

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Antenor Leonello Filho

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO
PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS
REVESTIDOS NA ESTABILIDADE DO ARCO E
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

**Itajubá
2005**

LEONELLO, Antenor Filho

Análise da influência dos parâmetros do processo de soldagem com eletrodos revestidos na estabilidade do arco e características geométricas do cordão. – Itajubá: UNIFEI, 2005.

89p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá
Itajubá, 2005.

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

1. Sistemas de Produção – XYZ – Produção e tecnologia
I.Costa, Sebastião Carlos. II. Universidade Federal de Itajubá
III.Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Antenor Leonello Filho

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO
PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS
REVESTIDOS NA ESTABILIDADE DO ARCO E
CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 21 de novembro de 2005, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Banca examinadora:

Examinador 1: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa (Orientador)

Examinador 2: Prof. Dr. Wanderlei Xavier Pereira

Examinador 3: Prof. Dr. José Leonardo Noronha

2005

Universidade Federal de Itajubá

- Unifei -

Palavras Chave:

Soldagem, estabilidade do arco, eletrodos revestidos

Banca examinadora:

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira

1º Examinador – UNIS - Varginha

Prof. Dr. José Leonardo Noronha

2º Examinador – UNIFEI -

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa. (Orientador)

3º Examinador - UNIFEI

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Sebastião Carlos da Costa, pela orientação e suporte técnico fundamental à realização desta dissertação.

Ao professor Júlio Navarro Santos pelos incentivos na construção dos equipamentos que demandaram longo tempo e disponibilização do laboratório de Materiais.

Ao prof. Newton Figueiredo no auxílio ao desenvolvimento do sistema de projeção do arco voltaico.

Ao engenheiro Manoel do IESTI/UNIFEI pelo auxílio prestado na construção do controle eletro-eletrônico do equipamento de soldagem.

Aos professores Nelson Augusto Viana e Geraldo Tiago Filho pela disponibilização de computadores e equipamentos de medição do LHPCH.

Ao engenheiro Wilson Furlaneto pelo auxílio no projeto e na fabricação do protótipo de soldagem automática.

Aos funcionários da Oficina Mecânica, laboratórios de Materiais e Metrologia da UNIFEI, que auxiliaram sobremaneira na construção dos vários protótipos desenvolvidos, sem os quais não seria possível a construção final do equipamento de solda semi-automática.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho se propõe a analisar a influência de alguns dos parâmetros (corrente, polaridade e comprimento do arco) na soldagem com eletrodos revestidos sobre a estabilidade do arco e características geométricas e produtivas do cordão de solda. Para cumprir com estes objetivos foi necessário o desenvolvimento de um protótipo para permitir o controle automático da soldagem. Para o delineamento dos experimentos e posterior análise da influência dos parâmetros utilizou-se uma ferramenta estatística baseada na técnica do projeto e análise de experimentos – DOE aplicados através do software Minitab. Para a realização das análises de estabilidade do arco foi utilizado o comportamento dinâmico da tensão aquisitada durante realização dos testes o qual associado a filtragens digitais permitiu verificar sua constância durante soldagens. Para avaliações dos aspectos geométricos do cordão foram analisados a influência dos parâmetros do processo sobre a convexidade, penetração, diluição além das características produtivas de taxa de fusão e de deposição e rendimento de deposição para três diferentes tipos de eletrodos, ou seja, rutílicos, básicos e celulósicos. Em função dos resultados obtidos verificou-se que a metodologia de verificação da estabilidade do arco baseada no coeficiente de variação da tensão se mostrou adequada para avaliação de soldagens, sendo que o modo de soldagem automático melhorou a estabilidade do arco comparado ao modo de soldagem manual para todos os tipos de eletrodos. Observou-se também que a polaridade teve grande influência na estabilidade do arco. O eletrodo celulósico foi o mais estável em ambas as polaridades, e mostrou maior estabilidade na polaridade direta, apesar de não ser recomendado para soldagens nesta polaridade. O eletrodo rutílico se situou na posição intermediária sem mostrar variações de comportamento com a polaridade. O eletrodo básico foi o menos estável com uma constância de comportamento em ambas as polaridades.

ABSTRACT

This work has the aim to analyze the influence of parameters welding current, polarity and arc length in the arc stability and geometrical weld bead characteristics of a Shielded Metal Arc Welding – SMAW – process. In order to complain with the objectives a prototype of an automatic welding equipment was developed. Based on this equipment a set of tests were design by the use of statistical tools based on the Design of Experiments techniques through a Minitab software. The electrical arc signals, in particular, voltage, were recorded by a data acquisition system and after processed by the use of a fast Fourier Transform (FFT) technique with a low-pass filter with a cut-off frequency of 4 kHz. The arc stability analysis were based on the variation coefficient by the voltage arc signal filtered. The geometrical characteristics and productivity of the welding bead specimens were evaluated by direct recorded dimensions after cross-sectioning, polishing and measuring of the penetration, dilution and bead convexity index, deposition and fusion rate, and deposition efficiency by the use of three different kind of covered electrodes, i.e., rutile, basic and celulosic. It was found that the automatic welding increased the arc stability compared with the manual welding procedure for all covered electrodes. Also the polarity had an important effect in the arc welding stability. The celulosic electrode had a higher arc stability in straight and reverse polarity, despite of its non recommended use in straight polarity, followed by rutile and basic electrodes, but this electrodes not showed conduct variations with the polarity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Ilustração dos diversos modos de transferência metálica (BRANDI, 1990).	08
Figura 2.2.	Oscilograma da corrente e tensão e fases do arco na transferência por curto-circuito (WELDING HANDBOOK, 1976).	09
Figura 2.3.	Mecanismo de transferência metálica (Larson, 1942).	11
Figura 2.4.	Esquema de circulação de uma bolha de gás no interior da gota em eletrodo rutilico (BRANDI,1988).	12
Figura 2.5	Variáveis utilizadas na determinação dos modos de transferências e índices de estabilidade num oscilograma típico de tensão.	17
Figura 2.6	Exemplo de coluna de arco com as respectivas manchas catódica e anódica.	19
Figura 3.1.	Variação da tensão para soldagem A - CV=0,32.	30
Figura 3.2.	Análise FFT da variação da tensão para soldagem A - CV=0,05.	30
Figura 3.3.	Variação da tensão para soldagem B - CV=0,28.	31
Figura 3.4.	Análises FFT da variação da tensão para soldagem B - CV=0,1.	31
Figura 4.1	Esquema do banco de ensaios com o conjunto eletro-mecânico.	33
Figura 4.2.	Sistema de projeção do arco.	34
Figura 4.3.	Desenho esquemático do hydro-check.	36
Figura 4.4.	Banco de ensaios para soldagens automáticas.	38
Figura 4.5.	Seção transversal da solda no corpo de prova.	41
Figura 5.1.	Influência das interações dos fatores na estabilidade do arco.	47
Figura 5.2.	Influência do modo de soldagem no rendimento dos eletrodos.	49
Figura 5.3.	Efeitos principais dos fatores sobre a penetração da solda - E 6010.	51
Figura 5.4.	Efeitos principais dos fatores sobre a convexidade do cordão - E 6010.	52
Figura 5.5.	Efeitos principais dos fatores sobre a diluição do cordão - E 6010.	53
Figura 5.6.	Efeitos principais dos fatores sobre o rendimento da soldagem - E 6010.	54
Figura 5.7.	Interação entre a intensidade de corrente e comprimento do arco sobre o rendimento da soldagem - E 6010.	54
Figura 5.8	Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de fusão da soldagem - E 6010.	55
Figura 5.9.	Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição - E 6010.	55
Figura 5.10.	Efeitos principais dos fatores sobre o coeficiente de variação da	

tensão E 6010.	56
Figura 5.11. Interação entre a comprimento do arco e polaridade sobre o coeficiente de variação da tensão - E 6010.	57
Figura 5.12. Efeitos principais dos fatores sobre a penetração da solda - E 6013.	58
Figura 5.13 Efeitos principais dos fatores sobre a convexidade do cordão - E 6013.	58
Figura 5.14. Efeitos principais dos fatores sobre a diluição do cordão - E 6013.	59
Figura 5.15. Efeitos principais dos fatores sobre o rendimento da soldagem - E 6013.	60
Figura 5.16 Interação entre a intensidade de corrente e comprimento do arco sobre o rendimento da soldagem - E 6013.	60
Figura 5.17. Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de fusão da soldagem - E 6013.	61
Figura 5.18. Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição - E 6013.	61
Figura 5.19. Interação entre a intensidade de corrente e comprimento do arco sobre a taxa de deposição - E 6013.	62
Figura 5.20. Efeitos principais dos fatores sobre o coeficiente de variação da tensão E 6013.	63
Figura 5.21. Interação entre a comprimento do arco e polaridade sobre o coeficiente de variação da tensão - E 6013.	63
Figura 5.22 Efeitos principais dos fatores sobre a penetração da solda - E 7018.	64
Figura 5.23 Efeitos principais dos fatores sobre a convexidade do cordão - E 7018.	65
Figura 5.24. Interação da corrente e comprimento do arco sobre a convexidade do cordão.	65
Figura 5.25. Interação entre o comprimento do arco e a polaridade sobre a diluição E 7018.	66
Figura 5.26 Efeitos principais dos fatores sobre o rendimento da soldagem – E7018.	67
Figura 5.27 Interação entre o comprimento do arco e a polaridade sobre a diluição E 7018.	67
Figura 5.28 Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de fusão da soldagem - E 7018.	68
Figura 5.29. Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição – E7018.	68
Figura 5.30 Comportamento da estabilidade do arco para os eletrodos estudados.	69
Figura 5.31 - Comportamento da taxa de deposição para os eletrodos estudados.	70
Figura 5.32 - Comportamento do rendimento de soldagem para os eletrodos estudados.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Comparação entre as técnicas de estudo das transferências metálicas com eletrodos revestidos.	15
Tabela 2.2	Equacionamentos para estudo de transferências metálicas (SANTOS, 1995).	17
Tabela 4.1	Variáveis com seus respectivos níveis.	39
Tabela 4.2.	Matriz de delineamento fatorial 2^3 , com suas respectivas combinações de variáveis.	39
Tabela 4.3.	Configuração da aquisição de dados.	40
Tabela 5.1	Resultados obtidos para soldagens automáticas e manuais.	45
Tabela 5.2	Resultados obtidos com o delineamento experimental para os eletrodos E 6010, E6013 e E7018.	46
Tabela 5.3	ANOVA para os eletrodos utilizados.	50
Tabela 5.4	Resultados observados sobre a qualidade visual da solda durante a experiência para os eletrodos E-6010, E-7018 e E-6013.	72

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	Força eletromagnética ou força de compressão.	14
Equação 2.2	Força eletromagnética equação de Sack.	14
Equação 2.3	Índice de estabilidade do arco.	21
Equação 4.1.	Convexidade do cordão.	41
Equação 4.2.	Diluição.	41
Equação 4.3.	Taxa de fusão.	41
Equação 4.4.	Taxa de deposição.	42
Equação 4.5.	Rendimento de deposição.	42
Equação 4.6	Coefficiente de variação da tensão.	42
Equação 4.7	Energia de soldagem.	43

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Energia de soldagem (J/mm)
P	Potência de soldagem (Watts)
V	Tensão de soldagem (Volts)
I	Corrente de soldagem (Ampere)
ρ	Resistividade do eletrodo ($\Omega \cdot \text{cm}$)
l	Comprimento do eletrodo (mm)
R	Resistência elétrica (Ω)
A	Constante, depende do tipo de metal do cátodo
T	Temperatura (Kelvin)
L	Função trabalho do elétron (eV)
K	Constante de Boltzmann
Fp	Força peso
d	Densidade da gota (g/mm^3)
g	Aceleração da gravidade
Fc	Força de compressão
Fj	Força devido à evaporação metálica
Fg	Força devido às reações químicas
B	Índice de avaliação da estabilidade do arco em corrente alternada
ΔEL	Variação do peso do eletrodo antes e após a soldagem (g)
t	Tempo de arco aceso (s)
ΔCP	Variação do peso do corpo de prova antes e após a soldagem
RD	Rendimento de deposição real do eletrodo (%)
v_s	Velocidade de soldagem (mm/s)
DP	Desvio padrão da amostra
V_m	Tensão média (Volt)
I_m	Corrente média (Ampere)
p	Profundidade de penetração (mm)
r	Altura do reforço (mm)
b	Largura do cordão (mm)
D	Diluição (%)

TF	Taxa de Fusão (kg/h)
TD	Taxa de Deposição (kg/h)
RD	Rendimento de soldagem (%)
CV	Coefficiente de variação da tensão (%)
σ_v	Desvio padrão da tensão (Volts)
CP	Corpo de prova
a	Comprimento do arco (mm)
Pol	Polaridade
CA	Soldagem com corrente alternada
CC+	Soldagem na polaridade reversa
CC-	Soldagem na polaridade direta
C	Eletrodo do tipo celulósico
B	Eletrodo do tipo básico
R	Eletrodo do tipo rutílico
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
CC	Transferência metálica por curto-circuito
GG	Transferência metálica globular
SS	Transferência metálica por spray
R_	Eletrodo E6013 – rutílico vs 1,67 mm/s
B_	Eletrodo E7018 – básico vs 1,67 mm/s
C_	Eletrodo E6010 – celulósico vs 1,67 mm/s
S_r	Área de reforço do cordão (mm ²)
S_p	Área de penetração da solda (mm ²)
S_z	Área afetada pelo calor (ZAC) – (mm ²)
RR_	E6013 vs - 2,33 mm/s
BB_	E7018 vs - 2,33 mm/s
CC_	E6010 vs - 2,33 mm/s
RM_	Eletrodo rutílico soldagem manual
BM_	Eletrodo básico soldagem manual
CM_	Eletrodo celulósico soldagem manual
S^2	Variância
B_i	Índice de estabilidade ($\Omega^{-1} \cdot S^{-1}$)
I_1	Corrente no momento da reignição do arco (A)
V_1	Tensão de reignição do arco (V)

Voc	Tensão em vazio (V)
ψ	ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão em vazio (graus)
T_c	Período médio de transferência (ms)
t_{cc}	Tempo médio de curto-circuito (ms)
f_i	Frequência da corrente (Hz)
f	Eficiência do processo
IC	Índice de Convexidade
E6010	Eletrodo celulósico
E6013	Eletrodo rutílico
E7018	Eletrodo básico

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	v
Lista de equações	viii
Lista de tabelas	ix
Lista de símbolos	x
Sumário	xii
1. INTRODUÇÃO	
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Motivação do trabalho	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Organização do Trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Introdução	4
2.2. O processo de soldagem com eletrodo revestido	4
2.2.1. Revestimentos e suas características	6
2.3. Transferência metálica na soldagem com eletrodo revestido	7
2.4. Forças atuantes nas transferências metálicas	12
2.5. Técnicas usadas nas observações das transferências metálicas	14
2.6. Estabilidade do arco	16
2.7. Aspectos econômicos da soldagem com eletrodos revestidos	21
2.8. Aspectos e geometria do cordão de solda	24
2.9. Considerações finais sobre a revisão bibliográfica	25
3. COMPARAÇÃO ENTRE SOLDAGENS ATRAVÉS DA ANÁLISE DA VARIÇÃO DA TENSÃO	27
3.1. Coeficiente de Variação	27
3.2. Coeficiente de variação da tensão de soldagem como forma de avaliação de soldagens	28

4.	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	33
4.1.	Banco de ensaios	33
4.2.	Sistema de acionamento de alimentação do eletrodo	35
4.2.1.	Acionamento hidráulico pneumático	35
4.2.2.	Acionamento elétrico	36
4.2.2.1.	Motor de passo	35
4.2.2.2.	Motor elétrico universal Singer	36
4.2.2.3.	Motor elétrico 12V, CC com redutor de 1:40	37
4.3.	Desenvolvimento Experimental	38
4.3.1.	Critério para avaliação das características econômicas dos eletrodos	41
4.3.2.	Metodologia utilizada para avaliação da estabilidade do arco	42
4.3.3.	Avaliação dos parâmetros operacionais	43
5.	RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	44
5.1.	Resultados obtidos	44
5.2.	Análise dos resultados	47
5.2.1.	Comparação entre soldagem automática e manual	47
5.2.2.	Comentários gerais sobre soldagens automáticas e manuais	49
5.2.3.	Estudo particular dos eletrodos utilizando a metodologia DOE	49
5.2.3.1.	Análise dos Efeitos Principais e de Interação para o Eletrodo Celulósico E6010	50
5.2.3.2.	Análise dos Efeitos Principais e de Interação para o Eletrodo Rutílico E6013	57
5.2.3.3.	Análise dos Efeitos Principais e de Interação para o Eletrodo Básico E7018	63
5.3.	Comparações finais do comportamento operacional para os três tipos de eletrodos	69
5.4.	Comparações entre qualidades visuais para os três tipos de eletrodos	71
5.5.	Considerações finais dos resultados	71

6. CONCLUSÃO	73
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Sabe-se que a estabilidade de arco é um fator importante no controle da soldagem, e esta estabilidade é influenciada por vários fatores, entre eles, o modo de transferência de material de adição, os tipos de gases, os consumíveis, a polaridade, etc. Estas modificações no comportamento do arco influenciam no modo de soldabilidade dos materiais (propriedades auferidas pela solda) principalmente aquelas relacionadas à penetração, quantidade de respingos, ciclos térmicos da solda, posição de soldagem, etc.

Muitos estudos tem sido dedicados à análise de estabilidade de arco abordando vários aspectos, como por exemplo estudo de novos gases (misturas) de proteção, desenvolvimento de novos eletrodos, análise de desempenho de fontes de soldagem, etc. Muitas formas de análise de estabilidade de arco tem sido utilizadas, porém face ao uso cada vez mais comum de sistemas de aquisição de dados, tem se considerado que a análise da característica dinâmica da tensão de soldagem é um dos mais efetivos neste sentido. Várias formas de análises tem sido consideradas a este respeito e, principalmente, aquelas que abordam novas ferramentas matemáticas e estatísticas. Devido à dificuldade de se filmar o arco voltaico, análises de seu comportamento através do estudo estatístico das características dinâmicas da tensão de soldagem tem sido citadas na literatura por autores como Shinoda (1989), Brandi (1988) e outros. Autores como Lancaster (1971) e Pistorius (1987) utilizaram a análise de frequência de curtos para determinar os modos de transferências e, conseqüentemente, a estabilidade do arco. Outros como Chawla (1992) abordaram o uso de transformadas rápidas de Fourier para análise da estabilidade do arco quando da utilização de diferentes tipos de gases em soldagens MIG/MAG. Santos (1995), por outro lado, empregou a análise de modos de transferências para comparação de fontes de energia em soldagem com eletrodos revestidos. Autores como Wyant et. al. (1948), Shinoda (1989), Dutra (1990) ressaltam a importância da aquisição de dados via computador no estudo das transferências de gotas que ocorrem durante a soldagem. Como se nota muitos trabalhos tem sido desenvolvido nesta área, porém observam-se poucos

trabalhos neste sentido, dedicados à análise de desempenho de equipamentos e sua aplicação no processo com eletrodos revestidos.

Este trabalho procura utilizar uma nova metodologia baseada na análise de transformadas rápidas de Fourier para implementação de filtros digitais e sua aplicabilidade no estudo de desempenho de equipamentos automáticos e manuais. Estende ainda sua utilização para a análise de consumíveis no que concerne à estabilidade do arco (CV) para as classes de eletrodos celulósicos, rútilicos e básicos. Finalmente são estudados para estes eletrodos, utilizando-se a metodologia estatística baseada no Projeto e Análise de Experimentos (DOE – Design of Experiments), a influência do comprimento do arco, polaridade e intensidade de corrente na penetração, convexidade e diluição do cordão, taxa e rendimento de deposição a partir de testes de simples deposição de soldagem.

1.2 Motivação do trabalho

- Verificação da aplicabilidade de novas técnicas de análise na estabilidade de arco.
- Poucos estudos de análise aplicados aos eletrodos revestidos. Considerando que este processo é um dos mais utilizados tal estudo se reveste de uma grande importância.
- Verificação de desempenho de um protótipo de soldagem automática para eletrodos revestidos desenvolvido para este fim, comparados às soldagens manuais no que concerne a estabilidade do arco.
- Análise da influência dos parâmetros de soldagem na configuração geométrica do cordão.

1.3 Objetivos

No desenvolvimento deste trabalho, deseja-se que os seguintes objetivos sejam alcançados:

- Proposição de nova metodologia de análise baseada no coeficiente de variação da tensão dinâmica de soldagem e sua aplicabilidade na comparação entre soldagens automáticas e manuais.
- Desenvolvimento de um protótipo automático para soldagem com eletrodos revestidos.
- Verificar a influência dos parâmetros polaridade, comprimento do arco e corrente na penetração, convexidade e diluição do cordão além da taxa e rendimento de deposição para diferentes eletrodos.

Para que estes objetivos pudessem ser atingidos, alguns objetivos intermediários foram definidos de modo a nortear o seu desenvolvimento. Tais objetivos são:

- Desenvolvimento de um banco de ensaios constituído por uma máquina automática especialmente desenvolvida para este fim, além de um sistema de projeção de arco.
- Identificação dos tipos de transferências metálicas para cada tipo de eletrodo utilizado neste trabalho.

1.4 Organização do Trabalho

Esta dissertação de mestrado está subdividida em 6 capítulos.

O capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho bem como seus objetivos.

O capítulo 2 apresenta as informações teóricas sobre o assunto desenvolvido neste trabalho, pesquisadas em publicações científicas e livros técnicos, de modo a servir de base para discussão dos resultados e conclusões.

No capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento da metodologia de análise usando-se ferramentas baseadas em Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) e coeficiente de variação a serem utilizadas na comparação entre soldagens automática e manual .

No capítulo 4 descrevem-se as várias tentativas e problemas enfrentados no desenvolvimento do protótipo automático para soldagem com eletrodos revestidos e de um sistema de projeção do arco. Neste capítulo trata-se também do desenvolvimento experimental.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e suas análises.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Como complementação há dois apêndices. No apêndice A são mostrados os dados complementares obtidos em ensaios e no apêndice B as macrografias esquemáticas das soldagens nas polaridades direta e reversa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Neste capítulo procura-se apresentar de maneira clara e concisa as principais informações e estudos de pesquisadores sobre processos de soldagem com eletrodos revestidos, sobre os vários tipos de transferências metálicas características dos eletrodos revestidos, sobre as forças atuantes nas transferências, sobre o conceito de estabilidade do arco, sobre os aspectos econômicos da soldagem com eletrodos e finalmente aspectos da geometria dos cordões de solda. Além disso, informações sobre metodologias de análise de estabilidade de arco são também descritas.

2.2 O processo de soldagem com eletrodo revestido

O processo de soldagem com eletrodo revestido é um processo no qual a fusão do metal é produzida pelo aquecimento de um arco elétrico, mantido entre a ponta de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base a ser soldada. Durante a soldagem, o arco e a poça metálica são protegidos da atmosfera circundante através da formação de uma cortina gasosa oriunda da queima do revestimento e a decomposição de seus constituintes. Outras vezes, ou mesmo conjuntamente, a proteção é feita por uma escória líquida, de densidade menor que a do metal base, protegendo a poça de fusão durante a solidificação. Após a soldagem, este líquido protetor se solidifica formando uma escória sólida, a qual deve ser removida (SANTOS, 1995).

O equipamento básico para soldagem com eletrodo revestido possui uma das mais simples configurações possíveis, em comparação com outros processos elétricos. O processo consiste de uma fonte de energia de característica estática de corrente constante, de um alicate para a fixação dos eletrodos, de cabos de interligação, de materiais de segurança, de equipamento para limpeza da solda e do eletrodo revestido propriamente dito.

Segundo Brandi (1988), o eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica, chamada alma, trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece o metal de adição para o preenchimento da junta. Esta alma é recoberta por um revestimento formado pela mistura de diferentes materiais, o qual tem diversas funções na soldagem como a

ajustagem da composição química do cordão pela adição de elementos de liga; a proteção da poça de fusão e o metal de solda da contaminação da atmosfera; conferir características operacionais e mecânicas ao eletrodo e à solda. Além destas, o revestimento desempenha uma importante função na manutenção da estabilidade do arco. Os gases provenientes da queima do revestimento são muito mais facilmente ionizáveis do que o ar, tornando assim a abertura e manutenção do arco mais fácil, minimizando inclusive o sopro magnético

O processo com eletrodos revestidos é um dos mais utilizados devido à sua versatilidade em termos de ligas soldáveis, operacionalidade e características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado. O processo puramente elétrico que ocorre enquanto durar o arco é bem entendido quando o cátodo e o ânodo forem de materiais refratários, como grafite e tungstênio. Em soldagem com eletrodos revestidos a existência do arco e suas propriedades são menos conhecidas e muito mais difíceis de explicar por causa da emissão de elétrons que é acompanhada pela transferência de metal e escória, formação de plasma, e ocorrência de várias reações físico-químicas, metalúrgicas e elétricas.

Na soldagem com eletrodos revestidos, o diâmetro do eletrodo e a espessura do revestimento são os principais parâmetros que controlam a magnitude da corrente, de acordo com Wegrzyn (1980), enquanto que a voltagem e o comprimento do arco dependem do tipo de revestimento e do soldador. Eles não são ajustáveis como na soldagem com o arco protegido por gás (GMAW). Apesar do tipo de corrente e polaridade do eletrodo (CA ou CC), a transferência do líquido e dos gases principais no arco, sempre ocorrem em uma direção, ou seja, do eletrodo para a poça de fusão.

A presença de escória no cátodo, em particular óxidos livres emitindo elétrons, e a atmosfera ionizada no arco, alteram consideravelmente as condições para a emissão termoiônica. As propriedades de emissão dos eletrodos revestidos dependem da composição do revestimento, particularmente do conteúdo de óxidos compostos de sódio e potássio nos eletrodos rúflicos e tipos similares como fluoritas nos revestimentos dos eletrodos básicos. Altas temperaturas ocorrem mais freqüentemente na zona catódica, onde as gotas têm alto potencial, de emissão elétrica e onde processos de ionização também ocorrem. O menor potencial da gota no cátodo ocorre quando os eletrodos contêm em seu revestimento grandes quantidades de compostos de potássio e seus óxidos.

2.2.1 Revestimentos e suas características

Eletrodos revestidos para soldagem manual de aço são classificados como ácidos, óxidos, básicos, rútilicos e celulósicos. Há um senso de que esta classificação é baseada nas divisões metalúrgicas. As propriedades do arco e os processos que ocorrem são determinados principalmente pelo tipo de eletrodo.

Os tipos de revestimentos quanto a composição básica podem ser (SANTOS, 1995):

a) *Rútilicos*, que tem como características:

- alta proporção de rutila (TiO_2) produzindo proteção essencialmente por escória;
- fácil acendimento e manutenção do arco, com poucos respingos;
- menos suscetível que os demais em relação as chapas sujas (impurezas presentes na superfície da chapa a ser soldada);
- acabamento plano nos filetes;
- alto teor de hidrogênio (20ml/100g).

Como resultado desta composição, o metal fundido do eletrodo não é altamente oxidável, portanto, a tensão superficial é um fator mais significativo do que para os eletrodos óxidos, e o modo de fundição envolve menos mecanismos do tipo spray do que com os eletrodos ácidos e óxidos. A rutila é reconhecida como um mineral que estabiliza melhor o arco do que o ferro e o minério de manganês, mas as diferenças não são grandes, de acordo com Wegrzyn (1980).

b) *Celulósicos*, que tem como características:

- alta proporção de celulose, produzindo proteção essencialmente gasosa;
- alta tensão de arco;
- alta penetração;
- baixo volume de escória;
- cordão de solda com alto teor de hidrogênio, tornando-se inadequado para soldas de alta resistência;
- acabamento do cordão ruim e com muitos respingos.

c) *Básicos*, que tem como características:

- alta proporção de CaCO_3 e CaF_2 , produzindo proteção mista (gases e escória);
- forte ação fluxante;
- depósitos de alta qualidade e baixo hidrogênio (10-15 ml/100g), chegando a 5 ml/100g com secagem e conservação apropriadas;
- fornece depósitos de bom aspecto superficial;
- escória mais difícil de destacar que os rutilicos;
- escória de alta tensão superficial, facilitando o controle da poça de fusão, principalmente na posição vertical ascendente, mas produzindo cordões convexos;
- altamente higroscópicos.

Os eletrodos básicos possuem propriedades marcadamente diferentes dos outros tipos de eletrodos. Pelo menos três propriedades distinguem estes eletrodos, ou seja, as transferências metálicas se processam através de grandes gotas, há um importante efeito da polaridade e estes eletrodos são, notoriamente, de difícil soldagem em corrente alternada (CA).

2.3 Transferência metálica na soldagem com eletrodos revestidos

Os modos de transferência do metal encontrados na soldagem com arcos manuais, é similar aqueles encontrados no processo MIG (Metal Inerte Gás), segundo Norrish (1988), mas o fluxo do revestimento do eletrodo tem influência no comportamento da transferência metálica ou tem efeitos mecânicos na poça de fusão. A transferência metálica está ligada à soldabilidade de um dado metal ou liga, sendo relacionada com a estabilidade do arco, posição de soldagem, quantidade de respingos, penetração, ciclo térmico de soldagem e qualidade da solda. O conhecimento de como se processa a transferência também tem sido utilizado para aperfeiçoar e automatizar processos de soldagem, segundo Wyant et. al. (1948), Brandi e Taniguchi (1988, 1990).

Segundo o Instituto Internacional de Soldagem (IIW, 1977) a transferência metálica pode ser dividida em três grupos: transferência por “vôo livre”, por *contato* e *protegida pela escória*.

A transferência por “vôo livre” abrange a transferência globular, a transferência por pulverização e a transferência por explosão. A transferência por contato engloba a transferência por curto-circuito e a transferência por contato ininterrupto. A transferência

protegida pela escória engloba a transferência guiada pela parede do fluxo fundido. A **Figura 2.1**, mostra esquematicamente os modos genéricos de transferências metálicas. Observando-se essa figura, vê-se a transferência por gotas (a), por repulsão (b), por projeção (c), por pulverização axial (d), por pulverização rotacional (e), por explosão (f), por curto-circuito (g) e guiada pela parede do fluxo fundido (h).

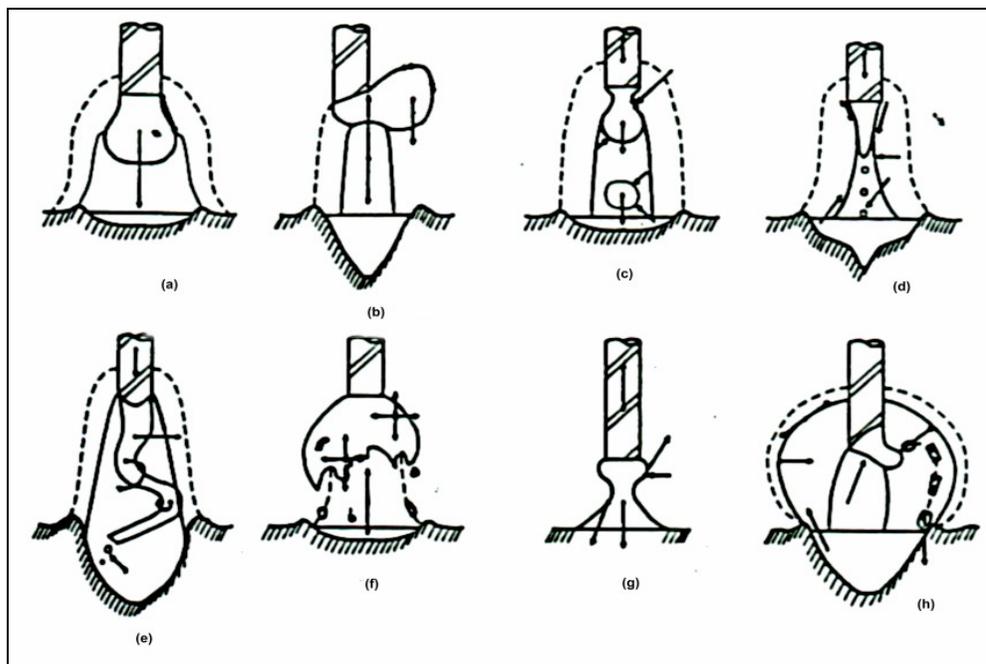


Figura 2.1 – Ilustração dos diversos modos de transferências metálicas (BRANDI, 1990)

Apesar do exposto, de acordo com Pokhodnya et. al. (1990), os modos mais comuns de transferência encontrados para eletrodos revestidos são através de grandes gotas, de explosões e de pequenas gotas.

As transferências por explosão são típicas de revestimentos ácidos ou orgânicos, onde acontecem intensos respingamentos. No mecanismo de transferência metálica, as gotas fundidas na ponta do eletrodo são transferidas para a poça de fusão quando atingem certo diâmetro, onde a força da gravidade supera as forças de tensão superficial, de evaporação metálica e devido às reações químicas, segundo Brandi (1988) e Chen et. Al. (1989).

Transferências metálicas por gotas podem estar associadas a curtos-circuitos, ou não, sendo que neste caso, a gota atinge a poça de fusão por vô livre. Nas transferências através de explosões, onde diz-se que houve curto-circuito mas não houve transferência metálica, as gotas se separam da ponta do eletrodo de forma aleatória. De acordo com Pokhodnya et. al.

(1990), existe um ciclo de transferência metálica por curto circuito conforme mostrado na **Figura 2.2**. Esta figura mostra um oscilograma típico da tensão do arco na soldagem com curtos-circuitos causados por transferências metálicas por gotas para a poça de fusão. Essers et. al. (1971) afirmam ainda que transferências de grandes gotas para a peça é raramente acompanhada por curto-circuito, que podem ser vistos nos oscilogramas, enquanto que as transferências por pequenas gotas causa pequenas ondulações nos oscilogramas.

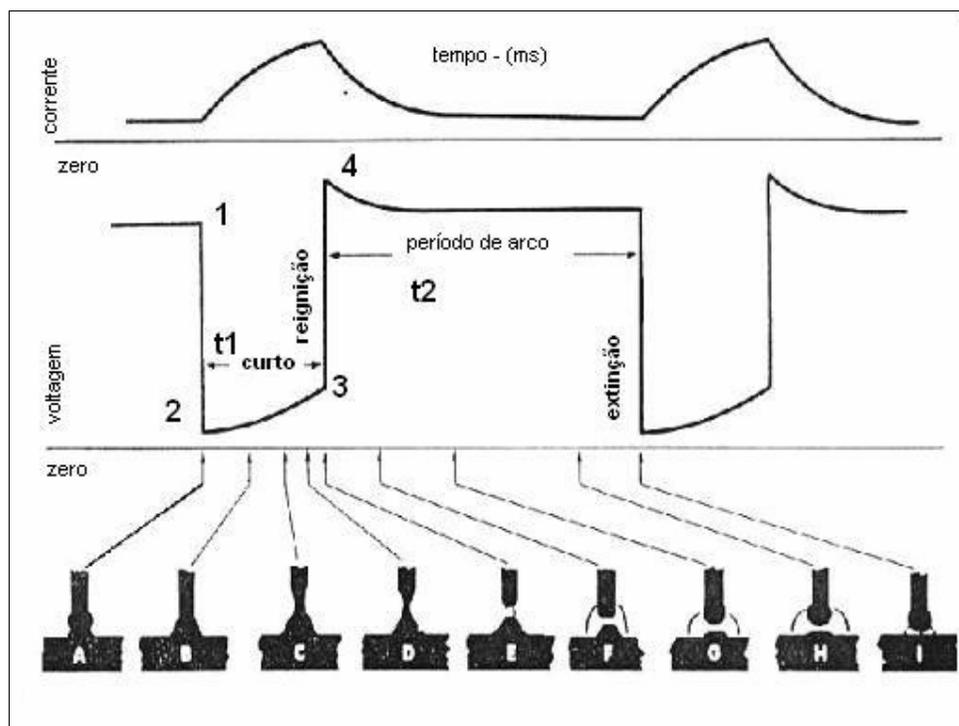


Figura 2.2 - Oscilograma da corrente e tensão e fases do arco na transferência por curto-circuito (WELDING HANDBOOK (1976)).

Do oscilograma, **Figura 2.2**, observa-se os períodos de crescimento da gota t_2 (F-I) e de transferência t_1 (A-E). No começo da transferência da gota (curto-circuito zona 1-2), a voltagem do arco cai a alguns volts, e durante a transferência (zona 2-3), apresenta lento crescimento. O final da transferência (rompimento da ponte líquido/metal) é acompanhado de um grande salto na voltagem do arco até seu valor máximo (zona 3-4). O ponto 4 é referido como pico de reignição do arco.

De acordo ainda com Pokhodnya (1983), aumentando-se significativamente a corrente, a quantidade de curtos circuitos decresce rapidamente. O número de curtos-circuitos também diminui com o aumento do comprimento do arco. Nas transferências metálicas através de gotas, mas sem curtos-circuitos, a tensão do arco não varia tão rapidamente, e não

atinge valores tão baixos, e o tempo t_1 é consideravelmente menor. Pokhodnya et. al. (1983, 1990), afirma que para haver transferência metálica durante um curto circuito, este deverá ser maior que 2 ms, e que há uma relação quantitativa entre o tempo de curto circuito e a dimensão das gotas transferidas.

Pokhodnya et al (1990) e Brandi (1988) afirmam que pode ocorrer durante uma soldagem, a combinação dos três tipos de transferências ao mesmo tempo, com predominância de um dos três tipos

Com relação aos tipos de eletrodos há consenso nos modos de transferência. Assim, eletrodos *básicos* tendem a transferência por curto circuito, em baixas correntes e do tipo *globular* em altas correntes enquanto que os eletrodos rúflicos geram tamanhos de gotas médias (POKHODNYA et. al., 1990). Brandi (1988) afirma, ainda, que o tipo de transferência do eletrodo básico é similar ao do eletrodo rúflico. A diferença está na frequência de curto-circuito que é menor e o tamanho da gota que é maior. Eletrodos do tipo *celulósico* tem altas taxas de transferência e pequenos tamanhos de gotas, caracterizando a transferência por spray projetada além de verificar-se também muitos curtos-circuitos, de acordo com Norrish (1988), Brandi (1990) e Pistorius (1997). Este tipo de eletrodo aparentemente possui bolhas de gás em seu interior, influenciando bastante no modo de transferência metálica de acordo com Brandi (1990c) e Essers et. al. (1971).

Outro fator importante a ser considerado na transferência metálica do eletrodo rúflico por exemplo, é que existe a presença de bolhas de gás na gota e que ela é levada a explodir no momento da transferência, influenciando bastante no modo de transferência metálica, segundo Brandi e Taniguchi (1988), Chen et. al. (1996).

Considerando o aspecto da presença de bolhas de gás no interior da gota, Larson (1942) propôs um modelo para caracterizar o seu modo de expansão. Apesar do mecanismo ser preponderante para soldagem sobre-cabeça, ele explica bem o que acontece também na posição plana, **Figura 2.3**. Segundo ele a bolha de gás no interior da gota pode se comportar de duas maneiras, ou seja, esta bolha pode se expandir e acabar por explodir a gota metálica sem que tenha sido formado um curto-circuito ou então expandir, tocar a poça de fusão e somente depois explodir a gota metálica. O tipo preponderante de transferência depende da taxa de aquecimento, da geração do gás no interior da bolha, da tensão superficial entre a gota e a escória, da viscosidade da gota líquida. Se a taxa de aquecimento for elevada, ocorre a expansão do gás com maior rapidez, ocasionando a explosão da gota. O mesmo ocorre com a

geração de gás, porém com a diferença de que um aumento na temperatura diminui a quantidade de CO formado porque a reação é exotérmica.

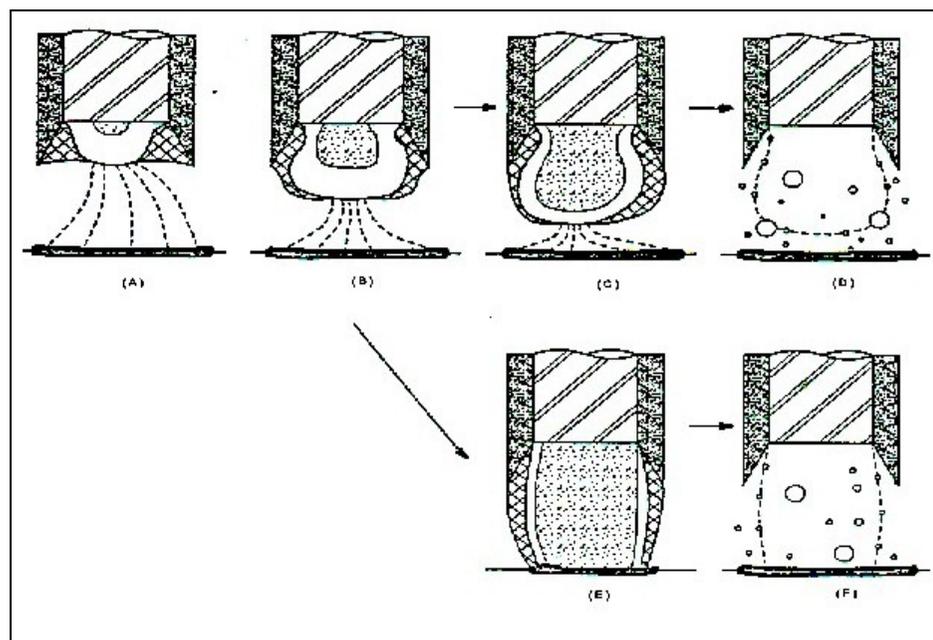


Figura 2.3 - Mecanismo de transferência metálica (LARSON,1942).

De acordo com Chen et. al. (1996), para o eletrodo básico, o principal processo causador de respingos (respingos), é a explosão do gás CO no interior da bolha, no momento do destacamento da gota por curto-circuito, e o conseqüente incremento da corrente neste momento realça significativamente este processo. Portanto, o controle da corrente é o principal fator para diminuir a quantidade de respingos.

Lancaster (1971) afirma que para o eletrodo rutílico há formação de gás CO no interior da gota e este fato faz com que a transferência ocorra em forma de pequenas gotas com diâmetros entre 1 e 3 mm, não havendo portanto transferência por spray neste caso. Brandi (1988) diz que o eletrodo rutílico possui o arco mais estável porque consegue aliar tamanhos de gotas relativamente pequenas com uma quantidade de respingos menor, comparando com os outros dois eletrodos.

Para o eletrodo celulósico, Brandi (1988) diz que o diâmetro médio das gotas é de 1,82 mm e que uma grande quantidade delas deve explodir antes que haja curto-circuito, sendo este um dos mecanismos propostos por Larson (1942). Neste caso há também evidências de formação de bolhas de gás no interior da gota, conforme afirma Wegrzyn (1980), favorecendo

a transferência por spray. Lancaster (1971) afirma que para eletrodos rúflicos, básicos e celulósicos, os diâmetros das gotas transferidas estão na faixa de 1 a 3 mm de diâmetro.

A **Figura 2.4** mostra um esquema de bolha de gás no interior de gota e suas respectivas circulações, para o eletrodo rúflico. Quanto maior a tensão superficial entre a gota e a escória e quanto mais viscosa for a gota, maior a probabilidade de ocorrer curto circuito.



Figura 2.4 - Esquema de circulação de uma bolha de gás no interior da gota em um eletrodo rúflico (BRANDI,1988)

Além de todas as considerações anteriores, Wainer (1992) destaca que a posição de soldagem também influencia na transferência. Desta forma gotas menores são obtidas quando o eletrodo é mantido na posição horizontal, devido possivelmente a uma diminuição do efeito da tensão superficial entre o metal fundido e a escória.

2.4 Forças atuantes nas transferências metálicas

As forças que agem na gota metálica são dependentes de um certo número de fatores, e na prática são difíceis de serem quantificadas. Por exemplo, a tensão superficial é função da temperatura, da composição e da forma da gota fundida. A forma da gota muda durante esta evolução resultando numa mudança da magnitude da força de tensão superficial. Similares mudanças ocorrem com outras forças dominantes, em geral, o comportamento do destacamento da gota da ponta do eletrodo deve levar em conta o tempo de ocorrência do fenômeno.

De acordo com Brandi (1988), as forças que podem agir na gota promovendo a transferência metálica são:

- Força devido a ação da gravidade;
- Força devido a tensão superficial (tensão superficial entre a gota e o metal de adição e entre a gota e a poça de fusão);
- Força eletromagnética ou força de compressão (efeito pinch);
- Força aerodinâmica (força de arraste do plasma e do gás de proteção);
- Força devido a evaporação metálica e a reações químicas;
- Forças mecânicas externas.

A transferência metálica é influenciada pelo balanço de forças que atuam em um dado instante. Este balanço é função dos parâmetros de soldagem, geometria do metal de adição, tipo de metal de adição, geometria do arco, posição de soldagem, composição do revestimento ou fluxo, pressão local e equipamento de soldagem.

De acordo com Brandi (1990, 1991), as forças predominantes no mecanismo de transferência metálica na soldagem com eletrodos revestidos são:

- Força devido a tensão superficial

Wegrzyn (1980) afirma que a viscosidade do metal líquido e da escória na fundição de eletrodos revestidos tem efeito marcante no modo de transferência, propriedades e movimentos na poça de fusão, mas, o tipo de revestimento determina o modo predominante da transferência. Como regra geral eletrodos básicos produzem grandes gotas. A tensão superficial segura as gotas na ponta do eletrodo fundido e causa a adoção de formas esféricas, retendo a gota qualquer que seja a posição de soldagem.

- Força devido às reações químicas.

Essa força é gerada pela reação do oxigênio dissolvido na gota com elementos desoxidantes. O produto gasoso formado expande-se de uma forma explosiva no interior da gota. A primeira menção a este tipo de força foi feita por Doan em 1932. Erdmann-Jesnitzer foi quem estudou esta força com mais detalhes. Segundo ele os gases presentes no interior da bolha podem ser CO, CO₂, H₂, H₂O e CH₄ (citação de BRANDI, 1988). Para eletrodos revestidos acredita-se que as bolhas de gás são predominantemente de CO (BRANDI, 1988; CHEN et. al., 1996).

- Força devido a evaporação metálica.

A força devido a evaporação metálica foi citada pela primeira vez por Conrady (1940). Segundo ele há uma pressão gerada pela mancha catódica que deforma a superfície da gota. Lancaster (1971) acredita que esta força pode superar a força de compressão (eletromagnéticas) no caso do eletrodo revestido. Segundo Hummitzsch (citação de BRANDI, 1988) chega-se a encontrar de 10 a 20% de vapor metálico na atmosfera do arco, mostrando que esta força tem papel importante na transferência metálica.

- Força eletromagnética ou força de compressão - F_c (efeito pinch);

A ação da força eletromagnética ou de compressão ocorre nos momentos finais do destacamento e tem sua importância no fenômeno, apesar de não ser citada como força importante no processo de soldagem com eletrodos revestidos (BRANDI, 1988).

O primeiro estudo para quantificar esta força foi feito por Creedy e colaboradores em 1932, obtendo a expressão:

$$F_c = \frac{I^2}{200} \quad \text{Onde: } I - \text{ corrente de soldagem} \quad (2.1)$$

Sack (citação de BRANDI, 1988) em 1932 modificou esta relação, introduzindo as áreas de entrada (A_1) e saída da corrente (A_2), chegando a relação:

$$F_c = \frac{I^2}{200} \times \ln(A_2/A_1) \quad (2.2)$$

A partir da **equação 2.2**, Sack (citação de Brandi, 1988) concluiu que se a gota metálica for deformada, formando um pescoço por exemplo, a concentração das linhas de corrente no pescoço acentua cada vez mais a ação da força de compressão. Caso não haja a formação do pescoço, a força tende a alongar a gota.

Para um detalhamento mais específico sobre os equacionamentos de cada força há muita literatura disponível, como por exemplo em Brandi (1988) e Wainer (1992).

2.5 Técnicas usadas na observação das transferências metálicas

O estudo das transferências metálicas e do comportamento do arco no processo com eletrodos revestidos é dificultado devido aos gases gerados pela queima do revestimento e às gotas de escória que são transferidas junto com as gotas metálicas.

Para o estudo do comportamento do arco com relação às transferências metálicas é necessário a utilização de algumas técnicas particulares. A comparação entre as técnicas mais comumente utilizadas, bem como suas vantagens, desvantagens e limitações são mostradas na **Tabela 2.1.**

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Câmeras de vídeo de alta velocidade.	<ul style="list-style-type: none"> • Observação direta da transferência da gota. • Resolução ótica média/boa 	<ul style="list-style-type: none"> • Preparação experimental complexa. • Medida imprecisa do tamanho da gota. • Difícil distinguir a gota da escória
Câmeras Fotográficas	<ul style="list-style-type: none"> • Observação direta da transferência da gota. • Preparação experimental simples. • Boa resolução ótica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Curto tempo de amostragem. • Medida imprecisa do tamanho da gota. • Difícil distinguir gota da cobertura de escória
Oscilogramas de voltagem e corrente.	<ul style="list-style-type: none"> • Preparação experimental simples. • Possibilidade de grandes quantidades de amostras 	<ul style="list-style-type: none"> • Observação indireta e correlação. • Difícil caracterizar a transferência. • Incapacidade para determinar o tamanho da gota. • Incapacidade para distinguir gota da escória.
Deposição em pratos metálicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Observação direta da transferência da gota. • Preparação simples. • Possibilidade de grandes amostras. • Capacidade para distinguir gotas da escória. 	<ul style="list-style-type: none"> • As gotas podem coalescer e fraturar em contato com o frio (ar).

Tabela 2.1 – Comparação entre as técnicas de estudo das transferências metálicas com eletrodos revestidos.

Estas considerações bem como observações dos estudos realizados por autores como Brandi (1988), Shinoda (1989), Baixo (1990), Chawla (1992) e Santos (1995) permitem uma avaliação sobre as técnicas de pesquisas adequadas ao estudo do comportamento do arco e consequentemente das transferências metálicas.

Dentre estas técnicas, uma das mais utilizadas são as análises do comportamento dinâmico da tensão e corrente durante o processo de soldagem. Observa-se que para avaliações de transferências em soldagem, o monitoramento da tensão é um parâmetro mais efetivo do que a corrente já que sendo a mesma proporcional ao comprimento do arco, a distinção entre uma transferência por curto-circuito e a globular se torna possível. Tal distinção fundamental no estudo de fontes de soldagem, consumíveis entre outros pode ser realizada através da determinação de valores instantâneos obtidos dos oscilogramas da tensão do arco da soldagem como mostrado na **Figura 2.5**. Conseguem-se deste modo, a partir destes registros obter parâmetros indicativos interessantes como, por exemplo (SANTOS, 1995):

- tensão média (V), o seu desvio padrão (σV) e o desvio padrão relativo ($\sigma V/V$);
- tensão eficaz;
- períodos de curto-circuitos (T_c), os seus desvios padrões e os seus desvios padrões relativos;
- tempos de curto-circuitos (t_{cc}), os seus desvios padrões e os seus desvios padrões relativos;
- frequência dos curto-circuitos (F), os seus desvios padrões e os desvios padrões relativos.

Além destes parâmetros indicativos é fundamental na distinção entre transferência globular e por curto-circuito a definição de uma tensão de referência abaixo da qual se verifica a ocorrência de curto-circuito. Na literatura encontra-se variações de 7-13 V para este nível, como destaca Santos (1995). Entretanto, para que efetivamente ocorra transferência por curto-circuito é necessário definir o tempo mínimo de curto-circuito que transferem gota metálica. Para eletrodos revestidos este valor varia de 1,5 a 3,5 ms (SANTOS, 1995). A partir destes critérios e ainda considerando os equacionamentos mostrados na **Tabela 2.2**, pode-se ter uma análise mais segura da influência da transferência metálica na estabilidade do arco.

Tais considerações servirão de base para a seleção da melhor técnica aplicada a este trabalho.

2.6 Estabilidade do arco

A estabilidade de um arco elétrico é uma das propriedades fundamentais para o desenvolvimento da soldagem, sendo este um dos fenômenos bastante estudado até hoje. Entretanto o conceito de estabilidade é muitas vezes mal empregado, pois, vários fenômenos fazem com que surjam estes erros de interpretação.

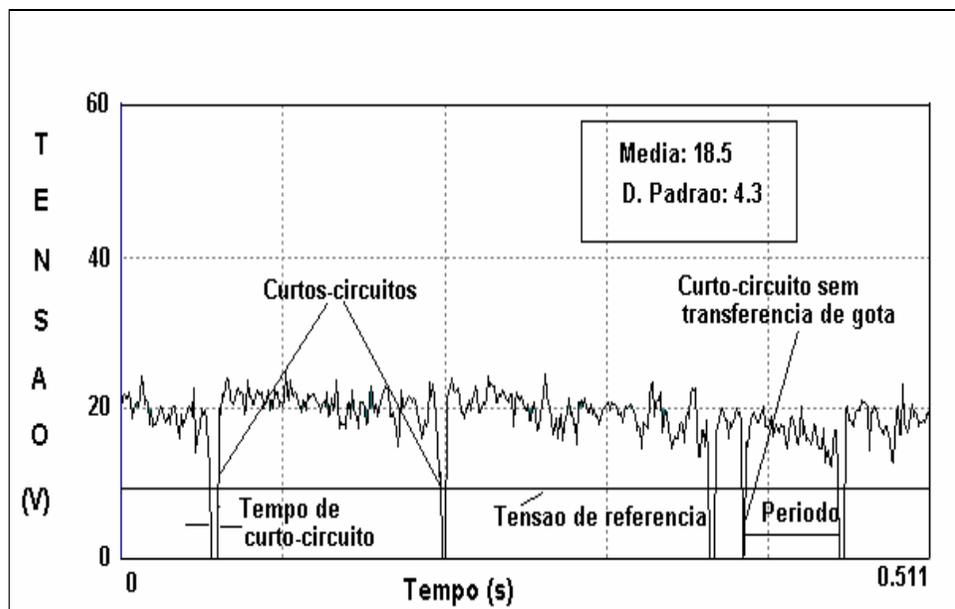


Figura 2.5 - Variáveis utilizadas na determinação dos modos de transferência e índices de estabilidade num oscilograma típico de tensão (fonte).

Variáveis	Índices	Considerações	Análise
Facilidade de ocorrência de curto-circuito	$F_{tm}=1/t_{cc} \cdot 1000 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	t_{cc} - Tempo médio de curto-circuito (ms) T_c - Período médio de transferência (ms)	Quanto maiores estes índices, maiores serão as facilidades de ocorrência de curtos-circuitos e de transferência metálica por curto-circuito.
Facilidade de transferência da gota no curto-circuito	$F_{cc}=1/T_c \cdot 1000 \text{ (s}^{-1}\text{)}$		
Regularidade da transferência de metal	$R_{cc}=T_c/\sigma T_c$ $R_{tm}=t_{cc}/\sigma t_{cc}$	σT_c - Desvio padrão dos valores de T_c (ms) σt_{cc} - Desvio padrão dos valores de t_{cc} (ms)	Quanto maiores estes valores, maior é a regularidade de transferência de metal verificada no curto-circuito.

Tabela 2.2 - Equacionamentos para estudo de transferências metálicas (SANTOS, 1995).

Um arco é considerado estável quando o escoamento de calor é uniforme e a deposição do material de adição é regular em face dos fenômenos transientes que ocorrem durante a transferência Wegrzyn (1980). Analisando o arco do ponto de vista da estabilidade, quanto menor a gota, mais estável é o arco. Segundo Brandi (1988), quanto menor a gota, maior sua temperatura. Como a gota também transporta energia, isso aumentaria a temperatura da poça de fusão, aumentando sua fluidez e dificultando, por exemplo, a

soldagem fora de posição. A influência da transferência de carga elétrica na estabilidade do arco pode ser percebida durante um curto-circuito em CC, onde o comprimento da coluna do arco é nulo, enquanto que a corrente permanece elevada. De acordo com Farias (1993), a avaliação da facilidade de transferência de carga pode ser analisada como a medida do restabelecimento da condutividade elétrica da coluna do arco, o que também depende da fonte de energia. Por outro lado, as causas da desestabilização do arco, segundo Brandi (1988), citando Ludwig (1933), pode ser entendida como a perturbação da emissão de elétrons na mancha catódica, **Figura 2.6**, devido ao transiente que ocorre durante a interrupção do arco ou a uma diminuição no gradiente de tensão na coluna do arco que dificulta a sua ionização.

A estabilidade de um arco pode ser avaliada de várias formas quer seja pelo som oriundo da solda, pelo comportamento da tensão do arco, pelo formato do cordão, ou ainda pelo nível de salpicagem.

A avaliação do arco pela sua aparência ou ruído, é feita de uma forma macroscópica. Isto é, um eletrodo que permite soldagens com um arco geometricamente constante, com níveis de ruídos homogêneos e poucos salpicos pode ser considerado um eletrodo de arco estável. Porém, como se sabe, estes aspectos são influenciados enormemente pelo tipo de revestimento, transferência do metal e tipo de corrente (FARIAS et. al., 1984). Desta forma, somente equipamentos de alta sensibilidade pode detectar as diferenças nos níveis de ruído entre diferentes arcos de soldagem ou até mesmo a presença de ruídos externos, dificultando sobremaneira uma avaliação mais precisa da estabilidade do arco.

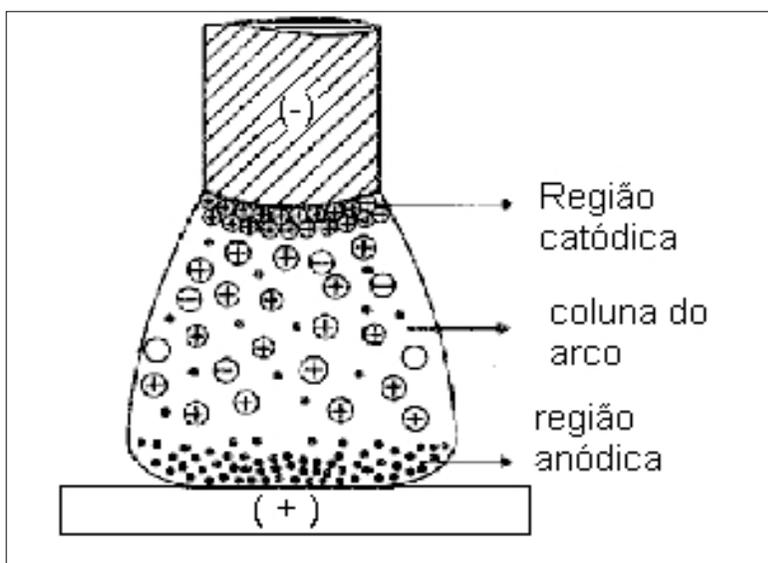


Figura 2.6 - Exemplo de coluna de arco com as respectivas manchas catódica e anódica.

Sob este aspecto, técnicas computacionais mais modernas, como a utilização de redes neurais, tem sido exploradas objetivando contornar estes problemas porém ainda sem sucesso (BURGER, 1992).

Uma outra forma de avaliação é pelo valor de tensão do arco, onde alguns consideram que os eletrodos que trabalham com menor tensão do arco, incluindo a tensão inicial para abertura, tem arco mais estável.

A explicação estaria no fato de que uma menor tensão de arco para as mesmas condições implica em uma atmosfera mais fácil de ionizar (FARIAS et. al., 1984).

Hoje, sabe-se que um fator muito importante que governa a estabilidade, é a característica dinâmica do arco, isto é, o comportamento da tensão com o tempo. Um arco para se tornar estável deve manter sua coluna ionizada mesmo quando por motivos tais como, soldagem em CA ou transferência por curto circuito, a tensão atinja durante curtos intervalos de tempo, valores insuficientes para mantê-lo aberto. A reignição será tão mais fácil quanto maior o grau de ionização em que se mantiver o arco. A estabilidade estaria, pois, relacionada com a facilidade de reignição.

Dentro os mecanismos influentes na estabilidade do arco de eletrodos revestidos, as transferências metálicas assumem um papel fundamental, principalmente quando a soldagem é realizada em corrente contínua (POKHODNYA et. al., 1983). Assim sendo, mudanças nos valores instantâneos da corrente e tensão de soldagem, também chamadas de representação funcional, podem ser utilizadas para avaliar o tipo de transferência metálica que está ocorrendo e a estabilidade do arco.

No mecanismo de transferência por spray com soldagem em corrente contínua a temperatura na coluna do arco pode ser considerada estável. Na condição de curto-circuito, a temperatura de fusão do eletrodo varia continuamente, e parece improvável que os gases e vapores na coluna do arco estejam em equilíbrio (WEGRZYN, 1980). A temperatura dos gases na coluna do arco flutua mais ou menos em relação à duração do curto-circuito.

Na soldagem com eletrodo revestido, o modo mais comum de transferência metálica conforme relatado anteriormente é o curto-circuito (BRANDI, 1988). Para haver curto-circuito a gota deve ter tamanho relativamente grande comparado com o comprimento do arco. No momento do curto-circuito, o arco é interrompido causando uma instabilidade no mesmo. Sob este mesmo ponto de vista, Pokhodnya et. al. (1983) afirmam que quanto *menor* a corrente de abertura ou *maior* a tensão de abertura, mais instável é o arco. Além disso, quanto maior o tempo de curto-circuito, mais instável é o arco. Estes autores ainda afirmam

que o tempo de curto circuito é diretamente proporcional ao tamanho da gota transferida. Portanto, quanto maior o tamanho da gota, mais instável é o arco.

Quando a soldagem é fora de posição, o arco deve ser o mais estável possível para que o soldador consiga realizar a solda sem muita dificuldade.

No caso de eletrodos revestidos tem-se duas situações antagônicas. A soldagem fora de posição é feita preferencialmente por transferências do tipo curto-circuito e, portanto, com gotas grandes. Por outro lado, o arco elétrico é mais estável para gotas pequenas.

Com o eletrodo revestido ocorre a explosão de bolhas de gás no interior da gota que pode diminuir o tamanho da gota mas gerar um transiente que influi na estabilidade do arco. Quanto maior a quantidade de respingos, maior a possibilidade da deposição do material de adição ser irregular, conseqüentemente deixando o arco mais instável.

Portanto, para se avaliar a instabilidade do arco deve-se levar em conta, também, tanto o tamanho da gota, quanto a quantidade de respingos, conforme afirma Brandi (1988). A situação ideal seria o menor tamanho de gota possível com a menor quantidade de respingos. Portanto, as variáveis que influem no tamanho da gota e na quantidade de respingos são: diâmetro do eletrodo, tipo de revestimento, corrente de soldagem, polaridade e posição de soldagem.

Santos (1995) citando Bollmann e Rehfeldt (1988), diz que a determinação de parâmetros do arco de soldagem com eletrodos revestidos, os quais podem ser obtidos dos oscilogramas da tensão e corrente de soldagem, contém informações sobre fatos físicos da coluna do arco, tais como emissão de elétrons, transferência metálica e condutividade.

Assim, uma completa análise do processo de soldagem permite afirmações objetivas e quantificadas a respeito de:

- transferência metálicas
- comportamento da reignição após o curto circuito
- estabilidade do arco
- soldabilidade em corrente alternada.

Estes autores afirmam que o processo de soldagem a arco é mais estável se este queimar sem grandes movimentos espontâneos e deflexões, os quais produzem altas variações na tensão de soldagem. Deste modo, o desvio padrão e o fator de variação da tensão média do arco podem ser usados como medida do grau de estabilidade do arco.

Farias et al (1984), estudando vários critérios de avaliação da estabilidade do arco voltaico, concluiu que a análise através da característica dinâmica do arco, que é definida

como o comportamento da tensão e corrente durante a variação no tempo, permite verificar o quanto varia a energia consumida pelo arco no decorrer do tempo, analisando-se a condição de regime térmico do mesmo. Estes autores propuseram um índice para avaliar a estabilidade em corrente alternada, cuja equação é mostrada na **equação 2.3**.

$$B_i = \frac{2\pi f_i I_1}{V_1 \left[\arcsen \frac{V_1}{\sqrt{2V_{oc}}} + \psi \right]} \quad (2.3)$$

onde, B_i - Índice de estabilidade [$\Omega^{-1}s^{-1}$]; f_i - Frequência da corrente (Hz); I_1 - Corrente no momento da reignição do arco (A); V_1 - Tensão de reignição do arco (V); V_{oc} - Tensão em vazio (V); ψ - ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão em vazio (graus).

Farias et. al. (1984) estabelece que quanto maior o valor de B , maior será a estabilidade do arco, e este índice cresce com a corrente, frequência, valor eficaz da tensão em vazio, e decresce com a tensão de reignição e ângulo de defasagem.

Em suma, a análise da flutuação do grau da voltagem, corrente, número e duração dos curtos-circuitos, medidos através de oscilogramas, possibilitam avaliar a estabilidade do arco. Tais análises propiciam não só a avaliação da magnitude da variação, mas a exata forma de onda de variação, indicando ainda o número de curtos-circuitos presentes e a correspondente mudança na corrente do arco. Como extensão deste tipo de análise, a própria utilização de FFT (Fast Fourier Transform) pode conduzir a informações importantes do comportamento da soldagem como observado por Chawla (1992). Este fato possibilita um completo estudo estatístico dos valores da voltagem e corrente de soldagem, sendo esta uma das metodologias a serem aplicadas neste trabalho.

2.7 Aspectos Econômicos da Soldagem com eletrodos revestidos

O consumo, a produção e o rendimento de deposição caracterizam os aspectos econômicos da soldagem com eletrodos revestidos. De acordo com Santos (1995) citando Farias (1993), estes aspectos dependem do tipo de eletrodo, do tipo da fonte de energia e dos demais parâmetros de soldagem. O consumo real do eletrodo ou taxa de fusão (TF) é maior que a produção de material de adição ou taxa de deposição, devido as perdas nas transferências de massa, principalmente aquelas geradas por formação de respingos.

A taxa de fusão (TF) representa a quantidade material da alma fundida enquanto que a taxa de deposição (TD) representa a massa de material depositada durante um determinado tempo de soldagem. Desta forma, o rendimento de deposição real (RD) está relacionado com

a quantidade de material perdido por salpicos ou pela escória, e a quantidade de metais contidos no revestimento transferido para a solda, sendo calculada pela relação entre produção e consumo do eletrodo expressa em porcentagens. Este tratamento foi utilizado neste trabalho.

Conforme mostrou-se anteriormente, os fatores que mais influenciam o consumo do eletrodo são o seu diâmetro e a composição química da alma, a polaridade e a intensidade de corrente utilizada.

Segundo Quites e Dutra (1979a), quanto maior a energia de ionização da atmosfera do arco para eletrodos revestidos, com comprimentos de arco iguais, maior será o consumo do eletrodo, maior a frequência de passagem de gotas do eletrodo para a peça, e menor será o diâmetro médio das mesmas.

Outro fator importante já mencionado, é a viscosidade superficial da gota que impede a separação da mesma da ponta do eletrodo, necessitando-se de correntes mais elevadas para ocorrer a transferência. Assim sendo, quanto maior for o teor de gás dissolvido no interior da gota, menores serão as forças viscosas, e em consequência, maior será o consumo do eletrodo. Desta forma, o tipo de revestimento do eletrodo exerce influência na transferência, de acordo com Quites e Dutra (1979b).

Estes autores afirmam ainda que, quando eletrodos trabalham na mesma faixa de corrente, o rutílico apresenta maior produção, embora o eletrodo básico com pó de ferro apresente produções maiores porque permite correntes mais elevadas. Já o eletrodo celulósico apresenta menores produções, embora o consumo seja intermediário entre o rutílico e o básico. Isto se deve provavelmente pela grande quantidade de salpicos gerados por este eletrodo, causando baixo rendimento de deposição metálica.

O eletrodo rutílico E6013 produz o arco mais estável e baixo nível de respingos por causa do pequeno tamanho das gotas transferidas. A presença de titânio ou rutila (TiO_2) em seu revestimento, faz com que o mecanismo de transferência envolvido seja menos por spray do que para os eletrodos ácidos. A rutila é reconhecida como um mineral que estabiliza melhor o arco do que o aço e o minério de manganês, mas as diferenças não são grandes Wegrzyn (1980).

Para o eletrodo básico E7018, Brandi et. al. (1991) mostram que a polaridade tem efeito contrário nos diâmetros característicos das gotas transferidas. Isto acontece devido a composição do fluxo do revestimento e reações químicas que ocorrem entre o metal e a ponta fundida do eletrodo. Wegrzyn (1980) afirma ainda que a presença de carbonato de flúor (CaF_2) no revestimento, causa um decréscimo do ponto de fundição e da viscosidade da

escória, sendo que a presença de fluoritas, soldando na polaridade negativa, a voltagem do arco e o espalhamento aumentam.

Para o eletrodo celulósico, Brandi et. al. (1991) diz que a polaridade é a variável que mais afeta o tamanho das gotas transferidas, bem como a quantidade de respingos. Wegrzyn (1980) salienta que estes eletrodos possuem em seu revestimento mais de 30% de celulose. Este tipo de eletrodo produz predominantemente gases tais como CO e CO₂. Esta grande quantidade de gases produzidos pelo revestimento associada à presença de grandes quantidades de sílica (SiO₂) e a menor presença de alumina (Al₂O₃) faz com que a voltagem do arco alcance 50V, favorecendo penetrações profundas.

De fundamental importância na determinação dos fatores econômicos que influenciam em uma soldagem é a formação de respingos. De acordo com Santos (1995) referindo-se a Farias (1993), incluindo Brandi (1988) as principais fontes de respingos na soldagem a arco voltaico são:

- Evolução dos gases: explosão da gota e/ ou da poça de fusão;
- Curto circuito ou desintegração explosiva do "pescoço" (efeito "constricção", devido às forças de compressão na transferência por curto-circuito);
- Desintegração da gota devido ao tamanho excessivo;
- Transferência irregular de metal devido a movimentação das manchas catódicas e anódicas;
- Impacto do arco sobre a poça de fusão no instante de sua reignição após curto-circuito;
- Choque das gotas na poça de fusão e
- Instabilidade do arco devido a presença de íons negativos (íons negativos de flúor por exemplo), que barram o fluxo de elétrons.
- Quanto menor a viscosidade da gota, maior a quantidade de respingos

Pode-se reduzir as perdas por respingos na soldagem com eletrodos revestidos controlando-se a composição do revestimento, de modo a garantir o efeito "canhão", ou, quando possível, ajustando a indutância da fonte de soldagem, de modo que a taxa de crescimento da corrente no momento do curto-circuito seja tal que não haja o crescimento violento da temperatura na região do "pescoço" (SANTOS, 1995). Este procedimento vem sendo aprimorado por meio do desenvolvimento de circuito, adaptados às fontes de energia, que controlam a variação da corrente durante o curto circuito (FARIAS, 1993). Para um determinado tipo de eletrodo e fonte de soldagem, pode-se, ainda, reduzir a quantidade de respingos pela seleção correta dos parâmetros de soldagem.

2.8 Aspectos e geometria dos cordões de solda

A geometria do cordão caracterizada principalmente por sua largura, pelo reforço, pela diluição, pela penetração, pela convexidade do cordão, pelas áreas de reforço e de penetração, entre outros influenciam a resistência mecânica da junta soldada, principalmente no limite de resistência à fadiga (FARIAS, 1993).

A penetração da solda é maior, quanto maior for a concentração e intensidade de energia e quanto maior for a “escavação” do arco. A concentração de energia é função do diâmetro do arco, e este é tanto menor, quanto menor for o seu comprimento, maior sua condutividade térmica e menor o diâmetro do eletrodo (FARIAS, 1993). A intensidade de energia aumenta a medida em que aumenta a corrente e diminui a velocidade de soldagem para a mesma atmosfera do arco.

De acordo com Farias (1993), citando Lancaster (1971), a penetração na soldagem é gerada basicamente da pressão exercida pela força do arco sobre a poça fundida, a qual comprime a superfície líquida para uma penetração profunda. Essa força resulta da inércia de um fluxo de gotas metálicas ou de um jato de gás colidindo com a poça de fusão, ou uma combinação dos dois mecanismos (SANTOS, 1995). Normalmente para qualquer intensidade de corrente, a penetração é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e ao diâmetro do eletrodo.

A largura do cordão de solda é tanto maior quanto maior for o diâmetro do arco e menor a viscosidade e tensão superficial da escória. Ela é inversamente proporcional à velocidade de soldagem e diretamente proporcional à tensão de soldagem e ao diâmetro do eletrodo, os quais afetam a área sobre a qual a força do arco é dissipada. A influência da corrente de soldagem, comprimento do eletrodo e composição do fluxo na largura do cordão é mais difícil de determinar. Geralmente em CC, a largura aumenta com a corrente até um valor crítico, a partir do qual começa a diminuir. Em CA verifica-se pouco efeito da corrente sobre a largura da solda (FARIAS, 1993).

Com relação ao reforço, sua forma é determinada pela largura da poça de fusão, pelo volume de metal adicionado, pela pressão hidrostática sobre o metal líquido, pela presença de escória e, em correntes elevadas, pela velocidade de movimentação do metal líquido. O reforço do cordão de solda aumenta com a redução do diâmetro do arco, com o aumento da área adicionada da solda, da viscosidade e tensão superficial. Logo independe do tipo de corrente e polaridade, e é diretamente proporcional à corrente de soldagem. Reduções na tensão, velocidade de soldagem e no diâmetro do eletrodo aumentam o reforço do cordão de

solda. Experimentos tem comprovado que o reforço é maior em CC- e menor em CC+, com valores intermediários em CA (FARIAS 1993).

A área da seção transversal do cordão de solda (S) é diretamente proporcional à corrente de soldagem e inversamente proporcional à velocidade de soldagem e ao diâmetro do eletrodo. De acordo com Farias (1993), não há relação bem definida entre a área da solda e o comprimento do eletrodo. Assim sendo, pode-se ver que muitos fatores afetam direta ou indiretamente as características geométricas do cordão de solda. Dentre eles estão a composição dos gases e fluxos, e a composição química do metal de base. Estes fatores podem afetar significativamente a tensão de soldagem, a configuração e a estabilidade do arco, a função de trabalho das superfícies do cátodo e ânodo, além de influenciarem nas propriedades físicas dos gases e escórias, no tipo de transferência de metal de adição e na força do arco de acordo com Santos (1995) citando Farias (1993).

O calor gerado na coluna do arco depende da corrente e tensão de soldagem. Logo, quanto maior a corrente ou tensão, maior a quantidade de calor gerado e maior a quantidade de material de base fundido, conseqüentemente, maior a zona termicamente afetada (ZTA).

2.9 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Na revisão bibliográfica, procurou-se fazer um apanhado geral sobre as publicações científicas mais significativas do processo com eletrodos revestidos bem como dos fatores associados à estabilidade do arco e formas de transferências metálicas, dos métodos de aquisição de dados. Mostrou-se também alguns aspectos econômicos da soldagem, utilizando-se conceitos de produção, consumo e rendimento de deposição para eletrodos revestidos.

A concentração da revisão nestes itens foi devido à necessidade de se desenvolver uma metodologia de análise baseada na utilização do coeficiente de variação da tensão (CV) e na aplicação das Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) para este fim. Para a aplicação desta metodologia e para forçar o aparecimento dos vários tipos de transferências, foi necessário o desenvolvimento de um protótipo para soldagens automáticas com eletrodos revestidos, sendo os dados obtidos, comparados com a soldagem manual (feita por soldador). A construção do banco de ensaios é apresentada no capítulo 4. Ressalta-se também as dificuldades em se encontrar publicações científicas referentes a estudos comparativos sobre eletrodos revestidos no que concerne a tratamentos econômicos.

A seguir, no capítulo três, será desenvolvida a metodologia de análise baseada nas Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) e no Coeficiente de Variação (CV)

Assim sendo, as qualidades superficiais do cordão de solda, a análise dos oscilogramas de tensão e corrente para identificar a estabilidade do arco bem como o provável tipo de transferência presente, a área de penetração da solda, o rendimento de deposição metálica e as Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) serão utilizadas principalmente nas análises dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 3

COMPARAÇÃO ENTRE SOLDAGENS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VARIAÇÃO DA TENSÃO

Em soldagem muitas avaliações estatísticas são necessárias para se realmente extrair o verdadeiro significado, nem sempre aparente, de determinadas influências de variáveis diretamente no processo. Tais avaliações são imprescindíveis quando se trabalha com sinais dinâmicos, sujeitos a diferentes perturbações. Nestes casos, além dos aspectos estatísticos deve-se também procurar a utilização de novas ferramentas que permitam retrabalhar estes sinais e processá-los de tal forma a gerar novas informações antes imperceptíveis. Tais ferramentas podem ser adaptadas através da utilização de transformadas rápidas de Fourier e consequentemente de filtros digitais possibilitando criar novas potencialidades para análises de sinais dinâmicos. Nos itens seguintes, estas considerações serão avaliadas no sentido de poder utilizá-las para, num primeiro momento, permitir comparações entre soldagens e, numa segunda fase, realizar estudos comparativos entre diferentes tipos de transferências metálicas obtidas de soldagem com diferentes tipos de eletrodos revestidos, bem como avaliações econômicas.

3.1 Coeficiente de Variação (CV)

O coeficiente de variação é um importante índice estatístico para análise de sinais flutuantes. Para melhor entendimento de como se interpreta o coeficiente de variação, imagine dois grupos de resultados obtidos para a tensão durante uma soldagem qualquer. No primeiro grupo, os resultados obtidos através da aquisição de dados foram:

$$3,1 \text{ e } 5 \text{ V} \quad \bar{X} = 4,05V$$

e no segundo grupo os resultados obtidos foram:

$$55, 57 \text{ e } 53 \text{ V}$$

No primeiro grupo, a média dos resultados obtidos é 4,05 V e no segundo grupo, a média dos resultados é 55 V. Nos dois grupos a dispersão dos dados é a mesma. Ambas têm variância $S^2 = 4$. Mas a diferença de 2 V são mais importantes no primeiro grupo, que tem média 3, do que no segundo grupo que tem média 55.

Agora vejamos os coeficientes de variação:

No primeiro grupo o coeficiente de variação (CV) é:

$$CV = 2/3 = 0,6667$$

No segundo grupo o coeficiente de variação (CV) é:

$$CV = 2/55 = 0,0364$$

Um coeficiente de variação igual a 0,6667 indica que a dispersão dos dados em relação à média é muito grande, ou seja, a dispersão relativa é alta. Já um coeficiente de variação de 0,0364 indica que a dispersão dos dados em relação à média é pequena. Em outras palavras, a diferença de 2 V são relativamente mais importantes no primeiro grupo, que tem média 3 (o coeficiente de variação é 0,6667), do que no segundo grupo, que tem média 55 (o coeficiente de variação é 0,0364). Então, o coeficiente de variação mede a dispersão em relação à média.

Portanto, um resultado ideal significa ter uma dispersão em relação à média muito pequena, o que significa dizer, que a curva é estável, não tendo grandes oscilações e diferenças de amplitude e deste modo o coeficiente de variação tenderia a zero, que é o ideal. No caso da soldagem, de posse da característica dinâmica da tensão, que representa melhor a variação do comportamento do arco que a corrente, tal análise poderia ser feita para se avaliar a estabilidade da soldagem utilizando diferentes eletrodos onde um menor coeficiente de variação (razão entre o desvio padrão e a média das medidas) certamente garante uma melhor estabilidade do arco de soldagem. Este conceito foi aplicado neste trabalho caracterizando a metodologia para avaliação de soldagens, melhor explicada a seguir:

Foi verificada a aplicabilidade desta técnica de análise no controle da tensão via filtragem dos sinais no domínio da frequência para eliminar-se as interferências provocadas pelos tipos de transferências. Esta técnica foi aplicada na comparação entre soldagem automática e manual, sendo os resultados apresentados e analisados no capítulo 6.

3.2 Coeficiente de variação da tensão de soldagem como forma de avaliação de soldagens

É conhecido que a melhor forma de se avaliar um arco em soldagem é pelo controle de seu comprimento de arco. Sabe-se também que o comprimento do arco é proporcional a tensão de soldagem, isto é, quanto mais próximo o soldador estiver soldando do material base, menor será o valor da tensão de soldagem correspondente. Obviamente que nem sempre o registro puro e simples do valor da tensão num instante qualquer traduz o comprimento do

arco real, já que outros tipos de influência também ocorrem, como por exemplo, o tipo de transferência de gotas.

Considerando a característica dinâmica da tensão, isto é, o registro das variações de tensão como uma função do tempo, poderíamos afirmar que quanto menor for o desvio padrão da tensão média de soldagem e, conseqüentemente, menor coeficiente de variação (σ/V_m), teoricamente melhor poderá ser o cordão de solda gerado por um sinal mais estável mantido pelo equipamento de soldagem. Entretanto, muitas vezes tais resultados obtidos para o coeficiente de variação são mascarados pelos tipos de transferências que ocorrem durante a soldagem, já que o desvio padrão do sinal em relação a média (σ) aumentaria significativamente. Os sinais devem, portanto, serem filtrados para se poder ter um parâmetro comparativo entre sinais sob diferentes condições considerando o aspecto de constância do sinal base em relação ao tempo. Para ilustrar tal fato, pode se observar da **Figura 3.1**, onde o comportamento dinâmico da tensão é registrado durante uma soldagem realizada por simples deposição, a qual será denominada de *soldagem A*. Neste gráfico nota-se uma série de picos de tensão ocasionados por variações nos modos de transferências de gotas. Estes picos influenciam no desvio padrão obtido e, em conseqüência, no coeficiente de variação da tensão, porém não permite nenhuma análise com relação ao comportamento base do arco. Caso se deseje implementar um sistema eficiente para avaliação do comportamento base do arco e em conseqüência permitir avaliações de equipamentos sob o ponto de vista de estabilidade será necessário utilizar sistemas de filtragens que possam eliminar tais influências. Isto pode ser realizado através da utilização de filtros digitais obtidos através de transformadas rápidas de Fourier. A utilização de filtros passa-baixa com frequências de corte pré-determinadas podem eliminar tais desvios nos valores da tensão ocasionados por diferentes tipos de transferências.

Aplicando uma filtragem digital através de filtros passa-baixa com frequência de corte de 4 Hz na curva de tensão observada na **Figura 3.1** é possível gerar-se o sinal mostrado na **Figura 3.2**. Observa-se, com a filtragem, um comportamento mais constante da tensão e uma redução substancial do desvio padrão das amostras, que neste caso reduziu de 4,95 (**Figura 3.1**) para 0,81 (**Figura 3.2**), o mesmo acontecendo para o coeficiente de variação que reduziu de 0,32 (**Figura 3.1**), para 0,05 (**Figura 3.2**).

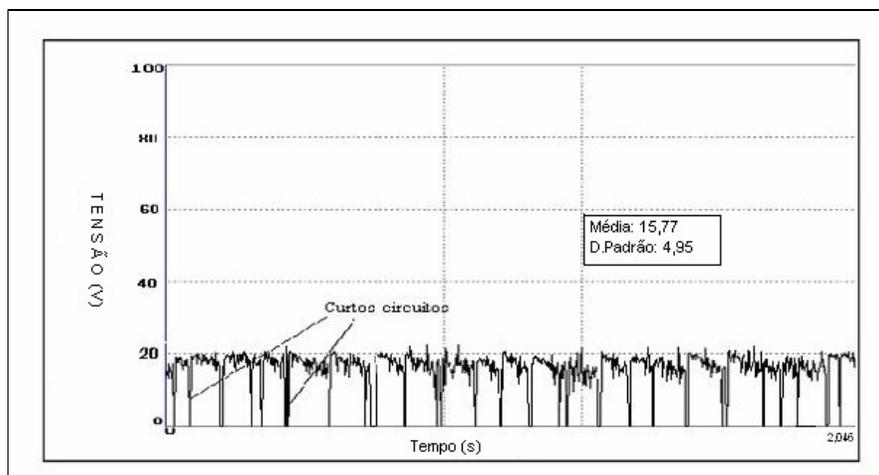


Figura 3.1 - Variação da tensão para a soldagem A - CV = 0,32

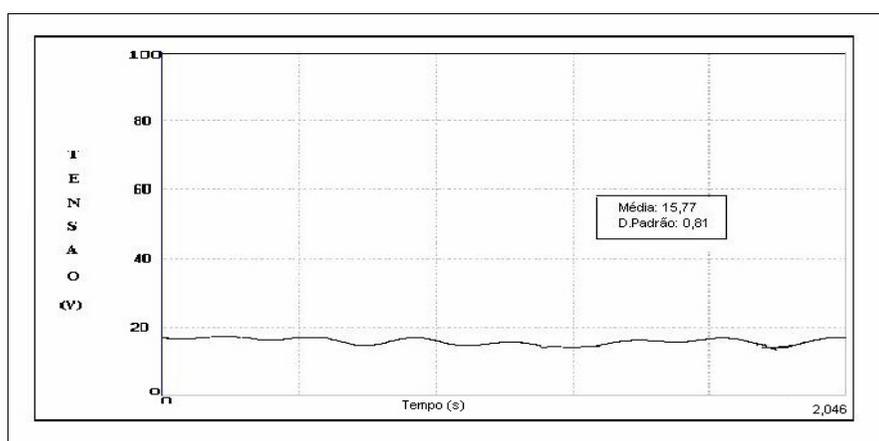


Figura 3.2 - Análise FFT da variação da tensão para a soldagem A - CV = 0,05

Para uma discussão mais geral da metodologia anteriormente descrita considere-se agora uma *soldagem B*, representada pela **Figura 3.3**, a qual após filtragem digital através de um filtro passa baixa com frequência de corte de 4 Hz gerou o comportamento mostrado na **Figura 3.4**.

Através de uma análise preliminar das *soldagens A e B* nota-se que, pelo comportamento da tensão dinâmica, a *soldagem A* mostrou-se mais estável que a soldagem B. Entretanto quando se considera a análise do coeficiente de variação, observa-se que a *soldagem B* com CV de 0.28 e a *soldagem A* com CV de 0.32 nos indica que sob este ponto de vista a *soldagem B* se mostra mais estável que a *soldagem A* indicando assim um resultado impreciso e não compatível com a realidade. Por outro lado, após a filtragem dos dados observa-se uma diferença bastante nítida entre as *soldagens A e B*, sendo que tanto o desvio padrão quanto o coeficiente de variação para a soldagem A se apresentou muito inferior aos

valores obtidos para a *soldagem B*, ou seja, 0,81- 4,71 volts para o desvio padrão e 0,05 – 0,21 para o coeficiente de variação respectivamente para as soldagens A e B.

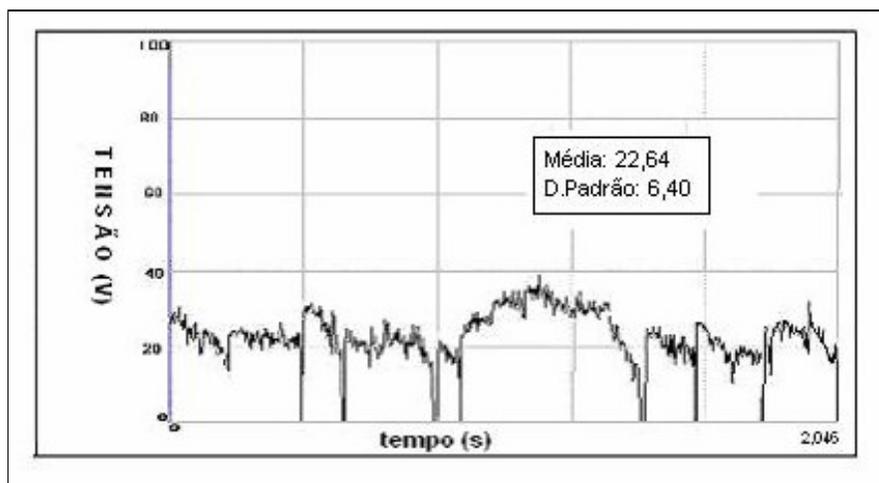


Figura 3.3 - Variação da tensão para a soldagem B; CV = 0,28.

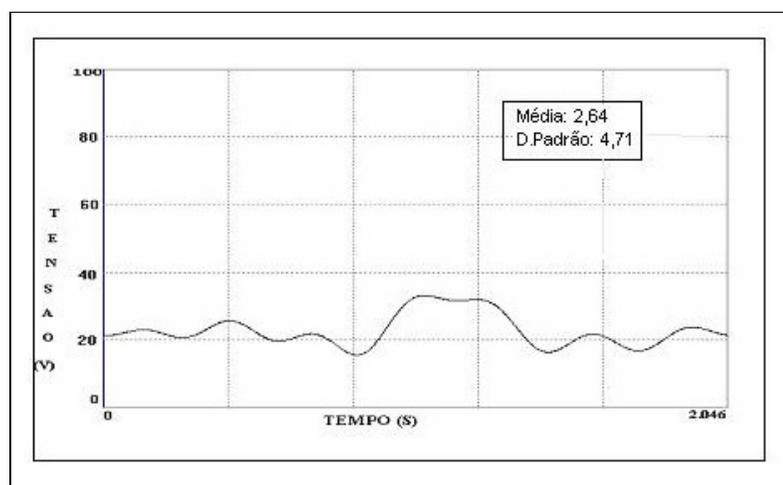


Figura 3.4 - Análise FFT da variação de tensão para soldagem B; CV = 0,21

Assim, pode-se notar que a soldagem A mostrou um desempenho muito melhor que a soldagem B. Tal resultado é reforçado pelo formato das curvas das características dinâmicas de tensão representadas nas *Figuras 3.2 e 3.4*, onde se percebe visualmente o comportamento mais estável obtido pela soldagem A, comparativamente com a soldagem B.

Com base nos aspectos expostos, este trabalho procura estender a metodologia de avaliação do coeficiente de variação na comparação entre soldagens com diferentes tipos de eletrodos revestidos baseado no conceito de estabilidade de arco bem como os seus reflexos sobre a qualidade e produtividade da solda. Para isto este trabalho foi dividido em três partes. Na primeira parte foi necessário realizar a montagem de um protótipo para a execução de

soldagens automáticas que permitissem monitorar os parâmetros de soldagem sem a interferência do fator humano na execução das soldas. Numa segunda etapa procurou-se comparar a estabilidade das soldagens executadas automaticamente com soldagens manuais sob as mesmas condições, comparações estas feitas com base na análise do comportamento dinâmico da tensão e coeficiente de variação através da utilização de filtros digitais e aplicáveis a diferentes tipos de eletrodos. Na terceira etapa foram avaliadas as influências de alguns parâmetros nos aspectos geométrico e produtivo do processo para três diferentes tipos de eletrodos.

CAPITULO 4

DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Banco de Ensaios

Para atender aos objetivos especificados houve necessidade de se idealizar um banco de ensaios que pudesse permitir a simulação e testes das variáveis a serem estudadas. O banco de ensaios foi na realidade subdividido em duas etapas, ou seja, uma etapa que correspondia a um banco com soldagem automática e outra etapa correspondente a um banco para soldagem manual. Na verdade, a distinção entre soldagem automática e manual corresponde apenas na forma de realização das soldas, sendo no primeiro caso realizada por um protótipo de máquina especialmente desenvolvido para isto e no segundo caso por um soldador. O restante do banco foi considerado o mesmo para todas as etapas e consistiu basicamente de uma fonte retificadora de soldagem de um sistema de aquisição de dados e um sistema projetor do arco. As soldagens foram realizadas sobre corpos de prova colocados sobre um carro de velocidade variável (“tartaruga”), utilizando testes de simples deposição sobre chapas conforme esquema mostrado na *Figura 4.1*.

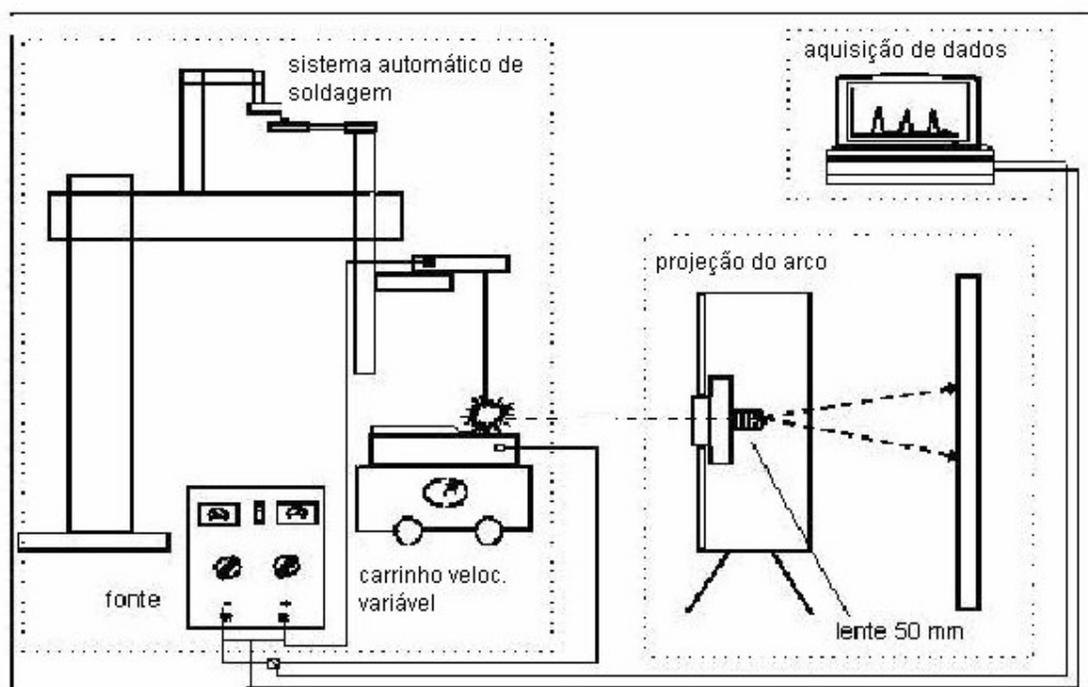


Figura 4.1 - Esquema do banco de ensaios com o conjunto eletro-mecânico.

Como equipamento base para este trabalho foi utilizado uma fonte de soldagem retificadora tipo RS 425 NM, fabricante White Martins, com capacidade de 45 A a 425 A e tensão em vazio de 80 volts.

Para a aquisição e o processamento dos dados foi utilizado um sistema de aquisição denominado “Arc-Mate”, o qual permitiu o registro da tensão e da corrente de soldagem durante a execução dos testes e sua posterior filtragem através da utilização de um gerador de FFT para eliminação das frequências indesejáveis e sua posterior reconstituição do sinal no tempo.

Como um dos parâmetros do processo foi o comprimento do arco, houve a necessidade de desenvolvimento de um sistema de projeção mostrado na **Figura 4.2**, constituído por uma lente de projetor de slide de 50 mm acoplada a um suporte de madeira. O sistema permitiu a projeção do arco em um anteparo colocado a 2 metros da lente. Para esta distância a escala de projeção foi de 1/15mm, ou seja, 1mm de comprimento de arco corresponde à 15mm de projeção no papel quadriculado de 10 em 10 mm. A lente foi colocada a 100 mm do cordão de solda.

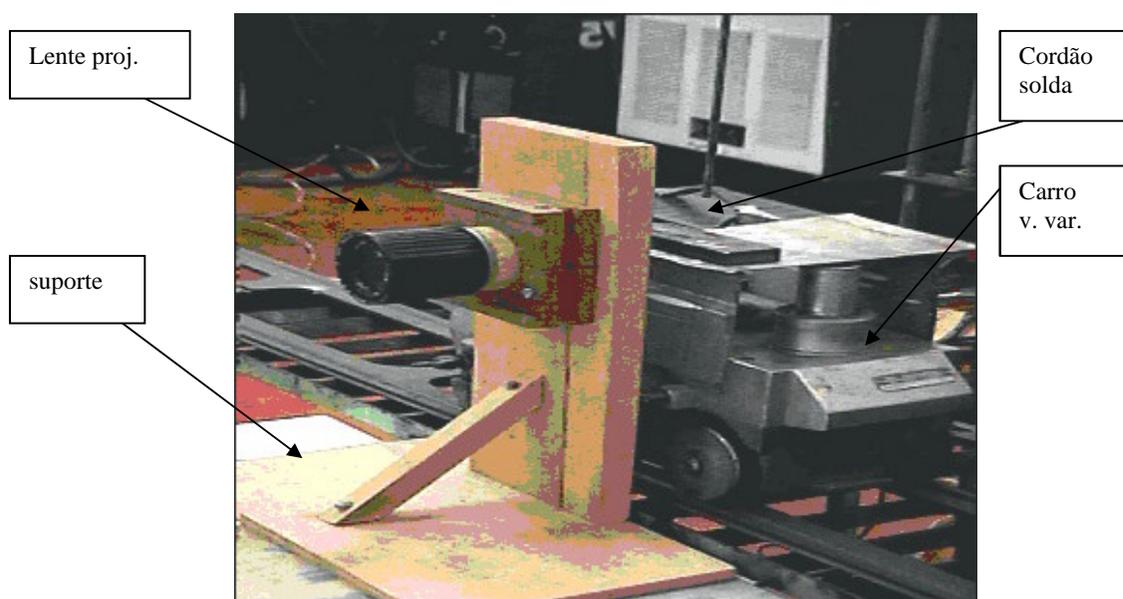


Figura 4.2 - Sistema de projeção do arco.

Independente do tipo de acionamento utilizado, a velocidade de descida do eletrodo foi controlada através de uma fonte de corrente contínua, com possibilidades de variação da tensão de 0 a 25 Volts e de corrente de 0 a 2 A, a qual permitiu ajustes precisos na alimentação do eletrodo e, conseqüentemente, controle no comprimento do arco de soldagem.

Para esta alimentação do eletrodo procurou-se desenvolver um sistema de acionamento que garantisse uma descida suave e controlada sobre a poça de fusão, característica esta necessária para se controlar o comprimento do arco e forçar o aparecimento dos vários tipos de transferências metálicas. A seguir são descritas as várias tentativas de desenvolvimento de um sistema de acionamento da alimentação do eletrodo.

4.2 Sistema de acionamento da alimentação do eletrodo

Para a montagem do sistema de acionamento foi utilizada uma estrutura básica de ferro, em L, que serviu de base para os tipos de acionamentos testados. Várias opções de acionamento foram consideradas analisando-se sua viabilidade de utilização para o propósito deste trabalho. Em função do grande esforço despendido nesta fase, a seguir far-se-á uma breve descrição dos tipos utilizados bem como as avaliações decorrentes de sua utilização para atender os objetivos requeridos.

4.2.1 Acionamento Hidráulico-Pneumático

Inicialmente utilizou-se um sistema de acionamento hidráulico-pneumático (hydro-check) mostrado na *Figura 4.3*. O hydro-check impõe um controle hidráulico totalmente regulável ao movimento de avanço do cilindro pneumático, eliminando vibrações e trepidações, sendo que pode ser montado em qualquer posição e ser preparado para regular a velocidade de descida da haste em extensa faixa de controle. O hydro-check utilizado apresentava como características principais uma carga máxima admissível de 575 kg (1200 lb); temperatura máxima de trabalho de 80 °C; velocidade de deslocamento variando de 2,5 cm/min a 18,5 cm/min contendo ainda vedações resistentes aos óleos hidráulicos, sendo este equipamento fabricado pela Scharader Bellows.

Este tipo de acionamento foi descartado, devido ao comprimento da haste do hydro-check ser limitado, impedindo o consumo total do eletrodo e também pelo seu elevado custo. Apesar disto, o comprimento de solda depositado sobre o corpo de prova, mesmo não sendo o comprimento desejado, foi satisfatório. Em função da inadequação do hydro-check, tentou-se ainda improvisar algo que pudesse simular o funcionamento do mesmo, o qual foi feito através da utilização de dois cilindros pneumáticos com óleo hidráulico em partes alternadas dos mesmos (2º projeto hidráulico-pneumático). Entretanto esta idéia também foi descartada devido à dificuldade de se vedar a entrada de ar dentro dos pistões, e não ter-se avanços regulares na haste do eletrodo.

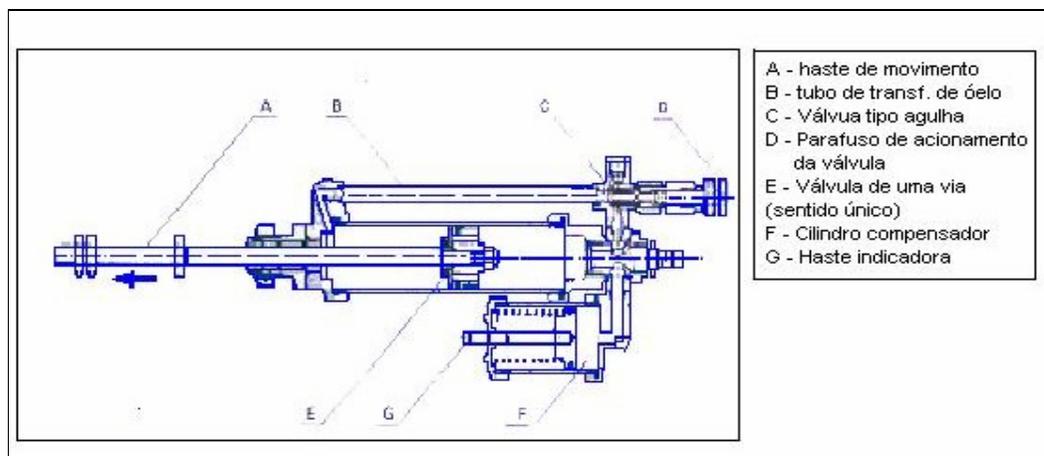


Figura 4.3 - Desenho esquemático do hydro-check.

4.2.2 Acionamento Elétrico

Descartados os protótipos pneumático e hidráulico, que não atenderam satisfatoriamente a manutenção constante do arco voltaico, passou-se à utilização de motor elétrico no lugar dos cilindros hidráulicos. Foram testados três tipos diferentes de motor, sempre utilizando a mesma estrutura em L inicial, sendo que neste caso, foi necessário a inclusão de duas hastes guia e um fuso de 12,7 mm (1/2") para suportar o porta eletrodo, *figura 4.4*.

O sistema foi montado utilizando-se um fuso de 500mm de comprimento e passo da rosca de 2 mm. Foram utilizadas ainda duas guias paralelas ao fuso, um mancal de rolamentos duplos e uma mesa suporte para o conjunto alicate-eletrodo. Este sistema foi utilizado nas três versões que são expostas a seguir, sendo que as únicas diferenças entre elas foram os tipos de suporte para cada motor, e o tipo de relação de acionamento (tamanho das polias motora e movida).

4.2.2.1 Motor de Passo

Foi utilizado um motor de passo de 2°/passo, 1.4 A, 4.5 V, sem a utilização de redução. O motor de passo foi acoplado diretamente no fuso. Foi desenvolvido um circuito eletrônico (através do depto de Eletrônica da UNIFEI), para controle da variação de rotações do motor de passo. Neste caso colocou-se o motor de passo diretamente no fuso para ganho de torque, portanto sem relação de polias. Apesar do sistema proporcionar torque suficiente para um acionamento eficaz do conjunto aliado a uma facilidade de se monitorar os dados de tensão e corrente através de uma interface com o micro computador,

podendo-se utilizar os padrões do Windows, o sistema não conseguiu atingir uma rotação adequada. A limitação deste sistema foi devido à rotação máxima conseguida no motor de passo de 6 rpm, insuficiente para o acionamento do conjunto alicate-eletrodo, que necessita de rotação em torno de 200 rpm. A alternativa de utilizar-se um multiplicador de rotações foi cogitada, mas o motor de passo não teve troque suficiente para acionar o conjunto.

4.2.2.2 Motor elétrico universal marca Singer

Neste projeto foi utilizado a mesma estrutura montada para o motor de passo, diferenciando apenas no tipo de acionamento do conjunto. Foi acoplado o motor Singer de 110V, 0,9 A, 100W e variação de rotação de 0 a 7000 rpm. Neste motor foi acoplado um regulador de tensão “Dimer”, para variar a sua rotação e um inversor de campo magnético. A relação de redução de velocidades foi com polias de 1:10 (polia motora $d = 25\text{mm}$, polia movida $d = 250\text{mm}$). O fato deste motor ter pouco torque à baixa rotação, inviabilizou o experimento. Neste caso, acredita-se que para ter uma montagem do conjunto trabalhando de forma adequado haveria a necessidade de que o sistema de acionamento (guias, fuso e porta eletrodo) deveria trabalhar com o mínimo de atrito possível. Entretanto na prática isto não foi possível mesmo com a utilização de rolamentos colocados nas duas extremidades do fuso.

4.2.2.3 Motor elétrico 12V, c.c. com redutor de 1:40

Foi utilizado neste quarto e definitivo projeto um motor elétrico de “limpador de pára-brisa de automóvel”, com redutor acoplado. A tensão de trabalho deste motor variou de 7V a 12 V com corrente de 2 A. Como este motor já possuía um redutor de 1:40 acoplado, foi necessário utilizarmos um multiplicador de velocidades de 1:4, a fim de ter-se a velocidade em torno de 5 mm/s, constante, necessária para realizar a deposição do eletrodo sobre o corpo de prova, *Figura 4.4*. Paralelamente foi montado um conjunto de chaves tipo liga/desliga em uma caixa para controles de elevação, velocidades e rotação, bem como uma fonte com corrente e tensão variáveis para controle da velocidade do conjunto, permitindo regulagens de 0 a 25 V e corrente de 0 a 2 A (já descrita no ítem 4.1). A *Figura 4.4* mostra a montagem do conjunto final.

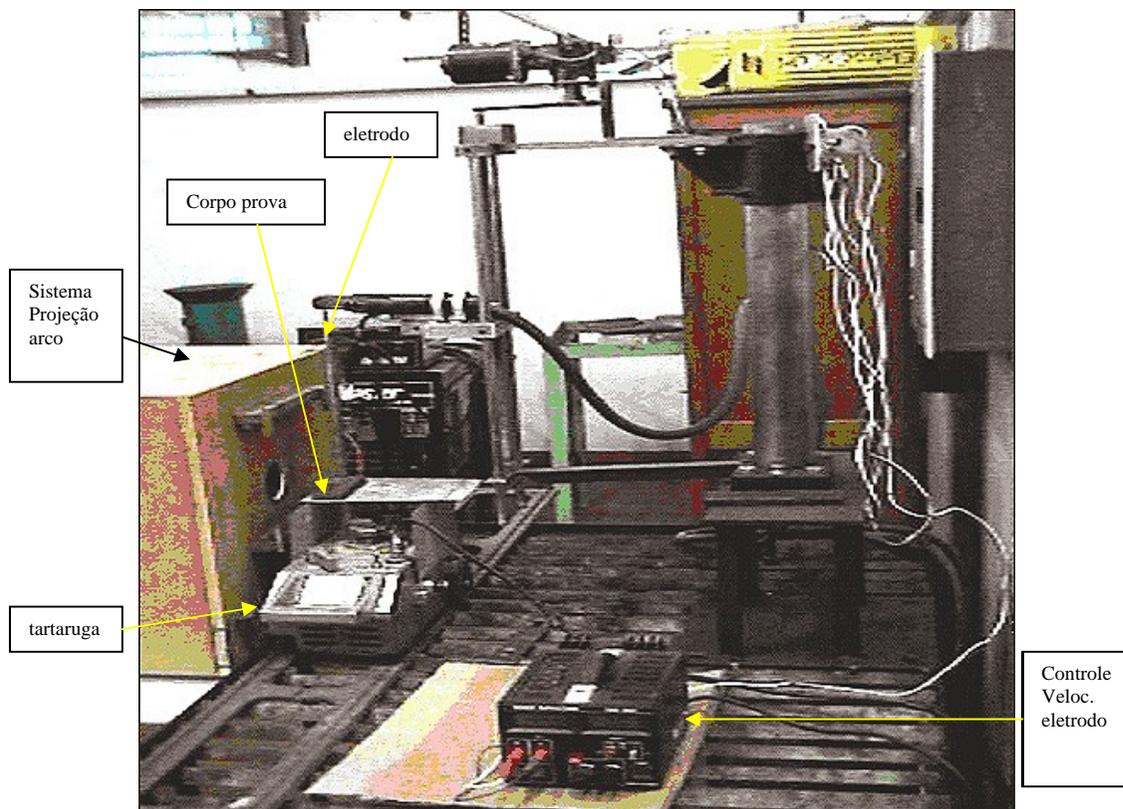


Figura 4.4 - Banco de ensaios para soldagens automáticas.

4.3 Desenvolvimento experimental

Concluído o banco de ensaio, iniciou-se o desenvolvimento experimental. Para este trabalho foram estudados três tipos de eletrodos, ou seja:

- AWS E6010 (celulósico); 3,25 mm; comp. 350 mm; 22 - 28 V; 80 - 140 A CC+
- AWS E6013 (rutílico); 3,25mm; comp. 350mm; 18 - 28V; 80 – 150 A. CC+ e CC-
- AWS E7018 (básico); 3,25mm; comp. 350mm; 20 - 30V; 110 - 150 A. CC+

Os testes foram realizados através de simples deposição de soldagem (teste BOP) sobre corpos de prova de aço carbono ABNT 1020, de dimensões 150 x 40 x 12,5 mm.

Para a aleatorização eficaz dos testes foram utilizadas técnicas de projeto e análise de experimentos, sendo escolhido o fatorial completo (2^k) com uma replicagem onde foram fixados dois níveis para as variáveis, ou seja, um inferior e outro superior. As análises estatísticas obtidas são válidas somente nos intervalos definidos pelas variáveis escolhidas.

As variáveis escolhidas para análise bem como os níveis de estudo estão especificados na **Tabela 4.1**. Vale ressaltar que em função da dificuldade no controle da intensidade de corrente e comprimento do arco, admitiu-se para a fixação dos níveis uma variação conforme explicitado na mesma tabela.

Variáveis	Inferior	Superior
Corrente (A)	(70 ±10) A	(140±10) A
Comprimento do arco (mm)	2±1	6±1
Polaridade	CC-	CC+

Tabela 4.1 – Variáveis com seus respectivos níveis.

A sequência dos experimentos foi definida através do software comercial Minitab cuja matriz é mostrada na **Tabela 4.2**.

Sequência	Corrente de Soldagem	Polaridade	Comprimento do Arco
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	-	-
6	-	-	+
7	-	+	-
8	-	+	+

Tabela 4.2 - Matriz de delineamento fatorial 2^3 , com suas respectivas combinações de variáveis.

Foram executados 72 testes com o protótipo da máquina de soldagem automática para os três tipos de eletrodos. Os testes foram divididos da seguinte maneira: 16 testes para cada um dos três eletrodos estudados, com oito repetições de cada teste, totalizando 48 testes, com velocidade de soldagem de 1,67 mm/s. A seguir foram feitos mais 8 testes com cada tipo de eletrodo (total de 24 testes), com velocidade de 2,33 mm/s, para efeitos de comparação com a soldagem manual.

A segunda etapa do experimento foi realizada com a soldagem manual utilizando-se o mesmo banco de ensaios da soldagem automática, apenas substituindo-se a máquina pelo soldador. O procedimento para fixação do comprimento do arco próximo de 2 mm, com variação admissível em torno de 1 a 2 mm, foi aproximado utilizando-se o equipamento de projeção do arco. Antes de iniciar os testes definitivos, foi feito um teste experimental, onde o soldador treinava a fixação da distância do comprimento do arco em 2 mm. Foram executados 4 testes com velocidade de 1,67 mm/s e 4 testes com velocidade de 2,33 mm/s para cada

eletrodo. Para garantir a velocidade de soldagem, o soldador posicionou-se defronte ao carrinho de soldagem, acompanhando o seu movimento através de uma marca visível. Com estas duas referências, o soldador tentou colocar-se o mais próximo possível dentro dos parâmetros de soldagem pré-fixados.

Como respostas foram definidos os seguintes aspectos associados as características do cordão:

- Características geométricas representadas pela penetração, convexidade do cordão e diluição.
- Características produtivas representadas pela taxa de deposição, taxa de fusão e rendimento da soldagem;
- Características de estabilidade do arco representadas pelo comportamento relativo percentual (coeficiente de variação) da característica dinâmica da tensão após filtragem digital .

Com relação a aquisição de dados, foram feitas as aquisições da tensão e corrente de soldagem, utilizando-se a mesma configuração para todos os casos conforme mostrado na **Tabela 4.3**. A aquisição foi iniciada após a estabilização da soldagem nas condições especificadas e foi realizada através de 5 janelas com intervalo de 4 segundos entre janelas, de tal forma a permitir a aquisição ao longo de todo o cordão.

Número de canais: 02	
Canal: 0 Tensão (V)	Fator de escala 0 : 20
Canal: 1 Corrente (A)	Fator de escala 1 : 100
Taxa de amostragem: 1000 Hz	
Quantidade de janelas de Amostragem: 5	
Quantidade de amostras por janela: 512	
Modo de disparo da aquisição: retardado = 2000 ms	
Modo de disparo entre janelas: temporizado = 4000 ms	

Tabela 4.3 – Configuração da aquisição de dados.

Após a soldagem procedeu-se a retirada da escória, escovamento e pesagem todos os corpos de prova além de se fazer uma primeira análise visual da qualidade superficial do cordão de solda. A seguir os corpos de prova foram seccionados transversalmente em

uma região significativa do cordão, sendo polidos e atacados com nital diluído a 4%. Através da utilização de um projetor de perfil, com ampliação de 10 vezes, foi possível registrar o perfil transversal de cada solda em um papel vegetal e com a utilização de planímetro determinou-se todos os valores geométricos do cordão, tais como, penetração (p), largura (b), altura do reforço (r), área penetrada do cordão (S_p), área de reforço (S_r) conforme esquema mostrado na **Figura 4.5**. No apêndice A são mostrados os resultados das medições gerais de todos os corpos de prova e no apêndice B são mostradas algumas das áreas obtidas através do projetor de perfil em papel vegetal.

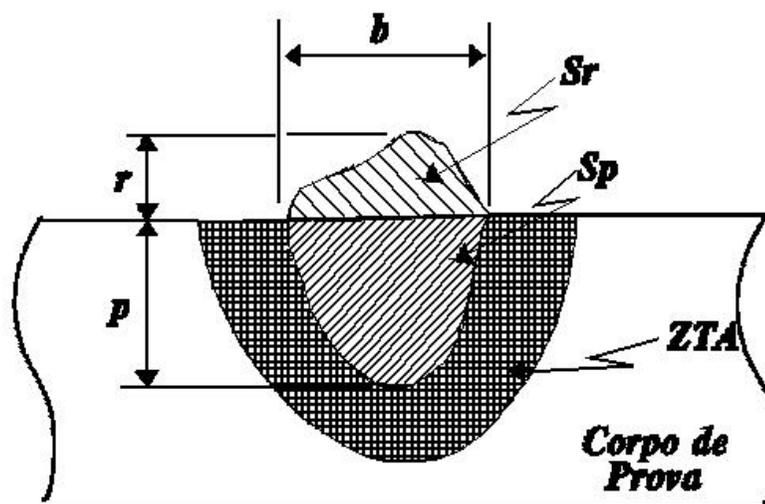


Figura 4.5 – Aspecto transversal de um cordão de solda.

Em função destas medições determinaram-se a convexidade do cordão (IC) e diluição (D) conforme equações 4.1 e 4.2, respectivamente:

$$IC = \frac{r}{b} * 100(\%) \quad (4.1)$$

$$D = \frac{S_p}{S_p + S_r} * 100(\%) \quad (4.2)$$

4.3.1 Critério para a avaliação das características econômicas dos eletrodos

A taxa de fusão (TF), a taxa de deposição (TD) e o rendimento (RD) ou eficiência de deposição, constituem as características econômicas de avaliação dos eletrodos revestidos.

A taxa de fusão foi determinada pela equação 4.3:

$$TF = 3,6 * \frac{\Delta EL}{t} \quad (4.3)$$

onde, TF – taxa de fusão (kg/h); ΔEL – Variação no peso do eletrodo antes e depois da soldagem (g); t – Tempo de arco aceso (s)

A taxa de deposição (TD) foi determinada pela equação 4.4:

$$TD = 3,6 * \frac{\Delta CP}{t} \quad (4.4)$$

onde, TD – taxa de deposição (kg/h); ΔCP – variação no peso do corpo de prova antes e depois da soldagem removidas as escórias (g); t – tempo de arco aceso (s).

O rendimento ou a eficiência de deposição foi avaliado pela equação 4.5:

$$RD = \frac{TD}{TF} \times 100(\%) \quad (4.5)$$

onde, RD – rendimento de deposição (%); TD – taxa de deposição (kg/h); TF – taxa de fusão (kg/h).

4.3.2 Metodologia utilizada para avaliação da estabilidade do arco

Conforme descrito no capítulo 3, a estabilidade do arco pode ser influenciado por vários fatores, e dentre estes os tipos de transferências metálicas apresentam papel fundamental no comportamento do arco. Neste trabalho utilizaram-se as análises dos oscilogramas da tensão aquisitadas durante a soldagem. Através da utilização de um filtro passa baixo com frequência de corte de 4 Hz determinou-se o desvio padrão da tensão. Através da equação 4.6 determinou-se o coeficiente de variação da tensão (CV), sendo considerado como critério de estabilidade que quanto menor for a variação percentual de CV maior a estabilidade do arco.

$$CV = \frac{\sigma V}{V_m} * 100 (\%) \quad (4.6)$$

Onde: CV – coeficiente de variação da tensão (%); σV – desvio padrão da tensão após filtragem digital (V); V_m – tensão média (V).

É interessante ressaltar que foram testadas várias frequências de corte, conforme pode ser visto no apêndice A, sendo que na frequência de 4 Hz se obteve a melhor característica do sinal. Testaram-se frequências menores que 4 Hz e maiores, sendo que foi observado um aumento significativo do desvio padrão da média da tensão, à medida que se utilizava frequências mais altas.

4.3.3 Avaliação dos parâmetros operacionais

Entre os parâmetros operacionais neste trabalho, complementares nas análises a serem efetuadas destacam-se a energia de soldagem e a avaliação da qualidade visual do cordão de solda.

Em função da utilização de duas diferentes velocidades de soldagem, houve alterações na imposição de calor na solda. Desta forma a energia de soldagem reflete esta variação e foi calculada através da equação clássica mostrada na equação 4.7:

$$H = f * \frac{V \times I}{v_s} \quad (4.7)$$

onde, H – energia de soldagem (J/mm); f- Eficiência do processo sendo considerado 1 para efeitos de cálculos neste trabalho; V – tensão de soldagem (V); I – corrente de soldagem (A); v_s – velocidade de soldagem (mm/s).

Além das avaliações geométricas, descritas anteriormente, foram realizadas análises do aspecto visual dos cordões de solda onde procurou-se avaliar quatro itens de qualidade através de uma classificação conforme o seguinte:

- a. Perfil:
 - PA – Adequado - deposição com penetração
 - PI – Inadequado - simples deposição
- b. Porosidade Superficial:
 - SP – sem porosidade
 - CP – com porosidade
- c. Ondulações superficiais do cordão:
 - MO – muitas ondulações
 - SO – sem ondulações
 - PO – poucas ondulações
- d. Aspecto Geral do cordão:
 - MB – muito bom
 - B – bom
 - M – médio
 - R – (ruim

A tabela com os valores obtidos para análise do aspecto visual dos cordões está mostrada no apêndice A.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos bem como suas análises.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com os testes e suas análises de acordo com metodologia descrita no capítulo 4. No item 5.1 são mostradas as tabelas com os dados adquiridos em soldagens automáticas e manuais para os três tipos de eletrodos estudados. No item 5.2 é realizada uma análise comparativa do desempenho da soldagem, no que concerne a estabilidade do arco refletida pela uniformidade do comprimento do arco, para estes dois modos de execução. No item 5.3 são analisadas as influências dos parâmetros de solda (comprimento do arco, corrente e polaridade) nos efeitos geométricos do cordão caracterizados pela penetração, convexidade do cordão, diluição e nos efeitos operacionais dos eletrodos caracterizado pelo rendimento de deposição, taxa de fusão, taxa de deposição e comportamento do arco durante soldagem. Para isto utilizou-se como ferramenta de apoio a metodologia estatística DOE tendo o software comercial Minitab como base para as análises. No item 5.4 é feita uma avaliação final comparativa entre os eletrodos sob a ótica do comportamento operacional das soldagens. Complementarmente é realizada uma análise visual da qualidade dos cordões obtidos com a soldagem automática.

5.1 Resultados Obtidos.

A *Tabela 5.1* mostra as condições de cada teste e os resultados obtidos para a energia de soldagem (H), o rendimento (Rd), a polaridade (Pol), tensão (V), Corrente (I) e o coeficiente de variação da tensão (CV) sob a forma filtrada quando executadas as soldagens de forma automática e manual. Vale ressaltar que a primeira coluna mostra a identificação do corpo de prova (CP), sendo utilizados as letras iniciais de cada revestimento para identificar o tipo de eletrodo que foi testado. Assim para o eletrodo celulósico utilizou-se a letra C, para o eletrodo rutílico a letra R e para o eletrodo básico a letra B. A *Tabela 5.2* mostra os resultados obtidos do delineamento experimental para análise da influência da variação da polaridade, comprimento do arco e corrente de soldagem sobre as características geométricas e operacionais para os eletrodos E6010, E6013 e E7018. Todas as soldagens nesta etapa foram realizadas com o dispositivo de soldagem automático e velocidade de translação do eletrodo de 2,33 mm/s.

CP	Pol	vs	V	I	H	Rd	CV
		mm/s	Volts	Amps	J/mm	%	%
Soldagens Automáticas							
CC1	+	2,33	32	133	1835	58	2,4
CC8	+	2,33	31	83	1089	63	2,7
CC3	+	2,33	36	73	1143	49	2,3
CC4	+	2,33	42	113	2030	44	1,4
CC5	-	2,33	33	83	1154	61	2,1
CC6	-	2,33	43	118	2155	48	0,7
CC7	-	2,33	45	67	1307	27	0,7
CC2	-	2,33	51	103	2221	53	0,5
RR3	+	2,33	22	85	792	64	8,1
RR4	+	2,33	25	140	1477	63	4,4
RR2	+	2,33	27	77	877	50	6,9
RR6	+	2,33	35	123	1834	57	2,5
RR1	-	2,33	18	92	714	70	5,4
RR5	-	2,33	25	135	1454	67	4,6
RR7	-	2,33	27	85	960	64	4,0
RR8	-	2,33	32	128	1724	65	3,2
BB1	+	2,33	26	136	1517	72	7,4
BB4	+	2,33	24	92	942	82	6,9
BB3	+	2,33	34	126	1851	69	6,2
BB7	+	2,33	29	92	1121	47	3,2
BB5	-	2,33	24	141	1427	76	6,2
BB8	-	2,33	24	90	940	74	10,3
BB2	-	2,33	28	138	1624	66	4,8
BB6	-	2,33	26	90	1006	79	12,7
Soldagens Manuais							
CM3	+	1,67	33,3	98,2	1963	50,7	3,0
CM4	+	1,67	39,3	164,6	3882	41,5	3,0
CM7	+	2,33	30,1	86,6	1117	53,6	5,9
CM8	+	2,33	40,5	159,8	2777	40,9	1,7
CM1	-	1,67	36,3	66,8	1454	40,7	3,3
CM2	-	1,67	47,6	107,6	3072	46,7	1,6
CM5	-	2,33	40,1	63,4	1092	44,7	3,1
CM6	-	2,33	48,6	104,8	2183	44,1	1,4
RM3	+	1,67	24,1	34,9	505	106,5	7,7
RM4	+	1,67	28,6	99,1	1700	76,1	2,6
RM7	+	2,33	25,2	34,8	376	91,7	7,7
RM8	+	2,33	29,5	104,2	1317	72,9	4,2
RM1	-	1,67	30,3	83,2	1510	79,4	2,8
RM2	-	1,67	26,0	102,3	1594	82,2	4,5
RM5	-	2,33	29,0	117,0	1452	86,9	4,5
RM6	-	2,33	28,0	98,4	1182	87,1	4,6
BM3	+	1,67	21,0	100,4	1265	58,1	9,6
BM4	+	1,67	27,3	143,1	2339	57,1	13,0
BM7	+	2,33	24,7	95,9	1017	68,0	8,2
BM8	+	2,33	24,6	142,7	1507	56,9	7,6
BM1	-	1,67	19,3	101,0	1172	71,8	11,3
BM2	-	1,67	23,7	136,4	1943	45,5	10,0
BM5	-	2,33	19,2	93,3	769	67,6	14,2
BM6	-	2,33	26,0	133,5	1485	30,8	6,5

Tabela 5.1 - Resultados obtidos para soldagens automáticas e manuais.

Tipo	Pol	a	I	V	H	D	IC	p	TD	TF	Rd	CV	C
-	-	mm	A	Volts	J/mm	%	%	mm	kg/h	kg/h	%	%	-
6010	-	2	70,2	39	1659	61	13	2,3	0,87	1,44	61	1,2	C10
6010	-	2	117,4	45	3148	58	10	3,5	0,88	1,98	44	0,7	C6
6010	-	6	76,7	43	1983	69	6	3,2	0,58	1,43	40	0,8	C9
6010	-	6	100,3	48	2856	75	5	3,0	0,80	1,80	44	0,5	C2
6010	+	2	86,0	28	1419	63	12	2,5	0,72	1,14	63	3,5	C13
6010	+	2	151,3	34	3104	32	19	2,5	0,96	1,75	55	2,7	C1
6010	+	6	74,7	36	1622	85	4	1,5	0,77	1,11	69	2,1	C3
6010	+	6	139,9	41	3432	70	4	2,7	0,66	2,66	25	0,9	C16
6010	-	2	93,5	40	2249	68	9	3,1	0,78	1,68	46	1,0	C5
6010	-	2	116,0	45	3110	59	9	4,0	0,91	1,91	48	0,8	C14
6010	-	6	76,8	46	2119	75	3	3,5	0,77	1,50	51	0,8	C7
6010	-	6	101,9	49	3001	73	6	3,0	0,72	1,81	40	0,5	C15
6010	+	2	97,0	28	1629	70	8	2,4	0,73	1,19	61	5,4	C8
6010	+	2	152,5	34	3120	51	15	3,2	1,09	1,76	62	2,6	C11
6010	+	6	75,7	36	1639	53	4	1,5	0,55	1,00	56	2,0	C12
6010	+	6	128,0	43	3309	80	2	2,2	0,50	1,55	33	0,4	C4
6013	-	2	64,5	16	611	22	17	0,2	0,89	1,27	70	6,2	R1
6013	-	2	116,8	18	1289	41	18	1,3	1,64	2,47	66	9,1	R13
6013	-	6	66,1	31	1217	28	17	0,7	0,86	1,28	67	4,3	R7
6013	-	6	108,2	27	1746	27	15	0,7	1,04	1,63	64	4,8	R15
6013	+	2	61,2	16	602	27	19	0,3	0,74	1,05	71	5,9	R11
6013	+	2	124,3	26	1946	36	19	1,3	1,01	1,57	64	6,2	R4
6013	+	6	63,5	24	929	31	26	0,8	0,86	1,20	72	8,3	R10
6013	+	6	115,6	35	2441	47	17	1,3	0,77	1,36	57	3,8	R6
6013	-	2	84,9	15	769	32	19	0,7	0,91	1,32	69	6,1	R12
6013	-	2	110,7	17	1116	41	17	1,2	1,15	1,62	71	10,4	R5
6013	-	6	75,0	27	1215	39	11	0,5	0,77	1,22	63	4,3	R9
6013	-	6	106,0	26	1634	41	13	1,2	0,97	1,53	64	4,5	R8
6013	+	2	98,6	22	1319	27	23	1,8	0,86	1,19	72	4,8	R3
6013	+	2	112,1	21	1439	41	18	1,6	1,27	1,98	64	6,5	R16
6013	+	6	93,3	31	1752	13	15	0,6	0,72	1,10	66	5,9	R2
6013	+	6	105,2	28	1742	38	15	1,5	0,58	0,93	62	5,5	R14
7018	-	2	51,0	19	572	19	43	0,3	0,86	1,22	71	8,3	B8
7018	-	2	121,8	17	1257	23	19	0,7	0,90	1,41	64	7,7	B5
7018	-	6	56,4	21	694	33	22	1,0	0,72	0,92	79	10,3	B6
7018	-	6	116,9	22	1536	29	15	1,8	0,76	1,17	65	7,3	B9
7018	+	2	66,5	19	750	32	37	0,8	0,97	1,38	70	9,8	B4
7018	+	2	116,9	20	1374	37	22	1,5	1,03	1,44	71	7,9	B1
7018	+	6	59,0	31	1083	18	23	0,7	0,57	0,83	68	7,8	B7
7018	+	6	126,3	33	2500	31	18	1,4	1,08	1,58	68	6,9	B15
7018	-	2	47,7	20	572	13	36	0,4	0,90	1,23	74	6,0	B14
7018	-	2	120,0	18	1289	25	25	1,0	1,10	1,59	69	6,8	B16
7018	-	6	49,3	19	574	16	23	1,1	0,68	0,94	73	13,4	B10
7018	-	6	117,7	22	1560	22	20	0,2	0,70	1,10	64	8,9	B2
7018	+	2	76,2	18	805	34	22	1,3	0,88	1,28	69	7,8	B13
7018	+	2	109,5	19	1261	27	23	1,2	0,87	1,24	71	8,5	B12
7018	+	6	54,8	25	805	24	21	1,6	0,70	1,01	69	7,0	B11
7018	+	6	101,2	29	1736	26	17	0,9	0,89	1,30	68	12,8	B3

Tabela 5.2 - Resultados obtidos com o delineamento experimental para os eletrodos Celulósico (E 6010), Rutílico (E6013) e Básico (E7018).

5.2 Análise dos Resultados.

5.2.1 Comparação entre soldagem automática e manual.

As análises feitas neste item referem-se às comparações entre os dois modos de soldagem com eletrodos revestidos, ou seja, automática e manual. O objetivo inicial destas análises foi verificar a eficiência da metodologia de comparação baseada no coeficiente de variação da tensão (CV). Considerando o pressuposto estabelecido no capítulo 3, quanto menor for o coeficiente de variação da tensão filtrada, maior deverá ser a estabilidade do arco durante soldagem. A **Figura 5.1** apresenta o comportamento médio do coeficiente de variação da tensão para os três tipos de eletrodos, considerando ainda suas interações com os modos de soldagem e polaridade. Estes resultados foram processados através do software Minitab. Apesar dos gráficos abaixo apresentarem uma reta, não significa que se trata de função linear.

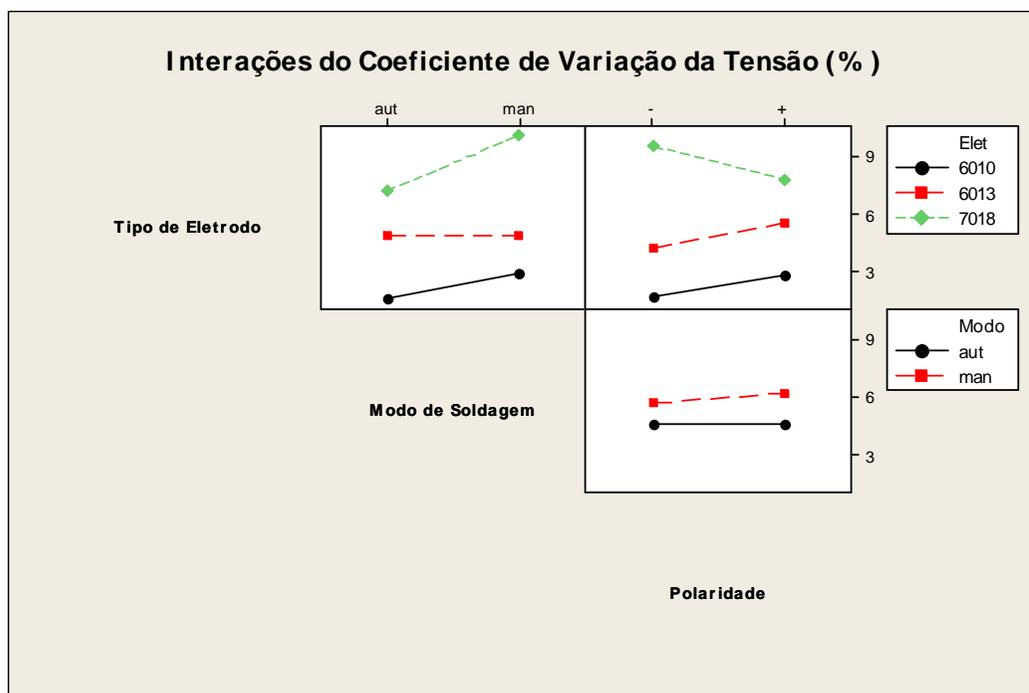


Figura 5.1 - Influência das interações dos fatores na estabilidade do arco.

Observa-se destes resultados que os eletrodos E6010 e E7018 apresentaram maior estabilidade do arco no modo de soldagem automático, sendo que o eletrodo E6013 não foi influenciado pelo modo de soldagem. Este comportamento do eletrodo rutílico de certa forma era esperado em função da sua maior facilidade de soldagem comparativamente aos outros

tipos. Desta forma o soldador provavelmente desenvolveu um melhor controle do arco durante soldagem com este eletrodo. Além deste aspecto observa-se que o eletrodo celulósico foi o que apresentou menor coeficiente de variação da tensão, seguido do eletrodo rutílico e por último o eletrodo básico. Esta tendência se manteve em ambos os modos de soldagem. O fato de o eletrodo celulósico apresentar maior estabilidade do arco provavelmente se deve ao fato deste eletrodo, quando soldado na polaridade direta possuir um tipo de transferência caracterizado por um número muito grande de pequenas gotas (BRANDI E TANIGUCHI, 1989), que a despeito da elevada perda e baixo rendimento nesta polaridade, parece influir positivamente no comportamento do arco quando comparado com os outros tipos de eletrodos.

Ao observar a interação do modo de soldagem com o tipo de polaridade nota-se novamente que, considerando o comportamento de todos os eletrodos estudados, o modo automático apresentou menor coeficiente de variação de tensão que o manual em ambas polaridades estudadas. Observa-se ainda que no modo automático não houve variação deste coeficiente, sendo que no modo manual há uma pequena tendência de crescimento quando da mudança da polaridade direta para a inversa. A razão para isto provavelmente se deve ao comportamento do eletrodo celulósico que na polaridade inversa apresenta maiores dificuldades de soldagem influenciando no desempenho do soldador.

Com relação a interação do eletrodo com a polaridade, tal comportamento será melhor analisado posteriormente quando da análise das soldagens automáticas.

A estabilidade do arco certamente influencia no rendimento de soldagem. Para verificar esta influência, a *Figura 5.2* mostra o resultado obtido para o rendimento de soldagem para os eletrodos estudados em ambos os modos de soldagem. Nota-se que a tendência do rendimento da soldagem para os eletrodos celulósicos e básicos no modo automático foi superior que no modo manual resultado este esperado em função da maior estabilidade do arco gerada por estes eletrodos conforme análise anterior do coeficiente de variação. Porém para o eletrodo rutílico esta tendência se mostrou inversa ao esperado, ou seja, o rendimento em soldagem manual foi significativamente maior que no modo automático. Isto provavelmente se deve ao fato de que este eletrodo possui grande quantidade de rutila (TiO_2) na composição do revestimento, facilitando muito a soldagem manual comparativamente aos outros tipos (BRANDI E TANIGUCHI, 1989). Isto, provavelmente, permitiu ao soldador um melhor controle do comprimento do arco durante soldagem, fato este não possível com o modo automático onde este comprimento de arco se manteve fixo durante toda a execução do cordão.

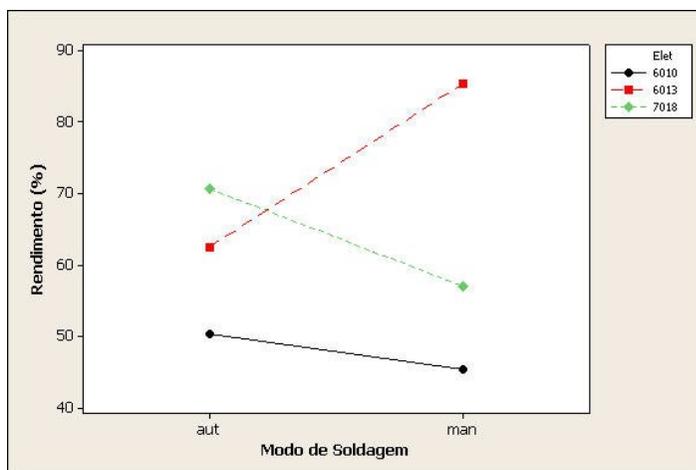


Figura 5.2 - Influência do modo de soldagem no rendimento dos eletrodos.

5.2.2 Comentários gerais sobre soldagem automática e manual.

As análises comparativas do Coeficiente de Variação dos dois modos de soldagem, automática e manual, mostraram que a soldagem automática foi melhor que a soldagem manual, praticamente em todos os testes efetuados, nas duas polaridades. Este fato mostra a eficiência no controle dos parâmetros de soldagem que este tipo de equipamento proporciona para a soldagem na posição plana, principalmente para eletrodos de difícil soldagem como os básicos e celulósicos. Ressalva deve ser feita para a soldagem com o eletrodo rutílico, conforme mencionado anteriormente como sendo o que apresenta melhor estabilidade do arco, onde os dois modos de soldagem não apresentaram diferenças significativas entre si, com valores do coeficiente de variação bem próximos.

5.2.3 Estudo particular dos eletrodos utilizando a metodologia DOE.

Conforme descrito, nesta etapa apenas soldagens automáticas foram utilizadas, sendo a velocidade de soldagem mantida constante em 2,33 mm/s. A partir dos resultados gerados, (*Tabela 5.2*), bem como do delineamento experimental inseriu-se os mesmos no software Minitab para que se pudesse fazer uma análise da influência dos parâmetros nos aspectos geométricos e operacionais do cordão de solda obtidos com cada tipo de eletrodo. Em função do delineamento de experimento projetado, a *Tabela 5.3* apresenta a Análise de Variância (ANOVA) para cada eletrodo utilizado considerando como 95% o nível de confiança, o que implica em valores de α (pvalue) inferiores a 5% considerados como significativos. Para as respostas analisadas de penetração (p), convexidade do cordão (IC), diluição (D), rendimento (Rd), taxa de deposição (TD), taxa de fusão (TF), e coeficiente de variação de tensão (CVcf), os valores em negrito indicam os parâmetros significativos em cada resposta, considerando-se para isto interações de até 1^a. ordem.

Parâmetros	pol	a	I	pol*a	pol*I	a*I	R ²	R ² (adj)
------------	-----	---	---	-------	-------	-----	----------------	----------------------

	AWS E6010 (celulósico)							
p	0,001	0,467	0,021	0,229	0,562	0,975	78,6	64,4
IC	0,331	0,000	0,948	0,497	0,135	0,163	84,9	74,8
D	0,535	0,016	0,685	0,700	0,439	0,087	62,6	37,7
Rd	0,016	0,001	0,003	0,690	0,896	0,019	83,1	71,8
TD	0,365	0,006	0,358	0,983	0,653	0,083	71,3	52,2
TF	0,013	0,059	0,001	0,472	0,872	0,100	83,4	72,3
CVcf	0,000	0,001	0,037	0,005	0,324	0,819	90,2	83,7
	AWS E6013 (rutílico)							
P	0,166	0,780	0,006	0,810	0,976	0,295	69,2	48,6
IC	0,037	0,091	0,161	0,417	0,275	0,145	61,7	36,2
D	0,617	0,863	0,095	0,994	0,990	0,684	31,1	0
Rd	0,953	0,007	0,004	0,767	0,039	0,202	78,3	63,9
TD	0,039	0,033	0,031	0,974	0,111	0,060	76,6	60,9
TF	0,071	0,158	0,018	0,898	0,277	0,155	69,4	49,1
CVcf	0,549	0,003	0,728	0,002	0,002	0,003	89,2	82,1
	AWS E7018 (básico)							
P	0,190	0,408	0,348	0,407	0,803	0,351	39,4	0
IC	0,439	0,002	0,002	0,493	0,759	0,053	83,1	71,2
D	0,075	0,723	0,128	0,067	0,877	0,920	58,4	30,6
Rd	0,647	0,622	0,018	0,322	0,005	0,094	79,3	65,5
TD	0,459	0,010	0,013	0,254	0,124	0,508	74,5	57,4
TF	0,474	0,007	0,002	0,140	0,355	0,252	81,4	69,1
CVcf	0,972	0,197	0,648	0,276	0,342	0,460	37,7	0

Tabela 5.3 - ANOVA para os eletrodos utilizados.

Observa-se dos resultados que os coeficientes de correlação (R^2 e R^2_{adj}) para os dados processados foram bastante dispersos, tendo condições com altos coeficientes e outras com valores muito baixos. De forma geral os melhores resultados foram obtidos para o eletrodo celulósico, seguido do eletrodo rutílico e básico nesta ordem.

5.2.3.1 Análise dos Efeitos Principais e de Interação para o Eletrodo Celulósico E6010

Para este eletrodo observou-se que o parâmetro polaridade (pol) foi estatisticamente significativo na penetração, no rendimento, na taxa de fusão e coeficiente de variação da tensão. O parâmetro de comprimento do arco (a) influenciou em todas as respostas com exceção da penetração e taxa de fusão. A intensidade de corrente influenciou a penetração, rendimento, taxa de fusão e coeficiente de variação. Com relação às interações, apenas duas se mostraram significativas, sendo que o rendimento foi influenciado pela interação do comprimento do arco com a intensidade de corrente (a*I) e o coeficiente de variação influenciado pela interação da polaridade com o comprimento do arco (pol*I).

a. Penetração.

A *Figura 5.3* mostra os efeitos principais dos parâmetros sobre a penetração.

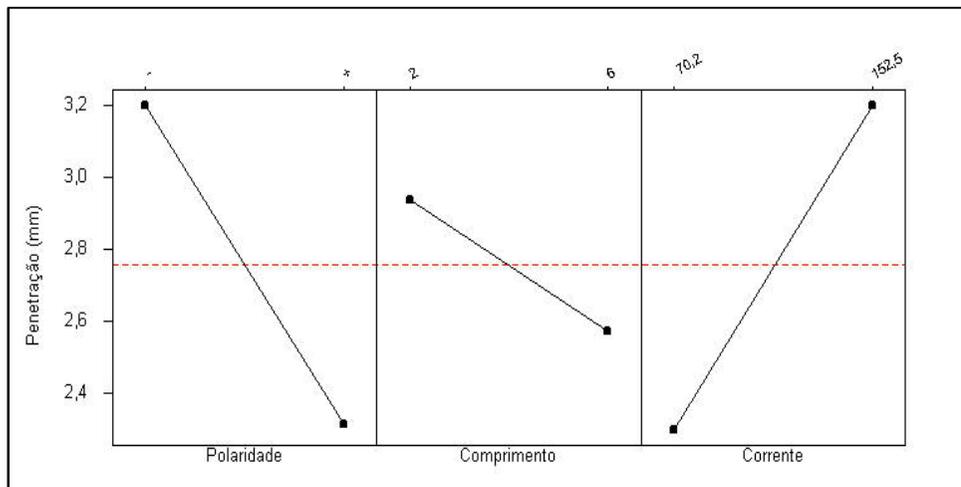


Figura 5.3 - Efeitos principais dos fatores sobre a penetração da solda - E 6010.

Observa-se dos efeitos principais que a polaridade e intensidade de corrente afetaram significativamente a penetração. No caso da polaridade observou-se que a polaridade direta (CC-) gerou uma maior penetração na solda. Entretanto como esta polaridade apresentou uma excessiva taxa de formação de respingos, afetando significativamente o rendimento, a mesma não é recomendada pelo fabricante. Com relação a intensidade de corrente, como esperado, um maior nível desta gerou uma maior penetração da solda, em função do maior nível de energia gerado no arco. O comprimento do arco pouco afetou a penetração, entretanto pela **Figura 5.3** observa-se que melhores resultados de penetração indicam para a utilização de um menor comprimento do arco. Tal resultado se justifica pelo fato de que um maior comprimento de arco aumenta a abrangência do mesmo, aumentando a largura do cordão e, conseqüentemente, diminuição da penetração, além de provavelmente aumentar as perdas por respingos.

b. Convexidade do Cordão.

Para o eletrodo celulósico E6010 observou-se que o parâmetro comprimento de arco foi o único fator estatisticamente significativo na convexidade do cordão (IC). Considerando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.4**, observa-se que o aumento do comprimento de arco conduziu a uma diminuição da convexidade do cordão. Este comportamento já era esperado em função do aumento da abrangência do arco quando se procedeu à solda com um maior afastamento do eletrodo. Entretanto, vale ressaltar que a convexidade do cordão, o qual é um parâmetro que muitas vezes é recomendado se trabalhar entre 20 a 30% (SILVA, 1998), no caso do eletrodo E 6010 ficou bem abaixo desta faixa. Além disso, quando soldados com

comprimento de arco maior, a convexidade se tornou excessivamente baixa, podendo inclusive gerar defeitos na soldagem. Neste caso específico sugere-se como um melhor resultado a utilização de um comprimento de arco menor.

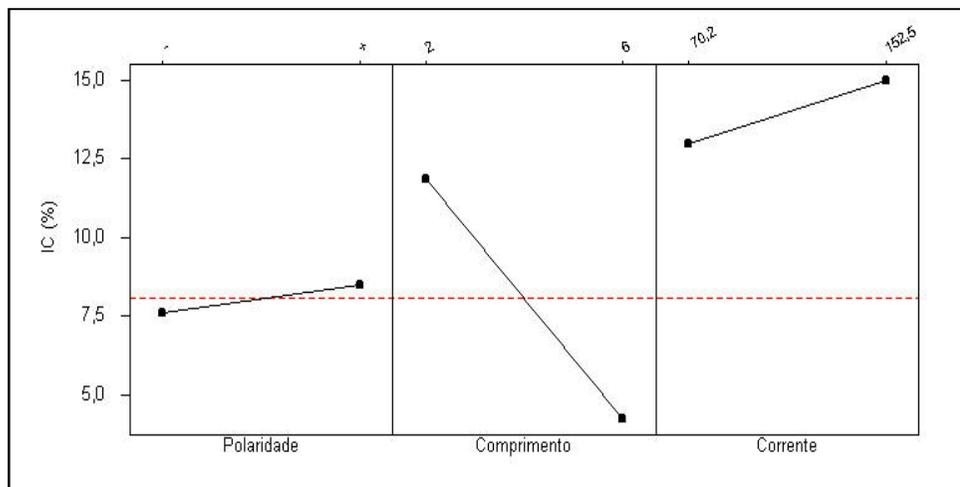


Figura 5.4 - Efeitos principais dos fatores sobre a convexidade do cordão - E 6010.

Com relação aos outros parâmetros não houve significância dos mesmos nesta resposta. Entretanto observando os efeitos principais sugere-se que uma melhor combinação que resulte numa convexidade mais adequada do cordão seria a utilização da polaridade reversa (CC+) associada a uma intensidade de corrente em seu nível máximo.

c. Diluição.

Com relação a diluição (D), o único fator estatisticamente significativo foi o comprimento do arco. Considerando-se os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.5**, observa-se que o aumento do comprimento de arco conduziu a um aumento significativo da diluição. Isto provavelmente pode ser característico do tipo de gotas pequenas predominante neste tipo de eletrodo (BRANDI E TANIGUCHI, 1989) e com a utilização de um comprimento de arco maior permitiu com que as gotas sofressem um processo de aceleração maior e, conseqüentemente, aumentassem a área de penetração influenciando significativamente no aumento da diluição do cordão. Com relação aos outros fatores, muito embora não influenciando significativamente a diluição, sugere-se que a condição onde possa se obter os melhores resultados seriam os utilizados para a análise de penetração, ou seja, polaridade reversa (CC+) e intensidade de corrente em seu nível máximo (entretanto reconhecendo que uma corrente menor aparentemente favorece, no caso deste eletrodo, a diluição do cordão de solda).

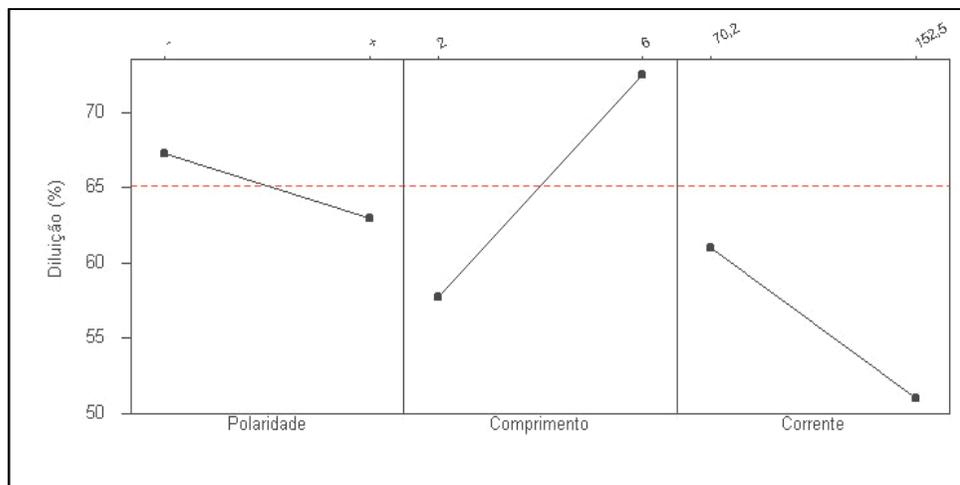


Figura 5.5 - Efeitos principais dos fatores sobre a diluição do cordão - E 6010.

d. **Rendimento.**

No caso do rendimento (Rd) todos os parâmetros isoladamente afetaram significativamente o seu comportamento, além da interação da corrente com o comprimento de arco. Considerando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.6**, observa-se que a condição de maximização do rendimento de soldagem é conseguida através da polaridade reversa (CC+), resultado este esperado, pois observou uma menor taxa de formação de respingos, associado a um comprimento de arco em seu nível mínimo e intensidade de corrente em seu nível máximo. Todos os resultados coincidem com o esperado. A utilização de um comprimento de arco menor diminui o espaço para que gotas se dispersem e conseqüentemente diminuem a formação de respingos. Associado a este aspecto, a maximização da intensidade de corrente aparentemente permitiu melhorar o rendimento da soldagem, muito embora tenha ocorrido pequeno incremento deste.

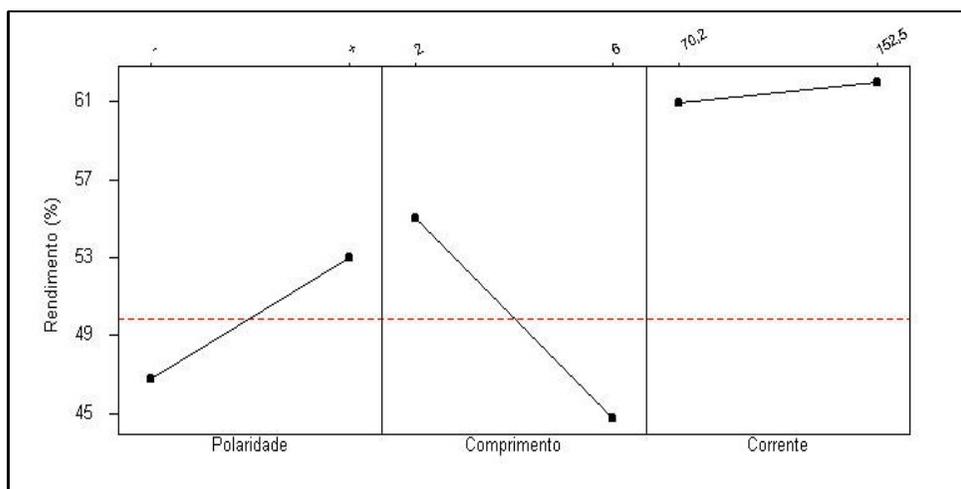


Figura 5.6 - Efeitos principais dos fatores sobre o rendimento da soldagem - E 6010.

Com relação a interação significativa da intensidade de corrente com o comprimento de arco, a **Figura 5.7** confirma o resultado dos efeitos principais dos parâmetros, ou seja, melhores resultados de rendimento são obtidos com utilização de um comprimento de arco menor. Vale ressaltar desta figura que no caso de arco com 2 mm de comprimento o rendimento sofreu pouca influência da corrente. Entretanto com 6 mm de comprimento, ocorreu uma sensível diminuição do rendimento para intensidade de corrente ascendentes, provavelmente pela maior agitação das gotas e conseqüentemente perda de direcionamento das mesmas em relação ao material base gerando aumento da taxa de respingos.

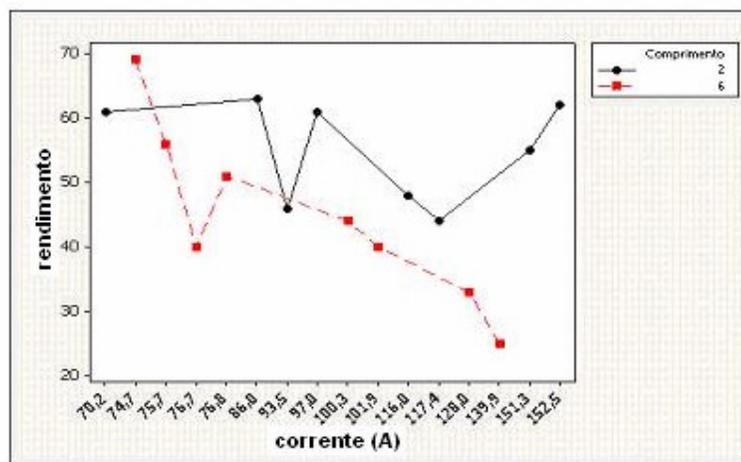


Figura 5.7 - Interação entre a intensidade de corrente e comprimento do arco sobre o rendimento da soldagem - E 6010.

e. Taxa de Fusão.

Com relação a taxa de fusão (TF), **Figura 5.8**, observou-se que os parâmetros polaridade e corrente foram significativos no consumo do eletrodo E6010.

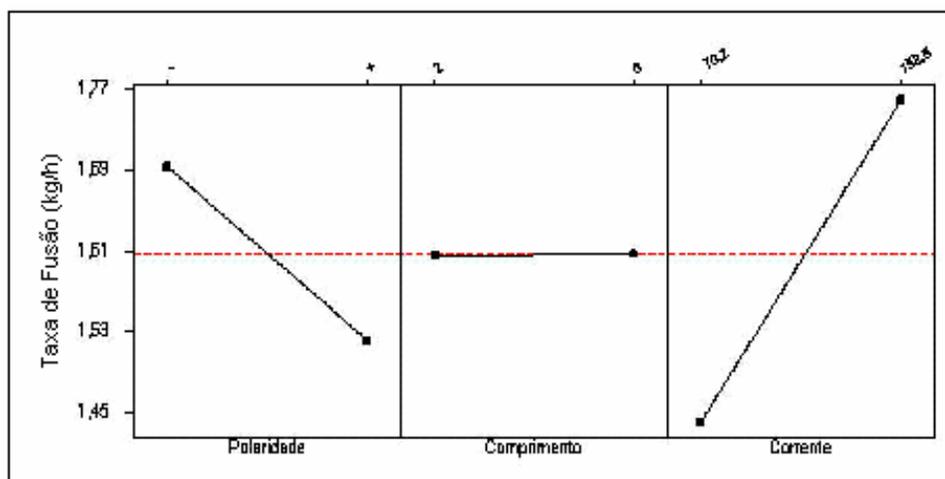


Figura 5.8 - Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de fusão da soldagem - E 6010.

No caso da polaridade, a maior taxa de fusão do eletrodo se verificou na polaridade direta (CC-), talvez por uma maior ação do efeito termoiônico do arco. No caso da intensidade de corrente, o seu aumento gerou maior aquecimento do eletrodo por efeito Joule e, conseqüentemente, gerou um aumento significativo da taxa de fusão.

f. Taxa de Deposição.

Os resultados obtidos permitiram verificar que somente o comprimento do arco afetou significativamente a taxa de deposição, *Figura 5.9*, e que a utilização de comprimento de arcos menores (baixa tensão) favorece uma melhor deposição de soldagem, provavelmente pela diminuição da taxa de respingos como discutido anteriormente. Observando os efeitos principais, a utilização de uma intensidade de corrente em seu nível superior igualmente beneficia o aumento da deposição de soldagem, muito embora este fator não tenha apresentado significância nesta resposta.

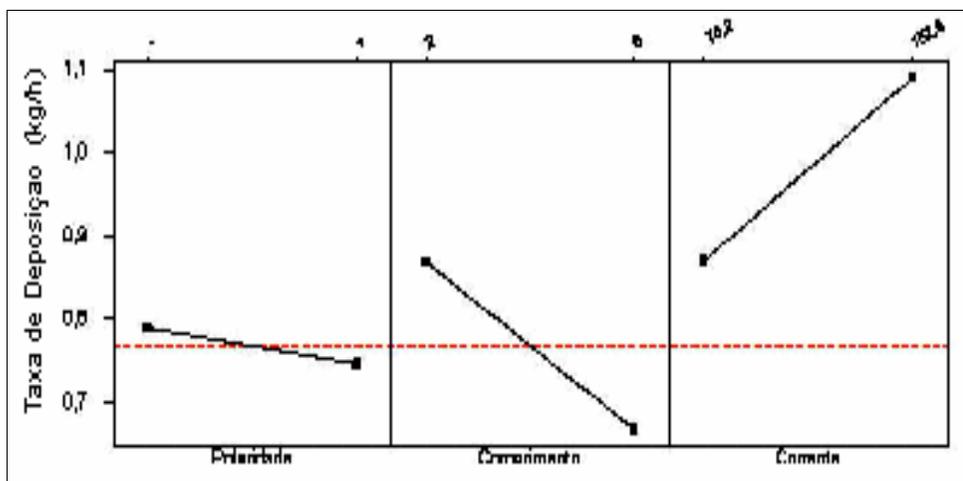


Figura 5.9 - Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição - E 6010.

g. Coeficiente de Variação da Tensão - CV.

A estabilidade de arco é de fundamental importância no estudo da soldagem, e principalmente no comportamento dos eletrodos. Como discutido anteriormente, a tensão e o seu índice derivativo de coeficiente de variação com a utilização de filtragem digital é aqui utilizado como elemento indicativo da estabilidade do arco. Conforme os resultados obtidos no caso do eletrodo E6010 todos os parâmetros isoladamente afetaram significativamente o seu comportamento, além da interação da polaridade com o comprimento de arco. Considerando os efeitos principais dos parâmetros, *Figura 5.10*, observa-se que a condição onde teoricamente se obteve uma melhor estabilidade do cordão foi originada da polaridade direta (CC-), comprimento de arco de 6 mm e intensidade de corrente de 70 A. Com relação a

polaridade este resultado era esperado desde que a forma de transferência verificada nesta polaridade se caracteriza por um tipo predominante de pequenas gotas, notadamente mais estável que os outros modos. No caso do comprimento de arco maior, este resultado sugere que talvez a transferência de gotas se proceda de uma forma mais adequada devido ao maior espaçamento para adquirir um movimento axial (BRANDI E TANIGUCHI, 1989d). Com relação a intensidade de corrente o aumento de sua intensidade diminuiu a estabilidade da soldagem, talvez pelo aumento da taxa de respingos originada. A interação da polaridade com o comprimento de arco, **Figura 5.11** confirma a tendência descrita. Entretanto vale ressaltar desta figura que a utilização da polaridade reversa com um comprimento de arco de 6 mm resultou em um bom resultado de estabilidade de arco, resultado este muito próximo do considerado ideal.

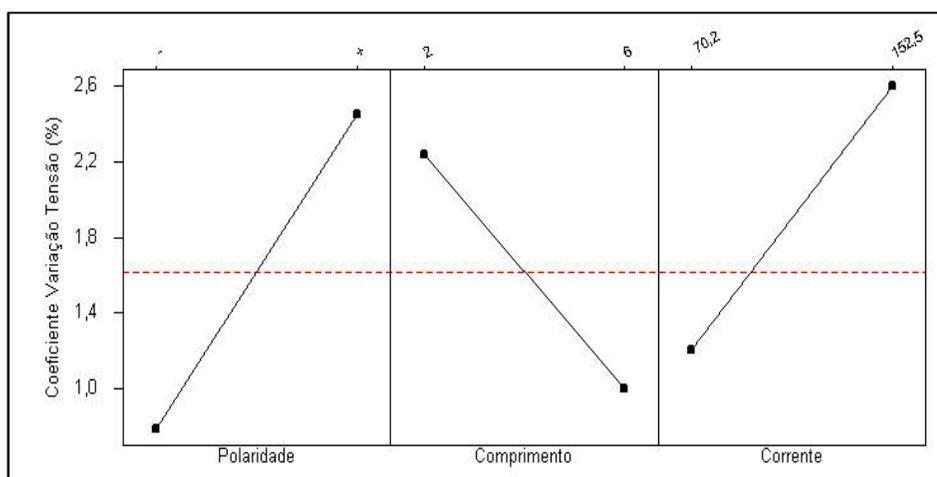


Figura 5.10 - Efeitos principais dos fatores sobre o coeficiente de variação tensão - E 6010.

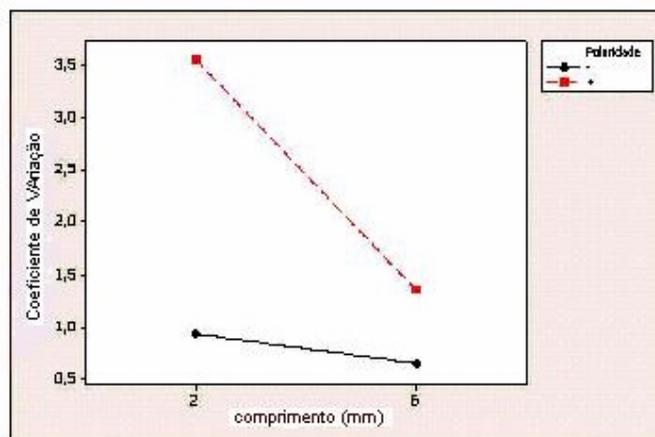


Figura 5.11 - Interação entre a comprimento do arco e polaridade sobre o coeficiente de variação da tensão - E 6010.

5.2.3.2 Análise dos Efeitos Principais e de Interação para o Eletrodo Rutilico E6013.

Para este eletrodo observou-se, (*Tabela 5.3*), que o parâmetro polaridade (pol) foi estatisticamente significativo para o índice de convexidade (IC) e taxa de deposição (TD). O parâmetro de comprimento do arco (a) influenciou no rendimento (Rd), na taxa de deposição (TD) e no coeficiente de variação (CV). A intensidade de corrente (I) influenciou a penetração (p), rendimento (Rd), taxa de fusão (TF) e taxa de deposição (TD). Com relação as interações, temos que a interação da polaridade com o comprimento do arco (pol*a) influenciou apenas o coeficiente de variação (CV). A interação da polaridade com a corrente (pol*I) influenciou o rendimento de deposição (Rd) e o coeficiente de variação (CV). A interação da corrente com o comprimento do arco (I*a) influenciou o coeficiente de variação e a taxa de deposição.

a. Penetração.

A *Figura 5.12* mostra os efeitos principais dos parâmetros sobre a penetração onde observa-se que a intensidade de corrente afetou significativamente a penetração. A polaridade e o comprimento do arco não apresentaram valores significativos, entretanto a utilização da polaridade reversa (CC+) apresentou uma tendência de gerar uma maior penetração na solda

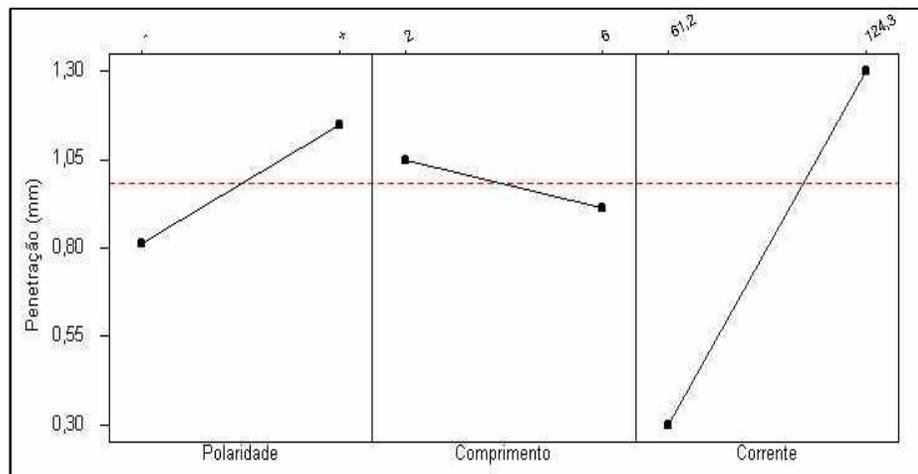


Figura 5.12 - Efeitos principais dos fatores sobre a penetração da solda - E 6013.

Com relação a intensidade de corrente, como esperado, um maior nível desta gerou uma maior penetração da solda, em função do maior nível de energia gerado no arco. O comprimento do arco pouco afetou a penetração sendo que o menor comprimento gerou uma leve melhora na penetração, como era de se esperar.

b. Convexidade do Cordão.

Para o eletrodo rutilico E6013 observou-se que o parâmetro polaridade foi o único fator que apresentou significância estatística de 95% na convexidade do cordão (*Tabela 5.3*). Entretanto caso esta significância fosse reduzido para 90% a intensidade de corrente também se tornaria significativa. Entretanto nota-se que a convexidade de forma geral não apresentou grandes variações entre os níveis máximo (19,2%) e mínimo (15,8%). Considerando os efeitos principais dos parâmetros, *Figura 5.13*, observa-se que na polaridade direta (CC-) obtêm-se valores menores para a convexidade associada ao comprimento do arco e intensidade de corrente em seu níveis máximos. Este comportamento já era esperado, conforme explicado acima.

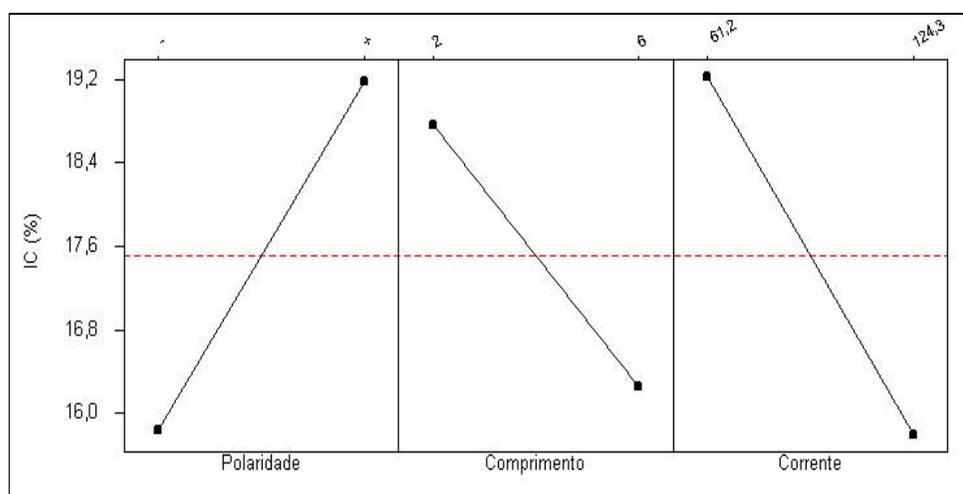


Figura 5.13 - Efeitos principais dos fatores sobre a convexidade do cordão - E 6013.

c. Diluição.

Com relação a diluição para o eletrodo E6013, nenhum dos fatores foi significativo. Considerando-se os efeitos principais dos parâmetros, *Figura 5.14*, observa-se que apenas a corrente apresenta uma maior influência sobre esta resposta sendo que um maior nível de corrente conduziu a um aumento da diluição. Este fato já era esperado, pois com o aumento da corrente aumenta-se a energia de soldagem e, com isto a escória tende a ficar mais fluída diminuindo o tamanho das gotas e conseqüentemente provocando aumento da diluição (BRANDI 1992).

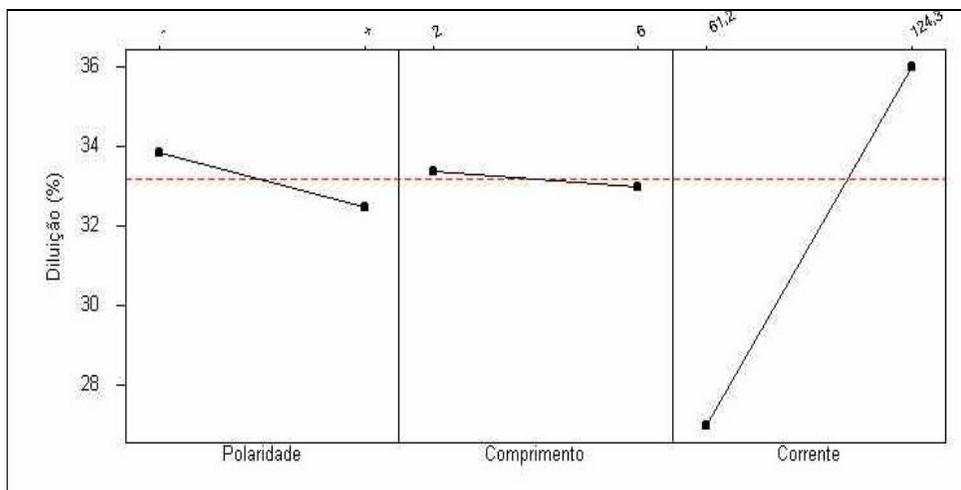


Figura 5.14 - Efeitos principais dos fatores sobre a diluição do cordão - E 6013.

d. **Rendimento.**

No caso do rendimento os parâmetros comprimento do arco e intensidade de corrente afetaram significativamente o seu comportamento, além da interação da corrente com a polaridade. Considerando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.15**, observa-se que a condição onde se maximiza o rendimento de soldagem é conseguida através do comprimento de arco e corrente em seus níveis mínimos, resultado este esperado, pois se observou uma menor taxa de formação de respingos.

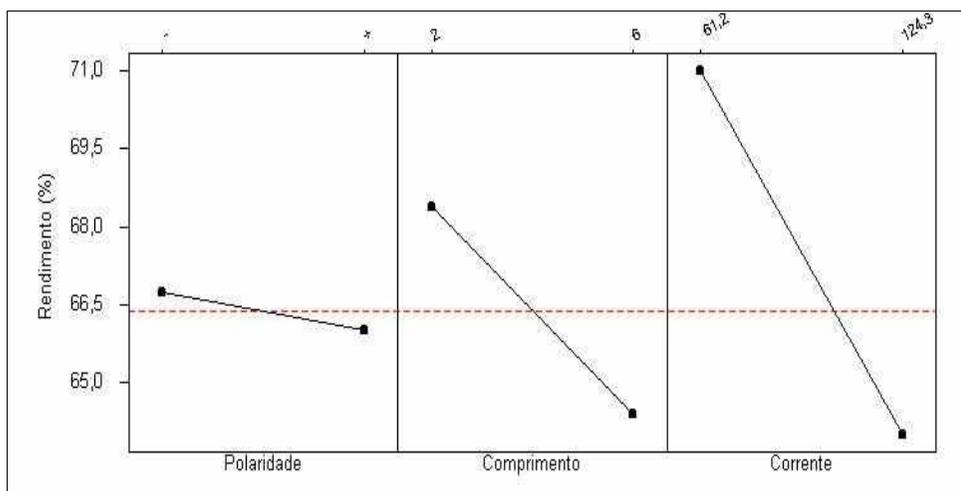


Figura 5.15 - Efeitos principais dos fatores sobre o rendimento da soldagem - E 6013.

Estudos realizados por Brandi e Taniguchi (1989) atestam que para correntes baixas o tamanho médio das gotas são maiores que para correntes altas, sendo que desta forma é possível que os respingos sejam melhor direcionados neste caso do que para correntes altas, ou seja, aumentando-se a corrente aumenta-se a quantidade de respingos e conseqüentemente

diminui-se o rendimento de soldagem. Também a mudança da polaridade reversa (CC+) para a direta (CC-) causou um aumento de respingos. Conforme dito anteriormente a utilização de um comprimento de arco menor reduz o espaço eletrodo-peça, reduzindo também a formação de respingos.

A interação das variáveis intensidade de corrente com a polaridade, **Figura 5.16**, também influenciaram na resposta, sendo que a melhor condição é obtida com a polaridade reversa (CC+) e a corrente em seu nível mínimo. Ressalta-se desta figura que, embora os fabricantes deste tipo de eletrodo recomendem a utilização das duas polaridades, aqui observa-se que na polaridade CC+ o rendimento foi maior.

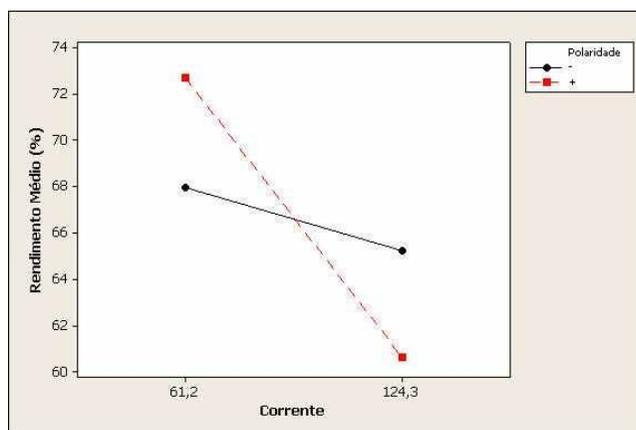


Figura 5.16 - Interação entre a intensidade de corrente e comprimento do arco sobre o rendimento da soldagem - E 6013.

e. Taxa de Fusão.

Com relação a taxa de fusão, **Figura 5.17**, observa-se que apenas a corrente apresentou significância na taxa de fusão, apesar deste fato, pode-se perceber do gráfico que houve tendência da polaridade direta (CC-) e comprimento de arco de 2 mm maximizarem a taxa de fusão. No caso da intensidade de corrente o aumento da taxa de fusão ocorre diretamente com o aumento da intensidade de corrente, o que era de se esperar, pois o aquecimento por efeito Joule se torna mais efetivo nestas condições.

De acordo com Qites e Dutra (1979), o consumo e a produção de material de adição do eletrodo são muito afetados pelo tipo de revestimento, devido à geração de atmosferas de arco com diferentes graus de ionização as quais influenciam nos modos de transferência de material de adição, intensidade de corrente, do comprimento do eletrodo e da polaridade. Desta forma quanto maior for a energia de ionização da atmosfera do arco, com comprimentos iguais de arco, maior a taxa de fusão do eletrodo, maior também a frequência de passagem das gotas e menor será o diâmetro médio das mesmas.

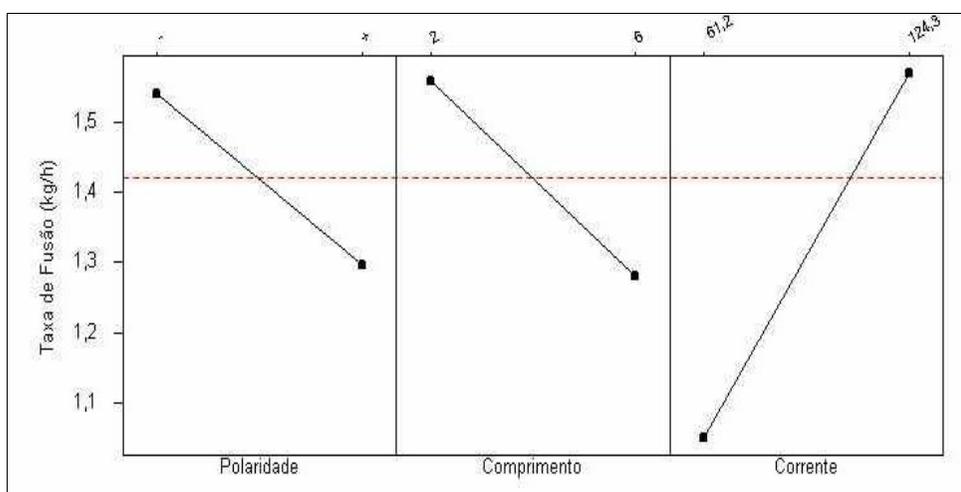


Figura 5.17 - Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de fusão da soldagem - E 6013.

f. Taxa de Deposição.

Os resultados obtidos permitem verificar que os três parâmetros estudados afetaram significativamente a taxa de deposição **Figura 5.18**, ou seja, polaridade direta associada a corrente em seu nível máximo e comprimento de arco em seu nível mínimo apontam para uma melhor taxa deposição de material de adição..

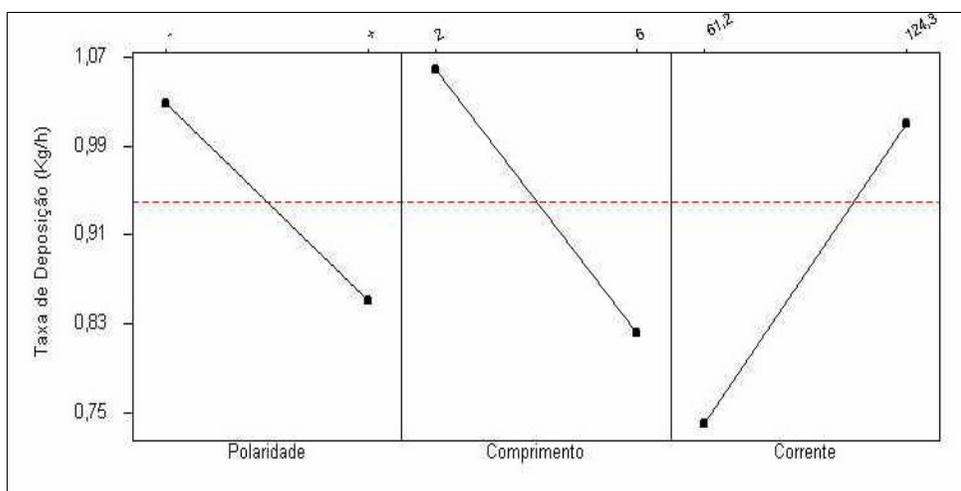


Figura 5.18 - Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição - E 6013.

Tais resultados são interessantes e, em particular a polaridade, pois como este eletrodo apresenta um bom comportamento do arco em ambas as polaridades, a polaridade direta se torna uma opção economicamente interessante de ser utilizada. Observa-se também que os gráficos de taxa de fusão e de deposição têm uma certa semelhança, isto porque existe uma proporcionalidade entre os dois parâmetros estudados

A interação significativa da intensidade de corrente com o comprimento de arco, **Figura 5.19**, confirma que os melhores resultados de deposição são obtidos com a utilização de um comprimento de arco menor associado a corrente em seu nível máximo. Vale ressaltar desta figura que no caso de arco com 6 mm de comprimento a taxa de deposição sofreu pouca influência da corrente. Entretanto com 2 mm de comprimento, ocorreu um sensível aumento da taxa de deposição para intensidades de correntes ascendentes. De acordo com Quites e Dutra (1979), a taxa de deposição é muito dependente do tipo de revestimento, pois este gera atmosferas de arco com diferentes graus de ionização, as quais influenciam nos modos de transferências de material de adição.

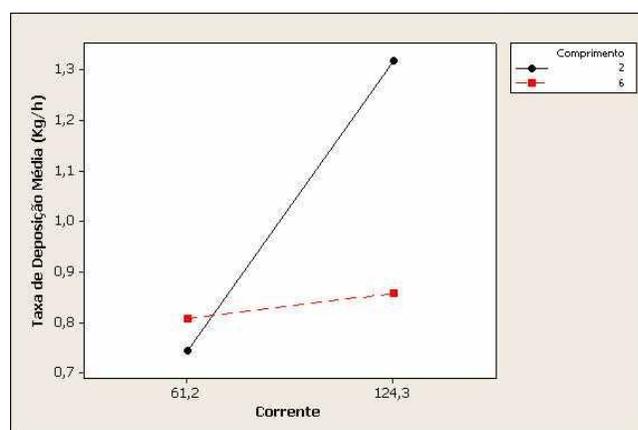


Figura 5.19 - Interação entre a intensidade de corrente e comprimento do arco sobre a taxa de deposição - E 6013.

g. Coeficiente de Variação da Tensão.

Conforme mencionado anteriormente, a estabilidade do arco é muito importante no estudo da soldagem e no comportamento dos eletrodos. Dos resultados obtidos, no caso do eletrodo E6013, o único parâmetro que afetou significativamente o seu comportamento foi o comprimento do arco, além da interação da corrente com o comprimento de arco e polaridade, e da polaridade com o comprimento do arco. Considerando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.20**, observa-se que a condição onde teoricamente se obteve uma melhor estabilidade do cordão foi originada com comprimento de arco de 6 mm, e apesar dos outros dois parâmetros não apresentarem significância, pode-se perceber que a polaridade inversa (CC+) e a corrente em seu nível mínimo contribuíram para a melhor estabilidade da soldagem. As interações da polaridade e corrente com o comprimento de arco, **Figura 5.21** confirmam a tendência descrita.

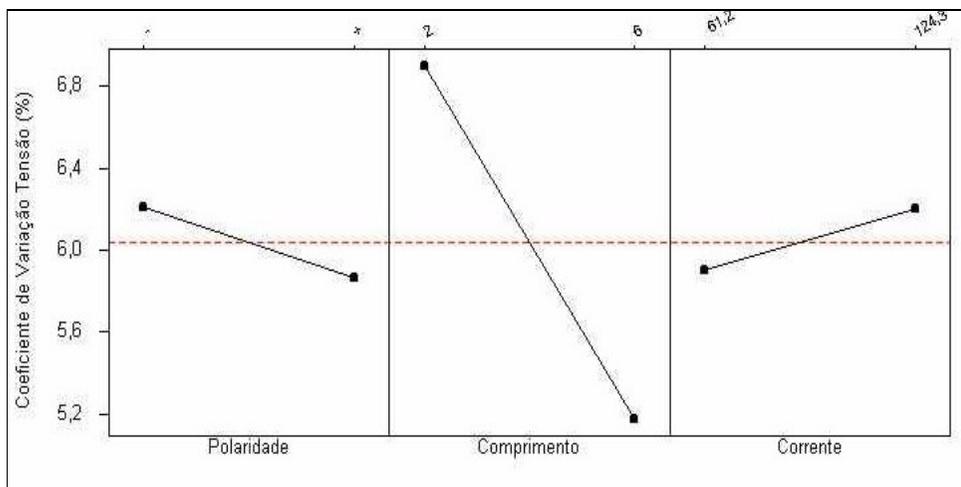


Figura 5.20 - Efeitos principais dos fatores sobre o coeficiente de variação da tensão E 6013.

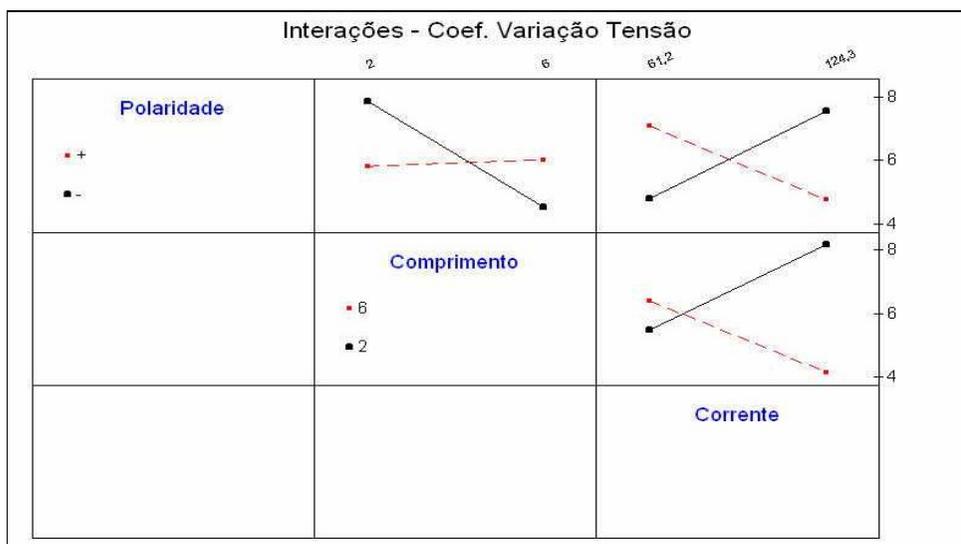


Figura 5.21 - Interação entre a comprimento do arco e polaridade sobre o coeficiente de variação da tensão - E 6013.

No caso do comprimento de arco maior, este resultado sugere a mesma explicação feita para o eletrodo E6010. Brandi e Taniguchi (1989) afirmam que a mudança da polaridade reversa (CC+) para a direta (CC-) causa um aumento na quantidade de respingos. Com relação a intensidade de corrente o aumento de sua intensidade diminuiu a estabilidade da soldagem.

5.2.3.3 Análise dos Efeitos Principais e de Interação para o Eletrodo Básico E7018.

Para este eletrodo observou-se, *Tabela 5.3*, que o parâmetro polaridade não apresentou influencia estatística sobre nenhuma das respostas. O parâmetro comprimento do arco

influenciou na convexidade do cordão, na taxa de deposição e na taxa de fusão. A intensidade de corrente influenciou na convexidade do cordão, no rendimento na taxa de deposição e taxa de fusão. Com relação às interações, observa-se que a interação da polaridade com o comprimento do arco influenciou apenas a diluição, a interação da polaridade com a corrente influenciou o rendimento de deposição e a interação da corrente com o comprimento do arco influenciou na convexidade do cordão.

a. Penetração.

A **Figura 5.22** mostra os efeitos principais dos parâmetros sobre a penetração.

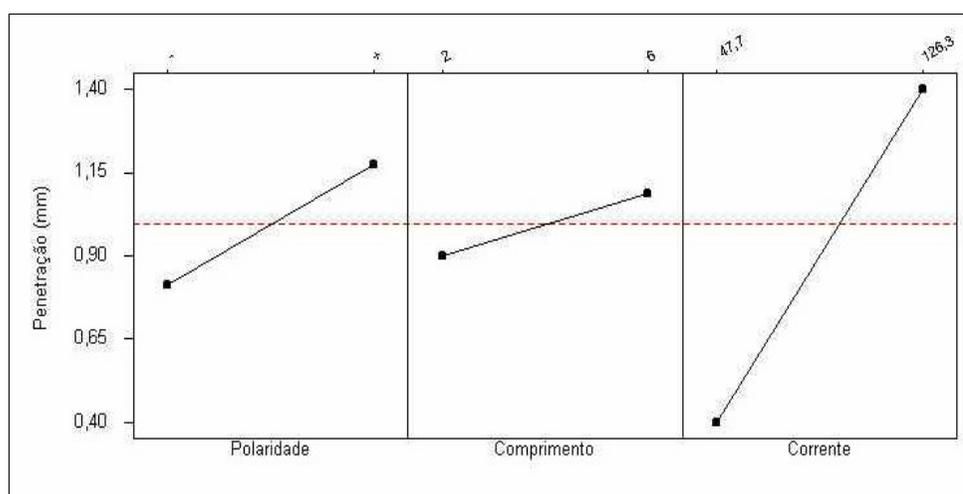


Figura 5.22 - Efeitos principais dos fatores sobre a penetração da solda - E 7018.

Observa-se da **figura 5.22** que a corrente foi o único fator que afetou significativamente a penetração sendo que um maior nível desta gerou uma maior penetração da solda, em função do maior nível de energia gerado no arco. No caso da polaridade observou-se que a polaridade inversa (CC+) gerou uma maior penetração na solda, estando de acordo com as recomendações do fabricante. O comprimento do arco pouco afetou a penetração, entretanto com uma tendência de se obter melhores resultados de penetração com a utilização de um maior comprimento do arco. Este fato se justifica talvez pela característica singular deste tipo de revestimento de apresentar transferências através de grandes gotas além de apresentarem importante efeito da polaridade.

b. Convexidade do Cordão.

Para o eletrodo celulósico E7018 nota-se da **Figura 5.23** que a convexidade obtida com este eletrodo foi superior aos outros tipos. Observa-se também que os parâmetros comprimento do arco e corrente foram os únicos fatores estatisticamente significativos na convexidade do cordão. Considerando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.23**, observa-se que o aumento do comprimento de arco e da corrente conduziu a uma diminuição da convexidade do cordão, muito embora a utilização de um menor comprimento de arco ainda permite convexidades adequadas do cordão.

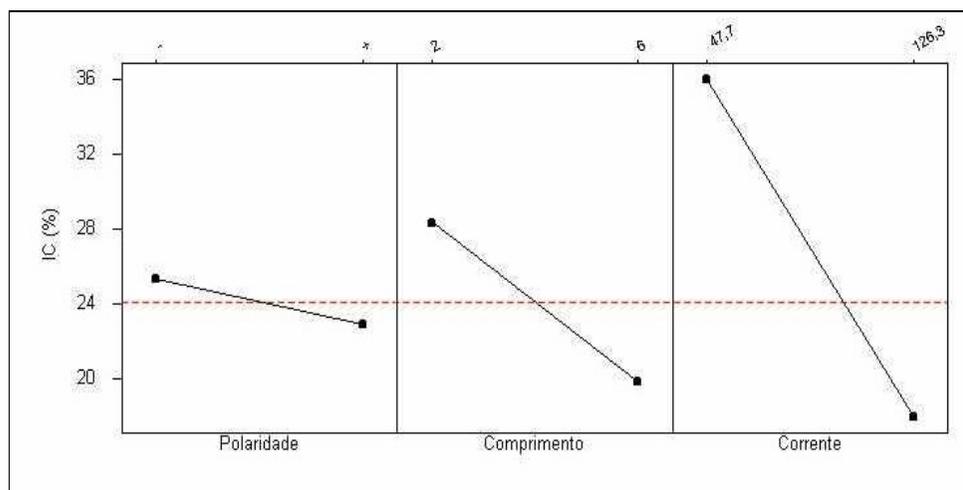


Figura 5.23 - Efeitos principais dos fatores sobre a convexidade do cordão - E 7018.

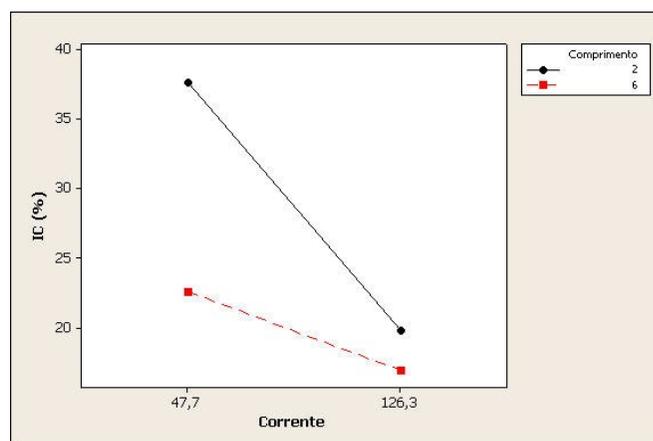


Figura 5.24 - Interação da corrente e comprimento do arco sobre a convexidade do cordão.

A interação da corrente com o comprimento do arco praticamente se situou no limite de significância, sendo por isto considerado significativo na resposta. Considerando a **Figura 5.24**, observa-se que valores de convexidade por volta de 20% (considerados adequados) podem ser obtidos para corrente no nível máximo associado a um menor comprimento do arco.

Considerando todos os efeitos dos parâmetros sugere-se que uma melhor combinação que resulte numa convexidade mais adequada do cordão seria a utilização da polaridade reversa (CC+) associada a uma intensidade de corrente em seu nível máximo e comprimento do arco de 2 mm.

c. Diluição.

Com relação a diluição, não houve fator estatisticamente significativo, apenas a interação do comprimento do arco com a polaridade. Considerando-se a interação dos parâmetros observa-se da **Figura 5.25** que para a utilização de um comprimento de arco em seu nível mínimo associado à polaridade reversa (CC+) conduziram a um aumento significativo da diluição.

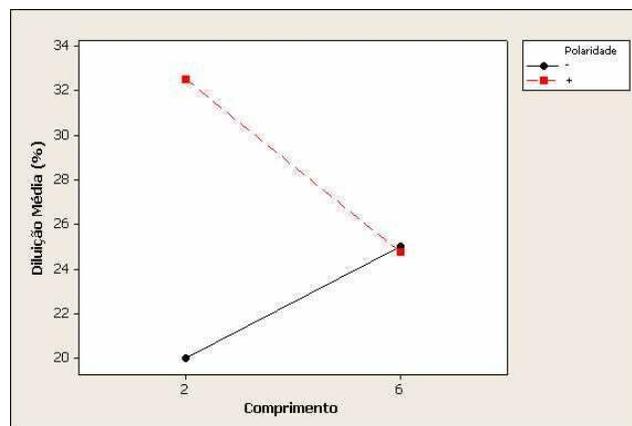


Figura 5.25 - Interação entre o comprimento do arco e a Polaridade sobre a diluição – E7018.

Isto provavelmente pode ser característico do tipo de transferência globular predominante, ou seja, gotas grandes, que segundo Polchodnya et. al. (1990) e Brandi e Taniguchi (1988) a utilização de comprimentos de arco menores podem causar acréscimos de pressão na superfície da poça líquida gerando em consequência aumento da área de penetração e da diluição do cordão.

d. Rendimento.

Para o rendimento o único fator que afetou significativamente seu comportamento foi a corrente de soldagem, além da interação da corrente com a polaridade. Considerando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 5.26**, observa-se que a condição onde se maximiza o rendimento de soldagem é conseguida através da corrente em seu nível mínimo. Entretanto

como este nível de corrente é muito baixo (47 A) o que pode afetar a taxa de deposição, sugere-se que a utilização da corrente no seu nível superior, muito embora apresente uma redução de rendimento de 74% para 68%, variação esta não muito significativa. Este fato é fortalecido pela interação da corrente com a polaridade, **Figura 5.27**. Como os eletrodos E7018 são recomendados pelo fabricante para soldar em polaridade reversa (CC+), observa-se desta interação e condição que o melhor rendimento foi conseguido com uma corrente em seu nível superior.

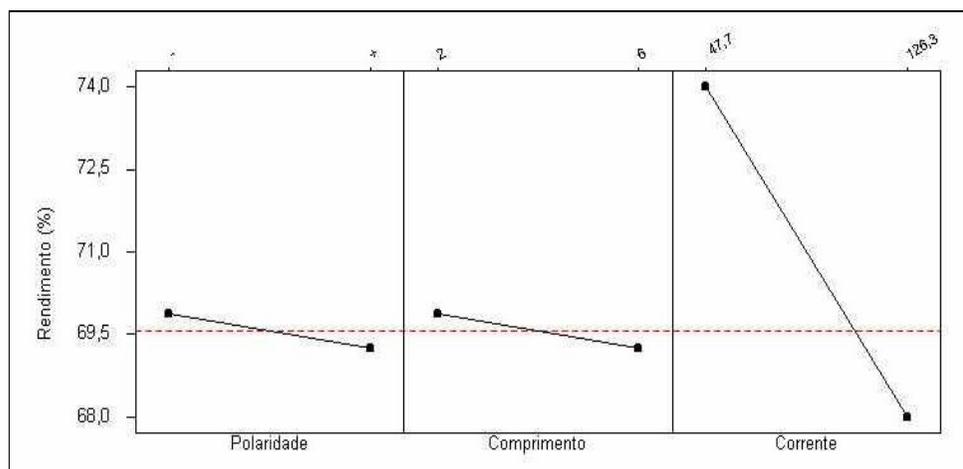


Figura 5.26 - Efeitos principais dos fatores sobre o rendimento da soldagem – E7018.

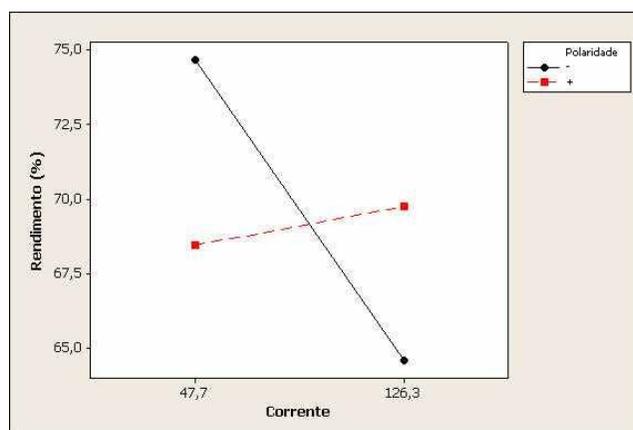


Figura 5.27 - Interação entre o comprimento do arco e a polaridade sobre a diluição - E 7018.

e. Taxa de Fusão.

Com relação a taxa de fusão, **Figura 5.28**, observou-se que os parâmetros comprimento do arco e corrente foram significativos na taxa de fusão do eletrodo E7018. O revestimento gera atmosferas de arco com diferentes graus de ionização, as quais influenciam nos diferentes modos de transferência de material de adição. Assim sendo, a taxa de

deposição e a taxa de fusão são muito dependentes do tipo de revestimento. No caso do comprimento do arco, a maior taxa de fusão do eletrodo se verificou para comprimentos em seu nível mínimo.

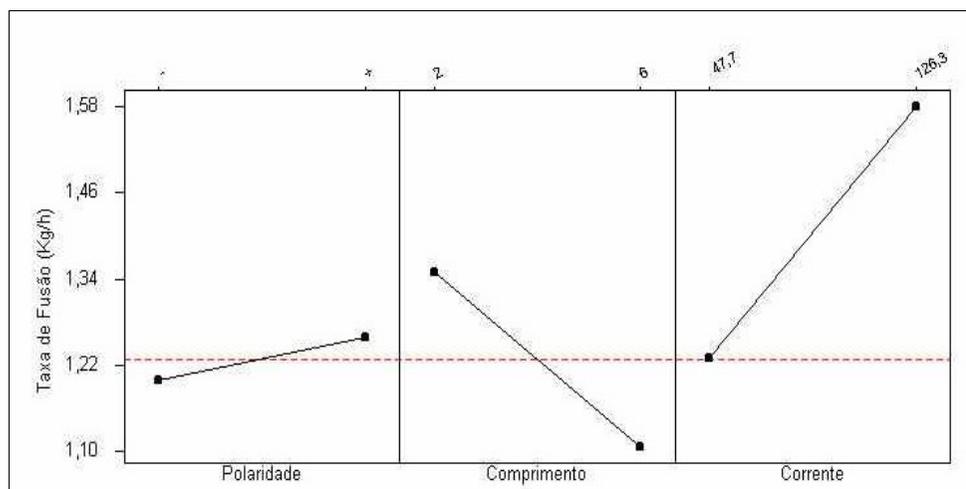
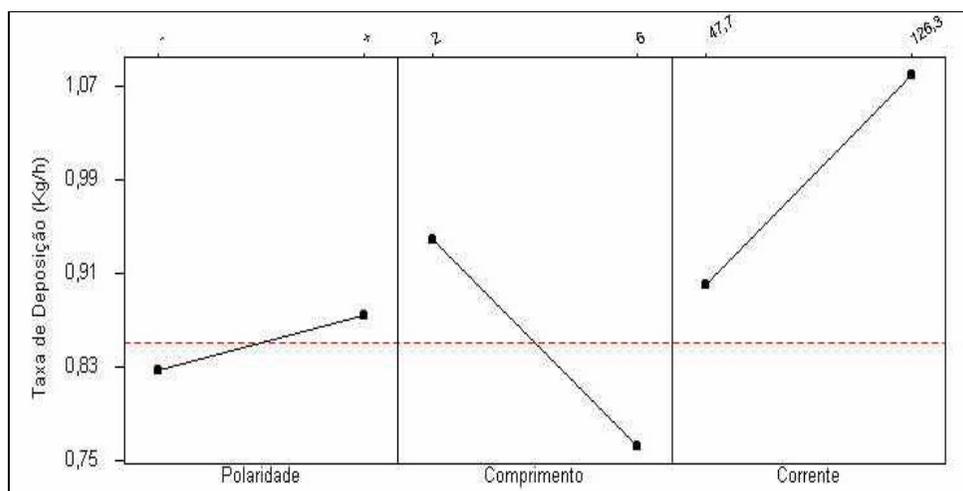


Figura 5.28 - Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de fusão da soldagem - E 7018.

Para a intensidade de corrente o aumento da taxa de fusão ocorre diretamente com o aumento da intensidade de corrente, o que era de se esperar, devido ao aquecimento por efeito Joule. No caso da polaridade, apesar desta não ter apresentado significância, pode-se observar que há uma tendência da mesma ser maior na polaridade CC+, conforme esperado.

f. Taxa de Deposição.

Com relação a taxa de deposição, tanto o comprimento do arco quanto a corrente de soldagem afetaram significativamente a taxa de deposição, **Figura 5.29**, e a utilização de comprimentos de arcos menores (baixa tensão) e a corrente em seu nível máximo favoreceram



5.29 - Efeitos principais dos fatores sobre a taxa de deposição – E7018.

uma melhor deposição de soldagem. Apesar da polaridade não ter apresentado significância, pode-se ver que a taxa de deposição foi maior na polaridade positiva, como era de se esperar.

g. Coeficiente de Variação da Tensão.

Conforme a ANOVA, nenhum dos três parâmetros estudados, bem como as interações afetaram significativamente a estabilidade do arco.

5.3 Comparações finais do comportamento operacional para os três tipos de eletrodos.

Os aspectos anteriormente discutidos no item 5.2 estabelecem a influência dos parâmetros no comportamento individual dos eletrodos. Entretanto é de fundamental importância compara-los conjuntamente no sentido de melhor adequá-los a uma aplicação industrial. Sob este aspecto algumas características se destacam sob o ponto de vista operacional e econômico. Desta forma três respostas serão analisadas comparativamente aos eletrodos estudados, ou seja, a estabilidade do arco, a taxa de deposição e o rendimento de soldagem.

A *Figura 5.30* mostra o comportamento do coeficiente de variação da tensão para os eletrodos estudados sob a influência de sua interação com a polaridade e comprimento do arco.

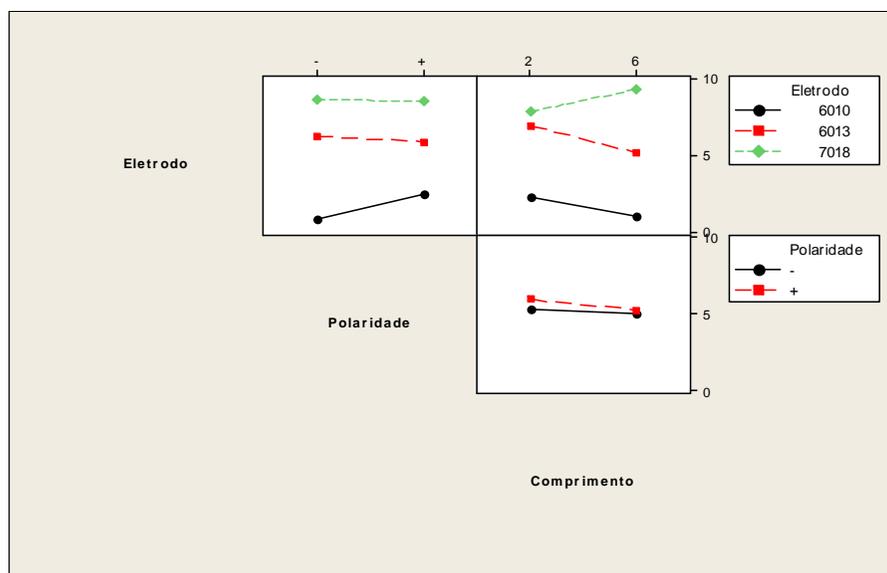


Figura 5.30 - Comportamento da estabilidade do arco para os eletrodos estudados.

Observa-se que o eletrodo celulósico foi o mais estável em ambas as polaridades comparativamente aos outros tipos e mostrou maior estabilidade na polaridade direta, fato este esperado e já explicado anteriormente. O eletrodo rutílico se situou na posição intermediária sem mostrar variações de comportamento com a polaridade. Por sua vez o eletrodo básico foi o menos estável com uma constância de comportamento em ambas as polaridades. Considerando a influência do comprimento do arco, os resultados mostram que para os eletrodos celulósicos e rutílicos a utilização de um comprimento de arco maior conduziu a uma estabilidade melhor, comportamento oposto ao eletrodo básico

Com relação à taxa deposição, observa-se dos resultados obtidos, **Figura 5.31**, que o eletrodo rutílico apresentou, dentre os eletrodos estudados, a maior taxa na polaridade direta, sendo que quando soldado na polaridade reversa a taxa de deposição foi praticamente igual do eletrodo básico. Considerando a influência do comprimento do arco, é nítido que a utilização do menor comprimento (2 mm) produziu os melhores resultados de deposição, como era esperado em função da menor perda por respingos.

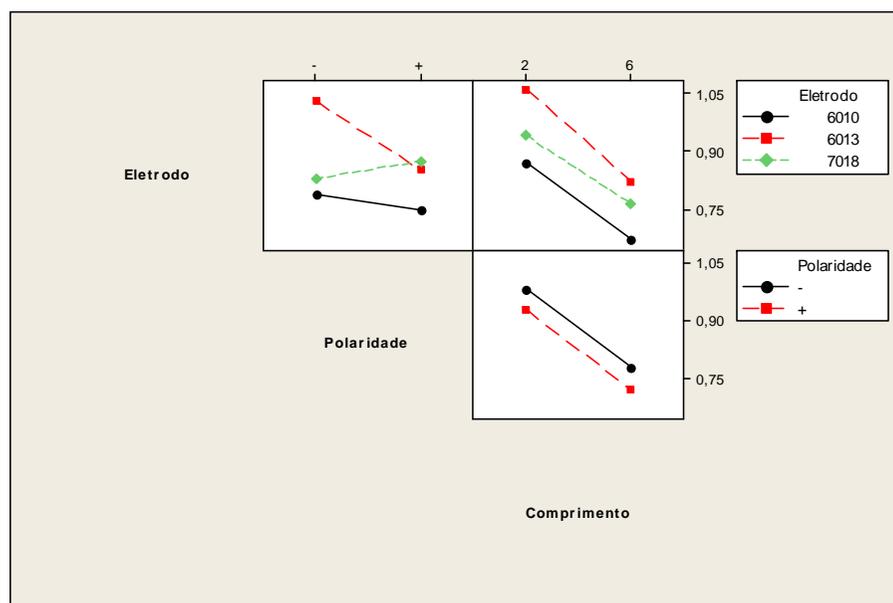


Figura 5.31 - Comportamento da taxa de deposição para os eletrodos estudados.

No caso do rendimento de soldagem observa-se pelos resultados gerados, **Figura 5.32**, que o eletrodo básico seguido pelo rutílico foram nesta ordem os de maiores rendimentos, sendo que ambos não são influenciados pela polaridade. O eletrodo celulósico apresentou um rendimento bem inferior aos outros tipos estudados na sua condição normal de trabalho, ou seja, na polaridade reversa. Observando a influência do comprimento do arco, o rendimento

apresenta a mesma tendência da taxa de deposição, onde os melhores resultados foram obtidos para a condição de menor comprimento do arco. Entretanto para o eletrodo básico aparentemente o comprimento do arco não influenciou no rendimento. Isto pode ser explicado em função de que o tipo de transferência predominante neste eletrodo é globular com uma movimentação de gotas bastante regular gerando boa estabilidade do arco. Desta forma a quantidade de respingos formada independe do comprimento do arco.

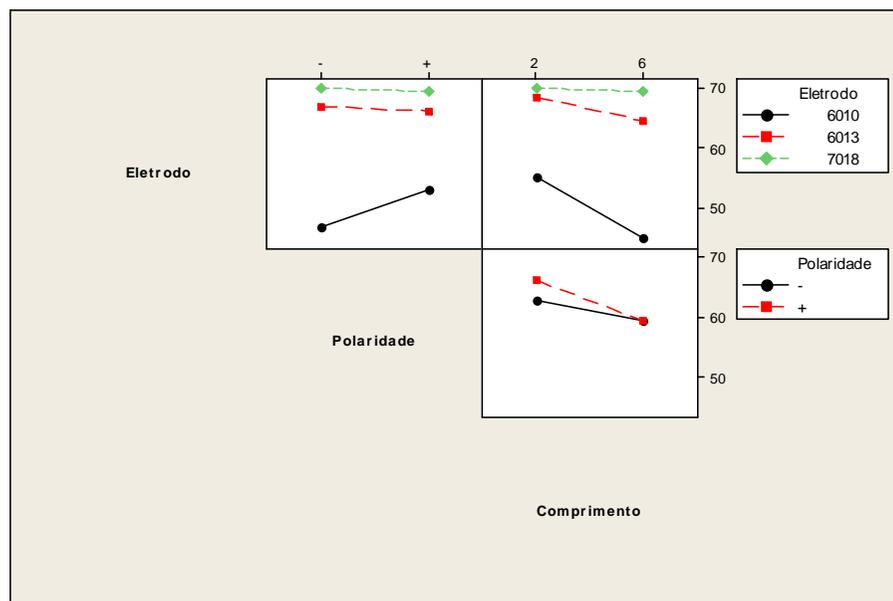


Figura 5.32 - Comportamento do rendimento de soldagem para os eletrodos estudados.

5.4 Comparações entre qualidades visuais para os três eletrodos

Foram analisados alguns corpos de prova sob o aspecto da qualidade visual da solda, sendo os resultados apresentados na *Tabela 5.4*. Estes resultados são oriundos de alguns corpos de prova, sendo que os resultados completos para todos os testes realizados encontram-se dispostos no Apêndice A. Como se pode observar desta tabela, os eletrodos do tipo básico e rutílico apresentaram aspectos visuais do cordão de solda considerados muito bons, enquanto que os eletrodos celulósicos apresentaram qualidade visual inferior mas ainda satisfatória.

5.5 Considerações finais dos resultados

Através das análises dos parâmetros de desempenho dos eletrodos, caracterizados pela penetração, convexidade do cordão, diluição, rendimento de deposição, taxa de deposição,

taxa de fusão e coeficiente de variação, pode-se perceber que os resultados obtidos neste trabalho assemelham-se aos obtidos pelos autores citados, evidenciando desta forma a aplicabilidade do equipamento automático de soldagem para análise de eletrodos revestidos. A utilização da metodologia DOE com a fixação dos parâmetros de comprimento do arco, corrente e polaridade permitiu uma visão geral da influência dos parâmetros importantes na soldagem com eletrodos revestidos.

CP	POL	Aspecto Superf.	Qualidade Superf.	E kJ/cm	Transf. (G,CC,S)	a mm
B1	CC+	SO	MB	13.76	CC	2,00
B5	CC-	SO	MB	12.62	CC	2.00
BB1	CC+	PO	MB	15.17	CC	2.00
BB5	CC-	PO	B	14.27	CC	2.00
C13	CC+	PO	MB	14.15	CC	2.00
C2	CC-	SO	B	31.09	S	6.00
CC1	CC+	PO	B	18.35	G	2.00
CC7	CC-	MO	B	12.0	S	6.00
R4	CC+	PO	MB	6.12	G	2.00
RR1	CC-	PO	MB	7.14	CC	2.00
RR3	CC+	PO	MB	7.92	CC	2.00
R13	CC-	PO	MB	11.57	G	2.00

Tabela 5.4 - Resultados observados sobre a qualidade visual da solda durante a experiência para os eletrodos E-6010, E-7018 e E-6013.

Legenda:

SO - Sem ondulações MB – Muito bom

PO - Poucas ondulações B - Bom

MO – Muitas ondulações R - Ruim

A escolha das condições de soldagem visou forçar, como dito anteriormente, o surgimento dos vários tipos de transferências metálicas. Brandi (1980) afirma que a escolha adequada do tipo de transferência metálica deve ser tal que alie a facilidade de soldagem, minimize as transformações metalúrgicas na zona afetada pelo calor e as distorções na estrutura soldada e maximize a taxa de deposição. Nem todos estes requisitos são compatíveis entre si. Entretanto observou-se que as qualidades superficiais das soldas obtidas com o equipamento de soldagem automática foram boas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Considerando-se que o objetivo deste trabalho foi desenvolver e aplicar uma metodologia para avaliação da estabilidade da soldagem através do coeficiente de variação da tensão bem como avaliar a influência dos parâmetros nas características geométricas e de produtividade em soldagem com eletrodos revestidos, os resultados obtidos nesta dissertação mostram que:

- As soldagens efetuadas com o equipamento automático foram melhores que as efetuadas manualmente. Para o eletrodo rutílico, no entanto, os dois modos de soldagem não apresentaram diferenças, com valores para o coeficiente de variação bem próximos.
- A aplicação da metodologia nas comparações da estabilidade do arco para os três tipos de eletrodos utilizando-se o equipamento automático, permitiram concluir que o eletrodo celulósico foi o mais estável em ambas as polaridades, e mostrou maior estabilidade na polaridade direta. O eletrodo rutílico se situou na posição intermediária sem mostrar variações de comportamento com a polaridade. O eletrodo básico foi o menos estável com uma constância de comportamento em ambas as polaridades.
- Em relação ao parâmetro comprimento do arco, concluiu-se que os eletrodos rutilicos e celulósicos apresentaram melhor estabilidade do arco com comprimentos maiores, e para os eletrodos básicos a estabilidade foi melhor para comprimentos menores.
- As comparações entre taxas de deposição mostraram que os piores resultados foram obtidos para os celulósicos. Os eletrodos rutilicos apresentaram as maiores taxas de deposição na polaridade direta e quando soldados com a polaridade reversa, tanto os rutilicos quanto os básicos apresentaram valores menores e semelhantes. Em relação ao comprimento do arco, tanto a deposição quanto o rendimento apresentaram melhores resultados para valores de 2,0 mm.

- As comparações entre os rendimentos de soldagem mostraram que os eletrodos rúflicos apresentaram os melhores rendimentos, seguido pelos básicos e celulósicos que apresentaram valores menores.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho percebeu-se que aspectos ainda podem ser explorados. Desta forma sugere-se uma melhor investigação em trabalhos futuros dos seguintes aspectos:

- Automatizar o controle de mergulho do eletrodo na poça de fusão através do controle da voltagem e do comprimento do arco utilizando-se motor de passo e componentes eletrônicos de controle.
- Fazer análise de custo associado aos modos de transferências metálicas e energia consumida.
- Analisar as zonas afetadas pelo calor das soldagens efetuadas com a soldagem automática e verificar alterações nas propriedades do material soldado.
- Estender as análises e os métodos aqui empregados para eletrodos com alma de aço inoxidável e eletrodos sintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAIXO, C.E.I. e DUTRA, J.C. - O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG através de Projetor de Perfil e de Tratamentos Oscilográficos. Soldagem e Materiais, Jan/Mar, 1990.
- BENITO, N. e COSTA, S.C. - Controle de Processos de Soldagem através de um Sistema de Aquisição de Dados. XIII Congresso Brasileiro de Eng. Mecânica, Belo Horizonte-MG, 1995.
- BRANDI, S.D. - Análise da Transferência Metálica na Soldagem Arco Elétrico com Eletrodo Revestido. Dissertação de Mestrado, USP, 1988.
- BRANDI, S.D. e TANIGUCHI, C. - Estudo da Transferência Metálica do Eletrodo Revestido AWS E6011. XIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Gramado - RS, pp.663-680, 1988.
- BRANDI, S.D. e TANIGUCHI, C. - Estudo da Transferência Metálica do Eletrodo Revestido AWS E6013. Soldagem e Materiais, 2(3), pp. 33-37, Jul/Set, 1990.
- BRANDI S.D.; TANIGUCHI, C. and LIU S. - Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding. Welding Journal, pp. 261s-270s, October 1991.
- CHAWLA, K.S. and NORRISH, J.N. - Quality Monitoring of Consumable Manufacturing using on-line PC Data Acquisition and Mathematical Modelling Techniques. Proceedings in Computer Technology in Welding, paper 16, Cambridge, U.K., 1992.
- CHEN, J.H. et al. - A Study of Mechanism for Globular Metal Transfer from Covered Electrodes. Welding Journal, pp. 145s-150s, April 1989.
- CHEN, J.H., SUN, Z.C. and FAN, D. - Study of Mechanism of Spatter Produced by Basic Welding Electrodes. Welding Journal, pp. 311s-316s, October 1996.
- CORREIA, D.S.; FARIAS J.P.; SCOTTI, A. - Controle de Curto-Circuito em Fontes de Energia para Eletrodos Revestidos: Efeito da Posição de Soldagem. XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem – BH, Setembro 1999.
- DATA, G.L. - Arc-Length, Arc-Voltage and Mode of Metal Transfer in Metal Arc Welding with Coated Electrodes. Mechanical Engineering, Vol 53, Pt ME 4, pp. 181-187, March 1973.
- ESSERS, W.G.; JELMORINI, G. and TICHELAAR G.W. - Metal Transfer from Coated Electrodes. Metal Construction and British Welding Journal, pp. 151-154, April 1971.
- FARIAS J.P. et. al. - Avaliação de Estabilidade de Eletrodos Revestidos, X Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 1984.
- FARIAS, J. P. e DUTRA, J. C. . Efeito do Tipo de Fonte de Energia Sobre a Estabilidade do Arco de Eletrodos Revestidos, XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1993.

- FARIAS, J.P., QUITES, A. M. and SURIAN, E.S. - The Effect of Magnesium Content on the Arc Stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 Covered Electrodes. *Welding Journal*, pp.245s-250s, June 1997.
- GUPTA, S.R., GUPTA, P.C. and REHFELDT, D. - Process Stability and Spatter Generation During Dip Transfer in MAG Welding. *Welding Review*, pp. 232-241, November 1988.
- I.I.W. Classification des Divers Modes de Transfert du Metal en Soudage a L'arc. Documento do Instituto Internacional de Soldagem n° XIII - 535-577, 1977.
- JOHNSON, J.A. et al. - Process Control of GMAW: Sensing of Metal Transfer Mode. *Welding Journal*, pp. 91s-99s, April 1991.
- JONSSON, P.G. et. al. - Power Characteristics in GMAW: Experimental and Numerical Investigation. *Welding Journal*, pp. 93s-102s, March 1995.
- LANCASTER, J.F. - The Transfer of Metal from Coated Electrodes. *Metal Construction and British Welding Journal*, 3(10), pp. 370-373, October 1971.
- LARSON, L.J. - Metal Transfer in the Metallic Arc. *Welding Journal*, 21(2), pp. 107s – 112s, February 1942.
- LIU, S. and SIWERT, T.A. - Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding: Droplet Rate. *Welding Journal*, pp. 52s-58s, February 1989.
- MELTON, G. B. et al. - Analysis of Tubular Wire Arc-Stability by Computerized Monitoring. *Proceedings Computer Technology in Welding*, paper 19, Cambridge, U.K., 1992.
- NORRISH, J. and RICHARDSON, I.F. - Metal Transfer Mechanisms. *Welding and Metal Fabrication*, pp. 17-22, Jan/Feb, 1988.
- PISTORIUS, P.G.H. and LIU, S. - Changes in Metal Transfer Behavior during the Metal Arc Welding. *Welding Journal*, pp. 305s-315s, August 1997.
- POKHODNYA, I.K. et al. - Relationship Between Short-Circuiting Time and Mass of Electrodes Droplets. *Automatic Welding* 36(9), pp. 28-31, September 1983.
- QUITES, A. M. e DUTRA, J.C. - Influência do Arco Voltaico sobre o Consumo do Eletrodo e Geometria da Solda. *Soldas e Eletrodos*, pp. 18-25, abril 1979a.
- QUITES, A. M. e DUTRA, J.C. - Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis, ed. EDEME, 248p. 1979b.
- SANTOS, M.G. - Metodologia para Comparação entre Fonte Inversora e Eletromagnética para Eletrodos Revestidos. *Dissertação de Mestrado, UFU*, 1995.
- SHINODA, T. et al. - An Evaluation of Short Circuiting Arc Phenomena in GMA Welding. *Welding and Metal Fabrication*, pp. 522-525, December 1989.

SILVA, C.R.; FERRARESI, V.A. e SCOTTI, A. - A Quality and Cost for Welding Process Selection. J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Vol. XXII, No.3, pp.389-398, 2000

WAINER, E.; BRANDI, S.D. e MELLO, F.D.H. – Soldagem: Processos e Metalurgia. Editora Edgard Blucher Ltda., 1ª edição, 494p., 1992.

WANG, W.; LIU, S. and JONES, J.E. - Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization. Welding Journal, pp. 369s-377s, November 1995.

WEGRZYN J. - Arc Properties in Manual Welding with Coated Electrodes. Metal Construction, July 1980.

WELDING HANDBOOK – Fundamentals of Welding. By American Welding Society, 1976

WYANT, R. A.; WINSOR, L. P., and SCHETKY, L. M. - An Investigation of Methods for Evaluating Welding - Arc Stability and their Applications. Welding Journal, pp. 502s-514s, October 1948.

Artigos Publicados

LEONELLO, ANTENOR FILHO; COSTA, SEBASTIÃO CARLOS; PEREIRA, WANDERLEI XAVIER - Análise das Variáveis Influente no Rendimento e na Qualidade de Soldagem para eletrodos Revestidos. COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18 a 21 de maio de 2003. Uberlândia – MG.

LEONELLO, ANTENOR FILHO; COSTA, SEBASTIÃO CARLOS - Uma Metodologia para Comparação entre Soldagens Automáticas e Manuais Utilizando Eletrodos Revestidos. XV COBEM, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 22 a 26 de novembro de 1999. Campinas – SP.

LEONELLO, ANTENOR FILHO; COSTA, SEBASTIÃO CARLOS; PEREIRA, WANDERLEI XAVIER - Análise da Qualidade e do Rendimento para um Processo Automático de Soldagem por Eletrodo Revestido. III CONEM, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10 a 13 de agosto de 2004. Belém – PA.

APENDICE A

TABELAS DE TESTES COM OS ELETRODOS

LEGENDA:

p.el.a – peso eletrodo antes (g)

p.el.d – peso eletrodo depois (g)

p.ch.a – peso chapa antes (g)

p.ch.d – peso chapa depois (g)

RD – rendimento

t – tempo de arco aceso (s)

a – comprimento do arco

S_p – área de penetração da solda (mm^2)

TF – taxa de fusão

TD – taxa de deposição

Pol – polaridade

v_s – velocidade de soldagem

r – altura do reforço do cordão

b – Largura do cordão

Φ eletrodo: 3,25 mm

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S_p	TF	TD	Pol	v_s
RUT	g	g	g	g	%	s	mm	mm^2	kg / h	kg/h		mm/s
R1	29,9	16,1	537,6	547,3	70,29	39,2	2	2,5	1,27	0,89	CC-	1,667
R2	29,7	12,8	589,7	600,8	65,68	55,4	6	3,2	1,10	0,72	CC+	1,667
R3	29,6	14,2	593,9	605,0	72,08	46,6	2	5,3	1,19	0,86	CC+	1,667
R4	29,7	9,98	550,1	562,8	64,40	45,13	2	10,9	1,57	1,01	CC+	1,667
R5	29,7	7,6	551	566,6	70,59	49,0	2	13,8	1,62	1,15	CC-	1,667
R6	29,7	11,4	572,4	582,8	56,83	48,4	6	13,5	1,36	0,77	CC+	1,667
R7	29,6	8,2	571,7	586,1	67,29	60,0	6	5,5	1,28	0,86	CC-	1,667
R8	29,8	8,6	531,7	545,2	63,68	50,0	6	15,0	1,53	0,97	CC-	1,667
R9	29,6	13,3	581,4	591,6	62,58	48,0	6	5,8	1,22	0,77	CC-	1,667
R10	29,8	10,1	550,5	564,6	71,57	59,0	6	6,0	1,20	0,86	CC+	1,667
R11	29,9	15,6	586,9	597,0	70,63	49,0	2	3,0	1,05	0,74	CC+	1,667
R12	29,6	14,9	565,1	575,2	68,71	40,0	2	5,3	1,32	0,91	CC-	1,667
R13	29,4	11,0	529,7	541,9	66,30	26,8	2	11,7	2,47	1,64	CC-	1,667
R14	29,7	14,2	580,5	590,1	61,94	60,0	6	11,2	0,93	0,58	CC+	1,667
R15	29,8	9,9	570,5	583,2	63,82	44,0	6	8,7	1,63	1,04	CC-	1,667
R16	29,9	14,5	561,1	571,0	64,29	28,0	2	12,9	1,98	1,27	CC+	1,667

Tabela A1 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-6013 – Rutílico

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
BAS	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	Kg/h	Kg/ h		mm/s
B1	36,5	22,3	542	552,3	71,13	35,42	2	11,0	1,44	1,03	CC+	1,667
B2	37,2	24,8	624	632,2	63,71	40,74	6	5,3	1,10	0,70	CC-	1,667
B3	37,4	23,3	554	563,5	68,09	39,0	6	6,6	1,30	0,89	CC+	1,667
B4	37,2	28,5	598	603,6	70,11	22,74	2	5,5	1,38	0,97	CC+	1,667
B5	37,1	23,0	612,0	621,0	63,83	35,96	2	6,2	1,41	0,90	CC-	1,667
B6	37,0	28,6	679	685,4	78,57	32,87	6	5,2	0,92	0,72	CC-	1,667
B7	37,1	28,3	562	567,9	68,18	38,00	6	3,5	0,83	0,57	CC+	1,667
B8	37,2	24,2	681	690,0	70,77	38,45	2	1,6	1,22	0,86	CC-	1,667
B9	37,1	25,7	656	663,1	64,91	35,00	6	10,8	1,17	0,76	CC-	1,667
B10	36,4	25,8	631	638,6	72,64	40,53	6	2,0	0,94	0,68	CC-	1,667
B11	37,2	26,1	543	551,0	69,37	39,72	6	8,4	1,01	0,70	CC+	1,667
B12	37,1	25,9	601	609,0	70,54	32,60	2	8,2	1,24	0,87	CC+	1,667
B13	37,1	25,0	595	602,9	68,60	34,00	2	9,1	1,28	0,88	CC+	1,667
B14	37,2	23,9	694	704,0	73,68	39,00	2	2,3	1,23	0,90	CC-	1,667
B15	37,1	20,7	558,0	569,2	68,29	37,29	6	14,7	1,58	1,08	CC+	1,667
B16	37,1	21,9	664,0	674,5	69,08	34,34	2	7,1	1,59	1,10	CC-	1,667

Tabela A2- Testes efetuados com eletrodo AWS E-7018 – Básico

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
CEL	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg / h	kg/h		mm/s
C1	26,2	11	630	638,3	54,90	31,41	2	25,6	1,75	0,96	CC+	1,667
C2	26,3	7,1	693	701,1	44,27	38,34	6	39,2	,80	0,80	CC-	1,667
C3	26,1	15	622	629,9	69,09	35,53	6	13,3	1,11	0,77	CC+	1,667
C4	26,1	13	545	549,6	32,56	30	6	31,2	1,55	0,50	CC+	1,667
C5	26,2	9,4	655	663	46,43	35,99	2	31,6	1,68	0,78	CC-	1,667
C6	26,2	6,6	685	693,2	44,39	35,6	2	55,0	1,98	0,88	CC-	1,667
C7	26,1	11	671	679	50,99	36,13	6	28,0	1,50	0,77	CC-	1,667
C8	26,2	13	630	637,8	61,24	38,91	2	16,9	1,19	0,73	CC+	1,667
C9	26,3	11	672	678,6	40,26	38,77	6	24,1	1,43	0,58	CC-	1,667
C10	26,3	12	671	679,4	60,71	35,09	2	20,7	1,44	0,87	CC-	1,667
C11	26,1	10	652	661,7	62,11	32,93	2	37,0	1,76	1,09	CC+	1,667
C12	26,2	15	630	636	55,45	39,64	6	12,9	1,00	0,55	CC+	1,667
C13	26,2	13	664	672,5	63,43	42,47	2	18,3	1,14	0,72	CC+	1,667
C14	26,2	7,5	648	656,7	47,59	35,22	2	52,8	1,91	0,91	CC-	1,667
C15	26,2	10	659	665,1	39,51	32,2	6	42,0	1,81	0,72	CC-	1,667
C16	26,3	1,6	667	672,6	24,70	33,38	6	39,2	2,66	0,66	CC+	1,667

Tabela A3 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-6010 - celulósico

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
RUT	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg / h	kg / h		mm/s
RR1	29,8	16,2	625,5	635,0	69,85	36,38	2	7,1	1,35	0,94	CC-	2,333
RR2	29,6	17,9	656,3	662,2	50,43	35,50	6	9,7	1,19	0,60	CC+	2,333
RR3	29,8	18,5	652,6	659,8	63,72	32,55	2	5,2	1,25	0,80	CC+	2,333
RR4	29,6	9,5	626,6	639,2	62,69	39,94	2	26,6	1,81	1,14	CC+	2,333
RR5	29,9	9,9	586,6	600,0	67,00	35,66	2	34,4	2,02	1,35	CC-	2,333
RR6	29,7	12,6	557,1	566,9	57,31	36,37	6	21,0	1,69	0,97	CC+	2,333
RR7	29,8	17,8	657,4	665,1	64,17	35,00	6	6,7	1,23	0,79	CC-	2,333
RR8	29,8	12,7	620,6	631,7	64,91	35,31	6	19,6	1,74	1,13	CC-	2,333

Tabela A4 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-6013

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
BAS	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg/h	kg/h		mm/s
BB1	37,1	24	592	602	72,31	32,21	2	7,5	1,45	1,05	CC+	2,33
BB2	37,1	25	662,0	670	65,57	40,58	6	6,8	1,08	0,71	CC-	2,33
BB3	37,0	25	546	554	68,80	33,67	6	9,9	1,34	0,92	CC+	2,33
BB4	37,1	27	578	586	82,35	35,20	2	3,5	1,04	0,86	CC+	2,33
BB5	36,7	23	658,0	669	76,43	34,17	2	6,3	1,47	1,13	CC-	2,33
BB6	37,1	26	653	661	78,90	38,00	6	3,6	1,03	0,81	CC-	2,33
BB7	37	28	676,0	680	47,25	34,34	6	2,5	0,95	0,45	CC+	2,33
BB8	37,1	24	652	661	74,02	34,85	2	2,8	1,31	0,97	CC-	2,33

Tabela A5 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-7018

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
CEL	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg/h	kg/h		mm/s
CC1	26,1	11	628	637	58,11	34,66	2	24,9	1,54	0,89	CC+	2,333
CC2	26,1	7,3	600	610,0	52,66	36,75	6	30,7	1,84	0,97	CC-	2,333
CC3	26,0	15	658	663,0	49,06	38,26	6	8,0	1,00	0,49	CC+	2,333
CC4	26,0	12	575,0	581	42,75	35,84	6	21,8	1,39	0,59	CC+	2,333
CC5	26,1	12	660	669	61,27	34,76	2	14,0	1,47	0,90	CC-	2,333
CC6	26,0	7,4	671	680	47,85	34,33	2	40,7	1,95	0,93	CC-	2,333
CC7	26,1	14	647	650,0	26,61	34,29	6	15,7	1,30	0,35	CC-	2,333
CC8	26,0	16	557	563	62,75	33,81	2	12,8	1,09	0,68	CC+	2,333

Tabela A6 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-6010

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
RUT	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg / h	kg / h		mm/s
RM1	28,8	22	609,8	615,2	79,41	21,08	2	6,0	1,16	0,92	CC-	1,667
RM2	28,7	18	597	605,8	82,24	24,93	2	7,1	1,55	1,27	CC-	1,667
RM3	28,8	22,6	547,3	553,9	106,45	24,58	2	1,7	0,91	0,97	CC+	1,667
RM4	28,3	19,5	598,5	605,2	76,14	23,83	2	8,0	1,33	1,01	CC+	1,667
RM5	28,8	18,9	602	610,6	86,87	22,65	2	17,9	1,57	1,37	CC-	2,333
RM6	29	18,9	556,1	564,9	87,13	22,93	2	5,4	1,59	1,38	CC-	2,333
RM7	28,5	22,5	597	602,5	91,67	23,51	2	9,0	0,92	0,84	CC+	2,333
RM8	28,5	18,9	578,7	585,7	72,92	23,69	2	15,4	1,46	1,06	CC+	2,333

Tabela A7 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-6013 soldagem manual

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
BAS	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg/h	kg/h		mm/s
BM1	37,1	30	604,8	609,9	71,83	24,12	2	6,4	1,06	0,76	CC-	1,667
BM2	37,1	27,2	588,3	592,8	45,45	23,94	2	14,0	1,49	0,68	CC-	1,667
BM3	37,1	26,6	592,3	598,4	58,10	23,7	2	5,0	1,60	0,93	CC+	1,667
BM4	37,1	25,2	586,4	593,2	57,14	23,84	2	16,0	1,80	1,03	CC+	1,667
BM5	37,1	30,0	598,2	603,0	67,61	24,26	2	5,0	1,05	0,71	CC-	2,333
BM6	37,1	26,7	602,2	605,4	30,77	27,72	2	11,0	1,35	0,42	CC-	2,333
BM7	37,1	29,3	605,4	610,7	67,95	23,74	2	6,0	1,18	0,80	CC+	2,333
BM8	37,1	26,1	557,9	564,1	56,88	24,00	2	15,0	1,64	0,93	CC+	2,333

Tabela A8 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-7018 soldagem manual

CP	p.el.a	p.el.d	p.ch.a	p.ch.d	RD	t	a	S _p	TF	TD	Pol	v _s
CEL	g	g	g	g	%	s	mm	mm ²	kg/h	kg/h		mm/s
CM1	26,1	15,3	582,8	587,2	40,74	25,14	2	20,9	1,55	0,63	CC-	1,667
CM2	26,1	11,1	590,9	597,9	46,67	24,56	2	51,4	2,20	1,03	CC-	1,667
CM3	26,1	18,6	593,6	597,4	50,67	24,5	2	21,0	1,10	0,56	CC+	1,667
CM4	26	13	592	597,4	41,54	24,81	2	49,0	1,89	0,78	CC+	1,667
CM5	26,1	15,8	588,4	593	44,66	24,3	2	53,0	1,53	0,68	CC-	2,333
CM6	25,3	11	584	590,3	44,06	25,75	2	51,4	2,00	0,88	CC-	2,333
CM7	26	19,1	596,1	599,8	53,62	25	2	8,2	0,99	0,53	CC+	2,333
CM8	26,1	12,9	600	605,4	40,91	25,5	2	32,	1,86	0,76	CC+	2,333

Tabela A-9 – Testes efetuados com o eletrodo AWS E-6010 soldagem manual

TABELAS: QUALIDADE SUPERFICIAL DAS SOLDAS

LEGENDA:

- PA – perfil adequado
 PI - perfil inadequado
 CV – coeficiente de variação
 SP – sem porosidades
 Transf – transferência
 G - globular
 S – spray
 CC – curto circuito
 Ondul – Ondulação

ELETR	P	a	aspecto	qualidade	perfil	poros.	Im	CV	Transf	custo
		mm	sup. Solda	sup. Solda	PA/PI	superf.	A			R\$(1,0/kW)
R1	CC-	2	sem ondul	ruim	PI	SP	64,529	0,132	CC	0,059
R2	CC+	6	muitas ondul	ruim	PA	SP	93,304	0,062	S	0,174
R3	CC+	2	sem ondul	boa	PA	SP	98,573	0,096	CC	0,13
R4	CC+	2	poucas ondul	muito boa	PA	SP	124,33	0,133	G	0,189
R5	CC-	2	poucas ondul	boa	PA	SP	109,82	0,108	CC	0,114
R6	CC+	6	muitas ondul	ruim	PA	SP	115,62	0,113	G	0,241
R7	CC-	6	escamado	ruim	PA	SP	67,802	0,094	S	0,114
R8	CC-	6	irregular	péssimo	PA	SP	105,25	0,066	S	0,165
R9	CC-	6	medias ondul	média	PA	SP	76,548	0,094	S	0,112
R10	CC+	6	escamado	boa	PA	SP	63,54	0,097	S	0,0917
R11	CC+	2	uniforme(alto)	ruim	PI	SP	61,181	0,155	CC	0,0603
R12	CC-	2	muitas ondul	média	PA	SP	83,891	0,128	CC	0,0816
R13	CC-	2	poucas ondul	muito boa	PA	SP	116,82	0,1	G	0,127
R14	CC+	6	medias ondul	média	PA	SP	105,15	0,266	S	0,172
R15	CC-	6	poucas ondul	boa	PA	SP	108,18	0,067	S	0,173
R16	CC+	2	poucas ondul	boa	PA	SP	112,06	0,484	G	0,141

Tabela A-10 – Qualidade visual da solda eletrodo AWS E-601

ELETR	P	a	aspecto	qualidade	perfil	poros.	Im	CV	Transf	custo
			sup. Solda	sup. Solda	PA/PI	superf.	A	R\$(1,0/kW)		
B1	CC+	2	sem ondul	muito bom	PA	SP	116,89	0,097	CC	0,135
B10	CC-	6	poucas ondul	ruim	PI	SP	49,325	0,148	CC	0,056
B11	CC+	6	poucas ondul	médio	PA	SP	54,768	0,122	G	0,078
B12	CC+	2	sem ondul	muito bom	PA	SP	109,49	0,098	CC	0,124
B13	CC+	2	médias ondul	médio	PA	SP	76,243	0,111	CC	0,078
B14	CC-	2	poucas ondul	ruim	PI	SP	47,732	0,185	CC	0,055
B15	CC+	6	muitas ondul	médio	PA	SP	126,34	0,075	S	0,248
B16	CC-	2	poucas ondul	bom	PA	SP	119,99	0,114	CC	0,125
B2	CC-	6	médias ondul	médio	PA	SP	117,69	0,09	G	0,153
B3	CC+	6	médias ondul	médio	PA	SP	101,21	0,097	G	0,17
B4	CC+	2	muitas ondul	médio	PA	SP	66,505	0,146	G	0,073
B5	CC-	2	sem ondul	muito bom	PA	SP	121,67	0,604	CC	0,12
B6	CC-	6	médias ondul	ruim	PI	SP	56,441	0,123	G	0,018
B7	CC+	6	muitas ondul	médio	PA	SP	59,042	0,119	S	0,106
B8	CC-	2	sem ondul	ruim	PI	SP	50,984	0,175	CC	0,056
B9	CC-	6	muitas ondul	médio	PA	SP	116,89	0,093	S	0,15

Tabela A-11 – Qualidade visual da solda eletrodo AWS – E7018

E	P	a	aspecto	qualidade	perfil	porosidades	In	CV	Transf	custo
			superficial	superficial	PA/PI	superficiais	A	R\$(1,0kW)		
C1	CC+	2	médias ondul	médio	PA	SP	151,34	0,061	G	0,308
C2	CC-	6	sem ondul	bom	PA	SP	100,29	0,06	S	0,234
C3	CC+	6	poucas ondul	bom	PA	SP	79,747	0,073	G	0,172
C4	CC+	6	muitas ondul	ruim	PA	SP	137,94	0,073	S	0,328
C5	CC-	2	muitas ondul	médio	PA	SP	93,519	0,064	S	0,224
C6	CC-	2	poucas ondul	médio	PA	SP	117,94	0,057	S	0,314
C7	CC-	6	sem ondul	bom	PA	SP	76,829	0,067	G	0,21
C8	CC+	2	poucas ondul	médio	PA	CP	97,091	0,08	G/CC	0,16
C9	CC-	6	médias ondul	médio	PA	SP	72,658	0,069	S	0,186
C10	CC-	2	muitas ondul	médio	PA	CP	70,285	0,074	S	0,165
C11	CC+	2	poucas ondul	ruim	PI	SP	152,53	0,059	G/S	0,308
C12	CC+	6	muitas ondul	ruim	PA	SP	75,731	0,08	G	0,162
C13	CC+	2	poucas ondul	muito bom	PA	SP	85,545	0,089	CC	0,14
C14	CC-	2	sem ondul	bom	PA	SP	116,04	0,062	S	0,309
C15	CC-	6	poucas ondul	ruim	PA	SP	101,92	0,058	S	0,298
C16	CC+	6	muitas ondul	ruim	PA	SP	135,84	0,056	S	0,331

Tabela A12 – Qualidade Visual da Solda eletrodo celulósico AWS E—6010

TABELAS: ÁREAS DE PENETRAÇÃO, ZAC E REFORÇO DO CORDÃO

LEGENDA:

Rx – eletrodo E6013 – rutilico $V_s - 1,667 \text{ mm/s}$

Bx – eletrodo E7018 – básico $V_s - 1,667 \text{ mm/s}$

Cx – eletrodo E6010 – celulósico $V_s - 1,667 \text{ mm/s}$

S_r – Área de reforço do cordão - mm^2

S_p – Área de penetração da solda - mm^2

S_z – Área afetada pelo calor (ZAC) – mm^2

RRx, BBx, CCx - - $V_s - 2,333 \text{ mm/s}$

CP	S_r	S_p	S_z	CP	S_r	S_p	S_z	CP	S_r	S_p	S_z
	mm^2	mm^2	mm^2		mm^2	mm^2	mm^2		mm^2	mm^2	mm^2
BM1	13,0	6,4	21,8	RM1	13,2	6,0	19,1	CM1	24,3	20,9	45,0
BM2	20,6	14,2	62,0	RM2	28,7	7,1	36,2	CM2	22,2	51,4	132,0
BM3	24,1	5,5	24,5	RM3	11,0	1,7	9,6	CM3	3,7	21,0	63,9
BM4	29,3	16,0	47,7	RM4	20,7	8,0	39,3	CM4	27,3	49,0	134,7
BM5	13,7	5,0	18,3	RM5	12,9	17,9	71,6	CM5	5,7	5,3	40,5
BM6	16,8	11,1	31,4	RM6	23,1	5,4	35,0	CM6	5,7	51,4	101,6
BM7	11,3	8,6	27,2	RM7	8,1	9,0	8,2	CM7	10,4	8,2	27,4
BM8	8,0	14,6	48,5	RM8	21,6	15,4	46,0	CM8	13,7	32,8	82,8

Tabela A13 – Valores obtidos para as áreas de penetração, área de deposição e ZAC soldagem manual $V_s = 2,333 \text{ mm/s}$

CP	S_r	S_p	S_z	CP	S_r	S_p	S_z
	mm^2	mm^2	mm^2		mm^2	mm^2	mm^2
RR1	8,0	7,1	28,4	CC1	8,0	24,9	75,5
RR2	3,8	9,7	31,2	CC2	11,9	30,7	85,8
RR3	7,2	5,2	23,0	CC3	4,6	8,0	32,2
RR4	3,5	26,6	64,6	CC4	7,0	21,8	64,5
RR5	1,85	34,4	77,0	CC5	4,2	14,0	37,0
RR6	1,08	21,0	62,3	CC6	18,3	40,7	84,0
RR7	5,9	6,7	28,1	CC7	4,2	15,7	38,0
RR8	10,9	19,6	65,7	CC8	3,9	12,8	36,3
BB1	10,0	7,5	29,5				
BB2	8,5	6,8	26,8				
BB3	6,8	9,9	38,5				
BB4	10,2	3,5	15,0				
BB5	10,1	6,3	20,1				
BB6	10,8	3,6	11,5				
BB7	12,2	2,5	14,6				
BB8	11,1	2,8	11,2				

Tabela A14 – Valores obtidos para área de penetração, deposição e ZAC soldagem automática $V_s = 2,333 \text{ mm/s}$

CP	S_r	S_p	S_z	CP	S_r	S_p	S_z	CP	S_r	S_p	S_z
	mm²	mm²	mm²		mm²	mm²	mm²		mm²	mm²	mm²
C1	53,3	25,6	84,2	R1	9,0	2,5	16,0	B1	21,0	11,0	35,9
C2	12,8	39,2	98,0	R2	21,0	3,2	35,0	B2	18,7	5,3	34,8
C3	2,4	13,3	61,0	R3	14,3	5,3	28,5	B3	18,7	6,6	36,5
C4	7,8	31,2	112,6	R4	19,6	10,9	25,5	B4	11,6	5,5	16,8
C5	15,0	31,6	104,0	R5	20,0	13,8	49,3	B5	20,5	6,2	27,4
C6	36,4	50,7	169,0	R6	15,0	13,5	55,5	B6	10,4	5,2	14,5
C7	9,3	28,0	91,2	R7	14,2	05,5	34,0	B7	15,8	3,5	19,1
C8	7,1	16,9	43,0	R8	21,6	1,5	8,02	B8	16,7	1,6	9,5
C9	11,0	24,1	64,5	R9	0,91	5,8	34,7	B9	9,4	13,4	36,8
C10	13,5	20,7	65,8	R10	13,5	6,0	32,1	B10	10,5	2,0	11,3
C11	36,0	37,	95,6	R11	8,0	3,0	17,0	B11	10,9	8,4	15,3
C12	11,6	12,9	50,9	R12	11,1	5,3	28,6	B12	21,7	8,2	44,0
C13	10,9	18,3	44,5	R13	17,4	11,7	55,0	B13	14,1	9,1	19,9
C14	36,1	52,8	149,4	R14	18,0	11,2	59,0	B14	14,9	2,3	10,5
C15	15,8	42,0	109,8	R15	23,9	8,7	70,8	B15	16,3	14,7	65,8
C16	17,0	39,2	137,4	R16	18,8	12,9	52,3	B16	21,4	7,1	29,2

Tabela A15 – Valores obtidos para área de penetração, deposição e ZAC, soldagem automática

APENDICE B

MACROGRAFIAS ESQUEMÁTICAS DA SOLDAGEM EM POLARIDADE DIRETA E REVESA

As macrografias mostradas a seguir foram obtidas através do projetor de perfil do laboratório de metrologia da UNIFEI de corpos de prova previamente seccionados, polidos e tratados quimicamente com solução a 3% de nital.

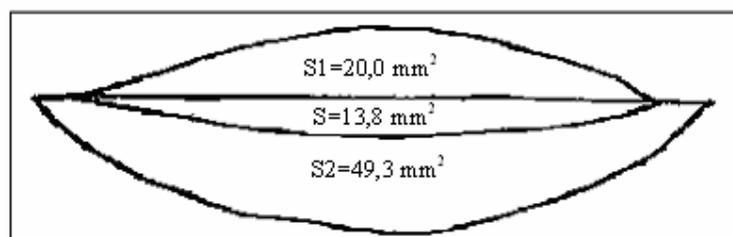


Figura B1 – peça 1.5 - Macrografia da soldagem com eletrodo AWS E-6013 CC+
H=1946 J/mm, $V_s = 1,667$ mm/s, I=124,3 A, a = 2mm

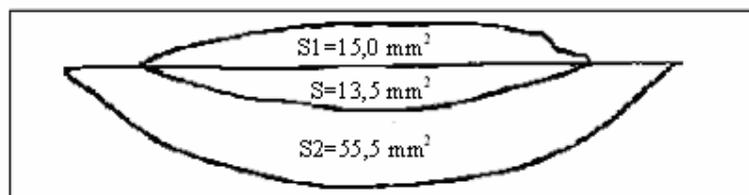


Figura B2 – peça 1.6 - Macrografia da soldagem com eletrodo AWS E-6013 CC+
H=2441 J/mm, $V_s = 1,667$ mm/s, I=115,6 A a = 6mm

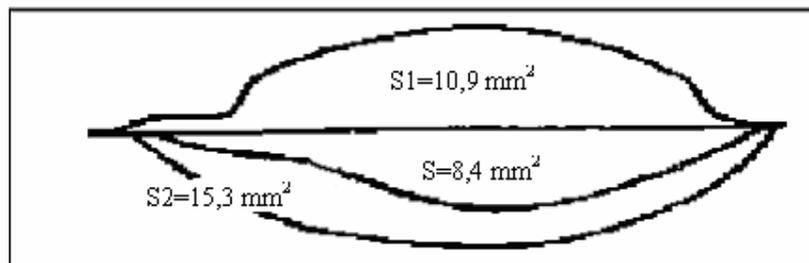


Figura B3 – peça 2.11 - Macrografia da soldagem com eletrodo AWS E-7018 CC+
H=805 J/mm, $V_s = 1,667$ mm/s I=101,2 A, a = 6mm

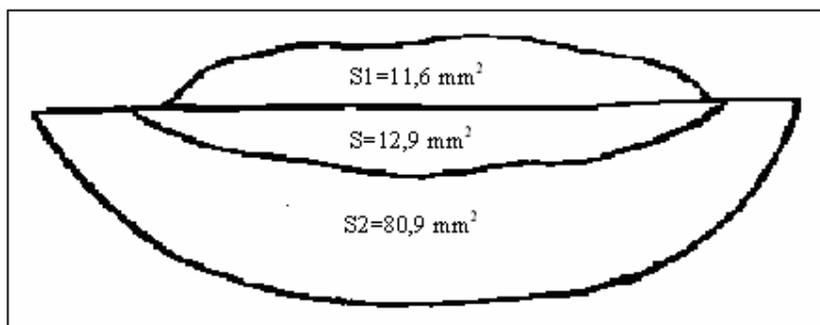


Figura B4 – peça 3.12 – Macrografia da soldagem com eletrodo AWS E-6010 CC+
H=1639 J/mm, $V_s = 1,667 \text{ mm/s}$, $I = 75,7 \text{ A}$, $a = 6 \text{ mm}$

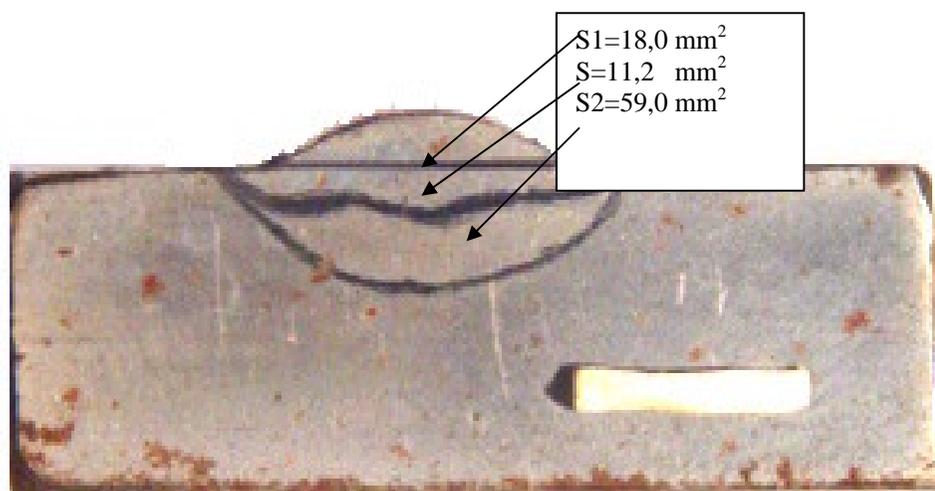


Figura B5 - R14 – Macrografia da soldagem com eletrodo AWS E-6013CC+
H= 1740 J/mm, $V_s = 1,667 \text{ mm/s}$, $I = 105 \text{ A}$, $a = 6 \text{ mm}$

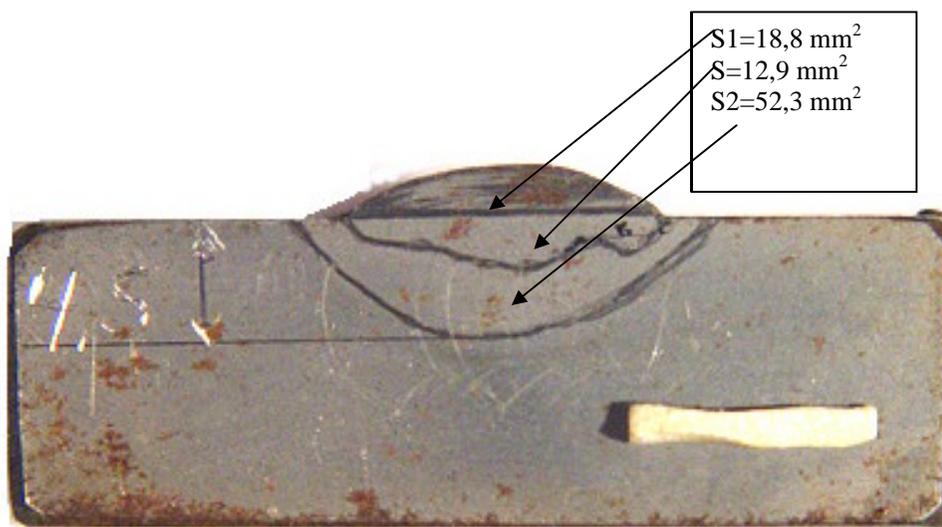


Figura B6 - R16– Macrografia da soldagem com eletrodo AWS E-6013CC+
H=1437 J/mm, $V_s = 1,667 \text{ mm/s}$, $I = 112 \text{ A}$, $a = 2 \text{ mm}$

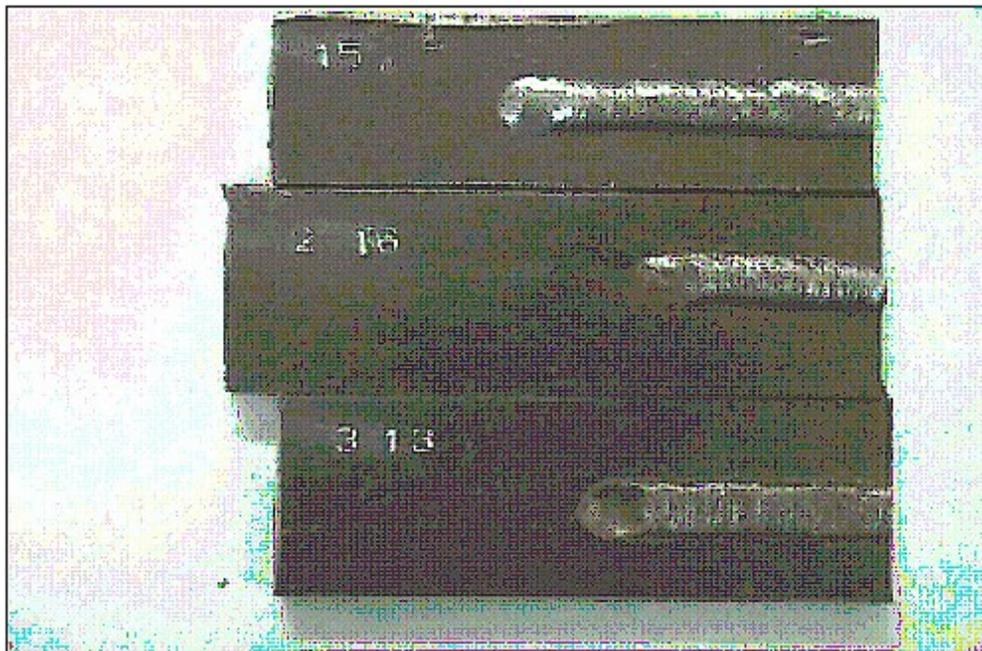


Figura B7 - Corpos de prova produzidos com a soldagem automática

(1.5) - E6013 H=1113 J/mm CC- a= 2mm I = 111 A

(2.16) - E7018 H=1290 J/mm CC- a= 2 mm I = 122 A

(3.13) - E6010 H=1411 J/mm CC+ a= 2mm I = 86 A



Figura B8 - Corpos de prova produzidos com a soldagem manual

(1.6) - E6013 -H=1677 J/mm CC- I = 98,4 A a= 2 mm

(2.5) - E7018- H=769 J/mm CC- I = 93,3 A a = 2mm

(3.5) - E6010- H=1092 J/mm CC- I = 63,4 A a = 2mm

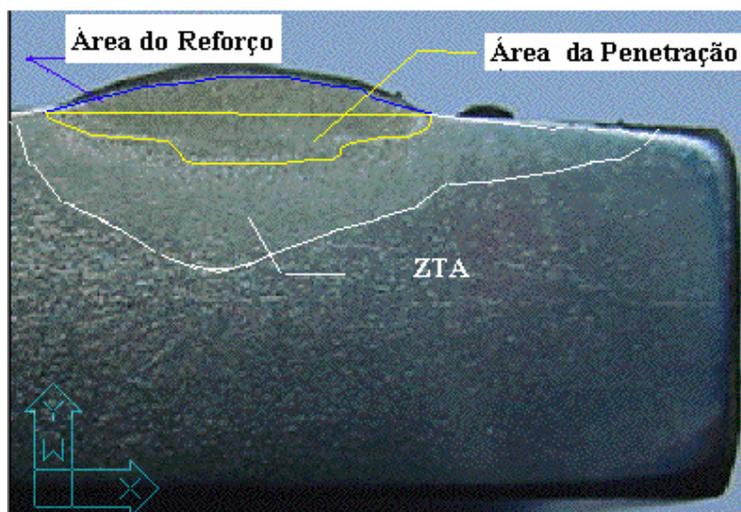


Figura B9 - Perfil da Solda e demarcações das áreas (reforço, penetração e ZTA) de um corpo de prova

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.