

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Comportamento da Soldagem por
Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo
Tubular através da Metodologia Taguchi**

Autor: **Enedina Beatriz Gomes**

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

Itajubá, Maio de 2006

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Comportamento da Soldagem por
Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo
Tubular através da Metodologia Taguchi**

Autor: **Enedina Beatriz Gomes**

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

Curso: **Mestrado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

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

Itajubá, Maio de 2006

M.G. – Brasil

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Comportamento da Soldagem por
Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo
Tubular através da Metodologia Taguchi**

Autor: Enedina Beatriz Gomes

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wanderley Xavier Pereira – UNIS

Prof. Dr. João Roberto Ferreira - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa, Presidente - IEM/UNIFEI

Dedicatória

À Deus, razão do meu viver.

À minha mãe Maria Nazaré Gomes.

Ao meu esposo Edésio Roberto Putini,
e aos meus filhos Ednei, Eric e Edric.

Agradecimentos

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

Aos amigos, Luciana, Lucilene, Anderson e Eduardo, pelo permanente incentivo, colaboração, amizade, momentos de lazer e inesquecível convívio escolar.

Aos Professores da Pós Graduação da Universidade Federal de Itajubá, Juliano, José Célio, Márcio Tadeu, Wlamir, Paulo Shigueme, João Roberto, e Genésio, pelo profissionalismo, apoio e convívio acadêmico.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos Professores e Funcionários, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos funcionários dos laboratórios de soldagem, metrologia e materiais pelo apoio técnico e na confecção de corpos de prova, para este trabalho.

Ao CNPQ, através do Programa de bolsas, pelo apoio financeiro.

À minha família, pelos incentivos; à Mônica que “colocou a mão na massa”, à minha mãe pela hospitalidade e amor.

A Liliam, minha secretária do lar, que me substituiu quando me ausentei.

A Janice, amiga e companheira que muito me ajudou na formatação deste trabalho.

“Ainda que eu tenha o dom de profetizar e conheça todos os mistérios e toda a ciência,..., se não tiver amor, nada serei.” 1Cor 13:2

Resumo

GOMES, E. B. (2006), *Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-circuito, aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi*. Itajubá, 99p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Este trabalho apresenta um estudo experimental para identificar os fatores de controle mais influentes no Processo Eletrodo Tubular sob proteção gasosa, eletrodo AWS E 71T-1, com transferência metálica tipo curto-circuito. As características do comportamento do arco elétrico, geométricas e econômicas do cordão foram analisadas por uma seqüência de testes de soldas realizadas em simples deposição na posição plana em chapas de aço ABNT 1020. As variáveis (ou fatores de controle) estudadas foram o tipo de gás, a tensão de soldagem, a velocidade de alimentação, a velocidade de soldagem, a distância bico contato peça e a indutância em diferentes níveis por um arranjo ortogonal L18 do planejamento experimental estatístico conhecido como Método Taguchi. Os resultados mostraram que a indutância teve uma influência significativa na redução da formação de respingos, apesar de diminuir a estabilidade do arco principalmente com o aumento dos curtos de pequena duração (curtos aleatórios); a tensão e o tipo de gás de proteção também tiveram forte influência na estabilidade do arco, e condições para obter um melhor comportamento do arco foram estabelecidas. Por outro lado, a velocidade de soldagem e a distancia bico contato peça não alteram nenhuma das características dos resultados analisados.

Palavras-chave

Soldagem, Processo Eletrodo Tubular, Transferência por Curto-circuito, Método Taguchi, DOE.

Abstract

GOMES, E. B. (2006), Process Behavior and Arc Stability Analysis in Short Circuit Flux Cored Arc Welding Using Taguchi Methodology. Itajubá, 99p. MSc. Dissertation - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

This work presents an experimental study of the control factors influencing a gas shielded FCAW process, electrode AWS E 71T-1 (rutile), in a short circuiting transfer mode. The arc stability, geometric and economic characteristics were evaluated in a series of experimental tests using a bead on plate (BOP) technique, flat position, in a mild steel ABNT 1020. As a control factors, the inductance level, voltage, wire feed rate, welding speed, the contact tube to work distance and shielding gas type were used in different levels by the use of an orthogonal L18 array. The results showed a very significant influence of the inductance in lowering spatter formation despite the decrease in arc stability mainly by the unstable short circuits presence. Also the voltage and shielding gas type had a significant influence in the arc stability, and conditions to reach a better arc stability were established. On the other hand the welding speed and the contact tube to work distance factors had shown no significant influence in any response studied.

Keywords

Welding, FCAW, Short Circuit Transfer, Taguchi, DOE.

Sumário

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
SIMBOLOGIA	ix
ABREVIATURAS	xii
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Motivações e Possíveis Contribuições	5
1.3 Limitações	5
1.4 Conteúdo	5
CAPÍTULO 2	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Fundamentos do Processo Eletrodo Tubular - FCAW	7
2.2 Arames Tubulares	8

2.3 Soldagem com Gás de Proteção	10
2.3.1 Proteção Gasosa (FCAW-S)	12
2.4 Soldagem sem Proteção Gasosa (FCAW-S)	15
2.5 Variáveis do Processo	16
2.5.1 Corrente de Soldagem	16
2.5.2 Tensão do Arco Elétrico	17
2.5.3 Extensão Livre do Eletrodo	18
2.5.4 Velocidade de Soldagem	19
2.6 Transferência Metálica	19
2.6.1 Tipos de Transferência Metálica	20
2.7 Critérios de Estabilidade do Arco em Transferência por Curto-Circuito	26
2.8 Características do Processo	30
2.8.1 Efeito da Indutância na Estabilidade do Arco	30
2.8.2 Econômicas	34
2.8.3 Efeito dos Parâmetros na Geometria do Cordão de Solda	37
2.9 Método Taguchi/Projeto Robusto	37
2.9.1 Definição	38
2.9.2 Desenvolvimento do Projeto Robusto	38
2.9.3 Projeto dos Parâmetros	39
2.9.4 Razão Sinal/Ruído	39
2.9.5 Arranjo Ortogonal	41
2.10 Experimentação e Análise	42

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
3.1 Banco de Ensaios e Montagem Experimental	46
3.2 Materiais de Consumo	47
3.2.1 Arame Eletrodo	47
3.2.2 Material de Base	47
3.2.3 Gás de Proteção	47
3.3 Planejamento Experimental	48
3.3.1 Escolha dos Fatores de Controle e Respostas	48
3.3.2 Definição dos Níveis dos Fatores de Controle	48

3.4 Delineamento dos Experimentos (Ensaio Finais)	54
3.5 Determinação das Respostas	57
3.5.1 Avaliação da Estabilidade do Arco e Regularidade de Ocorrência de Curto -Circuito	57
3.5.2 Características Geométricas e Econômicas	57
3.6 Ensaio de Confirmação	59
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 Resultados dos Ensaio Finais	60
4.2 Análise de Variância das Respostas do Ensaio	64
4.3 Análise das Respostas quanto à Estabilidade do Arco	66
4.3.1 Influência da Indutância	70
4.3.2 Influência da Tensão	76
4.3.3 Influência da Velocidade de Alimentação	78
4.4 Análise das Respostas quanto à Geometria do Cordão	78
4.5 Análise das Respostas quanto à Característica Econômica	82
4.6 Comentários Finais Associados às Análises	85
4.7 Resultados dos Ensaio de Confirmação	85
4.7.1 Ensaio de Confirmação	86
4.7.2 Previsão da Melhor Condição por Taguchi	87
4.7.3 Análise de Variância da Média Prevista das Respostas para Maximizar a Taxa S/R	88
4.7.4 Intervalo de Confiança para a Média Prevista por Taguchi	89
CAPÍTULO 5	
CONCLUSÕES E PROPOSTAS	92
5.1 Conclusões	92
5.2 Propostas para Trabalhos Futuros	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

Lista de Figuras

Figura 2.1 -	Soldagem com proteção gasosa.	10
Figura 2.2 -	Efeito de gás de proteção no perfil do cordão.	14
Figura 2.3 -	Soldagem sem proteção gasosa.	15
Figura 2.4 -	Influência da intensidade da corrente sobre a taxa de deposição para arames do tipo T-1.	17
Figura 2.5 -	Efeito da distância do bico de contato-peça na corrente e taxa de deposição.	19
Figura 2.6 -	Principais tipos de transferências metálicas.	21
Figura 2.7 -	Transferência por curto-circuito.	23
Figura 2.8 -	Ciclo completo da transferência por curto-circuito.	23
Figura 2.9 -	Efeito da tensão nos modos de transferências metálicas.	25
Figura 2.10 -	Modos de transferência metálica para o arame AWS E71 T-1.	26
Figura 2.11 -	Índices da transferência metálica por curto-circuito.	27
Figura 2.12 -	Detalhe da transferência durante curto-circuito.	31
Figura 2.13 -	Efeito da indutância na corrente de curto.	32
Figura 2.14 -	Efeito “pinch” e sua influência na quantidade de respingos.	33
Figura 2.15 -	Velocidade de fusão dos arames tubulares e maciços.	36
Figura 3.1 -	Banco de ensaios – (LSO – UNIFEI).	46
Figura 3.2 -	Oscilogramas de tensão (24 V): (a) $V_a = 3\text{m/min}$ – transferência metálica tipo globular; (b) $V_a = 4\text{m/min}$ – poucos curtos.	49
Figura 3.3 -	Oscilogramas de tensão ($V = 19\text{V}$, $\text{DBCP} = 16\text{mm}$, $V_a = 4\text{m/min}$) para os gases: (a) CO_2 e (b) C25.	50

Figura 3.4 -	Oscilogramas de tensão para distância bico contato peça maior (gás C25, $V = 19V$, $V_a = 4m/min$ e $DBCP = 19mm$).	51
Figura 3.5 -	Perfil geométrico de um cordão de solda.	52
Figura 3.6 -	Fotos dos cordões de solda dos testes da Tabela 3.2.	53
Figura 3.7 -	Distância bico de contrato peça (DBCP).	56
Figura 4.1 -	Oscilogramas de tensão típicos: (a) pequena regularidade (19V, IND 2) e (b) boa regularidade(21V, IND 9).	67
Figura 4.2 -	Oscilogramas da corrente de curto circuito típicos: (a) baixa indutância, (b) alta indutância.	68
Figura 4.3 -	Efeitos dos fatores de controle na taxa de variação da corrente: (a) di/dts e (b) di/dtd .	70
Figura 4.4 -	Efeitos dos fatores de controle no índice de respingos.	71
Figura 4.5 -	Efeitos dos fatores de controle no desvio padrão do tempo de curto-circuito.	72
Figura 4.6 -	Histogramas do tempo de curto-circuito com proteção gasosa CO_2 : (a) alta indutância IND9, 19V e (b) baixa indutância IND2, 21V.	73
Figura 4.7 -	Histogramas do tempo de curto-circuito com proteção gasosa C25: (a) alta indutância IND9, 19V e (b) baixa indutância IND2, 21V.	74
Figura 4.8 -	Efeito da interação tensão e indutância no desvio padrão do tempo de curto.	75
Figura 4.9 -	Efeitos dos fatores de controle no desvio padrão relativo da corrente de pico.	76
Figura 4.10 -	Influência dos fatores no tempo total de curto-circuito: (a) efeitos principais e (b) interação indutância e tipo de gás.	77
Figura 4.11 -	Aspecto superficial do cordão de solda com proteção gasosa C25 para os três níveis de tensão (19V, 21V, 23V): (a) $V_a = 4m/min$, (b) $V_a = 5m/min$ e (c) $V_a = 5,5m/min$.	79
Figura 4.12 -	Aspecto superficial do cordão de solda com proteção gasosa CO_2 para os três níveis de tensão (19V, 21V, 23V): (a) $V_a = 4m/min$, (b) $V_a = 5m/min$ e (c) $V_a = 5,5m/min$.	80
Figura 4.13 -	Efeitos dos fatores de controle na qualidade do cordão.	80
Figura 4.14 -	Efeitos dos fatores de controle no índice de convexidade.	81

Figura 4.15 -	Perfil do cordão de solda com proteção gasosa CO ₂ : (a) Tensão 19V, IND 2 e (b) Tensão 23V IND 9.	81
Figura 4.16 -	Perfil do cordão de solda com proteção gasosa C25: (a) Tensão 19V, IND 2 e (b) Tensão 23V IND 5.	81
Figura 4.17 -	Efeitos dos fatores de controle no índice de penetração e diluição.	82
Figura 4.18 -	Efeitos dos fatores de controle na taxa de deposição.	83
Figura 4.19 -	Efeito da alimentação do arame em função da taxa de deposição.	84
Figura 4.20 -	Efeito da alimentação do arame em função da taxa de respingos.	84
Figura 4.21 -	Efeitos dos fatores de controle na função S/R para taxa de fusão.	88

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 -	Resumo dos consumíveis para processo eletrodo tubular.	15
Tabela 2.2 -	Taxas típicas de deposição de processos usados em indústria “offshore”.	36
Tabela 2.3 -	Matriz ortogonal L8.	41
Tabela 3.1 -	Composição química e propriedades mecânicas.	47
Tabela 3.2 -	Resultado do perfil do cordão em função da razão velocidade de alimentação por velocidade de soldagem.	52
Tabela 3.3 -	Níveis dos fatores de controle usados nos ensaios.	54
Tabela 3.4 -	Seqüência de soldagem do arranjo ortogonal para o ensaio final.	55
Tabela 3.5 -	Parâmetros fixados para os ensaios: final e de confirmação.	55
Tabela 4.1 -	Resultado dos ensaios.	61
Tabela 4.2 -	Resultados obtidos para a geometria e aparência do cordão.	62
Tabela 4.3 -	Resultados das características econômicas e geométricas do cordão.	63
Tabela 4.4 -	Resultados referentes às características operacionais dos ensaios.	64
Tabela 4.5 -	ANOVA para o comportamento do arco e transferência da gota.	65
Tabela 4.6 -	ANOVA das características geométricas e econômicas do cordão.	66
Tabela 4.7 -	Condições estabelecidas para ocorrência de transferência metálica.	69
Tabela 4.8 -	Teste F, F _{crítico} e porcentagem de contribuição para a taxa S/R.	86
Tabela 4.9 -	Níveis dos fatores de controle para os ensaios de confirmação.	87
Tabela 4.10 -	Resultados obtidos dos experimentos realizados e os previstos por Taguchi.	87
Tabela 4.11 -	Análise de variância para a média prevista para taxa de fusão.	89

Tabela 4.12 -	Comparação entre os valores previsto e real para as características econômicas e geométricas.	91
Tabela 4.13 -	Comparação entre os valores previsto e real para o comportamento do arco.	91

Simbologia

CC+	Corrente continua
CCPR	Corrente continua polaridade reversa
cdp	Corpo de prova
cpd	Curto de pequena duração
DBCP	Distância bico contato peça (mm)
D	Diluição (%)
di/dtd	Taxa de variação da corrente de curto-circuito de descida (A/ms)
di/dts	Taxa de variação da corrente de curto-circuito de subida (A/ms)
$F_{0,05}$	Fator de variância crítico para confiança de 95%
F_{AO}	Fator de variância calculado para cada resposta
GL	Graus de liberdade
I_{ab}	Corrente do arco aberto (A)
I_{cc}	Corrente de curto-circuito (A)
I_{cc}^b	Corrente no início do curto-circuito (A)
I_{cc}^e	Corrente final do curto-circuito (A)
I_m	Corrente média de soldagem (A)
I_{ef}	Corrente eficaz de soldagem (A)
IC_p	Intervalo de confiança
IC	Índice de convexidade (%)
IND	Indutância
IP	Índice de penetração (%)
IR	Índice de respingos (%)
la	Comprimento do arame consumido (mm)

le	Comprimento do arame energizado – stick-out (mm)
L.E.	Limite de escoamento do eletrodo (N/mm ²)
L.R.	Limite de resistência do eletrodo (N/mm ²)
mf	Massa do cdp após soldagem (g)
mi	Massa do cdp antes da soldagem (g)
MQ	Média quadrática
n	Número de repetições num ensaio
N	Número total de ensaios
p	Penetração do cordão (mm)
QC	Qualidade do cordão de solda
r	Reforço do cordão (mm)
Rs	Razão entre a velocidade de alimentação e velocidade de soldagem
R	Rendimento do processo (%)
S/R	Taxa sinal ruído - função objetivo
S/R _s	Taxa sinal ruído para minimizar os resultados
S/R _L	Taxa sinal ruído para maximizar os resultados
Sc	Área total do cordão de solda (mm ²)
Sp	Área de penetração (mm ²)
Sr	Área do reforço do cordão (mm ²)
SS	Soma quadrática
t	Espessura da chapa (mm)
ta	Tempo de soldagem ou tempo do arco aberto (s)
t _{cc}	Tempo de duração do curto (s)
t _{ab}	Tempo do arco aberto (s)
T	Período de transferência das gotas (t _{ab} + t _{cc})
T _{cc}	Tempo total de curto porcentual (%)
TD	Taxa de deposição do arame eletrodo (kg/h)
TF	Taxa de fusão do arame eletrodo (kg/h)
U _i	Tensão de reignição do arco após o fim do curto-circuito (V)
U _{ab}	Tensão do arco aberto (V)
U _{cc}	Tensão durante o curto circuito (V)
U _{cc} ^b	Tensão quando inicia o curto (V)
U _{cc} ^e	Tensão quando termina o curto (V)

V	Tensão média de soldagem (V)
V _a	Velocidade de alimentação do arame eletrodo (m/min)
Valor p	Nível de significância
V _e	Variância do erro
V _s	Velocidade de soldagem (cm/min)
w	Largura do cordão (mm)
W	Velocidade de fusão do eletrodo (m/min)
y _i	Característica da qualidade
σ_{I_p}	Desvio padrão relativo da corrente de pico (%)
σ_T	Desvio padrão do período médio de curto-circuito (ms)
σ_{tcc}	Desvio padrão do tempo de curto-circuito (ms)
ρ_a	Densidade linear do arame (g/m)
α	Erro
α_c	Coefficiente da contribuição do arco para a fusão do eletrodo (mm/A.s)
β_c	Coefficiente da contribuição do efeito joule para a fusão do eletrodo (mm/A.s)
ν_e	Graus de liberdade para o erro

Abreviaturas

FCAW	Flux Cored Arc Welding - Processo Eletrodo Tubular
GMAW	Gas Metal Arc Welding - Processo com proteção gasosa e eletrodo sólido
IEM	Instituto de Engenharia Mecânica
LSO	Laboratório de Soldagem
MIG/MAG	Processo de soldagem MIG/MAG
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A evolução da eletrônica, da informática e da metalurgia, as constantes exigências de competitividade impondo requisitos de qualidade e de produtividade a baixos custos, tem impulsionado a tecnologia de soldagem a ampliar rapidamente o desenvolvimento e as aplicações industriais dos diversos processos de soldagem ao arco voltaico. Destes processos, a soldagem a Arame Tubular, muito empregada nos EUA e Japão, é uma das técnicas mais recentes sendo ainda pouco explorada e divulgada industrialmente, principalmente no Brasil. Aqui, estes arames encontram-se a um nível tecnológico pouco desenvolvido representando cerca de 2% (1600 ton/ano) do total de consumíveis produzidos pela indústria nacional, contra 65% dos eletrodos revestidos (Fortes, 2004). Isto ocorre devido a existência de fatores que dificultam a sua divulgação e utilização tais como a escassez de literatura específica, as dificuldades operacionais para a sua fabricação, custo mais elevado, a incerteza pelos resultados da substituição dos métodos e processos tradicionais, entre outros. Porém sua popularidade tem crescido, devido ao grande número de vantagens que o processo oferece como, por exemplo, alta qualidade do metal de solda depositado, excelente aparência do cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos, possibilidade de solda em todas as posições, preferência dos soldadores. Além disso, a razão de fusão do arame tubular na soldagem é maior que do arame sólido, a uma dada corrente, pois no caso de arame tubular, toda a corrente é conduzida pelo invólucro tubular metálico.

Então, a densidade de corrente e o efeito Joule garantem uma taxa de fusão maior para arames tubulares. (Fortes, 2004).

A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) é um processo que reúne as principais vantagens da soldagem com arame sólido e proteção gasosa (GMAW) tais como o alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda aliados com as vantagens da soldagem manual com eletrodos revestidos (SMAW) como a grande versatilidade, possibilidades de ajustes da composição química do cordão de solda, e facilidade de operação em campo.

Neste processo, que pode ser automático ou semi - automático, o calor necessário a ligação das partes é fornecido por um arco voltaico estabelecido entre a peça e o arame tubular contínuo, cujo núcleo é preenchido por um fluxo de composição química definida fundível, composto por materiais inorgânicos e pós-metálicos que possuem várias funções, entre as quais a melhoria das características do arco elétrico, a transferência do metal de solda e em alguns casos a adição de elementos de liga. O fluxo permite ainda agir como formador de escória, e os gases gerados de sua queima atuam como proteção primária sobre a poça de fusão, podendo ou não ser complementada por uma proteção extra de um gás externo.

O ajuste dos parâmetros no processo de soldagem arame tubular como, por exemplo, as variações comuns no gás de proteção, na fonte de energia, na intensidade da corrente e nos tipos de arames têm efeitos significativos que podem produzir três modos básicos de transferência de metal através do arco, ou seja, globular, spray e curto circuito (Kobayashi et al, 2005; Fortes, 2004; Wang, et al, 1995). A transferência de metal no modo globular é obtida predominantemente por arames tubulares autoprotetidos, que não necessitam de proteção gasosa externa para a poça de fusão (Miranda et al, 1998); para arames tubulares com proteção gasosa pelo gás CO₂, a transferência de metal tende a ser globular para tensões relativamente altas (Houdcroft e John, 1988). O processo a arame tubular convencional ajustado no modo de transferência “spray” não permite deposição do metal de solda fora de posição e nem em chapas finas (Nascimento et al, 2003), limitando este modo de transferência em suas aplicações industriais.

Uma das alternativas importantes no ambiente industrial se refere muitas vezes a soldagem de chapas finas e com possibilidades de trabalho em todas as posições. Para permitir estes desenvolvimentos e adaptações, o controle do processo de transferência metálica do arame para a peça se torna imprescindível. Neste sentido os vários tipos de transferências possuem suas particularidades, entretanto o modo de transferência por curto circuito se mostra como o mais viável para atender tais requisitos. A despeito de suas

vantagens já preconizadas, este modo de transferência apresenta suas dificuldades de ajuste em função principalmente de irregularidades ocasionadas pelo desequilíbrio provocado na formação da gota e sua posterior transferência por curto-circuito. Deste modo, uma série de análises se torna importante principalmente aquelas referentes a obtenção de condições que conduzam a uma melhor estabilidade do arco. Acrescente-se a isto os efeitos dos ajustes dos parâmetros nas condições geométricas de formação do cordão bem como os reflexos econômicos deste ajuste no resultado final da solda. Todos estes aspectos em conjunto devem ser observados para se adaptar o processo ao modo de soldagem por curto-circuito. Tais análises têm sido largamente abordadas na literatura em estudos voltados para o processo MIG/MAG. Muitas metodologias de análises têm sido utilizadas, outras adaptadas para se obter um melhor controle sobre os mecanismos durante o momento de crescimento e ocorrência dos curtos-circuitos. Porém poucos estudos têm se concentrado na adaptação do processo de soldagem com eletrodo tubular nas mesmas condições. Obviamente que a utilização do processo FCAW aplicado ao modo de transferência por curto-circuito apresenta limitações por ser característica deste processo o alto rendimento exigindo a maximização de taxas de deposição que permitam de certa forma sobrepor os maiores custos associados ao processo, principalmente no que tange ao alto valor agregado ao arame tubular. Entretanto é necessário frisar que, como afirma Barhost (2000), a utilização do processo FCAW no modo de transferência por curto-circuito pode sim ser uma alternativa interessante quando se procura melhorar a qualidade da solda bem como as propriedades mecânicas do cordão. Porém, cita o mesmo autor, é necessário para isto um melhor controle dos parâmetros de soldagem no sentido de se conseguir maior estabilidade do arco elétrico, resultando em cordões de solda com qualidade superior.

Visando atender cada vez mais as exigências de qualidade da solda, é necessária a utilização otimizada das variáveis do processo de soldagem, que por sua vez influenciam nos modos de transferências metálicas. Ao se considerar o modo de transferência por curto-circuito, variáveis como tensão, corrente, alimentação do arame, nível de regulação do efeito indutivo, velocidade de soldagem, tipo de gás de proteção entre outras também devem ser estudadas bem como seus efeitos sobre as características de formação da gota e reflexos na qualidade da solda. Entretanto tais análises são complexas de se executarem devido ao grande número de variáveis influentes no processo. Desta forma, a utilização de metodologias baseadas em métodos estatísticos se tornam imprescindíveis no sentido de melhor abranger as análises das influências dos parâmetros isoladamente ou através de interações.

Vários métodos baseado na técnica de projeto e análise de experimentos (DOE – Design of Experiments) vem sendo utilizados atualmente em várias áreas do conhecimento relacionados aos processos de manufatura. Dentre estes métodos destacam-se o método fatorial (fracionado ou completo), projeto Taguchi, ou metodologia de superfície de respostas (RSM), cada qual com suas abrangências e particularidades de utilização. O projeto Taguchi, também conhecido como projeto Robusto, tem sido largamente utilizado em aplicações onde a presença de um número elevado de variáveis ou fatores dificulta sobremaneira as análises em função do excessivo número de experimentos necessários quando se trabalha com análises baseadas no projeto fatorial. Com o projeto Taguchi um número reduzido de experimentos pode ser utilizado; entretanto limitações também surgem pela possibilidade de análise de apenas interações entre dois fatores, diferentemente da análise fatorial.

Baseado nestes aspectos este trabalho procura ampliar os conhecimentos associados ao processo com eletrodo tubular aplicado ao modo de transferência por curto-circuito, procurando identificar as variáveis mais influentes no processo bem como seus efeitos de ajustes no comportamento do arco e reflexos nos aspectos geométricos e econômicos do cordão, utilizando para tal os delineamentos dos experimentos e sua posterior análises baseados na metodologia Taguchi, visto ser o número de variáveis influentes no processo bastante elevados.

1.1 OBJETIVOS

Considerando os fatos citados, este trabalho tem como principais objetivos os seguintes aspectos:

- Ampliar o conhecimento do processo eletrodo tubular com proteção gasosa (FCAW), mais especificamente utilizando o arame tubular rutilico, com transferência metálica do tipo curto circuito na soldagem de chapas finas (espessura máxima de até 6mm), complementando os estudos já feitos com este arame, nos modos de transferência pulsada e spray em trabalhos desenvolvidos por Oliveira (2005) e Rodrigues (2005).
- Identificar as variáveis mais significativas e sua influência nas características quanto à estabilidade do arco, ao aspecto geométrico do cordão de solda e econômico do consumível utilizado no modo de transferência metálica por curto-circuito;

- Verificar a adequabilidade de utilização do projeto robusto (Taguchi) na análise de um processo com número grande de fatores influentes, através de um número reduzido de experimentos.

1.2 MOTIVAÇÃO E POSSÍVEIS CONTRIBUIÇÕES

A principal motivação para o presente trabalho foi a ampliação do conhecimento do processo de soldagem com eletrodo tubular no modo de transferência por curto-circuito visando as possibilidades de sua utilização como um processo alternativo ao processo MIG/MAG para a soldagem de chapas finas e/ou em todas as posições de soldagem. Nota-se que o processo de soldagem com eletrodo tubular encontra-se em fase de expansão nas aplicações para a indústria nacional sendo observado pouca divulgação de trabalhos técnico/científicos do mesmo no Brasil. Desta forma ao estudar o processo com eletrodo tubular, este trabalho procura ampliar o conhecimento tecnológico do processo visando uma maior utilização do mesmo pelo setor produtivo nacional.

1.3 LIMITAÇÕES

O presente trabalho se limitou a estudar o processo com eletrodo tubular com proteção gasosa através do arame rutílico, classe AWS E 71T-1, no modo de transferência por curto-circuito na posição plana.

1.4 CONTEÚDO

O trabalho foi dividido nos seguintes capítulos:

No Capítulo 1 se encontra uma introdução do trabalho ressaltando os aspectos que motivaram o presente trabalho bem como suas possíveis contribuições e limitações.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica do presente assunto, destacando os principais aspectos e pesquisas disponíveis na literatura a respeito do processo com

eletrodo tubular (FCAW). Desta forma são descritas as principais variáveis do processo, os modos de transferências metálicas, os principais parâmetros influentes na transferência por curto-circuito e modos de garantir a estabilidade do arco e seus reflexos nas características geométricas e econômicas do cordão. Além disso, os principais aspectos relacionados ao método de Taguchi são também descritos.

O Capítulo 3 descreve o procedimento experimental utilizado para se atingir os objetivos do trabalho. Desta forma, os equipamentos utilizados, a metodologia experimental, a montagem da bancada de ensaios, a seqüência de execução das soldas, os testes exploratórios e os definitivos são descritos neste capítulo.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos. As análises dos resultados são feitas qualitativamente e quantitativamente de acordo com os critérios adotados referentes a estabilidade do arco elétrico, perfil do cordão de solda e características econômicas do consumível.

O Capítulo 5 mostra as conclusões extraídas dos resultados deste trabalho bem como as propostas para futuros trabalhos.

Finalizando com as referências bibliográficas dos diversos documentos livros e publicações técnicas que foram utilizados para confecção e apoio científico desta dissertação.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A finalidade deste capítulo é relatar as informações técnicas que permitam um embasamento teórico dos aspectos relevantes da soldagem associado ao processo com eletrodo tubular, mais especificamente ao processo com eletrodo tubular tipo rutilico. Informações específicas aos modos de transferências metálicas serão apresentadas, com um enfoque especial dado ao modo de transferência metálica por curto-circuito, objetivo central deste trabalho, considerando a influência dos parâmetros de soldagem nos aspectos de estabilização do arco elétrico e na formação do cordão.

2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO ELETRODO TUBULAR - FCAW

O processo Eletrodo Tubular é um processo de soldagem por fusão, cujo arco é estabelecido entre a peça e o eletrodo alimentado continuamente, sendo protegido pela ação de um gás externo (ou não) e pela decomposição do fluxo alojado no interior do arame (Joaquim, 2001; Bracarense, 2000; Welding Handbook, 1991). Este fluxo é composto por materiais inorgânicos e metálicos que possuem várias funções, dentre as quais, a melhoria das características do arco elétrico e da transferência do metal de solda, a proteção do banho de

fusão e, em alguns casos, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (Fortes, 2004; Mota et al, 1998).

Existem duas variações para o processo eletrodo tubular. Na primeira (eletrodo com proteção gasosa), as funções de proteção do arco e ionização da atmosfera são feitas por um gás (inerte, ativo ou mistura destes) introduzido à parte. Na segunda variação (eletrodo autoprotégido), não exige proteção gasosa externa; os gases gerados pela decomposição do fluxo interno do eletrodo formam a atmosfera protetora para o arco e metal fundido. (Fortes, 2004; Bracarense, 2000; Mota et al, 1998).

Apesar da similaridade entre os processos Eletrodo Tubular com proteção gasosa e MIG/MAG, aquele apresenta algumas vantagens e limitações em relação a este. Assim sendo o processo Eletrodo Tubular se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual, além de soldar vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras, apresentar alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente, apresentar alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas, possuir relativamente alta eficiência de deposição e alta produtividade (Araújo, 2004). Em virtude dessas características, pode-se concluir que o processo Eletrodo Tubular é uma excelente opção quando o objetivo é qualidade, produtividade e facilidade operacional. Por outro lado, o processo Eletrodo Tubular limita-se por apresentar um alto custo do arame tubular na base de peso em relação ao arame de eletrodo sólido, entretanto, à medida que aumentam os elementos de ligas esta relação diminui (Araújo, 2004). Além disso, o processo exige a necessidade de remoção de escória e apresenta a tendência de gerar mais fumos do que os processos MIG/MAG e Arco Submerso.

2.2 ARAMES TUBULARES

A matéria prima empregada para a fabricação dos arames tubulares constitui-se de uma fita metálica enrolada na forma de uma bobina e de um pó com formulações específicas, denominado fluxo. A variedade de elementos que podem ser usados no interior dos arames tubulares é grande, por isso a soldagem com este tipo de eletrodo se torna mais complexa. Mudanças para adequação a alguma aplicação particular ou requisito especial são mais facilmente obtidas com arames tubulares que com sólidos, justamente devido a essa flexibilidade. Isso envolve alterações na formulação e no percentual do fluxo.

Não é simples de entender as várias reações químicas que envolvem estes elementos no ambiente do arco e como cada elemento contribui para o comportamento geral do fluxo com respeito ao desempenho do eletrodo, por exemplo, a estabilidade da transferência do metal, a viscosidade e destacabilidade da escória, as propriedades mecânicas finais da soldagem (Bauné et al, 2000). Portanto, cada composição de fluxo, vai gerar um resultado final diferente.

As funções básicas dos componentes do fluxo de acordo com Fortes (2004) são:

- desoxidantes e desnitrificantes - são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício e formadores de nitretos como o alumínio para auxiliar na purificação do metal de solda;
- formadores de escória - compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga;
- estabilizadores do arco - o potássio e o sódio são os elementos que auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos;
- elementos de liga - para aumentar a resistência, a ductilidade, a dureza e a tenacidade são empregados elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio;
- geradores de gases.

Os fluxos dos arames tubulares podem ser metálicos e não metálicos.

De acordo com o *Welding Handbook* (1991), a norma AWS (American Welding Society) A5.20-69 classifica os arames tanto autoprottegidos como os que utilizam gás de proteção, seguindo o padrão geral utilizado para classificação, porém algumas mudanças são necessárias para acomodar a composição natural do eletrodo.

Por exemplo: Arame E71T-1 (arame utilizado neste trabalho):

O prefixo E indica que a soldagem é com arco elétrico, como nos demais sistemas de classificação.

O número 7 indica o limite de resistência mínimo em 10000 psi.

O número 1 indica que a soldagem pode ser feita em todas as posições (no caso de ser o número 0, é indicado para soldagem nas posições plana e horizontal).

A letra T indica que o eletrodo é tubular.

E finalmente, o número 1 indica características da composição química do metal depositado, tipo de corrente, polaridade de operação entre outras informações.

2.3 SOLDAGEM COM GÁS DE PROTEÇÃO (FCAW-G)

Os processos de soldagem com gás de proteção (Figura 2.1) são amplamente utilizados na soldagem de aços de baixo carbono e de baixa liga, produzindo altas taxas de deposição e eficiência. Podem ser soldados em todas as posições e é adequado a uma grande variedade de juntas.

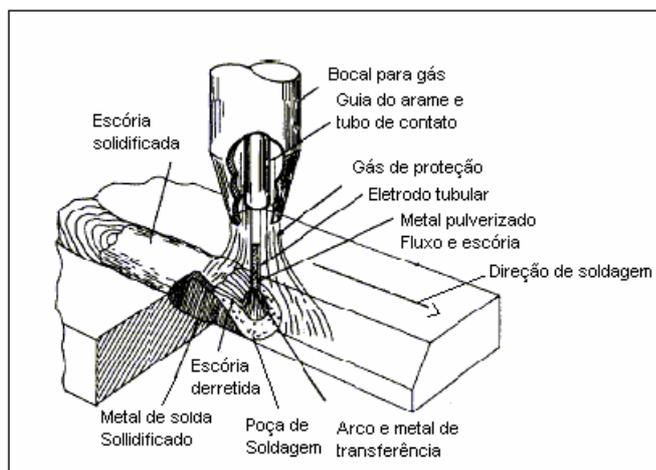


Figura 2.1 - Soldagem com proteção gasosa (Bracarense, 2000).

Os arames tubulares para o processo com gás de proteção podem ser com fluxo interno metálico e não metálico.

Para soldagem com proteção gasosa e arame tubular com fluxo não metálico (**flux cored wires**), o fluxo tem principalmente a função de desoxidante e de introdutor de elementos de liga. Os elementos não metálicos também ajudam a reduzir o número de respingos e controlar as características de fusão do eletrodo.

Os fluxos não metálicos com componentes predominantes ácidos são chamados rutilicos e produzem escória do tipo ácido; e os com grande quantidade de componentes de natureza básica são chamados básicos e originam escória do tipo básico. Os fluxos com a maioria de componentes formados de pós-metálicos são os metálicos. Cada fluxo específico

(rutílico, básico e metálico) do eletrodo tubular produz resultados diferentes no processo com proteção gasosa, como:

Soldagem com **eletrodos rutilicos** possui excelente soldabilidade. Segundo Widgery (1994), eles proporcionam um arco mais estável numa extensa gama de correntes, bom formato da gota e ainda pode ser utilizado para a soldagem em todas as posições. A capacidade de soldar em todas as posições é conseguida através da composição da escória, que começa a se solidificar a temperaturas altas o bastante para promover o apoio à poça de fusão. Esses arames tubulares possuem ótimos recursos operacionais, com baixo nível de respingos, e suas propriedades mecânicas são boas e atendem ou excedem as especificações AWS (norma americana de soldagem). Outra característica importante é a fácil destacabilidade da escória, além de se poder trabalhar com todos os tipos de transferências metálicas.

Através do **rutilo** que é uma forma do dióxido de titânio, permitiu-se controlar o ponto de fusão e a viscosidade da escória, de tal modo que fosse possível fabricar eletrodos com escória consistente para a soldagem na posição vertical, ou escórias fluidas para a soldagem em altas velocidades na posição plana. O dióxido de titânio é um componente estável que contribui com pouco oxigênio para a solda, porém favorece a transferência globular devido à fluidez.

Os eletrodos E71T-1 (utilizados nesta pesquisa) contêm componentes do fluxo que produzem uma escória de rápida solidificação, e a fluidez adequada da poça de fusão para a soldagem fora de posição. A tensão e a corrente de soldagem podem ser altas, devido ao suporte dado pela escória, conseguindo assim altas taxas de deposição.

Como características principais destes arames, temos:

- Gás de proteção: CO₂ ou a mistura de Ar + CO₂;
- Diâmetros de eletrodo disponíveis: 1,2 e 1,6 mm;
- Metal de solda de boa qualidade e com baixo nível de hidrogênio difusível;
- Cordão de aparência suave e regular, com baixo nível de respingos;
- Facilidade de remoção da escória;
- Altas taxas de deposição em todas as posições com a transferência por spray;

Soldagem com **eletrodos básicos** tem como resultado solda com excelente ductibilidade e tenacidade. Seu modo de transferência é mais globular e sua soldabilidade não é tão boa, quando comparada com o eletrodo rutilico, gerando também uma quantidade maior de respingos e um cordão mais convexo. São empregados quando propriedades mecânicas e baixo nível de depósito de hidrogênio são requeridos. Até mesmo, com diâmetros pequenos

não são usados fora de posição, devido às baixas correntes de soldagem e ao modo de transferência globular que necessita do efeito da gravidade para completar sua transferência. A escória formada pelo eletrodo básico não dá o suporte à poça de fusão, conseguido com o eletrodo rutilico, relata French e Boswoth (1995).

A escória proveniente do processo de soldagem, segundo Fortes (2004), tem características importantes, tais como, moldar e suportar o metal de solda ou ajudá-lo a molhar o metal de base, resultando em uma melhoria na sua capacidade de se misturar facilmente à parcela do metal de base fundido, aumentando assim a diluição. Nos arames tubulares com fluxo não metálicos, os componentes estabilizadores do arco, devem ser selecionados para que seus resíduos não prejudiquem a formação de escória.

Quando o fluxo é metálico (**metal cored wires**), de acordo com estudos de Bauné et al (2000), seus elementos têm a função de unir o metal de solda com os elementos de ligas contidos no revestimento metálico do eletrodo, para aumentar a resistência do material depositado e também para desoxidá-lo. Quando aplicados em peças com boa qualidade de limpeza, produzem muito pouca escória vítrea, similar à dos arames sólidos (Araújo, 2004).

Os componentes do fluxo determinam a soldabilidade do arame e as propriedades mecânicas do metal de solda, ou seja, a seleção correta do eletrodo influencia diretamente na qualidade final da solda.

Esta breve descrição das características dos arames tubulares ilustra que, enquanto o arame rutilico oferece alta facilidade de execução, podendo soldar em todas as posições, porém para a soldagem com baixa responsabilidade, o arame básico e o “metal cored” oferecem potenciais vantagens em termos de propriedades mecânicas, nível de hidrogênio difusível, taxa de deposição e eficiência.

2.3.1 Proteção Gasosa

O gás de proteção tem uma influência muito significativa em todo o desempenho da soldagem com eletrodo tubular. Sua função principal é proteger o metal fundido da oxidação, quando este é transferido do eletrodo para o metal base durante a soldagem. O gás promove também a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica, controlando o modo de transferência em conjunto com outros parâmetros. Tanto a abertura como a estabilidade do arco é influenciada pelo potencial de ionização dos gases de proteção usados no processo de soldagem. Ele afeta a eficiência, a qualidade, as propriedades da solda e a

geometria do cordão de solda. O gás de proteção interage com o arame eletrodo na soldagem melhorando a resistência mecânica, a dureza e a resistência à corrosão no metal depositado. Controlando a transferência eficiente dos componentes do arame tubular, o gás de proteção pode alterar a microestrutura e as propriedades inerentes da solda. O gás de proteção pode também afetar o conteúdo residual de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio dissolvido no metal de solda, (Lyttle e Stapon, 1990).

O dióxido de carbono (CO_2) é muito usado para proteção durante a soldagem com arames tubulares. Duas vantagens deste gás são o baixo custo e a alta penetração. A elevada condutividade térmica do CO_2 faz com que o núcleo de condução do arco tenha pequeno diâmetro, tornando o arco mais constricto, o que provoca uma maior pressão do arco sobre a poça de fusão, promovendo uma influência marcante na geometria do cordão, aumentando não somente a penetração, mas também o reforço e diminuindo a largura do cordão (Sales et al, 1998). Por outro lado a ocorrência de um núcleo de condução do arco de pequeno diâmetro aumenta a perturbação da superfície da poça metálica fundida prejudicando a estabilidade do arco e gerando a formação excessiva de respingos (Dillenbeck e Castagno, 1987; Dutra e Baixo, 1990).

Apesar do processo de soldagem com arames sólidos não permitir o alcance da transferência por spray utilizando-se o CO_2 puro, um aspecto interessante a ser observado em soldagens com arame tubular, é que este processo, mesmo utilizando 100% de CO_2 como gás de proteção, permite que se alcance a transferência metálica do tipo spray, devido às características do fluxo que permite tal benefício; já o comportamento do arame sólido sob altas densidades de corrente (típico da transferência no modo spray) está associado a alguns problemas, tais como o excesso de perdas por respingos, o aumento da suscetibilidade do processo a porosidades além de provocar a deterioração da morfologia do cordão de solda (Nascimento et al, 2003; Barhorst, 1999).

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

O uso da mistura de gases na soldagem com arames tubulares pode combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases cita Bracarense (2000). O aumento de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração será reduzida. O Argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as

temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com 100% CO₂ (Bracarense, 2000).

A Figura 2.2 apresenta um comparativo do efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda em soldagem com Eletrodo Tubular.

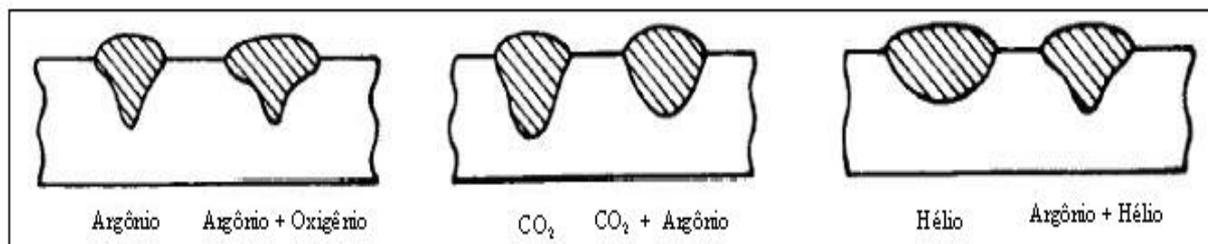


Figura 2.2 - Efeito do gás de proteção no perfil do cordão em CCPR (Bracarense, 2000).

Alguns resultados da influência benéfica da mudança do gás CO₂ para uma mistura de Argônio e CO₂ são verificadas através da obtenção de melhor acabamento e perfil do cordão de solda superior, minimização dos respingos e maiores velocidades de soldagem (Fortes,2004; Bracarense, 2000). Atualmente, diversos tipos de mistura de gases estão disponíveis no mercado. A mistura de gases mais usada em soldagem com Eletrodo Tubular é 75% de Argônio e 25% de CO₂. O metal de solda depositado com esta mistura tem alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com o metal depositado com 100% de proteção com CO₂ (Bracarense, 2000).

O gás de proteção promove a estabilidade do arco e a uniformidade da transferência metálica enquanto controla o modo de transferência de metal em conjunto com vários outros parâmetros. A abertura e a estabilidade do arco são grandemente influenciadas pelo potencial de ionização dos gases de proteção no modo de transferência por curto circuito. O uso da mistura gasosa 75% Ar e 25% CO₂, considerada com alto nível de CO₂, (maior que 20%), no modo de transferência por curto circuito aumenta o aquecimento do arco e melhora formação da gota e a fluidez da poça de soldagem (Lyttle e Stapon,1990), o que diminui sistematicamente o aparecimento de respingos.

Apesar da transferência de metal ser um pouco diferente daquela para arame sólido e variar conforme o tipo de arame tubular, o gás CO₂ como proteção para o FCAW reage de maneira semelhante para arame sólido; o dióxido de carbono dá boa cobertura e proteção, porem aumenta os respingos e exige tensões mais altas que para a mistura gasosa Ar – CO₂; para correntes de soldagem até 200 (A) a transferência de metal obtida com 100% CO₂ é a

curto circuito (Houdcroft e John,1998). A Tabela 2.1 resume os consumíveis para o processo eletrodo tubular.

Tabela 2.1 - Resumo dos consumíveis do processo eletrodo tubular (Houdcroft e John,1998).

PROCESSO FCAW	SEM PROTEÇÃO	COM PROTEÇÃO		
		NÃO METÁLICOS		METÁLICOS
TIPO ARAME		RUTILICO	BÁSICO	
FLUXO		CO ₂ *	Ar/ CO ₂	
GÁS PROTEÇÃO	–	Ar/ CO ₂		
POLARIDADE	CC+/CA	CC+	CC+/CC-	CC+/CC-
*Limitada à condição de transferência por curto circuito para correntes acima de 200A				

2.4 SOLDAGEM SEM GÁS DE PROTEÇÃO (FCAW-S)

A soldagem sem gás de proteção ou soldagem com eletrodo **autoprotégido**, Figura 2.3, é muito popular, por não requerer equipamento para gás de proteção, o que resulta numa maior facilidade de operação; dependem somente dos componentes do fluxo para proteger o arco da atmosfera. Uma grande variedade de fluxo para esse tipo de eletrodo tem sido desenvolvida, já que pode-se obter respostas mais adequadas com uma formulação de fluxo mais ajustada, e como resultado, tem-se nesta área de fabricação, um grande interesse em pesquisas, acrescentam (Widgery,1988). Um dos maiores problemas desse processo é a porosidade no metal de solda. Como não há nenhuma proteção gasosa externa, nem um fluxo de solda que protege eficazmente a área de soldagem, este pode facilmente ser contaminado pelo ar. Assim, a sensibilidade aos poros aumenta e é muito difícil de controlar.

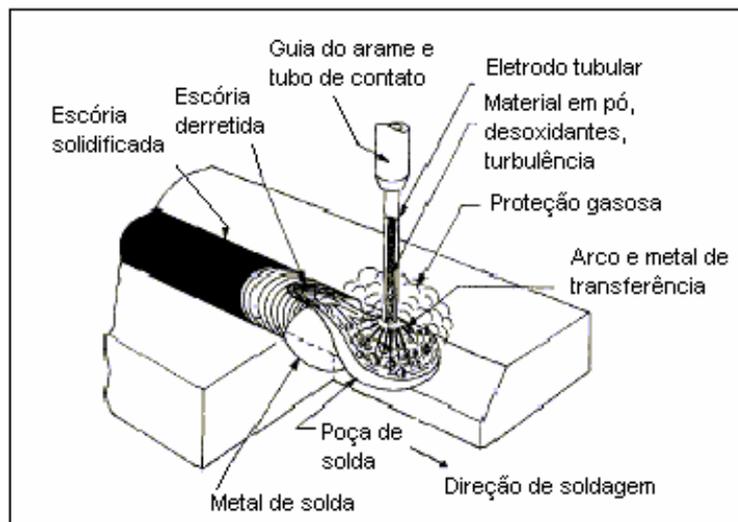


Figura 2.3 - Soldagem sem gás de proteção (Bracarense, 2000).

Os efeitos metalúrgicos e os parâmetros de soldagem são os principais focos de pesquisa para a solução deste problema. Vários modelos e avaliações matemáticas e termodinâmicas de susceptibilidade aos poros, também foram apresentados para esclarecer melhor o mecanismo de formação desses defeitos estudados por Bosworth (1991). De acordo com estudos realizados por Mckeown (1989), o nitrogênio é tipicamente considerado fator determinante para a formação de poros em soldagens com eletrodo autoprotégido, porém outras pesquisas mostram que só com a redução do nitrogênio contido no metal de solda não se pode controlar eficazmente a porosidade. Segundo Wei et al (2002), o oxigênio também tem sua parcela de contribuição à formação de porosidade. Reduzindo o potencial de oxigênio e nitrogênio na atmosfera de soldagem, como também o oxigênio e o nitrogênio contido no metal de solda, pode-se reduzir a quantidade de poros produzidos no cordão. A adição de alumínio também pode diminuir sensivelmente a produção de poros, pois ele tem forte habilidade de reduzir a quantidade de nitrogênio no metal de solda.

2.5 VARIÁVEIS DO PROCESSO

Muitas variáveis influenciam no desempenho do processo com eletrodo tubular. O conhecimento da influência destas variáveis no comportamento do processo em muito auxilia numa melhor utilização do mesmo. A seguir as variáveis mais importantes bem como suas influências serão descritas.

2.5.1 Corrente de Soldagem

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo (Bracarense, 2000), sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem (Sales, 2001; Poepcke, 1997). A Figura 2.4 mostra a influência da intensidade de corrente para arames do grupo T-1 sobre a taxa de deposição (Bracarense, 2000). Além disso, o aumento da corrente de soldagem causa também, uma diminuição na quantidade de salpicos, porosidades, e diâmetro da gota, bem como, na formação excessiva de nitretos e má aparência do cordão (Poepcke, 1997).

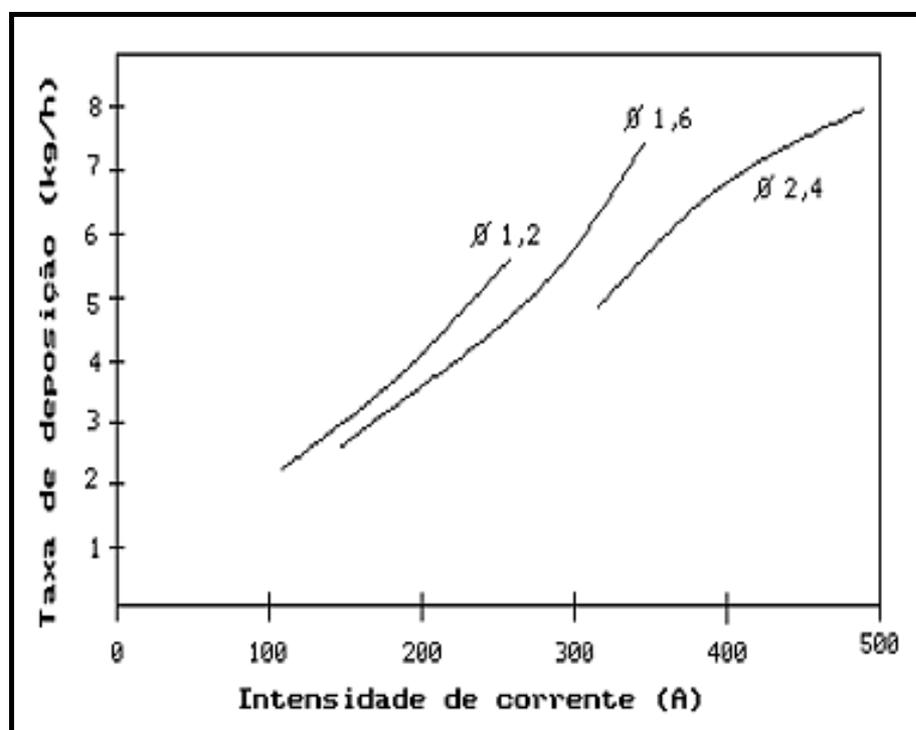


Figura 2.4 - Influência da intensidade de corrente sobre a taxa de deposição para arames do grupo T-1 (Joaquim, 2001 citando Jones, 1982).

2.5.2 Tensão do Arco Elétrico

A tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados; e podem afetar a aparência, penetração e as propriedades do cordão de solda. Grandes comprimentos de arco causam muitos respingos e irregularidade na morfologia do cordão, enquanto que para tensões baixas (arco com comprimento menor) há uma diminuição na tensão superficial da poça de fusão, pois a área de contato entre o arco e o metal base é menor, então a poça receberá menos

calor irradiado do arco, originando cordão convexo de pouca penetração com superfície estreita (Joaquim, 2001; Bracarense, 2000).

Dutra e Baixo (1990) ao estudarem a estabilidade do processo MIG/MAG com transferência no modo curto-circuito, levando em consideração os desvios da média de picos e do tempo médio de curto verificou a existência de um ponto de inflexão a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão resultam em menor regularidade, indicando que para cada valor de velocidade de alimentação existe apenas um ajuste de tensão capaz de produzir uma condição de estabilidade máxima.

2.5.3 Extensão Livre do Eletrodo (stick out)

Extensão do eletrodo é seu comprimento não fundido a partir do bico de contato. Um aumento na extensão do eletrodo tende a aumentar a temperatura do eletrodo devido ao efeito Joule (aumento da resistência elétrica); conseqüentemente o fluxo do interior do eletrodo também aquece colaborando para uma boa proteção do banho de fusão. A temperatura atingida por esse pré-aquecimento é função do "stick out". Se o "stick out" é pequeno, o pré-aquecimento do fluxo é insuficiente e a produção de gases não é adequada à proteção do banho de fusão. Para grandes valores de "stick out" pode ocorrer dissociações prematuras do CO₂, causadas pelo aquecimento do arame e atmosfera circundante, originando respingos excessivos, deterioração da morfologia do cordão, além de elevar a temperatura do arame para próximo da temperatura de fusão provocando o amolecimento do mesmo antes de atingir a poça de fusão, causando desvios na linha de solda (Joaquim, 2001). Sales (1998) menciona um estudo em que o aumento da DBCP pode provocar um aumento significativo do reforço do cordão de solda e diminuição da largura do cordão. Esta tendência é mais pronunciada para a soldagem com o CO₂ puro.

Para uma taxa de alimentação de arame fixa, qualquer aumento na distância bico de contato peça (DBCP) e, conseqüentemente do stick-out, tem o efeito de reduzir a corrente fornecida pela fonte. Se a velocidade de alimentação do arame é aumentada para compensar a queda de corrente resultará em um significativo aumento na taxa de deposição do metal de solda, Figura 2.5.

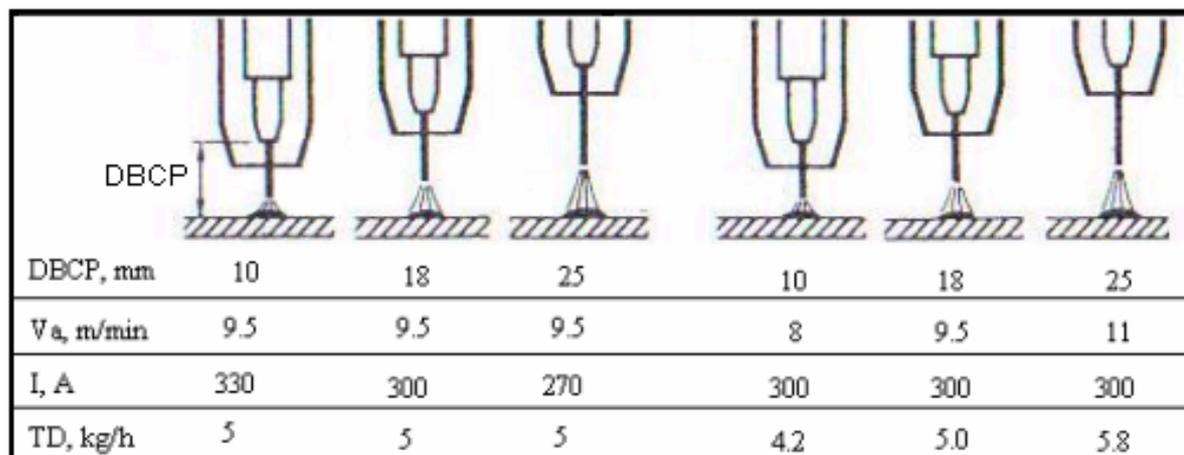


Figura 2.5 - Efeito da distância bico de contato peça na corrente e na taxa de deposição (Houdcroft e John, 1988).

Como procedimento normal é recomendado a utilização de extensão do eletrodo de 19 a 38 mm para eletrodos com proteção gasosa e 19 a 95 mm para eletrodos autoprotetidos, dependendo da aplicação (Bracarense, 2000).

2.5.4 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta de solda. Observa-se que a penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias. Quando a velocidade é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Por outro lado para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui, podendo ocorrer ainda mordeduras ao longo do cordão (Miranda, 1999).

2.6 TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS

A fusão do eletrodo no arco e sua aglutinação é periódica e em forma de gotas. Sobre o efeito do aquecimento do arco, funde-se a ponta do eletrodo, cuja fase líquida cresce continuamente. Quando a camada de metal líquido, na ponta do eletrodo, atinge certo limite

dimensional, parte do metal se separa do eletrodo, em forma de uma gota. Em seguida, a camada líquida cresce novamente, a gota se forma e assim sucessivamente. Deste modo, gotas são separadas do eletrodo e transferidas para a poça (Farias et al, 1998).

Atualmente, as características de transferência do metal de solda, são objetos de estudo nos processos utilizados para soldagem dos materiais, principalmente em relação a processos semi-automáticos, onde as variações ligadas ao processo tais como o comprimento do arco elétrico (tensão) e a velocidade de alimentação do arame (responsáveis pela instabilidade do processo), influem na taxa de fusão e no modo de transferência do metal. A presença do fluxo nos arames tubulares, atuando durante a soldagem tanto nas características do arco elétrico como no comportamento físico da poça de fusão e metal depositado, veio corrigir alguns defeitos do processo MIG principalmente as colagens (responsáveis pela impopularidade deste processo em construções de grande responsabilidade), a falta de fusão e acabamento adequados. A transferência do metal por Arame Tubular varia com o tipo de arame utilizado, proteção gasosa ou ausência desta, polaridade e intensidade da corrente (Joaquim, 2001). Além destas variáveis, deve-se considerar o efeito “pinch” (força de contração sobre o eletrodo), que é um dos fatores mais importantes que controlam a transferência de metal (Farias et al, 1998). A força que surge devido a formação de um campo magnético gerado pelo fluxo de corrente através do eletrodo (condutor elétrico), direcionada para o centro do condutor é chamada de força de Lorentz. Quando há variação na seção circular do condutor, como a que ocorre entre a frente de fusão e a interface arco-gota, esta força é dotada de uma componente axial e de outra radial conhecida como Efeito Pinch, sempre direcionada para o centro do condutor, a qual é determinante em relação à transferência metálica. A componente axial da Força de Lorentz pode atuar a favor ou contra o destacamento da gota, mas sempre no sentido de aumento da área do condutor, enquanto o Efeito Pinch é responsável pela contração da ponte metálica líquida adjacente ao eletrodo, normalmente favorecendo o destacamento (Junior, 2002).

Dutra e Baixo, (1990) citando Dorn (1986) afirmam que em função do caráter cíclico da transferência metálica, a definição de um critério de estabilidade deve basear-se na uniformidade da transferência de gotas do arame a poça de fusão. Quanto mais regular o processo de transferência, mais uniforme será a deposição de material.

2.6.1 Tipos de Transferências Metálicas

Dentre as características fundamentais de operacionalidade e eficiência do processo, estão os modos de transferência do metal de adição, pois elas afetam a habilidade de soldagem em várias posições, a penetração, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos (Subramanian et al, 1998). Estes modos de transferências são dependentes dos ajustes das variáveis operacionais, tais como, corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, gás de proteção e do modo como as forças atuantes no processo interagem. A deposição do metal de solda é realizada pela transferência de gotas de metal através da coluna do arco, sendo que o tamanho, forma e frequência desta deposição caracterizam um determinado tipo de transferência metálica. Basicamente estas transferências metálicas são classificados em três tipos diferentes, como mostra a Figura 2.6, ou seja:

- a) - Transferência globular
- b) - Transferência por spray ou aerossol
- c) - Transferência por curto-circuito.

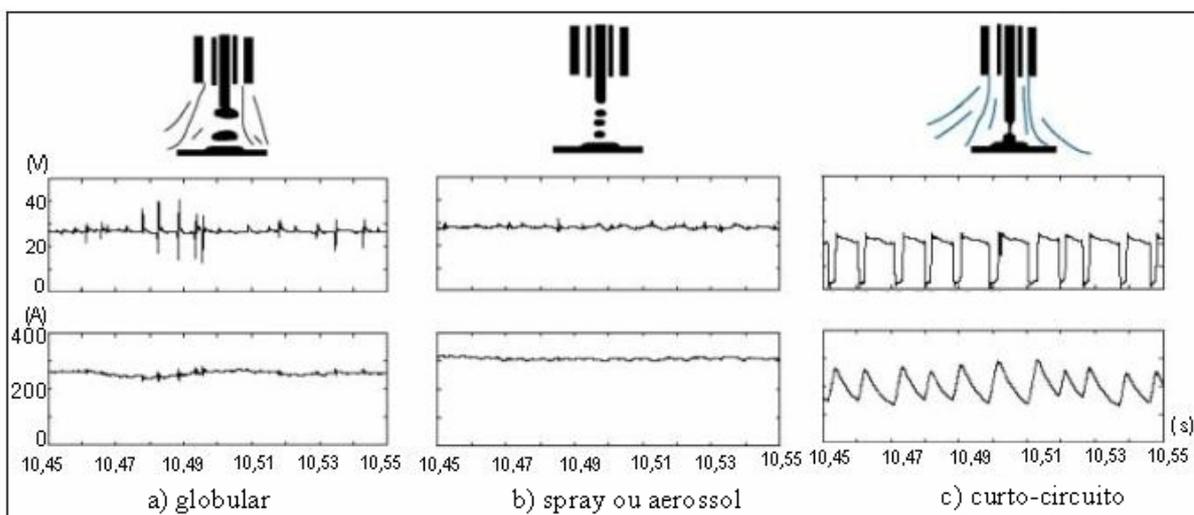


Figura 2.6 – Principais tipos de transferência metálica (Adolfsson et al, 1998).

a) – Globular:

Ocorre geralmente em tensões não muito baixas e correntes moderadas, porém com a utilização de CO₂ como gás de proteção, a transferência globular pode acontecer também em correntes elevadas. Neste modo de transferência quando a gota é formada, esta permanece no eletrodo devido a ação da força de tensão superficial. A partir do momento em que o seu volume se torna grande (maior que o diâmetro do eletrodo) o suficiente para que seu peso, juntamente com a força eletromagnética, supere a força da tensão superficial, a gota tenderá a

se destacar. Este tipo de transferência é limitado à posição plana de soldagem. Esta limitação, somada a instabilidade e a geração excessiva de respingos, faz com que a transferência tipo globular seja pouco desejada na soldagem.

b) – Spray ou Aerossol:

Este tipo de transferência é caracterizado pela grande quantidade de pequenas gotas (menor que o diâmetro do arame tubular) a alta frequência, quase formando um jato contínuo. Estas gotas são depositadas com alta energia (altas correntes e tensões) e fazem com que a poça de fusão seja bastante fluída, limitando o processo para a posição plana ou horizontal, geralmente em metal de base com espessura superior a 3 mm, em situações onde se deseja taxas de deposição máxima (Joaquim, 2001). É um tipo de transferência obtida, de forma geral, com argônio como gás principal de proteção.

A transferência do metal de solda é muito estável, direcional e essencialmente livre de respingos, obtendo solda com aparência muito boa.

c) – Curto-circuito:

Este tipo de transferência utiliza tensões baixas e correntes não muito elevadas, e diâmetros de eletrodos menores, usualmente limitados para arames de até 1,2 mm de diâmetro. É caracterizado pelo toque periódico da gota (pequena, de tamanho próximo ao diâmetro do eletrodo) na poça de fusão no momento de sua transferência. O arame curto circuita o material base em média cem vezes por segundo (Uttrachi e Meyer, 1993), muito embora a frequência de transferência de curtos-circuitos de 20 a 200 vezes por segundo pode ocorrer dependendo das condições de soldagem (Miranda, 1999, citando ASM, 1993 e AWS, 1992). A cada toque ocorre a extinção do arco, e o metal é transferido em cada curto. Este toque acontece por causa da diferença entre a velocidade de alimentação do arame eletrodo e a taxa de fusão do mesmo, em regime de arco aberto. A ação repetitiva dos curtos-circuitos só pode suceder se a flutuação da taxa de fusão ocorrer regularmente abaixo e acima da velocidade de alimentação do arame eletrodo (Miranda, 1999; Uttrachi e Meyer, 1993). A Figura 2.7 ilustra o modo de transferência por curto-circuito.

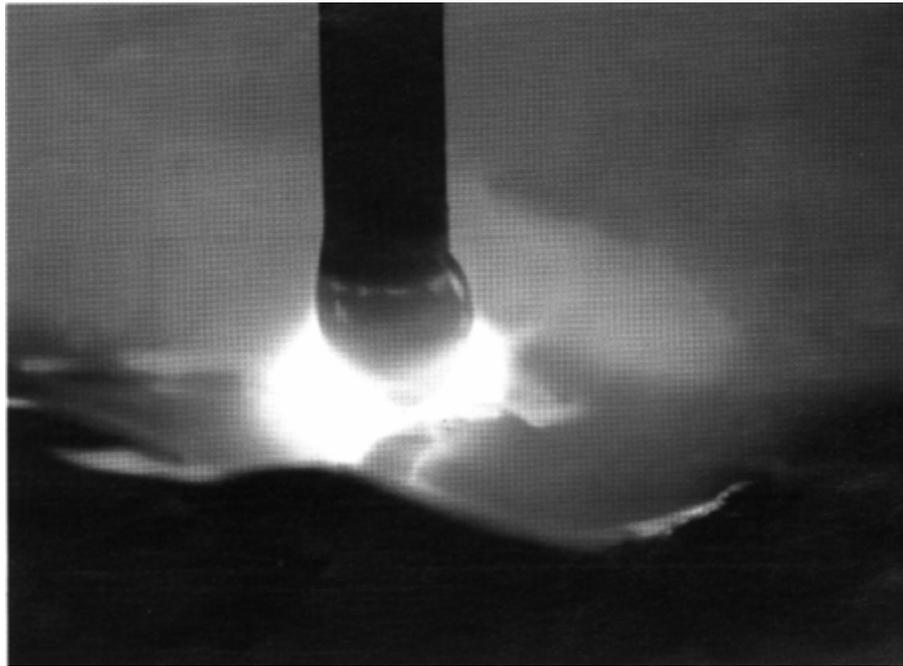


Figura 2.7 – Transferência por curto-circuito (Fortes, 2004).

Esta transferência é muito utilizada em soldagens de chapas finas, em todas as posições ou na soldagem de passe de raiz em juntas tubulares.

No momento do curto a corrente aumenta rapidamente de valor e a tensão cai bruscamente. Pela Figura 2.8, explica-se melhor um ciclo completo da transferência metálica por curto-circuito (Miranda, 1999).

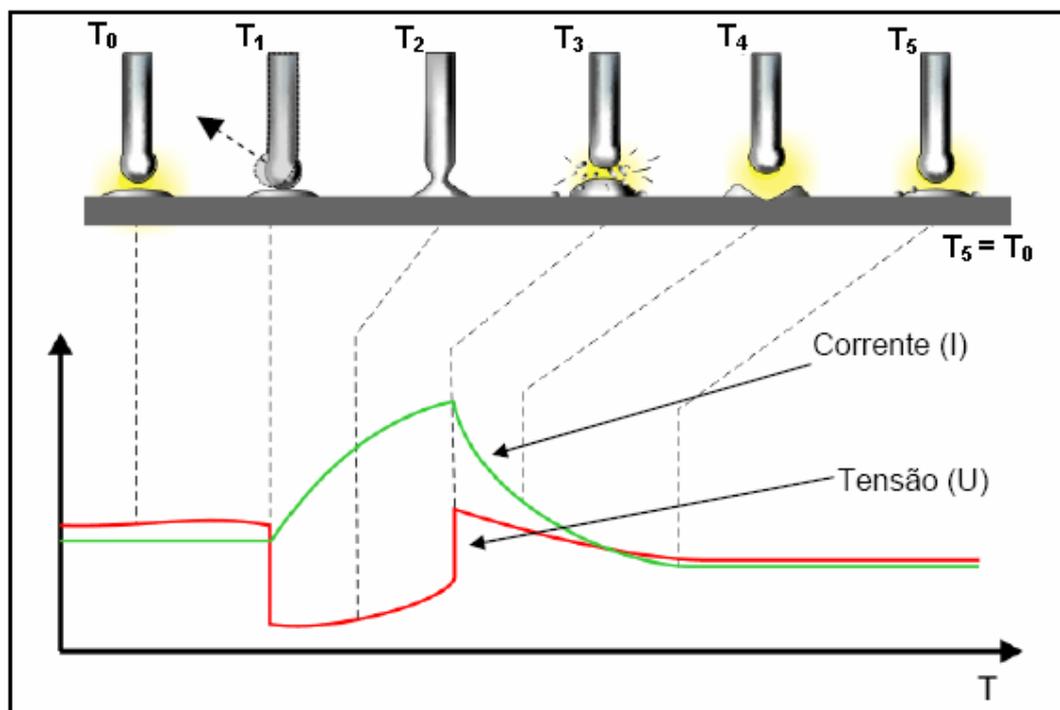


Figura 2.8 – Ciclo completo da transferência por curto-circuito (Silva, 2005).

- T_0 é a fase de formação e crescimento da gota na ponta do arame eletrodo. À medida que a gota é formada, o comprimento do arco diminui, ocorrendo uma pequena queda de tensão.
- Em T_1 , a gota formada toca a poça de fusão, a tensão cai bruscamente e a corrente aumenta a taxas elevadas.
- Em T_2 , parte da gota já foi transferida para a poça de fusão e a ponte formada entre o eletrodo e a poça de fusão começa a se romper.
- Em T_3 ocorre o rompimento da ponte metálica e a tensão sobe caracterizando um pico de reignição. A corrente neste mesmo instante começa a cair para valores de regime.
- Em T_4 , a tensão e corrente já se estabilizaram para valores de regime e começa a formar uma nova gota na ponta do eletrodo.
- Em T_5 reinicia o ciclo de transferência metálica, ocorrendo o mesmo que em T_0 .

Em T_1 e T_2 , onde a corrente aumenta acentuadamente, ocorre o aumento da força eletromagnética (efeito “pinch”) e um maior aquecimento do eletrodo. Pela ação das forças “pinch” e tensão superficial, a gota é transferida para a poça de fusão. Se a corrente sobe a uma taxa muito elevada para um dado intervalo de tempo, a gota é transferida de forma brusca, gerando excessivos respingos, instabilidade do arco e aumento do custo da soldagem.

A taxa de variação da corrente deve ser alta o suficiente para causar a transferência da gota e baixa o suficiente para minimizar os respingos (Miranda, 1999 – citando ASM, 1993). Para alterar a taxa de variação da corrente, as fontes de soldagem do tipo tensão constante possuem o recurso de controle da indutância. Esta altera a velocidade de resposta do circuito de soldagem, fazendo com que a corrente modifique seu valor de forma controlada. Como os valores de corrente e tensão são limitados e as extinções frequentes, o calor transferido é baixo, indicando que este tipo de transferência é próprio para soldagem de chapas finas, passes de raiz em juntas com abertura. E também, como as gotas são transferidas pelo contato com a poça de fusão, através da tensão superficial é ideal para a soldagem fora de posição em peças de pequena espessura. Esse modo de transferência tem a vantagem de ser muito fácil de usar (Miranda, 1999; Fortes, 2004). No entanto falta de fusão lateral e de penetração podem ser problemas quando se soldam peças mais espessas que 6,0 mm em função do baixo aporte térmico (Fortes, 2004).

Rodgers e Lockhead (1989) afirmam que um aspecto importante a se descartar no uso de arame sólido com transferência normal por curto-circuito é a fusão incompleta do metal de

solda causando defeitos na solda. Entretanto, a utilização de eletrodos tubular básico e auto protegido mostraram condições adequadas de soldagem, posteriormente comprovadas através de inspeções com partículas magnéticas e ultra-som. Os mesmos autores, em testes preliminares, também testaram o arame tubular rútilico, que apesar de demonstrar ótima operosidade, ficou limitado em sua tolerância para ajuste de passe de raiz em soldas de responsabilidade.

Além da corrente de soldagem, a tensão é de fundamental importância nas transferências metálicas. Wang et al (1995) observaram que a tensão de soldagem pode afetar a porcentagem relativa de cada modo de transferência metálica presente no processo, como mostrado na Figura 2.9. Percebe-se que com o aumento da tensão, as transferências por curtos circuitos aumentam seguidas por uma substancial queda.

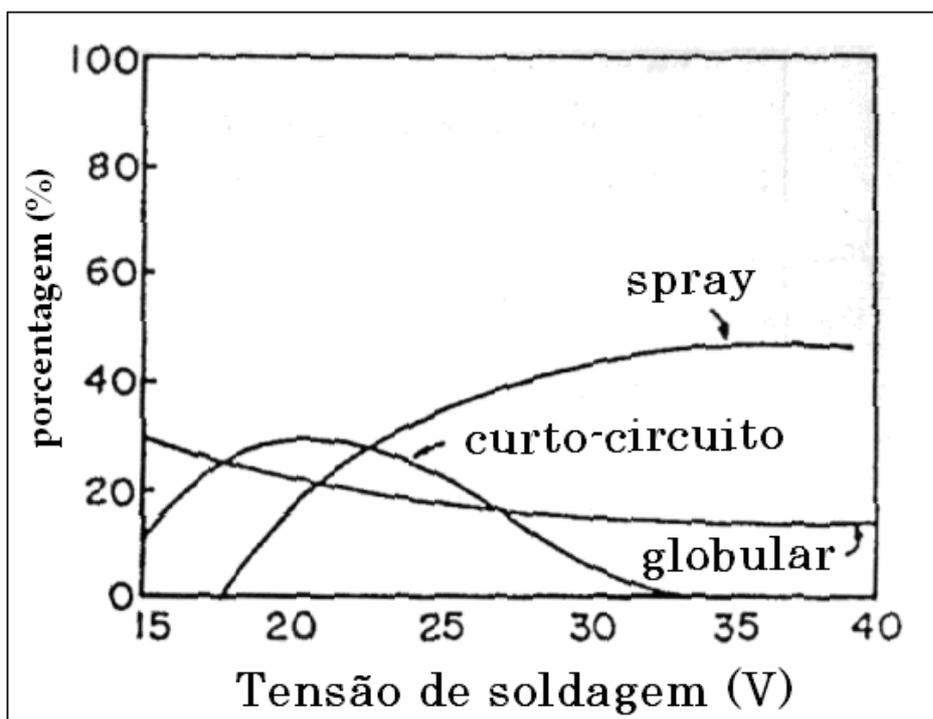


Figura 2.9 – Efeito da tensão nos modos de transferências metálicas (Wang et al, 1995).

Os mesmos autores em estudos sobre o processo com eletrodo tubular, utilizando o arame AWS E 71T-1 com 1,6 mm de diâmetro e proteção gasosa de 75% Ar – 25% CO₂, propuseram critérios classificatórios para os modos de transferência baseados nas taxas de variações (flutuações de tensões - ΔV). As conclusões apresentadas foram que dois ou mais modos de transferência metálica coexistem todo tempo. Porém de forma geral, Wang et al (1995) estabeleceram os seguintes critérios para se obter cada modo de transferência predominante:

$\Delta V > 10 \text{ V}$ - transferência metálica por curto-circuito.

$1 \text{ V} < \Delta V < 10 \text{ V}$ – transferência globular.

$0,3 \text{ V} < \Delta V < 1 \text{ V}$ – transferência por spray.

Além destas taxas de variações, para o arame em estudo, os autores determinaram um mapeamento da distribuição dos modos de transferência metálica usando o critério da flutuação da tensão e da transformada rápida de Fourier conforme mostrado na Figura 2.10.

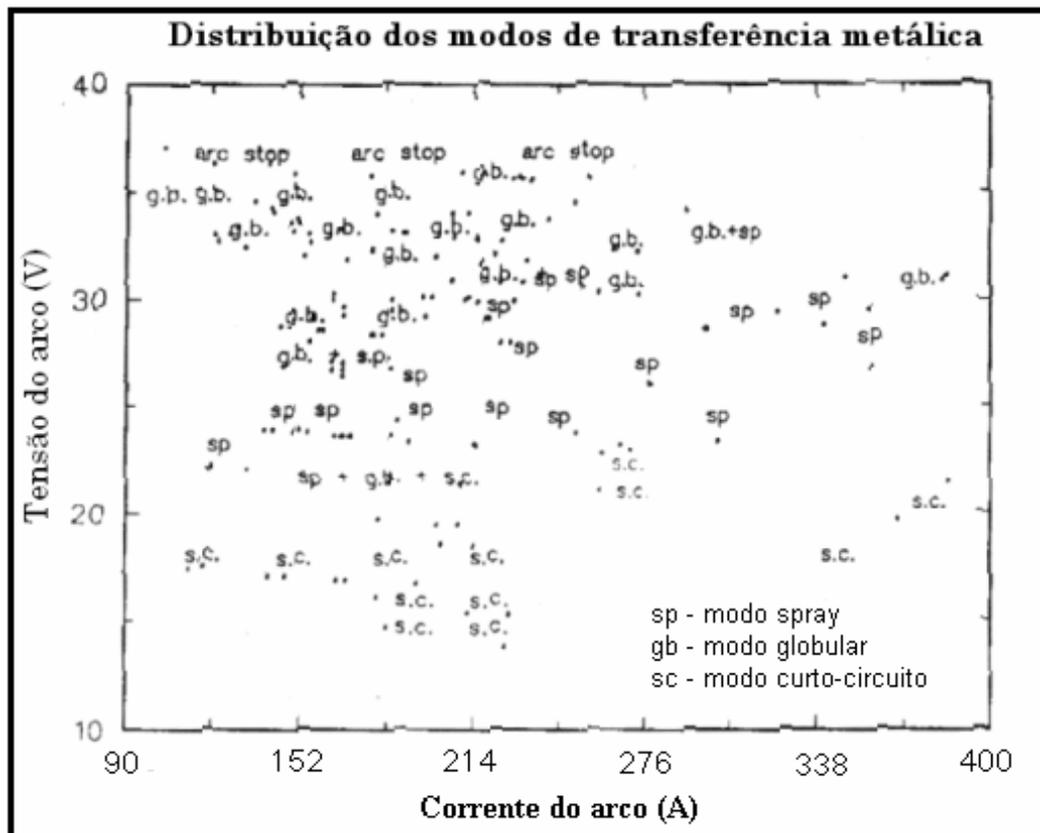


Figura 2.10 – Modos de transferências metálicas para o arame AWS E71T-1, 1,6 mm, C25 (Wang et al, 1995).

2.7 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE DO ARCO EM TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO.

A estabilidade do arco é responsável pela execução de soldas com boa qualidade. Um arco estável depende das características do equipamento, das propriedades do eletrodo (física e química), da atmosfera ionizante e do material de base. Como estes fatores são influentes

entre si, a estabilidade só será alcançada, com base no conhecimento das propriedades do arco. O ajuste das variáveis elétricas será baseado na ionização do gás, nas dimensões e tipo de metal de base e do eletrodo, na posição de soldagem, na qualidade exigida (Miranda, 1999).

O modo de transferência metálica aumenta a complexidade da análise da estabilidade do arco. Na transferência por curto circuito as extinções do arco afetam a estabilidade, isto é, um arco estável possui uma transferência periódica e um tempo de apagamento o menor possível. Desta forma, em um menor período de curto circuito e menor tempo de transferência, com a transferência de gotas menores em uma maior frequência, maior regularidade deve ser obtida. A Figura 2.11 ilustra uma caracterização de índices na transferência por curto circuito.

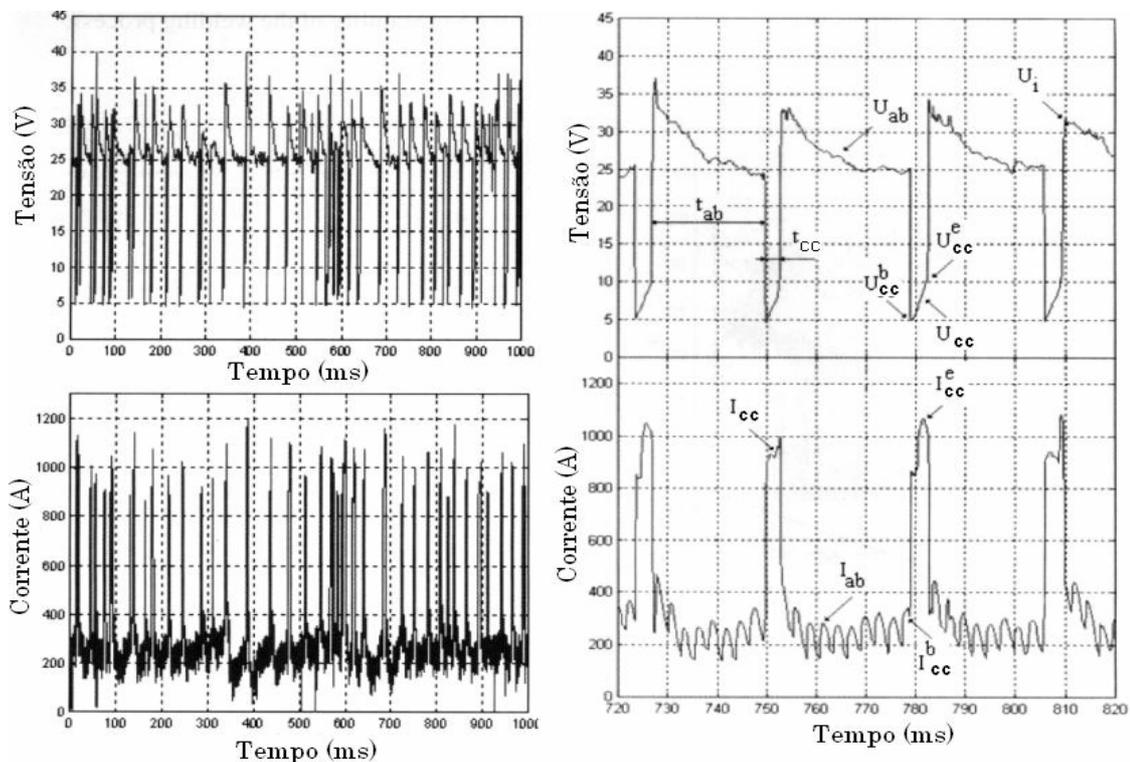


Figura 2.11 – Índices da transferência metálica por curto-circuito (Roca et al, 2005).

Como se percebe, as características dinâmicas tensão e corrente do arco possuem vários índices que influenciam no modo de transferência por curto-circuito. Dentre estes se destacam:

- tensão de reignição do arco após o fim do curto-circuito (U_i);
- tensão do arco aberto (U_{ab});
- tensão durante o curto circuito (U_{cc});

- tensão quando inicia o curto (U_{cc}^b);
- tensão quando termina o curto (U_{cc}^e);
- tempo de duração do curto (t_{cc});
- tempo que o arco permanece aberto (t_{ab});
- período de transferência das gotas T ($t_{ab} + t_{cc}$);
- corrente do arco aberto (I_{ab});
- corrente de curto-circuito (I_{cc});
- corrente quando o curto é iniciado (I_{cc}^b) e
- corrente do final do curto (I_{cc}^e).

Vários critérios de estabilidade baseado na análise de alguns dos índices anteriormente descritos têm sido citados na literatura. Dutra e Baixo (1990) ao analisarem a estabilidade do arco, em processo de soldagem MIG/MAG usaram como parâmetros característicos períodos de duração do curto-circuito, período de transferência e nível máximo do pico da corrente de curto, bem como os desvios padrão relativo a estes índices. O período de duração do curto-circuito explica a dispersão dos parâmetros não controlados da operação de soldagem em fontes moduladas em tensão constante. Irregularidades no período de curto influem diretamente no nível do pico da corrente de curto nos ciclos de transferência. Período mais prolongado faz com que a corrente atinja valores de picos mais elevados, aumentando os respingos.

Miranda (1999), de acordo com a literatura, associa uma máxima estabilidade do arco aos menores períodos e menores tempos de curto.

Adolfson et. al (1999) acrescenta que condições ótimas de estabilidade correspondem a quatro características básicas, ou seja, uma máxima taxa de curto-circuitos; uma mínima variação no período de curto; uma mínima taxa de massa transferida por curto-circuito associado a uma mínima perda de respingos.

Análises mais abrangentes de avaliação de regularidade dos parâmetros aplicados a estes índices têm sido comumente utilizadas por vários autores (Dutra e Baixo, 1990; Wang et al, 1989). Dentre estes, a utilização de valores médios, desvios padrão, valores máximos e mínimos observáveis, coeficiente de variação, histogramas entre outros permite avaliar a regularidade dos parâmetros selecionados no que se refere a uma dispersão dos mesmos.

Hermans e Den Ouden (1999) registraram que uma máxima estabilidade do processo e conseqüentemente do arco é possível, quando o desvio padrão da frequência de curto-circuito

é mínimo. Na transferência por curto-circuito a oscilação da poça de fusão é acelerada com a reignição do arco e ruptura da ponte metálica no momento da transferência do metal líquido. A estabilidade ocorre quando a frequência de curto-circuito e a frequência de oscilação da poça fundida são iguais. Dutra e Baixo (1990) acrescentam a esta estabilidade o mínimo desvio padrão relativo do tempo de curto circuito e nível de corrente de pico.

A análise dos histogramas dos picos de corrente, dos tempos entre as transferências e dos tempos de curto circuito, para avaliar a estabilidade do arco mostra que a tensão (para uma dada velocidade de alimentação do eletrodo e velocidade de soldagem) e a indutância são as variáveis críticas para estabelecer uma condição adequada de soldagem. Para tensões elevadas, a indutância deve ser ajustada em valores altos (taxa de crescimento da corrente lenta), e para tensões menores, a indutância deve ser baixa (Miranda, 1999 citando Dutra, 1989); com a elevação da tensão, a corrente média de soldagem acompanha esta elevação, resultando em um aumento da velocidade de fusão do eletrodo. A implicação direta deste aumento é o deslocamento da altura em que o eletrodo inicia seu período de arco, permitindo que a gota tenha mais tempo para crescer fazendo com que o período de curto seja prolongado e o pico da corrente de curto maior, provocando instabilidade no arco (maiores desvios no período de curto e corrente de pico).

Roca et al (2005) estudaram a estabilidade do processo a arco com proteção gasosa (GMAW) e desenvolveu um método de análise estatística para o estudo da estabilidade da transferência metálica no modo curto-circuito do processo. Este método, baseado na determinação das áreas dos diagramas tensão e corrente de soldagem, se mostrou eficaz para analisar a estabilidade da transferência metálica por curto-circuito. Foi verificado que velocidade de alimentação e a distância bico contato peça (DBCP) são os parâmetros que mais influenciam na estabilidade do processo. Observou-se que ao variar a velocidade, mantendo os outros parâmetros constantes, inclusive a DBCP, os coeficientes de variação (média/desvio padrão) do tempo de duração dos curtos-circuitos, do tempo de arco aberto, do tempo total de curtos-circuitos mostraram altos valores, resultando em um processo bastante instável, com gotas irregulares e muitos respingos. Mantendo constantes os valores da velocidade de alimentação e variando a DBCP, os coeficientes de variação citados acima, também sofreram variação, com altos valores.

Avaliações estatísticas dos índices de curto-circuito se tornam uma opção interessante para avaliações de estabilidade do arco. Desta forma, menores valores de coeficiente de variação do tempo de duração do curto circuito podem ser associados a transferências mais

uniformes. Quando as gotas metálicas são transferidas uniformemente para a poça metálica, os oscilogramas da corrente e tensão de soldagem são regulares.

Shinoda et al (1989) também avaliaram a estabilidade do processo GMAW no modo de transferência por curto-circuito, utilizando coeficiente de variação de dados baseados no tempo do arco, tempo de duração dos curtos-circuitos, oscilogramas da tensão e corrente de soldagem, etc.

Wang et al (1995) investigaram os sinais do arco, processando e caracterizando os modos de transferência metálica para o processo FCAW. Os resultados para os sinais do arco foram analisados pela técnica da transformada rápida de Fourier, mostrando que as flutuações tanto da tensão do arco (ΔU) como os espectros característicos da transformada de Fourier foram adequadas para distinguir os diferentes modos de transferência metálica no FCAW. Os autores destacaram ainda que dois ou mais modos de transferência no processo FCAW podem coexistir ao mesmo tempo.

2.8 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

2.8.1 Efeito da Indutância na Estabilidade do Arco

A indutância é uma importante característica dinâmica do processo e deve ser ajustada adequadamente. Este parâmetro representa a propriedade que um circuito elétrico tem de diminuir a taxa pela qual a corrente aumenta (a corrente ao passar através de um núcleo indutivo, cria um campo magnético contrário à corrente de soldagem).

No processo por curto-circuito, a regularidade do processo de soldagem, bem como a formação de respingos, estão fortemente relacionados à indutância de saída. O ajuste da indutância não evita a ocorrência de respingos, apenas contribui para achar o ponto de operação, onde os mesmos são minimizados.

Junior (2002) verificou que de acordo com a literatura e observações práticas, os respingos ocorrem freqüentemente nos momentos em que a gota toca a peça e durante a reignição do arco, Figura 2.12. Quando a gota está na iminência de tocar a peça, a distribuição do arco sobre a gota pode fazer com que a força eletromagnética atue no sentido de empurrar a gota para cima, projetando-a para fora da região da poça metálica dependendo do valor da

corrente. Também, a passagem de corrente pela pequena área inicial de contato, da gota com a peça, causa uma elevação pontual de temperatura e, conforme o valor da corrente pode ocorrer a evaporação de metal fundido, provocando micro explosões. Estes dois eventos são apontados por gerar os respingos de maior volume. Durante a reignição do arco são gerados os respingos finos, e os fatores abaixo relacionados são indicados como os principais causadores dos mesmos.

- Máxima densidade de corrente devido ao elevado valor da corrente e da pequena área da ponte formada entre o metal fundido do eletrodo e a peça. A elevada densidade da corrente provoca um superaquecimento do metal fundido e conseqüente explosão, que acaba expulsando parte do metal fundido em forma de respingos.
- Após a reabertura do arco com o rompimento da ponte metálica, grande pressão sobre a poça metálica é causada pela alta densidade de corrente passando por uma pequena região gasosa.
- Forças eletromagnéticas máximas são geradas devido ao elevado valor da corrente e da pequena área da ponte.
- Força de escoamento muito grande devido à gota estar toda em contato com a peça.

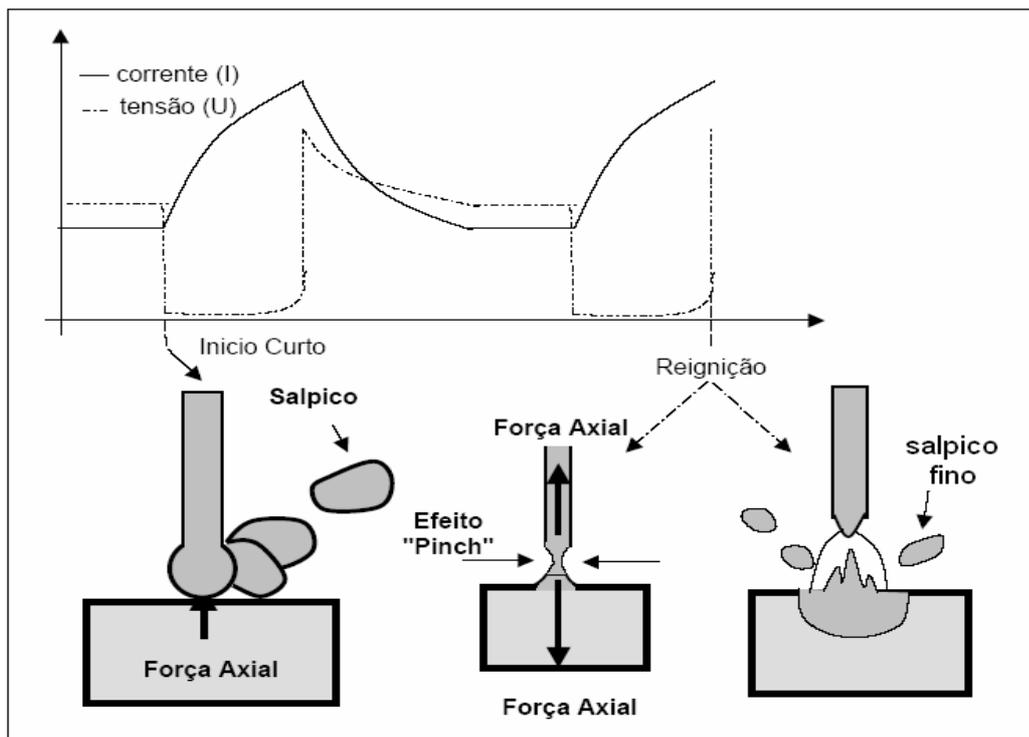


Figura 2.12 – Detalhe da transferência durante curto-circuito (Junior, 2002).

A taxa de aumento da corrente durante a formação da ponte entre o eletrodo e o material a ser soldado na transferência por curto circuito, associada com o aumento das forças eletromagnéticas durante o curto, afeta o arco. A inclusão da indutância para diminuir a taxa de subida da corrente na primeira fase do curto é muito útil principalmente quando a soldagem é feita em diferentes posições, melhorando a estabilidade do arco (Miranda, 1999).

A Figura 2.13 ilustra como o controle da taxa da corrente de pico (corrente de curto), usando a indutância pode afetar o processo no modo curto-circuito. Na baixa indutância a corrente sobe rapidamente (Figura 2.13-A), de forma abrupta fazendo com que ocorra uma fusão do eletrodo com o aparecimento de forças explosivas que podem gerar a formação de respingos. Quando a velocidade da corrente nesta condição é reduzida com o acréscimo da indutância (Figura 2.13-B) a corrente de curto sobe mais suavemente e as forças explosivas no eletrodo são minimizadas ou eliminadas.

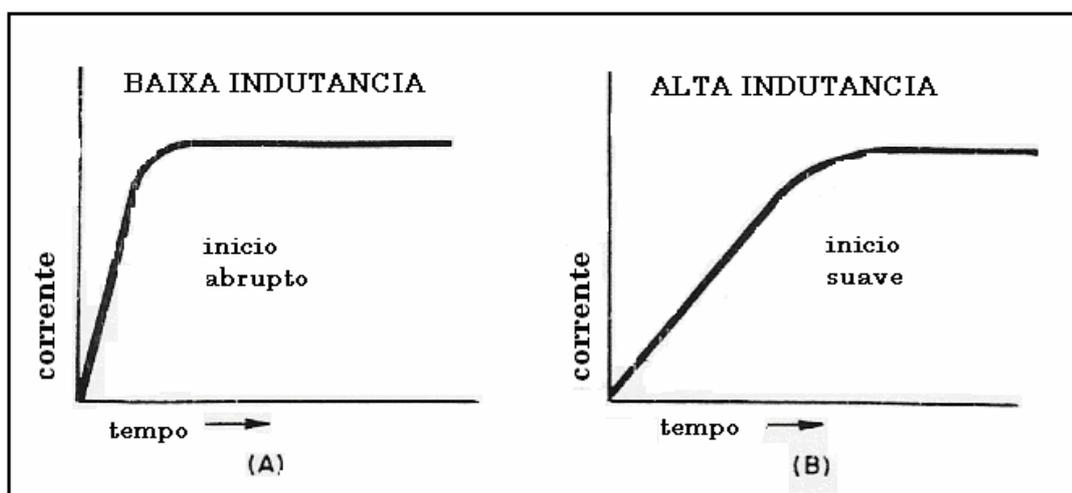


Figura 2.13 – Efeito da indutância na corrente de curto (Uttrachi e Meyer, 1993).

A indutância na fonte de potência controla a taxa de subida da corrente e conseqüentemente a taxa de aplicação da força “pinch” (compressão). Se a força “pinch” for aplicada maior intensidade, os respingos irão aumentar (as gotas serão ejetadas violentamente para a poça de fusão). No modo curto circuito, um acréscimo na indutância irá diminuir o número de curtos metálicos transferidos por segundo e aumentar o tempo de arco. O tempo do arco apagado forma uma poça menos fluida (Uttrachi e Meyer, 1993).

Miranda et al (1998) afirmam ter a indutância um efeito muito significativo na transferência por curto-circuito, mas nenhum na transferência por spray. O aumento da indutância gera um aumento do tempo do arco, diminuindo a frequência de curtos-circuitos. O

estudo da indutância é ainda recente no Brasil e geralmente é associado à otimização da soldagem cuja transferência seja por curto-circuito, influenciando diretamente na formação de respingos e na estabilidade do arco. A variação da corrente representa duas conseqüências sobre a gota, independente do tipo de transferência metálica:

1. Alteração do calor gerado no arame devido ao efeito joule;
2. Modificação da força eletromagnética. Afetando diretamente o fenômeno de estrangulamento da gota (efeito “pinch”). Para a gota fluida formada na ponta do arame, essa força exerce influência relevante para o seu destacamento (para um dado diâmetro do arame, esse efeito é proporcional ao quadrado da corrente).

A corrente máxima alcançada controla a intensidade do efeito “pinch”, enquanto a taxa de variação da corrente afeta a cinética deste efeito (Miranda, 1998). Em determinadas situações, tal como na transferência por curto-circuito, quanto maior for a cinética do efeito “pinch” maior será a instabilidade do arco e a quantidade de respingos gerados no curto-circuito. A Figura 2.14 mostra de forma esquemática, de acordo com Utrachi e Meyer (1993), a taxa “pinch” e o seu efeito nos respingos. Entretanto, resultados de trabalhos de Miranda et al (1998) não indicaram uma relação linear crescente da taxa de respingos com o aumento da taxa “pinch” .

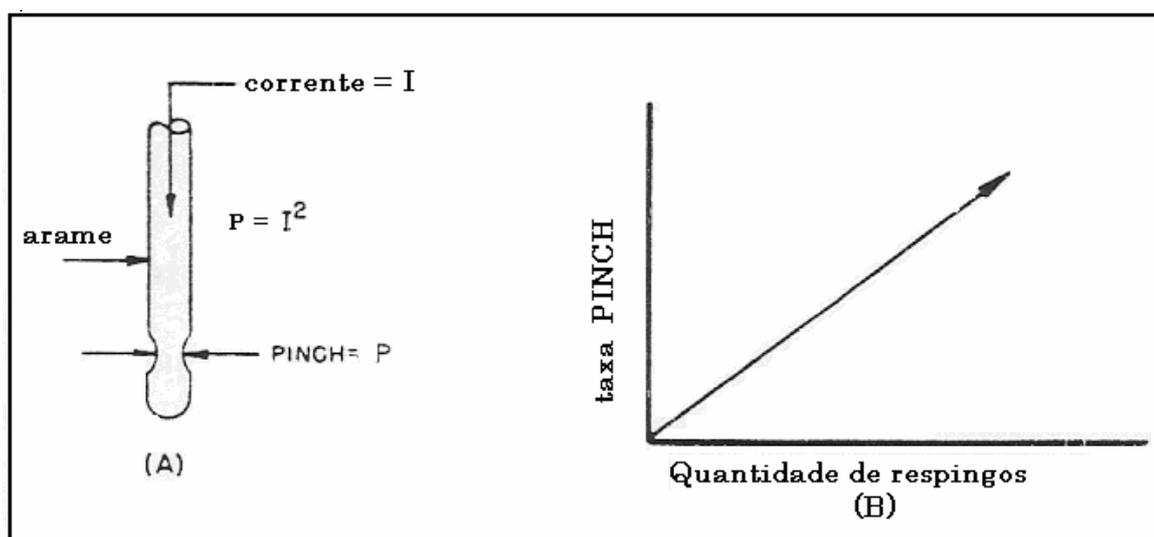


Figura 2.14 – Efeito “pinch” e sua influência na quantidade de respingos (Utrachi e Meyer, 1993).

Através dos ajustes de indutância e da característica estática da fonte, é possível obter as condições ótimas no MIG/MAG com transferência por curto circuito. Portanto, o efeito indutivo deve ser estudado mais detalhadamente para auxiliar na obtenção de um processo

estável e econômico, soldas com boas propriedades e com boa aparência. (Uttrachi e Meyer, 1993).

No que concerne ao efeito da indutância no processo de soldagem com arame tubular algumas pesquisas tem sido mencionadas na literatura. Miranda et al (1998) estudou o efeito dos ajustes independentes de subida e descida de indutância sobre o processo arame tubular autoprotetido. A principal conclusão foi que o efeito indutivo afetou de maneira significativa as características operacionais e econômicas deste processo, entretanto ficou claro a necessidade de um estudo exploratório mais completo. O ajuste médio da escala da fonte, tanto para subida quanto para descida, se mostrou mais favorável à estabilidade do arco. Verificou-se também que o ajuste do efeito indutivo no valor mínimo (zero na escala da fonte) de subida e de descida foi bastante prejudicial à soldagem, impossibilitando a execução da solda devido às instabilidades associadas.

Kobayashi et al (2005) estudaram o comportamento das características geométricas (largura, penetração e reforço) e o rendimento real de deposição para o processo FCAW com transferência do tipo curto-circuito, sob proteção de uma mistura gasosa C25 com a influência da taxa de variação da corrente de curto-circuito (indutância). As soldas foram realizadas por simples deposição, com tensão e “stick-out” mantido praticamente constante, e verificou-se que com a variação do percentual de indutância, o rendimento real de deposição se manteve aproximadamente constante, porém as características geométricas e o consumo sofreram variações. Para maiores correntes de soldagem notou-se que a indutância apresentou maior influência nas características geométricas do cordão de solda. O consumo do eletrodo também foi alterado pelo aumento da indutância.

É essencial salientar ainda, a importância de outros fatores (além da indutância) na soldagem e o efeito dos mesmos sobre a influência da indutância na estabilidade do arco, no processo por curto-circuito. Como exemplo destes fatores, pode-se citar a tensão e a velocidade de alimentação do arame eletrodo (Fortes, 2004; Miranda, 1999).

2.8.2 Econômicas

O rendimento (R%), o consumo (C) e a taxa de deposição influenciam diretamente nas características econômicas dos eletrodos, e, conseqüentemente, da soldagem. Vários fatores influenciam nestas características, tais como a intensidade da corrente, o comprimento e

diâmetro do eletrodo, o tipo e vazão do gás de proteção, as características estáticas e dinâmicas da fonte de soldagem, entre outros.

O rendimento é a relação entre a taxa de deposição e o consumo. O consumo é a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo. Por sua vez, a taxa de deposição é a quantidade de eletrodo (em peso) depositado por unidade de tempo. A taxa de deposição depende de variáveis de soldagem, tais como, diâmetro do eletrodo, composição, extensão do eletrodo e corrente de soldagem (Fortes, 2004; Joaquim, 2001; Miranda, 1999).

Como causa principal da ineficiência da soldagem com transferência por curto-circuito no processo eletrodo tubular se destaca a presença de respingos durante o processo de formação e transferência das gotas. Entretanto os principais fatores que influenciam nestas perdas são os seguintes (Miranda, 1999 citando Farias, 1993):

1. Movimento dinâmico dos gases, causando explosões na gota e/ou na poça de fusão.
2. O rompimento da ponte metálica entre o eletrodo e o metal de base durante a transferência por curto-circuito
3. A desintegração das gotas grandes.
4. O impacto do arco sobre a poça de fusão no momento da reabertura do arco após o curto-circuito.
5. O impacto das gotas sobre a poça de fusão.

Como ressaltado anteriormente, por sua ação na formação de respingos, Miranda et al (1998) destacam que o efeito indutivo influencia de forma significativa as características operacionais e econômicas do processo arame tubular autoprotégido. Um ajuste médio dos valores de subida e descida da indutância, de acordo com os resultados obtidos, são os mais recomendados para obtenção de um processo mais econômico e com maior estabilidade. Este ajuste médio se destacou por uma produção elevada e melhor rendimento.

No mesmo sentido Kobayashi et al (2005) estudaram a influência da variação da corrente de curto, onde concluíram que o rendimento praticamente não foi alterado pelo aumento percentual da indutância. Tal resultado foi o oposto da literatura que diz que a indutância é regulada para aumentar o rendimento real de deposição (Dutra e Baixo, 1990). Sua adição causa na soldagem um acréscimo no tempo de abertura de arco e de curto-circuito resultando em menos curtos por segundo e, conseqüentemente, em um tempo de arco maior gerando mais calor na solda, o que pode alterar o rendimento e as características geométricas da solda.

A velocidade de fusão do eletrodo influencia a produtividade do processo e as suas características operacionais (como soldar em diferentes posições e o formato do cordão).

Variações inesperadas ou inadequadas da velocidade de fusão ou a incapacidade de manter a igualdade desta velocidade com a velocidade de alimentação do arame são causas frequentes de instabilidade do processo de soldagem. O eletrodo é aquecido basicamente, pela energia do arco elétrico (principalmente pela região de queda do cátodo e do ânodo) e pelo calor gerado por efeito joule ao longo do eletrodo (Starling et al, 2003).

A equação (2.1) calcula a velocidade de fusão do arame sólido (modelo clássico).

$$W = \alpha_c \cdot I_m + \beta_c \cdot l_e \cdot I_{ef}^2 \quad (2.1)$$

onde: α_c e β_c são respectivamente coeficientes indicativos da contribuição do arco e do efeito joule para a fusão do eletrodo (mm/A.s); l_e é o comprimento energizado do eletrodo (mm); I_m é a corrente média de soldagem (A) e I_{ef} é a corrente eficaz de soldagem (A);

Starling et al (2003), estudaram as características de fusão de arames tubulares dos tipos rutilico, básico e “metal cored” com diâmetro de 1,2mm, para dois gases de proteção (100%CO₂ e 75%Ar – 25%CO₂), variando o comprimento energizado do eletrodo (16 e 20mm) e o comprimento do arco (3,5 e 5,5mm) e os resultados mostraram que as curvas de fusão obtidas satisfazem ao modelo clássico empregado na soldagem de arames maciços. O comprimento do arco e a composição do gás de proteção não afetaram estas curvas (os coeficientes α_c e β_c obtidos para os arames tubulares rutilico e básico são maiores do que os de um arame maciço de aço de mesmo diâmetro. Para o “metal cored” os coeficientes são próximos aos do arame sólido. Na soldagem com 75%Ar – 25%CO₂ os arames maciço e tubular rutilico tendem a apresentar valores muito próximos para a taxa de deposição enquanto o básico e “metal cored” tendem a apresentar respectivamente taxas de deposição superior e inferior à de um arame maciço. Para soldagem com 100%CO₂ (e uma mesma corrente) a taxa de deposição do arame básico foi inferior à do arame rutilico. Na Figura 2.15 tem-se a velocidade de fusão em função da corrente de soldagem.

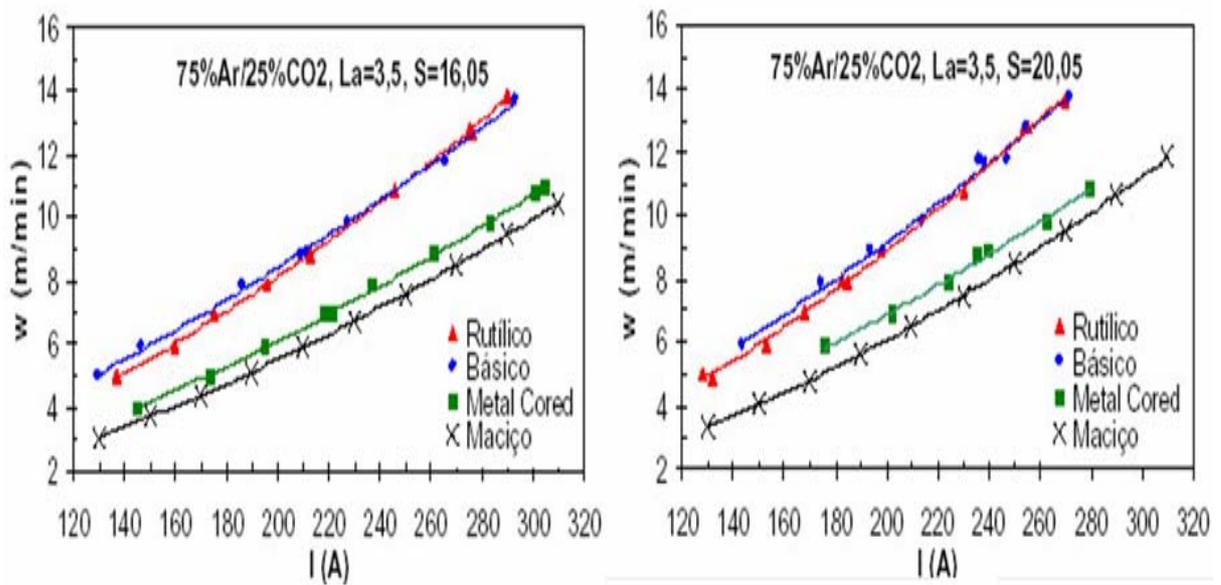


Figura 2.15 - Velocidades de fusão dos arames tubulares e sólidos (Starling et al, 2003).

Rodgers e Lohead (1989) estudaram o uso dos arames tubulares com proteção gasosa e transferência metálica por curto-circuito em indústrias “offshore”; e na Tabela 2.2, mostrou as taxas de deposição do processo FCAW, arame flux cored básico com proteção gasosa (75%Ar e 25%CO₂) comparadas com as taxas de deposição do SMAW, do FCAW pulsado com proteção gasosa e do FCAW com arame autoprottegido. O processo FCAW no modo de transferência curto-circuito se mostrou satisfatório, a operabilidade e a estabilidade do arco foram grandes e nenhuma evidencia foi achada de alguma tendência para fusão incompleta e descontinuidades.

Tabela 2.2 – Taxas típicas de deposição de processos usados em indústria “offshore” (Rodgers e Lohead, 1989).

PROCESSO	PROTEÇÃO GASOSA (75%Ar-25%CO ₂)	TAXA DEPOSIÇÃO (kg/h)
FCAW – curto-circuito	Com proteção	2,1 – 2,4
FCAW – pulsado	Com proteção	5,4
SMAW – 7018-G		1,2 – 1,8
FCAW – auto protegido (NR203 Ni-C)	Sem proteção	1,5 – 2,0

2.8.3 Efeito dos Parâmetros na Geometria do Cordão

O Processo FCAW se destaca por apresentar metal depositado de alta qualidade e solda com boa aparência visual. A qualidade da solda produzida por este processo depende do tipo de metal base, do projeto da junta e do procedimento de soldagem. Entretanto, a ocorrência de descontinuidades está diretamente relacionada a procedimentos e práticas inadequadas (Bracarense, 2000).

A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância muito maior para desalinhamentos da tocha de soldagem e, adicionalmente, reduzindo os riscos de defeitos de falta de fusão. O arco mais largo dos arames tubulares produz uma poça de fusão calma e plana que promove um cordão de solda de aspecto liso e com boa molhabilidade.

Dutra e Baixo (1990) lembram em sua pesquisa que apesar dos valores de tensão e corrente média manterem-se inalterados com a mudança na dinâmica da fonte, a geometria do cordão de solda não segue o mesmo comportamento e isto deve ser levado em consideração na seleção de variáveis de soldagem.

2.9 MÉTODO TAGUCHI / PROJETO ROBUSTO

A técnica denominada Projeto Robusto, desenvolvida por Taguchi, é uma ferramenta poderosa na otimização de produtos ou processos. Ela visa determinar as variáveis (denominadas de fatores) que mais influenciam a variabilidade do processo ou produto. O controle destes fatores garante a qualidade do processo/produto (menor variabilidade), além da otimização do seu desempenho (Ross, 1991).

O método Taguchi pertence a uma classe de abordagens que assegura a qualidade através do projeto, neste caso através da identificação e controle de variáveis críticas (ou ruídos) que fazem ocorrer desvios na qualidade do produto e/ou processo (Vieira, 1996).

2.9.1 Definição

Projeto robusto pode ser definido como um conjunto de conceitos, estratégias e métodos que utiliza o conhecimento existente de engenharia para realizar os seguintes benefícios:

- Melhoria da Qualidade;
- Minimização do custo;
- Minimização do tempo de desenvolvimento.

Segundo Ross (1991), para se alcançar a robustez, esforços de controle de qualidade devem começar na fase de projeto de produto e continuar durante as fases de engenharia de produção e fabricação.

2.9.2 Desenvolvimento do Projeto Robusto

Os níveis (valores) de fatores controláveis (parâmetros do projeto) são selecionados para minimizar os efeitos de fatores perturbadores nas características funcionais do produto, ou seja, determinam-se os níveis dos diferentes parâmetros que dão ao produto as suas qualidades funcionais e que minimizam a perda de qualidade. Em outras palavras, procura-se estabelecer os níveis dos parâmetros do produto de modo que a característica de qualidade deste torne-se insensível ou robusta às fontes de variação (fatores de ruído), mantendo o valor médio da resposta sobre o valor objetivo de maneira consistente, obtendo alto desempenho e baixo custo, simultaneamente (Ross, 1991; Vieira, 1996).

2.9.3 Projeto dos Parâmetros

A resposta do produto considerada para o propósito de otimização em um delineamento de experimento robusto é chamada de característica de qualidade. Vários parâmetros podem influenciar a característica de qualidade ou resposta do produto. Estes parâmetros classificam-se dentro das seguintes três classes (note que a palavra parâmetro equivale à palavra fator na literatura de Projeto Robusto):

1. FATORES DE SINAL (M): Este é o grupo de parâmetros para o usuário ou operador expressar o valor pretendido para a resposta do produto. Os fatores de sinal são

selecionados pelo engenheiro de projeto baseado no conhecimento da engenharia do produto que está se desenvolvendo.

2. FATORES DE RUÍDO (X): Certos parâmetros não podem ser controlados pelo projetista, sendo estes parâmetros chamados de fatores de ruído.
3. FATORES DE CONTROLE (Z): Estes são parâmetros que o projetista pode especificar livremente. De fato, é responsabilidade do projetista determinar o melhor valor destes parâmetros. Cada fator de controle pode ter múltiplos valores, chamados níveis. Quando se muda os níveis de certos fatores de controle, o custo de fabricação não muda.

Identificar respostas importantes, fatores de sinal, fatores de ruído e fatores de controle em um projeto específico são questões importantes. Em um Delineamento de Projeto Robusto é também importante reconhecer quais fatores de controle mudam o custo de fabricação. A melhor situação, dos parâmetros que não afetam o custo de fabricação, é determinada através do projeto do parâmetro.

2.9.4 Razão Sinal/Ruído

É a função objetiva empregada no Método Taguchi. O uso da razão S/R obtendo o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, tem a vantagem deste ajuste também ser válido para outro valor médio do parâmetro.

a) Sinal/ Ruído

Os parâmetros de controle que contribuem na redução de variação (aperfeiçoamento da qualidade) podem ser rapidamente identificados observando o quanto de variação aparece como resposta. A metodologia Taguchi idealiza uma transformação dos dados da repetição em outro valor, que representa a variação da medição existente. Designa-se a transformação como relação sinal-ruído (S/R) ou função objetiva. A função objetiva para ser maximizada, nas resoluções dos problemas estatísticos de projeto de processo/produto, tem que ser escolhida corretamente. As diversas relações S/R disponíveis, de acordo com o tipo de característica são: menor é melhor (mM), maior é melhor (MM) e nominal é melhor (NM).

Cada característica tem a equação específica para o cálculo da taxa S/R (Ross, 1991). Para este trabalho foram utilizadas as seguintes características:

- **Problema do tipo Menor é melhor**, usado quando se deseja minimizar os resultados. Sua equação é representada pela seguinte relação:

$$S / R_S = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.2)$$

onde n = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis de ruído), y_i é a característica da qualidade (resposta observada).

Como exemplo de menor é melhor pode-se citar o número de defeitos de uma peça, os índices de convexidade e respingos durante uma soldagem.

- **Problema do tipo Maior é melhor**. Usado quando se deseja maximizar os resultados, sendo determinada pela relação:

$$S / R_L = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \right) \quad (2.3)$$

Como exemplo de aplicação da função maior é melhor pode-se citar o rendimento de um equipamento, as taxas de fusão e deposição, o índice de penetração, a diluição e a qualidade do cordão de solda na soldagem.

Assim, os níveis ótimos das variáveis de influência são aqueles que maximizam o S/R apropriado para cada análise estatística específica.

b) Parâmetros de Controle e de Ruído

A Metodologia Taguchi distingue os parâmetros em dois grupos principais: parâmetros de controle e de ruído. Parâmetros de controle são aqueles estabelecidos pelo fabricante e que não podem ser diretamente modificados pelo consumidor. Parâmetros de ruído são aqueles sobre os quais o fabricante não possui controle direto, mas que variam de acordo com o ambiente e hábito do consumidor.

Parâmetros de ruído podem ser classificados em três categorias:

1. Ruídos externos são aqueles relacionados aos fatores ambientais como temperatura ambiente, umidade, pressão ou pessoas. Ruídos externos provocam variações externamente ao produto;
2. Ruídos internos estão relacionados com a função e com o tempo, tais como deterioração, desgaste, desaparecimento gradual da cor, encolhimento e ressecamento; ruídos internos causam variação no interior do produto;
3. Ruído do produto manifesta-se como variação de peça para peça. São ocasionados durante a fabricação, mudando uma determinada característica entre dois ou mais produtos.

2.9.5 Arranjo Ortogonal

O arranjo ortogonal (AO) facilita e reduz o número de experimentos. As colunas da matriz representam os fatores a serem estudados e as linhas os experimentos que serão realizados. Na matriz ortogonal, colunas podem ser deixadas vazias (que correspondem às variáveis a serem estudadas) sem prejuízo na análise. Linhas vazias, que corresponde deixar de realizar algum experimento, prejudica a ortogonalidade e compromete a análise e a confiabilidade dos experimentos (Vieira, 1996).

A seleção do arranjo ortogonal a ser utilizada depende: do número de fatores e interações de interesse e do número de níveis para estes fatores de interesse. Estes dois itens determinam os graus totais de liberdade exigidos para todos os experimentos. Os graus de liberdade para cada fator consistem no número de níveis menos um ($v_A = \kappa_A - 1$, onde κ é o número de níveis do fator A e v , o grau de liberdade do fator A). O número de graus de liberdade para uma interação é o produto dos graus de liberdade dos fatores nessa interação ($v_{AXB} = v_A \cdot v_B$). Graus de liberdade mínimos exigidos em série de experimentos consistem na somatória de todos os graus de liberdade de fator e interação.

O número na designação do arranjo indica o número de graus de ensaios contidos no mesmo, sendo o número de graus de liberdade disponíveis num certo arranjo equivalente ao número de ensaios menos um (o arranjo L8 possui 7 graus de liberdade disponíveis) (Ross, 1991).

Por exemplo, a Tabela 2.3 é chamada de arranjo de distribuição ortogonal L8 (2^7) ou simplesmente de arranjo ortogonal L8.

Tabela 2 3 – Matriz ortogonal L8.

Projeto Robusto							
Experimento	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

O número à esquerda de cada fila é chamado de número do experimento ou número da distribuição, e vai de 1 a 8. Os alinhamentos verticais são chamados de colunas do arranjo ortogonal, e todas as colunas contêm quatro vezes os numerais 1 e 2. Quando cada uma das duas colunas consiste de numerais 1 e 2 e as quatro combinações (11), (12), (21) e (22) aparecem com a mesma freqüência, diz-se que estas duas colunas estão balanceadas ou são ortogonais. Existem outros arranjos ortogonais como o arranjo ortogonal L8. Entre os arranjos ortogonais mais freqüentemente usados estão o L9, L16, L18, L27e L32. Para os propósitos deste trabalho foi utilizado o arranjo ortogonal L18.

2.10 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE

A metodologia do Delineamento Robusto permite ao engenheiro gerar as informações necessárias para tomar decisões com pouco esforço experimental. O mensuramento da qualidade durante o projeto e desenvolvimento e a experimentação eficiente para encontrar informações confiáveis sobre os parâmetros de projeto são duas importantes questões para serem desenvolvidas no Delineamento Robusto (Vieira, 1996).

Vários autores com pequenas alterações nos termos e/ou nas etapas a serem seguidas, mostram como se realiza o delineamento de experimentos pelo método Taguchi. Para maior aprofundamento, recomenda-se as referências: (Pan et al, 2005; Antony et al, 1999; Vieira, 1996; Ross, 1991; Montgomery, 1984;). As principais etapas são:

- **Objetivo/ meta do experimento**

Procura-se nesta etapa determinar os fatores mais importantes que afetam as características da qualidade (ou respostas) e conseqüentemente reduzir a variabilidade nas respostas.

- **Seleção das características de qualidade**

Identificado o objetivo do experimento, nesta etapa é selecionada as respostas apropriadas para o experimento. As respostas de interesse mostram as características que se quer obter do produto/processo analisado.

- **Identificação dos fatores de controle e S/R**

Seleção de fatores que podem influenciar as características da qualidade bem como a seleção dos níveis dos fatores. Fatores de controle são aqueles que podem ser controlados sob condições normais de produção.

Seleção de fatores ruídos. Fatores ruídos são aqueles que causam variação no desempenho funcional do produto/ processo.

Seleção de fator sinal. Fator sinal é aquele que afeta somente a média do processo/produto

- **Escolha do arranjo ortogonal (AO)**

Seleção apropriada do AO de acordo com o número de fatores e seus níveis que encaixe perfeitamente com o pretendido para o estudo, com economia de tempo, trabalho e número de ensaios.

- **Preparação experimental**

Nesta etapa são elaboradas as matrizes de projeto codificadas e decodificadas para o experimento e análise dos resultados respectivamente.

- **Análise estatística e interpretação dos resultados**

Na metodologia Taguchi o objetivo sempre é reduzir a variabilidade nas respostas. O S/R é uma medida do desempenho da variabilidade do produto/ processo na presença dos fatores ruídos. A idéia é maximizar o S/R e, desse modo, minimizar os efeitos dos fatores ruídos.

- **Confirmação experimental**

Alguns ensaios são feitos para a condição ótima e comparados com os resultados previstos por Taguchi, para concluir se são satisfatórios e válidos.

Capítulo 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Todo o procedimento de montagem da bancada experimental, a descrição dos equipamentos, dos acessórios, dos materiais de consumo empregados, dos testes exploratórios realizados para definição dos parâmetros avaliados no ensaio final foram detalhados neste capítulo. Em função dos objetivos do trabalho os testes exploratórios foram avaliados para se obter com quais variáveis (e respectivos níveis) do processo a transferência metálica por curto-circuito seria predominante. Em seguida, com as variáveis ou fatores de controle e parâmetros definidos, o software MINITAB foi utilizado para se obter o delineamento dos experimentos pelo método Taguchi. Os dados foram montados em uma ordem adequada para gerar uma matriz ortogonal. A matriz selecionada foi uma L18 com 18 ensaios e com 11 graus de liberdade (g.l.) para os fatores de controle e 6 (gl) para o cálculo da variância residual dos 17 g.l. possíveis para esse arranjo (L18). Através do método Taguchi os fatores de controle foram analisados na ordem do mais para o menos influente no processo de soldagem, com o objetivo de reduzir o número de variáveis para facilitar a análise dos resultados. Destes, os mais influentes foram selecionados como fatores de controle variando seus níveis previamente escolhidos e os menos influentes foram fixados como parâmetros do processo. Novamente utilizando Taguchi, foram previstas as respostas para alguns ensaios considerados críticos verificando a validade dos resultados com o ensaio prático de confirmação.

3.1 BANCO DE ENSAIOS E MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foi utilizado o banco de ensaios do Laboratório de Soldagem (LSO) da UNIFEI, mostrado na Figura 3.1. Como componente principal do banco foi utilizado a fonte de soldagem multiprocesso Inversal 300 (5), com comando digital e funcionamento no modo normal. A tocha de soldagem (3), que guia o eletrodo consumível e conduz a corrente elétrica e o gás de proteção para a área de trabalho foi acoplada a um carro tartaruga (2), onde é ajustada a velocidade de soldagem, e ao sistema mecânico (9) que garante o ajuste do posicionamento da mesma nas condições desejadas. O comprimento do arame consumido em cada teste, bem como o tempo de soldagem foram registrados através de um medidor de velocidade do arame (1). A vazão do gás de proteção, mantida constante durante a realização da soldagem, foi registrada no medidor de vazão (6). Para todos os testes utilizou-se um sistema de aquisição de dados (8), denominado OSCILOS4, para determinação das características dinâmicas de tensão e corrente com tempo de aquisição de 1 segundo. O tempo do arco aberto foi medido com um cronômetro.



Figura 3.1 – Banco de ensaios – (LSO – UNIFEI).

3.2 MATERIAIS DE CONSUMO

3.2.1 Arame Eletrodo

Para realização dos testes foi utilizado neste trabalho como consumível o arame tubular AWS E71T-1 (rutílico) com 1,2 mm de diâmetro, fabricado pela Hyndai. A composição química e propriedades mecânicas deste arame eletrodo de acordo com dados fornecidos pelo fabricante são mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química e propriedades mecânicas.

ARAME AWS E71T-1				
Composição Química %				
C – 0,03	Si – 0,55	Mn – 1,45	P – 0,013	S – 0,01
Propriedades Mecânicas				
L. R. (N/mm ²)	L. E. (N/mm ²)	Alongamento [%]	Charpy-V/ [J] 18° C	
580	525	29	104 / 72	

3.2.2 Material Base

Constituídos por chapas de aço ABNT 1020 de 3,0 x 30 x 80 mm. Sendo este material selecionado por ser uma pesquisa direcionada à soldagem de chapas finas com o intuito de verificar o comportamento do processo no modo de transferência por curto-circuito.

3.2.3 Gás de Proteção

Utilizou-se neste trabalho os gases de proteção CO₂ puro e a mistura gasosa 25% CO₂ – 75% Ar com a finalidade de testar para as condições de soldagem especificadas, qual dos dois gases, tem maior influência na transferência metálica por curto-circuito e na estabilidade do arco. Além disso, estes dois tipos de gases são recomendados para o arame adotado.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Escolha dos Fatores de Controle e Respostas

Como ressaltado no Capítulo 2, vários fatores influenciam na ocorrência da transferência por curto-circuito. Em princípio se destacam a tensão, a velocidade de alimentação, a distância bico de contato-peça (DBCP), a indutância e o tipo de gás proteção utilizado. Porém há interesse em se identificar quais destes fatores são os mais influentes, bem como quais níveis de regulagem permitem obter uma melhor condição de soldagem no que se refere ao comportamento do arco e características geométricas e de deposição. A partir destes aspectos foi fundamental a realização de uma série de testes exploratórios com o intuito de se determinar os níveis de estudo dos parâmetros. Em princípio foi definido a utilização de 3 níveis de regulagem para cada parâmetro, com exceção do tipo de gás que por imposição do tipo de arame utilizado permite apenas a utilização de dois tipos de gases. Desta forma, em função destas definições o arranjo ortogonal L18 do método Taguchi, atende aos objetivos pré-determinados.

3.3.2 Definição dos Níveis dos Fatores de Controle

Em função da dificuldade em se determinar os níveis dos fatores de controle para o estudo pretendido, uma série de testes exploratórios foram desenvolvidos a partir de informações coletadas na literatura. A seguir as várias etapas destes testes serão descritas bem como as análises geradas pelas observações dos resultados obtidos a partir dos oscilogramas de tensão e corrente.

- Na 1ª etapa procurou-se inicialmente estabelecer os níveis mínimo e máximo de tensão que conduzissem a uma boa formação de curtos-circuitos. Conforme afirmações de Wang et. al. (1995), para o arame estudado neste trabalho, porém com diâmetro 1,6 mm, valores de tensões entre 18 e 24 V permitiram as melhores condições de ocorrência de curtos-circuitos. Desta forma ao se testar o nível de tensão com 18 V e velocidade de alimentação (V_a) em 4 m/min, para o arame AWS E71T-1, 1,2 mm de diâmetro, percebeu-se poucas ocorrências de curtos associado a uma maior

irregularidade de transferência. Para tensões de 19 V houve uma melhora significativa na ocorrência de curtos, sendo então fixado este valor como nível mínimo. Com tensão maior que 23 (V) e velocidade de alimentação menor que 4,0m/min não houve ocorrência de transferência metálica no modo curto-circuito, como indica a Figura 3.2.

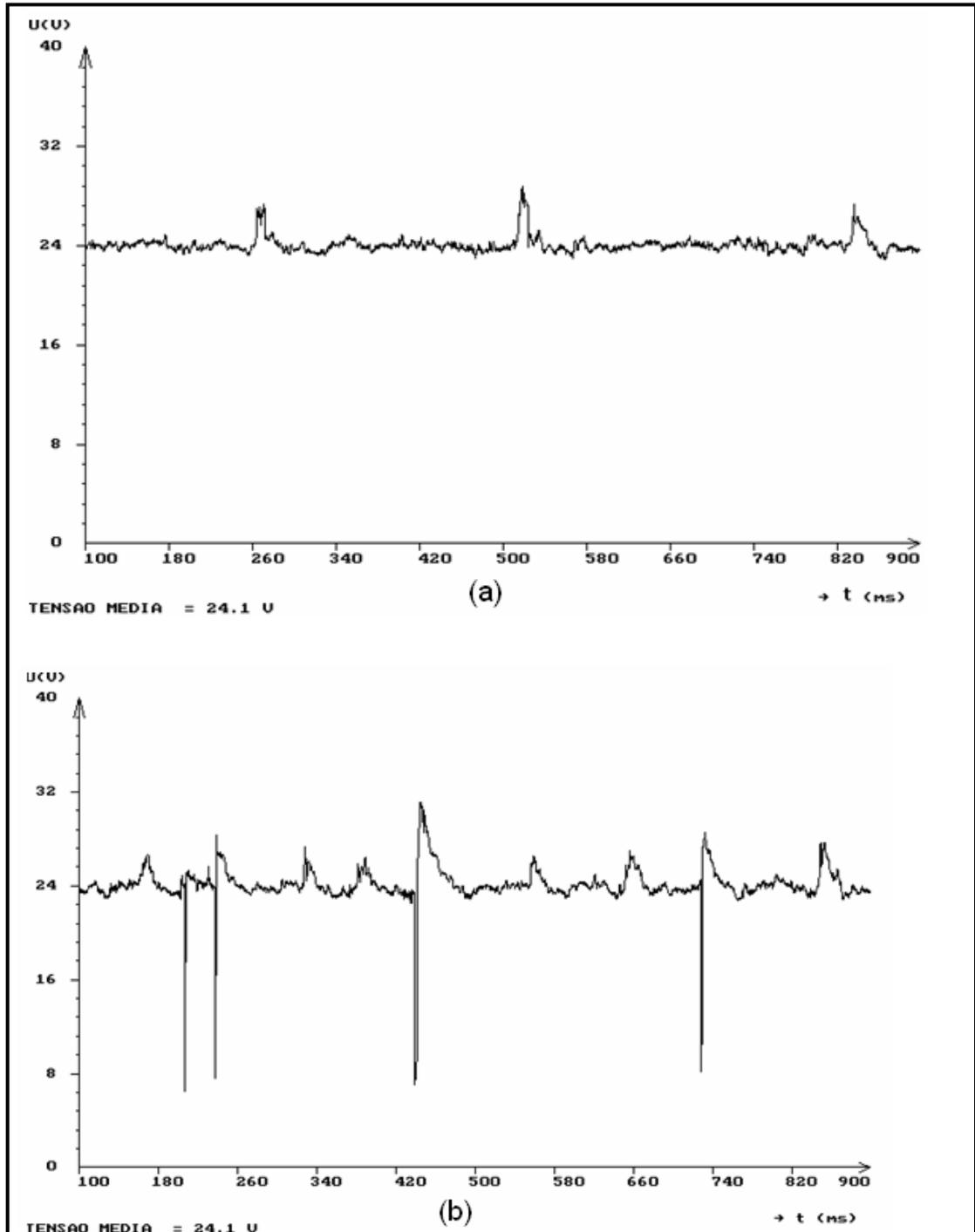


Figura 3.2 - Oscilogramas de tensão (24 V): (a) $V_a = 3\text{m/min}$ – transferência metálica tipo globular; (b) $V_a = 4\text{m/min}$ – poucos curtos.

- Na 2ª etapa procurou-se analisar o comportamento dos gases. Nesta etapa, o CO₂ foi usado como gás de proteção e comparado com a mistura gasosa C25 para verificação da influência do tipo de gás nos oscilogramas de tensão no modo de transferência por curto-circuito, como mostra a Figura 3.3. Por imposição do tipo de eletrodo adotado, os gases testados foram o CO₂ e a mistura C25.

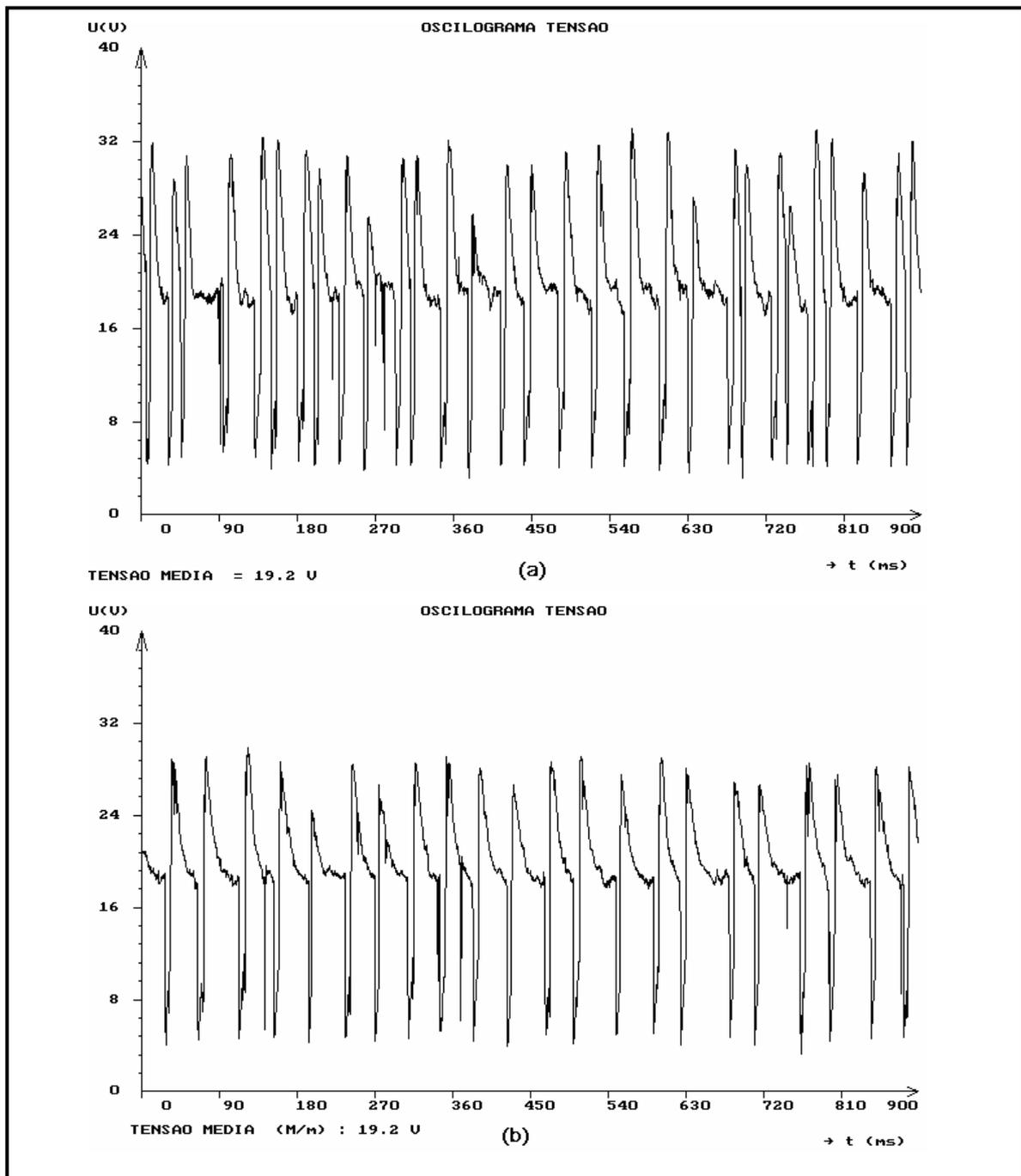


Figura 3.3 - Oscilogramas de tensão ($V = 19V$, $DBCP = 16mm$, $V_a = 4m/min$) para os gases: (a) CO₂ e (b) C25.

Ao se fazer testes aleatórios ($V_s=25\text{cm/min}$, V_a variando de 4, 5 e 6m/min, tensão de 19 e 23V) percebeu-se que com ambos os gases utilizados houve ocorrência de curtos, em maior ou menor incidência.

- Na 3ª etapa procurou-se avaliar a influência da distância de contato bico-peça (DBCP). De acordo com informações na literatura (Bracarense, 2000; Wang et. al, 1995) há faixas relativamente amplas de ajuste do fator DBCP, podendo oscilar de 19 a 38 mm. Entretanto tais regulagens se concentram mais para o tipo de transferência por spray. Desta forma neste trabalho procurou se avaliar três níveis de DBCP, ou seja, 11, 16 e 19 mm. De acordo com os testes preliminares em todas as regulagens houve uma boa condição de ocorrência de curtos-circuitos, sendo assim mantidos estes níveis para futuras análises. A Figura 3.4 confirma a ocorrência de curtos-circuitos com DBCP de 19 mm.

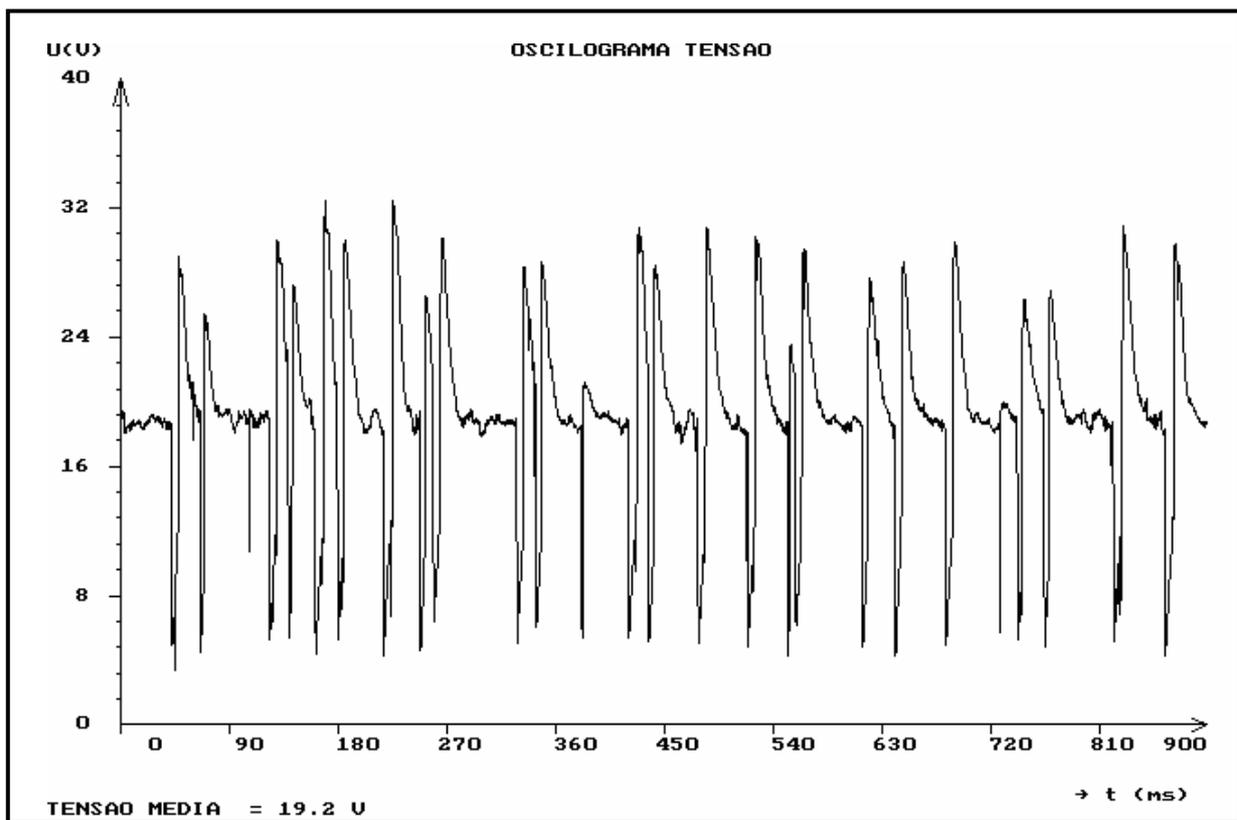


Figura 3.4 - Oscilograma de tensão para distância bico contato peça maior (gás C25, $V=1\text{ V}$, $V_a=4\text{m/min}$ e DBCP =19mm).

- Na 4ª etapa procurou-se determinar os níveis máximos e mínimos de alimentação do arame que pudesse conduzir a uma boa condição de ocorrência de curtos-circuitos. Percebeu-se que velocidade de alimentação (V_a) de 6 m/min gerou fusão exagerada da

chapa, ao passo que com 5,5 m/min houve uma melhor estabilização. Desta forma os níveis para a velocidade de alimentação ficaram estabelecidos em 4, 5, e 5,5 m/min.

- Para a 5ª etapa, foi analisada a velocidade de soldagem. Procurou-se nesta fase encontrar a melhor razão entre a velocidade de alimentação e a velocidade de soldagem (V_a/V_s), e assim fixar os níveis da velocidade de soldagem, para obter uma área adicionada na chapa mais regular. Vários testes foram feitos mantendo fixos, o gás C25, a tensão em 23 V e a velocidade de alimentação (V_a) em 5,5 m/min, e variando a velocidade de soldagem em 20, 25, 30 e 35 cm/min. Com os resultados montou-se a Tabela 3.2 com os dados obtidos através da leitura no planímetro dos perfis das soldas conforme Figura 3.5 para as áreas do cordão (S_c), áreas do reforço (S_r), reforço (r), penetração (p), largura (w) e a razão entre a velocidade de alimentação e velocidade de soldagem (R_s) do cordão de solda. $S_c = S_r + S_p$ (área total do cordão de solda).

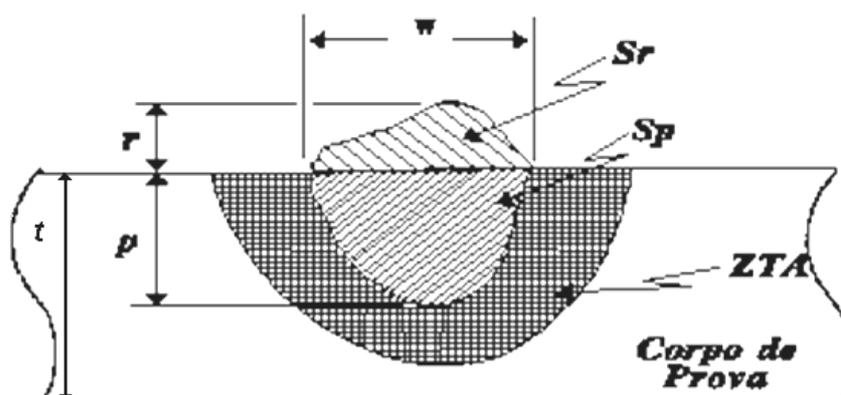


Figura 3.5 – Perfil geométrico de um cordão de solda.

Tabela 3.2 - Resultado do perfil do cordão em função da razão velocidade de alimentação por velocidade de soldagem.

Teste nº	S_c (mm ²)	S_r (mm ²)	r (mm)	p (mm)	w (mm)	V_a/V_s	razão R_s
1	39,3	25,1	3,24	1,7	11,95	5,5/20	27,5
2	24,9	18,8	2,35	1,5	11,1	5,5/25	22
3	24,4	17,7	2,5	0,98	10,3	5,5/30	18,3
4	20,8	13,6	2,3	1,42	9,2	5,5/35	15,7
5*	21,9	15,6	2,42	1,25	9,9	5,5/35	15,7
6*	15,9	9,8	1,95	0,61	7,92	4,0/35	11,43

*união de duas chapas.

Observou-se dos resultados que o teste 4 com razão $R_S = 15,7$ ($V_a = 5,5\text{m/min}$ e $V_s = 35\text{cm/min}$) apresentou um bom resultado, comparativamente aos outros testes, para a penetração, área do cordão e convexidade do cordão, conduzindo ainda a uma solda mais rápida (mais produtiva). Desta forma esta relação foi utilizada para determinação da velocidade de soldagem. Em função da velocidade de alimentação adotada, mantida a relação, os valores da velocidade de soldagem foram definidos como sendo 25,4; 31,8; 35 cm/min. Para efeitos de realização dos experimentos os valores da velocidade de soldagem foram aproximados para 25; 30 e 35 cm/min. As fotos da Figura 3.6 e os valores analisados da Tabela 3.2, comprovam que o melhor cordão foi o de nº 4.

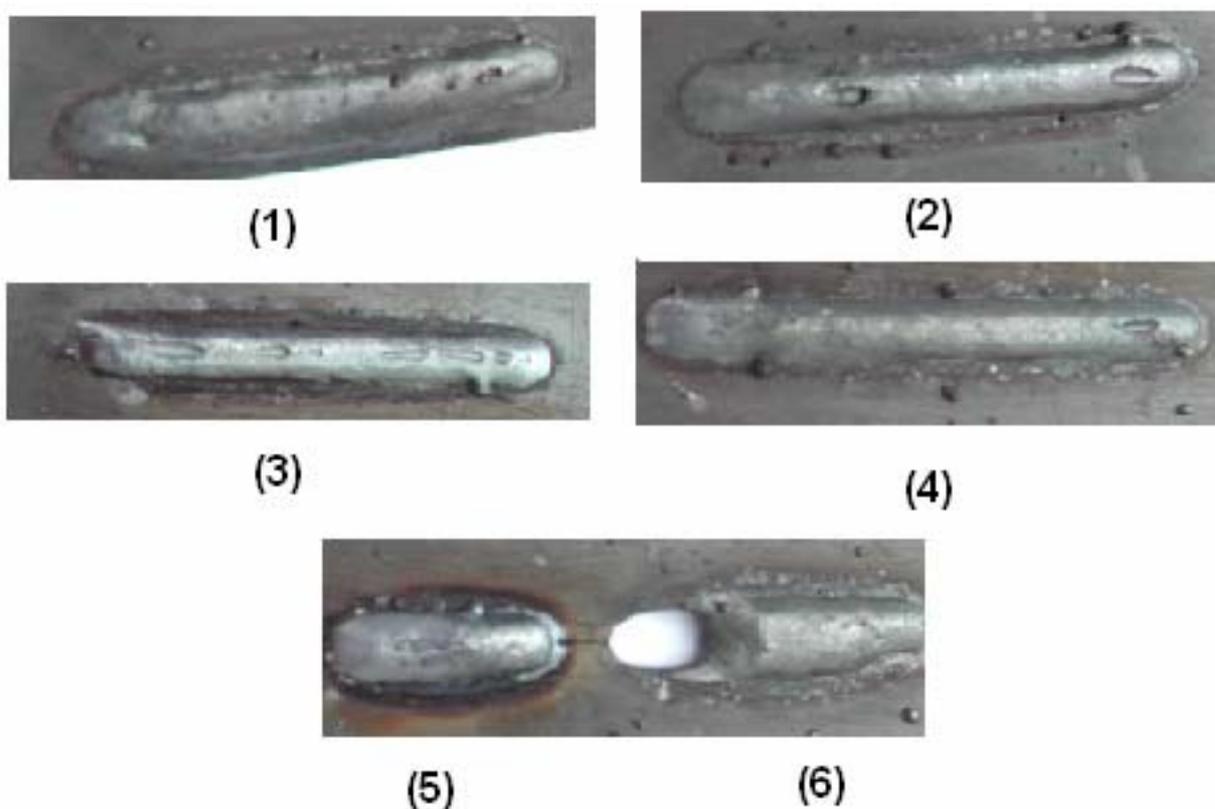


Figura 3.6 – Fotos dos cordões de solda dos testes da tabela 3.2.

- Na 6ª etapa procurou-se definir os níveis de regulagem da indutância (0 a 10). De acordo com Miranda et al (1998), para o processo MIG/MAG no modo de transferência por curto-circuito, o autor sugere os seguintes níveis de regulagem da indutância, 3 ou 4 o mínimo (0 a 2 são inadequados para posição plana e sobre cabeça); 7 o máximo para posição sobre cabeça e 8 a 10 (o máximo) para posição plana.

Baseado nestes aspectos e nos trabalhos de Miranda (1998) e Kobayashi et al (2005) optou-se por ajustar os níveis de indutância em 2, 5 e 9, que permite uma análise mais abrangente da influência desta importante característica no modo de transferência por curto-circuito.

Concluídas as etapas dos testes exploratórios, a Tabela 3.3 resume todos os fatores de controle e seus níveis empregados no ensaio final.

Tabela 3.3 – Níveis dos fatores de controle usados nos ensaios.

FATORES	NOMES	NIVEIS		
Gás de Proteção	GAS	CO ₂	C25	
Tensão (V)	V	19	21	23
Velocidade de Alimentação (m/min)	Va	4,0	5,0	5,5
Velocidade de soldagem (cm/min)	Vs	25	30	35
DBCP (mm)	DBCP	11	16	19
Indutância	Ind	2	5	9

Como respostas para o presente trabalho foram definidos as características associadas ao comportamento do arco no que tange a sua estabilidade e regularidade de ocorrência de curtos-circuitos, bem como as associadas às características geométricas e econômicas dos cordões.

3.4 DELINEAMENTO DOS EXPERIMENTOS (ENSAIOS FINAIS)

Para se analisar a influência dos parâmetros nas respostas selecionadas foi utilizado a metodologia Taguchi através de um arranjo ortogonal L18, nos níveis anteriormente especificados. A Tabela 3.4 apresenta o delineamento dos experimentos gerados a partir do software MINITAB – versão 14.

Todas as soldas foram depositadas utilizando a técnica de simples deposição sobre chapas de aço ABNT 1020 preparados nas dimensões de 3,0 x 30 x 80 mm. A Tabela 3.5 mostra os ajustes dos parâmetros fixos durante a realização dos testes.

Tabela 3.4 – Sequência de soldagem do arranjo ortogonal para o ensaio final.

ENSAIO	GAS	V(V)	Va(m/min)	Vs (cm/min)	DBCP(mm)	Ind
1	CO ₂	19	4,0	25	11	2
2	CO ₂	19	5,0	30	16	5
3	CO ₂	19	5,5	35	19	9
4	CO ₂	21	4,0	25	16	5
5	CO ₂	21	5,0	30	19	9
6	CO ₂	21	5,5	35	11	2
7	CO ₂	23	4,0	30	11	9
8	CO ₂	23	5,0	35	16	2
9	CO ₂	23	5,5	25	19	5
10	C25	19	4,0	35	19	5
11	C25	19	5,0	25	11	9
12	C25	19	5,5	30	16	2
13	C25	21	4,0	30	19	2
14	C25	21	5,0	35	11	5
15	C25	21	5,5	25	16	9
16	C25	23	4,0	35	16	9
17	C25	23	5,0	25	19	2
18	C25	23	5,5	30	11	5

Tabela 3.5 – Parâmetros fixados para os ensaios: final e de confirmação.

PARAMETROS FIXOS	VALORES
TIPO ELETRODO	AWS E71T-1
DIAMETRO	1,2 (mm)
POLARIDADE	CC+ (CDPR)
VAZÃO DO GAS	15 (l/min)

Vale ressaltar que a tocha de soldagem foi posicionada a 90° em relação ao plano da superfície do corpo de prova, sendo tais ajustes feitos com o auxílio de esquadros. Para todos os ensaios, o bico de contato se posicionou no mesmo nível do bocal da tocha, não havendo assim nenhum recuo, como mostra a Figura 3.7.

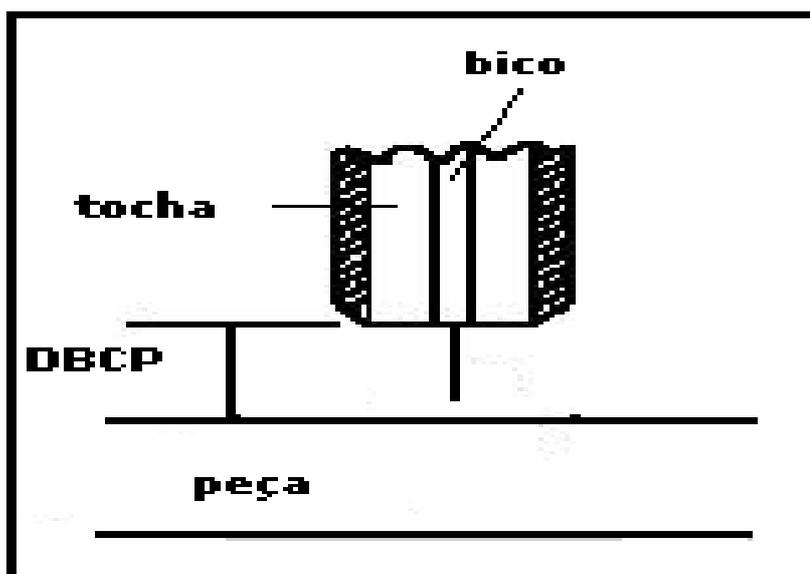


Figura 3.7 – Distancia bico de contato peça (DBCP).

Durante execução dos experimentos, os dados relativos à soldagem foram aquiritados para que posteriormente fossem avaliados. Desta forma utilizou-se o software de aquisição OSCILOS4, com tempo de aquisição de 1 segundo, para caracterização do comportamento dinâmico da tensão e corrente. Posteriormente estes dados foram processados através de um software específico (MIGMAG) para que os dados relativos ao comportamento do arco (ocorrência de curtos-circuitos, taxa de variação de corrente, picos de correntes, histogramas, entre outros) pudessem ser avaliados.

3.5 DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS

3.5.1 Avaliação da Estabilidade do Arco Elétrico e Regularidade de Ocorrência de Curtos-Circuitos

Em função dos dados aquiritados pelo software Oscilos4 e, posteriormente processados pelo software MIGMAG determinou-se para cada ensaio os índices relativos à estabilidade do arco elétrico e regularidade de ocorrência de curtos-circuitos. Estes índices foram os seguintes:

- √- desvio padrão do tempo de curto-circuito, σ_{tcc} (ms).
- √- desvio padrão do período médio de curto-circuito, σ_T (ms).
- √- desvio padrão relativo da corrente de pico, σ_{rIp} (A).
- √- derivada da corrente de subida e de descida – di/dts e di/dtd (A/ms).
- √- tempo total de curto percentual – T_{cc} (%).

Foi utilizado o desvio padrão para quantificar o tempo e o período de curto-circuito, por ele representar a dispersão destes dois índices, Dutra e Baixo (1990); e o desvio padrão relativo para quantificar a corrente de pico (ou de curto), por este reproduzir em porcentagem o quanto o desvio padrão dispersou do valor da corrente média de pico. O tempo total de curto-circuito representa o quanto percentualmente ocorreu de curtos no intervalo de tempo em que a solda foi aquisitada. Este qualifica o rendimento do processo.

3.5.2 Características Geométricas e Econômicas

Para se determinar as características geométricas e econômicas dos ensaios, todos os corpos de prova foram pesados antes da soldagem. Após soldados, procedeu-se a remoção de escória e respingos e novamente pesados. A seguir avaliou-se a qualidade visual do cordão atribuindo uma nota de 0 (péssimo) a 10 (ótimo). Posteriormente os cdp's foram seccionados, lixados, polidos e atacados com nital 4%. Através da utilização de um projetor de perfil com aumento de 20x e de um planímetro foram avaliados a penetração (p), o reforço (r), a largura do cordão (w) e suas respectivas áreas (S_p e S_r) conforme esquema mostrado na Figura 3.5. A partir destes dados determinou-se os índices derivativos das características geométricas e econômicas do cordão, conforme as seguintes relações:

Características Geométricas

Índice de convexidade:

$$IC = \frac{r}{w} * 100 (\%) \quad (3.1)$$

Índice de penetração:

$$IP = \frac{P}{t} * 100 (\%) \quad (3.2)$$

Diluição:

$$D = \frac{Sp}{Sc} * 100 (\%) \quad (3.3)$$

onde $Sc = Sp + Sr$ (mm^2).

Características Econômicas

Taxa de deposição:

$$TD = 3,6 * \frac{(m_f - m_i)}{ta} \text{ (kg/h)} \quad (3.4)$$

onde, m_f – massa do cdp após soldagem (g); m_i – massa do cdp antes da soldagem (g); ta – tempo de soldagem (s).

Taxa de fusão:

$$TF = \frac{3,6 * \rho_a * la}{ta} \text{ (kg/h)} \quad (3.5)$$

onde, ρ_a – densidade linear do arame (7,25 g/m); la – comprimento do arame (mm).

Rendimento:

$$R = \frac{TD}{TF} * 100 (\%) \quad (3.6)$$

Índice de respingos:

$$IR = 100 - R (\%) \quad (3.7)$$

3.6 ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO

Após a realização dos ensaios, na etapa final da análise das respostas, algumas das conclusões adquiridas dos resultados foram os fatores de controle que influenciaram significativamente nas respostas analisadas, bem como as condições ótimas estabelecidas para estes fatores influentes e também quais fatores não foram significativos. A partir destas conclusões, alguns ensaios serão escolhidos e realizados fixando o nível dos fatores menos influentes que maximiza a taxa Sinal/ Ruído (S/R) ou as respostas analisadas e, variando os níveis dos fatores significativos para as condições críticas e ótimas. Também com estes

mesmos ajustes para os fatores mais e menos influentes de cada experimento, a ferramenta estatística Taguchi fará uma previsão das respostas estudadas para os experimentos escolhidos. As respostas obtidas das soldas realizadas serão comparadas com as respostas estimadas, previstas por Taguchi. Se os valores obtidos dos ensaios estiverem dentro da faixa de variação prevista por Taguchi, quando comparados, então serão considerados satisfatórios e válidos, confirmando os ensaios obtidos com os previstos pelo Taguchi.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios realizados, neste capítulo as respostas foram exibidas e discutidas. A análise dos resultados foi feita de forma quantitativa e qualitativa. Primeiramente a avaliação foi baseada nos valores das respostas referentes às características operacionais dos ensaios, quantitativamente segundo os critérios de ocorrência das transferências metálicas e da estabilidade do arco. Na forma qualitativa as respostas foram agrupadas de acordo com o perfil do cordão e características econômicas.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS FINAIS

Os resultados foram agrupados segundo os critérios de análise adotados. As características relativas à regularidade dos curtos-circuitos serão quantificadas pelos desvios padrão do período de curto-circuito (σT), do tempo de curto-circuito (σt_{cc}) e do tempo total de curtos (T_{cc}), considerados como critérios de avaliação do comportamento das transferências metálicas. A corrente de pico (I_p) e seu desvio relativo (σI_p), as taxas de variação da corrente de subida (di/dt_s) e descida (di/dt_d) foram relacionadas com o comportamento do arco. A convexidade do cordão (IC%), o índice de penetração (IP%), a diluição (D%), e a avaliação visual do cordão (QC), foram empregados na análise do perfil do

cordão. Os critérios de avaliação das características econômicas foram as taxas de fusão (TF) e de deposição (TD) da solda e o índice de respingos (IR%).

Com base no procedimento experimental descrito no Capítulo 3, a Tabela 4.1 expõe os resultados dos ensaios referentes aos pesos iniciais (m_i) e finais (m_f) dos corpos de prova, comprimento de arame consumido (l_a) e do tempo de arco aberto (t_a).

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios.

EXP.	m_i (g)	m_f (g)	l_a (m)	t_a (s)
1	100,8	106,1	0,91	12,75
2	110,2	117,7	1,19	14,03
3	108,8	115,6	1,05	11,69
4	116,4	122,6	1,02	15,38
5	117,7	124,5	1,07	9,37
6	114,1	120,2	1,04	11,22
7	111,5	117,0	0,86	12,81
8	119,5	125,6	1,07	12,69
9	121,8	131,7	1,60	17,25
10	124,9	129,9	0,82	12,35
11	109,3	117,2	1,25	14,56
12	103,4	110,4	1,22	13,43
13	115,1	119,8	0,90	13,38
14	105,1	110,6	0,86	10,35
15	107,5	117,3	1,50	16,10
16	119,7	124,8	0,80	11,69
17	115,8	124,0	1,44	16,97
18	108,3	115,9	1,21	13,13

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos referentes ao perfil geométrico do cordão, expressos pela média de duas medidas da área total do cordão (S_c), da área de penetração (S_p), do reforço (r), da penetração (p) e da largura do cordão (w); bem como da qualidade do cordão (QC) quanto à sua aparência visual. A qualidade do cordão (QC) foi obtida a partir de notas dadas de 0 a 10 por pessoas da área de soldagem que avaliaram os cordões obtidos

quanto ao seu formato e aparência superficial; cada cordão recebeu quatro notas, e a média entre estas notas foi o valor de QC na tabela.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos para a geometria e aparência do cordão.

EXP.	Sc (mm²)	Sp (mm²)	r (mm)	p (mm)	w (mm)	QC
01	16,6	3,10	3,8	0,7	5,6	5,3
02	18,3	2,47	3,9	0,8	5,7	3,7
03	15,3	2,57	3,5	0,6	6,0	2,7
04	16,5	2,74	3,2	0,6	7,1	7
05	18,3	2,00	3,4	0,7	7,2	6,3
06	18,0	4,15	3,5	1,1	6,0	4
07	18,1	4,89	2,1	1,1	8,8	5
08	16,6	5,55	2,2	1,1	8,7	7,3
09	25,6	5,72	3,5	1,4	8,2	7,7
10	11,5	0,88	2,9	0,4	5,0	3,3
11	20,1	2,50	3,7	0,8	6,8	4,7
12	16,1	1,46	3,8	0,7	4,8	2
13	12,6	1,99	2,1	0,6	6,8	5
14	16,9	2,75	3,1	0,7	6,9	4,7
15	25,2	4,36	3,8	1,0	8,5	7
16	14,5	2,89	2,0	0,6	7,8	8,7
17	21,5	5,11	2,3	1,0	10,0	7,3
18	23,8	6,11	2,9	1,3	9,3	7,7

A Tabela 4.3 apresenta os resultados referentes às características econômicas dos ensaios, representados pela taxa de fusão (TF) e de deposição (TD) e índice de respingos (IR), e índices geométricos derivativos, representados pela diluição (D), índice de convexidade (IC) e índice de penetração (IP), determinados a partir dos resultados obtidos das Tabelas 4.1 e 4.2, conforme procedimento descrito no Capítulo 3.

Tabela 4.3 – Resultados das características econômicas e geométricas do cordão.

EXP.	TD (kg/h)	TF (kg/h)	IR (%)	D (%)	IC (%)	IP (%)
01	1,5	1,85	19,1	18,7	68,6	23,0
02	1,92	2,2	12,5	13,5	68,8	26,0
03	2,09	2,33	10,1	16,8	58,8	18,3
04	1,45	1,72	15,6	16,7	44,4	19,2
05	2,61	2,96	11,7	11,0	46,9	22,5
06	1,96	2,4	18,5	23,1	57,8	37,5
07	1,55	1,74	11,2	27,1	24,4	35,2
08	1,73	2,19	20,8	33,5	25,7	35,0
09	2,07	2,4	14,1	22,3	43,0	45,8
10	1,46	1,72	15,3	7,6	56,8	13,3
11	1,95	2,23	12,2	12,5	53,6	25,4
12	1,88	2,35	20,3	9,1	78,6	23,8
13	1,26	1,74	27,5	15,9	30,7	18,8
14	1,91	2,15	11,2	16,2	44,6	23,3
15	2,19	2,41	9,3	17,3	44,6	32,1
16	1,57	1,77	11,5	20,0	25,7	20,4
17	1,74	2,2	20,9	23,8	23,4	32,8
18	2,08	2,39	12,8	25,7	31,0	41,7

Na Tabela 4.4 se encontram os resultados referentes às características operacionais dos ensaios finais, gerados a partir das análises dos oscilogramas de tensão e de corrente, e processados pelo programa computacional MIGMAG. Os desvios padrão do tempo de curto circuito (σ_{tcc}), do período de transferência (σ_T); o percentual relativo do tempo total de curto-circuito ($T_{cc} \%$), o desvio relativo da corrente de pico ($\sigma_{I_p} \%$) e as taxas de variação da corrente de subida (di/dt_s) e de descida (di/dt_d) são apresentados nesta tabela.

Tabela 4.4 – Resultados referentes às características operacionais dos ensaios.

EXP. Nº	$\sigma_{tcc}(\text{ms})$	$\sigma_T(\text{ms})$	Tcc(%)	$\sigma_{rIp}(\%)$	di/dts(A/ms)	di/dtd(A/ms)
01	3,5	11,4	19,08	15	74	75
02	4,1	16,5	22,75	11	23	38
03	9,4	21,6	18,13	15	17	16
04	2,5	32	12,38	17	43	35
05	4,7	17,7	14,13	13	24	12
06	2,4	10	22,78	9	69	64
07	2,8	48,3	3,08	53	26	11
08	1,6	18,3	5,43	33	92	47
09	2,8	24,3	12,68	25	43	32
10	2,9	21,9	12,9	21	34	27
11	10,1	25,5	21,88	12	20	13
12	2,8	20,8	14,08	10	47	87
13	1,1	42	3,6	36	85	47
14	4,1	31,4	12,1	12	41	51
15	3,5	22	13,0	12	22	14
16	2,3	103,4	2,45	70	24	7
17	1	52	1,73	31	79	33
18	2,9	23,1	7,1	33	44	18

4.2 ANÁLISE DE VARIÂNCIA DAS RESPOSTAS DOS ENSAIOS

As respostas foram submetidas à análise de variância, de modo que se pudesse avaliar os efeitos dos fatores de controle sobre as respostas. O critério de análise adotado foi que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma determinada resposta (ou mais), quando o **valor p** obtido for inferior a 5%, isto é, com uma confiabilidade estatística de 95%. A Tabela 4.5 mostra os valores do **valor p** para as respostas referentes ao comportamento do arco e à transferência metálica; a Tabela 4.6 mostra os valores do **valor p** para o perfil do

cordão e às características econômicas. Os números destacados nas tabelas indicam que os valores médios das respostas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle com 95% de confiabilidade.

Tabela 4.5 – ANOVA para comportamento do arco e transferência da gota.

FATOR DE CONTROLE	VALOR P					
	di/dts(A/ms)	di/dtd(A/ms)	σrI_p %	σt_{cc} %	σT %	Tcc%
GAS	0,697	0,042	0,119	0,621	0,098	0,027
TENSÃO(V)	0,049	0,019	0,000	0,017	0,096	0,002
Va (m/min)	0,353	0,251	0,002	0,148	0,135	0,062
Vs(cm/min)	0,543	0,889	0,240	0,568	0,761	0,439
DBCP(mm)	0,590	0,158	0,253	0,255	0,593	0,214
INDUTANCIA	0,000	0,000	0,361	0,015	0,311	0,558

Da Tabela 4.5, nota-se que no tocante a estabilidade do arco e comportamento da transferência da gota, as variáveis, distância bico contato peça (DBCP) e velocidade de soldagem não tiveram nenhuma influência significativa nas respostas; já o tipo de gás influenciou significativamente na taxa de variação da corrente de descida e no tempo total de curto-circuito e a alimentação do arame apenas na regularidade da corrente de curto através do desvio relativo da corrente de pico de curto-circuito. Percebe-se ainda que a tensão e a indutância foram os fatores de controle que mais influenciaram nas respostas. De uma forma geral a resposta do desvio padrão do período não sofreu influência significativa dos fatores de controle estudados.

Com relação às características geométricas e econômicas do cordão, observa-se da Tabela 4.6 que a tensão sucedida pela velocidade de alimentação (Va) do arame eletrodo são os fatores de controle que mais influenciaram nas respostas analisadas. O gás, a velocidade de soldagem (Vs) e a distância bico contato peça (DBCP), ao contrário, não influenciaram significativamente nenhuma das respostas. Os respingos foram influenciados claramente pela indutância

Tabela 4.6 – ANOVA das características geométricas e econômicas do cordão.

FATOR DE CONTROLE	VALOR P						
	IC %	IP %	D %	TF(kg/h)	TD(kg/h)	IR%	QC
GAS	0,194	0,134	0,068	0,366	0,339	0,414	0,811
TENSÃO(V)	0,001	0,004	0,003	0,546	0,591	0,827	0,009
Va (m/min)	0,128	0,009	0,814	0,003	0,004	0,157	0,752
Vs(cm/min)	0,919	0,185	0,535	0,518	0,684	0,499	0,163
DBCP(mm)	0,599	0,108	0,207	0,578	0,767	0,179	0,634
INDUTANCIA	0,439	0,481	0,245	0,463	0,075	0,000	0,712

4.3 ANÁLISE DAS RESPOSTAS QUANTO À ESTABILIDADE DO ARCO

De uma forma geral, a estabilidade do arco deve atender a dois requisitos: transferência de metal e transferência de carga elétrica, fácil e uniforme. A transferência de carga elétrica está ligada ao comportamento do arco: arcos macios com pequenas variações no seu comprimento, com tempos de curtos-circuitos regulares (curtos ocorrendo com o mesmo tempo de duração) e com períodos de transferência das gotas para a poça de fusão, também simétricos, caracterizando a uniformidade da deposição de material, sem respingos e consequentemente com maior regularidade do processo. Como ilustração, a Figura 4.1, compara os oscilogramas de tensão obtidos dos experimentos 12 e 15 (ensaio final), onde o primeiro apresenta um comportamento instável do arco, Figura 4.1 (a) no qual tanto o período de transferência como o tempo de curto-circuito, são irregulares; com valores diferentes do tempo de curto-circuito (tcc) e do período (T) os desvios tanto do tempo como do período de curto-circuito são grandes, indicando instabilidade. O segundo, Figura 4.1 (b), apresenta um comportamento mais regular. Os valores do tcc e do T são mais regulares e os desvios são pequenos indicando maior estabilidade

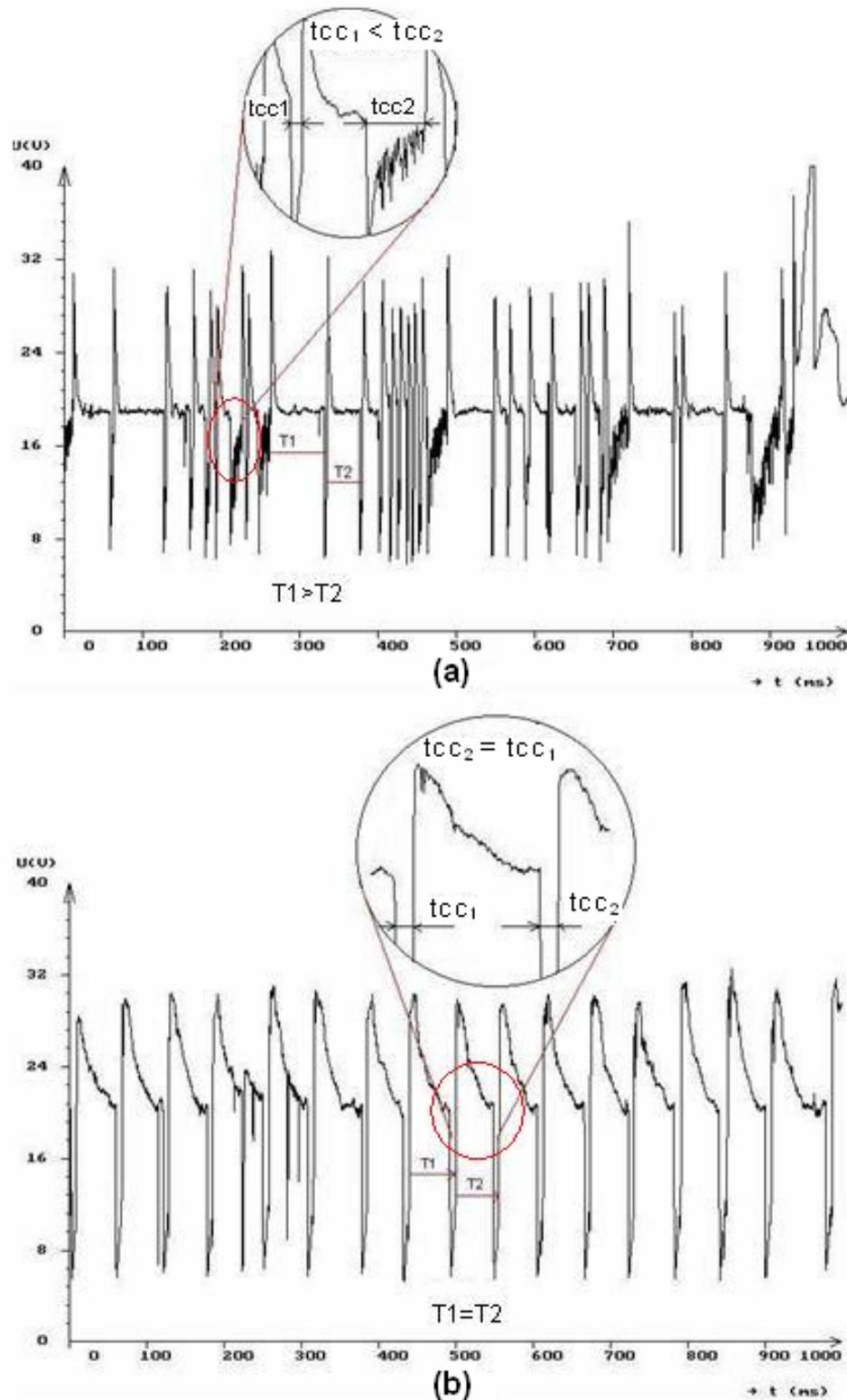


Figura 4.1 – Oscilogramas de tensão típicos: (a) pequena regularidade (19V, IND2);
(b) boa regularidade (21V, IND 9).

A corrente de pico no curto circuito também interfere na estabilidade do arco; a gota pode transferir de uma forma muito brusca, se a corrente subir em uma taxa muito elevada num dado intervalo de tempo, gerando formação excessiva de respingos, instabilidade do

arco, e aumento do custo de soldagem. Miranda (1999) cita que a taxa de variação da corrente deve ser alta o bastante para causar a transferência da gota, e baixa o bastante para minimizar os respingos. A Figura 4.2 mostra os oscilogramas da corrente de curto e identifica as taxas de variação da corrente, oriundas de uma alteração no nível de indutância utilizado.

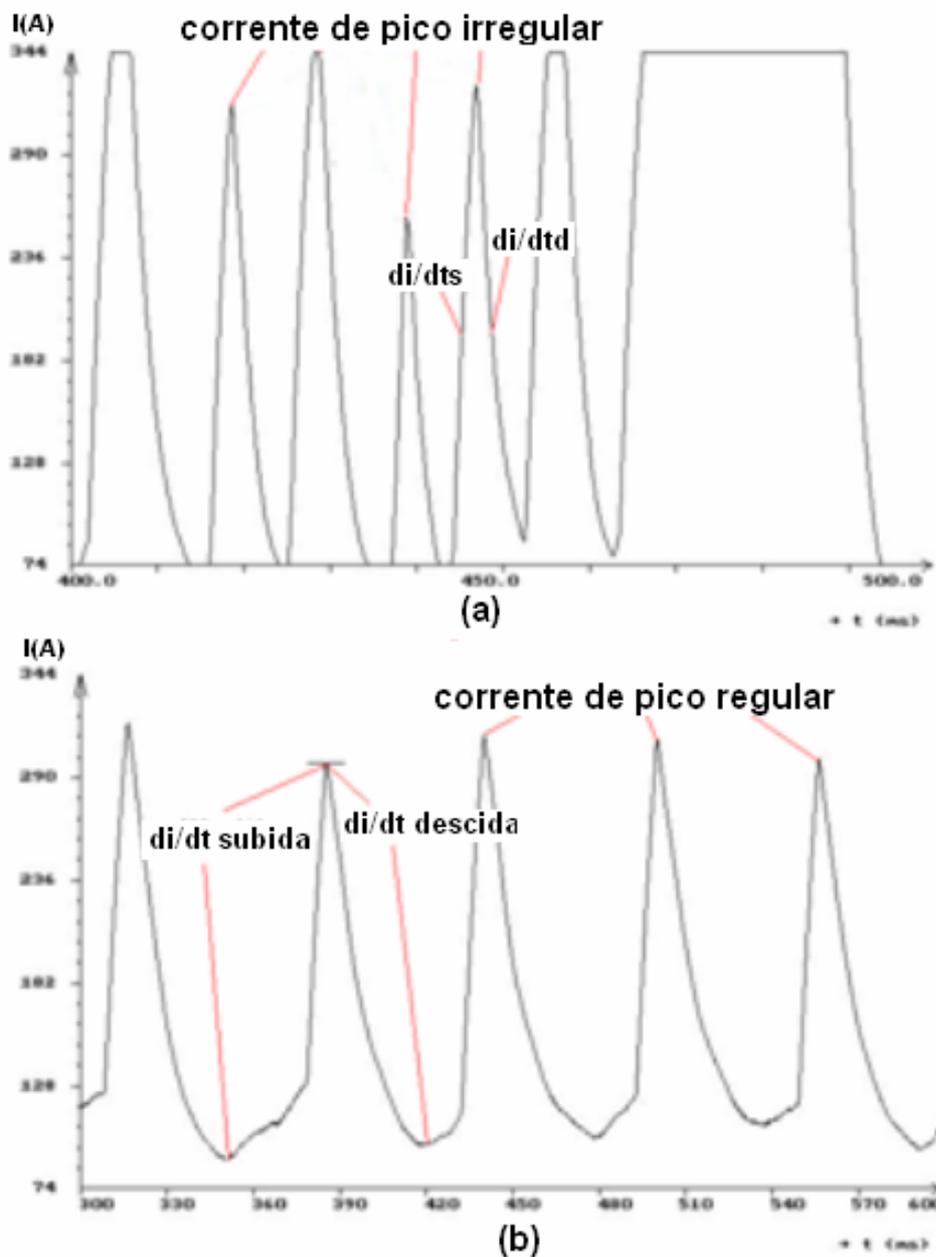


Figura 4.2 - Oscilogramas da corrente de curto circuito típicos: (a) baixa indutância e (b) alta indutância.

Percebe-se da Figura 4.2(a), nível de regulagem da indutância baixo, uma subida brusca da corrente resultando em uma alta taxa de variação de subida e descida da corrente e na Figura 4.2(b), nível de regulagem da indutância alto, uma subida da corrente mais suave resultando em uma menor taxa de variação da corrente de subida e descida.

Para melhorar as condições de transferências metálicas durante o curto-circuito, e, conseqüentemente favorecer a estabilidade do arco, alguns princípios foram estabelecidos como diretrizes para análise, os quais são indicados na Tabela 4.7. Estas condições estabelecidas permitem obter o melhor ajuste das respostas com menos variabilidade, maximizando a função objetivo, que é a razão sinal/ ruído (S/R) empregada no método Taguchi.

Tabela 4.7 - Condições estabelecidas para ocorrência de transferência metálica.

RESPOSTAS		CONDIÇÃO DESEJÁVEL	CONSEQÜÊNCIA
σ_{tcc} (ms)	Desvio padrão do tempo de curto-circuito	Menor é melhor	Permite uma melhor estabilidade na ocorrência de curtos-circuitos
σ_T (ms)	Desvio padrão do período do curto-circuito	Menor é melhor	Melhor estabilidade nas transferências
T_{cc} (%)	Tempo total do curto porcentual	Maior é melhor	Quanto maior melhor o rendimento da soldagem
σ_{rIp} (%)	Desvio relativo da corrente de pico de curto-circuito	Menor é melhor	Obter maior regularidade na ocorrência de curto-circuito
di/dts (A/ms)	Taxa de variação da corrente na subida para o curto-circuito.	Menor é melhor	Quanto mais suave for a subida da corrente de curto-circuito menos respingos ocorrerá.
di/dtd (A/ms)	Taxa de variação da corrente na descida para o curto-circuito.	Menor é melhor	Quanto mais suave for a descida da corrente de curto-circuito menos respingos ocorrerá.

4.3.1 Influência da Indutância

A indutância é uma variável que tem um efeito significativo no modo de transferência por curto-circuito influenciando, dentre outras respostas, na formação de respingos durante a execução da soldagem. O aumento da indutância alterando a dinâmica da fonte reflete na taxa de variação da corrente de pico, pois quanto maior a indutância (de subida e/ou de descida) menor será a taxa de crescimento da corrente, mais suavemente a corrente de curto subirá ou descenderá, contribuindo para a diminuição da formação dos respingos. Das Tabelas 4.5 e 4.6 verificou-se com 95% de confiabilidade que a indutância influenciou significativamente nas taxas de subida e descida da corrente e no índice de respingos (**valor p** < 0,05); comprovados

pelas Figuras 4.3 (a), 4.3 (b) e 4.4. Percebe-se destes resultados que a indutância no seu nível mais alto (neste trabalho igual a 9) diminuiu as taxas de variação da corrente de curto circuito tanto na subida quanto na descida. Em consequência disto houve uma significativa queda na taxa de formação de respingos conforme notado na Figura 4.3. Da mesma figura foi observado ainda que nenhum, dos outros fatores, influenciou significativamente na formação dos respingos, ressaltando a importância da indutância no controle desta resposta.

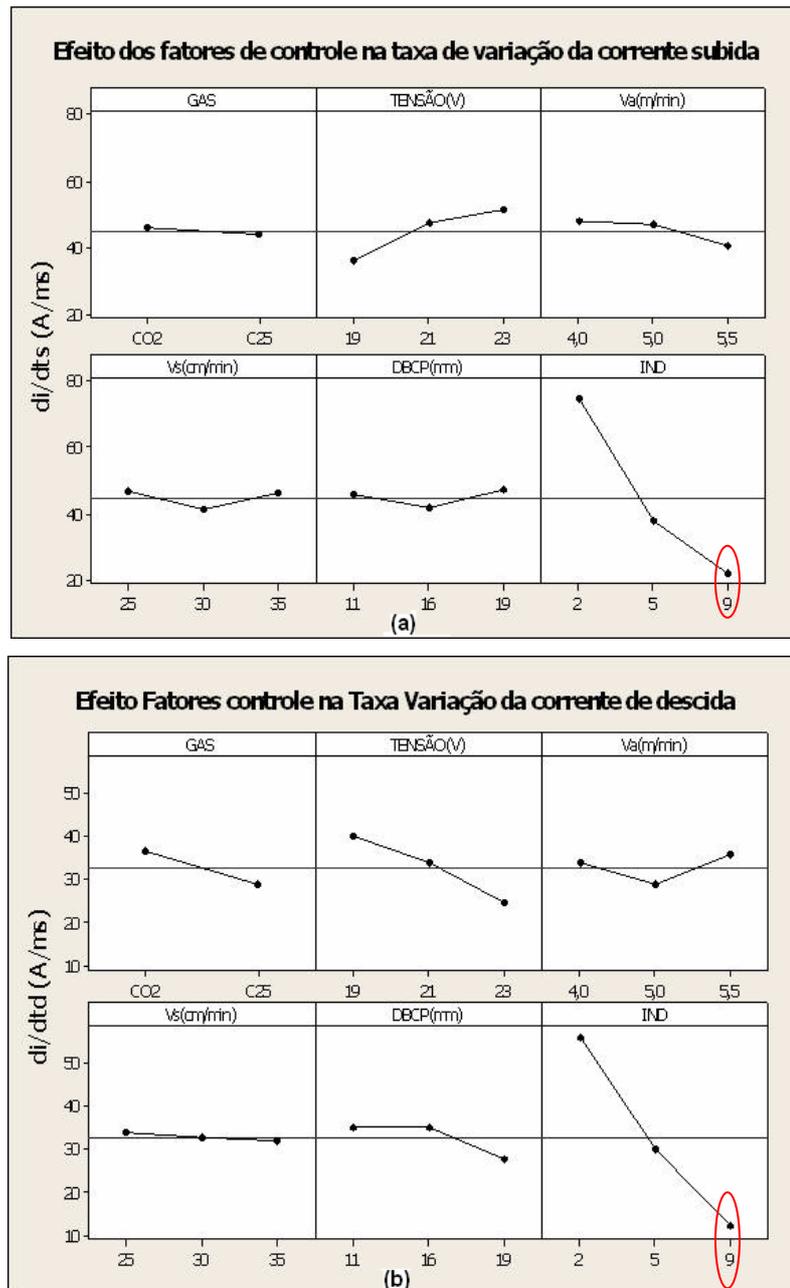


Figura 4.3 – Efeitos dos fatores nas taxas de variação da corrente: (a) di/dts e (b) di/dtd.

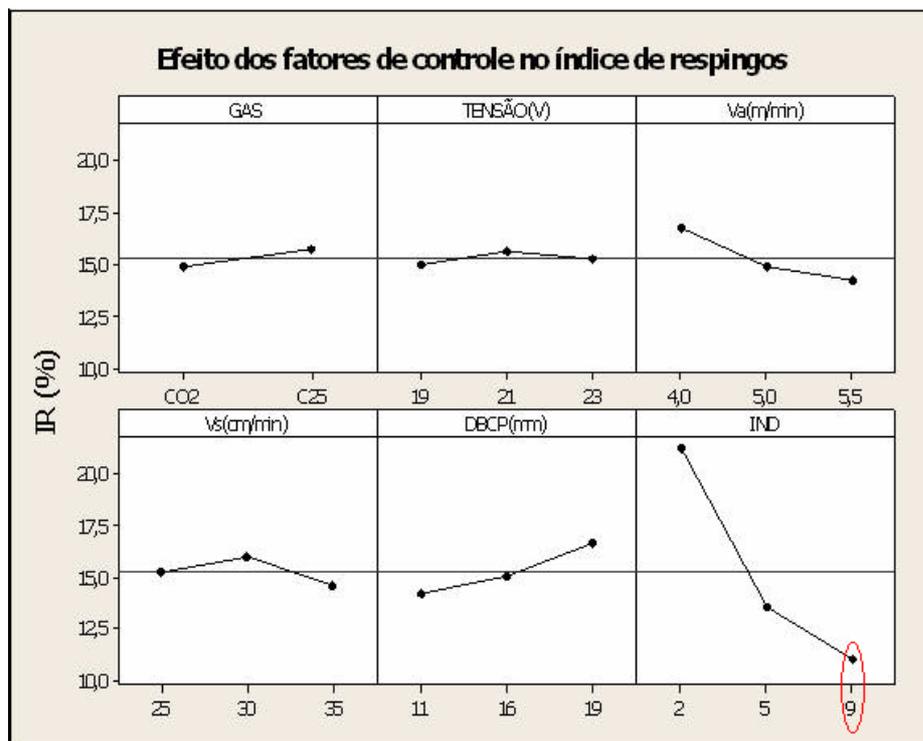


Figura 4.4 – Efeitos dos fatores de controle no índice de respingos IR%.

Para caracterizar a influência ou não da indutância na estabilidade do arco, o critério definido baseou-se na uniformidade da transferência das gotas fundidas do arame para a poça de fusão. Assim quanto maior a regularidade de duração do tempo de curto-circuito e do período de transferência da gota para poça de fusão, mais uniforme será a deposição de material da solda para o metal base e, conseqüentemente, mais ajustado será o processo (Dutra e Baixo, 1990).

A regularidade dos parâmetros selecionados para este trabalho foi quantificada pelos desvios padrão dos índices medidos. Este elemento foi selecionado por representar a dispersão dos parâmetros tempo de duração do curto-circuito (t_{cc}) e do período de transferência (T), índices estes justificados por Dutra e Baixo (1990), como adequados para esta avaliação.

O desvio padrão do tempo de curto circuito (σ_{tcc}), foi afetado pela indutância com 95% de confiança, como mostra a Tabela 4.5. Analisando o efeito da indutância neste índice, percebe-se pela Figura 4.5 que a melhor condição de estabilidade foi obtida para o nível mínimo de indutância. Parece que este comportamento se assemelha com o que Dutra verificou em seu estudo da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG onde afirmou que o aumento da indutância não gerou melhoria na estabilidade do arco (regularidade de transferência metálica). O mesmo autor observou ainda que, com a redução na taxa de crescimento da corrente, o processo tornou-se mais passível ao surgimento de

curtos circuitos de pequena durabilidade levando o desvio do período de curto-circuito a apresentar crescimento da ordem de 50 a 100%. Miranda (1999) também encontrou alguns oscilogramas com comportamentos semelhantes ao efeito proposto por Dutra, sobre o aumento dos curtos-circuitos aleatórios pelo acréscimo da indutância, no entanto, em seu trabalho, onde analisou a influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobre-cabeça, não foi possível observar este fato como predominante sobre o aumento dos curtos-circuitos aleatórios.

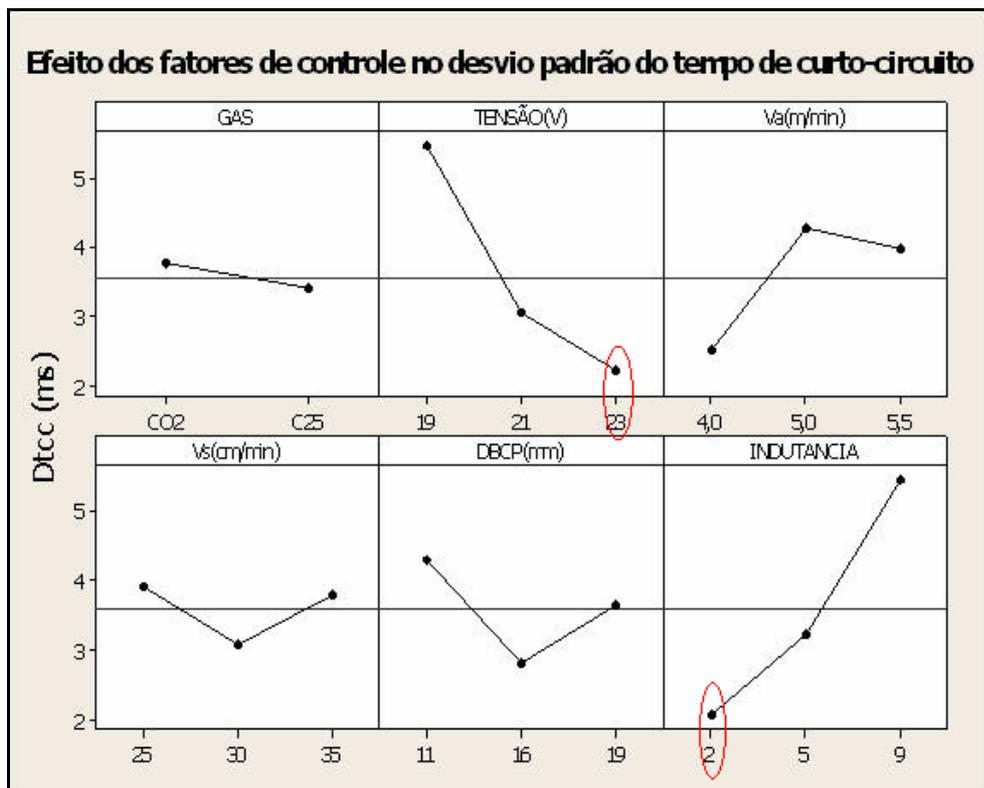
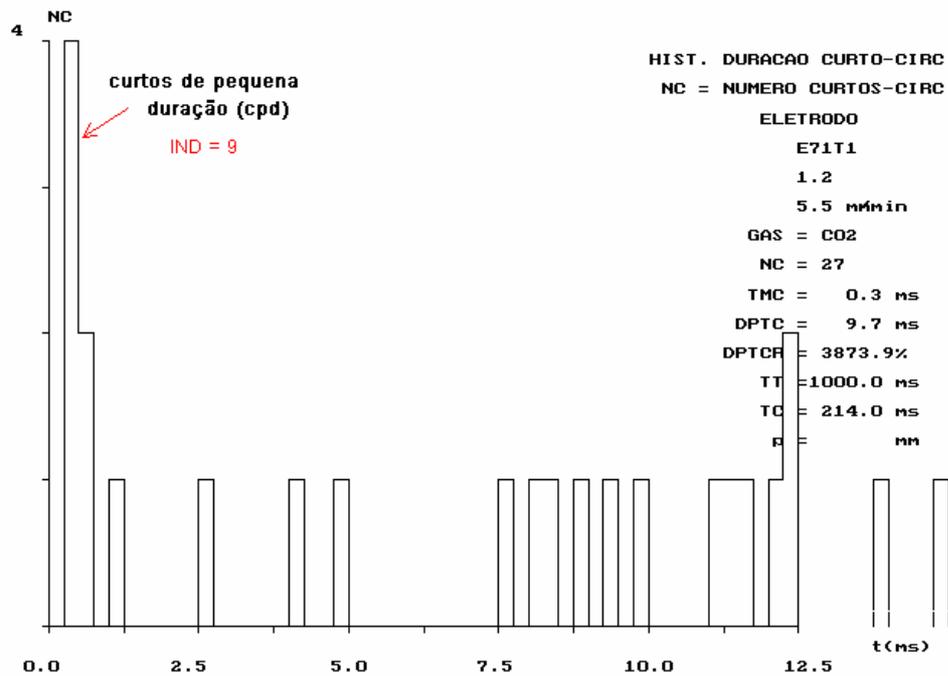


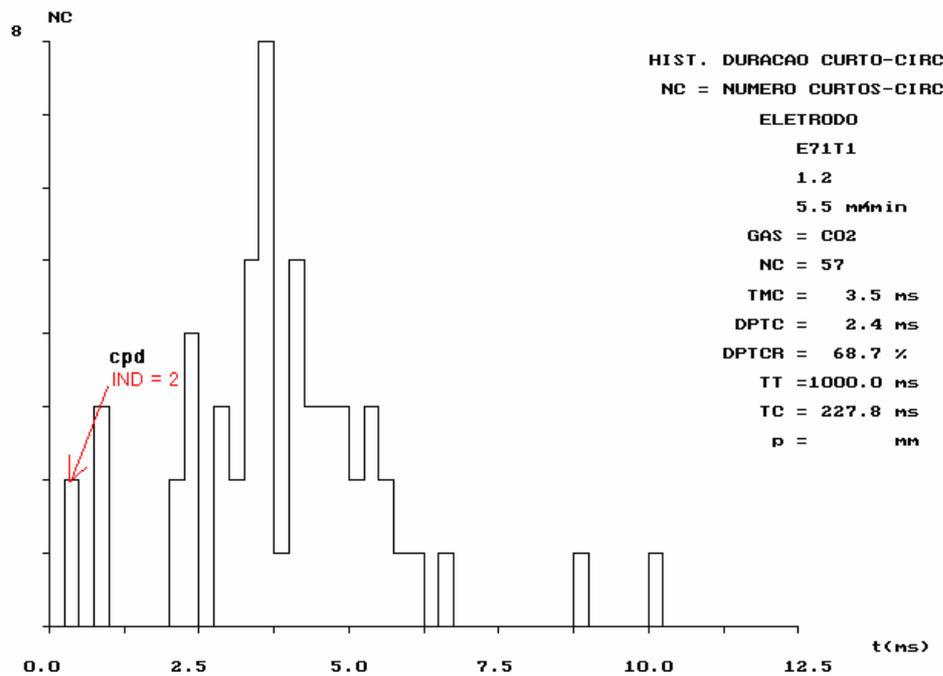
Figura 4.5 – Efeitos dos fatores de controle no desvio padrão do tempo de curto-circuito.

Assim, baseados nos resultados parece que com a utilização de alta indutância houve diminuição de ocorrência de respingos, e aumento dos curtos de pequena duração, resultando na queda da regularidade de ocorrência de curtos-circuitos.

Para verificar o aumento dos curtos-circuitos aleatórios, com a indutância no nível máximo, no processo eletrodo tubular, e explicar por que o desvio do tempo de curto aumentou com a indutância no nível máximo, foram analisados os histogramas das Figuras 4.6 e 4.7.



(a)

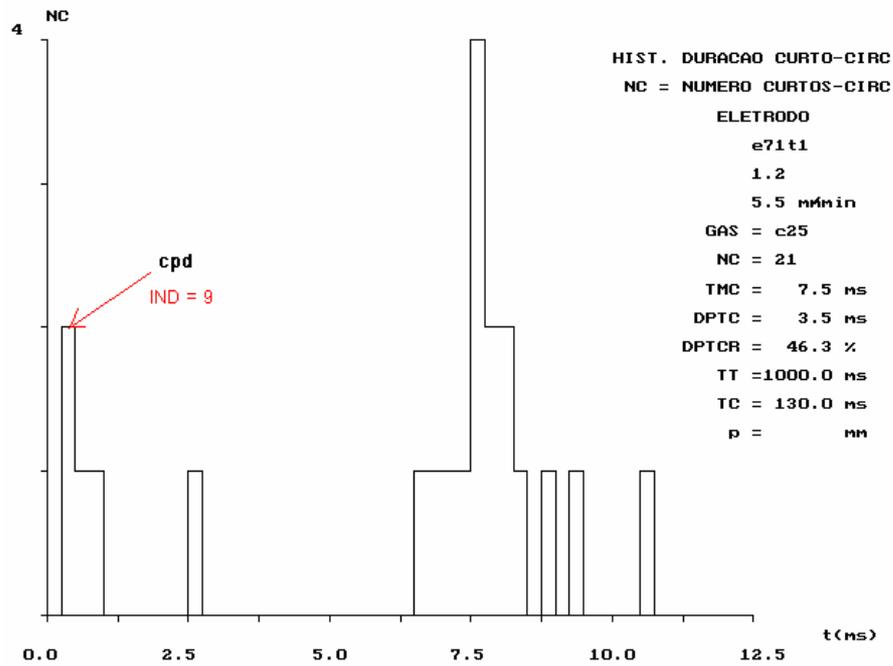


(b)

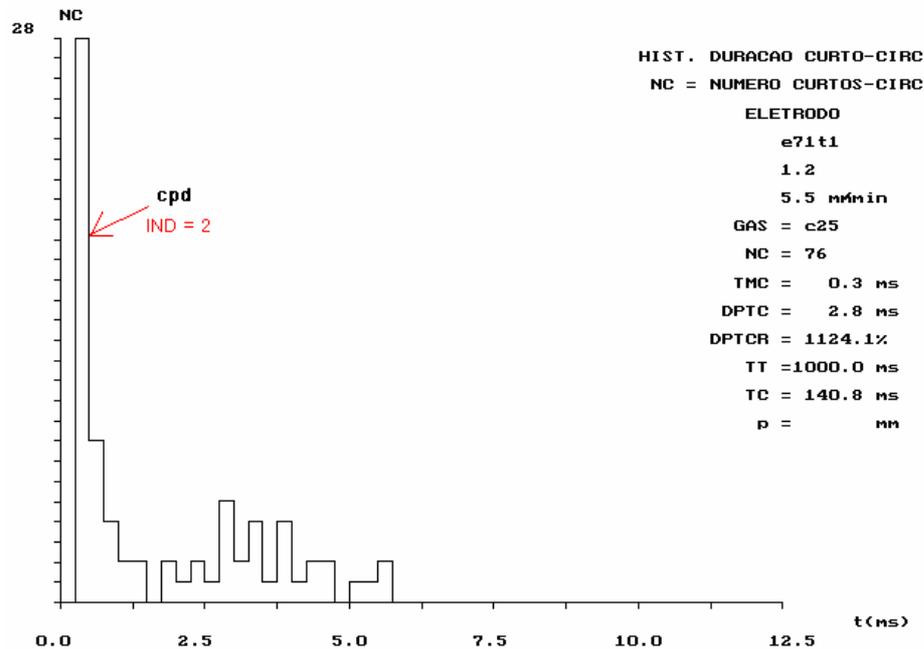
Figura 4.6 – Histogramas do tempo de curto-circuito com proteção gasosa CO₂ :
(a) Indutância 9, 19V e (b) Indutância 2, 21V.

A Figura 4.6 (a) mostra o histograma do experimento nº 03, com proteção gasosa CO₂ e indutância no nível máximo 9, onde parece que ocorreu um aumento na incidência dos curtos de pequena duração diminuindo a estabilidade do processo e consequentemente aumentando a dispersão do tempo de duração dos curtos, quando comparado com o

histograma da Figura 4.6 (b) que é do experimento nº 06, com proteção gasosa CO₂ e indutância no nível mínimo 2.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Histogramas do tempo de curto-circuito com proteção gasosa C25 :
(a) Indutância 9, 21V e (b) Indutância 2, 19V.

A Figura 4.7 mostra os histogramas dos experimentos com atmosfera protetora de mistura gasosa C25 com regulagens de indutância nos níveis máximo (experimento nº 15) e

mínimo (experimento de nº 12). Nota-se que neste caso a alta indutância, além de indicar tendência de diminuição da taxa de respingos, parece favorecer a estabilidade do arco devido à redução de ocorrência dos curtos de pequena duração conforme observado na Figura 4.7 (a), fato este contrário ao observado com a atmosfera protetora de CO₂. Estes resultados parecem indicar que no processo FCAW, o tipo de proteção gasosa exige diferentes tipos de regulagem da indutância para se conseguir melhor regularidade na ocorrência dos curtos-circuitos.

Além de sua influência isolada, percebeu-se dos resultados que a interação da indutância com a tensão de soldagem no desvio do tempo de curto foi altamente significativa (**valor p** = 0,001) sendo esta interação mais significativa que os seus efeitos isolados. A Figura 4.8 mostra os efeitos desta interação onde se percebe um efeito nítido de aumento da regularidade de ocorrência de curtos-circuitos para valores limites de tensão de 23 V, independente do nível de indutância utilizado. Por outro lado, nota-se que a diminuição do nível de indutância permite uma melhor regularidade do tempo de curto-circuito, porém como visto anteriormente aumentará a taxa de formação de respingos. Um resultado interessante foi o observado para o nível mínimo de tensão (19V) e indutância no nível médio (5) cuja estabilidade melhorou sensivelmente, inclusive com aproximadamente os mesmos valores para o desvio do tempo de curto-circuito da indutância no nível 2 (tanto para o CO₂ como para o C25). Isto sugere que a utilização de níveis de indutância intermediários permite obter bons resultados independentemente do nível de tensão utilizado, já que os desvios foram muito próximos.

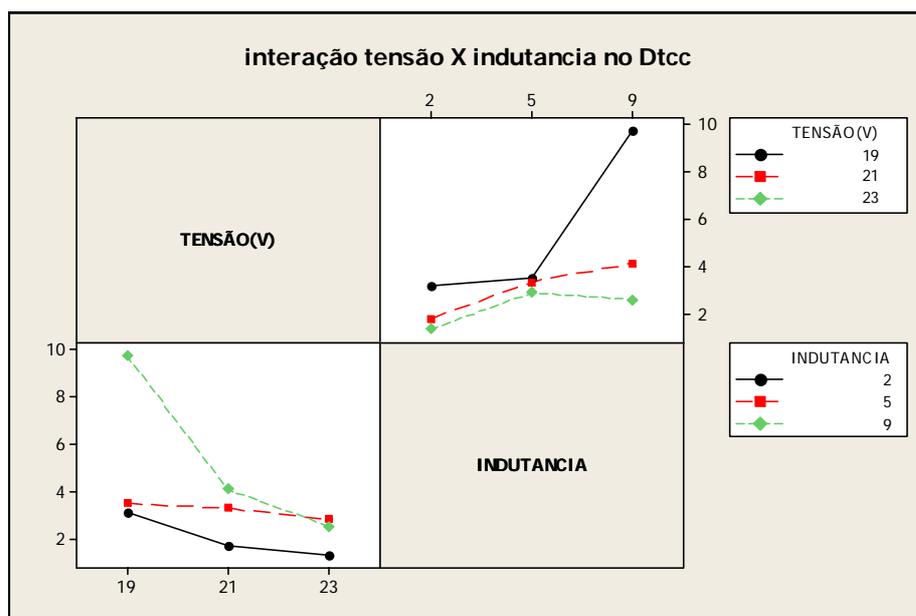


Figura 4.8 – Efeito da interação tensão e indutância no desvio do tempo de curto-circuito.

4.3.2 Influência da Tensão

Como mostrado na Tabela 4.5 a tensão influenciou significativamente no desvio relativo do pico da corrente de curto-circuito, no tempo total de curto circuito, no desvio do tempo de curto-circuito, na taxa de variação da corrente de subida e de descida, nesta ordem.

Com a elevação da tensão média de soldagem, há um deslocamento maior da altura que o eletrodo inicia seu período de arco, permitindo que as gotas que formam na ponta do eletrodo cresçam de forma acentuada resultando em maiores correntes de curto-circuito, que por sua vez, prejudica a regularidade da corrente de pico como mostra a Figura 4.9. Nota-se que no maior nível da tensão ocorreu o maior desvio relativo da corrente de pico. Já para a mesma condição observa-se que houve uma maior regularidade do tempo de curto circuito (Figura 4.5). Provavelmente a utilização de um maior nível de tensão como visto, Figura 4.3(a) provocou um pequeno aumento na taxa de variação da corrente de subida, suficiente para diminuir o tempo de duração do curto, resultando em um menor desvio padrão no tempo de curto, como mostrado na Figura 4.5, melhorando a estabilidade do arco.

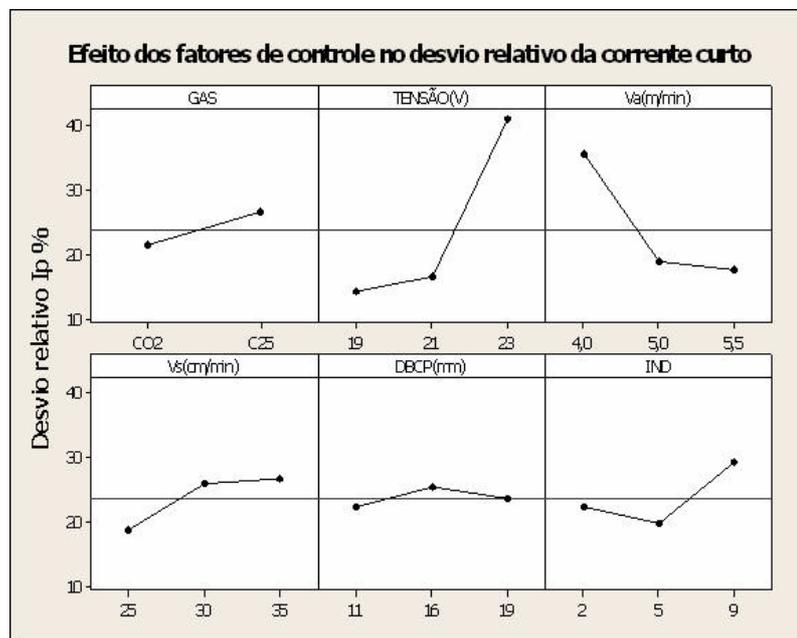
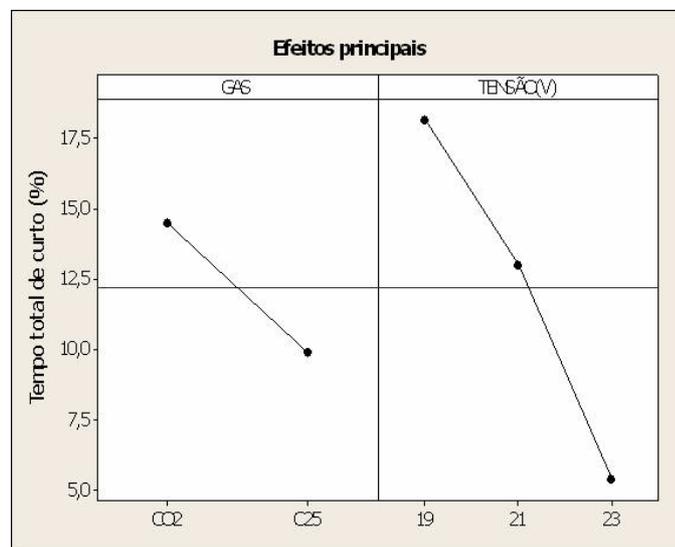


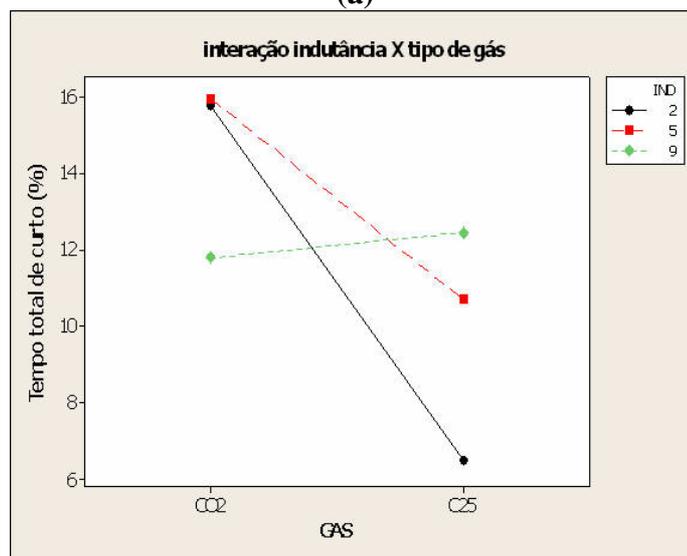
Figura 4.9 – Efeitos dos fatores de controle no desvio padrão relativo da corrente de pico.

A maximização da ocorrência de curtos-circuitos conduz a uma maior eficiência do processo. A Figura 4.10(a) apresenta os efeitos principais dos dois parâmetros significativos, ou seja, tipo de gás e tensão nesta resposta. Percebe-se que a maximização do tempo total de curto pode ser obtida com a utilização do gás CO₂ e tensão mínima de soldagem. De fato a

minimização da tensão facilita a ocorrência de curtos-circuitos. Por outro lado, percebeu-se das análises que a interação do tipo de gás com a indutância foi quase significativa no processo (**valor p** = 0,061). A Figura 4.10(b) apresenta os efeitos desta interação sobre o tempo total de curto-circuito. Nota-se que os resultados desta interação confirmam os efeitos principais, onde a maximização do tempo total de curto é obtida com o gás CO₂ com o ajuste da indutância no nível 2 ou 5. Obviamente que a indutância no nível 5 permite um aproveitamento melhor do processo em função da menor formação de respingos comparativamente ao nível mínimo de indutância. Por outro lado, a mesma interação sugere que caso a mistura C25 seja utilizada, o melhor ajuste da indutância para a maximização do tempo total de curto ocorre quando a mesma é regulada em seu nível máximo.



(a)



(b)

Figura 4.10 - Influência dos fatores no tempo total de curto circuito. (a) efeitos principais; (b) interação indutância e tipo de gás.

Resumindo, a tensão isoladamente influenciou significativamente no desvio padrão do tempo de curto, sendo que a tensão no seu nível máximo, aparentemente melhorou a regularidade do tempo de curto-circuito (Figura 4.8). Porém a interação da tensão com a indutância se mostrou mais significativa para esta resposta. De fato os resultados desta interação confirmaram a tendência de que a melhor regularidade é obtida para tensões maiores associadas com indutâncias baixas e a melhor proteção gasosa parece ser o CO₂ conforme mostra a Figura 4.10; para indutâncias altas com tensões maiores a opção de proteção gasosa passa a ser o C25 (também Figura 4.10), muito embora indutância média com tensão média (CO₂) e indutância média ou alta com tensão média (C25) forneça bons resultados.

4.3.3 Influência da Velocidade de Alimentação

A velocidade de alimentação do arame eletrodo como indicado na Tabela 4.5 apenas influenciou significativamente no desvio relativo da corrente de pico.

A utilização de velocidades de alimentação maiores faz com que o número de curtos circuitos se intensifique. Conseqüentemente se evita o crescimento excessivo da gota na ponta do eletrodo e, desta forma, é de se esperar que a variação da corrente de pico seja menor, conforme verificado e mostrado na Figura 4.9.

4.4 ANÁLISE DAS RESPOSTAS QUANTO À GEOMETRIA DO CORDÃO

Geralmente cordões geometricamente aceitos são aqueles que visualmente tem formato e aparência regulares, não apresentando defeitos superficiais como porosidades, falta ou excesso de material em determinado ponto do cordão de solda, etc. Também o perfil do cordão deve ser regular, não muito convexo e sem penetração, nem muito largo. A metodologia de avaliação do cordão de solda foi descrita no capítulo 3.

Os valores de **valor p** menores que 0,05 (Tabela 4.6), mostram que a tensão é o fator de controle que mais atua na qualidade do perfil do cordão, pois ela influencia os índices de convexidade (IC%) e de penetração (IP%), a diluição (D%) e a qualidade do cordão (QC);

seguida pela velocidade de alimentação do arame eletrodo que influencia também o índice de penetração (IP).

A tensão do arco, de acordo com Joaquim (2001) pode afetar a aparência, penetração e as propriedades do cordão de solda; o mesmo ocorre com a velocidade de alimentação que é diretamente proporcional à taxa de deposição e a penetração do processo.

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram o efeito de cada nível da tensão e da velocidade de alimentação empregados sobre o aspecto superficial do cordão de solda.

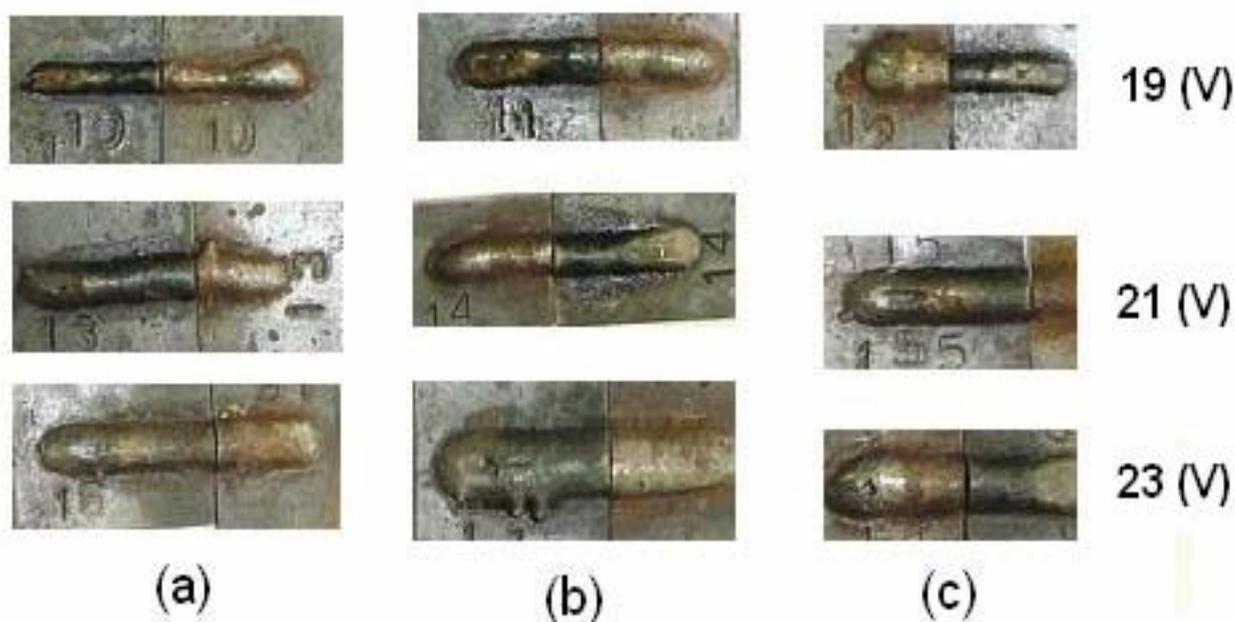


Figura 4.11 - Aspecto superficial do cordão de solda com proteção gasosa C25 para os três níveis de tensão (19V, 21V, 23V): (a) $v_a=4\text{m/min}$, (b) $v_a=5\text{m/min}$ e (c) $v_a=5,5\text{m/min}$.

A tensão no nível mais alto parece favorecer o aspecto superficial do cordão de solda, como mostrado pela Figura 4.13, onde o aumento da tensão aumentou significativamente as notas dadas para os cordões de solda. A melhora superficial na aparência geral e no formato mais regular do cordão (cordões mais largos com menos reforço e deposição mais linear) também pode ser sentida nas fotos tiradas de cada cordão das Figuras 4.11 e 4.12.

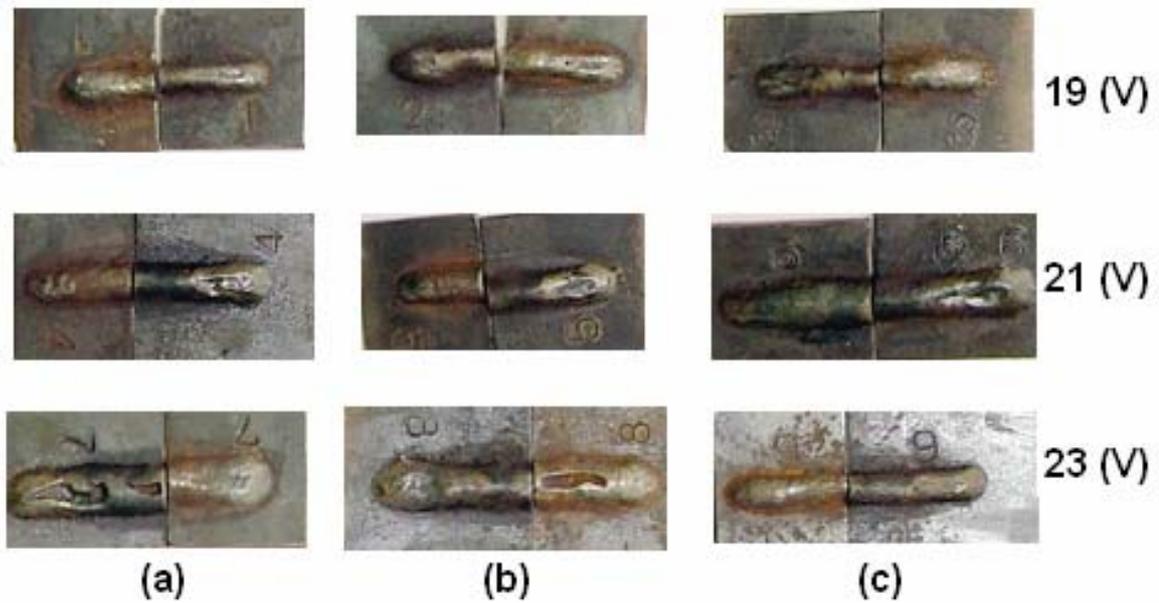


Figura 4.12 - Aspecto superficial do cordão de solda com proteção gasosa CO₂ para os três níveis de tensão (19V, 21V, 23V): (a) va=4m/min, (b) va=5m/min e (c) va=5,5m/min.

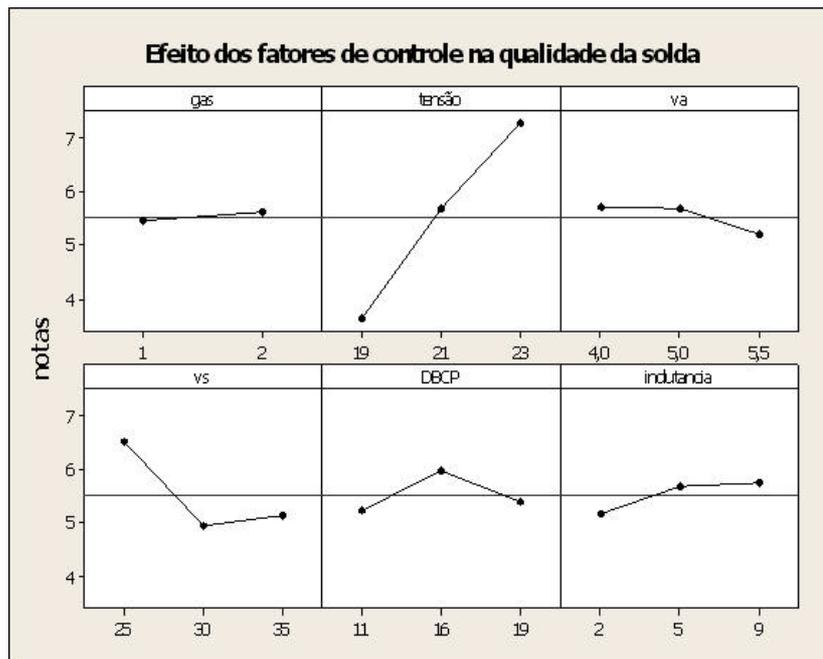


Figura 4.13 – Efeitos dos fatores de controle na qualidade do cordão.

A Figura 4.14 mostra os efeitos principais dos fatores na convexidade do cordão. Nota-se que a tensão foi o fator mais influente sendo que níveis maiores desta provoca uma redução na convexidade dos cordões. Tal resultado já era previsível, pois soldas com comprimentos de arco maiores tem a coluna de plasma mais ampla na sua extensão, e são, portanto mais largas e com menos reforço, confirmadas pelas Figuras 4.15 e 4.16.

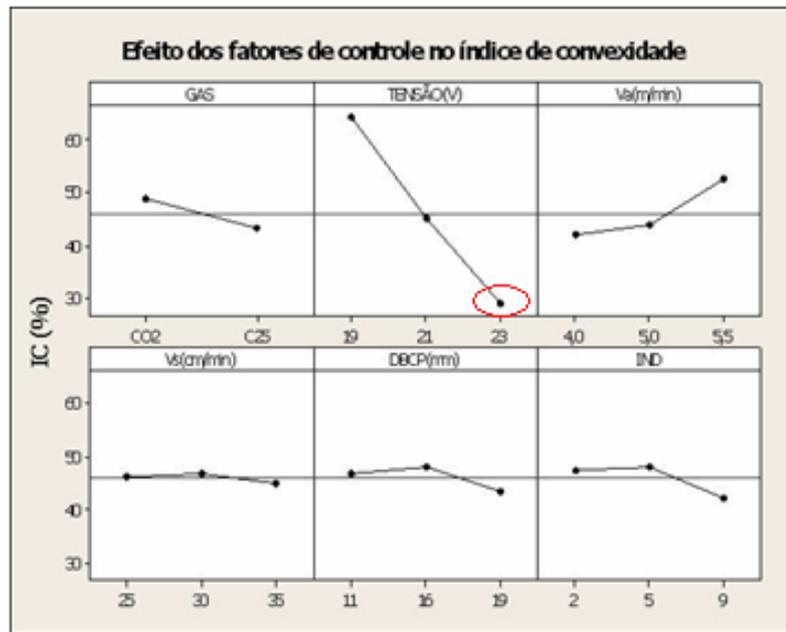


Figura 4.14 – Efeitos dos fatores de controle no índice de convexidade.



Figura 4.15 – Perfil do cordão de solda com proteção gasosa CO₂: (a) tensão 19V IND 2 e (b) tensão 23V, IND 9.



Figura 4.16 – Perfil do cordão de solda com proteção gasosa C25: (a) tensão 19V IND 2 e (b) tensão 23V, IND. 5.

O índice de penetração (IP%) e a diluição (D%) apresentam um comportamento muito parecido com relação aos efeitos dos fatores como mostrado na Figura 4.17. Nota-se que em ambas as respostas há uma maximização das respostas com a tensão no nível mais alto, melhorando a geometria do cordão. No caso da penetração da solda, a velocidade de

alimentação também foi muito significativa, sendo que o seu aumento provocou melhorias na resposta. De fato o aumento da velocidade de alimentação provoca o aumento da corrente de curto-circuito, conseqüentemente o aumento de tensão associado a uma maior corrente faz com que maior energia seja transferida para a peça aumentando a penetração do cordão.

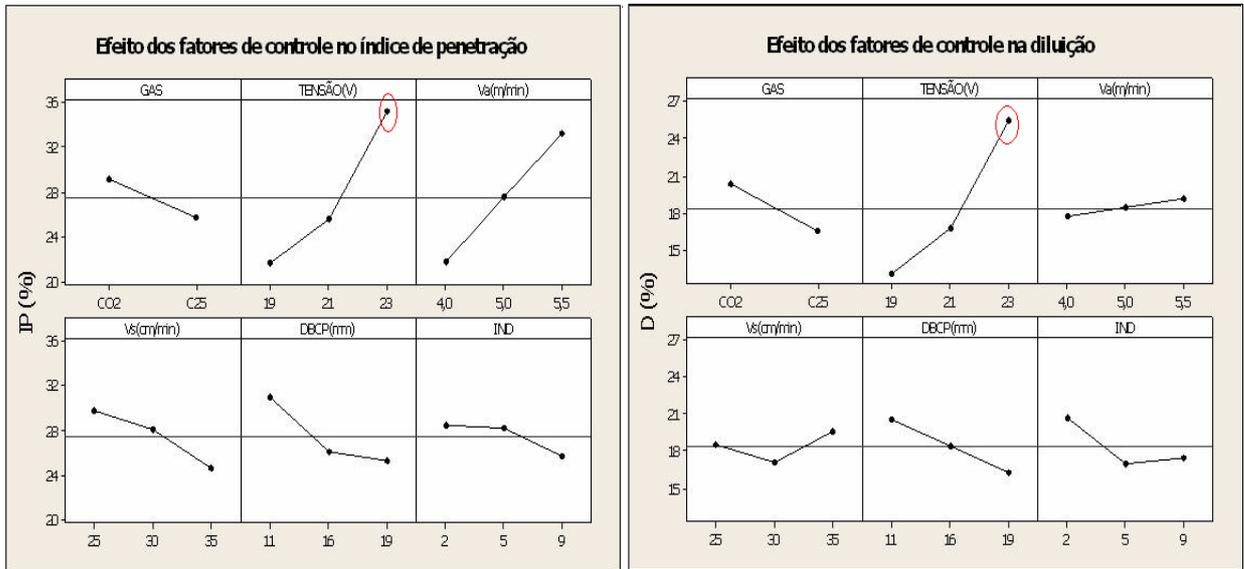


Figura 4.17 – Efeitos dos fatores de controle no índice de penetração e diluição.

4.5 ANÁLISE DAS RESPOSTAS QUANTO À CARACTERÍSTICA ECONÔMICA

Um melhor aproveitamento do processo com eletrodo tubular é de fundamental importância para a sua utilização industrial visto que os custos associados ao consumível são superiores aos dos arames sólidos. Desta forma as respostas associadas as taxas de fusão e de deposição e, conseqüentemente, ao rendimento do processo são importantes para um melhor ajuste do processo. Percebeu-se dos resultados que a velocidade de alimentação do arame foi o único parâmetro que influenciou significativamente nas taxas de fusão e de deposição, muito embora a indutância tenha se situado muito próximo do limite de significância para a taxa de deposição (**valor p** = 0,075). Nota-se que para a obtenção de uma maior taxa de deposição (ou de fusão) e assim melhorar o rendimento do processo, é necessário trabalhar com a velocidade de alimentação e a indutância nos níveis mais altos (5,5 m/min e 9) como

mostra a Figura 4.18. Entretanto vale ressaltar que o aumento da velocidade de 4 m/min para 5 m/min provocou um aumento muito significativo da taxa de deposição.

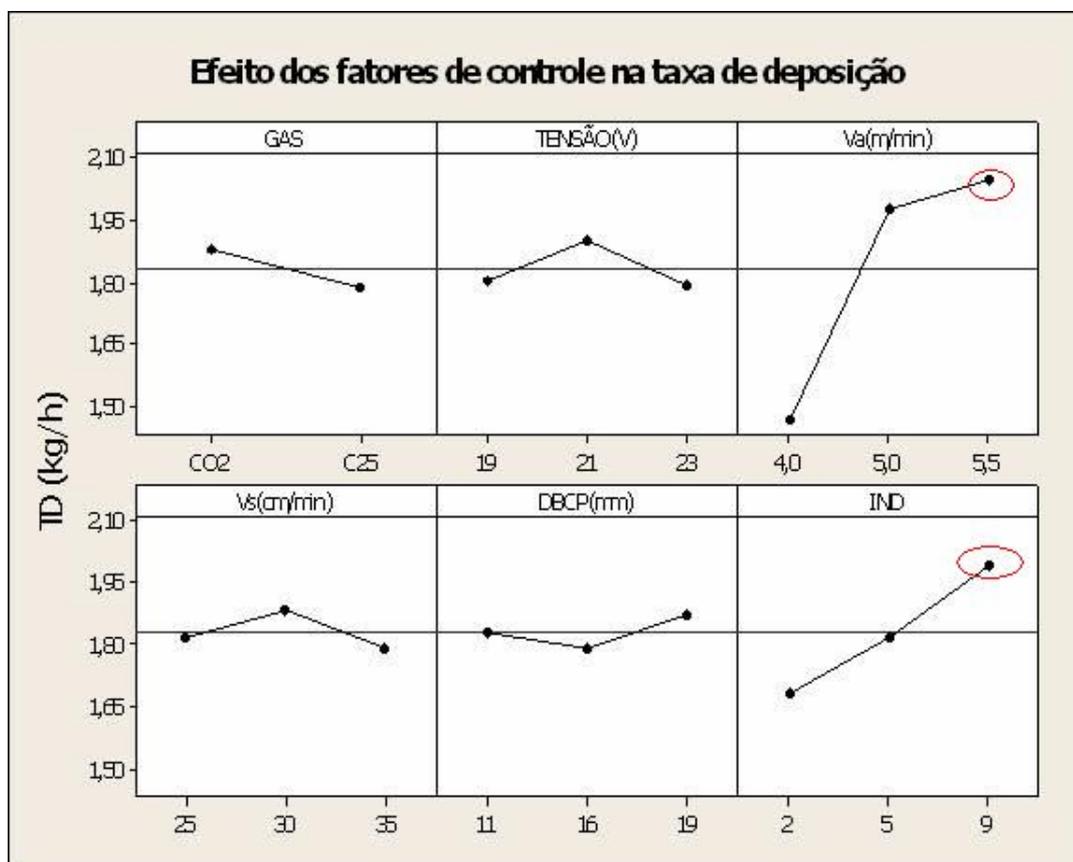


Figura 4.18 – Efeitos dos fatores de controle na taxa de deposição.

De forma geral a velocidade de alimentação influencia diretamente na quantidade de material depositado por unidade de tempo. Quanto maior a velocidade de alimentação, maior a taxa de deposição do arame eletrodo, maior a largura e a penetração do cordão de solda. Com o aumento da velocidade de alimentação, o desvio relativo da corrente de pico diminuiu, melhorando a regularidade de ocorrência do curto-circuito, aumentando assim a taxa de fusão e deposição. Nenhuma interação dos fatores de controle foi significativa na taxa de deposição; a Figura 4.19 mostra a alimentação do arame em função da deposição do mesmo, de onde provavelmente verificou-se que com o gás CO₂ (como gás de proteção), na alta indutância e no nível mais alto da velocidade de alimentação, a taxa de deposição diminuiu, parecendo ser melhor trabalhar com velocidade de alimentação média, quando a proteção gasosa for o CO₂. Para o gás C25, tanto a indutância como a alimentação no nível mais alto maximiza a deposição do arame eletrodo.

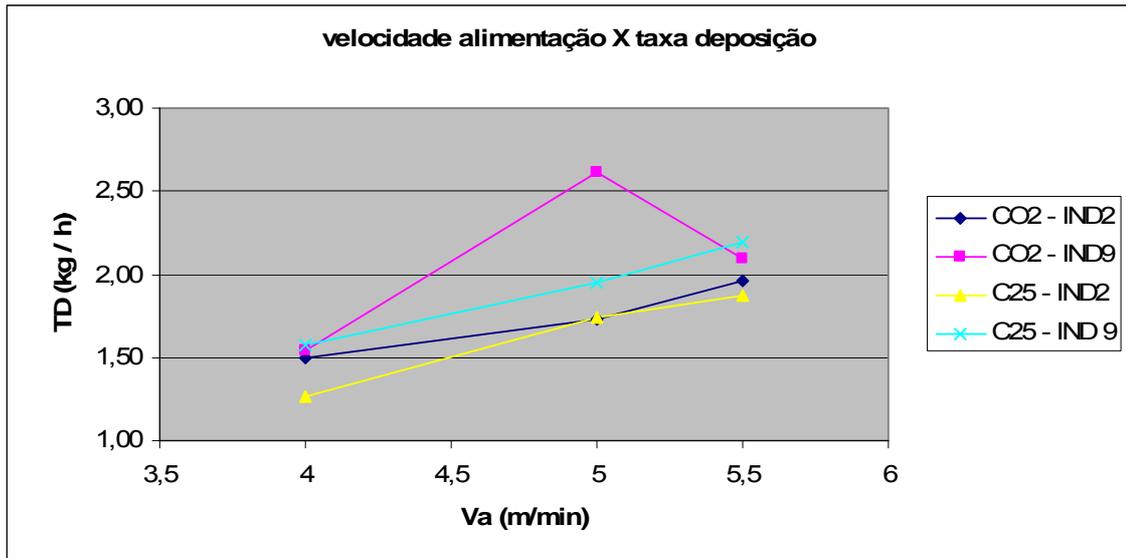


Figura 4.19 – Efeito da alimentação do arame em função da taxa deposição.

Resta testar o índice de respingos, que é controlado diretamente pela indutância e indica o rendimento real de deposição, através do gráfico da velocidade de alimentação em função do índice de respingos da Figura 4.20, já que não houve interação significativa destes dois fatores de controle no índice de respingos. Observa-se da Figura 4.20, que a velocidade de alimentação no seu nível mais alto e a indutância também, no nível mais alto, minimizou o índice de respingos para ambos os gases utilizados como gás de proteção (CO_2 e C25).

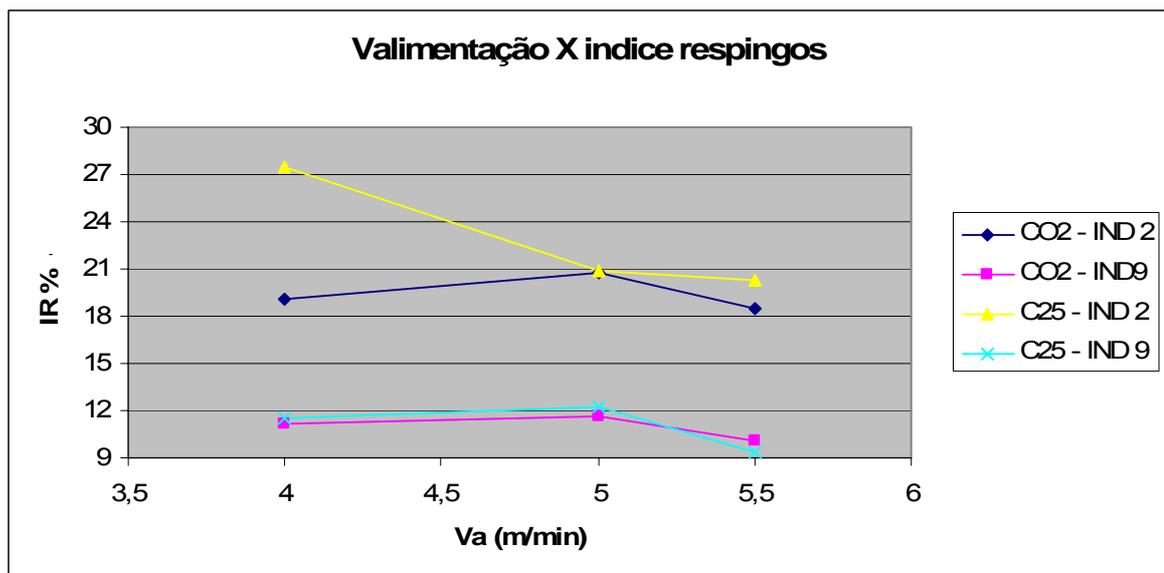


Figura 4.20 – Efeito da alimentação do arame em função da taxa de respingos.

4.6 COMENTÁRIOS FINAIS ASSOCIADOS ÀS ANÁLISES

Em função de todos os resultados e análises anteriormente descritas alguns aspectos importantes associados à utilização do processo com eletrodo tubular no modo de transferência por curto-circuito foram observados. Notou-se que o tipo de gás tem uma influência importante no processo e algumas premissas básicas foram estabelecidas. Para o gás CO₂ os resultados mostraram indícios de que é melhor trabalhar com baixos níveis de indutância (favorece a estabilidade, mas aumenta os respingos), pois a soldagem combinada (baixa indutância e alta tensão) provavelmente melhora a estabilidade do arco (diminui os curtos de pequena duração) e a qualidade do cordão, mas encarece o processo impondo mais ônus para retirada dos respingos do material de base e a maior perda do material depositado por respingos; a possível solução para diminuir as perdas seria trabalhar com o CO₂ com indutância no nível médio. O gás CO₂, com alta indutância e alta tensão diminui a estabilidade do arco e parece melhorar a qualidade do cordão; o gás C25 com alta indutância e maior tensão melhora a estabilidade do arco e a qualidade do cordão e é mais econômico (tanto o tipo de gás como a alta indutância diminui os respingos).

4.7 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONFIRMAÇÃO

Dos ensaios finais, através da análise de maximização da função sinal/ruído, foi possível determinar a influência percentual dos fatores de controle nas respostas, comparando o teste F (ferramenta estatística para inspeção dos fatores dominantes) com o F crítico (α é igual a 0,05). Como regra geral pode-se afirmar que a contribuição dos fatores específicos será dominante no processo eletrodo tubular se o teste F (F_{AO}) for igual ou maior que o índice $F_{0,05}$, que é o F crítico. A Tabela 4.8 apresenta os resultados da contribuição de cada fator onde os valores em negrito se referem a maximização da relação sinal/ruído ($F > F_{0,05}$), e indicam que os fatores com valores de F_{AO} maiores que o F crítico foram os que influenciaram com 95% de confiabilidade, nas respostas. Os valores em vermelho indicam a porcentagem de contribuição dos fatores mais influentes na resposta analisada.

Percebeu-se dos resultados que os fatores que mais influenciaram na maximização da taxa sinal/ruído, que é a função objetivo do método Taguchi e indica uma medida do

desempenho do processo, em que ($F_{A0} > F_{0,05}$) foram a tensão, velocidade de alimentação e indutância (maior porcentagem de contribuição).

Tabela 4.8 – Teste F, F crítico e porcentagem de contribuição para a taxa S/R.

PAR.	GAS		TENSÃO(V)		Va (m/min)		Vs(cm/min)		DBCP(mm)		IND.	
F0,05	5,99		5,19		5,19		5,19		5,19		5,19	
	F _{A0}	%	F _{A0}	%	F _{A0}	%	F _{A0}	%	F _{A0}	%	F _{A0}	%
TF (kg/h)	1,0	4	0,6	2	25,3	87	0,67	2	0,51	2	0,9	3
TD(kg/h)	1,2	4	0,3	1	21,7	77	0,21	1	0,12	0	4,5	16
IR%	0,2	0	0,0	0	2,5	5	0,5	1	1,62	3	43,8	90
D%	3,8	19	12,2	62	0,2	1	0,61	3	1,83	9	1,0	5
IP%	4,1	8	19,9	40	15,1	30	3,97	8	5,87	12	0,9	2
IC%	2,7	6	34,4	81	3,9	9	0,11	0	0,29	1	1,2	3
QC	0,0	0	11,1	73	0,9	6	2,79	18	0,08	1	0,4	3
di/dts(A/ms)	0,0	0	14,0	9	2,2	1	1,02	1	1,56	1	131,1	87
di/dtd(A/ms)	24,4	8	23,9	8	3,0	1	1,94	1	0,79	0	247,5	81
σ_{Ip} %	3,3	4	55,0	65	21,9	26	1,82	2	1,74	2	1,2	1
Tcc (%)	9,5	20	25,7	54	6,6	14	0,7	1	1,76	4	3,1	7
σ_{tcc} (ms)	4,0	5	25,5	35	6,4	9	0,6	1	5,52	8	31,5	43

4.7.1 Ensaios de Confirmação

Alguns ensaios foram escolhidos, de modo que os fatores que menos influíram nas respostas (gás, velocidade de soldagem e DBCP), ficaram fixos nos níveis que elevasse a taxa sinal/ruído na maioria das respostas. O gás foi fixado para se obter a menor taxa de variação da corrente de pico de descida, pois foi nesta resposta que o valor do teste F foi maior (Tabela 4.8); a DBCP foi escolhida em 16 mm devido à sua influência no desvio do tempo de curto e também porque os fatores mais influentes atuaram nesta resposta (Tabela 4.8). A velocidade de soldagem foi fixada no valor que mais respostas foram maximizadas (ensaios 15 e 18). Os ensaios de confirmação foram realizados na seqüência da Tabela 4.9, para confirmar se os valores obtidos para as respostas dos ensaios executados estão de acordo com os previstos pelo método Taguchi. Taguchi, para cada resposta fez uma previsão média desta utilizando os ajustes dos testes escolhidos.

Tabela 4.9 – Níveis dos fatores de controle para os ensaios de confirmação.

PARÂMETRO DE SOLDAGEM	EXP 1	EXP 2	EXP 3	EXP 4	EXP 5
GAS DE PROTEÇÃO	C25	C25	C25	C25	C25
TENSÃO (V)	23	21	21	21	23
VELOC. ALIMENTAÇÃO (m/min)	4,0	5,5	5,0	4,0	5,5
VELOC. SOLDAGEM (cm/min)	30	25	30	30	30
DIST. BICO CONTATO PEÇA (mm)	16	16	16	16	16
INDUTÂNCIA	9	9	9	2	9

4.7.2 Previsão da Melhor Condição por TAGUCHI

A Tabela 4.10 mostra as médias previstas por Taguchi (PREV.) e as obtidas do ensaio de confirmação (REAL) para as respostas analisadas. Os valores dos resultados obtidos foram calculados a partir dos dados operacionais e dos medidos durante a soldagem.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos dos experimentos realizados e os previstos por Taguchi.

RESPOSTA	EXP 1		EXP 2		EXP 3		EXP 4		EXP 5	
	REAL	PREV.								
TF(kg/h)	1,62	1,79	2,4	2,43	2,09	2,47	1,69	1,79	2,34	2,41
TD(kg/h)	1,43	1,56	2,2	2,18	1,87	2,18	1,13	1,35	2,08	2,14
IR%	11,9	13,3	9,0	10,4	10,6	11,91	32,7	23,91	10,9	10,79
D%	29,5	20,48	17,3	14,7	19,1	12,53	34,2	15,02	24,9	21,87
IP%	25	25,02	32,1	28,7	23,3	21,28	18,3	18,27	33,3	36,57
IC%	25	21,06	44,0	47,1	37,4	39,01	22,2	42,16	26,1	31,59
QC	7,5	7,62	7	7,0	5,5	5,96	5,0	5,42	7	7,09
di/dts(A/ms)	26	24,33	22	18,3	24	19,17	86	72,5	26	17
di/dtd(A/ms)	5	4,33	14	15,5	11	6,83	41	56,33	10	6,33
σ_{Ip} %	35	64,28	12	14,6	12	23,28	39	33,11	19	46,28
Tcc (%)	0,6	3,36	13,0	13,84	12,0	9,45	5,0	5,46	6,0	3,58
σ_{tcc} (ms)	1,7	1,58	3,5	4,7	5,7	4,14	1,5	3,03	3,2	3,03

Considerando os níveis de fatores que mais influenciaram a resposta na condição desejada (maior é melhor ou menor é melhor) Taguchi faz uma previsão da média das respostas para cada ensaio e com o cálculo do intervalo de confiança (IC_p) da média prevista (equação 1) obteve-se a faixa de variação da média prevista para cada resposta ($média \pm IC_p$). Esta faixa de variação foi então comparada com a resposta do ensaio prático correspondente, verificando a validade dos resultados.

4.7.3 Análise de Variância da Média Prevista das Respostas para Maximizar a Taxa S/R

Considerando os fatores de controle mais influente para cada resposta que maximiza a taxa S/R, foi obtida a variância do erro, também utilizada para calcular o intervalo de confiança. A Figura 4.21 ilustra os fatores de controle (no caso o fator) que maximiza a função objetivo (S/R) para a taxa de fusão (TF). A Tabela 4.11 mostra a análise de variância para TF.

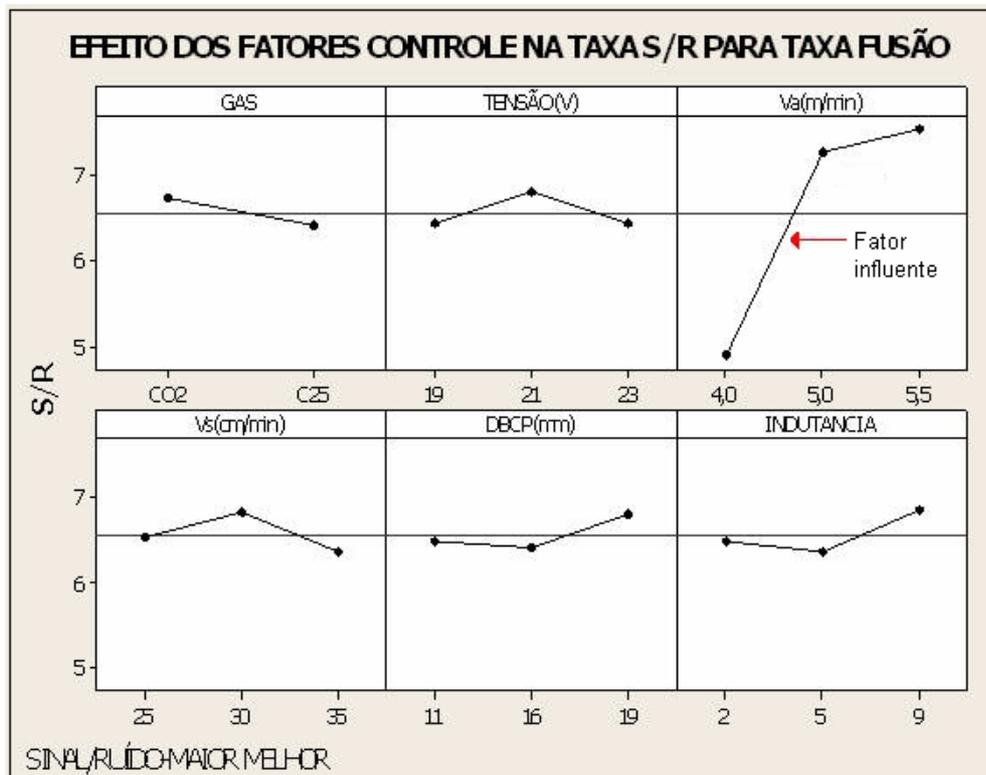


Figura 4.21 – Efeitos dos fatores de controle na função S/R para taxa de fusão.

Tabela 4.11 – Análise de Variância para a Média Prevista para Taxa de Fusão.

FATOR VARIAÇÃO	GL	SS	MQ	F TESTE
Va(m/min)	2	1,4223	0,71117	20,93
ERRO RES.	15	0,5096	0,03397	
TOTAL	17			

4.7.4 Intervalo de Confiança para a Média Prevista por Taguchi

O intervalo de confiança para a previsão da melhor condição da média das respostas é dado pela equação:

$$IC_P = \sqrt{\frac{(F_{(\alpha,1,v_e)} \bullet V_e)}{N_f}} \quad (1)$$

Onde:

IC_p = intervalo de confiança.

$F_{(\alpha,1,v_e)}$ - valor de F com um grau de liberdade para o numerador e v_e graus de liberdade para o erro. (tabelado ou calculado no MINITAB).

V_e = variância do erro.

$$N_f = \frac{N}{1 + \left[\begin{array}{l} \text{graus totais de liberdade associados aos itens} \\ \text{utilizados na estimativa da resposta} \\ \text{média para a melhor condição} \end{array} \right]} \quad (2)$$

N = número total de ensaios.

Exemplo de seqüência de calculo para a resposta TF (taxa de fusão):

Para a resposta média prevista para TF, levando em consideração o efeito dos fatores de controle mais significativos (σ) foi calculado o intervalo de confiança (IC_p), com os dados da Tabela 4.11:

$$IC_P = \sqrt{\frac{4,54 \times 0,03397 \times (1 + 2)}{18}} \equiv 0,16$$

Faixa de variação prevista: média prevista para cada experimento $\pm 0,16$

EXP 1 ($1,79 \pm 0,16$); EXP 2 ($2,43 \pm 0,16$); EXP 3 ($2,47 \pm 0,16$); EXP 4 ($1,79 \pm 0,16$); EXP 5 ($2,41 \pm 0,16$); mesma seqüência de cálculo foi utilizada para as outras respostas e anotada nas Tabelas 4.12 e 4.13 de acordo com as características analisadas nas respostas. Onde a faixa de variação prevista nas Tabelas se encontram nas colunas (PREV.)

Se os valores das respostas dos testes experimentais se encontrarem dentro da faixa de variação dos valores estimados por Taguchi, então a análise da(s) resposta(s) considerada(s) empregando o método Taguchi, pode ser usada com boa segurança aumentando a confiabilidade.

A análise de variância no método Taguchi apresentou resultados satisfatórios quanto às características analisadas; para se obter soldas com melhores características geométricas e boas características econômicas, o EXP 5 com gás C25, tensão 23(V), v_a 5,5 (m/min), vs 30 (cm/min), DBCP 16 (mm) e indutância 9 parece ser a melhor opção; pode se afirmar que o método Taguchi não consegue avaliar com 95% de confiabilidade o índice de penetração para este ajuste. Considerando mais os critérios comportamento do arco e transferência metálica e também o critério econômico, a melhor condição, dentro do estudado para esta pesquisa, é o gás C25, tensão 21(V), v_a 5,5(m/min), DBCP 16(mm) e indutância 9 – EXP 2. Já para a condição crítica, onde se usou o nível mínimo para v_a 4 (m/min) e para a indutância (2), o método Taguchi mostra que a maioria das respostas experimentais ficaram fora do intervalo previsto, pois foi o fator mais influente que foi ajustado no nível crítico (minimizou a taxa S/R).

Tabela 4.12 – Comparação entre os valores previsto e real para as características econômicas e geométricas.

CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS E GEOMETRICAS						
	EXP 1		EXP 2		EXP 5	
RESPOSTA	REAL	PREV.	REAL	PREV.	REAL	PREV.
TF (kg/h)	1,60	1,6 a 2,0	2,4	2,3 a 2,6	2,34	2,3 a 2,6
TD (kg/h)	1,43	1,4 a 1,7	2,2	2,0 a 2,4	2,08	2,0 a 2,3
IR%	11,90	11,4 a 15,2	9,0	8,5 a 11,9	10,9	8,9 a 12,7
D%	29,50	16,8 a 24,2	17,3	11,0 a 18,5	24,9	18,1 a 25,6
IP%	25,00	18,8 a 31,2	32,1	22,0 a 34,9	33,3	36,6 a 42,8
IC%	25,0	13,6 a 28,5	44,0	39,7 a 54,5	26,1	24,2 a 39,0
QC	7,50	6,52 a 8,72	7,0	5,9 a 8,1	7,0	6,0 a 8,2

* os valores em negrito estão fora do intervalo previsto e, portanto a análise da resposta considerada não pode ser feita com boa segurança.

Tabela 4.13 – Comparação entre os valores previsto e real para o comportamento do arco.

CARACTERÍSTICAS DO COMPORTAMENTO DO ARCO		
ENSAIO	EXP 2	
RESPOSTA	REAL	PREV.
di/dts(A/ms)	22,00	9,17 a 27,43
di/dtd(A/ms)	14,00	6,40 a 24,60
σ_{Ip} %	12,00	5,50 a 23,70
Tcc (%)	13,00	9,39 a 18,29
σ_{tcc} (ms)	3,50	2,65 a 6,75

Capítulo 5

CONCLUSÕES E PROPOSTAS

5.1 CONCLUSÕES

Em função dos resultados e das análises, aplicado ao processo Eletrodo Tubular sob proteção gasosa com transferência do tipo curto-circuito este trabalho permitiu concluir que:

1. Os parâmetros que mais influenciaram na estabilidade do processo foram a tensão, a velocidade de alimentação, a indutância e o gás de proteção.
2. A tensão foi o parâmetro mais influente no processo, quando analisados o comportamento do arco e perfil do cordão de solda.
3. A indutância foi altamente significativa na formação dos respingos (característica econômica) e comportamento do arco.
4. A velocidade de alimentação teve influência na geometria do cordão de solda, no rendimento do processo e no comportamento do arco com menor intensidade que a tensão e indutância para os índices estudados neste trabalho.
5. A velocidade de soldagem e a distância bico contato peça foram os fatores com menos influência no resultado final da solda, pois não exerceram efeitos significativos nas respostas analisadas.
6. A soldagem com o gás CO₂ e baixa indutância melhorou estabilidade do arco e a qualidade do cordão, mas encarece o processo pelo aumento na taxa de respingos, já que a limpeza dos mesmos acarreta em tempo e custos.

7. A soldagem com o gás C25 e alta indutância, melhorou a estabilidade do arco diminuindo os curtos de pequena duração e a qualidade do cordão, porém ao contrario do gás CO₂, apresentou mínima taxa de respingos, parecendo ser mais econômica.
8. Para se obter soldas com melhores características econômicas e geométricas os seguintes valores foram ajustados para a tensão em 23 V, a velocidade de alimentação 5,5 m/min, a velocidade de soldagem em 30 cm/min, a distância bico contato peça em 16 mm, a indutância em 9 e o gás de proteção C25.
9. Os melhores ajustes para se obter soldas com melhores características para o comportamento mais estável do arco, e transferência da gota mais regular foram 21 V para tensão, 5,5 m/min para a velocidade de alimentação, 25 cm/min para velocidade de soldagem, 16 mm para distância bico contato peça, 9 para indutância e C25 para gás de proteção.

5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

No sentido de complementar as informações obtidas nesta pesquisa, algumas sugestões são citadas que podem ajudar o desenvolvimento de trabalhos futuros com este tipo de consumível.

1. Realizar ensaios fora da posição plana, como por exemplo, na posição vertical, sobre cabeça verificando se este tipo de eletrodo é o mais viável para soldagem fora de posição no modo de transferência por curto-circuito.
2. Comparação dos resultados obtidos para o eletrodo tubular com os resultados para o arame sólido (MIG/MAG) realizando os ensaios com os mesmos ajustes de parâmetros para comparar quais são as vantagens e desvantagens da utilização de um processo para o outro.
3. Realizar ensaios para obter as propriedades mecânicas e metalográficas dos experimentos deste trabalho.
4. Utilização de outras ferramentas estatísticas para efeitos comparativos dos resultados.
5. Análise detalhada do aporte térmico para o processo eletrodo tubular no modo de transferência por curto circuito.

6. Estudar o comportamento do arco associado com a reabertura do arco após o curto-circuito nas respostas da tensão de reabertura do arco e da sua energia consumida após o curto.
7. Análise detalhada dos efeitos dos curtos de pequena duração, identificando-os com oscilogramas e histogramas, no processo eletrodo tubular no modo de transferência por curto-circuito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJO, G.; CLAEISSON, I., (1999)**, “On-line Quality Monitoring in Short-Circuit Gas Metal Arc Welding”. *Welding Journal*, February, pp 59s – 73s.
- ADOLFSSON, S.; BAHRAMI, A.; BOLMSJO, G.; CLAEISSON, I., (1998)**, “Quality Monitoring in Robotised Spray GMA Welding”. *Int. J. for the Joining of Materials*, 10, pp3-23.
- ANTONY, J.; HUGHES, M.; KAYE, M., (1999)**, “Reducing Manufacturing Process Variability using Experimental Design Technique: A Case Study”. *Integrated Manufacturing Systems*, March, pp 162 – 169.
- ARAÚJO, W.R., (2004)**, “Comparação entre a Soldagem Robotizada com Arame Sólido e Metal Cored – A Ocorrência do Finger”. *Dissertação de Mestrado, UFMG*.
- BARHORST, S., (2000)**, “Metal Cored Electrode Basics”. *The American Welder*, Nov/Dec, pp. 13-15.
- BAUNÉ, E.; BONNET, C.; LIU, S., (2000)**, “Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable- Part 1 – Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as Basicity Indicator”. *Welding Journal* , March, pp. 57s-64s.
- BOSWORTH, M. R., (1991)** “Effective Heat Input in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding - Solid Wire Electrodes”. *Welding Journal*, May, pp. 111s-117s.

- BRACARENSE, A.Q., (2000)**, “Processo de Soldagem por Arame Tubular”. Apostila UFMG, Maio, Belo Horizonte, pp. 88- 104.
- DILLENBECK, V.R.; CASTAGNO, L., (1987)**, “The Effects of Various Shielding Gases and Associated Mixtures in GMA Welding”. *Welding Journal*, vol. 66, nº 9, Sept, pp 45-49.
- DUTRA, J.C.; BAIXO, C.E.I., (1990)**, “O Estudo da Transferência Metálica no Processo de Soldagem MIG/MAG”. *Revista Soldagem e Materiais*, nº 21, Jan./Mar., pp. 32-36.
- FARIAS, J.P.; SCOTTI, A.; FERRARESI, V., (1998)**, “Fontes Eletrônicas para Soldagem com Eletrodos Revestidos: Avaliação do controle da Corrente de Curto”. XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino Americano e V Íbero- Americano de Soldagem, Fortaleza, setembro, 11pp.
- FORTES, C., (2004)**, “Aramas Tubulares”. Apostila ESAB S/A, Contagem, pp. 2-40.
- FRENCH, I.E.; BOSWOTH, M.R., (1995)**, “A Comparison of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires”. *Welding Journal*, June, pp. 197s-205s.
- GUPTA, S.R.; GUPTA, P.C.; REHFELDT, D., (1988)**, “ Process Stability and Spatter Generation during Dip Transfer in MAG Welding”. *Welding Review*, November, pp.232-241.
- HERMANS, M.J.M.; DEN OUDEN, G., (1999)**, “Process Behavior and Stability in Short Circuiting Gas Metal Arc Welding”. *Welding Journal*, April, pp 137s – 141s.
- HOUDCROFT, P.; JOHN, R., (1988)**, “Welding and Cutting” – Woodhead – Faulkner Ltd. Cambridge, England.
- JOAQUIM, R., (2001)**, “Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem – Módulo II - Processo de Soldagem Arame Tubular”. Centro de Tecnologia de Soldagem, SP.

- JÚNIOR, R., G., (2002)**, “Novos Métodos de Controle na Soldagem MIG/MAG”. Tese de Doutorado; UFSC, Setembro, Florianópolis.
- KOBAYASHI, Y.; ANASTÁCIO, A.C.A.; NARDI, C., (2005)**, “Estudo da influência da Variação da Corrente de Curto-Circuito, através da Indutância, sobre as Características Geométricas e Rendimento Real de Deposição”. III COBEF, Joinville, maio.
- LYTTLE, K. A.; STAPON, W.F.G., (1990)**, “Select the Best Shielding Gas Blend for the Application”. *Welding Journal*, November, pp. 21 – 27.
- MAZZAFERRO, J.A.E.; MACHADO, I.G., (2000)**, “Método de Caracterização da Estabilidade do Arco Elétrico utilizando Freqüências por FFT”. *Revista Soldagem e Inspeção - Ano 6, nº 5*, pp 7-15.
- MCKEOWN, D., (1989)**, “Synergic Control- Another Gimmick or Practical Solution”. *Joining and Materials*, June, pp.271-273.
- MIRANDA, H.C., MOTA, C.A.M., FARIAS, J. P., (1998)**, “Efeito Indutivo na Soldagem com Arame Tubular Auto Protegido”. XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem; Fortaleza, Setembro, 11 pp.
- MIRANDA, H.C., (1999)**, “Influencia da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobre-Cabeça”. Dissertação de Mestrado; UFU; Uberlândia, Fevereiro.
- MONTGOMERY, D.C., (1984)**, “Design and Analysis of Experiments”, New York, Georgia Institute of Technology, 1984.
- MOTA, C.A.M.; FARIAS, J.P.; SURIAN, E.; RIVAS, R.H.V., (1998)** “Efeito dos Parâmetros de Soldagem e do tipo de Arame sobre a Geometria da Solda a Arame Tubular Autoprotégido”. V CEM- NNE 98, Fortaleza, CE, pp. 390-396.
- NASCIMENTO, A.S.; DIAS, A.C.D.; FILHO, B.B.M.; MOTA, C.A.M., (2003)** “Procedimento Experimental para Seleção de Parâmetros de Pulso para Soldagem com Arame Tubular em Corrente Pulsada”, COBEF, Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, ref 175, pp 855- 865.

- OLIVEIRA, L.M., (2005)**, “Uma Investigação da Influência dos Parâmetros de Pulso em Soldagem com Eletrodo Tubular com Proteção Gasosa”. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Itajubá, Setembro.
- PAN, L.K.; WANG, C.C.; HSIAO, Y.C.; HO, K.C., (2005)**, “Optimization of Nd: YAG Laser Welding onto Magnesium Alloy via Taguchi Analysis”, Optics and Laser Technology, February, pp. 33 – 42.
- ROCA, A.S.; FALS, H.C.; FERNANDEZ, J.B.; ADÁN, F.S., (2005)**, “Application of U versus I Diagrams for Process Stability Evaluation in Gas Metal Arc Welding in Short Circuit Transfer Mode”. Revista Soldagem e Inspeção, vol. 10, nº 2, Abr./ Jun., pp. 85-91.
- RODGERS, K.J.; LOCHHEAD, J.C., (1989)**, “The Use of Gas – Shielded FCAW for Offshore Fabrication”. Welding Journal, February, pp. 26-32.
- RODRIGUES, L.O., (2005)**, “Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular”. Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Setembro, Itajubá.
- ROSS, P. J., (1991)**, “Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade”. Makros Books do Brasil Editora Ltda, 333p.
- SALES, J.C. (2001)**, “Estudo da Geometria do Cordão de Solda usando CO₂ e uma Mistura de Ar e CO₂ na Soldagem com Arame Tubular AWS E71T-1”. COBEM, Uberlândia – MG, V4, ref 172, pp 543-551.
- SANTOS, M.G.; (1995)**, “Metodologia para Comparação entre Fontes Inversora e Eletromagnética para Eletrodo Revestido”. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia-MG, 118 pp.
- SHINODA, T.; KANEDA, H.; TAKEUCHI, Y.; (1989)**, “An Evaluation of Short Circuiting Arc Phenomena in GMA Welding”. Welding & Metal Fabrication, December, pp. 522-525.

- SILVA, R. H. G., (2005)**, “Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz”.Dissertação de Mestrado, UFSC, Fevereiro, Santa Catarina, 128 pp
- STARLING, C.M.D.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q.; GUIMARÃES, A.F., (2003)** “Avaliação da Velocidade de Fusão de Arames Tubulares”; EEUFMG; XXIX CONSOLDA; Novembro, Belo Horizonte..
- SUBRAMANIAN, S.; WHITE, D.R.; JONES, J.E.; LYONS, D.W., (1998)**, “Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum”. Welding Journal, November, pp.459-465.
- UTTRACHI G.D.; MEYER, D.W., (1993)**, “The Basic of Semiautomatic Welding”. Welding Journal, August, pp 47- 51.
- VIEIRA, S.R.B.,(1996)** “Capítulo 4 – O Método Taguchi”; Dissertação, UFSC, Florianópolis.
- WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E., (1995)**, “Flux Cored Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization”. Welding Journal, November, pp. 369s – 377s.
- WEI, Q.; HU, Q.; GUO, F.; XIONG, D.J., (2002)**, “A Study of Weld Pore Sensitivity of Self-Shielded Flux Cored”. Welding Journal, June, pp. 90s-93s.
- WELDING HANDBOOK, (1991)**, “Flux Cored Arc Welding.” 8th ed., Miami-USA. American Welding Society, v.2, pp.158.
- WIDGERY, D.J., (1988)**, “Flux Cored Wire: An Update”. Welding and Metal Fabrication, April, pp. 88-94.