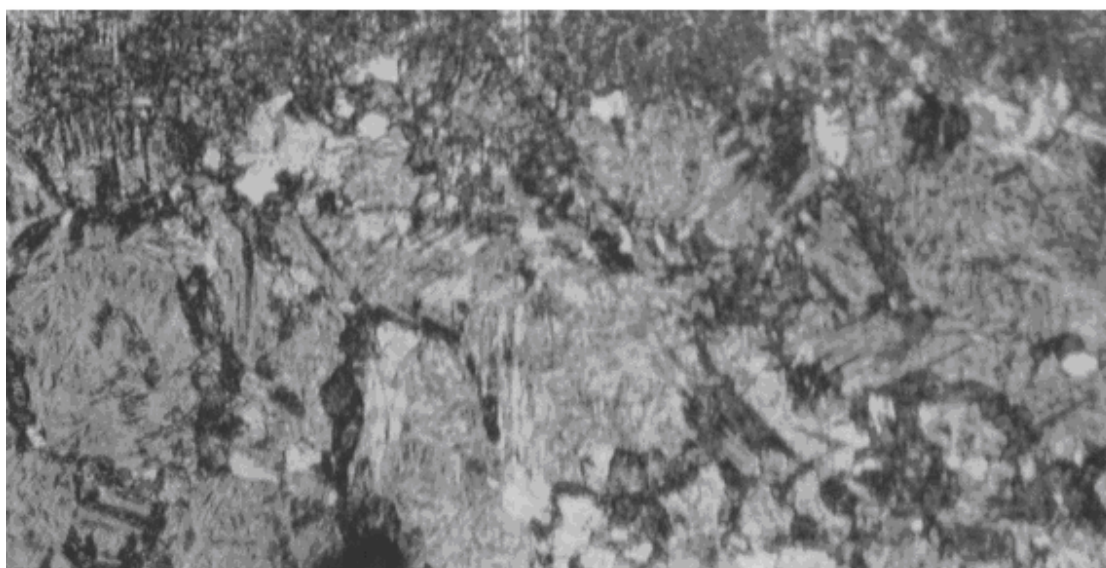


Figura 4.41 – Microestruturas da ZTA - processo MAG, $H = 704 \text{ J/mm}$, aumento: 200X.

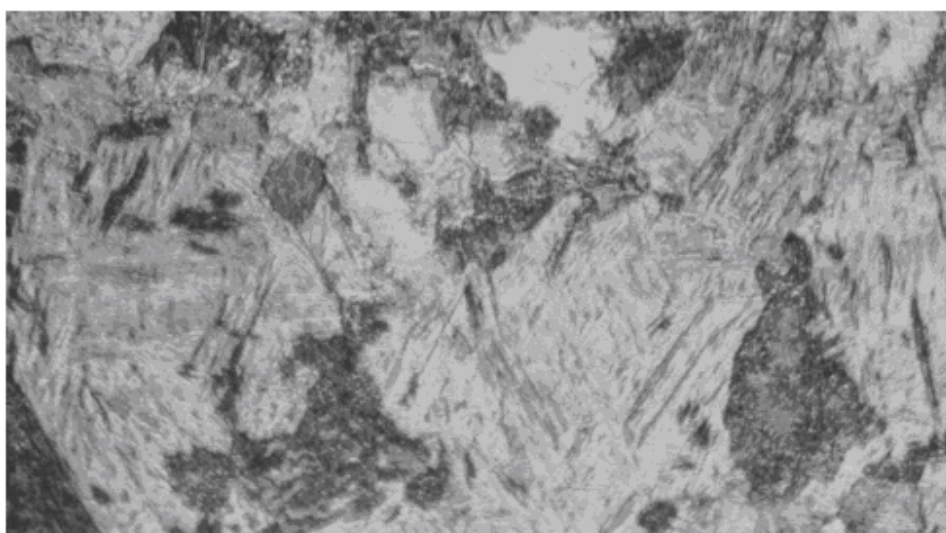


Figura 4.42 – Detalhes da Martensita – processo MAG, $H = 704 \text{ J/mm}$, aumento 500X.

A **Figura 4.43** apresenta as microestruturas formadas na ZTA da amostra soldada na condição de menor energia utilizando o processo Eletrodo Tubular. Nela observa-se uma grande quantidade de ferrita com grãos bastante grandes e a presença predominante de martensita, além de perlita fina com locais onde se encontra bainita acicular, cujos detalhes podem ser melhor observados na **Figura 4.44**.

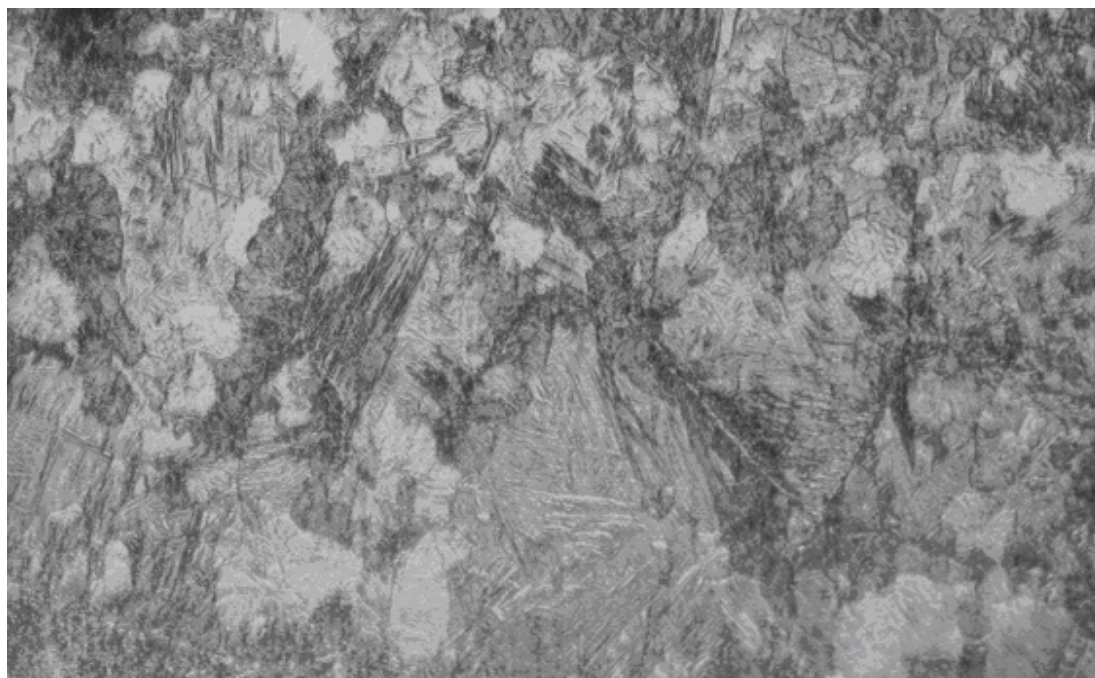


Figura 4.43 – Microestruturas da ZTA – processo Eletrodo Tubular, $H = 704 \text{ J/mm}$, aumento: 200X.

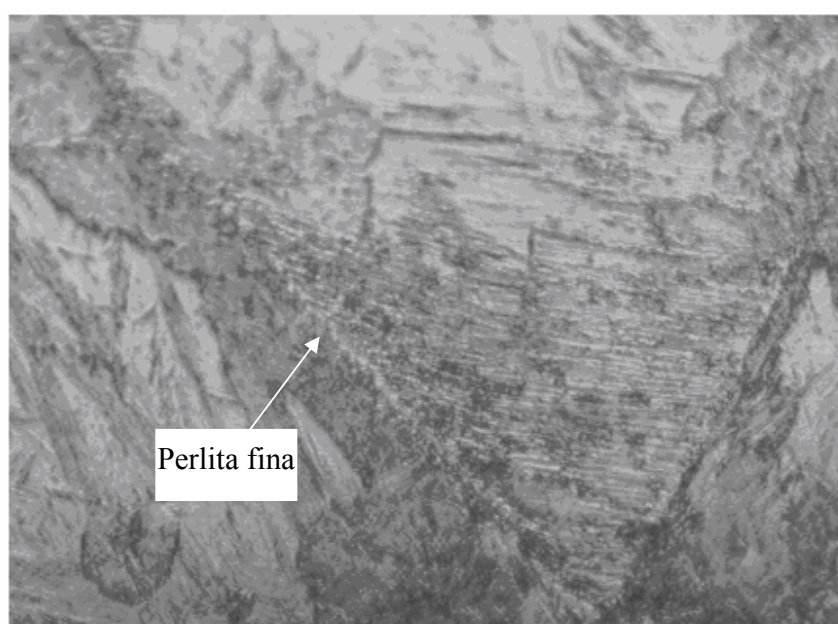


Figura 4.44 – Detalhes da perlita fina – processo Eletrodo Tubular, $H = 704 \text{ J/mm}$, aumento: 500X.

Na **Figura 4.45**, apresenta-se uma comparação entre as amostras soldadas com Eletrodo Tubular sob as duas condições de energia estudadas. Nota-se nesta figura que a espessura da camada afetada termicamente da amostra soldada sob menor energia é menor que a espessura da camada afetada pelo calor no corpo de prova produzido sob maior energia.

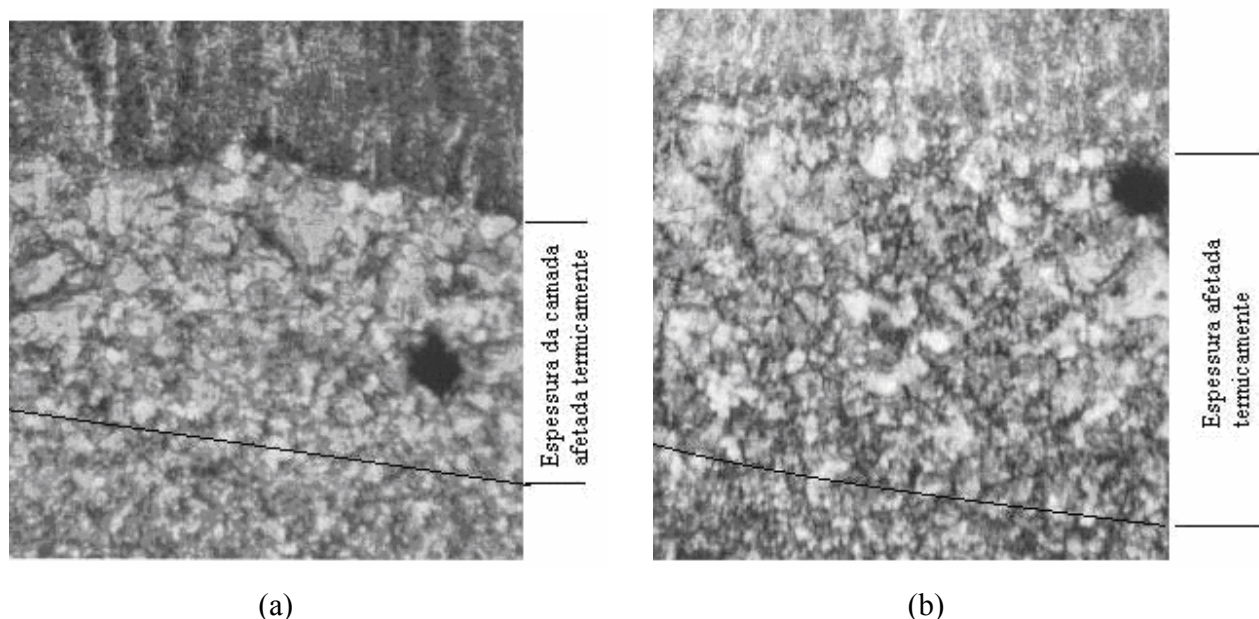


Figura 4.45 – Micrografia do cordão feito com processo Eletrodo Tubular com (a) $H = 704 \text{ J/mm}$ (b) $H = 1195 \text{ J/mm}$, aumento: 50X

Apesar da grande quantidade de martensita, a dureza da ZTA das estruturas é diminuída pela presença de microestruturas mais dúcteis, tais como a ferrita e perlita, em ambos os processos. No processo MAG, conforme já comentado, observou-se a formação de redes de troostita/bainita, começando a envolver a martensita.

A **Figura 4.46** apresenta as microestruturas formadas em amostra soldada na condição de maior aporte térmico utilizando o processo MAG. Observa-se, nesta figura, que além de martensita e poucos grãos de ferrita, a ZTA apresenta perlita fina num início de envolvimento da martensita, o que, aliás, já foi observado anteriormente em solda produzida com o processo MAG. Na ZTA do cordão processado com maior energia nota-se a presença de ferrita em maior quantidade e com granulometria maior que na ZTA do cordão produzido com menor energia (**Figura 4.41**). Além disso, nota-se a formação de uma martensita mais grosseira devido a alta temperatura atingida (**Figura 4.47**).

Na **Figura 4.48** encontram-se as microestruturas formadas na ZTA de uma amostra soldada sob maior nível de energia utilizando o processo Eletrodo Tubular. Nela nota-se a presença das microestruturas martensita, perlita fina e ferrita. Comparativamente à amostra feita com menor nível de

energia (**Figura 4.43**), nota-se que a ferrita formada na estrutura do cordão apresenta tamanho de grão, notadamente, maior devido as altas temperaturas atingidas.

Com todas essas análises foi possível perceber que as estruturas formadas nos corpos de prova dos dois processos estudados foram diferentes. O processo MAG permitiu que se formasse, além de martensita, redes de perlita muito finas (troostita e bainita), que possibilitaram a diminuição da dureza na ZTA, condição esta que seria muito maior sem a formação dessas estruturas devido a grande quantidade de martensita. No processo Eletrodo Tubular, observou-se, além da martensita, a formação de ferrita em grande quantidade e em grãos bastante grandes.

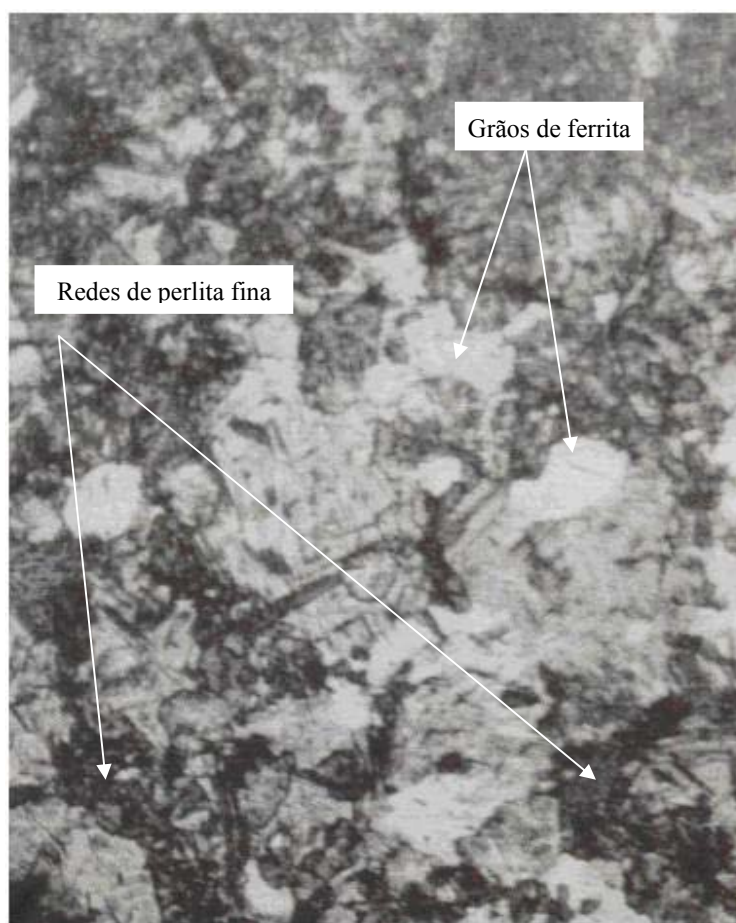


Figura 4.46 – Microestruturas da ZTA – processo MAG, $H = 1195 \text{ J/mm}$, aumento: 200X.

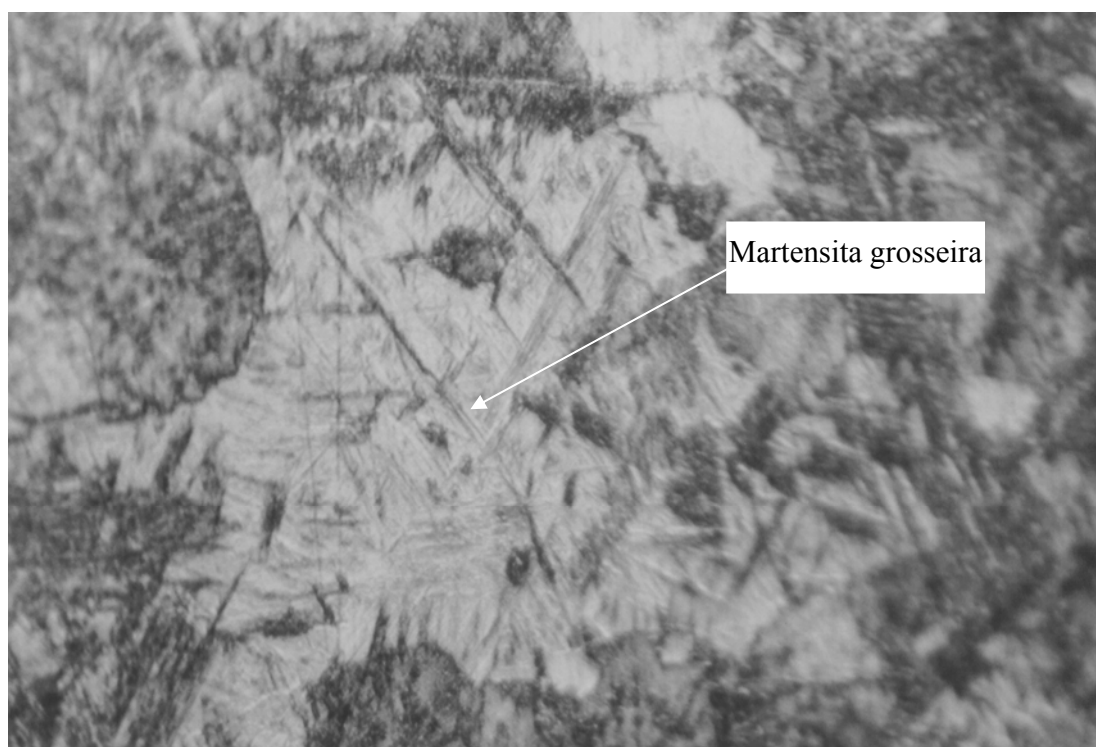


Figura 4.47 – Detalhes da martensita grosseira – processo MAG, $H = 1195 \text{ J/mm}$, aumento: 500X.

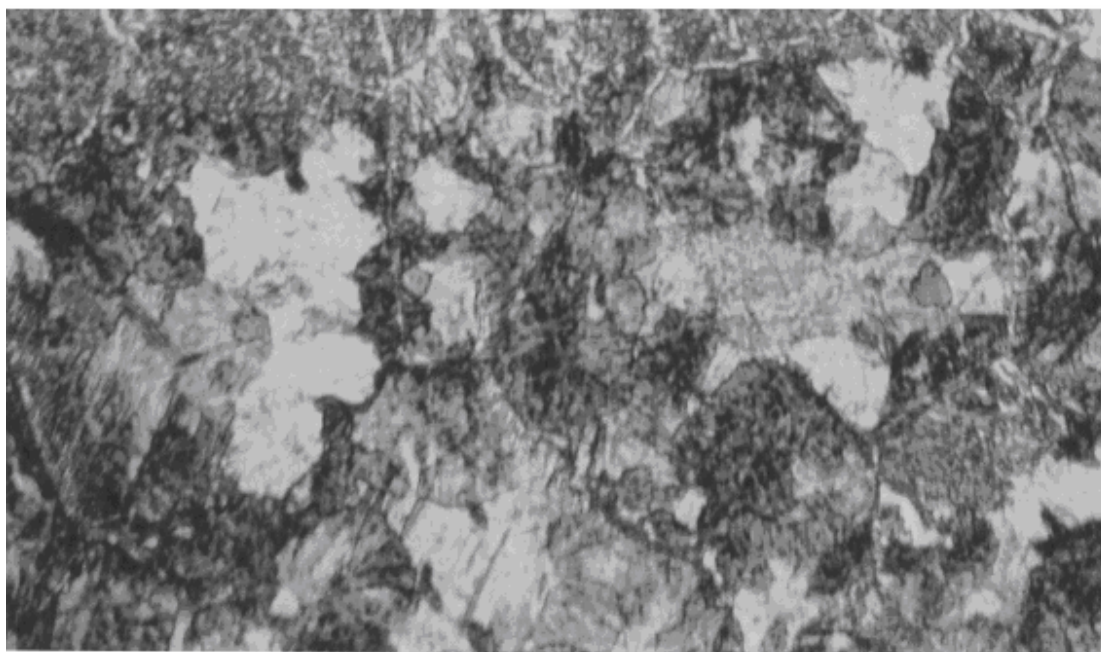


Figura 4.48 – Microestruturas da ZTA – processo Eletrodo Tubular, $H = 1195 \text{ J/mm}$, aumento: 200X.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões

Para as condições de soldagem e parâmetros de pulso utilizados na primeira parte deste trabalho observou-se um maior potencial do processo MAG em relação ao processo Eletrodo Tubular. No entanto, verificou-se que as condições utilizadas não foram adequadas ao processo Eletrodo Tubular, que por apresentar características de fusão diferentes do processo MAG, devido a presença do fluxo, necessita de maior energia e maior velocidade de alimentação do arame para proporcionar resultados equivalentes e melhores que o processo MAG.

Para as condições de soldagem e parâmetros de pulso definidos para o planejamento fatorial completo estudado na segunda parte do trabalho, verificou-se que:

- a penetração foi influenciada pela corrente média, pela interação da corrente média com a velocidade de alimentação do arame, pela frequência de pulso e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação do arame;

- a convexidade do cordão foi influenciada pela corrente média, pela velocidade de alimentação, pela interação da corrente média com a frequência e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação;

- a área total foi influenciada pela corrente média, pela velocidade de alimentação e pela interação da corrente média com a velocidade de alimentação;

- a Qualidade foi influenciada pela corrente média, pela frequência e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação;

- a taxa de deposição foi influenciada somente pela velocidade de alimentação do arame;

- o rendimento foi influenciado pela frequência, pela velocidade de alimentação e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação;

- o aumento da corrente média provocou o aumento da penetração e da área total, e a redução do índice de convexidade, da qualidade visual do cordão e do rendimento;

- o aumento da frequência de pulso provocou a redução da penetração e do índice de convexidade, e o aumento da qualidade visual do cordão e do rendimento;

- o aumento da velocidade de alimentação do arame provocou o aumento do índice de convexidade, da área total, da taxa de deposição e do rendimento.

Através das análises realizadas na terceira parte deste trabalho, que se refere à análise de dureza e das micrografias verificou-se que as estruturas formadas nos corpos de prova dos dois processos estudados foram bastante diferentes. No processo MAG, observou-se, além da martensita, a formação de redes de perlita muito finas (troostita e bainita), que possibilitaram a diminuição da dureza na ZTA. No processo Eletrodo Tubular, foi observado, na ZTA, a formação de martensita e de ferrita em grande quantidade e em grãos bastante grandes.

5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Ao trabalhar com Eletrodo Tubular no modo pulsado sugere-se:

- manter a tensão constante fixando o comprimento do arco;
- variar continuamente a frequência e a velocidade de alimentação do arame, de modo a manter fixo o volume da gota, mantendo uma maior estabilidade do processo;
- estudar a influência dos parâmetros de pulso na resistência mecânica da solda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL S/A (1992)**, *MIG Pulsado. Manual de Soldagem*, São Paulo, Alcan Alumínio do Brasil S/A, pp 11-14.
- ALLUM, C. J. (1985)**, “Control of Fusion Characteristics in Pulse Current MIG Welding. Part II”, *Metal Construction*, v 5, n 17, pp 308R-314R.
- ALLUM, C. J., QUINTINO, L. (1985)**, “Control of Fusion Characteristics in Pulse Current MIG Welding – Part I”, *Metal Construction*, v 4, n 17, pp 242R-245R.
- AMERICAN WELDING SOCIETY (1979)** – *Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding – AWS A 5.20-79*.
- AMERICAN WELDING SOCIETY (1980)** – *Specification for Low Alloy steel Electrodes for Flux Cored Arc. Welding – AWS A 5.29-80*.
- AMERICAN WELDING SOCIETY (1963)**, *Welding Handbook, fundamentals of Welding*, Arthur L. Phillips 5 ed., London, 364p.
- AMIN, M. (1983)**, “Pulse Current Parameters for Arc Stability Controlled Metal Transfer In Arc Welding”, *Metal Construction*, v 5, n 6, pp 272-8.
- ARAÚJO, W. R. (2004)**, *Comparação entre Soldagem Ruborizada com Arame Sólido e “Metal Cores”- A Ocorrência do “Finger”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 79p.
- ARAÚJO, W. R. ET AL (2001)**, “Arames Tubulares Tipo “Metal Cored”- Soldagem Robotizada”, *Anais do XXVII Congresso Nacional de Soldagem*, Campinas.
- ATKINS, G. ET AL.** “Welding Process Effects in Weldability Testing of Steel”. *Welding Journal*, v 81, n 3, pp 61s-68s.

- BAUNÉ, E. ET AL. (2000)** “Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable – Part 1: Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as a Basicity Indicator”. *Welding Journal*, v 79, n3, pp 57s-65s.
- BLACKMAN. S., NORRISH. J. (1988)**, “Pulsed MIG welding with Gas-Shielded Flux Cored Wires”, *MIG Synergic Update, Welding & Metal Fabrication, Special Supplement*, v 76, n 4, pp 12-14.
- BOSWORTH, M. R. (1991)**, “Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding With Solid Wire Electrodes”, *Welding Journal*, v 70, n 5, pp 111s-117s.
- BRACARENSE. A.Q. (2000)**, *Processo de Soldagem por Arame Tubular - FCAW*, apostila do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte – MG.
- BRAGA, E. M., MOTA, C. A. M., FARIAS, J. P. (1998)**. ”Uma Contribuição ao Estudo da Soldagem a Arame Tubular Autoprottegido em Corrente Pulsada”. *Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino-Americano e Ibero-Americano de Soldagem, Fortaleza*, v 1, ref 187, pp 645-655.
- DANTAS, M. S. (2002)**, *Análise dos Parâmetros de Pulso em Soldagem MIG/MAG na Geometria e Índices de Respingos de um Cordão de Solda*, Trabalho de Diploma, Universidade federal de Itajubá, 10p.
- FERREE, S. E. (1995)**, “New Generation of Cored Wires Creates Less Fume and Spatter”, *Welding Journal*, v 74, n 12, pp. 45-49.
- FERREE, S. E. (1996)**, “New Generation of Low Fuming Gas Shielded Flux Cored and Metal Cored Wires”, *A Welding Review Published by the Esab Group*, v 87, pp. 44-54.
- FRENCH, I. E., BOSWORTH, M. R. (1995)** ”A Comparasion of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires”, *Welding Journal*, v 74, n 6, pp 197s-205s.

- FRENCH, I. E., BOSWORTH, M. R. (1997)**, “Special Basic Flux Cored Wire for All-Position Pulsed Welding”, *Welding Journal*, v 76, n 3, pp 120s-124s.
- HUISMAN, M. D. (1996)**, “Flux and Metal-cored Wires, a Productive Alternative to Stick Eletrodes and Solid Wires”, *A Welding Review Published by the Esab Group*, v 75, n 5, pp 6-14.
- LEE, H.W. ET AL. (2001)**, “Fatigue Strength Depending on Position of Transverse Cracks in FCAW Process”, *Welding Journal*, v 80, n 6, pp 110s-114s.
- MACHADO, L. G. (1995)**, “A Economia da Soldagem”, *Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*, Caxias do Sul, v 2, pp 999-1013.
- MACHADO, L. G. (1997)**, “*Soldagem e técnicas conexas*”. Livro editado pelo autor.
- MEDEIROS, R.C., QUINTINO, L. E OLIVEIRA SANTOS, J. F. (1989)**, “Estudo da Aptidão dos Arames Tubulares à Soldagem MIG com Transferência Controlada”, *Soldagem & Materiais*, v 66, n 5, pp. 44 – 49.
- MELTON, G. B. ET AL. (1992)**. ”Pulsed Welding with Basic flux Cored Wires”, *Welding Journal*, v 75 , n 3, pp 110s-114s.
- MIRANDA, H. C. (1999)**, *Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobrecabeça*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 169p.
- MOTA, C. A. M. (1998)**, *Níquel e Manganês como Controladores da Tenacidade na Soldagem com Arames Tubulares Autoprotégidos*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 182p.
- NASCIMENTO, A. S. ET. AL. (2003)**, “Procedimento Experimental para seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com Arame tubular em Corrente Pulsada”, *Anais do COBEF*, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, ref 175, pp 855-865.

- OLIVEIRA SANTOS, J.F., ALLUM, C. J. (1986)**, “Fusion Characteristics of pulse MIG deposits on 304 Stainless Steel Plate”, *Metal Construction*, v 54, n 18, pp 460-469.
- POEPCKE, J. S. (1997)**, *Processo com Arame Tubular*, In: Ziedas, S., Tatini, I., Coleção Tecnológica SENAI: Soldagem, São Paulo, SENAI, 300p.
- SAITO, M. S. (2001)**, *Análise da Influência dos Parâmetros de Pulso Sobre a Geometria do Cordão de Solda e Rendimento de Deposição, Obtidos Pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular Utilizando Arco Pulsado*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da UNESP, 146p.
- SALES ET. AL. (2001)**, “Estudo da Geometria do Cordão de Solda Usando CO₂ e Mistura de Ar e CO₂ na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1”, *Anais do COBEM*, Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Minas Gerais, V 4, ref 172, pp 543-551.
- SCOTTI. A., SILVA. A. D. (1986)**, “Processo Eletrodo Tubular, O estado da Arte – Parte 1 (Uma Revisão Bibliográfica)”, *Associação Brasileira de Soldagem, ABS, Trabalho Técnico*, v 45, pp 1-13.
- SILVA, C.R. ET. AL. (2000)**, “A quality and cost approach for welding process selection”, *Journal of the Braz. Soc. Mechanical Sciences*, v XXII, n 3, pp. 389-398.
- STARLING ET AL. (2003)**, “Avaliação da Velocidade de Fusão de Arames Tubulares”, *Anais do XXIX CONSOLDA*, Congresso Nacional de Soldagem, São Paulo, v 1, ref 198, pp 751-757.
- STRIDH, L. E. (2000)**, “Newly-developed Consumable Makes Thin-plate Welding More Effective”, *Svetsaren*, vol. 55, n. 3, p. 14-16.
- SUBRAMANIAM, S. ET. AL. (1998)**, “Droplet transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum”, *Welding Journal*, v 77, n7, pp 458-464.
- SURIAN, E. S., RISSONE, N. M. R. (1998)** “Efeito Del Gas de Proteccion y Del Procedimiento de Soldadura Sobre Lãs Características Del Metal Depositado Por Alambre Tubular Tipo

AISI/WELDING HANDBOOK A5.20-95 E71T-1”, *DEYTEMA. Fac. Reg. San Nicolas. Buenos Aires. Argentina.*

WANG (1995), “Flux Arc Welding: Arc Signals, processing and Metal Transfer Characteristics”, *Welding Journal*, v 82, n3, pp 369s-377s.

APÊNDICE A

DADOS COLETADOS NO LABORATÓRIO

A **Tabela 1** e a **Tabela 2** apresentam os valores de penetração (P), largura (b), reforço (r), área de penetração (Sp), área de reforço (Sr) e qualidade superficial dos cordões (Qualidade) medidos nos corpos de prova produzidos com MAG e Eletrodo Tubular, respectivamente. Esses valores foram medidos após os corpos de prova serem processados depois da realização das soldas, conforme procedimento descrito no Capítulo 3.

Tabela 1 - Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos com MAG.

Teste	P	b	r	Sp	Sr
----	mm	mm	mm	mm ²	mm ²
1	1,5	9,4	2,5	7,5	14,4
2	1,7	10,9	2,7	10,7	18,3
3	2,2	7,4	3,2	8,6	16,5
4	0,9	9,1	2,4	4,5	13,3
5	2,6	9,9	2,6	12,4	16,7
6	1,2	9,0	2,2	7,3	13,6
7	1,2	8,8	1,9	9,3	10,4
8	1,1	11,1	2,6	7,7	17,0
9	1,9	9,3	2,6	10,0	14,8
10	2,0	10,6	2,7	11,3	19,0
11	2,1	9,1	3,1	10,3	16,8
12	0,6	11,3	1,5	4,5	9,6
13	2,0	10,0	2,8	10,0	18,3
14	1,3	10,3	2,4	5,7	16,2
15	0,9	11,4	2,1	7,1	13,4
16	0,9	12,4	2,7	7,6	19,5

Tabela 2 - Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos com Eletrodo Tubular.

Teste	P	b	r	Sp	Sr	Qualidade
----	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	-
1	0,6	8,6	1,9	3,4	11,1	9,0
2	1,3	9,5	1,8	7,2	12,2	9,0
3	1,0	11,0	2,0	6,0	16,1	9,7
4	0,7	9,6	1,6	5,4	9,3	5,5
5	0,9	18,0	1,9	4,8	15,1	8,5
6	1,0	8,4	2,0	6,6	11,9	6,0
7	0,9	10,0	2,1	6,4	13,6	3,9
8	0,6	11,2	2,0	4,8	12,0	6,5
9	0,6	8,7	1,8	3,0	9,5	8,0
10	0,7	10,4	2,1	5,6	15,8	9,4
11	0,9	11,1	1,7	6,9	14,3	9,0
12	0,7	8,8	1,8	4,3	12,2	7,5
13	1,1	10,4	1,8	6,9	14,0	9,0
14	0,4	7,6	1,9	2,0	9,4	5,0
15	0,8	9,6	1,9	5,5	10,4	5,7
16	0,8	12,8	1,7	8,1	13,4	7,3
17	0,6	9,0	1,9	4,6	10,5	8,0
18	0,7	9,7	1,8	6,4	14,1	7,0
19	1,0	10,6	1,9	7,5	14,5	9,0
20	0,5	9,3	1,6	3,0	9,5	5,0
21	0,8	10,1	1,8	5,6	14,6	9,0
22	0,7	10,0	1,8	5,2	12,3	5,0
23	0,8	8,8	1,6	4,0	9,6	4,0
24	1,2	10,8	1,7	9,5	13,1	6,0

A **Tabela 3** e a **Tabela 4** mostram os dados coletados para os corpos de prova antes e após a soldagem, com ambos os processos MAG e Eletrodo Tubular.

Os símbolos m_{ci} e m_{cf} referem-se às massas inicial e final, respectivamente, dos corpos de prova, medidas antes e após a realização das soldas, através de uma balança de precisão. A variável L_{el} refere-se ao comprimento do arame, medido através de um tacômetro digital acoplado na fonte de soldagem; e a variável t indica o tempo de soldagem medido com um cronômetro digital.

Através da diferença das médias das massas finais e iniciais, obteve-se a massa medida nos corpos de prova, a qual foi utilizada no cálculo da taxa de deposição. Com o comprimento do eletrodo utilizado na confecção do corpo de prova, L_{el} , e com a densidade do arame, $d = 6,47 \text{ g/cm}^3$

, calculou-se o rendimento do processo. As equações utilizadas no cálculo desses índices encontram-se no **Capítulo 3**.

Tabela 3 – Grandezas medidas antes e após os ensaios com o processo MAG.

OP	m_{ci}	m_{cf}	L_{elI}	t
----	g	g	cm	s
1	488,7	497,2	110,0	13,2
2	524,1	533,3	108,0	10,8
3	518,5	530,1	135,0	13,5
4	485,6	496,4	142,0	17,0
5	487,0	501,3	182,0	18,2
6	489,8	499,6	127,0	15,2
7	488,3	499,0	142,0	17,0
8	475,0	485,7	163,0	16,3
9	520,0	531,2	138,0	16,6
10	523,2	537,7	173,0	17,3
11	510,8	526,7	193,0	19,3
12	491,6	502,0	142,0	17,0
13	476,3	494,0	223,0	22,3
14	481,4	493,6	152,0	18,2
15	479,6	492,2	157,0	18,8
16	493,6	506,2	168,0	16,8

Tabela 4 – Grandezas medidas antes e após os ensaios com o processo Eletrodo Tubular.

OP	m_{ci}	m_{cf}	L_{el}	t
----	g	g	cm	s
1	307,5	314,8	115,0	13,0
2	318,7	326,5	123,0	11,0
3	331,5	339,0	119,0	11,0
4	317,1	322,2	89,0	10,0
5	310,3	317,3	119,0	11,0
6	337,7	344,0	103,0	11,0
7	330,1	336,2	102,0	11,0
8	279,2	286,0	113,0	10,0
9	316,2	323,0	108,0	12,0
10	322,0	329,8	126,0	12,0
11	318,5	326,7	129,0	12,0
12	376,4	383,1	115,0	13,0
13	327,6	335,3	123,0	11,0
14	316,9	322,6	97,0	10,0
15	321,1	327,8	113,0	13,0
16	312,5	319,2	117,0	11,0
17	292,6	298,6	97,0	12,0
18	312,6	321,0	131,0	13,0
19	293,9	302,0	124,0	13,0
20	271,2	276,5	98,0	11,0
21	273,8	281,0	127,0	12,0
22	292,2	298,7	113,0	13,0
23	302,8	308,3	105,0	12,0
24	299,1	306,5	131,0	12,0

Na **Tabela 5** e na **Tabela 7** encontram-se os valores de penetração (P), largura (b), reforço (r), área de penetração (Sp), área de reforço (Sr) e qualidade superficial dos cordões (Qualidade) medidos nos corpos de prova referentes aos testes preliminares para o fatorial completo e nos corpos de prova do fatorial completo, respectivamente.

A **Tabela 6** e a **Tabela 8** mostram as grandezas medidas, antes e após, os testes preliminares para o fatorial completo e os valores medidos, antes e após, os testes do fatorial completo, respectivamente.

Tabela 5 - Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos nos testes preliminares para o fatorial completo.

Testes	P	r	b	Sp	Sr	Qualidade
-	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	-
1	0,9	2,1	10,0	6,4	13,6	4
2	1,1	2,0	11,0	7,9	15,5	7
3	1,2	2,0	11,3	5,8	18,4	9
4	0,5	2,0	8,9	1,3	8,6	6
5	1,1	2,0	11,0	5,7	16,3	9
6	1,0	3,6	9,1	6,0	16,1	10
7	1,0	1,8	9,5	5,6	11,0	6
8	1,0	2,0	9,0	2,3	13,8	10
9	0,5	3,0	7,0	2,4	16,8	8
10	1,2	2,9	12,2	7,5	24,0	10
11	1,2	2,2	10,5	7,6	14,9	10
12	1,0	2,4	8,7	5,9	14,0	10
13	0,7	2,6	8,8	3,8	17,0	10
14	1,3	2,6	10,3	7,2	19,0	10

Tabela 6 – Grandezas medidas antes e após os testes preliminares para o fatorial completo.

OP	m _{ci}	m _{cf}	L _{el}	t
----	g	g	cm	s
1	330,1	336,2	102,0	11,0
2	234,1	239,5	91,0	9,0
3	288,1	296,4	131,0	12,0
4	296,0	301,2	101,0	11,0
5	331,5	339,0	119,0	11,0
6	286,0	295,8	132,0	10,0
7	247,5	253,3	94,0	10,0
8	304,2	312,5	131,0	15,0
9	352,2	363,9	164,0	15,0
10	307,0	330,8	3,74	32,2
11	361,5	375,3	2,13	18,1
12	386,5	399,4	2,06	17,7
13	219,0	224,8	0,95	7,6
14	264,8	273,7	1,50	8,6

Tabela 7 - Resultados obtidos para os parâmetros geométricos dos cordões de solda produzidos no fatorial completo.

Teste	P	b	r	Sp	Sr	Qualidade
----	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	-
1	1,1	9,3	1,9	4,2	13,3	9
2	1,2	10,2	1,8	5,7	13,2	7
3	0,9	8,7	2,4	4,4	13,7	10
4	1,0	11,9	1,9	5,9	12,6	8
5	0,8	8,6	2,6	4,5	15,8	8
6	1,2	9,4	2,3	8,5	19,4	7
7	0,7	9	2,5	1,8	17,3	10
8	1,3	10,5	2,1	9,4	17,1	9
9	1,0	8,8	2	3,1	13,1	8
10	1,2	9,5	2	3,8	13,5	7
11	0,9	8,8	2	4,8	12,6	9
12	1,1	11,9	1,8	6,8	12,4	8
13	0,9	8,6	2,6	3,8	15,3	8
14	1,2	9,4	2,3	8,7	16,5	7
15	0,8	8,7	2,3	3,4	14,8	10
16	1,3	11,7	2,2	8,8	16,4	9

Tabela 8 – Grandezas medidas antes e após os testes para o fatorial completo.

OP	m _{ci}	m _{cf}	L _{elI}	t
----	g	g	cm	s
1	366,8	376,1	1,55	14
2	297,1	305,8	1,44	14
3	251,7	259,9	1,31	12
4	349	357,2	1,36	13
5	297,6	309,7	1,93	15
6	348,9	360,3	1,9	13
7	364,3	375,2	1,71	13
8	255,9	266,6	1,70	12
9	348,2	356,2	1,32	12
10	280,4	288,5	1,36	12
11	272,1	280,5	1,35	13
12	337,9	345,5	1,26	12
13	387,5	399,6	1,99	14
14	291,6	301,6	1,66	12
15	327	339,6	1,97	12
16	240,4	251,7	1,79	13

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)