

MON
621.791.7
C824a
TES/mem

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO CONTROLE DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO
NA SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS**

Dissertação apresentada
à Universidade Federal de Uberlândia por:

DAVI SAMPAIO CORREIA

1999

Como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica

DIRBI/UFU



1000187181

Aprovada por:

Prof. Dr. Jesualdo Pereira Farias - (UFC) - Orientador
Prof. Dr. Américo Scotti - (UFU) - Co-Orientador
Prof. Dr. Valtair Antonio Ferraresi - (UFU)
Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense - (UFMG)

Aos meus pais, Antônio e Rita

Ao meu irmão, Jaime

À minha namorada, Mônica

Agradecimentos

Ao professor e orientador Jesualdo Pereira Farias, pela orientação, apoio e amizade na realização deste trabalho.

Ao professor e co-orientador Américo Scotti, pelas relevantes contribuições à esta dissertação e sua amizade.

Aos professores do curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pelos ensinamentos.

Aos professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio.

Aos meus amigos de Fortaleza e Uberlândia, Bozzi, Darius, Hélio e tantos outros, pela ajuda e companheirismo durante todo o meu curso de mestrado.

Aos bolsistas do Laboratório de Engenharia de Soldagem da UFC: Eduardo, Rodrigo, Temístocles e Vinícius.

Ao suporte financeiro do CNPq, através da concessão de bolsa

À FUNCAP, pelo financiamento do material de consumo utilizado.

Correia, D. S., 1999, "Avaliação do Controle da Corrente de Curto-Circuito na Soldagem com Eletrodos Revestidos", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

Resumo

Atualmente, já existem disponíveis no mercado fontes eletrônicas com possibilidade do ajuste da tensão de referência e da corrente de curto-circuito. Porém, não há ainda dados suficientes para comparar a eficácia desta nova tecnologia em relação à tecnologia aplicada nas fontes eletromagnéticas. Desta forma, foi objetivo deste trabalho a avaliação das vantagens e desvantagens do ajuste da tensão de referência e da corrente de curto-circuito sobre a estabilidade do arco e sobre as características econômicas dos eletrodos na posição sobrecabeça. Para tal, foi realizada uma série de soldagens através de simulador em chapas chanfradas, nas posições plana e sobrecabeça, com aquisição de dados computadorizada, empregando-se para o planejamento experimental a técnica estatística do Projeto Robusto. Utilizou-se uma fonte eletrônica chaveada no secundário e eletrodos comerciais básicos, rutilicos e celulósicos, de 3,25 mm de diâmetro. Para cada eletrodo, variou-se a posição de soldagem, a corrente média, a tensão de referência e a corrente de curto-circuito. Para todas as soldagens, manteve-se constante a área adicionada, através da variação da velocidade de soldagem. Os resultados indicaram influência da corrente de curto-circuito e da tensão de referência sobre a frequência e a duração dos curtos-circuitos. Mas, para as condições empregadas neste trabalho, não houve efeito negativo no uso dos ajustes da tensão de referência e da corrente de curto-circuito, considerando-se as características econômicas. Conclui-se ainda que os fatores mais influentes sobre as características econômicas dos eletrodos são a posição de soldagem, a corrente média e o tipo de eletrodo.

Palavras chaves: Eletrodo revestido; Estabilidade do arco; Transferência metálica; Fonte de soldagem; Controle.

Correia, D. S, 1999, "Short-Circuit Control on MMA Welding", M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, MG.

Abstract

Power supplies for Manual Metal Arc (MMA) Welding with short-circuiting current electronic control are already available in market. However, no data was found in the current literature, which can be used to compare the efficiency of this new technology with the technology applied in the conventional power supplies. Therefore, the aim of this present work was to evaluate the influence of the short-circuiting current and the reference voltage (short-circuit control) on the arc stability and on the economics characteristics of the electrodes. To do so, a series of single-V groove joint welds was carried-out with a welder simulator, on flat and overhead positions, using the statistical technique Taguchi's Method for the experimental design. A secondary-chopped power supply with the capability to set the short-circuit control parameters was used along with a computer based electrical signal data logger and analyser. The control factors were the reference voltage, the short-circuiting current, the mean current, the welding position and the type of electrode (commercial rutilic, basic and celulosic of 3,25 mm of diameter). In each experiment, the added area of the weld bead was kept constant, by the variation of travel speed. The results indicated that, for the conditions used in this work, there is no detrimental effect in the use of the short-circuit control on the economics characteristics of the electrodes. But it was found some influence of this control on the frequency and the time of the shorts-circuits. Still, it was concluded that the economics characteristics of the electrodes were affected mostly by the welding position, the mean current and the type of electrode.

Keywords: MMA; Arc stability; Metal transfer; Power supply; Control.

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Introdução	4
2.2 Transferência de Metal	7
2.3 Fontes de Energia para a Soldagem a Arco Elétrico	13
2.3.1 Características das Fontes de Energia para a Soldagem a Arco Voltaico	14
2.3.2 Tipos de Controle das Fontes Eletromagnéticas	17
2.3.3 Tipos de Controle das Fontes Eletrônicas	18
2.4 Estabilidade do Arco de Eletrodos Revestidos	19
2.4.1. Transferência de Metal	20
2.4.2. Transferência de Carga Elétrica	20
2.5 Aspectos Relevantes no Estudo da Estabilidade do Arco	22
2.6 Características Econômicas de Eletrodos Revestidos	27
3. Planejamento Experimental - Método Taguchi	31
3.1 Introdução	31
3.2 Arranjos Ortogonais	31
3.3 Razão Sinal/Ruído	32
3.4 Aditividade	34
3.5 Interação entre os Fatores	34
3.6 Graus de Liberdade	35
3.7 Razão de Variância (F)	35
3.8 Experimento de Confirmação (Verificação)	36
3.9 Passos do Projeto Robusto	36

4. Equipamentos e Materiais	38
4.1 - Fonte de Soldagem	38
4.2 – Sistema Automático de Soldagem (SAS)	38
4.2.1 Grupo Mecânico	39
4.2.2 Grupo Eletro-Eletrônico	40
4.3 - Sistema de Aquisição de Dados	40
4.4 – Programas de Tratamento de Dados	41
4.5 - Corpos de Prova	43
4.6 – Consumíveis	44
5. Metodologia Experimental	45
5.1 Critérios de Avaliação das Características Econômicas dos Eletrodos	45
5.1.1. A Taxa de Fusão do Eletrodo, TF	45
5.1.2. A Taxa de Deposição do Eletrodo, TD	46
5.1.3. Eficiência de Deposição, ED	46
5.2 Critérios de Avaliação da Estabilidade do Arco	46
5.3 Organização Geral dos Experimentos	46
5.4 Testes Preliminares	48
5.5 Primeira Fase - Comparação entre Máquina e Soldador	49
5.6 Levantamento do Valor da Corrente de Ajuste e da Taxa de Deposição	50
5.7 Segunda Fase - Estudo da Influência da Corrente de Curto-Circuito e da Tensão de Referência para Controle de Curto-Circuito sobre as Características Operacionais e Econômicas na Soldagem com Eletrodos Revestidos	51
5.8 Testes de Confirmação	54
6. Discussão dos Resultados	55
6.1 Observações Gerais	55
6.2 Análise Quantitativa da Transferência de Carga Elétrica	66
6.3 Análise Quantitativa da Transferência de Metal	72
6.4 Análise das Características Econômicas	82

6.5 Confirmação do Método Taguchi	87
6.6 - Considerações Gerais	87
7. Conclusões	95
8. Propostas para Trabalhos Futuros	96
9. Bibliografia	97
10. Anexo I	101
11. Anexo II	108

Notações

- α - Nível de significância
 η - Função objetiva
 σ_T - Desvio padrão de T
 σ_{U_m} - Desvio padrão de U_m
 σ_{I_m} - Desvio padrão de I_m
 $\sigma_{t_{cc}}$ - Desvio padrão de t_{cc}
 σ_{U_1} - Desvio padrão de U_1
 σ_{t_1} - Desvio padrão de t_1
 σ_{I_1} - Desvio padrão de I_1
 σ_{E_1} - Desvio padrão de E_1
A – Alto
B – Baixo
Bas – Eletrodo básico
BP - Eletrodo básico, posição plana
BS - Eletrodo básico, posição sobre-cabeça
Cel – Eletrodo celulósico
CP - Eletrodo celulósico, posição plana
CS - Eletrodo celulósico, posição sobre-cabeça
ED – Eficiência de deposição (%)
 E_1 – Energia dispendida para a abertura do arco após o curto-circuito ($W \cdot s$)
Elet – Eletrodo
 E_a – Queda de tensão na entrada do transformador
 E_c – Queda de tensão na carga (ou no arco)
 E_L - Queda de tensão na indutância
F – Razão de variância
 FE_1 – Facilidade de transferência de carga elétrica com transferência ($W^{-1}s^{-1}$)
 FE_{1T} – Facilidade de transferência de carga elétrica total ($W^{-1}s^{-1}$)
 F_{cc} – Facilidade de ocorrência de curto-circuito com transferência (s^{-1})
 F_{ccT} – Facilidade de ocorrência de curto-circuito total (s^{-1})
 F_{tm} - Facilidade de transferência metálica com transferência (s^{-1})
 F_{tmT} - Facilidade de transferência metálica total (s^{-1})
 i_{aj} - Corrente de ajuste (A)
 I_{cc} - Corrente de curto-circuito (A)

- I_{ef} – Corrente eficaz (A)
 I_m – Corrente média (A)
 I_1 - Corrente no instante da reabertura (A)
 I_r - Corrente de referência (A)
 L_{27} – Arranjo ortogonal com 27 linhas e 13 fatores de 3 níveis
 m_f - Massa final do eletrodo (g)
 m_i - Massa inicial do eletrodo (g)
 M_f - Peso da chapa após a soldagem (g)
 M_i - Peso inicial da chapa (g)
 M – Médio
 P_1 - Potência no instante da reabertura do arco (W)
 P_r - Potência de referência (W)
 RE_1 - Regularidade do transporte de carga elétrica com transferência
 RE_{1T} - Regularidade do transporte de carga elétrica total
 R_{cc} – Regularidade de ocorrência de curto-circuito com transferência
 R_{ccT} – Regularidade de ocorrência de curto-circuito total
 R_{tm} – Regularidade de transferência metálica com transferência
 R_{tmT} – Regularidade de transferência metálica total
 Rut – Eletrodo rutilico
SAER – Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido
SAS – Sistema automático de soldagem
S/N - Razão sinal/ruído
 t - Tempo de soldagem (s)
 t_1 - Tempo de reabertura do arco (ms)
 t_{cc} - Tempo médio de curto-circuito (ms)
 $t_{max.}$ - Tempo máximo de reabertura (ms)
 $t_{min.}$ - Tempo mínimo de curto-circuito com transferência da gota (ms)
 T - Período médio de transferência (ms)
TD – Taxa de deposição (Kg/h)
TF – Taxa de fusão (Kg/h)
 U_1 - Tensão média de reabertura após o curto circuito (V)
 U_{ef} – Tensão eficaz (V)
 U_m – Tensão média (V)
 U_{rc} – Tensão de referência para controle de curto-circuito (V)
 U_r - Tensão de referência (V)
 V_s – Velocidade de soldagem (cm/min)

Capítulo I

Introdução

O mercado mundial utiliza-se ainda em grande escala do processo de soldagem a arco com eletrodo revestido. Mesmo nos países do chamado primeiro mundo, ele é responsável por cerca de 20% do total de material depositado por soldagem e este patamar ainda deve ser mantido por muitos anos, principalmente na montagem de equipamentos pesados (ESAB, 1995). No Brasil, os últimos levantamentos indicam que a sua participação chega a 65% da produção de consumíveis de soldagem (01 apud Farias, 1993). Isto se deve ao fato da soldagem com eletrodo revestido aliar versatilidade, qualidade e operacionalidade com um equipamento bastante simples, barato e razoavelmente compacto quando comparado aos demais processos de soldagem (Santos, 1995).

O processo ainda está aberto a inovações e suas principais linhas de pesquisa concentram-se nos dois pontos abaixo descritos.

- 1) Através de combinações de diferentes compostos, pode-se formular vários tipos de revestimentos. Vale destacar que muitas composições anteriormente testadas com sucesso em pequenos lotes de eletrodos revestidos têm depois seus avanços estendidos também para outros processos, como arco submerso e arame tubular (Santos, 1995).
- 2) Com a evolução dos semicondutores de potência, tais como diodos, tiristores, mosfet's, igbt's e outros, propiciou-se condições para que fossem desenvolvidas fontes para soldagem com controle eletrônico, possibilitando um maior controle sobre os parâmetros dos processos. Estas fontes já estão sendo empregadas no processo de soldagem com eletrodo revestido.

Na história das fontes de soldagem, as primeiras a surgirem foram as eletromagnéticas. Elas são usadas até hoje devido à sua robustez, simplicidade e menor custo. Para o processo de soldagem com eletrodo revestido possuem como único ajuste a regulagem da sua característica estática (curva tensão x corrente).

As fontes eletrônicas produzem sinais de saída muito mais precisos e controláveis. Pode-se atuar em tempo real sobre as características dinâmicas das mesmas e, por exemplo, executar o controle adequado do crescimento da corrente nos momentos de curto-circuito, facilitando o destacamento das gotas e impedindo a colagem do eletrodo na peça (Farias, 1993). Uma das formas deste controle tem como princípio básico o aumento da corrente do arco durante o tempo em que a gota permanece em contato com a poça de fusão e o seu desempenho depende da corrente de ajuste, da corrente de curto-circuito, da velocidade de aumento desta corrente e da tensão de referência para controle de curto-circuito (Farias et al,

1998). Quando a tensão do arco alcança um valor abaixo da tensão de referência para controle de curto-circuito (pelo contato da ponta do eletrodo com a poça de fusão), permite-se que a corrente do arco suba até um valor de corrente de curto-circuito pré-determinado. Como a corrente de curto-circuito é bem maior que a corrente de ajuste, a transferência da gota e a reignição do arco são facilitadas. Já existem fontes comerciais onde é possível ajustar de forma independente a corrente de curto-circuito e a tensão de referência para controle de curto-circuito, mas ainda não há uma avaliação pormenorizada dos seus efeitos sobre o desempenho operacional do processo de soldagem com eletrodo revestido, ou seja, se efetivamente elas contribuem para a estabilidade do processo e, conseqüentemente, se existe mesmo a necessidade da inclusão destes novos parâmetros na regulagem das fontes.

Do ponto de vista da produção, três situações podem surgir a partir de futuras investigações neste campo. Na primeira, os resultados podem indicar que não há influência significativa da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle de curto-circuito nas características do processo de soldagem com eletrodos revestidos. Neste caso, é melhor perder uma pequena parcela da produção do que aumentar os problemas relacionados com a seleção de um novo parâmetro. Na segunda, pode haver um efeito relevante destes parâmetros com uma mesma tendência, independente do tipo de eletrodo. Por exemplo, diâmetros maiores, por exigirem maiores correntes, deveriam também requerer maiores valores da corrente de curto-circuito e menores de tensão de referência para controle de curto-circuito. O soldador seria facilmente treinado para ajustar os parâmetros seguindo as novas regras (Farias et al, 1998).

Na terceira situação, os resultados poderiam indicar um efeito significativo da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle de curto-circuito, mas sem nenhuma relação bem estabelecida. Devido a este fato e ao número de possíveis combinações dos diversos parâmetros de soldagem, armazenar os possíveis ajustes na EPROM do sistema de controle da máquina seria impraticável do ponto de vista da construção de um banco de dados. O usuário poderia selecionar as suas condições práticas mais comuns e determinar as melhores combinações de parâmetros para cada situação. Os diferentes ajustes poderiam ser eventualmente armazenados no sistema de controle da máquina de soldagem ou em um banco de dados externo. Outra solução seria usar filosofias alternativas de controle tais como redes neurais, para se obter um auto ajuste dos parâmetros (controle sinérgico) (Farias et al, 1998).

Em um trabalho recente (Santos, 1995), verificou-se a importância da corrente de curto-circuito na transferência metálica e na redução dos riscos de colagem do eletrodo na peça. Outro trabalho (Farias et al, 1998) aponta que os ajustes da corrente e da tensão de curto-circuito não afetaram de forma significativa as características econômicas dos eletrodos, mas alerta que em outras condições de soldagem (juntas com chanfro, soldagens fora de posição e

tecimento do cordão) os resultados poderiam ser diferentes. A experiência acumulada com estes trabalhos mostrou que seria necessário um grande número de ensaios com experimentos multifatoriais para cobrir todas as variáveis que se mostraram influentes nas características econômicas e operacionais do processo de soldagem com eletrodo revestido. Uma forma de contornar esta dificuldade é a utilização da técnica experimental do Projeto Robusto, que permite o estudo de vários fatores simultaneamente com substancial economia do número de ensaios. Este método tem demonstrado excelentes resultados no Brasil (Farias et al, 1998) e no exterior (Phadke, 1989; Mc Connell e Mc Pherson, 1997).

Desta forma, busca-se neste trabalho o levantamento de dados experimentais, com o objetivo de se avaliar os efeitos de diferentes combinações de corrente de curto-circuito e de tensão de referência para controle de curto-circuito, sobre o desempenho operacional de diferentes tipos de eletrodos comerciais, soldando-se através de um simulador em diferentes posições (plana e sobrecabeça) com chapas chanfradas.

Capítulo II

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Soldagem a arco com eletrodo revestido é um processo de soldagem no qual a coalescência de metais é produzida pelo calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo revestido e a superfície do metal de base onde a junta está sendo soldada (AWS, 1991).

Este é um dos processos mais usados no mundo, particularmente para soldas curtas em produção, manutenção e construção de campo. O equipamento é relativamente simples, de baixo custo e portátil. O metal de adição e os meios de proteção contra a oxidação (dos metais de adição e depositado) são fornecidos pelo eletrodo revestido. Não é necessário proteção gasosa auxiliar ou fluxo granular. As características de proteção dos eletrodos fazem com que o processo seja menos sensível à ação do vento (AWS, 1993).

A posição de soldagem não é limitada pelo processo e sim pelo tipo e diâmetro do eletrodo. Pode-se soldar a maioria dos metais e ligas comumente usados, com a vantagem do alcance em áreas de acesso limitado. Existem eletrodos revestidos para a soldagem de aços carbono e baixa liga; aços inoxidáveis; ferros fundidos; alumínio; cobre e níquel e suas ligas (AWS, 1993).

Quando o arco é iniciado, a corrente flui por todo o comprimento do eletrodo. Portanto, a intensidade de corrente que pode ser usada é limitada pela resistência elétrica da alma do eletrodo. Amperagem excessiva superaquece o eletrodo e destrói o revestimento, o que muda as características do arco e o tipo de proteção obtida. Devido à esta limitação, as taxas de deposição dos eletrodos revestidos são mais baixas que as dos processos com eletrodo contínuo. Outros fatores que também prejudicam a produção do processo são as constantes trocas de eletrodo e o tempo perdido para a remoção de escória entre passes (AWS, 1993).

Os equipamentos para a soldagem manual compreendem, em geral, uma fonte de energia, cabos, porta-eletrodo, ferramentas (picadeira, escova de aço etc.) e materiais de segurança (máscara, óculos, avental etc.) (Santos, 1995).

O eletrodo e a peça são parte de um circuito elétrico conhecido como circuito de soldagem, mostrado na Figura 2.1. Este circuito começa com a fonte de energia e inclui os cabos de soldagem, o porta-eletrodo, o eletrodo revestido, a garra do "terra", a(s) peça(s) a soldar e o arco voltaico. Um dos dois cabos da fonte de energia é conectado à peça. O outro é

conectado ao porta-eletrodo. Usa-se corrente alternada ou corrente contínua (eletrodo positivo ou negativo), dependendo das características do revestimento (ASM, 1993). A soldagem começa quando o arco é aberto entre a ponta do eletrodo e a peça. O intenso calor do arco funde a extremidade do eletrodo e a superfície da peça sob a ação do arco. Gotas de metal fundido transferem-se através do arco para a poça de fusão. Desta maneira o eletrodo é progressivamente consumido e o material de adição depositado (AWS, 1991). O arco é movido então, através da peça, com comprimento e velocidade apropriados. A Figura 2.2 mostra os detalhes do processo.

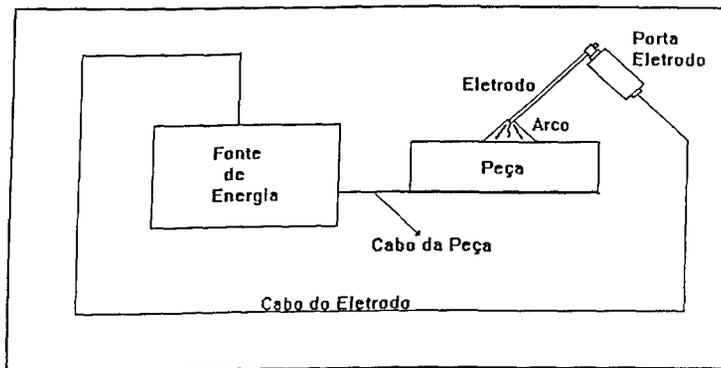


Figura 2.1 - Circuito de soldagem.

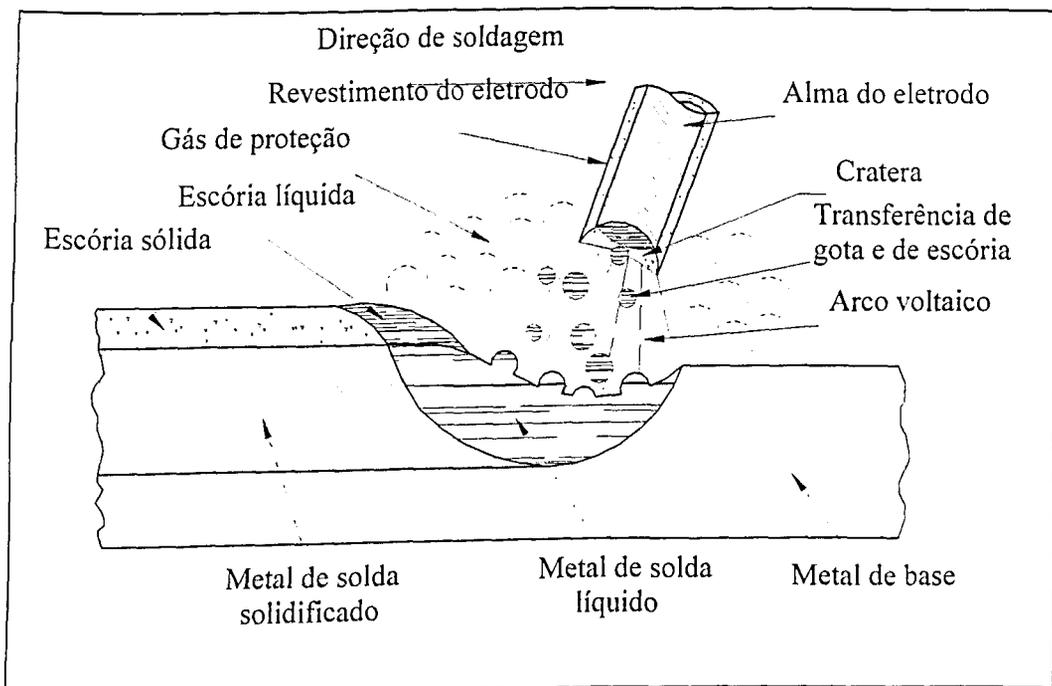


Figura 2.2 - Detalhes do processo eletrodo revestido.

O eletrodo revestido é composto de duas partes: a alma metálica e o revestimento. A primeira, no caso dos aços, é normalmente composta de aço comum ao carbono (com 0,05 a 0,10% C) e tem dimensões comerciais que variam geralmente de 2,0 a 6,0 mm de diâmetro e

350 ou 450 mm de comprimento (Farias, 1993). A alma metálica é responsável pela condução de corrente elétrica para o arco e também fornece metal de adição para a junta. O revestimento, extrudado em torno da alma metálica, apresenta as funções abaixo descritas (Quites e Dutra, 1979).

- a) Isolamento elétrico – normalmente, o revestimento é isolante elétrico e evita aberturas laterais de arco.
- b) Isolamento térmico - o revestimento limita a perda de calor gerado na alma do eletrodo por efeito da passagem de corrente elétrica.
- c) Direcionamento do arco - em certos casos, forma-se na extremidade do revestimento, uma cratera que guia o metal fundido para a poça de fusão, estabilizando o arco e protegendo o metal fundido. Chama-se a isto “efeito canhão”. Também pode ocorrer da cratera formada permitir a soldagem apoiando-se o eletrodo na peça, tornando-a mais fácil.
- d) Função metalúrgica - o revestimento contém elementos de liga que, quando de sua fusão, ficam inseridos na junta. Estes elementos têm várias funções, como por exemplo, prevenir o crescimento excessivo do grão do metal de solda.
- e) Função ionizante - os gases emanados do revestimento, quando de sua queima, são muito mais facilmente ionizáveis do que o ar e, por isso, propiciam uma abertura e manutenção mais fácil do arco. Alguns tipos de escórias também facilitam a ignição do arco devido as suas baixas funções de trabalho (Farias, 1993).
- f) Proteção do arco e da poça de fusão - a proteção é proporcionada por uma cortina gasosa gerada a partir da queima do revestimento e a subsequente decomposição de seus constituintes tais como carbonato de cálcio ou celulose. Outras vezes, ou mesmo concomitantemente, a proteção é feita por uma escória líquida, de temperatura de solidificação e densidade menores do que as do metal. Este líquido protege as gotas, durante a passagem através do arco, e a poça de fusão durante a sua solidificação. Após a soldagem, ele se solidifica formando uma camada protetora de escória, a qual deve ser removida (Farias, 1993).

Existem vários tipos de revestimentos, cada um atendendo determinada necessidade tecnológica. Os principais tipos de revestimentos, assim como suas características gerais, estão descritos a seguir (Scotti, 199-a).

- a) Celulósicos, que têm como características:
 - alta proporção de celulose, produzindo proteção essencialmente gasosa;
 - alta tensão de arco;
 - alta penetração;
 - pequeno volume de escória;

- cordão de solda com os maiores teores de hidrogênio (acima de 30 ml/100 g) (Boniszewski, 1979);
 - acabamento do cordão ruim e com muito respingo.
- b) Rútílicos, que têm como características:
- alta proporção de rutila (TiO_2) produzindo proteção essencialmente por escória;
 - fácil acendimento e manutenção do arco, com poucos respingos;
 - mais tolerante que os demais em relação à chapas sujas;
 - acabamento plano nos filetes;
 - alto teor de hidrogênio (20 – 30 ml/100 g) (Boniszewski, 1979).
- c) Básicos, que têm como características:
- alta proporção de CaCO_3 e CaF_2 ; produzindo proteção mista (gases e escória);
 - forte ação fluxante (escorificante);
 - depósitos de alta qualidade e baixo hidrogênio (3 – 15 ml/100 g) (Boniszewski, 1979);
 - escória de difícil destacabilidade;
 - escória de alta tensão superficial, facilitando o controle da poça, principalmente na posição vertical ascendente, mas produzindo cordões convexos;
 - altamente higroscópicos.

2.2 Transferência de Metal

Denomina-se transferência metálica ao processo pelo qual o material de adição é transferido do eletrodo para a poça de fusão através do arco elétrico. Esta transferência tem sido assunto de várias pesquisas (Wegrzyn, 1980; Essers et al, 1971; Lancaster, 1971; Norrish e Richardson, 1988; Modenesi et al, 1984; Pokhodnya et al, 1985; Brandi e Taniguchi, 1989), já que a maneira como esta ocorre influencia de modo marcante várias características do processo de soldagem, tais como a estabilidade do arco, a quantidade de perdas na forma de respingos, a posição de soldagem, a regularidade e a qualidade de metal depositado, a geometria do cordão, a eficiência da proteção gasosa (no processo MIG/MAG) e a velocidade de soldagem. As gotículas de metal fundido contribuem com importante fração da energia total recebida pela poça de fusão e a quantidade de movimento associada com estas, no instante de sua entrada na poça de fusão, pode afetar a penetração final da solda (Modenesi et al, 1984).

O modo de transferência depende de diversos fatores como, por exemplo, os parâmetros elétricos do arco (tipo e valor da corrente, tensão e polaridade), o diâmetro e a composição do metal de adição, o tipo e a composição do meio de proteção, o comprimento energizado do eletrodo, a pressão atmosférica etc. (Quites e Dutra, 1979). A compreensão do

papel destes efeitos requer uma análise da física do processo de transferência metálica através do arco. Entre as várias forças que atuam na transferência, as seguintes são listadas de forma mais freqüente (02, 08, 10 apud Brandi e Taniguchi, 1989).

- a) Força devido à tensão superficial.
 - b) Força devido à ação da gravidade.
 - c) Força de compressão (efeito "pinch").
 - d) Força de arraste do plasma e do gás de proteção.
 - e) Força devido à evaporação metálica.
 - f) Força devido à reações químicas.
-
- a) Força devido à tensão superficial - a intensidade das forças de tensão superficial, do metal líquido e da escória, na fusão de um eletrodo revestido tem um efeito marcante sobre o modo de transferência e sobre as propriedades e o movimento do metal na poça de fusão. A força devido à tensão superficial atua no sentido de reter a gota de metal fundido na ponta do eletrodo. Porém, ao menor contato, a poça de fusão atrai a gota para si, porque agora a tensão superficial é mais forte no sentido oposto devido à maior área de contato. Se a temperatura aumenta pela elevação da corrente de soldagem, a tensão superficial do metal líquido é reduzida. As forças que suportam as gotas se tornam menores, facilitando sua transferência na posição plana (Quites e Dutra, 1979; Brandi e Taniguchi; 1989).
 - b) Força devido à ação da gravidade - a força gravitacional favorece a transferência metálica através do arco na posição plana, mas dificulta a mesma em outras posições, particularmente na posição sobrecabeça. Na soldagem com eletrodos revestidos, as forças gravitacionais dificilmente são importantes quando comparadas com as outras forças que afetam a transferência de metal no arco (Wegrzyn, 1980).
 - c) Forças de compressão (efeito "pinch") - a força de compressão (Lorentz) é devida a interação entre a corrente de soldagem, o campo eletromagnético gerado e a superfície líquida do condutor da corrente. Essa força causa uma compressão na gota líquida gerando o efeito de pinçamento ("pinch effect") (Brandi e Taniguchi, 1989). Estudos em fontes eletrônicas de soldagem (Santos, 1995; Farias, 1998) indicam que na transferência metálica por curto-circuito, os tempos de curto-circuito são tanto menores quanto maiores forem as correntes de curto-circuito permitidas. Este resultado mostra o importante efeito da variação das forças eletromagnéticas sobre a transferência metálica.

- d) Força de arraste do plasma e do gás de proteção - as forças de arraste do plasma e do gás de proteção (02, 03, 14, 16 apud Brandi e Taniguchi, 1989) são devidas ao atrito entre o gás e a superfície da gota e à diferença de pressão causada pela vorticidade, conforme mostra a Figura 2.3.
- e) Força devido à evaporação metálica - a força devido à evaporação metálica foi citada pela primeira vez em 1940 por Conrady (17 apud Brandi e Taniguchi, 1989). Segundo ele, há uma pressão gerada pela mancha catódica que deforma a superfície da gota. Lancaster (18 apud Brandi e Taniguchi, 1989) também estudou esta força, concluindo que ela pode superar a força de compressão no caso do eletrodo revestido. Chega-se a encontrar de 10% a 20% de vapor metálico na atmosfera do arco (19 apud Brandi e Taniguchi, 1989), mostrando que esta força tem um papel importante na transferência metálica com eletrodos revestidos.
- f) Força devido à reações químicas - essa força é gerada pela reação do oxigênio dissolvido na gota com elementos desoxidantes. O produto gasoso formado expande-se de uma forma explosiva no interior da gota. A primeira menção a esse tipo de força foi feito por Doan (1932). Segundo ele, a soldagem na posição sobrecabeça só poderia acontecer com almas de eletrodos feitas de aço efervescente. Erdmann-Jesnitzer (21-23 apud Brandi e Taniguchi, 1989) foi quem estudou esta força com mais detalhes. Segundo ele (21 apud Brandi e Taniguchi, 1989) os gases presentes no interior da gota podem ser CO, CO₂, H₂ e H₂O. No caso dos eletrodos revestidos acredita-se que o gás predominante é o CO (04, 21-24 apud Brandi e Taniguchi, 1989).

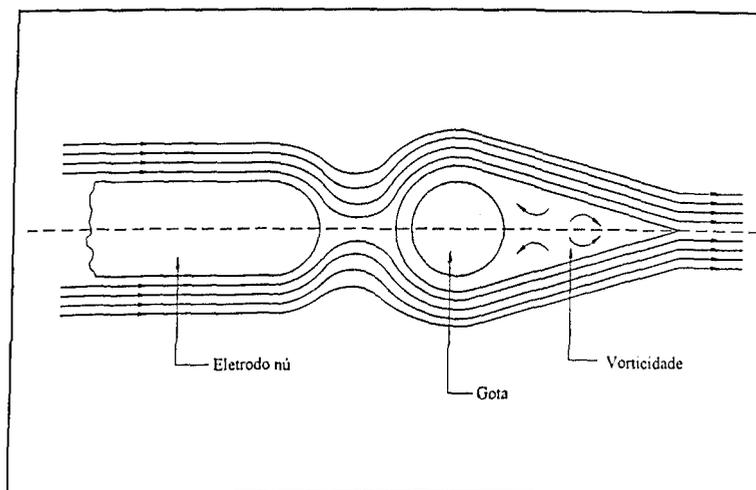


Figura 2.3 - Representação da força de arraste exercida pelo escoamento do plasma (04 apud Brandi e Taniguchi, 1989).

As forças discutidas acima não agem todas ao mesmo tempo, em todos os processos de soldagem. No caso do processo de soldagem com eletrodo revestido, as seguintes forças são mais significativas (Brandi e Taniguchi, 1989): força devido à tensão superficial, força de compressão (efeito "pinch"), força devido à evaporação metálica e força devido à reações químicas.

De acordo com o International Institute of Welding - IIW, a transferência metálica é classificada em oito tipos principais a saber: transferência metálica globular, transferência metálica por repulsão, transferência metálica por projétil, transferência metálica por pulverização axial, transferência metálica por pulverização rotacional, transferência metálica por explosão, transferência metálica por curto-circuito e transferência metálica guiada pela escória (Farias, 1998). Esta classificação é fenomenológica e não define os mecanismos dos vários modos de transferência (Lancaster, 1984).

Os modos de transferência encontrados no processo de soldagem com eletrodo revestido são similares àqueles encontrados no processo MIG, mas o revestimento do eletrodo pode influenciar o comportamento da transferência tanto por seu efeito na atmosfera do arco como por "efeitos mecânicos" da escória (Norrish e Richardson, 1988). De acordo com Pistorius e Liu (1997), o comportamento da transferência metálica dos eletrodos celulósicos (E6010), rutilícos (E6013) e básicos (E7018) muda significativamente a medida que o eletrodo é consumido. E estas mudanças no comportamento são mais pronunciadas quanto mais alta for a corrente de soldagem.

Os modos mais comuns de transferência são o globular e o curto-circuito. Eletrodos básicos tendem a transferir por curto-circuito em baixas correntes e baixas tensões e de forma globular em correntes e tensões mais altas. Os eletrodos do tipo celulósico apresentam taxas de transferência mais altas e pequenos tamanhos de gota, os quais são mais típicos de transferência por pulverização (Norrish e Richardson, 1988). Os eletrodos do tipo rutilíco apresentam, de maneira geral, transferência globular (com gotas menores que o tipo básico) e/ou por curto-circuito (Essers et al, 1971; Lancaster, 1971).

De acordo com Brandi et al (1991), para os eletrodos E6011 (celulósico) e E6013 (rutilíco), uma mudança na polaridade, de eletrodo positivo (polaridade reversa) para eletrodo negativo (polaridade direta), provocou uma diminuição no diâmetro das gotas de metal transferidas e um aumento no número de respingos. Isto pode estar relacionado com a temperatura superficial das gotas. A Figura 2.4 mostra a diferença na distribuição da temperatura superficial da gota com eletrodo positivo e negativo. É conhecido que o gradiente de temperatura na ponta fundida do eletrodo promove circulação de gás e fluxo metálico na referida extremidade, como ilustrado na Figura 2.5. Ainda de acordo com Brandi et al (1991),

um aumento na corrente de soldagem de 150 A para 200 A causou um decréscimo no diâmetro das gotas transferidas em três tipos de eletrodos: E7018 (básico), E6011 e E6013.

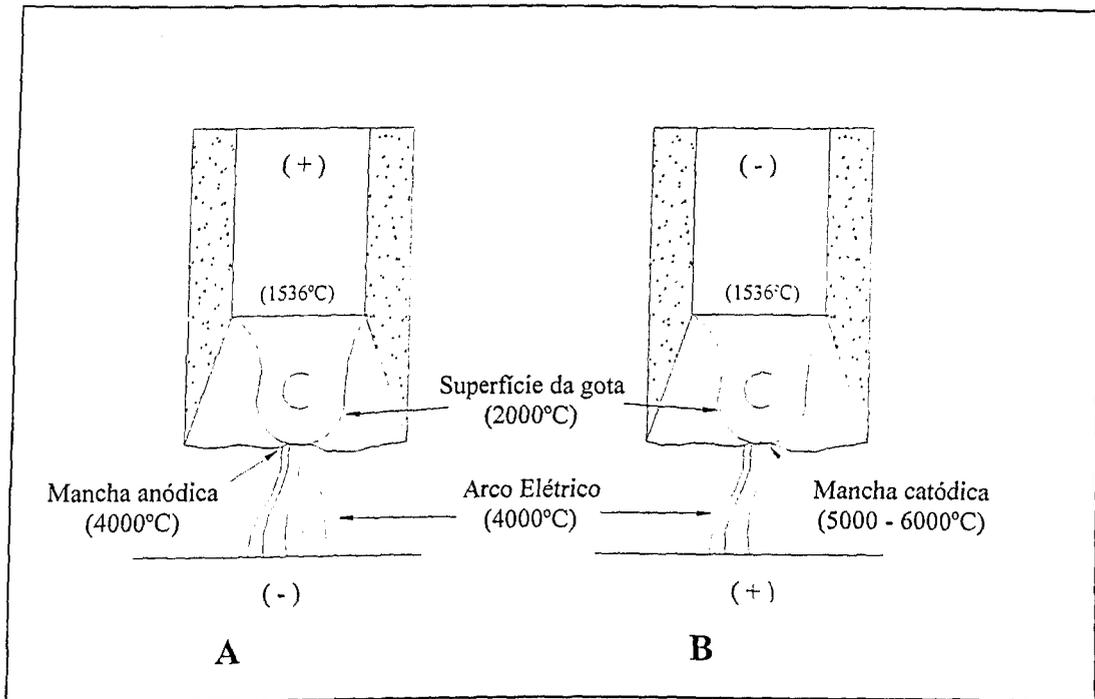


Figura 2.4 - Temperatura superficial da gota como função da polaridade. A - corrente contínua, eletrodo positivo; B - corrente contínua, eletrodo negativo (Brandi et al, 1991).

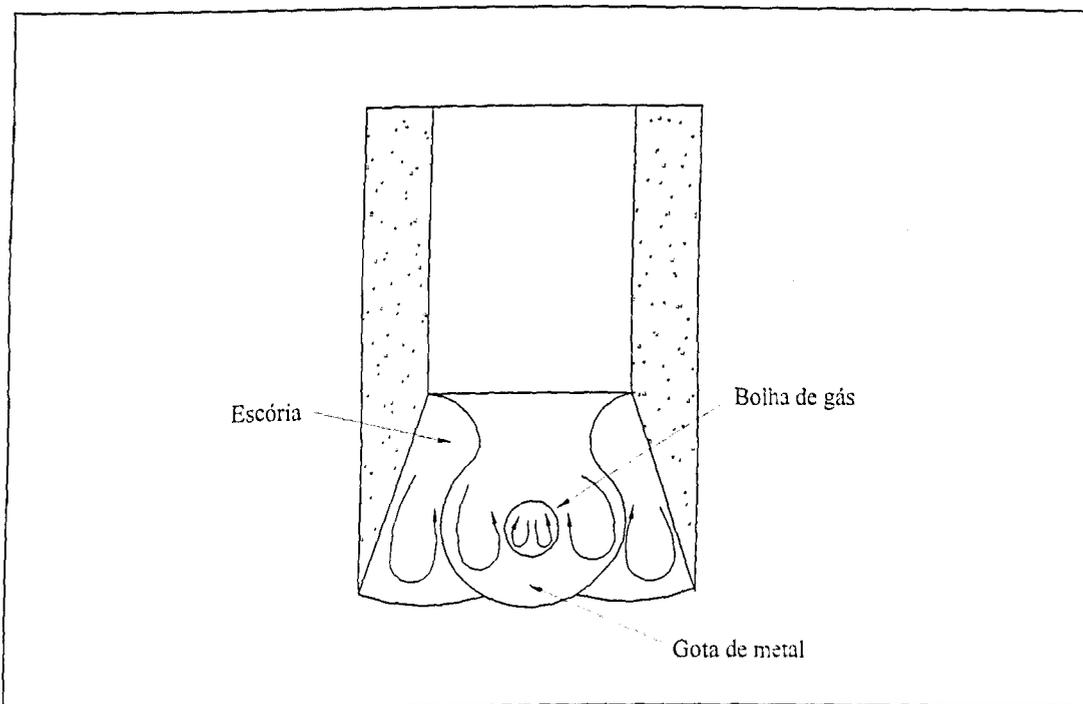


Figura 2.5 - Circulação de gás e fluxo metálico na extremidade fundida do eletrodo (Brandi et al, 1991).

JOURNAL OF THE BRITISH WELDING INSTITUTE
 1991

Os componentes do fluxo têm um papel ativo na transferência metálica (a) afetando a composição e propriedades físicas do metal fundido (tensão superficial, por exemplo), (b) determinando em grande parte as características do arco elétrico e (c) criando, em determinados tipos de eletrodos, uma cavidade que ajuda a direcionar o metal de adição para a poça de fusão (o chamado "efeito canhão"). Adicionalmente, dependendo do grau de desoxidação do metal fundido na ponta do eletrodo ou da presença de componentes voláteis, bolhas de gases podem ser formadas na ponta do eletrodo. Estas bolhas, ao romperem-se, podem causar a transferência explosiva de pequenas gotas de metal fundido (Modenesi, 1996).

De acordo com Pokhodnya et al (1987), uma ferramenta bastante útil para o estudo da transferência metálica por curto-circuito é o histograma dos tempos de curto-circuito. Como regra, estes histogramas são "duplos" ou "bimodais", provocando assim a existência de dois tipos de curtos-circuitos: os falsos ou aleatórios, onde não ocorre transferência metálica para a poça de fusão (parte esquerda da Figura 2.6) e os curtos-circuitos com transferência de metal (parte direita da Figura 2.6). Portanto, estas duas partes do histograma são relativas a diferentes fenômenos e devem ser estudadas separadamente. O valor médio do tempo de curto-circuito e suas características de dispersão devem ser determinadas para cada uma das partes.

O tempo de curto-circuito pode ser usado para quantificar a estabilidade do arco voltaico, como se verá na metodologia, e para estimar a resistência do eletrodo à colagem na peça (Pokhodnya et al, 1987). Neste caso, para a soldagem com um dado eletrodo, quanto mais longos forem os curtos-circuitos, maior é a possibilidade da colagem. Tal estudo é particularmente importante na soldagem com eletrodos básicos, pois estes transferem metal em gotas grandes (maior tempo de curto-circuito). Uma vez "colado" o eletrodo, a subsequente reignição é quase sempre acompanhada pela formação de poros no metal de solda, devido à falha na proteção gasosa (Pokhodnya et al, 1987).

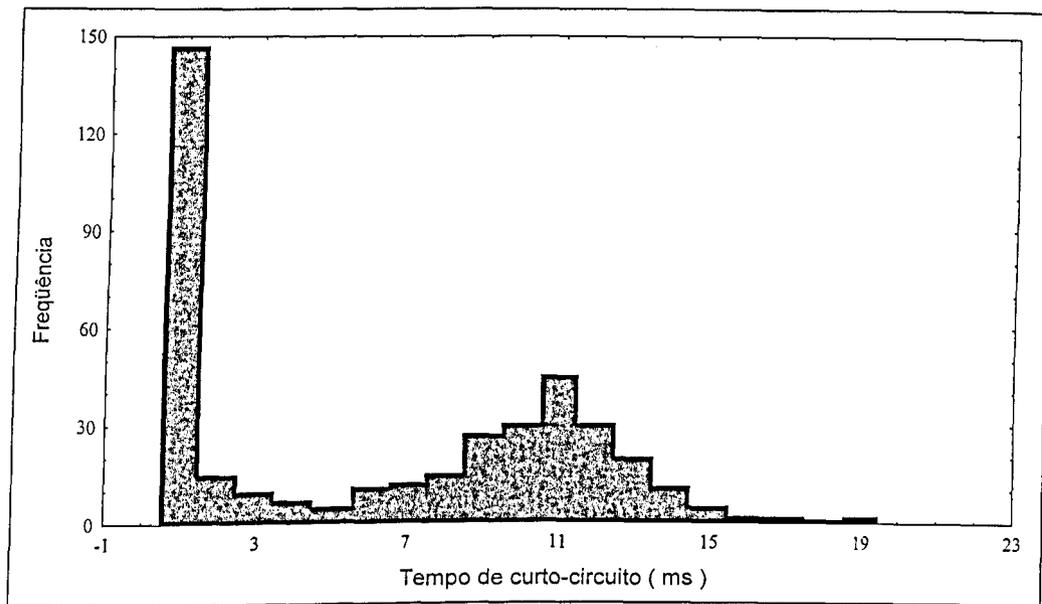


Figura 2.6 - Histograma dos tempos de curto-circuito para o eletrodo AWS E7016-C2L, com 5,00 mm de diâmetro (Farias, 1993).

2.3 Fontes de Energia para a Soldagem a Arco Elétrico

A fonte de energia para soldagem pode fornecer corrente alternada, corrente contínua, ou ambos os tipos. Estas fontes devem possuir como característica estática de saída corrente ou tensão constante. Quanto aos tipos de corrente fornecidas pelas fontes, os mais comumente aplicados em soldagem são as alternadas do tipo senoidal e as contínuas. Entretanto, o formato da onda pode variar, como por exemplo no caso da onda alternada retangular ou da contínua pulsada. Assim, propõe-se a seguinte classificação das fontes quanto ao tipo de corrente.

- Corrente contínua
 - convencional
 - pulsada
- Corrente alternada
 - senoidal
 - retangular balanceada
 - retangular pulsada

Existem diferentes tipos de fontes de energia para o processo de soldagem com eletrodo revestido e o conhecimento de suas diferenças estruturais é essencial para a compreensão dos fenômenos físicos e químicos da soldagem.

As fontes mais utilizadas nas soldagens a arco com eletrodo revestido são as do tipo corrente constante com corrente contínua convencional e corrente alternada senoidal.

2.3.1 Características das Fontes de Energia para a Soldagem a Arco Voltaico

Todas as fontes de energia de soldagem têm dois tipos de características operacionais, a característica estática e a característica dinâmica, cada uma afetando a soldagem de maneiras diferentes (AWS, 1993).

O comportamento de uma fonte submetida a cargas variadas (resistivas, capacitivas ou indutivas), em regime de trabalho, expressa a sua característica estática. Esta característica é representada através de gráficos tensão x corrente. A Figura 2.7 (a) e a Figura 2.7 (b) mostram curvas que representam as características estáticas de uma fonte de soldagem genérica.

Quanto às características estáticas, as fontes são classificadas em fontes do tipo corrente constante e do tipo tensão constante. Abaixo, apresenta-se a definição de cada uma delas de acordo com a associação americana que normaliza a fabricação de equipamentos elétricos – National Electrical Manufacturers Association, NEMA (AWS, 1993).

- Fonte de Corrente Constante (Figura 2.7 a) - é aquela que permite o ajuste da corrente de trabalho e que tem uma curva estática tensão-corrente que tende a produzir uma corrente de trabalho relativamente constante. A voltagem, para uma dada corrente, retrata a velocidade na qual o eletrodo consumível é alimentado no arco, exceto quando o eletrodo não consumível é usado, para o qual a tensão retrata a distância eletrodo-chapa.
- Fonte de Tensão Constante (Figura 2.7 b) - é aquela que permite o ajuste da voltagem de trabalho, e que tem uma curva estática tensão-corrente que tende a produzir uma voltagem de trabalho relativamente constante. A corrente, para uma dada voltagem, retrata a velocidade na qual o eletrodo consumível é alimentado no arco.

Quites e Dutra (1979) detalham melhor o que se entende por "voltagem ou corrente relativamente constante". De acordo com estes autores, uma fonte de corrente constante apresenta uma variação maior que 200mV/A na faixa de 20 a 30 volts, enquanto uma fonte de tensão constante apresenta variação menor do que 50 mV/A em qualquer condição de regulagem. Estas variações são devidas às limitações construtivas destes equipamentos.

As fontes de corrente constante são adequadas à soldagem manual, pois uma variação no comprimento do arco elétrico de soldagem provoca pequena variação na corrente de soldagem. Estas fontes também são utilizadas em processos semi-automáticos e automáticos, onde uma corrente de soldagem aproximadamente constante é requerida (Figura 2.7 a).

Uma máquina de soldagem de tensão constante é utilizada com processos que empregam eletrodo consumível alimentado continuamente, formando essencialmente um sistema auto-regulador (o sistema tende a se estabilizar apesar de mudanças momentâneas, tais como variações do comprimento do arco e flutuações na fonte de energia - controle interno) (AWS, 1993).

As chamadas fontes universais ou centrais de soldagem normalmente produzem tanto corrente como tensão constante.

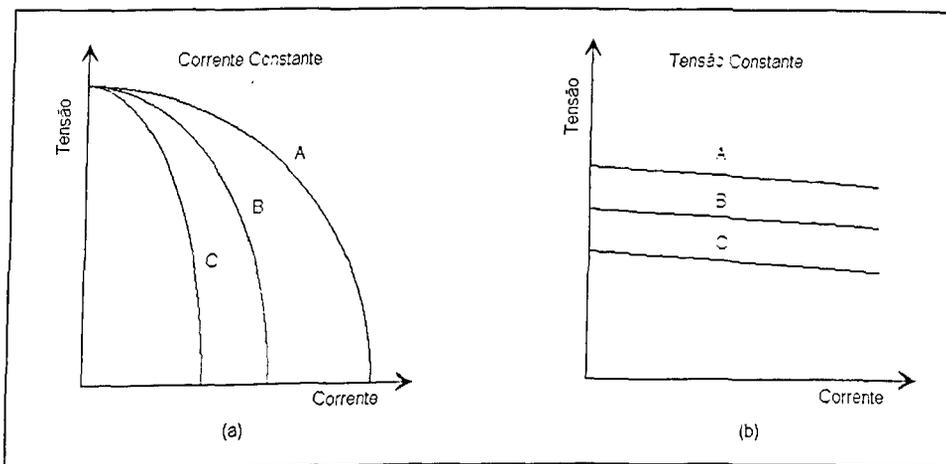


Figura 2.7 - Características estáticas para fontes de soldagem.

A característica dinâmica de uma fonte é determinada pela resposta transiente de corrente e de tensão. Esta característica pode ser visualizada através de gráficos tensão x tempo e corrente x tempo, para uma dada condição de soldagem, como indica a Figura 2.8. Outra forma empregada para representar o comportamento dinâmico da fonte é através de gráficos tensão x corrente conhecidos como campo de trabalho (Figura 2.9). Ressalta-se, entretanto, que estes gráficos dependem também do tipo de eletrodo e das condições de soldagem (Farias, 1998).

A inerente característica transiente do arco de soldagem é a principal razão para a grande importância dada à dinâmica de uma fonte de soldagem. A maioria dos arcos de soldagem estão continuamente mudando suas condições. Particularmente, os transientes ocorrem durante a abertura do arco, durante a transferência de metal e durante a extinção e reignição do arco tanto em corrente contínua como em corrente alternada. Outras causas de transientes incluem variações no comprimento do arco, na sua temperatura e nas características emissivas do meio. Estes transientes de arco podem aparecer e desaparecer em um intervalo de tempo tão curto como 0.001 segundo (Quites, 1989).

Nas fontes eletromagnéticas, para a soldagem com eletrodos revestidos, o usuário não dispõe de opções para a regulagem das características dinâmicas. Neste caso, apenas a

característica estática da fonte pode ser selecionada. A corrente de soldagem, para uma dada característica estática, dependerá basicamente do tipo e diâmetro do eletrodo assim como, do comprimento do arco (Farias, 1998).

As fontes modernas de soldagem, controladas eletronicamente, podem proporcionar várias alternativas para o controle das suas características dinâmicas. Uma destas características é a corrente de curto-circuito (I_{cc}) que desempenha papel fundamental na transferência metálica durante o curto-circuito. Desta forma, o controle adequado desta grandeza pode reduzir a salpicagem, evitar a colagem do eletrodo na peça e melhorar a soldagem fora de posição plana, resultando em maior produtividade (Farias, 1993).

A forma mais prática de se controlar a corrente de curto-circuito, nos projetos de fontes de soldagem, é permitindo que a corrente do arco aumente durante o tempo em que a gota permanece em contato com a poça de fusão. Isto é possível fixando-se, na fonte, uma tensão de referência de controle de curto-circuito (U_{rc}), abaixo da qual, considera-se que o processo está em curto-circuito. Sempre que a tensão no arco for menor do que o valor selecionado de U_{rc} , a corrente sobe imediatamente atingindo o valor da corrente de curto-circuito (I_{cc}) pré-definida pelo usuário (Farias, 1998). A Figura 2.10 ilustra este procedimento em dois casos. No segundo curto, a corrente originalmente regulada em 130 A, sobe até o valor pré-selecionado da corrente de curto-circuito (325 A) quando a tensão atinge o valor pré-fixado de 10 V (U_{rc}), ou seja, o controle funcionou como era esperado. No primeiro, entretanto, a ponte metálica que caracteriza o curto foi rompida antes da máquina conseguir elevar a corrente até o valor regulado. Este último caso ocorre geralmente quando a gota formada na ponta do eletrodo toca rapidamente a poça de fusão, rompendo a ponte metálica e transferindo uma quantidade muito pequena de material. Esta situação pode também ocorrer com maior frequência na soldagem com eletrodos celulósicos, onde os tamanhos médios das gotas são muito pequenos (Farias, 1998).

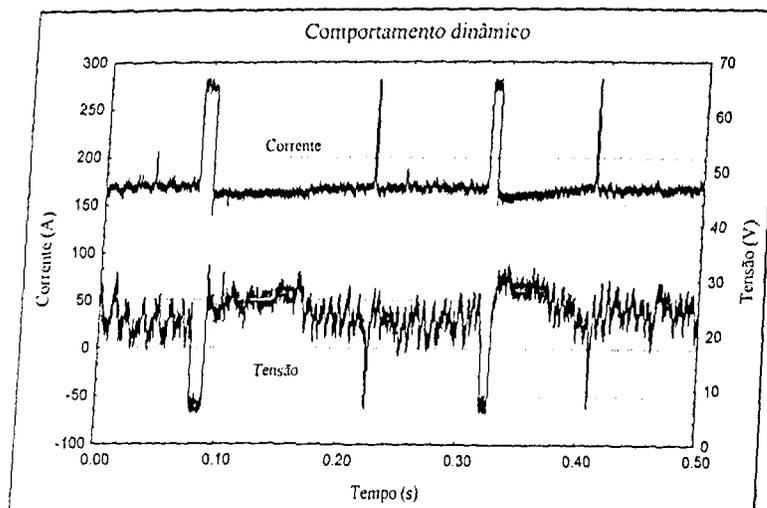


Figura 2.8 - Comportamento dinâmico da tensão e da corrente.

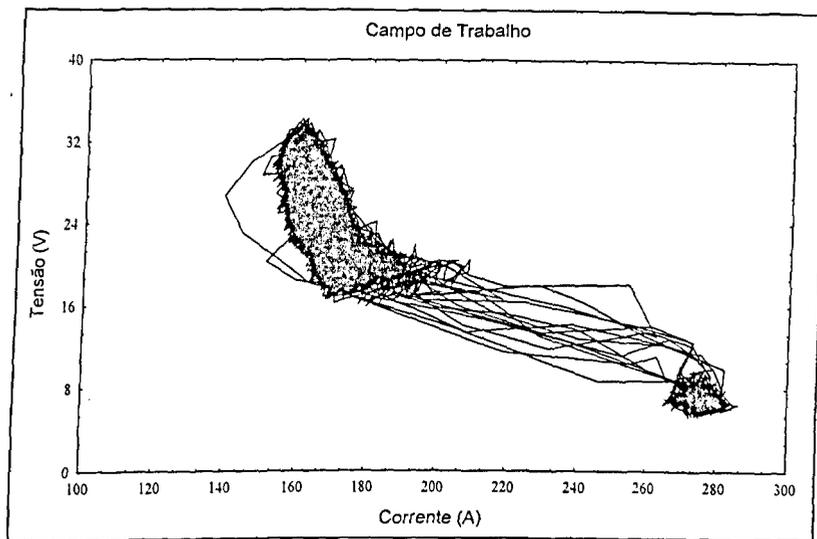


Figura 2.9 - Campo de trabalho para uma fonte de corrente constante.

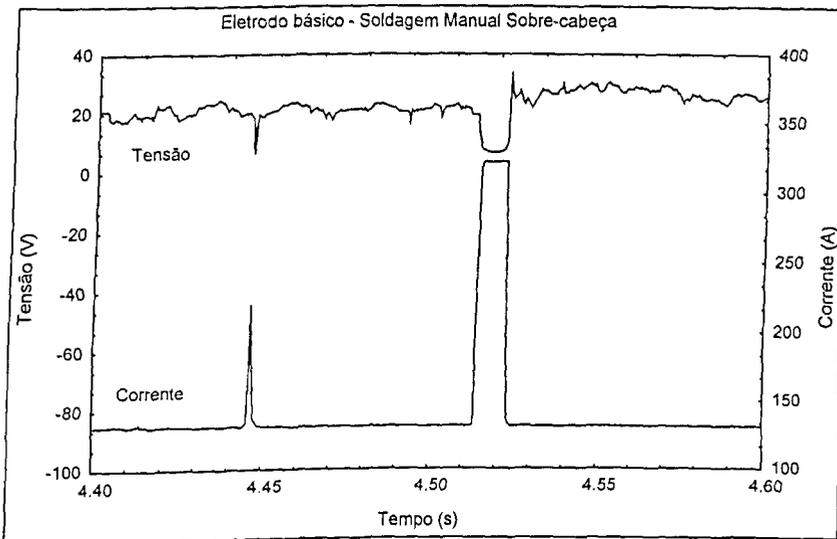


Figura 2.10 – Exemplo de soldagem com corrente de curto-circuito.

2.3.2 Tipos de Controle das Fontes Eletromagnéticas

As primeiras fontes de energia utilizadas na soldagem com eletrodo revestido foram as fontes eletromagnéticas (convencionais). Estes equipamentos são assim denominados porque utilizam controles eletromagnéticos para ajuste do sinal de saída (tensão e corrente), apresentando na maioria dos casos a configuração básica mostrada pela Figura 2.11. Algumas fontes combinam esta configuração com derivações no primário do transformador de entrada para ajustar o valor da tensão em vazio da mesma. Nas fontes de corrente constante, a queda de tensão sobre a indutância aumenta bastante quando ocorre uma pequena variação na corrente de soldagem. Nas fontes de tensão constante, a queda de tensão sobre a indutância

não aumenta significativamente com o aumento da corrente de carga, pois estas fontes possuem a indutância série de pequeno valor, o que permite uma ampla variação na corrente de soldagem sem que esta variação provoque considerável diminuição na tensão de saída (AWS, 1993).

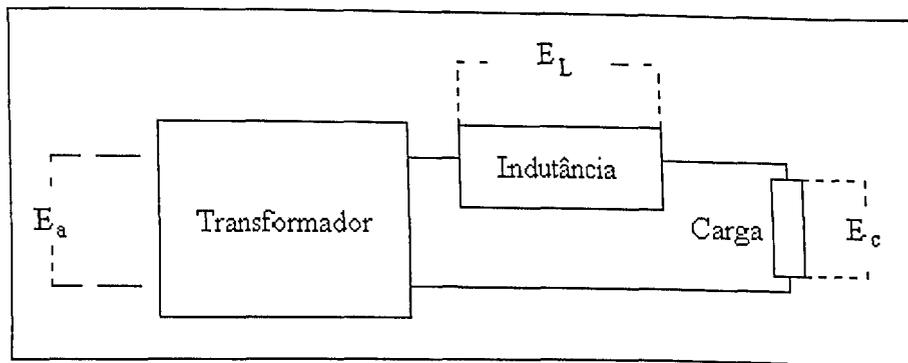


Figura 2.11 - Esquema típico para circuito com controle da corrente de saída.

Nas fontes para soldagem a arco elétrico que usam transformador ou transformador mais retificador, pode-se ajustar a característica estática utilizando uma impedância indutiva variável. Este tipo de controle é comumente empregado através dos mecanismos descritos abaixo (AWS, 1993; Norrish, 1992).

- Controle de escala no primário.
- Controle por ferro móvel.
- Controle por indutor variável.
- Controle por reator saturável.
- Controle por amplificador magnético.
- Controle por bobina móvel.
- Controle por reator de núcleo móvel.

2.3.3 Tipos de Controle das Fontes Eletrônicas

O desenvolvimento dos semicondutores de potência tais como: tiristores, mosfet's, igbt's e outros, possibilitou o desenvolvimento de fontes com controle eletrônico, e o posterior surgimento das fontes multi-processo. O que na verdade caracteriza uma fonte de energia eletrônica é a capacidade que a mesma deve ter de ser controlada remotamente através de sinais eletrônicos. Isto confere à soldagem grande versatilidade, além de viabilizar a soldagem em sistemas automatizados, pois permite uma comutação rápida de uma característica estática para outra.

A qualidade do sinal de saída nas fontes eletronicamente controláveis depende de dois fatores (Quites, 1989):

- a) da qualidade da unidade de potência, da qual se requerem altas velocidades de reação para efeito de regulação do processo;
- b) da qualidade da unidade eletrônica de controle, que vigia o processo pelos seus parâmetros, como corrente e tensão de soldagem, e determina um conseqüente controle dinâmico da unidade de potência e, assim, do processo.

De forma simplificada, os sistemas eletrônicos de controle empregados nas fontes de soldagem a arco elétrico são (Norrish, 1992): controle utilizando retificadores controlados a silício - SCR's; controle analógico - regulador série; controle com transistor chaveado no secundário; controle por chaveamento no primário - inversor e controles híbridos.

Todos estes tipos se constituem de uma unidade de potência e de uma unidade de controle. Entenda-se por este último uma fonte de sinal (eletronicamente controlada) que comunica os seus sinais de baixa potência à unidade de alta potência, estabelecendo assim, a cada instante, o desempenho desejado. Uma unidade eletrônica de potência, por sua própria natureza, não pode soldar, assim como um amplificador estereofônico sem a conexão com uma fonte de sinal (músico, violão etc.) não pode produzir som (Quites, 1989).

2.4 Estabilidade do Arco de Eletrodos Revestidos

A obtenção de juntas soldadas com boas propriedades mecânicas e características geométricas satisfatórias seria impossível se o arco não se mantivesse estável. Por isso, um dos aspectos mais importantes na análise do processo de soldagem a arco voltaico é a determinação da sua estabilidade (Farias, 1993).

Os profissionais da área de soldagem empregam o termo "estabilidade do arco" desde o surgimento do processo no século XIX. Várias décadas se passaram e ainda não se tem um consenso sobre sua definição (Farias, 1993). Como conseqüência, surgiram diferentes critérios qualitativos e quantitativos de análise da estabilidade do arco (Hazlett, 1956 e Patchett, 1974).

O estudo de todos estes critérios sugere uma reflexão maior sobre o próprio conceito de estabilidade do arco. Por um lado há que considerar a existência de dois fenômenos simultâneos: o transporte de carga elétrica e o transporte de massa (metal líquido). Por outro lado, há que considerar ainda a facilidade e a regularidade da ocorrência destes fenômenos durante a soldagem. Com base nestas considerações, um arco estável, tanto em CC como em CA, deve atender a duas ordens de requisitos (Farias, 1993):

- a) transferência de metal fácil e uniforme e
 b) transferência de carga elétrica fácil e uniforme.

Com base nos dois itens descritos acima, Farias (1993) propôs os seguintes índices para a avaliação da estabilidade do arco em CC, a partir dos valores instantâneos da tensão e da corrente de soldagem, para o conjunto eletrodo/fonte de energia.

2.4.1. Transferência de Metal

- a) Facilidade de transferência de metal: avaliada a partir dos índices F_{cc} e F_{tm} . O primeiro expressa a facilidade de ocorrência de curto-circuito, enquanto o segundo representa a facilidade de transferência metálica. Ou seja:

$$F_{cc} = \frac{1}{T} \cdot 1000 \quad (s^{-1}) \quad (2.1)$$

$$F_{tm} = \frac{1}{t_{cc}} \cdot 1000 \quad (s^{-1}) \quad (2.2)$$

onde: T - período médio de transferência (ms);

t_{cc} - tempo médio de curto-circuito (ms);

quanto maiores estes índices, maiores serão a facilidade de ocorrência de curtos-circuitos e de transferência metálica no curto-circuito.

- b) Regularidade da transferência de metal: avaliada pelos índices R_{cc} e R_{tm} , os quais representam o inverso do desvio padrão relativo do T e do t_{cc} . Ou seja:

$$R_{cc} = \frac{T}{\sigma_T} \quad (2.3)$$

$$R_{tm} = \frac{t_{cc}}{\sigma_{t_{cc}}} \quad (2.4)$$

onde: σ_T - desvio padrão dos valores de T (ms);

$\sigma_{t_{cc}}$ - desvio padrão dos valores de t_{cc} (ms);

quanto maiores estes índices, maior é a regularidade de transferência de metal.

2.4.2. Transferência de Carga Elétrica

- a) Facilidade de transferência de carga elétrica: avaliada a partir das condições de reabertura do arco após o curto-circuito (índice FE_1).

O índice E_1 representa a energia dispendida para a abertura do arco após o curto-circuito em CC. Ele indica a área sob a curva $P \times t$ durante a reabertura do arco após o curto-circuito, ou seja:

$$E_1 = \frac{(P_1 - P_r) \cdot t_1}{2000} \quad (W.s) \quad (2.5)$$

sendo:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \quad (W) \quad (2.6)$$

$$P_r = U_r \cdot I_r \quad (W) \quad (2.7)$$

onde: P_1 - potência no instante da reabertura do arco (W);

P_r - potência de referência (W);

I_1 - corrente no instante da reabertura (A);

I_r - corrente de referência (A);

t_1 - tempo de reabertura do arco (ms);

U_1 - tensão de reabertura do arco (V);

U_r - tensão de referência (V);

A facilidade de transporte de carga elétrica é expressa pelo inverso da energia E_1 , ou seja:

$$FE_1 = \frac{1}{E_1} \quad (W^{-1}s^{-1}) \quad (2.8)$$

quanto maior o valor de FE_1 , maior a facilidade de transferência de carga elétrica em CC.

b) Regularidade do transporte de carga elétrica: avaliada a partir do inverso do desvio padrão relativo do índice E_1 . Ou seja:

$$RE_1 = \frac{E_1}{\sigma_{E_1}} \quad (2.9)$$

quanto maior este valor, mais regular é a transferência de carga elétrica em CC.

Observa-se que a avaliação da transferência de carga elétrica em CC é feita com base nos fenômenos que ocorrem imediatamente após o curto-circuito. Neste caso, durante o curto-circuito, o comprimento da coluna do arco é nulo, enquanto a corrente permanece elevada ou aumenta, dependendo do tipo de fonte de soldagem. A reabertura do arco em CC é facilitada devido as altas temperaturas envolvidas (intensidade de corrente elevada). Deseja-se portanto a menor dissipação de energia neste momento ou seja, que a reabertura se dê com a menor potência possível. Os índices acima descritos baseiam-se no fato que, com eletrodos revestidos,

em condições normais, é muito comum a ocorrência de curtos-circuitos com transferência metálica durante a soldagem (Farias, 1993).

Percebe-se, portanto, que estes índices não se aplicam a soldagens com eletrodos revestidos sem ocorrência de curto-circuito. Neste caso, a partir dos valores instantâneos da tensão e da corrente de soldagem, pode-se avaliar apenas o transporte de carga elétrica. Em CC, sugere-se o valor médio da tensão de soldagem (U) para avaliar a facilidade de transferência de carga elétrica e o inverso do seu desvio padrão relativo (U/σ_U) para a avaliação da regularidade de transferência, em ambos os casos, para igual valor de corrente e comprimento do arco. Estes índices têm sido utilizados em diversos trabalhos experimentais (Farias, 1993; Santos, 1995; Farias et al, 1998; Farias, 1998; Silva, 1998). Maiores detalhes sobre os índices podem ser encontrados na literatura específica (Farias, 1993).

2.5 Aspectos Relevantes no Estudo da Estabilidade do Arco

Existe um grande número de fatores que interferem no comportamento do arco de soldagem: flutuações de tensão e corrente determinadas pela fonte de energia, movimentação contínua do arco para novas seções do componente soldado, fusão e transferência de metal, mudança de polaridade em CA, heterogeneidade do fluxo de partículas no arco etc. Além disso, a presença de óxidos e outros filmes no cátodo podem aumentar ou diminuir a estabilidade (Pokhodnya et al, 1991). Quando controla-se melhor a estabilidade do arco voltaico, pode-se evitar sérios problemas no metal fundido, tais como porosidade, fragilização por hidrogênio, mordeduras e falta de fusão. Na soldagem com eletrodos básicos, por exemplo, que são conhecidos pela transferência metálica com gotas relativamente grandes, o soldador pode precisar aumentar o comprimento do arco em um curto-circuito para que o eletrodo não "cole" na peça. Tal aumento eleva as chances da formação de poros (Pokhodnya et al, 1984). Outro fator que também pode contribuir para a formação de poros é o tempo de reabertura do arco após o curto-circuito (quanto maior este tempo, maior a possibilidade de contaminação do metal fundido).

O fluxo de massa é uma característica essencial na soldagem com eletrodo consumível, onde o eletrodo é ao mesmo tempo fonte de calor e de metal de adição. Por exemplo, o fluxo de gotas da ponta do eletrodo pode afetar a uniformidade da composição química do metal de solda. O fluxo de massa na coluna de plasma pode influenciar a forma da coluna, o seu nível de contaminação e a profundidade da depressão que ocorre na poça de fusão. O fluxo de massa pode afetar ainda o perfil da junta soldada e, em certos casos, pode até limitar a corrente de soldagem a ser usada (Lancaster, 1984).

Na soldagem com eletrodos revestidos, as perturbações no arco estão intimamente associadas com a transferência metálica, especialmente se o processo é acompanhado por curtos-circuitos (Lancaster, 1984; Pokhodnya et al, 1991). O fechamento do arco pela gota causa sua extinção, mas não ocorre a total desionização do comprimento do arco. Uma fina ponte de metal superaquecido, que evapora parcialmente, forma-se no final de um curto-circuito, sendo que o arco pode ser facilmente reiniciado nesta fase vapor-gás. De acordo com Dorn e Rippl (1986), um contato breve entre a ponta líquida do eletrodo e a poça de solda, sem qualquer transferência de metal, é indesejável e faz com que a gota cresça além do normal. A transferência por curto-circuito seguinte é então de longa duração e o valor de pico da corrente maior podendo-se observar na reignição seguinte um aumento dos respingos.

A frequência na qual os curtos-circuitos ocorrem depende do tipo de eletrodo e das condições de soldagem. De acordo com Farias (1993), o eletrodo básico geralmente apresenta uma frequência de curtos-circuitos menor que o eletrodo rutilico, que por sua vez possui uma frequência menor que o eletrodo celulósico. Com relação ao tempo médio de duração do curto-circuito, o eletrodo básico apresenta os maiores tempos e o eletrodo celulósico os menores. Ressalta-se que, além do tipo de revestimento, outros fatores afetam a frequência de curtos-circuitos. Dentre eles destacam-se a corrente e a tensão de soldagem, a umidade do revestimento, a taxa de fusão do eletrodo e o comprimento do arco.

A estabilidade do arco também depende do tipo de fonte de energia empregada. Mesmo entre fontes com características construtivas semelhantes, é possível haver variação do comportamento do eletrodo com relação às transferências de carga e metálica.

Farias (1993) comparou dois eletrodos básicos experimentais em cinco tipos de fontes de energia (eletrônicas chaveada no primário, chaveada no secundário, analógica e eletromagnéticas do tipo retificador e transformador/retificador). As soldagens, todas na posição plana, foram feitas através de um simulador automático, em simples deposição e polaridade positiva. Durante os ensaios, observou-se que a facilidade de abertura do arco aumentava com o aumento da tensão em vazio da fonte. Acredita-se que a corrente de curto-circuito também seja importante. Neste caso, deve-se destacar a ação benéfica desta corrente no instante da abertura do arco. Sabe-se que, quando a abertura do arco é feita por curto-circuito, há um aquecimento intenso da região de contato entre o eletrodo e o material de base e que este aquecimento, por efeito Joule, é suficiente para levar esta região à incandescência e proporcionar a adequada ionização do meio para o início de funcionamento do arco. Para que o eletrodo não cole na peça, durante a abertura do arco, o tempo de contato deve ser muito pequeno. Logo, para haver o adequado aquecimento, é necessário que a corrente de curto-circuito seja acionada, o que evita a colagem do eletrodo na peça (Farias, 1998). Em relação à transferência de carga elétrica, as fontes apresentaram comportamentos semelhantes. Na

transferência metálica, a variável mais importante, afetada na soldagem em corrente contínua, foi o tempo médio de curto-circuito. Este tempo mostrou-se significativamente mais curto na fonte que permitia a corrente de soldagem subir até valores elevados (cerca do dobro da corrente de soldagem) durante o curto-circuito. Deste modo, o "efeito constricção" é intensificado, acelerando a transferência da gota para a poça de fusão. A fonte neste caso, eletromagnética do tipo transformador/retificador, não possuía ajuste da corrente de curto-circuito. Nas demais fontes, a corrente não sofreu variações consideráveis no instante do curto-circuito, de forma que no mecanismo de transferência predomina a ação da tensão superficial da poça líquida. Vale salientar que, se por um lado, uma transferência rápida caracteriza um arco mais estável, por outro lado, o aumento da quantidade de salpicos, causado pelo deslocamento da gota por efeito de elevadas correntes de curto-circuito, reduz a eficiência de deposição do eletrodo (Farias, 1993). Além disso, a salpicagem excessiva pode dificultar a limpeza do cordão de solda.

Farias (1993) conclui que a corrente de curto-circuito é uma das características mais importantes das fontes analisadas. Ela influencia o campo de trabalho na curva "tensão x corrente", a facilidade de transferência de metal e a facilidade de transferência de carga elétrica, além de afetar as características operacionais dos eletrodos, especialmente a salpicagem. Outra conclusão deste estudo refere-se à ocorrência de interação entre o tipo de fonte e o tipo de eletrodo, especialmente na soldagem em CA. Um eletrodo pode apresentar um excelente desempenho em um tipo de fonte, mas não funcionar bem em outro.

A corrente de curto-circuito também mostrou-se importante em outro estudo. Santos (1995) comparou uma fonte eletromagnética convencional e uma fonte eletrônica inversora através de ensaios automatizados de simples deposição na posição plana, utilizando cinco tipos de eletrodos comerciais. As soldagens foram realizadas em corrente contínua com polaridade positiva. Tanto a fonte eletromagnética como a fonte inversora utilizadas permitiam a corrente de soldagem subir até valores mais elevados no momento do curto-circuito, mas sem a possibilidade de ajuste deste valor de pico. Entretanto, as velocidades de subida da corrente para as duas fontes são diferentes, sendo a fonte inversora a de maior di/dt . Esta diferença construtiva levou a resultados semelhantes aos de Farias (1993), ou seja, os tempos de duração dos curtos-circuitos foram menores para a fonte eletrônica. O autor acrescenta que na comparação das duas fontes em ensaios de extinção do arco, a fonte inversora apresentou os maiores tempos de arco aceso (melhor característica anti-colagem). Quanto à regularidade da ocorrência de curtos-circuitos, a fonte inversora apresentou uma tendência de maior irregularidade nos tempos dos curtos. O autor supõe que esta menor regularidade da fonte inversora esteja vinculada à sua maior velocidade de crescimento da corrente: como as correntes de pico são maiores e os tempos menores, maiores são os gradientes de corrente

(Santos, 1995). Deste modo, talvez um crescimento muito rápido da corrente crie instabilidades na gota, provocando diferentes tempos e frequências de curtos-circuitos. De maneira geral, o número total de curtos-circuitos para as duas fontes é igual. Mas a fonte inversora apresentou transferência por curtos-circuitos de gotas menores e mais transferências sem curto do que a convencional. Em relação à facilidade do transporte de carga elétrica, as fontes testadas foram semelhantes, porém a inversora apresentou menor regularidade. Santos (1995) conclui que, entre as duas fontes testadas, não houve implicações nas características operacionais durante as soldagens da grande maioria dos tipos de eletrodos. Entretanto, além das vantagens inerentes às fontes inversoras (como o menor tamanho), a fonte inversora em questão apresentou maiores facilidades de manipulação pelo soldador, por melhor evitar a colagem do eletrodo.

Silva (1998) também comparou dois tipos de fontes de energia (eletrônica inversora x convencional eletromagnética), como parte de um estudo sobre o efeito do teor de magnésio no revestimento de eletrodos rutilicos. Foram utilizados eletrodos experimentais da classe AWS E7024 (diâmetro de 3,25mm) com cinco variações do teor de magnésio metálico no revestimento. Os ensaios foram feitos por um soldador qualificado na posição plana com simples deposição e polaridade direta (CC⁺). A boa operacionalidade dos eletrodos rutilicos proporcionou facilidade de abertura de arco em ambas as fontes. Quanto à transferência de carga elétrica, a fonte inversora apresentou os maiores valores do inverso do desvio padrão relativo da corrente e da tensão, sendo tal indicativo de maior estabilidade. O modo de transferência metálica na inversora não foi por curto-circuito, enquanto que na fonte convencional ocorreu este tipo de transferência. Sabe-se que as fontes que possuem maiores correntes de curto-circuito facilitam a transferência da gota, diminuindo o tempo de curto-circuito, e podendo ainda reduzir a taxa de deposição dos eletrodos pela maior salpicagem (Farias, 1993). No entanto, a velocidade de crescimento da corrente no instante do curto-circuito também deve ser considerada. A fonte eletromagnética utilizada permitia correntes de curto-circuito com valores levemente superiores aos apresentados pela fonte inversora. Entretanto, as frequências e os tempos de curto-circuito são menores para esta fonte. Neste caso, a rápida velocidade de subida da corrente, típica das fontes eletrônicas, contribuiu para o imediato destacamento das gotas logo no início do curto-circuito. Isto pode contribuir também para a redução da frequência de curtos-circuitos (Silva, 1998).

Em um trabalho recente, Farias et al (1998) estudaram o efeito do ajuste da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle de curto-circuito sobre a estabilidade do arco. Foram utilizados um sistema automático de soldagem e uma fonte eletrônica chaveada no secundário. Os ensaios foram de simples deposição, na posição plana, em CC⁺ e com três tipos de eletrodos comerciais (básico, rutilico e celulósico) de diferentes diâmetros. A análise

da transferência de carga elétrica indicou que a corrente de curto-circuito é uma das maiores responsáveis pela variação tanto da facilidade como da regularidade desta transferência. A corrente de curto-circuito também exerceu grande influência sobre a facilidade de ocorrência de curtos-circuitos e, principalmente, sobre a facilidade de transferência metálica. A exemplo do que foi verificado em trabalhos anteriores, para valores elevados da corrente de curto-circuito, no instante em que a gota toca a poça de fusão, há um brusco aumento da corrente, rompendo a ponte líquida e evitando a ação da tensão superficial no sentido de reter uma maior quantidade de metal líquido em contato com a poça de fusão. Neste caso, a ação da corrente se sobrepõe ao efeito da tensão superficial. Isto causa um aumento na frequência de curtos-circuitos sem transferência e diminui, quando não elimina completamente, os curtos com transferência (Farias, 1998). A tensão de referência não afetou o processo de soldagem nas condições analisadas, mas o autor observa que ela deve ser mantida como um parâmetro ajustável na fonte de energia. A justificativa para isto está nos diferentes valores de tensão de referência para controle de curto-circuito para os diferentes processos de soldagem e para os diferentes tipos de eletrodos (Farias, 1998).

A análise destes últimos trabalhos mostra que a corrente de curto-circuito e a velocidade de subida desta corrente afetam sobremaneira a transferência metálica dos eletrodos revestidos. De uma forma geral, as fontes que apresentam maiores valores de corrente de curto-circuito, sejam eletrônicas, sejam eletromagnéticas, apresentam uma maior facilidade de transferência metálica, além de reduzir os riscos de colagem do eletrodo na peça. Estas fontes podem apresentar um desempenho diferente na soldagem fora da posição plana, onde a ação da gravidade dificulta a transferência (Farias, 1998). A Figura 2.12 ilustra a influência da corrente de curto-circuito sobre a facilidade de transferência metálica. Os dados apresentados são referentes à soldagens manuais, com um só tipo de eletrodo, em quatro tipos de fontes com características estáticas e dinâmicas diferentes (Farias, 1998).

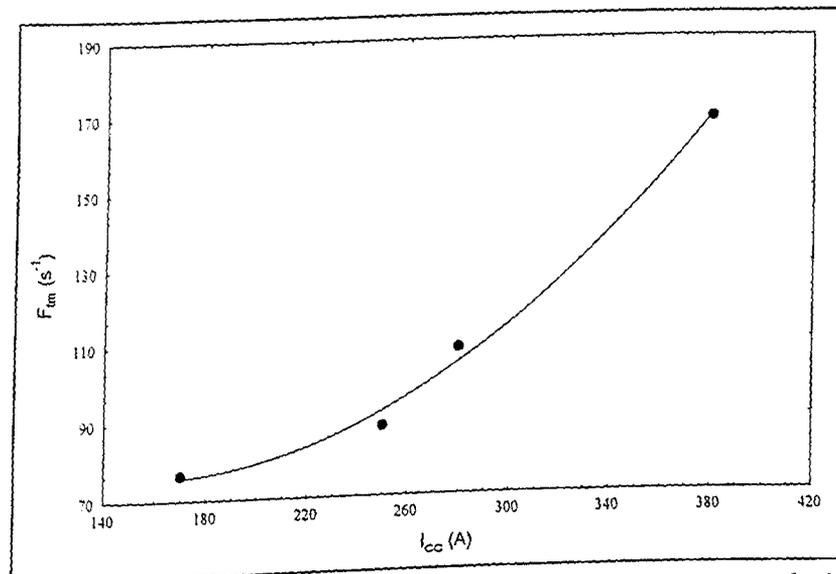


Figura 2.12 - Efeito da corrente de curto-circuito sobre a facilidade de transferência metálica.

2.6 Características Econômicas de Eletrodos Revestidos

A taxa de fusão (TF), a taxa de deposição (TD) e a eficiência de deposição (ED) constituem as características econômicas dos eletrodos revestidos. Enquanto a taxa de fusão representa a quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo, a taxa de deposição representa a quantidade de material efetivamente transferida para a solda na mesma unidade de tempo. A relação entre TD e TF é a eficiência de deposição, expressa em porcentagem de (Farias, 1993). Desta forma, a eficiência de deposição está relacionada com a quantidade de material perdido por salpicos e pela escória, e a quantidade de metais contidos no revestimento transferidos para a solda (Essers et al, 1971). As características econômicas do eletrodo dependem do tipo de revestimento, do tipo de fonte de energia, do tipo e da intensidade de corrente e dos demais parâmetros de soldagem (Farias, 1993).

As principais fontes de calor que contribuem para a taxa de fusão dos eletrodos revestidos estão abaixo relacionadas (Quites e Dutra, 1979).

- o calor gerado no arco e na conexão arco-eletrodo;
- o calor gerado pela resistência elétrica do eletrodo (efeito Joule).

O aquecimento dos eletrodos, por efeito Joule, é dependente da geometria e composição da alma, mas de acordo com Waszink (17 apud Kobayashi, 1986), o efeito Joule é a menor parcela de energia térmica necessária para aquecer e fundir o eletrodo revestido. O eletrodo pode ganhar ou perder calor por radiação e/ou convecção. Entretanto, tais perdas são tidas como desprezíveis na maioria das condições práticas de soldagem. Além disso, perde-se calor por condução do extremo fundido à extremidade do contato elétrico. Este calor perdido

também tem sido considerado desprezível nas condições comuns de soldagem (Quites e Dutra, 1979). Portanto, a variação da taxa de fusão é dependente, principalmente, dos fenômenos que ocorrem na região da conexão arco-eletrodo, que pode ter características totalmente diferentes, dependendo da polaridade e do meio ionizante utilizados (Kobayashi, 1986).

O tipo de transferência metálica através do arco elétrico também afeta a taxa de fusão do eletrodo (Lancaster, 1984). É de se esperar que uma transferência metálica em gotas menores aumente a taxa de fusão.

Outro fator que pode alterar a taxa de fusão é a geometria do arco, fazendo com que a frequência de transferência das gotas seja afetada pelo gradiente de pressão ao longo do comprimento do arco (12 apud Kobayashi, 1986). Quanto menor o diâmetro e/ou comprimento do arco, menor é esse gradiente, diminuindo, assim, a ação de arraste das gotas pelo jato de plasma e, conseqüentemente, dificultando a transferência. A alta condutibilidade do meio, por exemplo, CO₂, resulta em um arco de pequeno diâmetro, podendo surgir forças ascendentes que agem sobre a gota em fusão (11 apud Kobayashi, 1986).

A taxa de deposição está vinculada aos fatores que afetam a taxa de fusão e à outros como o número de salpicos e a quantidade de metais no revestimento, como, por exemplo, o pó de ferro (Kobayashi, 1986).

A salpicagem é uma das piores falhas de certos processos de soldagem a arco pois ela é responsável pela redução da taxa de deposição, além de dificultar a limpeza do cordão de solda e, em muitos casos, a remoção da escória. As principais fontes de salpicos na soldagem ao arco voltaico estão abaixo indicadas (Lipei et al, 1988 e Zaruba, 1970).

- a) evolução dos gases: explosão da gota e/ou da poça de fusão;
- b) curto-circuito ou desintegração explosiva do "pescoço" ("efeito constricção" na transferência por curto-circuito);
- c) desintegração da gota devido ao tamanho excessivo;
- d) transferência irregular de metal devido à movimentação das manchas catódica e anódica;
- e) impacto do arco sobre a poça de fusão no instante da sua reignição após o curto-circuito;
- f) choque das gotas na poça de fusão, e
- g) instabilidade do arco devido à presença de uma nuvem de íons negativos (F⁻, por exemplo) que barram o fluxo de elétrons.

Uma maneira de se diminuir a salpicagem na soldagem, no caso do eletrodo revestido, é a introdução de pó de ferro no revestimento (12, 16, 22 apud Kobayashi, 1986). Nos eletrodos sem pó de ferro, a corrente é transportada, em sua totalidade, pela alma do eletrodo. Nos eletrodos com pó de ferro, somente parte da corrente passa pela alma, já que o revestimento apresenta condutividade elétrica parcial, podendo surgir um arco secundário

(entre o revestimento e o metal de base) em adição ao arco primário entre a alma e o metal de base. Durante o processo de transferência do metal fundido do eletrodo, o módulo da força de explosão, que atua no estrangulamento da gota, é menor, como conseqüência de somente parte da corrente ser transportada pelo núcleo. Além disso, a formação de um "canhão" na ponta do eletrodo, também facilitada pelo pó de ferro, pode diminuir a salpicagem (Kobayashi, 1986).

Farias (1993) comparou dois eletrodos básicos experimentais em cinco tipos de fonte de energia (eletrônicas chaveada no primário, no secundário e analógica e eletromagnéticas do tipo retificador e transformador/retificador). As soldagens, todas na posição plana, foram feitas através de um simulador automático, em simples deposição e polaridade positiva. Os resultados indicaram que a taxa de fusão foi equivalente para todas as fontes utilizadas, para um mesmo nível de corrente média. Já a taxa de deposição foi menor para a fonte do tipo transformador/retificador. Esta fonte, devido às elevadas correntes de curto-circuito, originou uma grande quantidade de salpicos no instante do desprendimento da gota, enquanto que as demais, com baixas correntes de curto-circuito, causaram menos salpicagem (Farias, 1993).

Santos (1995) comparou uma fonte eletromagnética convencional e uma fonte eletrônica inversora através de ensaios com um simulador de soldagem, em simples deposição, na posição plana e utilizando cinco tipos de eletrodos comerciais. A corrente empregada foi contínua com polaridade positiva. Verificou-se que as fontes utilizadas apresentaram desempenhos equivalentes quanto às características econômicas, exceto para os eletrodos celulósicos, onde a eficiência de deposição foi maior para a fonte eletromagnética. O eletrodo celulósico, por não apresentar proteção por escória, é mais sensível aos efeitos eletromagnéticos do arco. Logo, para a fonte inversora, que apresenta maiores respostas dinâmicas (maiores velocidades de subida e maiores valores da corrente de curto-circuito) espera-se maiores impactos do arco na poça de fusão, resultando num maior nível de salpicagem. Segundo Lipei et al (1988), o impacto do arco na poça de fusão é bem maior quando as correntes de pico são maiores.

Silva (1998) também comparou dois tipos de fontes de energia (eletrônica inversora x convencional eletromagnética), como parte de um estudo sobre o efeito do teor de magnésio no revestimento de eletrodos rutilicos. Foram utilizados eletrodos experimentais rutilicos da classe AWS E7024 (diâmetro de 3,25mm) com cinco variações do teor de magnésio metálico no revestimento. Os ensaios foram feitos por um soldador qualificado na posição plana com simples deposição e polaridade direta (CC). Em contraste com os trabalhos acima, os resultados indicaram diferenças estatisticamente relevantes na taxa de fusão, bem como na taxa de deposição entre as duas fontes. A fonte eletromagnética permitia à corrente subir até valores de curto-circuito mais altos que a inversora, mas esta última apresentou velocidades de

subida maiores, embora para valores absolutos menores. A autora conclui pela necessidade da realização de novos experimentos para a elaboração de hipóteses mais sólidas sobre a influência da fonte na taxa de fusão dos eletrodos. Vale salientar que para as fontes de energia onde ocorrem grandes flutuações da corrente, obtém-se grandes diferenças entre os valores das correntes média e eficaz. Logo, para uma mesma corrente média, uma fonte que apresenta maior corrente eficaz (resultante de grandes flutuações de corrente) pode proporcionar uma maior taxa de fusão do eletrodo, principalmente para menores diâmetros onde o aquecimento por efeito Joule é maior.

Em um trabalho recente, Farias et al (1998) estudaram o efeito do ajuste da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle de curto-circuito sobre as características econômicas de eletrodos revestidos. Foram utilizados um simulador de soldagem e uma fonte eletrônica chaveada no secundário. Os ensaios foram de simples deposição, na posição plana, em CC⁺ e com três tipos de eletrodos comerciais (básico, rutilico e celulósico) de diferentes diâmetros. As variáveis independentes deste trabalho foram: tipo de eletrodo, combinação corrente de soldagem/diâmetro do eletrodo, velocidade de soldagem, corrente de curto-circuito e tensão de referência para controle de curto-circuito. Verificou-se que o tipo de eletrodo e a combinação corrente/diâmetro foram os maiores responsáveis pela variação da taxa de deposição (97% da resposta, segundo a análise de variância). Isto é indicativo de que, para as condições empregadas neste trabalho, a procura por uma maior taxa de deposição passa primordialmente pela escolha correta do tipo de eletrodo e de um maior diâmetro. No entanto, a partir destes resultados, foi possível mostrar que existe uma contribuição individual, apesar de pequena, tanto da corrente de curto-circuito como da tensão de referência para controle de curto-circuito, para o aumento da taxa de deposição (Farias et al, 1998). Também para a eficiência de deposição, foram o tipo de eletrodo e a combinação corrente/diâmetro os fatores que mais influenciaram na resposta (quase 89% da resposta, segundo a análise de variância). Os autores concluem que, pelo menos para as condições de soldagem empregadas (posição plana, simples deposição, sem tecimento), o benefício do uso do controle e ajuste da corrente de curto-circuito e da tensão de curto-circuito, do ponto de vista da produtividade, é pequeno. Entretanto, a verificação da influência deste controle em outras condições de soldagem (juntas com chanfro, soldagens fora da posição, tecimento do cordão) poderia levar a resultados diferentes (Farias et al, 1998).

Capítulo III

Planejamento Experimental - Método Taguchi

3.1 Introdução

O Projeto Robusto (ou Método Taguchi) é uma metodologia que tem como objetivo reduzir a variabilidade no desempenho de um produto ou processo através da escolha de um projeto adequado, ou seja, do projeto mais robusto. Seu princípio fundamental consiste em minimizar o efeito das causas de variação de qualidade sem, contudo, eliminar estas causas (Phadke, 1989).

Na prática, o projeto robusto se implementa através da realização de experimentos nos quais se introduzem modificações sistemáticas nos fatores de controle, a fim de tornar as respostas (resultados) insensíveis à presença de fatores de ruído. Os fatores de controle são os parâmetros de projeto (fatores que são controlados ou ajustados pelo operador), enquanto que os ruídos são fatores não controláveis ou cujo custo de controle seja oneroso.

A maior parte dos produtos tem grande número de características de desempenho. Mas não é necessário, nem econômico, aperfeiçoar todas as características de um produto. A filosofia do Método Taguchi baseia-se em aperfeiçoar somente as mais influentes. Estas características são chamadas de "respostas". O valor ideal da característica é denominado "valor ou desempenho alvo" e a variação da resposta em torno do valor alvo é conhecida como "variação do desempenho" (Phadke, 1989).

As duas principais ferramentas usadas no Projeto Robusto são: (1) Arranjos Ortogonais, usados para estudar vários parâmetros do projeto simultaneamente, e (2) Razões sinal/ruído, que fornecem uma medida quantitativa de qualidade (Phadke, 1989).

3.2 Arranjos Ortogonais

Uma matriz experimental consiste de um conjunto de experimentos arranjados em uma matriz onde mudam-se os valores de vários parâmetros (de um produto ou processo), que deseja-se estudar, de um experimento para outro. Após a condução dos ensaios, os dados de todos os experimentos do conjunto são reunidos e analisados para determinar o efeito dos vários parâmetros (Phadke, 1989).

As matrizes experimentais são planejadas através de matrizes especiais, chamadas Arranjos Ortogonais. Os Arranjos Ortogonais permitem que os efeitos de vários fatores sejam

determinados simultaneamente, e, em conjunto com os experimentos de confirmação, são uma poderosa ferramenta para a economia do número de ensaios e para a detecção de interações entre os fatores. O Método Taguchi possui uma série de Arranjos Ortogonais padrões e a escolha de um ou outro depende do número de fatores e seus níveis, da conveniência da mudança dos níveis de um determinado fator e das possíveis interações a serem estudadas. A Tabela 3.1 mostra um arranjo do tipo L_{27} com 13 fatores de 3 níveis, onde cada coluna representa um fator e cada linha representa o nível de cada fator durante determinado experimento. Para melhor entendimento da tabela, apresenta-se um exemplo: no experimento 8, tem-se que o fator 1 deve ser ajustado no nível 1, o fator 2 no nível 3 e assim por diante (Phadke, 1989).

No Projeto Robusto, a ortogonalidade dos arranjos é interpretada de forma combinatória, ou seja, para qualquer par de colunas da matriz, todas as combinações de níveis de fatores ocorrem, e ocorrem um igual número de vezes.

3.3 Razão Sinal/Ruído

Para cada linha de experimentos da matriz, os resultados são reunidos em um sumário estatístico por uma função objetiva (η), chamada razão sinal/ruído (S/N). A razão sinal/ruído é uma medida de qualidade, usada para quantificar os efeitos de diferentes fatores na robustez do sistema. O uso da razão S/N tem a vantagem que, uma vez obtido o melhor ajuste que minimize a sensibilidade ao ruído para um dado valor médio de um parâmetro estudado, esse ajuste também é válido para outro valor médio deste parâmetro (Phadke, 1989).

Os problemas no Projeto Robusto podem ser divididos em duas classes principais: problemas estáticos, onde o valor alvo para a característica de qualidade é fixo, e problemas dinâmicos, onde espera-se que a característica de qualidade siga um fator-sinal. Para cada classe de problema, tem-se um conjunto de funções específicas. No caso da soldagem, são mais comuns os problemas estáticos e tem-se como exemplos de funções as seguintes: menor-é-o-melhor, nominal-é-o-melhor e maior-é-o-melhor (Phadke, 1989).

Tabela 3.1 - Arranjo Ortogonal L₂₇

Projeto Robusto													
Matriz ortogonal L ₂₇ : 13 fatores com 3 níveis													
(Fatores são especificados por números)													
Exp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	2	3	1	3	1	2	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2
18	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
19	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
20	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
21	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
22	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
23	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
24	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
25	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
26	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
27	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
28	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

3.4 Aditividade

No Projeto Robusto, a combinação ótima dos valores é estabelecida pelo exame do efeito de cada fator separadamente. A justificativa para este procedimento vem do uso do Arranjo Ortogonal para o planejamento da matriz experimental e do uso do modelo aditivo como aproximação (Phadke, 1989).

Em um modelo aditivo ideal, o efeito total de vários fatores é igual à soma dos efeitos dos valores individuais. Se o efeito de um fator depende do nível de outro fator, então os dois fatores estão interagindo. No modelo aditivo, essas interações são consideradas como erros. No entanto, as interações só são descobertas durante a análise de dados.

Quando o modelo aditivo mostra-se válido, tem sido demonstrado que é desnecessário experimentar todas as combinações de níveis dos fatores (Farias et al, 1998; Phadke, 1989; Mc Connell e Mc Pherson, 1997). Felizmente, na maioria das aplicações práticas de engenharia, o modelo aditivo fornece uma excelente aproximação (Phadke, 1989). Isto torna o Método Taguchi uma poderosa ferramenta para a economia do número de ensaios necessários no estudo de vários fatores de controle simultaneamente.

3.5 Interação entre os Fatores

O conceito de interações pode ser entendido a partir da análise da Figura 3.1. A Figura 3.1-a mostra o caso onde não há interação entre os dois fatores A e B. As linhas paralelas indicam que mudando-se o nível do fator A para A_1 , A_2 ou A_3 , a correspondente mudança na resposta (η) é a mesma independentemente do nível do fator B. O modelo aditivo é perfeito para esta situação. As Figuras 3.1-b e 3.1-c mostram dois exemplos da presença de interação. Na figura 3.1-b, as linhas não são paralelas, mas a direção de progresso não muda. Neste caso, os níveis ótimos identificados pelo modelo aditivo são ainda válidos. Já na Figura 3.1-c, não só as linhas não são paralelas, como a direção de progresso também não é consistente. Em tal caso, os níveis ótimos indicados pelo modelo aditivo podem ser enganadores. O tipo de interação da Figura 3.1-b é chamado, por vezes, de interação sinérgica enquanto que o da Figura 3.1-c é chamado antisinérgica (Phadke, 1989). Nota-se pela Figura 3.1 que estimar um interação significa determinar o "grau" de não-paralelismo entre as retas dos efeitos dos fatores (Farias et al, 1998). A presença de interações entre fatores pode ser estudada pelo Método Taguchi. Neste caso, existe a necessidade de mais parâmetros no modelo aditivo, aumentando com isso o tamanho da matriz experimental e, conseqüentemente, o número de experimentos. Em algumas situações, o estudo de interações pode ser muito importante.

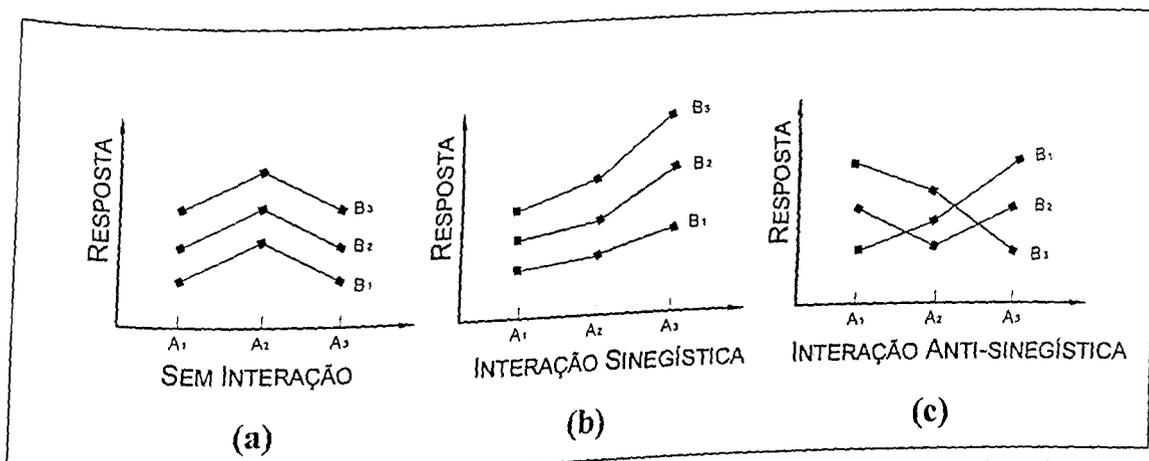


Figura 3.1 - Exemplos de interações entre os fatores A e B, em três níveis, sobre a resposta

3.6 Graus de Liberdade

O primeiro passo na construção de um Arranjo Ortogonal é a contagem dos graus de liberdade, definidos como o número total de comparações independentes que podem ser feitas dentro de um conjunto de dados. Os graus dizem o número mínimo de experimentos que devem ser conduzidos para o estudo de todos os fatores de controle escolhidos. Regra geral, o número de graus de liberdade associados com um fator é igual ao número de níveis deste fator menos um. Já o valor dos graus associados com as interações é dado pelo produto dos graus de liberdade para cada um dos fatores em questão (Phadke, 1989).

3.7 Razão de Variância (F)

Em projetos experimentais estatísticos clássicos, testes de significância como o teste F, possuem grande importância. Eles são usados para determinar se determinado fator deve ser incluído no modelo. Em contraste, as razões F são calculadas no Projeto Robusto para determinar a importância relativa dos vários fatores de controle em relação à variância do erro (Farias et al, 1998). Um grande F significa que o efeito do fator é grande quando comparado com a variância do erro. Também, quanto maior o valor de F, mais importante é aquele fator na influência da resposta do processo (η). Portanto, o valor de F pode ser usado para ordenar o efeito dos fatores. O melhor nível de fator é escolhido de acordo com os custos e benefícios associados.

Um valor de F menor que 1 significa que o efeito do fator é menor que o erro do modelo aditivo. Um valor de F maior que 2 significa que o efeito do fator não é tão pequeno, enquanto um valor maior que 4 significa que o efeito do fator é bem expressivo (Phadke, 1989).

3.8 Experimento de Confirmação (Verificação)

O Método Taguchi permite a predição da melhor resposta possível com base nos dados da matriz experimental. Após a determinação das condições ótimas e a predição da resposta nestas condições, deve-se conduzir um ensaio com os ajustes ótimos dos parâmetros e comparar o valor observado de η com a predição. Se os valores de η predito e observado são próximos, pode-se concluir que o modelo aditivo é adequado para descrever a dependência de η dos vários parâmetros. Do contrário, se a observação é drasticamente diferente da predição, diz-se então que o modelo aditivo é inadequado. Isto é evidência de forte interação entre os parâmetros (Phadke, 1989).

3.3 Passos do Projeto Robusto

O planejamento experimental através do Método Taguchi segue os 8 passos seguintes (Phadke, 1989).

PASSO 1 - Identificar a função principal, os efeitos laterais e os modos de falha. Este passo requer conhecimento de engenharia do produto ou processo e o ambiente do consumidor.

PASSO 2 - Identificar fatores de ruído e as condições de teste para avaliar a perda de qualidade. As condições de teste são selecionadas com o intuito de capturar o efeito dos fatores de ruído mais importantes. É vital que as condições de teste permitam uma estimativa consistente da sensibilidade aos fatores de ruído para quaisquer combinações dos níveis dos fatores de controle.

PASSO 3 - Identificar a característica de qualidade a ser observada e a função objetiva a ser otimizada. Deve-se evitar a tentação de usar a percentagem de produtos que satisfazem as especificações como função objetiva a ser otimizada. Tal procedimento leva à uma redução na eficiência do experimento.

PASSO 4 - Identificar os fatores de controle e seus níveis. Quanto mais complexo for o produto ou processo, mais fatores de controle devem ser usados e vice-versa. Para cada fator de controle, dois ou três níveis são selecionados, dos quais um é geralmente a condição inicial. Os níveis devem ser escolhidos suficientemente distantes de forma a cobrir uma região experimental razoável, pois a sensibilidade aos fatores de ruído freqüentemente não muda com pequenas mudanças no ajuste dos fatores de controle.

PASSO 5 - Compor a matriz e definir o procedimento de análise de dados. O uso dos Arranjos Ortogonais é uma maneira eficiente de estudar o efeito de vários fatores de controle simultaneamente. Os fatores de controle obtidos são válidos dentro da região experimental estudada e fornecem uma forma de teste da aditividade dos efeitos dos fatores. O esforço experimental necessário é bem menor quando comparado à outros métodos de experimentação, tais como tentativa e erro, um fator por vez e experimentos completamente fatoriais. A análise dos dados também é fácil quando os Arranjos Ortogonais são usados. A escolha de um Arranjo Ortogonal para um projeto particular depende do número de fatores e de seus níveis, da conveniência da mudança de níveis para um determinado fator e outras considerações práticas.

PASSO 6 - Conduzir o experimento matricial. Os níveis dos vários fatores de controle devem ser mudados quando se passa de um experimento a outro na matriz. O cuidado no ajuste dos níveis é essencial. Quaisquer experimentos errôneos ou faltosos precisam ser repetidos.

PASSO 7 - Analisar os dados, determinar os níveis ótimos dos fatores de controle e prever a performance com estes níveis.

PASSO 8 - Conduzir o experimento de verificação (confirmação) e planejar ações futuras. O propósito deste último e crucial passo é verificar se as condições ótimas sugeridas pelos experimentos matriciais efetivamente apresentam as melhoras previstas. Se há correspondência entre as melhoras observadas e as projetadas, adota-se então as condições ótimas sugeridas. Caso contrário, conclui-se que o modelo aditivo não é válido e encontram-se maneiras de solucionar o problema. As ações corretivas incluem a busca de melhores características de qualidade, ou razões sinal/ruído, ou diferentes fatores de controle e níveis ou o estudo de algumas interações entre os fatores.

Capítulo IV

Equipamentos e Materiais

4.1 - Fonte de Soldagem

A fonte de soldagem utilizada neste trabalho é do tipo eletrônica, multiprocesso (MIG/MAG, TIG, plasma e eletrodo revestido), com chaveamento no secundário por meio de transistores. As soldagens foram feitas no modo de corrente constante. Abaixo seguem as características técnicas segundo o fabricante.

Fonte Inversal 300

- Voltagem de alimentação – 220, 380 ou 440 V trifásica
- Tensão em vazio – 56 V
- Tipo de corrente de saída – Contínua ou alternada
- Corrente nominal – 300 A
- Corrente máxima – 450 A
- Dimensões – 0,5 x 0,6 x 1,2m
- Peso – 170 Kg
- Circuito de arrefecimento – 3,5 litros de água destilada
- Potência máxima consumida – 12 Kw
- Fator de potência – 0,94

4.2 – Sistema Automático de Soldagem (SAS)

As soldagens automáticas foram feitas por um simulador mecânico controlado eletronicamente. O objetivo deste simulador é tentar amenizar a influência das flutuações inerentes ao soldador.

O princípio de funcionamento é bastante simples: o simulador procura manter o comprimento do arco voltaico constante através da leitura da tensão do arco, a qual é comparada a uma tensão de referência, que é pré-ajustada (a tensão de um arco é proporcional ao seu tamanho, para uma dada condição). A correção desta tensão é feita pela variação da velocidade de mergulho do eletrodo (Gadotti, 1994). Quando a voltagem no arco é maior do que a voltagem de referência, o simulador aumenta a velocidade de mergulho do

eletrodo. Quando esta voltagem é menor, este diminui a velocidade de mergulho do eletrodo ou em alguns casos inverte o sentido de rotação do motor de passo. As Figuras 4.1a e 4.1b mostram o aspecto do SAS.

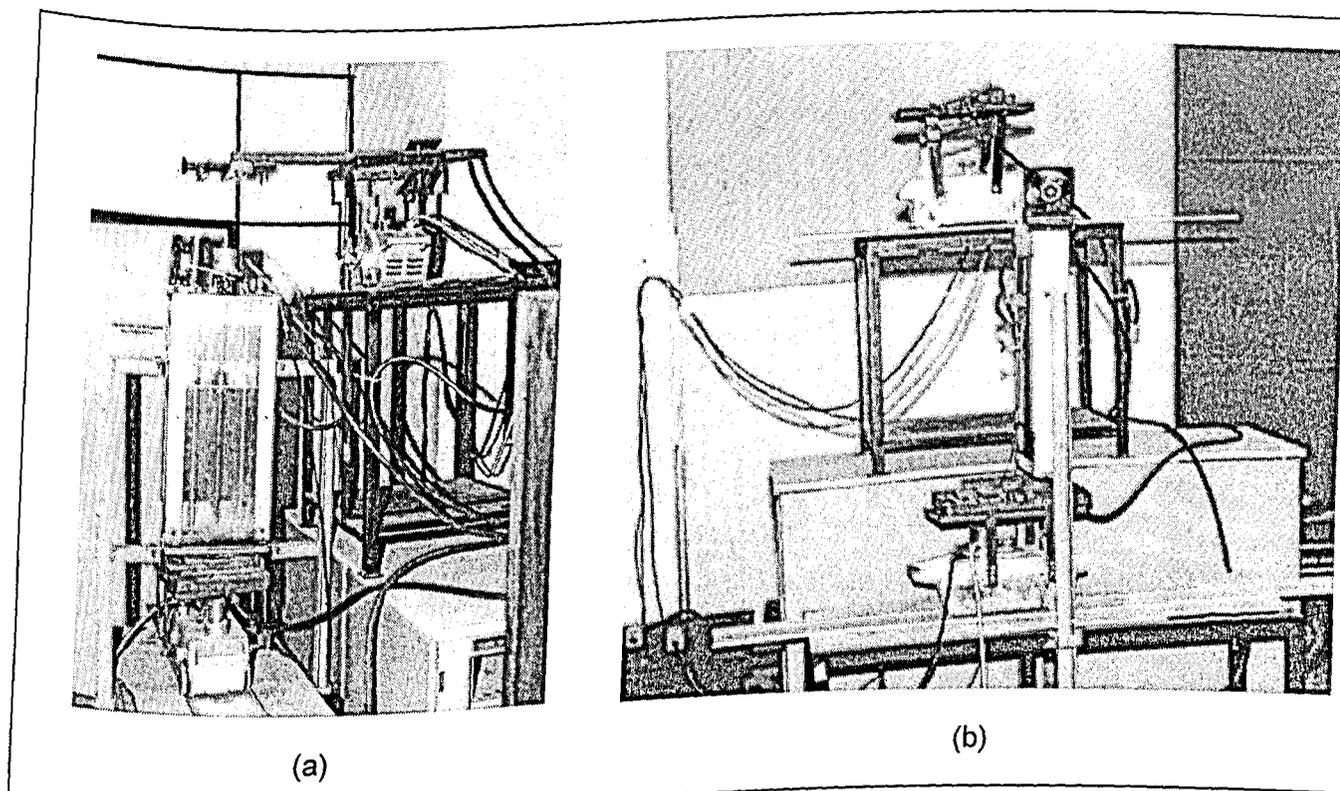


Figura 4.1 – Banco de ensaio automatizado para soldagem com eletrodo revestido

O simulador pode ter seus componentes divididos em dois grupos principais: o mecânico e o eletro-eletrônico, abaixo descritos.

4.2.1 Grupo Mecânico

- Máquina de corte portátil (tartaruga): responsável pelo movimento de translação da peça a ser soldada.
- Fuso mergulhador: este sistema movimentava o eletrodo de forma linear (ascendente e descendente), através de um sistema de fuso de esferas recirculantes e guias.
- Motor de passo.
 - Fabricante = Astrosyn.
 - Modelo = 23LM-K005-20.
 - Torque residual = 4,0 N.cm.
 - Torque de travamento = 48 N.cm.

- Passo angular = $0,9^\circ$.
- N° de passos = 400 passos.
- Precisão do passo = 5%.
- Peso = 500 gramas.
- N° de fios de saída = 6.

4.2.2 Grupo Eletro-Eletrônico

- Sistema de controle: trata-se basicamente de um comparador de tensão que compara a tensão do arco com a tensão de referência pré-ajustada e para o "driver" do motor de passo, deste modo, controlando a velocidade do motor. Permite ainda o posicionamento ascendente e descendente (Santos, 1995).
- Módulo "Driver" do motor de passo: comanda o acionamento das bobinas para a determinação do seu passo e o sentido de rotação.
- Motor de passo: Aciona o fuso e, conseqüentemente, movimenta o eletrodo a soldagem.

4.3 - Sistema de Aquisição de Dados

A fonte Inversal 300 possui uma interface que fornece os dados diretamente à um microcomputador através de um cabo com divisor de tensão. Essa atua no sentido de reduzir o valor da tensão tornando-a compatível com a placa de aquisição (de -10 V a $+10\text{ V}$).

- Placa de aquisição (Interdata 3) – Possui um conector compatível com o barramento de microcomputadores da linha IBM PC. Opera com um conversor analógico/digital de 16 canais, dos quais 14 plenamente disponíveis para a aquisição de dados. A placa apresenta as resoluções da placa de aquisição.
- Microcomputador – Equipado com um processador Pentium 100MHz, 16 Mbytes de memória.

Tabela 4.2. - Resoluções da placa de aquisição

Aquisição	Corrente (A)	Tensão (V)
8 bit	4,0	0,9
12 bit	0,3	0,06

Programa de aquisição – O programa para aquisição de dados utilizado neste trabalho foi o JSMIG (Farias, 1993). O programa controla a placa de aquisição, adquire e armazena os dados referentes à tensão e corrente do arco. Este programa permite a leitura de dois canais simultâneos (corrente e tensão) ou apenas um, dependendo da opção escolhida pelo usuário. Neste trabalho, as leituras foram feitas em dois canais, com 12 bits, pelo tempo de seis segundos utilizando uma frequência de aquisição de 13 KHz/canal. O início de todas as aquisições ocorreu aproximadamente na metade do comprimento do cordão de solda para cada ensaio.

4.4 – Programas de Tratamento de Dados

- JSMIG – Trata-se do mesmo programa de aquisição de dados citado anteriormente. Possibilita traçar e imprimir gráficos de corrente e tensão *versus* tempo ou tensão *versus* corrente. Pode-se trabalhar com os valores médios ou eficazes de corrente e tensão.
- CONVERT – Converte os dados produzidos pelo JSMIG, tornando-os compatíveis com o programa ANALISER (Farias, 1993).
- ANALISER – Possibilita a realização do estudo quantitativo do comportamento do arco em CC e em CA, e fornece todos os índices indicativos da estabilidade do arco (Farias, 1993). Uma vez feita a aquisição de dados dos valores de tensão e corrente, considerando-se os aspectos relacionados ao processo e ao sistema de medição acima descritos, procede-se com a fase de tratamento dos dados. O programa ANALISER permite o processamento do arquivo completo ou de intervalos específicos definidos pelo usuário. A partir dos valores instantâneos da tensão e da corrente de soldagem em corrente contínua, obtêm-se as seguintes variáveis (Farias, 1993):
 1. a tensão média (U_m), o seu desvio padrão (σ_{U_m}) e o desvio padrão relativo (σ_{U_m}/U_m);
 2. a corrente média (I_m), o seu desvio padrão (σ_{I_m}) e o desvio padrão relativo (σ_{I_m}/I_m);
 3. a tensão eficaz (U_{ef});
 4. a corrente eficaz (I_{ef});
 5. o período médio de transferência (T), o seu desvio padrão (σ_T) e o desvio padrão relativo (σ_T/T);
 6. o tempo médio de curto-circuito (t_{cc}), o seu desvio padrão ($\sigma_{t_{cc}}$) e o desvio padrão relativo ($\sigma_{t_{cc}}/t_{cc}$);
 7. a tensão média de reabertura após o curto circuito (U_1), o seu desvio padrão (σ_{U_1}) e o desvio padrão relativo (σ_{U_1}/U_1);

8. o tempo médio de reabertura (t_1), o seu desvio padrão (σ_{t1}) e o desvio padrão relativo (σ_{t1}/t_1);
9. a corrente média de reabertura (I_1), o seu desvio padrão (σ_{I1}) e o desvio padrão relativo (σ_{I1}/I_1);
10. o índice E_1 , o seu desvio padrão (σ_{E1}) e o desvio padrão relativo (σ_{E1}/E_1).

O programa tem as opções de saída para impressora, para arquivo texto e para arquivo ASCII. Desta forma, pode-se obter, por exemplo, a listagem de todos os valores individuais de T , de t_{cc} , de U_1 , de t_1 , de I_1 e de E_1 , ou ainda, um arquivo ASCII destas variáveis que pode ser utilizado posteriormente em "softwares" comerciais para tratamento estatístico e/ou elaboração de gráficos (Farias, 1993).

Para a análise do comportamento do arco de um determinado eletrodo, é importante a definição de um critério de avaliação. No caso da soldagem em CC, o critério tem como base a definição de três parâmetros que devem ser definidos pelo usuário (Farias, 1993).

- i) A tensão de referência para o curto-circuito, U_r . O curto-circuito só é registrado quando a tensão do arco cair abaixo de U_r . O produto de U_r pelo seu correspondente de corrente determina o valor de P_r (potência de referência) que é empregado para o cálculo do índice E_1 (Equação 2.5). Neste trabalho, utilizou-se $U_r = 10$ V. Para eletrodos revestidos encontram-se na literatura variações na faixa de 7-13 V (Farias, 1993). Este valor pode ser diretamente avaliado a partir da análise qualitativa do comportamento dinâmico da tensão do arco.
- ii) O tempo mínimo de curto-circuito com transferência da gota, t_{min} . A partir da análise dos histogramas dos tempos de curtos-circuitos, como o apresentado na Figura 2.6, é possível determinar o tempo limite que separa os curtos-circuitos aleatórios daqueles que efetivamente transferem uma gota metálica. Para eletrodos revestidos, este tempo comumente varia de 1.5 a 3.0 ms (Farias, 1993). Neste trabalho, adota-se o valor de 2.0 ms. Desta forma, o tratamento dos dados referente à transferência de carga em curtos-circuitos aqueles referentes à transferência de metal em CC e em CA podem ser apresentados em três formas distintas: o processamento total (incluindo todos os curtos-circuitos ocorridos durante a aquisição), o processamento com transferência (para $t_{cc} \geq 2.0$ ms) e o processamento sem transferência (para $t_{cc} < 2.0$ ms).

- iii) O tempo máximo de reabertura, t_{max} . Para a determinação da tensão de reabertura após o curto-circuito, verifica-se a condição:

$$U_i - U_{i+1} \geq 0$$

No entanto, em alguns casos, há uma queda de tensão durante a reabertura que não caracteriza, de fato, a reabertura do arco. Em outros casos, não ocorre o pico e a tensão registrada não teria o significado de U_1 . Define-se, portanto, a tensão de reabertura como a tensão máxima que satisfaz a equação 4.1 no intervalo de tempo (t_{max}) considerado. Não havendo pico neste intervalo, o curto-circuito não é considerado para efeito da determinação dos valores médios de U_1 , I_1 e t_1 . Neste trabalho, adota-se $t_{max} = 1.0$ ms.

A partir da definição destes três critérios pode-se ter mais segurança na análise dos resultados. Cada variável fica bem definida e só pode ser comparada a outra que tenha sido determinada a partir dos mesmos critérios. A falta destas determinações torna difícil a interpretação de resultados que são comumente publicados na literatura. Fala-se, por exemplo, em tempo médio de curto-circuito para um dado eletrodo. No entanto, este valor, quando computados os curtos-circuitos aleatórios, é bem menor que o valor que efetivamente transfere metal. Tomando como exemplo um eletrodo AWS E6010, que apresenta, sob determinadas condições de soldagem em CC, frequência de curto-circuito de 6.9 Hz, tempo médio de curto-circuito de 3.59 ms e tensão de reabertura do arco após o curto-circuito de 26 V, no processamento total, estes valores mudam para 3.8 Hz, 6.18 ms e 30 V, respectivamente, quando se considera apenas os curtos-circuitos com transferência (Gotal'skii and Stertovich, 1976). Entende-se que, para efeito de avaliação da transferência metálica, estes últimos valores são mais representativos.

- Outros softwares – foram empregados ainda softwares comerciais para plotagem de curvas, confecção de tabelas e editoração de texto.

4.5 - Corpos de Prova

Foram utilizados corpos de prova chanfrados em aço ABNT 1020 com as dimensões abaixo descritas.

Comprimento – 150 mm

Largura – 50 mm

Espessura – 7,4 mm

As dimensões do chanfro (em mm) estão apresentada na Figura 4.2.

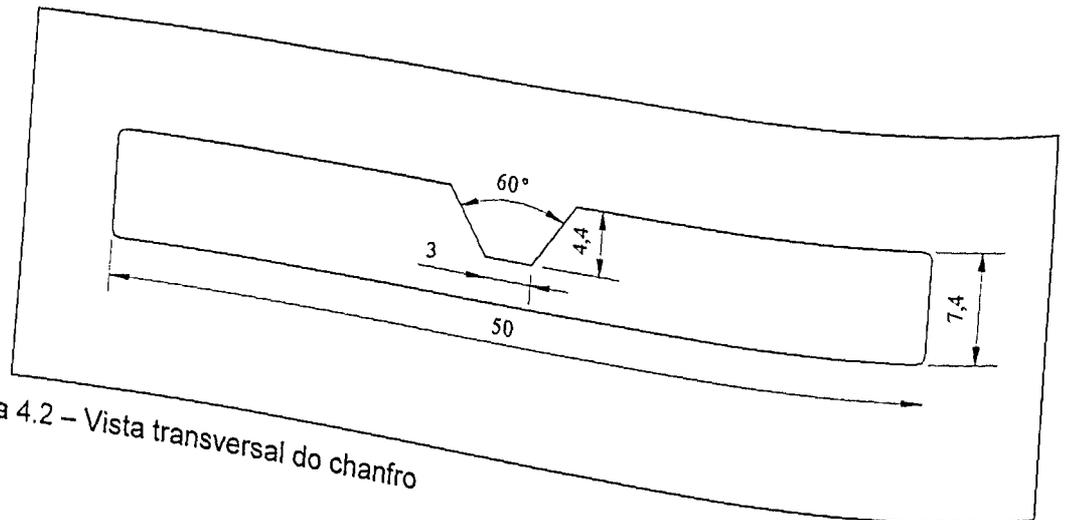


Figura 4.2 – Vista transversal do chanfro

4.6 – Consumíveis

Empregaram-se neste projeto, conforme a metodologia, três classes de eletrodos comerciais de diferentes revestimentos feitos por um único fabricante. A Tabela 4.1 apresenta a identificação dos consumíveis.

Tabela 4.1 – Descrição dos eletrodos

Denominação	Tipo	Classe AWS	Diâmetro (mm)	Faixa de Corrente (A)
Rut	Rutílico, aço comum ao carbono	E 6013	3,25	80 – 150
Cel	Celulósico, aço comum ao carbono	E 6010	3,25	80 – 140
Bas	Básico, aço comum ao carbono	E 7018	3,25	110 – 150

Obs. Todos os eletrodos possuem 350 mm de comprimento.

Obs₂. A faixa de corrente apresentada é a sugerida pelo fabricante.

Capítulo V

Metodologia Experimental

Neste capítulo está descrita a metodologia proposta e aplicada na realização deste trabalho. Tem-se como objetivo principal o levantamento dos efeitos de diferentes combinações de corrente de curto-circuito (I_{cc}) e de tensão de referência para controle de curto-circuito (U_{rc}) sobre a soldagem com eletrodos revestidos em diferentes posições com chapas chanfradas e polaridade positiva. Esta metodologia baseia-se na análise das características operacionais e econômicas de uma série de soldagens realizadas segundo uma matriz experimental robusta. Os critérios de avaliação estão abaixo descritos.

5.1 Critérios de Avaliação das Características Econômicas dos Eletrodos

As características econômicas dos eletrodos serão avaliadas, para cada condição de soldagem, a partir da determinação da taxa de fusão, TF, da taxa de deposição, TD, e da eficiência de deposição, ED.

5.1.1. A Taxa de Fusão do Eletrodo, TF

A taxa de fusão ou consumo do eletrodo é definido como a quantidade de eletrodo consumida, incluindo o revestimento, por unidade de tempo. A taxa de fusão é determinada pela equação 5.1.

$$TF = 3.6 \cdot \frac{(m_i - m_f)}{t} \text{ (kg/h)} \quad (5.1)$$

onde:

- m_i - massa inicial do eletrodo em (g);
- m_f - massa final do eletrodo (g);
- t - tempo de soldagem, (s);

5.1.2. A Taxa de Deposição do Eletrodo, TD

A taxa de deposição ou produção é a quantidade de material depositada pelo eletrodo que é efetivamente incorporada à solda, na unidade de tempo, e é dada pela equação 5.2.

$$TD = 3.6 \cdot \frac{(M_i - M_f)}{t} \text{ (kg/h)} \quad (5.2)$$

onde:

- M_i - peso inicial da chapa, (g);
- M_f - peso da chapa após a soldagem, (g);
- t - tempo de soldagem, (s);

5.1.3. Eficiência de Deposição, ED

A eficiência de deposição ou rendimento de deposição real é a relação entre a taxa de deposição e a taxa de fusão, determinada pela equação 5.3.

$$ED = \frac{TD}{TF} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (5.3)$$

5.2 Critérios de Avaliação da Estabilidade do Arco

A estabilidade do arco será avaliada com base nos índices descritos no item 2.4 (equações 2.1 a 2.9).

5.3 Organização Geral dos Experimentos

Este trabalho divide-se em duas partes sequenciais. O objetivo da primeira etapa consistiu em definir se existiam, para fins de pesquisa, diferenças significativas entre a soldagem realizada por um soldador qualificado e pelo Simulador de Soldagem Automática (SAS) no processo de soldagem a arco com eletrodos revestidos. Feita a comparação, baseada na estabilidade do arco e nas características econômicas, partiu-se para a Segunda Fase que foi o estudo propriamente dito dos efeitos da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle de curto-circuito. O planejamento experimental deste estudo foi feito através de uma matriz experimental robusta (Método Taguchi).

No Brasil, grande parte das pesquisas no processo de soldagem com eletrodos revestidos é realizada em equipamentos que simulam a soldagem manual (Farias, 1993; Santos, 1995; Farias et al, 1998; Silva, 1998). No entanto, não são considerados os aspectos referentes às diferenças de comportamento entre o homem e a máquina. Isto é fundamental uma vez que, na prática, o eletrodo revestido é um processo de soldagem manual.

Durante a soldagem manual, o soldador tenta corrigir, em tempo real, as eventuais alterações do processo, procurando principalmente uma boa geometria do cordão de solda. A sua atuação resume-se em dois movimentos simultâneos: alimentação do eletrodo em direção da poça de fusão e a sua movimentação ao longo da junta a ser soldada. As velocidades com que ele executa estes dois movimentos mudam, durante a soldagem, em função da conformação do cordão de solda.

Na soldagem por simulador, na maioria das vezes, apenas a velocidade de alimentação do eletrodo é variável, enquanto a velocidade de soldagem é fixa e não sofre influência do simulador.

Face a estas características de cada técnica de soldagem, tornou-se necessário um estudo comparativo das soldagens feitas pelo soldador e feitas pelo simulador com base nas características operacionais do arco dos eletrodos revestidos.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de comparação das duas técnicas de soldagem, definiu-se a metodologia a ser aplicada para a realização do trabalho. Duas situações poderiam ocorrer, como indica a Figura 5.1.

Primeiro, a soldagem com o soldador leva a resultados completamente diferentes daqueles da soldagem com o simulador. Neste caso, o trabalho seria realizado empregando-se as duas técnicas. Segundo, o desempenho do soldador é equivalente ao do simulador. Neste caso, o trabalho poderia ser realizado com o soldador ou com o simulador. A escolha cairá sobre a técnica que resultar em menores dispersões entre os valores médios das grandezas empregadas para a avaliação (itens 5.1 e 5.2).

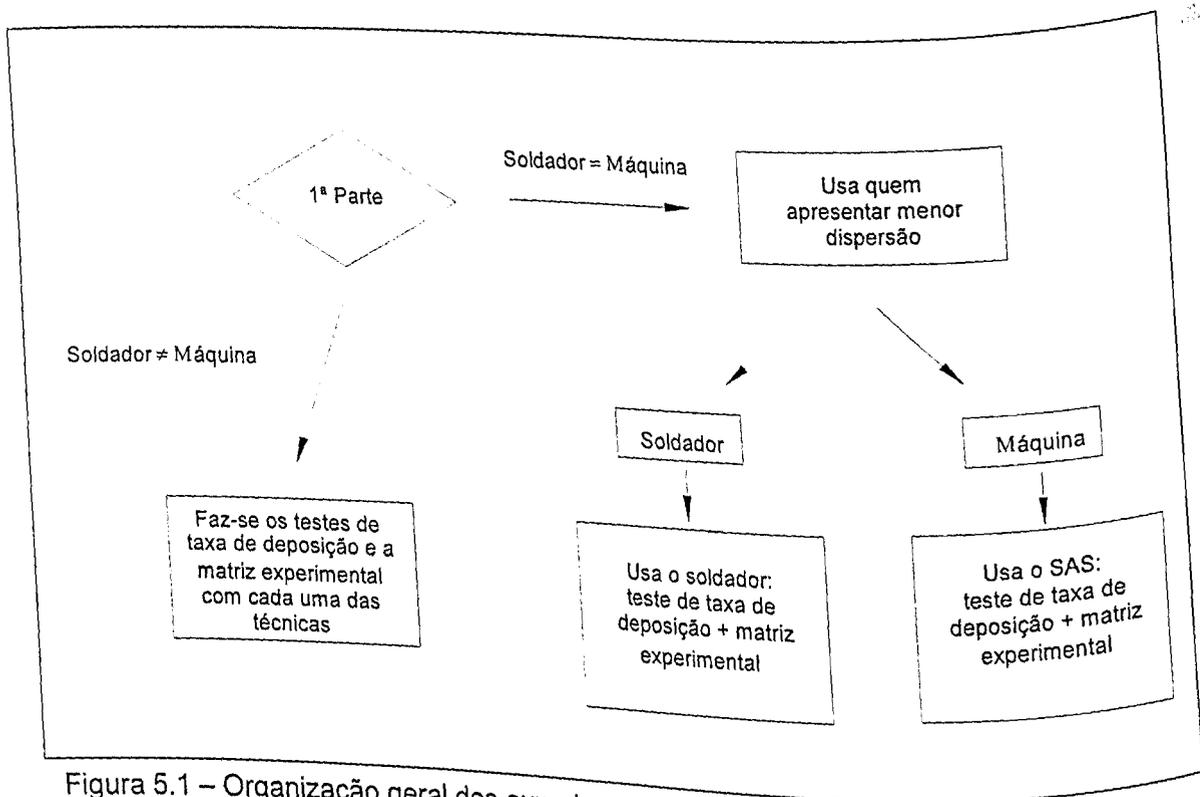


Figura 5.1 – Organização geral dos experimentos.

5.4 Testes Preliminares

De acordo com observações feitas pelos grupos de pesquisa do Engesolda e do Laprosolda (Farias, 1998), a corrente de curto-circuito altera a corrente média de soldagem, aumentando o valor desta última com relação ao valor ajustado na fonte (I_{aj}). À título de exemplo, foram feitos 3 ensaios, cujos parâmetros estão apresentados na Tabela 5.1 e os resultados na Tabela 5.2. Entre os ensaios 1 e 2, vê-se que a diminuição da corrente de curto-circuito causou uma diminuição da corrente média. A comparação dos ensaios 1 e 3 mostra que é possível compensar o efeito da corrente de curto-circuito através do aumento da corrente de ajuste da máquina, com o intuito de se obter a mesma corrente média. Estes ensaios levaram à adoção da corrente média (em lugar da corrente de ajuste) como variável de pesquisa na matriz robusta da Segunda Fase. Maiores detalhes sobre esta mudança encontram no item 5.6 (Levantamento).

Tabela 5.1 – Condições dos ensaios de influência de I_{cc} em I_m

Ensaio	Eletrodo (AWS)	Diâmetro (mm)	Corrente			
			de Ajuste (A)	I_{cc} (A)	U_{rc} (V)	Polaridade
1	E 7018	3,25	140	325	10	CC ⁺
2	E 7018	3,25	140	140	10	CC ⁺
3	E 7018	3,25	150	150	10	CC ⁺

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de influência de I_{cc} em I_m

Ensaio	U_m (V)	U_{ef} (V)	I_m (A)	I_{ef} (A)
1	22.8	23.2	149	152
2	22.9	23.6	141	141
3	22.9	23.6	150	150

5.5 Primeira Fase - Comparação entre Máquina e Soldador

Nesta parte do trabalho foram utilizados duas técnicas de soldagem (simulador e soldador), duas posições de soldagem (plana e sobrecabeça) e dois tipos de eletrodos (AWS E 6010 e AWS E 7018). Estes eletrodos foram escolhidos por serem de difícil manuseio, e assim, exigirem maior perícia por parte do soldador e do sistema de simulação. Foram mantidos fixos o diâmetro dos eletrodos (3,25 mm), a corrente de ajuste (escolhida como a média entre a faixa recomendada pelo fabricante para cada tipo de eletrodo), a corrente de curto-circuito (mantida em vezes a corrente de ajuste) e a tensão de referência para controle de curto-circuito (mantida em 10 V). Utilizaram-se chapas chanfradas (Figura 4.2) e cada ensaio teve 3 repetições.

Primeiro, os ensaios foram feitos com o soldador, sendo este instruído a manter a velocidade de soldagem constante e sem tecimento. A tensão média do arco foi monitorada e seu valor posteriormente utilizado para a regulagem do controle da velocidade de mergulho do Sistema Automático de Soldagem (SAS), de forma a se manter o mesmo comprimento do arco do soldador. Assim, o simulador soldou o mais próximo possível da condição manual. Mantendo-se o ângulo de soldagem em torno de 90 graus durante todos os ensaios (soldador e simulador). Este valor foi determinado pelo simulador de soldagem, o qual apresentou, em testes preliminares, melhor operacionalidade para este ângulo. O valor da corrente de curto circuito (2,5 vezes o valor da corrente de ajuste) foi escolhido de acordo com os resultados obtidos por Farias (Farias et al, 1998). Tenta-se desta maneira evitar ao máximo a colagem do eletrodo na peça.

Para cada condição de soldagem, tanto para o soldador como para o simulador, foram calculados os valores médios referentes aos índices indicativos das características econômicas dos eletrodos (TF, TD e ED) e da estabilidade do arco (FE_1 , RE_1 , F_{cc} , R_{cc} , F_{tm} e R_{tm}). Os valores destes índices para todos os ensaios da Primeira Fase podem ser vistos no ANEXO I. Os resultados foram submetidos ao tratamento estatístico de análise de variância para efeito de comparação das médias obtidas nas soldagens com o soldador e com o simulador. A Tabela 5.3 indica o resultado da análise estatística. Como pode ser visto por esta tabela, foram poucos os índices utilizados para a avaliação da estabilidade do arco e características econômicas

cujas médias apresentaram diferença significativa. Dos 60 parâmetros estudados, apenas 6 obtiveram índices de significância $\alpha = 5\%$ e 3 obtiveram índices de significância $\alpha = 1\%$. Mesmo nestes poucos índices onde as médias foram estatisticamente diferentes, uma análise mais detalhada indica que estas diferenças não chegam a ser relevantes. Desta forma, optou-se por usar na Segunda Fase o simulador de soldagem, uma vez que este apresentou uma melhor repetibilidade. Durante os ensaios finais (Segunda Fase), foram utilizados os valores de ajuste do SAS para os quais se conseguem as mesmas tensões da soldagem com o soldador. Para o eletrodo rutilico, foram usadas as mesmas tensões do eletrodo básico, de acordo com os resultados de Farias et al (1998). Ensaios preliminares indicaram que estes ajustes levaram a comprimentos visíveis do arco equivalentes para os três tipos de eletrodos, os quais são os comprimentos usados na prática.

Tabela 5.3 - Análise de Variância (Primeira Fase)

Características Econômicas	Análise de Curtos (com transferência)								Análise de Curtos (total)						
	TF	TD	ED	F _{cc}	R _{cc}	F _{tm}	R _{tm}	FE ₁	RE ₁	F _{ccT}	R _{ccT}	F _{tmT}	R _{tmT}	FE _{1T}	RE _{1T}
BP	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
BS	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CP	---	---	---	◆	▽	---	---	---	---	---	---	---	---	---	▽
CS	---	◆	▽	---	▽	---	---	---	---	---	▽	---	---	▽	◆

Legenda:

BP: Eletrodo básico, posição plana

BS: Eletrodo básico, posição sobrecabeça

CP: Eletrodo celulósico, posição plana

CS: Eletrodo celulósico, posição sobrecabeça

--- : médias iguais (não significante)

▽ : médias diferentes (significante a 5%)

◆ : médias diferentes (significante a 1%)

5.6 Levantamento do Valor da Corrente de Ajuste e da Taxa de Deposição

Conforme visto nos Testes Preliminares (5.4), quando utiliza-se o ajuste da corrente de curto-circuito na soldagem com eletrodos revestidos, a corrente média dificilmente será igual ao valor ajustado na máquina (corrente de ajuste). Portanto, adotou-se neste trabalho a corrente média de soldagem como fator de controle. A razão para isso foram observações

Farias et al (1998), cujo trabalho mostrou que a corrente de curto-circuito alterava a corrente média de soldagem, aumentando o valor desta última com relação ao valor ajustado na fonte. Sendo assim, a escolha da corrente média como fator garante que cada grupo de três ensaios seja soldado com a mesma corrente. Em virtude da tensão média também ser igual para o grupo (devido ao controle do simulador), obtém-se como resultado uma matriz experimental termicamente balanceada.

A partir do momento que se definiu a corrente média como fator de controle, ao invés da corrente de ajuste, foi necessário realizar pré-testes para cada uma das 27 condições da matriz experimental da Segunda Fase (apresentada no item 5.7). Estes pré-testes indicaram qual corrente deveria ser regulada na fonte para obter-se a corrente média desejada e foram realizados mantendo-se a velocidade de soldagem constante e igual a 20 cm/min.

Outro objetivo destes pré-testes foi o levantamento da taxa de deposição para cada condição experimental da matriz. Estes valores foram utilizados para o cálculo das velocidades de soldagem da Segunda Fase. Maiores detalhes sobre este cálculo se encontram no próximo item (5.7).

Inicialmente, esta etapa seria realizada com os valores extremos de corrente indicados pelo fabricante, mas para a geometria de chapa chanfrada utilizada, ocorreram furos com o eletrodo celulósico na soldagem em corrente alta. Neste caso, a intensidade de corrente foi gradativamente sendo diminuída de 5 em 5 ampères até que não ocorressem mais furos. Isto levou a uma corrente máxima de 125 A. Em seguida, os valores de corrente máxima para os outros tipos de eletrodos foram proporcionalmente abaixados.

5.7 Segunda Fase - Estudo da Influência da Corrente de Curto-Circuito e da Tensão de Referência para Controle de Curto-Circuito sobre as Características Operacionais e Econômicas na Soldagem com Eletrodos Revestidos

O estudo foi feito a partir de uma matriz ortogonal construída através da técnica do Projeto Experimental Robusto (Método Taguchi). Como visto no Capítulo 3, este método permite a redução do número de experimentos com relação ao método fatorial, para um mesmo número de fatores de controle. A Tabela 5.4 mostra a matriz experimental que foi utilizada, sendo a parte destacada relativa aos fatores de controle. As demais colunas ficaram para o número dos ensaios, a velocidade utilizada em cada ensaio e a corrente de ajuste (I_{aj}). No caso das transformadas utilizadas para o cálculo das diversas respostas, empregou-se a função "maior-é-o-melhor" para as características econômicas e optou-se pela função

“sensitividade” no caso da estabilidade do arco. Maiores detalhes sobre a função sensitividade podem ser encontrados em Farias et al (1998).

Foram escolhidos como fatores a serem estudados os seguintes: posição de soldagem, tipo de eletrodo, corrente de curto-circuito (I_{cc}), tensão de referência para controle de curto-circuito (U_{rc}) e corrente média (I_m). As posições escolhidas para a matriz foram a plana e a sobrecabeça. Até então, a maioria dos trabalhos contemplava apenas a posição plana. Neste trabalho, utiliza-se também a posição sobrecabeça. Traça-se assim, um comparativo entre as posições mais fácil e a posição mais difícil de serem soldadas na prática. Os tipos de eletrodos escolhidos foram rutilico (AWS E 6013), celulósico (AWS E 6010) e básico (AWS E 7018), por serem os eletrodos comerciais mais utilizados. Os três níveis de corrente de curto-circuito (I_{cc}) foram subjetivamente adotados como 1, 1,8 e 2,5 vezes os valores dos níveis de corrente média para cada eletrodo (Tabela 5.5). Para a tensão de referência para controle de curto-circuito (U_{rc}) foram utilizados os valores 6, 9 e 12 volts. Estes valores foram escolhidos a partir de uma avaliação qualitativa de oscilogramas de tensão para cada tipo de eletrodo, adotando-se como valor máximo aquele em que a oscilação natural da tensão durante a soldagem não ativava a corrente de curto-circuito e para o valor mínimo o menor valor de tensão correspondente a um curto-circuito.

Os níveis desejados para a corrente média estão apresentados na Tabela 5.5. Estes níveis, dentro da faixa recomendada pelo fabricante, foram escolhidos após vários ensaios preliminares, assegurando-se que não ocorressem grandes problemas durante as soldagens na posição sobrecabeça (como os furos citados no item anterior). Neste trabalho aceitou-se uma variação de ± 1 A sobre o valor da corrente média esperada. Esta variação é fruto da impossibilidade de se prever, para cada ensaio, a frequência de curtos-circuitos (que, por sua vez, podem elevar o valor da corrente média).

Conforme visto no item anterior, o valor de corrente máxima do eletrodo celulósico tinha sido definido em 125 A, mas na Tabela 5.5 mudou-se para 124 A. Isto foi feito porque, durante os ensaios, as correntes apresentaram um valor médio de 124 ampères e, para evitar novos ensaios, resolveu-se adotar este novo valor (sem prejuízo para a matriz).

De acordo com a experiência acumulada com o trabalho anterior (Farias et al, 1998), os fatores posição de soldagem, tipo de eletrodo, corrente média de soldagem, corrente de curto-circuito e tensão de referência foram alocados nas colunas 1, 2, 4, 7 e 8, respectivamente. Usando a tabela de interações para a matriz L_{27} (Phadke, 1989), as colunas 5 e 11 foram selecionadas para a interação tipo de eletrodo x tensão de referência, colunas 3 e 12 para a interação corrente de curto-circuito x tensão de referência e colunas 6 e 10 para a interação

Tabela 5.4 – Matriz experimental da Segunda Fase com os valores desejados dos níveis de cada fator de controle

Ensaio	Posição	Elet (AWS)	I_{cc} (A)	U_{rc} (V)	I_m (A)	V_s (cm/min)	I_{aj} (A)
1	Plana	6013	337	12	135	22	125
2	Plana	6013	243	9	135	22	131
3	Plana	6013	135	6	135	21	135
4	Plana	6010	262	9	105	20	101
5	Plana	6010	189	6	105	19	101
6	Plana	6010	105	12	105	19	105
7	Plana	7018	275	6	110	15	107
8	Plana	7018	198	12	110	14	107
9	Plana	7018	110	9	110	15	110
10	Plana	7018	80	12	80	15	80
11	Sobrecabeça	6013	200	9	80	15	74
12	Sobrecabeça	6013	144	6	80	14	77
13	Sobrecabeça	6013	125	9	125	20	125
14	Sobrecabeça	6010	312	6	125	23	121
15	Sobrecabeça	6010	225	12	125	23	121
16	Sobrecabeça	6010	125	6	125	18	125
17	Sobrecabeça	7018	312	12	125	17	120
18	Sobrecabeça	7018	225	9	125	18	123
19	Sobrecabeça	7018	198	12	110	20	106
20	Sobrecabeça	6013	110	9	110	19	110
21	Sobrecabeça	6013	275	6	110	22	105
22	Sobrecabeça	6013	144	9	80	12	78
23	Sobrecabeça	6010	80	6	80	12	79
24	Sobrecabeça	6010	200	12	80	17	76
25	Sobrecabeça	6010	252	6	140	17	76
26	Sobrecabeça	7018	140	12	140	19	138
27	Sobrecabeça	7018	350	9	140	20	140

Tabela 5.5 – Valores de corrente utilizados no procedimento experimental

Eletrodos (AWS)	Rutilico (E 6013)	Básico (E 7018)	Celulósico (E 6010)
Faixa de Corrente* (A)	80 - 150	110 - 150	80 - 140
Níveis utilizados (A)	80 / 110 / 135	110 / 125 / 140	80 / 105 / 124

*Recomendada pelo fabricante

Utilizando-se os dados de taxa de deposição obtidos no item 5.6, foram calculados os valores das áreas adicionadas para cada ensaio da matriz experimental. Escolheu-se, então, o valor médio aproximado destas áreas (50 %) como parâmetro fixo. A partir dele, calcularam-se as velocidades de soldagem que cada ensaio deveria ter para que a área adicionada no chanfro fosse de 50 %. Este procedimento evitaria o efeito do tamanho de poça sobre as características que se desejam avaliar neste trabalho, uma vez que, eletrodos de classes distintas, soldados com níveis de correntes diferentes, apresentam taxas de deposição e poças de fusão diferentes. Ressalta-se que a alteração das condições de transferência metálica, devido à variações do tamanho da poça de fusão, poderia influir sobre as características de estabilidade do arco e econômicas dos eletrodos. Desta forma, para se conseguir a mesma área adicionada com diferentes tipos de eletrodos e correntes, variou-se a velocidade de soldagem proporcionalmente. As velocidades de soldagem utilizadas podem ser vistas na Tabela 5.4.

5.8 Testes de Confirmação

Conforme visto no Capítulo III, é necessário que se confirme a validade do modelo aditivo, utilizado na avaliação dos resultados da matriz experimental. Para esta confirmação foram escolhidas duas condições aleatórias e cada condição foi repetida três vezes. A velocidade de soldagem para cada ensaio foi calculada a partir de novos ensaios de taxa de deposição, feitos de acordo com o item 5.6. Os parâmetros utilizados nestes ensaios estão na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Condições experimentais dos ensaios de confirmação

Condição	Posição	Eletrodo	I_m (A)	I_{cc} (A)	U_{rc} (V)	V_s (cm/min)
1	Sobrecabeça	Celulósico	105	189	9	18
2	Sobrecabeça	Básico	110	275	12	15

Capítulo VI

Discussão dos Resultados

6.1 Observações Gerais

Os valores médios monitorados da tensão (U_m) e da corrente do arco (I_m), para os diferentes ensaios, estão apresentados na Tabela 6.1. Percebe-se que a tensão média do arco para os eletrodos celulósicos (média de 28.5 V, desvio padrão de 0.4 V) foi maior do que para os eletrodos básicos e rútilicos (média de 24 V, desvio padrão de 0.3 V). No entanto, a distância entre a ponta do eletrodo e a superfície do material de base (comprimento do arco) foi mantida aproximadamente constante, para os três tipos de eletrodos, pelo SAS. Logo, esta diferença nos valores da tensão média está diretamente relacionada com a atmosfera do arco e não reflete diferenças relevantes no comprimento do arco do eletrodo celulósico em relação aos demais. Pode-se considerar, então, que a boa repetibilidade dos valores de tensão média, para cada classe de eletrodo, é consequência do controle eficaz do comprimento médio do arco pelo SAS. Ressalta-se, contudo, que muitos ensaios foram conduzidos em situações consideradas extremas (posição sobrecabeça, chapa chanfrada, corrente de curto-circuito igual a corrente de ajuste). Em razão disso, a dispersão dos valores de tensão para cada tipo de eletrodo foi um pouco maior que aquela encontrada por Farias et al (1998), que estudou também a influência da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle do curto-circuito na soldagem de simples deposição e posição plana com o processo de soldagem com eletrodos revestidos.

Outro aspecto revelado pelos dados da Tabela 6.1 é que os valores médios de corrente mostraram-se estar dentro da faixa de valores esperada, que foi ± 1 A do valor desejado (Tabela 5.4).

Tabela 6.1 – Dados da estabilidade do arco para todos os curtos-circuitos

Exp. Nº	I _m (A)	U _m (V)	Transferência de carga		Transferência de metal			
			FE _{1T} (W ⁻¹ s ⁻¹)	RE _{1T}	F _{ccT} (s ⁻¹)	F _{tmT} (s ⁻¹)	R _{ccT}	R _{tmT}
1	134	23,8	0,87	1,32	43,10	1526,02	0,75	0,97
2	135	24,5	1,86	2,19	26,01	697,06	1,09	1,24
3	136	24,6	1,60	2,50	19,23	407,91	1,16	1,19
4	105	28,2	1,75	1,75	16,19	776,16	1,20	1,23
5	104	27,9	2,27	2,04	14,99	485,91	1,17	1,32
6	105	28,1	1,56	2,01	17,08	397,57	1,18	1,12
7	109	24,5	2,82	1,56	3,28	260,11	1,44	1,02
8	109	24,1	1,13	1,67	2,41	158,08	1,32	1,36
9	110	24,3	2,40	2,19	2,22	118,27	3,05	1,54
10	81	24,3	2,73	1,70	6,97	184,18	1,25	1,35
11	79	23,7	1,92	1,19	12,99	576,70	0,74	1,20
12	80	24,5	2,39	1,65	9,74	340,87	0,79	1,40
13	125	28,8	1,34	2,12	8,54	440,66	1,05	0,95
14	123	28,1	1,53	2,62	9,38	713,88	0,93	1,17
15	124	28,7	0,80	1,55	12,38	1252,35	0,92	0,83
16	125	24,0	1,83	2,82	2,79	167,59	1,14	0,84
17	124	23,7	1,08	1,25	6,46	447,19	0,92	0,59
18	125	23,7	1,49	1,45	4,66	265,96	0,80	0,72
19	110	23,8	1,29	1,94	9,59	522,96	1,07	1,00
20	110	23,9	1,84	2,15	10,68	257,16	1,22	1,09
21	109	23,8	2,87	2,08	15,58	604,23	0,93	1,32
22	80	28,9	1,77	1,67	3,86	582,00	0,93	0,81
23	81	28,8	2,67	1,84	5,55	291,43	0,74	1,01
24	79	28,9	0,78	1,78	6,71	528,68	1,09	1,13
25	140	23,6	1,76	3,16	5,97	265,33	1,14	0,90
26	140	23,8	1,53	2,57	4,89	160,38	1,46	1,05
27	140	24,2	1,19	1,76	7,37	544,96	1,03	0,87

Uma amostra dos oscilogramas, representando comportamentos dinâmicos típicos para os três tipos de eletrodos, estão apresentados nas Figuras 6.1 a 6.12. Pode-se notar que na posição plana o eletrodo rutilico apresentou o maior número de curtos-circuitos, seguido do celulósico e por último do básico. Esta tendência foi repetida para a posição sobrecabeça. Já para um mesmo tipo de eletrodo, vê-se que os eletrodos rutilicos e celulósicos apresentaram menor número de curtos-circuitos na posição sobrecabeça, enquanto para o básico a posição

não provocou diferença facilmente perceptível na quantidade de curtos. Deve-se ressaltar que para os três tipos de eletrodo, os níveis de corrente usados na posição plana foram diferentes dos usados na posição sobrecabeça, mas acredita-se que esta diferença no número de curtos também sofreu efeito da gravidade. Deve-se observar ainda nestas figuras que, para os casos onde ocorreu ação da corrente de curto-circuito, a cada curto-circuito corresponde um pico de corrente. No entanto, nem sempre a corrente alcança o valor previamente definido. Em muitos casos, a gota se destaca ou é repelida antes mesmo da corrente alcançar seu valor de pico. É importante considerar ainda, que variações deste tipo podem também ser obtidas erroneamente quando se usam baixas frequências de aquisição de dados (Farias, 1998). Os demais oscilogramas e os histogramas de curto-circuito para todos os ensaios deste trabalho estão disponíveis em Correia (1999).

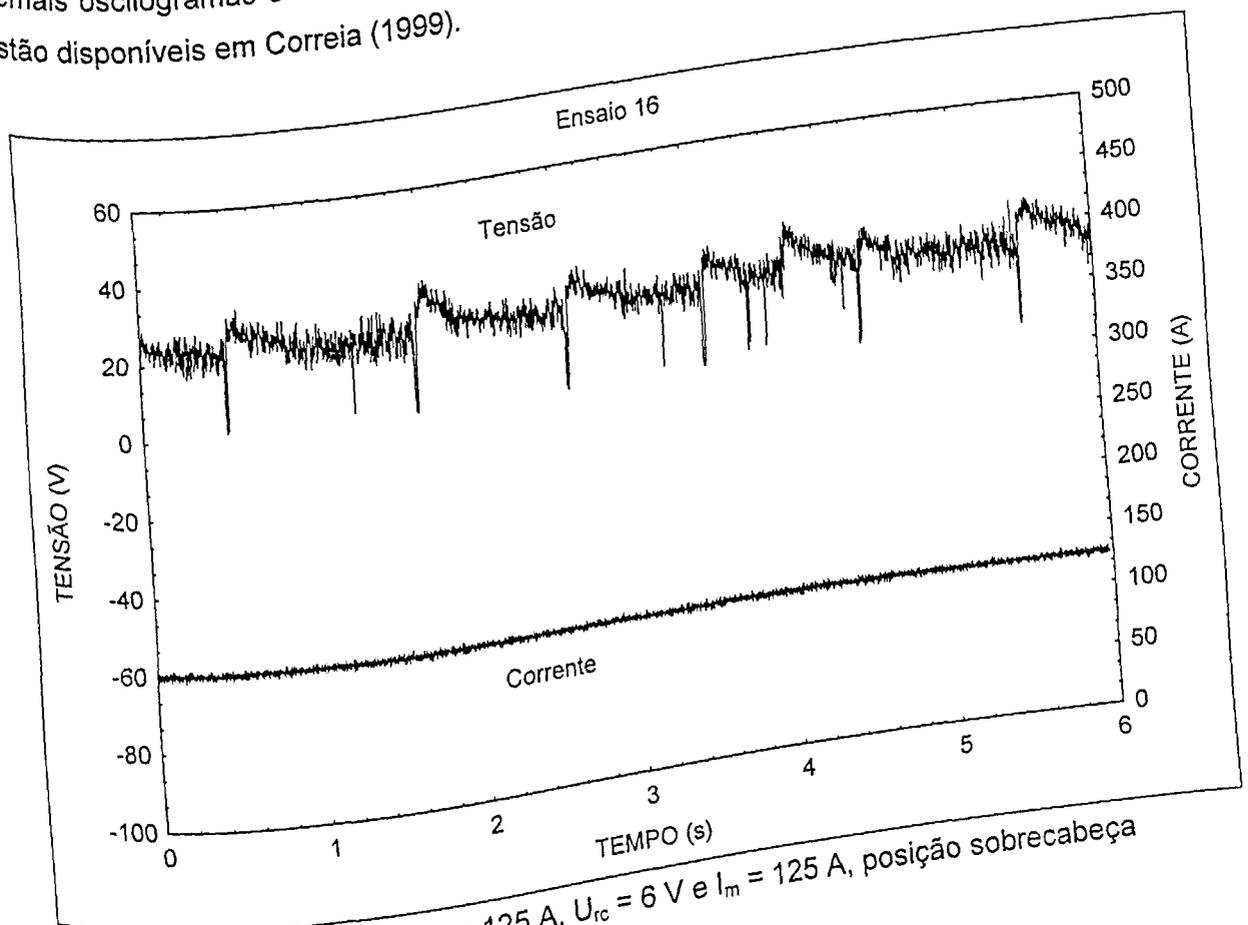


Figura 6.1 – Eletrodo básico, $I_{cc} = 125$ A, $U_{rc} = 6$ V e $I_m = 125$ A, posição sobrecabeça

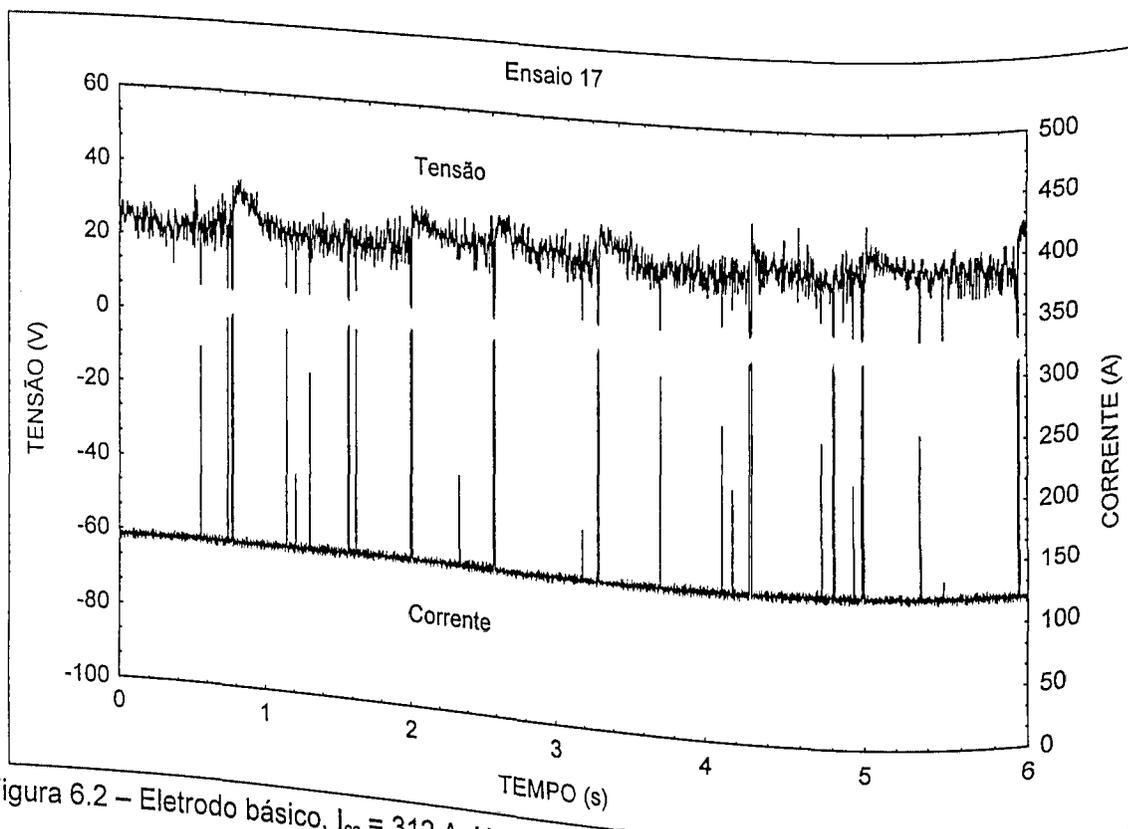


Figura 6.2 – Eletrodo básico, $I_{cc} = 312$ A, $U_{rc} = 12$ V e $I_m = 124$ A, posição sobrecabeça

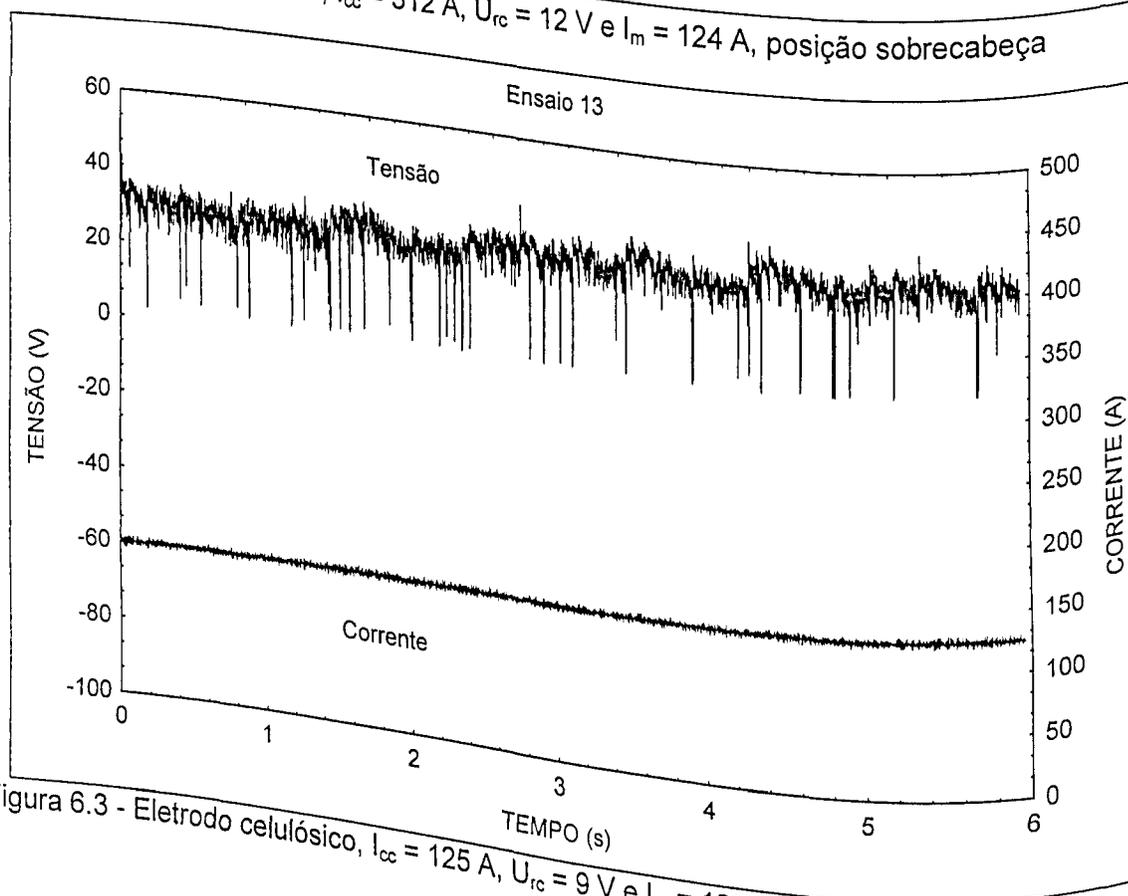


Figura 6.3 - Eletrodo celulósico, $I_{cc} = 125$ A, $U_{rc} = 9$ V e $I_m = 125$ A, posição sobrecabeça

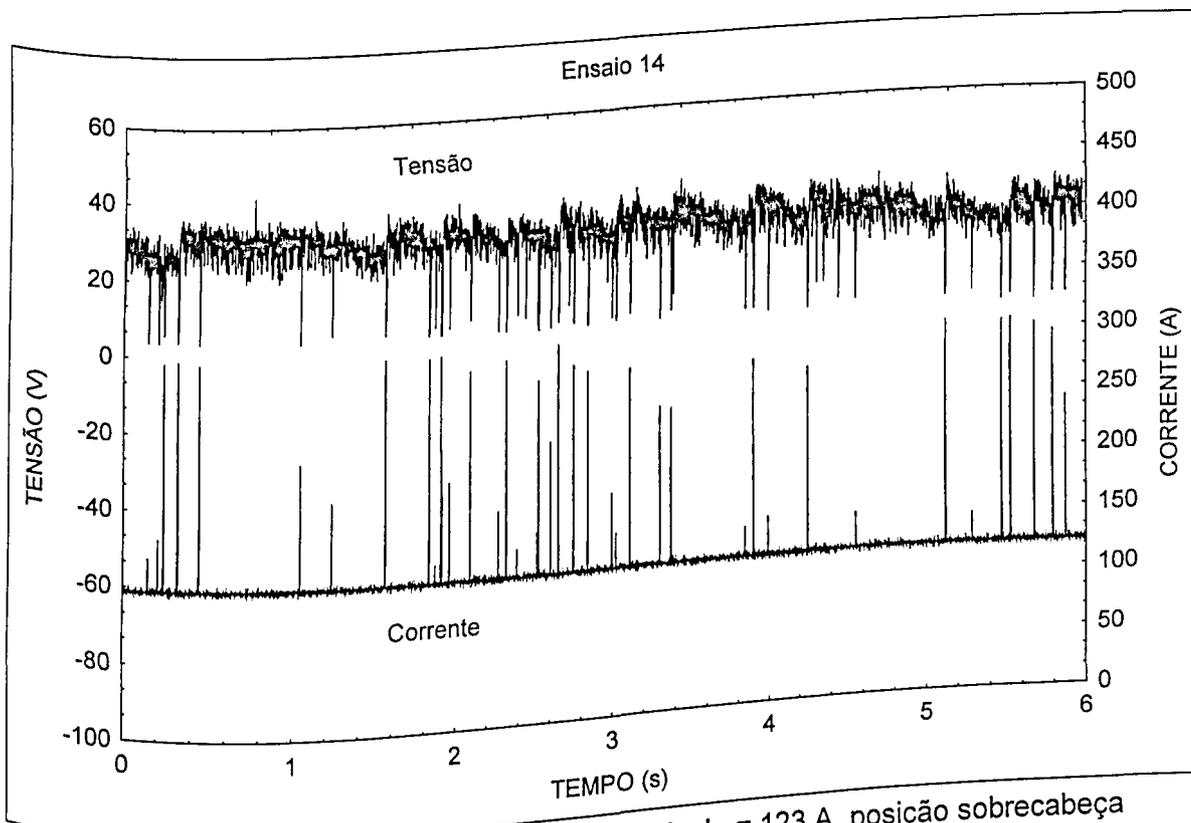


Figura 6.4 - Eletrodo celulósico, $I_{cc} = 312$ A, $U_{rc} = 6$ V e $I_m = 123$ A, posição sobrecabeça

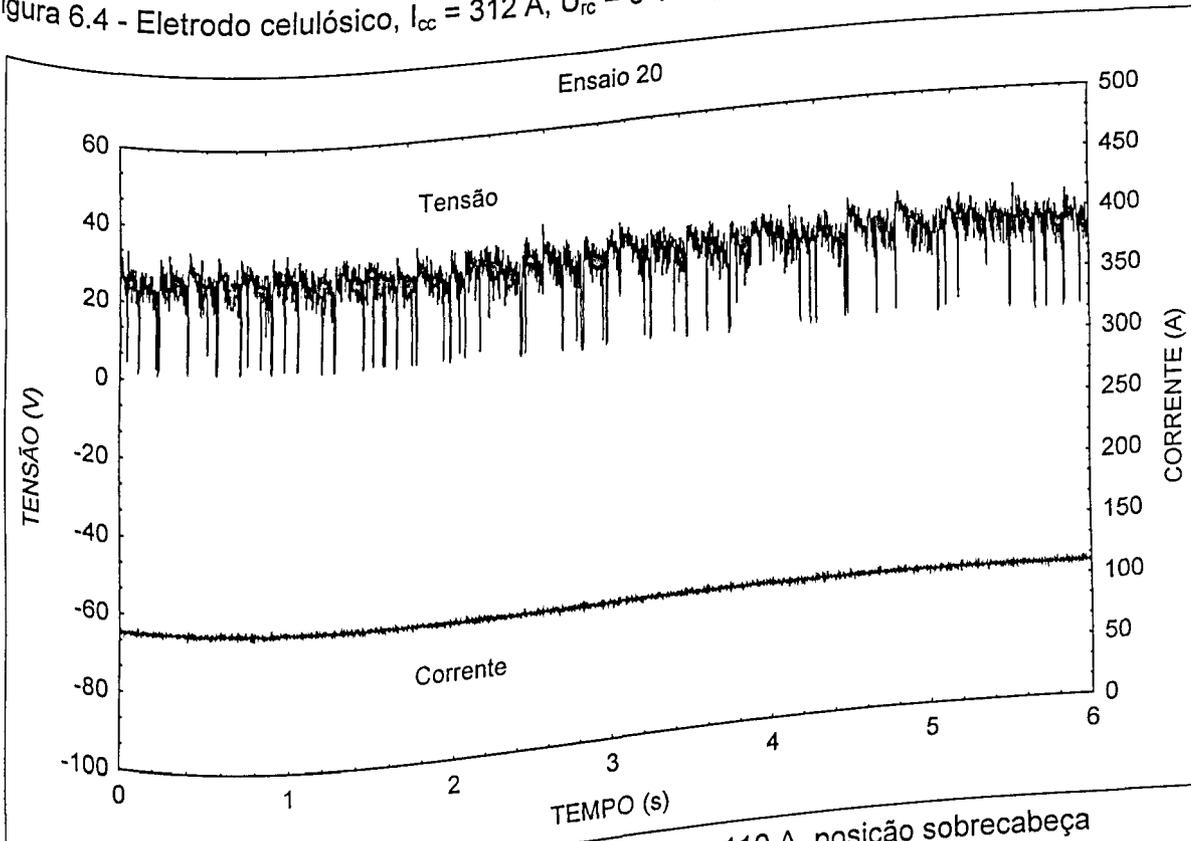


Figura 6.5 - Eletrodo rutilico, $I_{cc} = 110$ A, $U_{rc} = 9$ V e $I_m = 110$ A, posição sobrecabeça

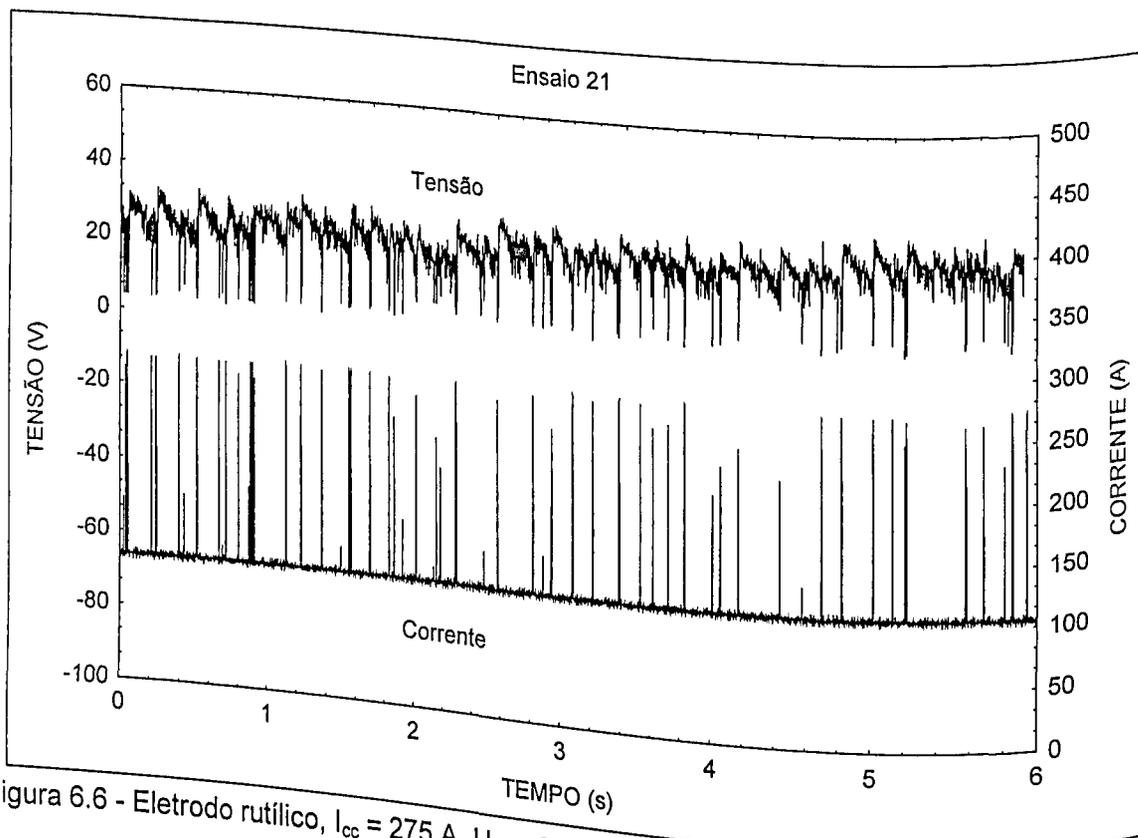


Figura 6.6 - Eletrodo rutilico, $I_{cc} = 275$ A, $U_{rc} = 6$ V e $I_m = 109$ A, posição sobrecabeça

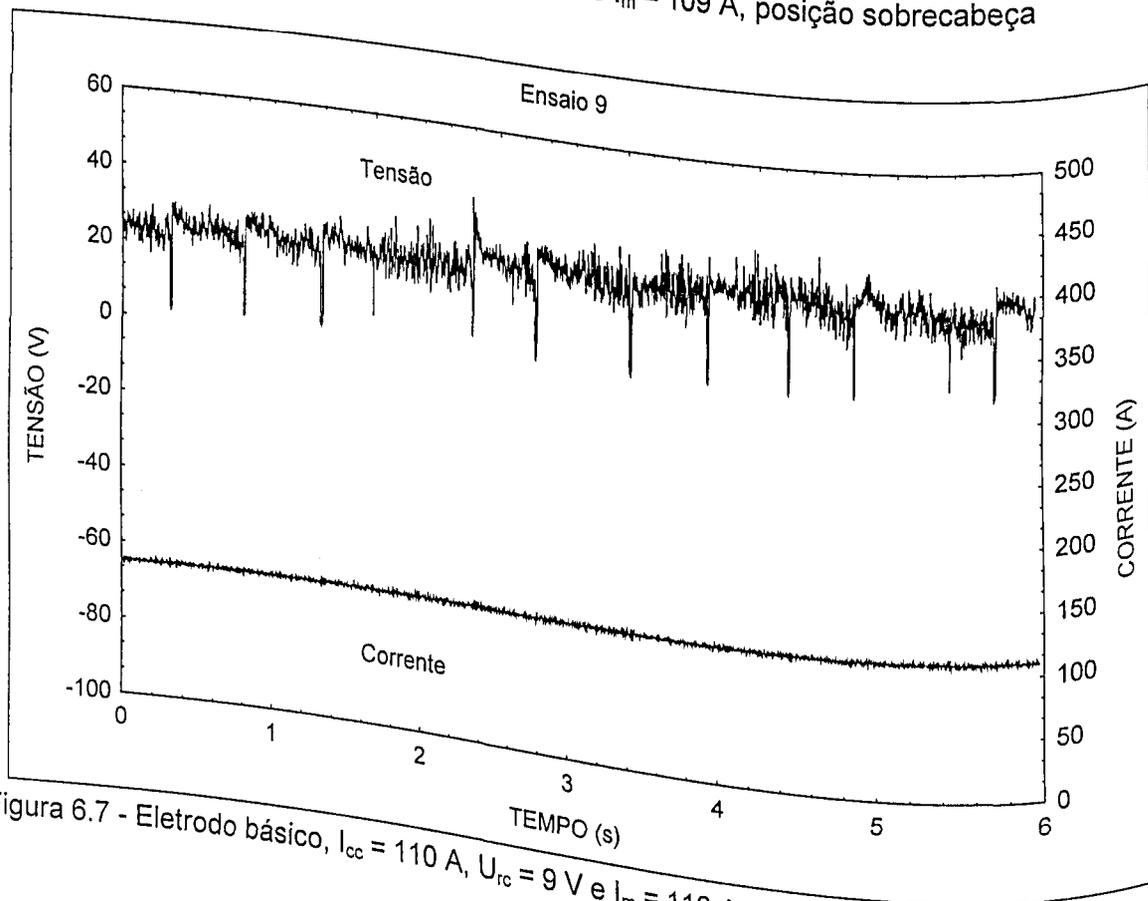


Figura 6.7 - Eletrodo básico, $I_{cc} = 110$ A, $U_{rc} = 9$ V e $I_m = 110$ A, posição plana

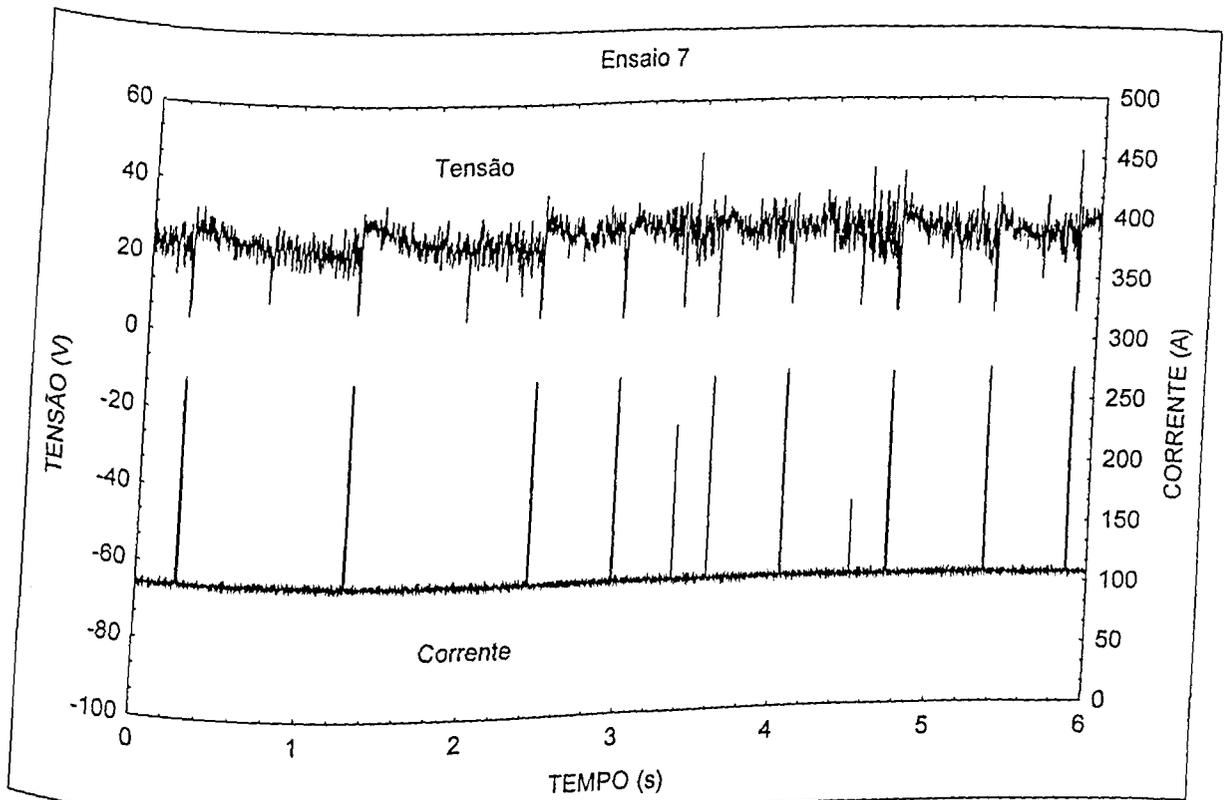


Figura 6.8 - Eletrodo básico, $I_{cc} = 275$ A, $U_{rc} = 6$ V e $I_m = 109$ A, posição plana

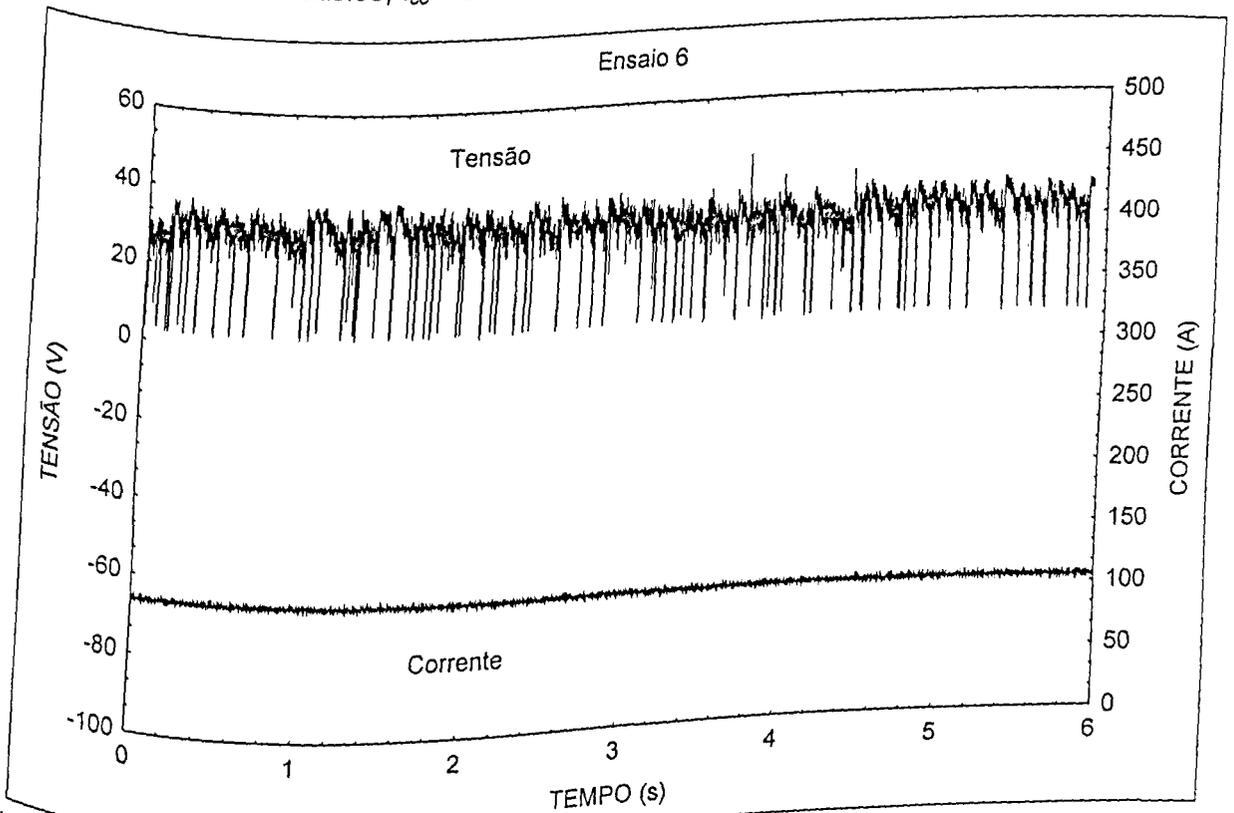


Figura 6.9 - Eletrodo celulósico, $I_{cc} = 105$ A, $U_{rc} = 12$ V e $I_m = 105$ A, posição plana

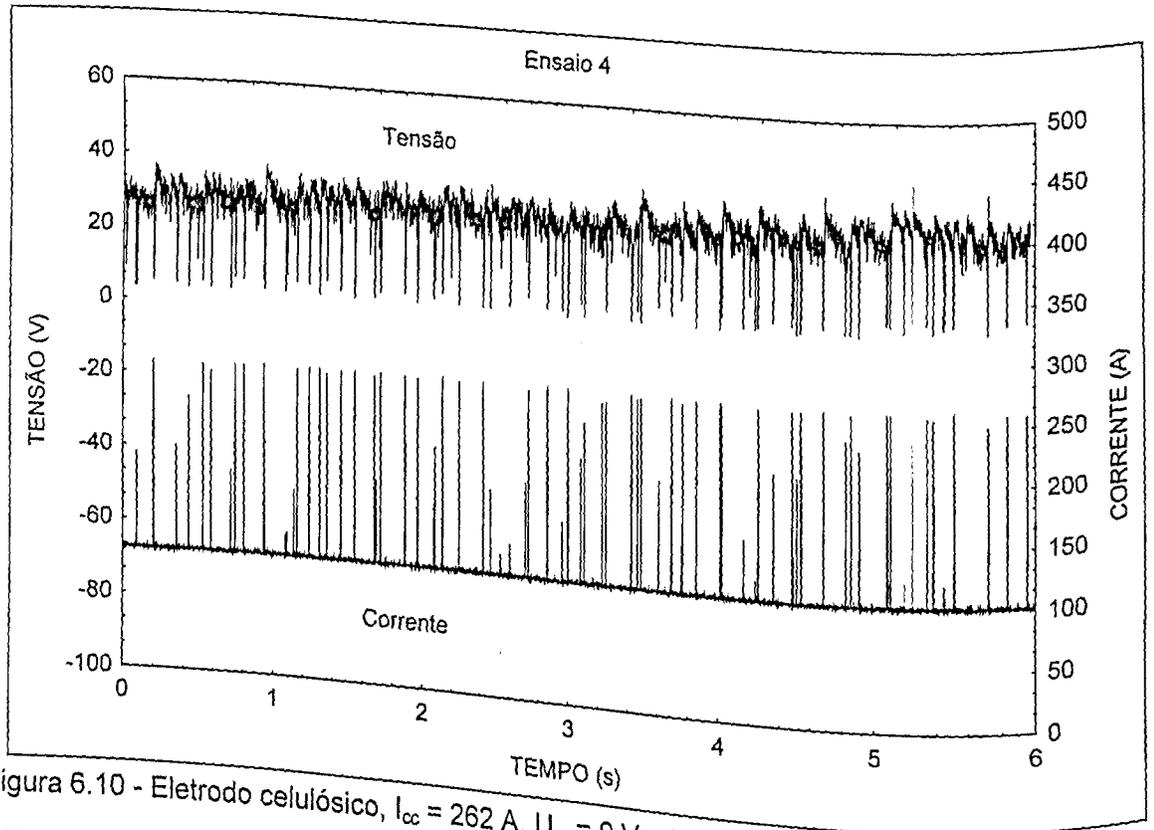


Figura 6.10 - Eletrodo celulósico, $I_{cc} = 262$ A, $U_{rc} = 9$ V e $I_m = 105$ A, posição plana

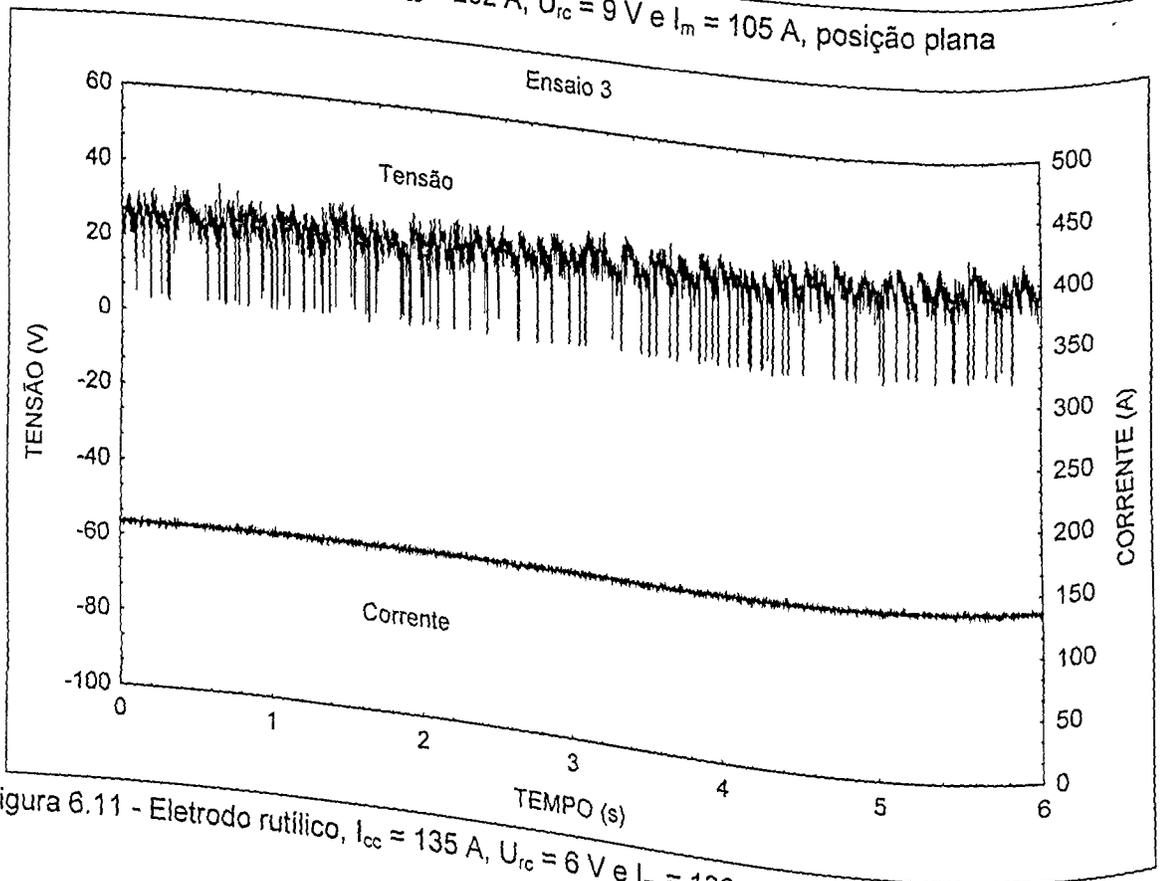


Figura 6.11 - Eletrodo rutilico, $I_{cc} = 135$ A, $U_{rc} = 6$ V e $I_m = 136$ A, posição plana

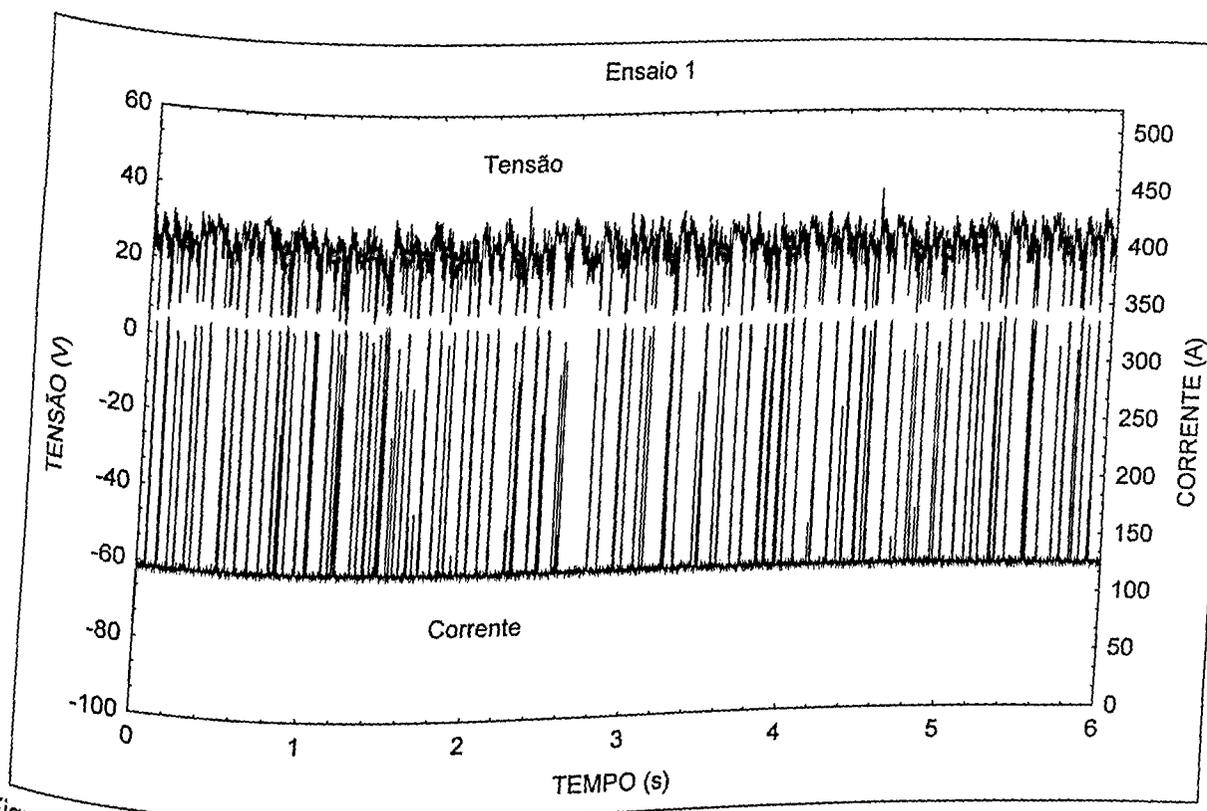


Figura 6.12 - Eletrodo rutilico, $I_{cc} = 337$ A, $U_{rc} = 12$ V e $I_m = 134$ A, posição plana

Além das características elétricas, outro aspecto analisado genericamente foi o acabamento dos cordões. A aparência dos cordões de solda variou significativamente ao longo dos ensaios. Na posição plana, todos os cordões foram bem conformados, sendo os eletrodos básicos os de melhor aspecto superficial. A Figura 6.13 mostra uma solda típica nesta posição com o eletrodo básico.

Na posição sobrecabeça, os eletrodos rutilicos, soldados em corrente baixa ($I_m=80$ A), apresentaram grande instabilidade do cordão de solda. Todas as três soldas apresentaram aparência semelhante à da Figura 6.14. Estas irregularidades desapareceram com o aumento do nível de corrente, como mostra a Figura 6.15, onde o eletrodo rutilico produziu um cordão de bom aspecto no nível de corrente médio ($I_m=110$ A).

Ainda na posição sobrecabeça, os eletrodos celulósicos apresentaram problemas de desvio do cordão de solda para as laterais do chanfro, quando soldados com corrente alta ($I_m=124$ A). A Figura 6.16 mostra uma solda típica nestas condições. No entanto, observou-se que a diminuição do nível de corrente teve como consequência a melhora do aspecto dos cordões. A Figura 6.17 exemplifica a mudança.

Também na posição sobrecabeça, os eletrodos básicos apresentaram os cordões de melhor aspecto, como indica a Figura 6.18.

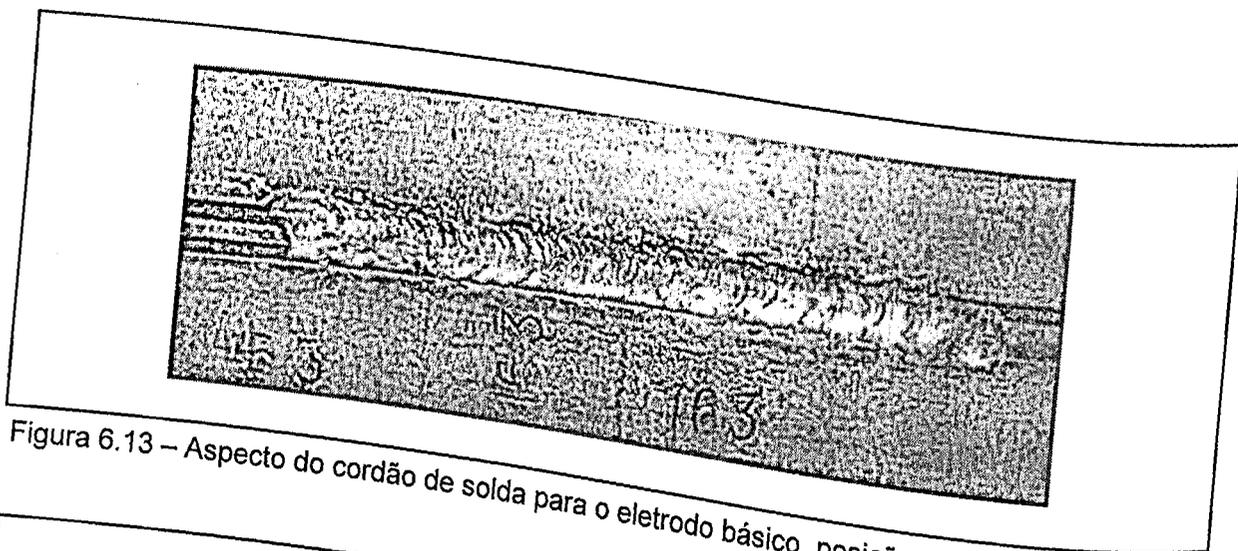


Figura 6.13 – Aspecto do cordão de solda para o eletrodo básico, posição plana (ensaio 08)

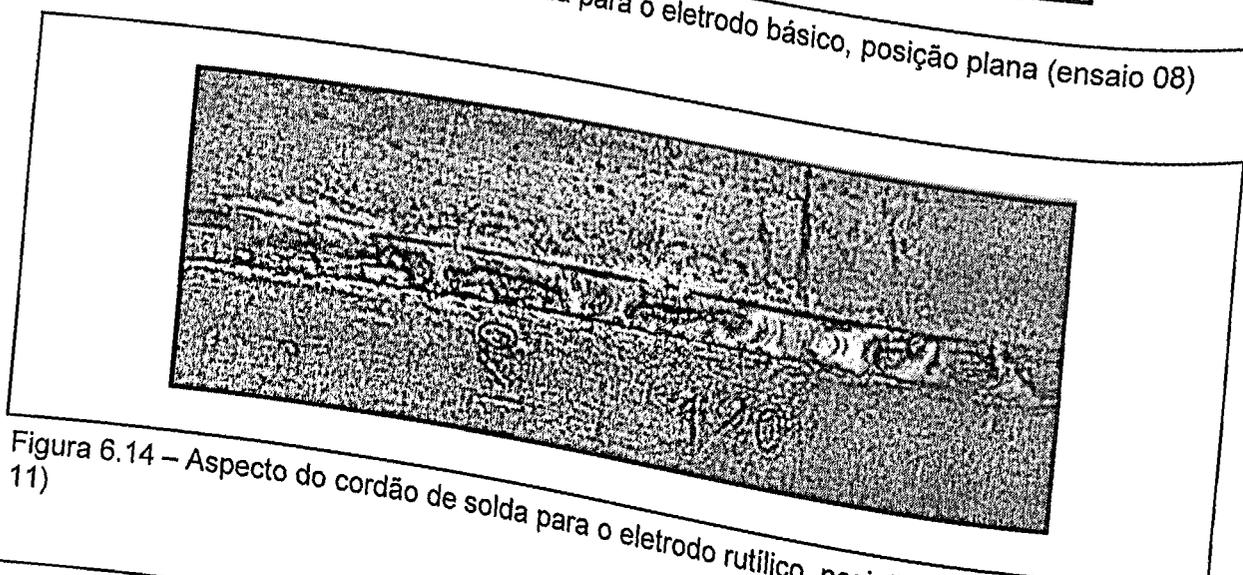


Figura 6.14 – Aspecto do cordão de solda para o eletrodo rutilico, posição sobrecabeça (ensaio 11)

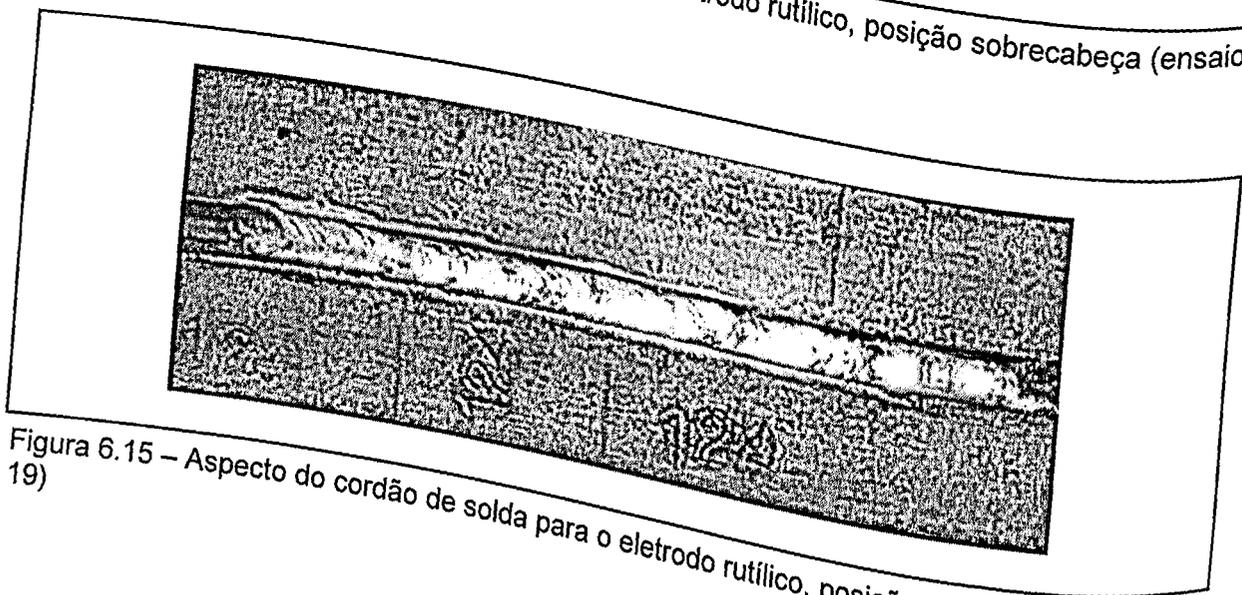


Figura 6.15 – Aspecto do cordão de solda para o eletrodo rutilico, posição sobrecabeça (ensaio 19)

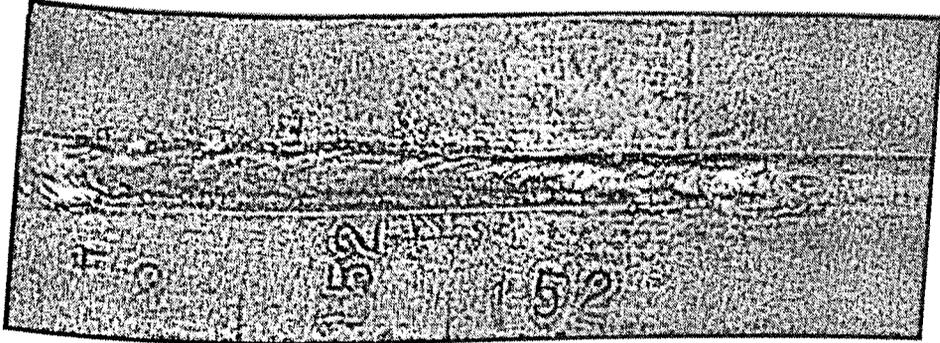


Figura 6.16 – Aspecto do cordão de solda para o eletrodo celulósico, posição sobrecabeça (ensaio 14)

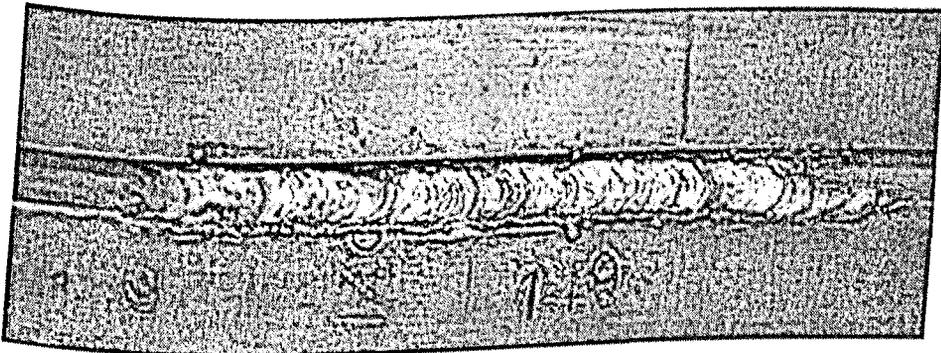


Figura 6.17 – Aspecto do cordão de solda para o eletrodo celulósico, posição sobrecabeça (ensaio 23)

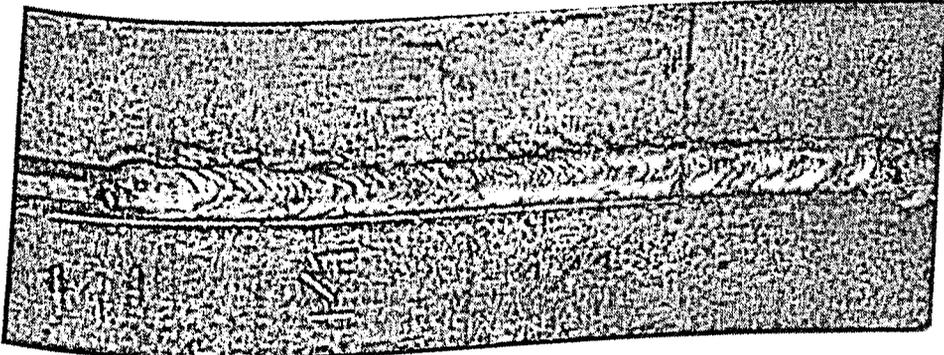


Figura 6.18 – Aspecto do cordão de solda para o eletrodo básico, posição sobrecabeça (ensaio 25)

6.2 Análise Quantitativa da Transferência de Carga Elétrica

Os valores dos índices de estabilidade do arco estão apresentados, de forma destacada, nas Tabelas 6.2, considerando-se apenas os curtos-circuitos com transferência metálica ($t_{cc} \geq 2,0$ ms), e Tabela 6.1, para todos os curtos-circuitos. Observa-se que em todos os ensaios houve a ocorrência de curtos-circuitos com transferência. Estes resultados diferem daqueles encontrados por Farias et al (1998), onde registrou-se a ausência de curtos-circuitos com transferência quando se usaram os valores máximos de corrente de curto-circuito com eletrodos rútilicos e celulósicos de menor diâmetro (2,5 mm).

Nas tabelas de análise de variância que vêm a seguir, o índice F representa a importância relativa dos vários fatores de controle em relação à variância do erro. Um grande fator F significa que o efeito do fator é grande quando comparado com a variância do erro. Desta forma, quanto maior o valor de F, mais importante é aquele fator na influência da resposta do processo. Um valor de F menor que 1 significa que o efeito do fator é desprezível. Um valor de F maior que 2 significa que o efeito do fator não é tão pequeno, enquanto um valor maior que 4 significa que o efeito do fator é bem expressivo (Phadke, 1989). A Razão SQ indica qual a participação relativa de cada fator na composição da resposta. Isto é, a Razão SQ para todas as tabelas de análise de variância, valores em negrito indicam que o fator correspondente afeta a resposta com significância de 1% e valores sublinhados indicam que o fator correspondente afeta a resposta com significância de 5%.

A análise de variância para o índice facilidade de transferência de carga elétrica para todos os curtos-circuitos, FE_{1T} está apresentada na Tabela 6.3. Percebe-se que os fatores U_{rc} e I_m foram os que mais influenciaram o valor de FE_{1T} , ou seja, alterações em seus níveis provocaram uma variação na facilidade de transferência de carga muito mais acentuada do que variações da posição de soldagem, da corrente de curto-circuito e do tipo de eletrodo. A tensão de referência para controle de curto-circuito e a corrente média explicaram sozinhas 58% da resposta. Na Figura 6.19 observa-se, através de gráficos das médias, o sentido do efeito de cada fator sobre a FE_{1T} .

Tabela 6.2 - Dados da estabilidade do arco para os curtos-circuitos com $t_{cc} \geq 2,0$ ms

Exp. Nº	I_m (A)	U_m (V)	Transferência de carga		Transferência de metal			
			FE_1 ($W^{-1}s^{-1}$)	RE_1	F_{cc} (s^{-1})	F_{tm} (s^{-1})	R_{cc}	R_{tm}
1	134	23,8	0,50	2,05	3,52	408,66	1,25	6,75
2	135	24,5	1,31	3,64	7,49	333,10	1,69	4,32
3	136	24,6	1,45	2,47	9,58	236,47	1,42	2,96
4	105	28,2	1,09	3,90	4,71	363,10	1,60	4,95
5	104	27,9	2,27	3,16	6,97	289,10	1,53	3,29
6	105	28,1	1,27	3,17	8,52	222,53	1,95	2,89
7	109	24,5	2,76	1,75	1,60	139,08	2,15	3,35
8	109	24,1	0,99	1,88	1,61	111,91	2,24	3,26
9	110	24,3	2,51	1,86	1,67	91,76	2,90	3,20
10	81	24,3	2,61	1,92	5,61	153,42	1,15	1,77
11	79	23,7	1,04	2,39	4,40	290,93	1,67	3,58
12	80	24,5	1,94	2,34	5,84	234,55	1,13	2,67
13	125	28,8	1,14	3,16	3,63	214,70	1,28	2,66
14	123	28,1	1,60	4,50	2,88	342,83	0,95	3,92
15	124	28,7	0,43	3,55	2,17	365,19	1,51	5,58
16	125	24,0	1,55	1,98	1,00	70,37	9,64	5,64
17	124	23,7	0,54	2,68	1,35	111,68	3,68	3,28
18	125	23,7	0,88	2,08	1,31	93,46	2,63	2,70
19	110	23,8	1,10	2,64	3,34	241,67	1,64	2,54
20	110	23,9	1,89	2,53	6,18	163,31	1,51	1,94
21	109	23,8	2,63	2,40	5,94	339,74	1,46	3,00
22	80	28,9	1,11	3,11	1,07	211,30	0,80	2,39
23	81	28,8	2,18	1,97	2,78	165,65	0,75	2,18
24	79	28,9	0,51	4,08	2,58	278,68	1,52	2,79
25	140	23,6	1,59	4,86	2,53	126,99	2,07	2,69
26	140	23,8	1,45	2,23	2,62	91,91	3,28	2,86
27	140	24,2	0,79	2,77	2,80	233,60	1,97	2,61

Tabela 6.3 – Análise de variância para o índice FE_{1T}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,05	0,05	0,35	0,5
Eletrodo	2	0,50	0,25	1,64	5,1
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	0,57	0,28	1,86	5,9
I_m	2	2,10	1,05	<u>6,87</u>	21,6
Eletrodo x U_{rc}	2	0,07	0,03	0,22	0,7
$I_m \times U_{rc}$	2	0,10	0,05	0,34	1,0
I_{cc}	2	0,55	0,27	1,78	5,7
U_{rc}	2	3,53	1,77	11,54	36,3
Posição x U_{rc}	2	0,88	0,44	2,86	9,0
Erro	9	1,38	0,15		
Total	26	9,73	0,37		

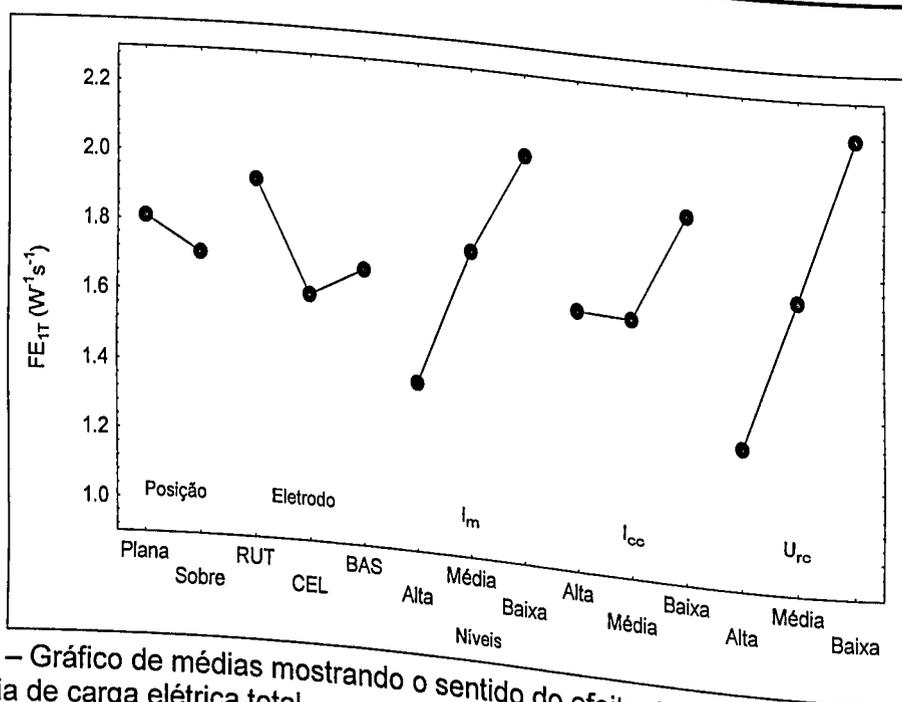


Figura 6.19 – Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a facilidade de transferência de carga elétrica total

A Tabela 6.4 e a Figura 6.20 mostram, respectivamente, a análise de variância e os gráficos de médias para a facilidade de transferência de carga elétrica nos curtos-circuitos com transferência, FE_1 . Neste caso, somente a U_{rc} mostrou-se influente, responsável por cerca de 35% da resposta. Nota-se pelas Figuras 6.19 e 6.20 que os maiores índices de FE_1 foram conseguidos com os menores ajustes de U_{rc} . Uma análise mais detalhada do comportamento dinâmico do arco mostrou que o aumento de U_{rc} provocou um aumento no valor de E_1 , o que, conseqüentemente, diminuiu o valor de FE_1 (fórmula 2.5), para os três tipos de eletrodos. Analisando-se todos os curtos-circuitos, verifica-se que o aumento de U_{rc} aumentou o valor da

corrente de reabertura do arco após o curto, I_1 . Este efeito também ocorreu para o caso dos curtos com transferência. O efeito do aumento da U_{rc} sobre a tensão de reabertura do arco após o curto-circuito, U_1 , também mostrou-se influente. Percebe-se um aumento de U_1 com o aumento de U_{rc} de 6 para 12 V. Já o valor do tempo de reabertura do arco, t_1 , aumentou para maiores valores de U_{rc} (de 9 a 12 V). Explica-se, assim, a relação entre U_{rc} e FE_1 . Estes resultados vão de encontro aos de Farias et al (1998), onde os fatores mais influentes foram a combinação diâmetro do eletrodo/corrente (D/I) e a corrente de curto-circuito para FE_{1T} .

Tabela 6.4 - Análise de variância para o índice FE_1

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,20	0,20	0,90	1,6
Eletrodo	2	0,46	0,23	1,01	3,7
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	1,57	0,78	3,47	12,5
I_m	2	1,62	0,81	3,58	12,9
Eletrodo x U_{rc}	2	0,07	0,03	0,15	0,6
$I_m \times U_{rc}$	2	0,14	0,07	0,31	1,1
I_{cc}	2	4,35	2,18	9,62	34,6
U_{rc}	2	0,62	0,31	1,37	4,9
Posição x U_{rc}	2	2,04	0,23		16,2
Erro	9	12,58	0,48		
Total	26				

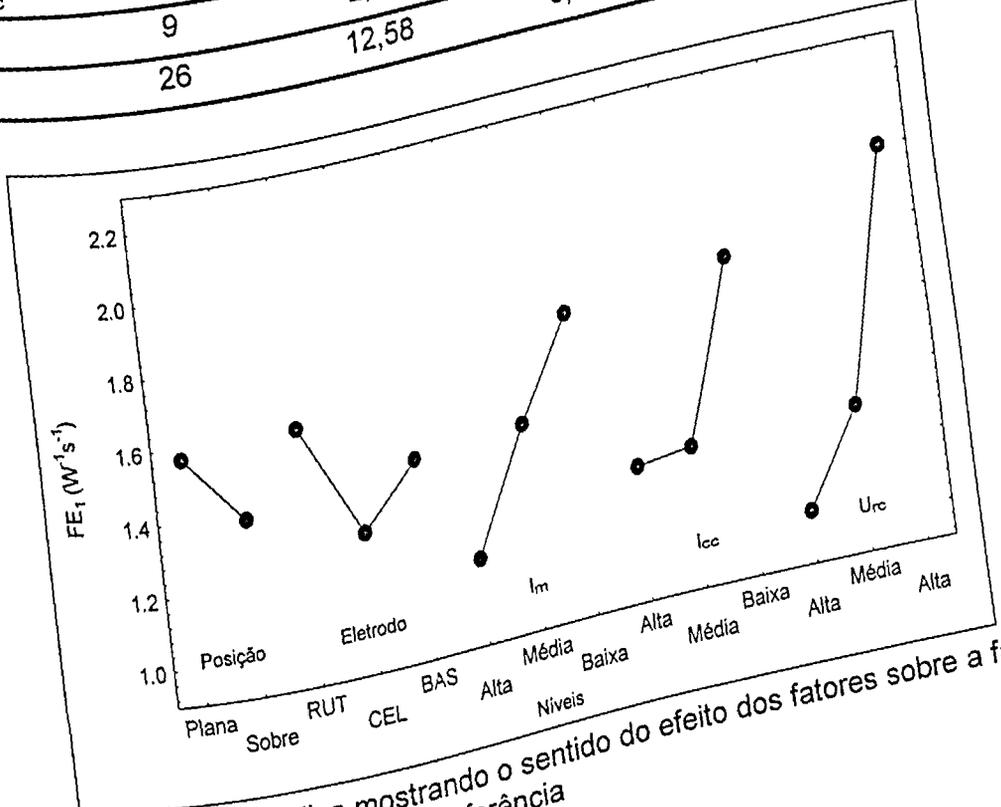


Figura 6.20 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a transferência de carga elétrica com transferência

A regularidade de transferência de carga elétrica, RE_1 , mede o grau de variação do Índice FE_1 , em torno de seu valor médio. Considera-se que, quanto maior o valor do índice RE_1 , mais regular é a transferência de carga. A Tabela 6.5 mostra que nenhum fator de controle se mostrou estatisticamente significativo sobre a regularidade de transferência de carga elétrica para todos os curtos-circuitos, RE_{1T} . Segundo Farias (1993), o aumento da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle do curto-circuito age no sentido de diminuir este índice. Pode-se supor que, após a transferência da gota, a distância entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão seja proporcional à corrente de curto-circuito (principalmente para $t_{cc} > 2,0$ ms em fontes eletromagnéticas). Logo, pode-se esperar variações nos valores da tensão e do tempo de reabertura, principalmente quando a fonte apresentar elevadas correntes de curto-circuito. Isto leva a um aumento no desvio padrão dos valores de E_1 , reduzindo conseqüentemente os valores de RE_1 . A Figura 6.21 apresenta o sentido do efeito dos fatores de controle sobre a RE_{1T} .

Vê-se pela Tabela 6.6 e pela Figura 6.22, que no caso de RE_1 ($t_{cc} \geq 2,0$ ms), o único fator influente foi o tipo de eletrodo, responsável por cerca de 28% da resposta. A Figura 6.22 também mostra que os maiores níveis de RE_1 foram conseguidos com o eletrodo do tipo celulósico. Acredita-se que o eletrodo celulósico, por apresentar proteção essencialmente gasosa e transferência metálica por gotas pequenas, apresenta poucas alterações nas condições de reabertura do arco após o curto-circuito.

Tabela 6.5 - Análise de variância para o índice RE_{1T}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,01	0,01		
Eletrodo	2	0,17	0,08	0,07	0,2
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	0,08	0,04	0,47	2,8
I_m	2	1,15	0,57	0,23	1,3
Eletrodo \times U_{rc}	2	0,06	0,03	3,24	19,1
$I_m \times U_{rc}$	2	0,47	0,24	0,18	1,0
I_{cc}	2	1,18	0,59	1,34	7,8
U_{rc}	2	1,30	0,65	3,33	19,6
Posição \times U_{rc}	2	0,02	0,01	3,67	21,6
Erro	9	1,59	0,18	0,06	0,3
Total	26	6,02	0,23		26,4

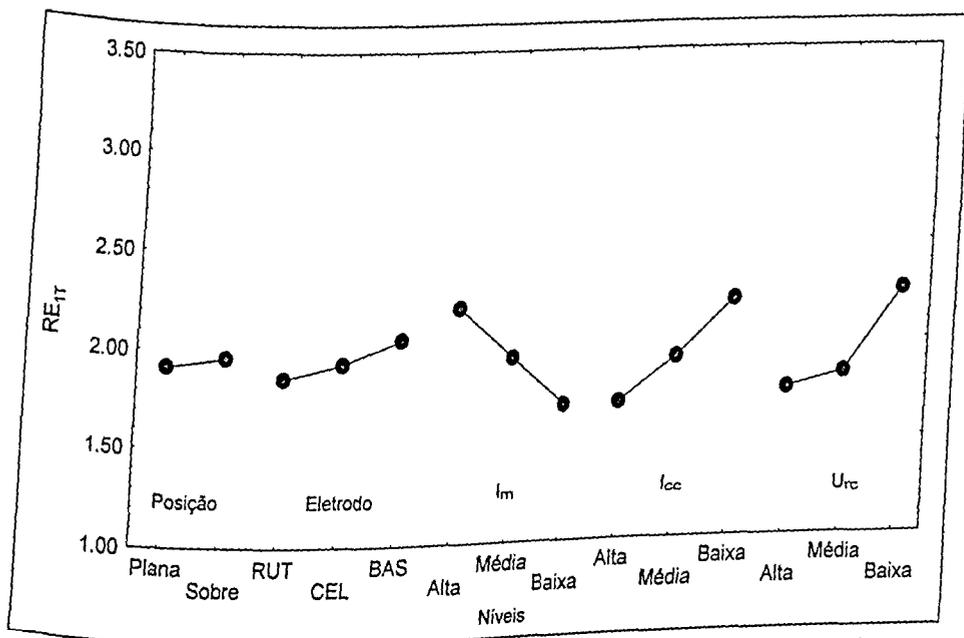


Figura 6.21 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a regularidade de transferência de carga elétrica total

Tabela 6.6 - Análise de variância para o índice RE₁

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,22	0,22	0,40	1,2
Eletrodo	2	5,19	2,59	<u>4,79</u>	27,5
I _{cc} x U _{rc}	2	0,49	0,25	0,46	2,6
I _m	2	3,53	1,77	3,26	18,7
Eletrodo x U _{rc}	2	0,02	0,01	0,02	0,1
I _m x U _{rc}	2	1,55	0,77	1,43	8,2
I _{cc}	2	2,35	1,18	2,17	12,5
U _{rc}	2	0,11	0,06	0,10	0,6
Posição x U _{rc}	2	0,52	0,26	0,48	2,8
Erro	9	4,08	0,54		21,6
Total	26	18,87	0,73		

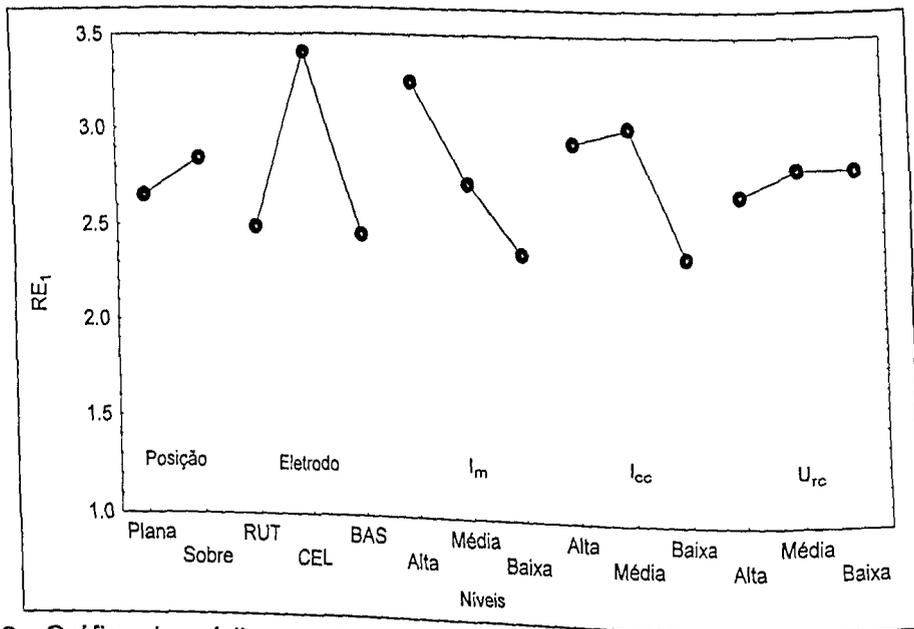


Figura 6.22 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a regularidade de transferência de carga elétrica com transferência

6.3 Análise Quantitativa da Transferência de Metal

A Tabela 6.7 apresenta a análise de variância para a facilidade de ocorrência de curtos-circuitos totais, F_{ccT} . Percebe-se que os fatores mais influentes foram a posição, o tipo de eletrodo e a corrente média. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Farias et al (1998), com exceção da posição (que não foi por ele estudada). Na Figura 6.23 verifica-se, através de gráficos de média, o sentido do efeito de cada fator sobre a F_{ccT} .

Tabela 6.7 - Análise de variância para o índice F_{ccT}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	388,87	388,87	21,81	19,7
Eletrodo	2	720,36	360,18	20,20	36,6
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	109,08	54,54	3,06	5,5
I_m	2	384,56	192,28	10,78	19,5
Eletrodo \times U_{rc}	2	2,92	1,46	0,08	0,1
$I_m \times U_{rc}$	2	35,08	17,54	0,98	1,8
I_{cc}	2	110,50	55,25	3,10	5,6
U_{rc}	2	31,86	15,93	0,89	1,6
Posição \times U_{rc}	2	25,96	12,98	0,73	1,3
Erro	9	160,49	17,83		8,1
Total	26	1969,68	75,76		

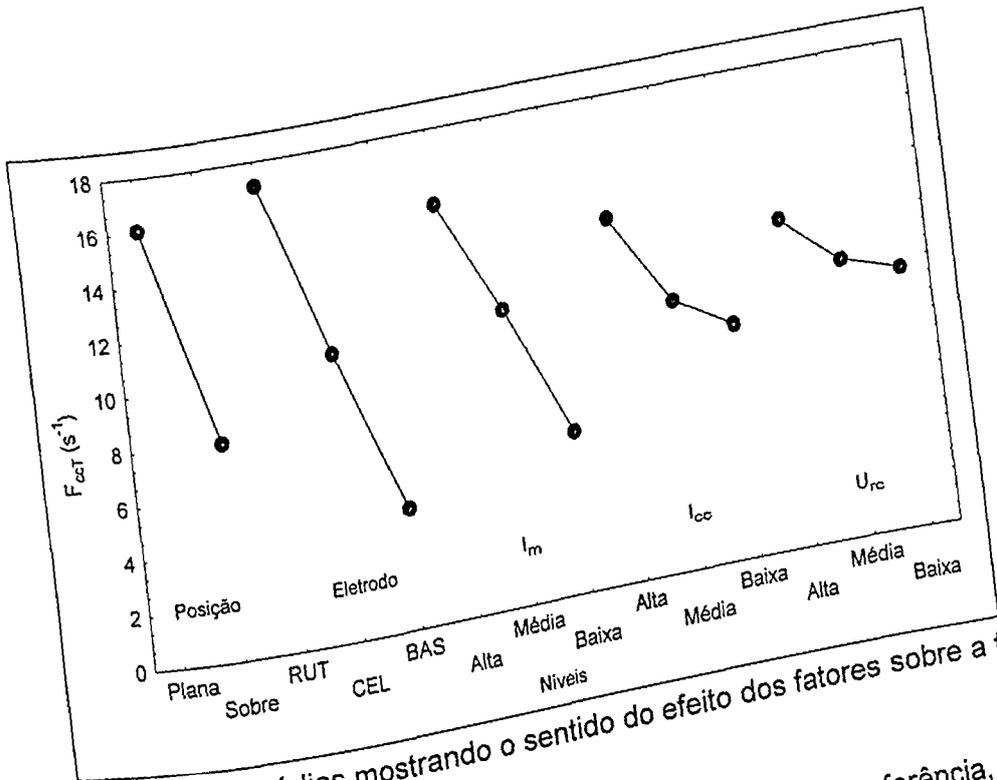


Figura 6.23 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a facilidade de ocorrência de curto-circuito total

No caso da facilidade de ocorrência de curtos-circuitos com transferência, F_{cc} , a análise de variância (Tabela 6.8) indica efeitos mais significativos da posição de soldagem, do tipo de eletrodo, da interação $I_{cc} \times U_{rc}$, da corrente média e da interação Eletrodo $\times U_{rc}$. Na Figura 6.24 verifica-se, através de gráficos de média, o sentido do efeito de cada fator sobre a F_{cc} .

A análise das Figuras 6.23 e 6.24 mostra que quanto maior o nível, tanto da I_{cc} como da U_{rc} , maior a frequência de curtos-circuitos total e menor a frequência dos curtos com transferência.

Tabela 6.8 – Análise de variância para o índice F_{cc}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	20,55	20,55	19,11	13,7
Eletrodo	2	69,75	34,88	32,43	46,4
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	14,98	7,49	<u>6,97</u>	10,0
I_m	2	9,39	4,69	<u>4,36</u>	6,3
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	10,46	5,23	<u>4,87</u>	7,0
$I_m \times U_{rc}$	2	2,74	1,37	1,28	1,8
I_{cc}	2	8,58	4,29	3,99	5,7
U_{rc}	2	3,66	1,83	1,70	2,4
Posição $\times U_{rc}$	2	0,40	0,20	0,18	0,3
Erro	9	9,68	1,08		6,4
Total	26	150,20	5,78		

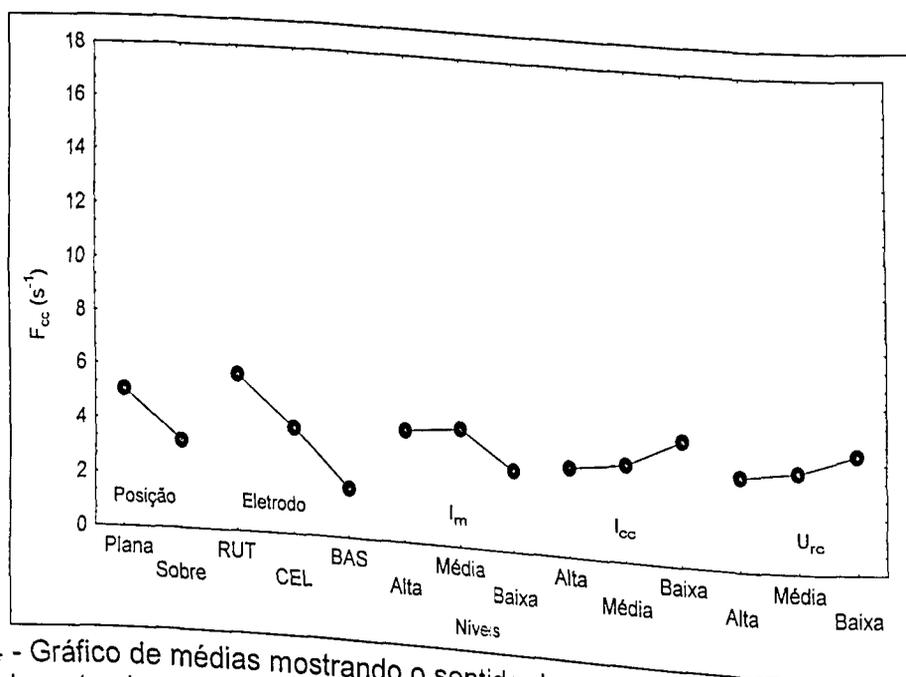


Figura 6.24 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a facilidade de ocorrência de curto-circuito com transferência

O tipo de eletrodo foi, nos dois casos, o maior responsável pela resposta. Isto já era esperado, uma vez que as freqüências próprias de curtos (ou seja, o modo de transferência metálica) para os três tipos de eletrodos é bem diferente. O segundo parâmetro em importância para estes índices foi a posição de soldagem, sendo a posição sobrecabeça detentora do menor número de curtos-circuitos, tanto totais como com transferência. Acredita-se que a força da gravidade seja a responsável (ela dificulta a gota tocar na poça de fusão, mas, uma vez

tocando, a principal força de transferência passa a ser a tensão superficial e a força gravitacional perde a relevância). Juntos, estes dois parâmetros responderam por cerca de 60% da resposta, tanto em F_{ccT} , como em F_{cc} . Nota-se também, pela Tabela 6.8, uma contribuição significativa da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ na resposta do índice F_{cc} . A Figura 6.25 exemplifica o comportamento desta interação para o eletrodo rutilico: verifica-se que o efeito do aumento da U_{rc} sobre o índice F_{cc} depende do ajuste da I_{cc} . Tomando-se como exemplo o ajuste da I_{cc} no valor médio ($I_{cc} = 1,8 \times I_m$) percebe-se uma redução da facilidade de ocorrência de curtos-circuitos, enquanto que para o ajuste baixo da I_{cc} ($I_{cc} = I_m$), há um aumento no valor de F_{cc} quando a tensão de referência é reduzida de 9 para 6 V. A Tabela 6.8 também mostra a influência da interação Eletrodo $\times U_{rc}$ na resposta do índice F_{cc} , mas deve-se levar em conta que sua participação é da ordem do erro.

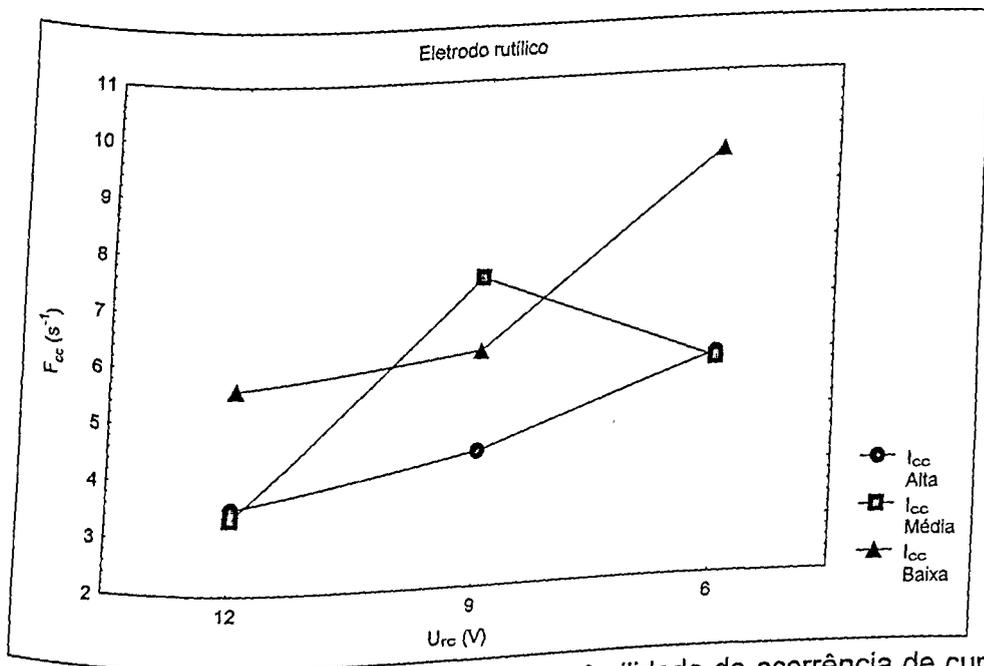


Figura 6.25 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a facilidade de ocorrência de curto-circuito com transferência

Seguindo a tendência de trabalhos anteriores (Farias, 1993 e Farias et al, 1998), a corrente de curto-circuito foi o fator mais influente sobre a facilidade de transferência metálica, considerando a totalidade dos curtos-circuitos (F_{tmT}). Tal pode ser verificado pela análise de variância mostrada na Tabela 6.9. Esta indica ainda que o tipo de eletrodo e a corrente média também foram fatores bastante influentes. A soma desses três fatores foi responsável por quase 70% da resposta. Na Figura 6.26 verifica-se, através de gráficos de médias, o sentido do efeito de cada fator sobre a F_{tmT} . Quando analisam-se os dados dos curtos-circuitos com transferência (Tabela 6.10 e Figura 6.27), vê-se que a corrente de curto-circuito permaneceu influente, mas o tipo de eletrodo apareceu como o fator mais importante. Também a corrente média manteve sua influência. Para este índice, a análise de variância mostra ainda que a

posição passou a ser também um parâmetro significativo, mas com participação equivalente ao erro. Pode-se admitir, então, que considerando a soldagem com determinado tipo de eletrodo, a I_{cc} seria a principal responsável pela duração dos curtos-circuitos.

Tabela 6.9 – Análise de variância para o índice F_{tmT}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	42093,87	42093,87	1,12	1,6
Eletrodo	2	631976,78	315988,39	8,44	23,4
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	77590,78	38795,39	1,04	2,9
I_m	2	516106,52	258053,26	<u>6,90</u>	19,1
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	51893,73	25946,87	0,69	1,9
$I_m \times U_{rc}$	2	110947,74	55473,87	1,48	4,1
I_{cc}	2	711320,78	355660,39	9,50	26,3
U_{rc}	2	150166,86	75083,43	2,01	5,6
Posição $\times U_{rc}$	2	76146,58	38073,29	1,02	2,8
Erro	9	336800,26	37422,25		12,5
Total	26	2705043,89	104040,15		

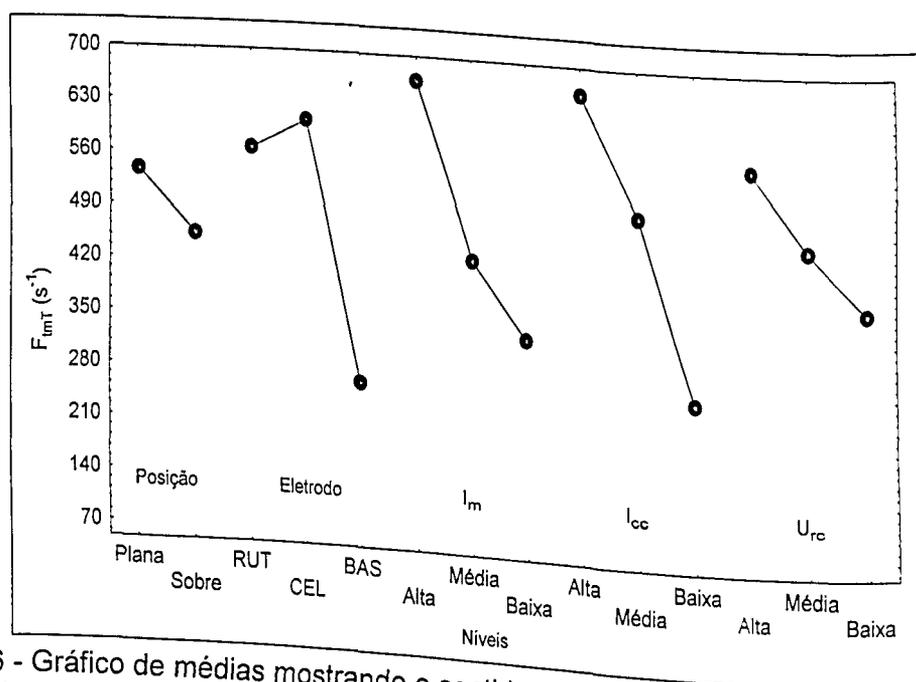


Figura 6.26 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a facilidade de transferência metálica total

02653/99

Tabela 6.10 - Análise de variância para o índice F_{tm}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	136490,14	136490,14	7,84	3,2
Eletrodo	2	723,84	361,92	66,01	53,7
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	26474,20	13237,10	0,35	0,3
I_m	2	2476,40	1238,20	12,80	10,4
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	1635,82	817,91	1,20	1,0
$I_m \times U_{rc}$	2	67171,06	33585,53	0,79	0,6
I_{cc}	2	159,66	79,83	32,49	26,4
U_{rc}	2	1788,85	894,42	0,08	0,1
Posição $\times U_{rc}$	2	9304,50	4652,25	0,87	0,7
Erro	9	254326,36	28258,48		3,7
Total	26				

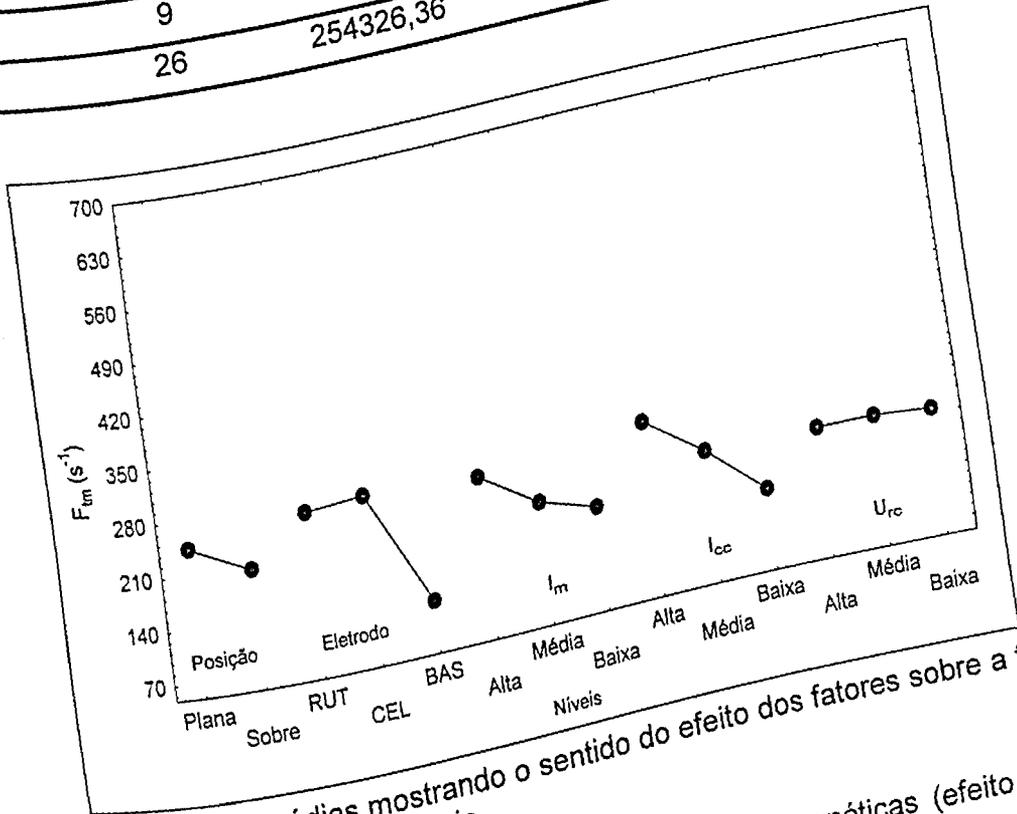


Figura 6.27 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a facilidade de transferência metálica com transferência

A I_{cc} age por meio da intensificação das forças eletromagnéticas (efeito "pinch"), que acelera o destacamento da gota. Farias (1998) aponta que, para valores elevados de I_{cc} , no instante em que a gota toca a poça de fusão, há um brusco aumento da corrente, rompendo a ponte líquida e evitando a ação da tensão superficial no sentido de reter uma maior quantidade de metal líquido em contato com a poça de fusão. Neste caso, a ação da corrente se sobrepõe ao efeito da tensão superficial. Isto causa um aumento na frequência de curtos-circuitos com tempo de duração de 2,0 ms e diminui, quando não elimina completamente, os curtos com

O uso da I_{cc} possui diversas vantagens: aumento da facilidade de transferência (maiores freqüências e menores tempos de transferência), redução dos riscos de contaminação da peça e de contaminação da poça no instante da reabertura do arco após o curto-circuito (Farias, 1998). Na posição sobrecabeça e com chapas chanfradas, o uso da I_{cc} possui estas mesmas vantagens, de forma semelhante as encontradas na soldagem de posição plana estudada por Farias et al (1998).

Também a corrente média age na diminuição dos tempos de transferência por intensificação das forças eletromagnéticas e pelo efeito causado na viscosidade do metal líquido. Nota-se pelas Figuras 6.26 e 6.27 que os mais altos níveis de corrente provocam maiores valores, tanto de F_{mT} como de F_{m} .

Os menores tempos de transferência metálica foram obtidos pelos eletrodos celulósicos e rutilicos, em níveis aproximadamente iguais. Estes tipos de consumíveis são conhecidos por suas maiores freqüências de curto-circuito e menores tempos de transferência de gota. O eletrodo básico é conhecido por suas gotas grandes e mais longos tempos na transferência de curto-circuito (Farias, 1993).

Acredita-se que os maiores tempos de transferência para a posição sobrecabeça estejam de algum modo relacionados com a força gravitacional (a força gravitacional dificulta a transferência metálica, aumentando como consequência os tempos de curto-circuito).

A U_{rc} não se mostrou de grande influência para a faixa de valores empregados. Contudo, sua regulagem é importante, pois cada tipo de eletrodo tem sua faixa de oscilação de tensão. Isto significa que, se a fonte possui um ajuste único para U_{rc} , pode acontecer da I_{cc} ser ativada não apenas pelas quedas de tensão nos curtos, mas também pela oscilação natural da tensão do eletrodo, causando aumentos tão grandes quanto 20 A na corrente média em relação à corrente ajustada na fonte. Vale ressaltar que em pelo menos dois índices, F_{cc} e R_{m} (como será visto adiante), houve influência significativa da interação $I_{cc} \times U_{rc}$.

As Tabelas 6.11 e 6.12 apresentam as análises de variância para os índices de regularidade R_{ccT} e R_{cc} , enquanto os sentidos dos efeitos de cada fator de controle sobre estes índices encontram-se nas Figuras 6.28 e 6.29. A posição foi o único fator influente para a totalidade dos curtos-circuitos, sendo a posição sobrecabeça a que apresenta os menores valores para R_{ccT} . Já para os curtos com transferência, apenas o tipo de eletrodo teve influência. Neste caso, o eletrodo básico foi o mais regular (o que era esperado, uma vez que o modo de transferência metálica por curto-circuito é próprio deste eletrodo).

Tabela 6.11 - Análise de variância para o índice R_{ccT}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,80	0,80	6,76	16,5
Eletrodo	2	0,76	0,38	3,21	15,6
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	0,62	0,31	2,61	12,8
I_m	2	0,23	0,12	0,98	4,7
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	0,11	0,05	0,46	2,3
$I_m \times U_{rc}$	2	0,18	0,09	0,77	3,7
I_{cc}	2	0,72	0,36	3,06	14,8
U_{rc}	2	0,16	0,08	0,69	3,3
Posição $\times U_{rc}$	2	0,22	0,11	0,92	4,5
Erro	9	1,06	0,12		21,8
Total	26	4,86	0,19		

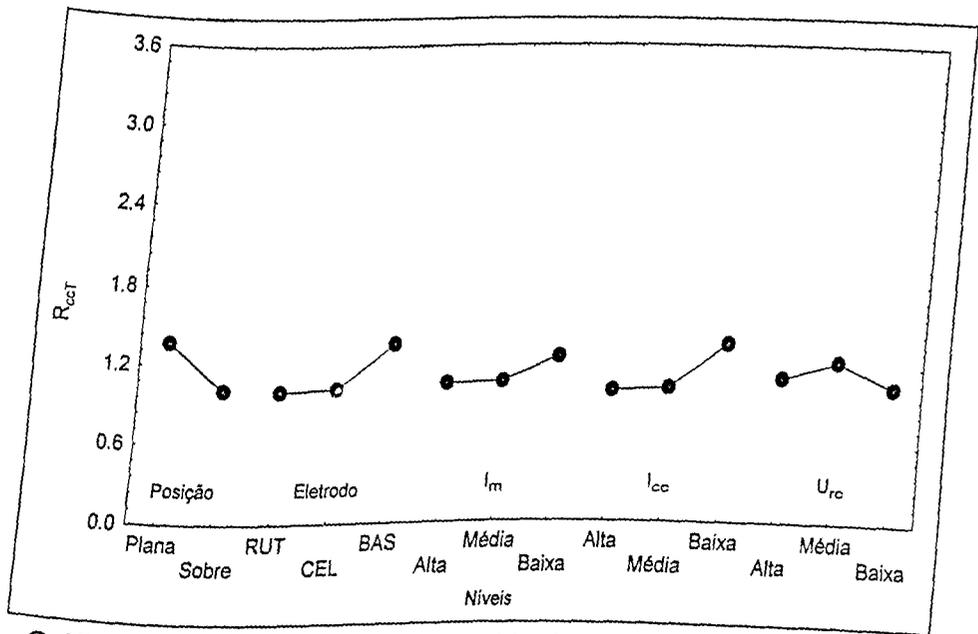


Figura 6.28 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a regularidade de ocorrência de curto-circuito total

Tabela 6.12 - Análise de variância para o índice R_{cc}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,50	0,50	0,20	0,7
Eletrodo	2	24,47	12,24	<u>4,84</u>	33,6
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	4,07	2,03	0,80	5,6
I_m	2	8,67	4,33	1,72	11,9
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	1,66	0,83	0,33	2,3
$I_m \times U_{rc}$	2	2,79	1,39	0,55	3,8
I_{cc}	2	4,96	2,48	0,98	6,8
U_{rc}	2	1,43	0,71	0,28	2,0
Posição $\times U_{rc}$	2	1,49	0,74	0,29	2,0
Erro	9	22,74	2,53		31,2
Total	26	72,78	2,80		

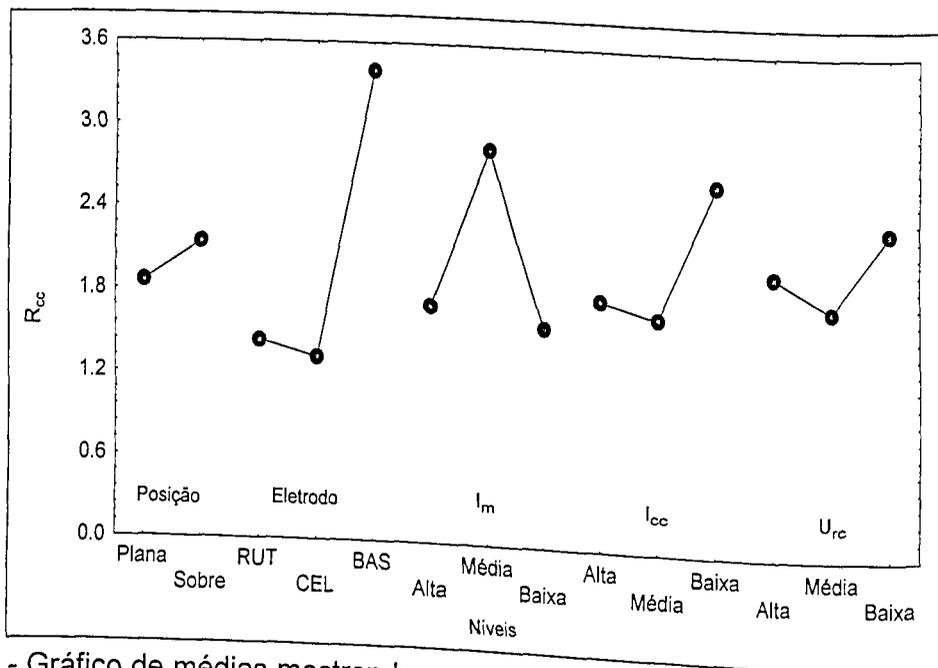


Figura 6.29 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a regularidade de ocorrência de curto-circuito com transferência

As Tabelas 6.13 e 6.14 e as Figuras 6.30 e 6.31 mostram, respectivamente, as análises de variância e os gráficos de média para os índices de regularidade de transferência de metal, R_{tmT} e R_{tm} . Aqui, mais uma vez, a posição teve um papel de destaque, sendo a posição sobrecabeça a mais irregular, considerando a totalidade dos curtos-circuitos. A interação $I_{cc} \times U_{rc}$ também afetou o índice R_{tmT} . Já o índice R_{tm} não apresentou nenhum parâmetro significativo (Tabela 6.14). Ressalta-se que o aumento da corrente de curto-circuito diminui a regularidade, avaliada tanto pelo índice R_{ccT} como pelos índices R_{tmT} e R_{cc} .

Tabela 6.13 - Análise de variância para o índice R_{imT}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
			0,26	10,65	19,3
Posição	1	0,26	0,26	4,07	14,8
Eletrodo	2	0,20	0,10	<u>5,27</u>	19,3
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	0,26	0,13	3,98	14,1
I_m	2	0,19	0,10	1,54	5,9
Eletrodo \times U_{rc}	2	0,08	0,04	1,44	5,2
$I_m \times U_{rc}$	2	0,07	0,04	0,55	2,2
I_{cc}	2	0,03	0,01	0,70	2,2
U_{rc}	2	0,03	0,02	0,25	0,7
Posição \times U_{rc}	2	0,01	0,01		16,3
Erro	9	0,22	0,02		
Total	26	1,35	0,05		

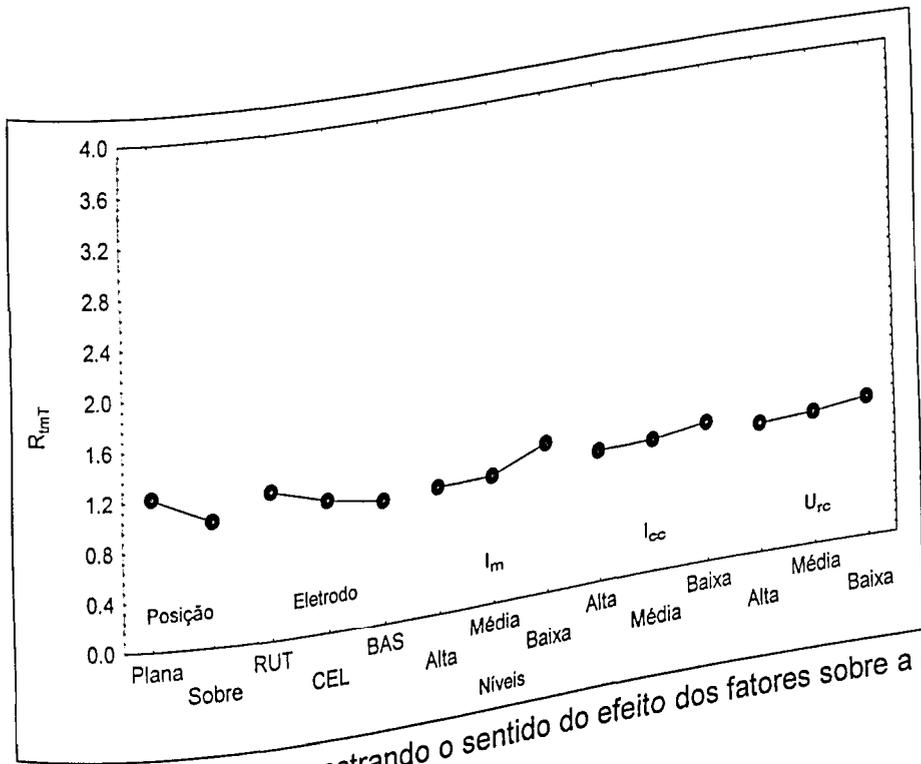


Figura 6.30 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a regularidade de transferência metálica total

Tabela 6.14 - Análise de variância para o índice R_{tm}

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	4,24	4,24	2,32	11,6
Eletrodo	2	0,09	0,04	0,02	0,2
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	1,84	0,92	0,50	5,0
I_m	2	4,68	2,34	1,28	12,8
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	1,33	0,66	0,36	3,6
$I_m \times U_{rc}$	2	1,76	0,88	0,48	4,8
I_{cc}	2	3,71	1,86	1,02	10,2
U_{rc}	2	0,64	0,32	0,17	1,8
Posição $\times U_{rc}$	2	1,77	0,88	0,48	4,9
Erro	9	16,44	1,83		45,1
Total	26	36,49	1,40		

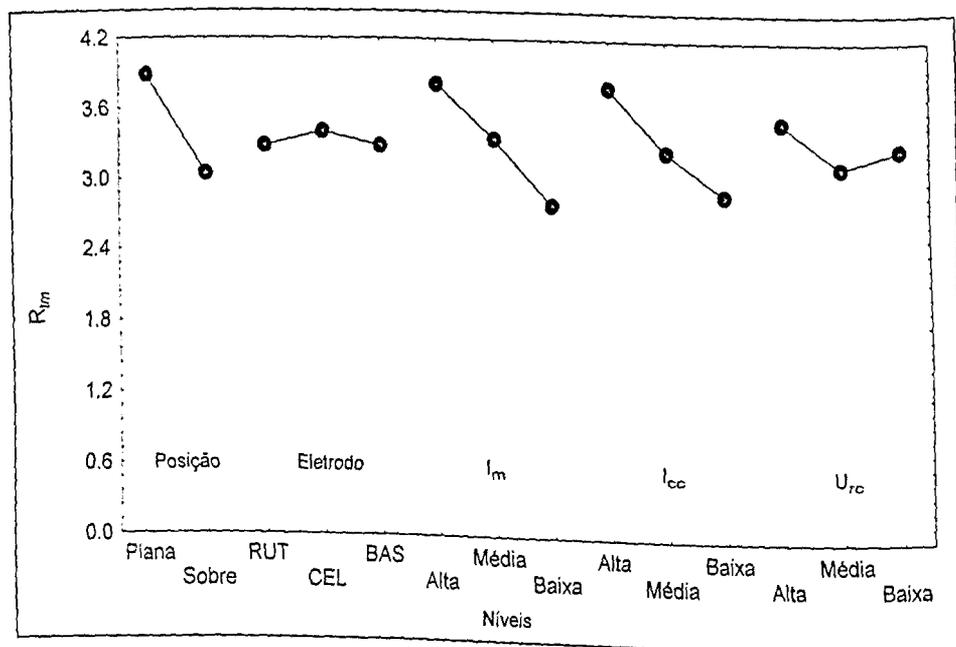


Figura 6.31 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a regularidade de transferência metálica com transferência

6.4 Análise das Características Econômicas

A Tabela 6.15 apresenta, de forma destacada, os resultados das características econômicas medidas (TF, TD e ED). A análise de variância para o índice taxa de fusão (TF) está apresentada na Tabela 6.16. Vê-se que cinco fatores mostraram-se influentes na composição da resposta da taxa de fusão: posição de soldagem, tipo de eletrodo, a interação

$I_{cc} \times U_{rc}$, corrente média, e corrente de curto-circuito. Contudo, a participação desta última foi da mesma ordem do erro (0,8%). Quanto à interação $I_{cc} \times U_{rc}$, considera-se que sua participação na resposta, apesar de significativa, é desprezível em virtude de sua baixa contribuição à resposta (1,7%). Por outro lado, a soma das participações da corrente média, da posição de soldagem e do tipo de eletrodo chega a quase 97% da resposta, ou seja, estes três fatores sozinhos controlam praticamente a variação da taxa de fusão. Na Fig. 6.32 verifica-se, através de gráficos das médias, o sentido do efeito de cada fator sobre a taxa de fusão.

Tabela 6.15 – Resultados referentes às características econômicas

Exp. Nº	I_m (A)	U_m (A)	TF (kg/h)	TD (kg/h)	ED (%)
1	134	23,8	1,78	1,26	70,8
2	135	24,5	1,77	1,31	74,2
3	136	24,6	1,67	1,19	71,4
4	105	28,2	1,37	1,05	76,7
5	104	27,9	1,29	0,99	76,9
6	105	28,1	1,29	1,04	80,4
7	109	24,5	1,19	0,81	67,7
8	109	24,1	1,16	0,85	73,1
9	110	24,3	1,21	0,86	70,7
10	81	24,3	1,07	0,70	65,1
11	79	23,7	1,12	0,66	58,8
12	80	24,5	1,13	0,72	64,3
13	125	28,8	1,53	0,91	59,6
14	123	28,1	1,53	1,03	67,6
15	124	28,7	1,52	1,02	66,7
16	125	24,0	1,28	0,91	71,0
17	124	23,7	1,32	0,84	63,9
18	125	23,7	1,28	0,82	64,2
19	110	23,8	1,40	0,82	60,1
20	110	23,9	1,33	0,84	62,7
21	109	23,8	1,41	0,83	61,9
22	80	28,9	1,04	0,87	44,3
23	81	28,8	1,01	0,87	44,3
24	79	28,9	1,04	0,46	45,1
25	140	23,6	1,46	0,45	44,0
26	140	23,8	1,44	0,46	65,4
27	140	24,2	1,53	0,96	70,7
				1,02	63,8
				0,98	

Tabela 6.16 - Análise de variância para o índice TF

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	0,08	0,08	84,00	6,7
Eletrodo	2	0,07	0,03	37,92	5,8
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	0,02	0,01	12,03	1,7
I_m	2	1,01	0,50	561,06	84,2
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	0,00	0,00	0,75	0,0
$I_m \times U_{rc}$	2	0,00	0,00	0,05	0,0
I_{cc}	2	0,01	0,01	6,54	0,8
U_{rc}	2	0,00	0,00	1,19	0,0
Posição $\times U_{rc}$	2	0,00	0,00	1,02	0,0
Erro	9	0,00	0,00		0,0
Total	26	1,20	0,05		0,8

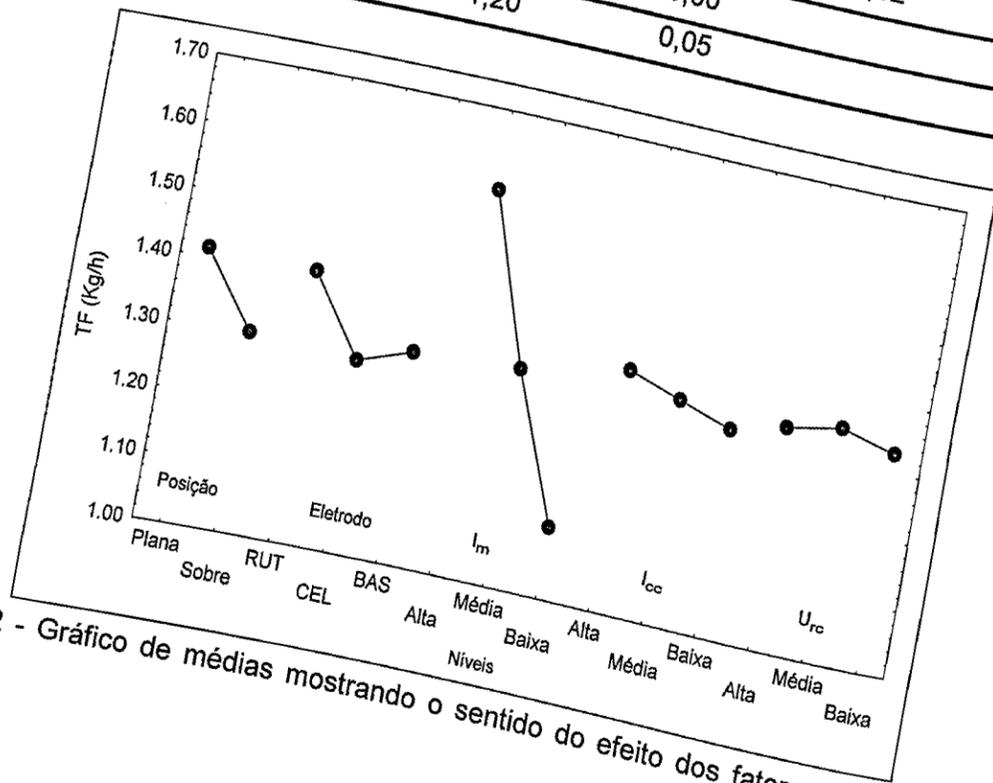


Figura 6.32 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a taxa de fusão

A corrente média foi o fator que mais afetou a taxa de fusão, com uma participação de 84% na resposta. Isto era esperado, uma vez que seu aumento eleva tanto o calor na conexão eletrodo-arco, como o calor gerado pelo efeito Joule ao longo do eletrodo. Como conseqüência, tem-se a elevação da quantidade de eletrodo fundido por unidade de tempo. Destaca-se ainda que uma corrente que solda um determinado tipo de eletrodo na posição plana, sem maiores dificuldades, pode revelar-se alta na posição sobrecabeça, tornando a poça de fusão fluida demais e impedindo a soldagem.

O segundo fator mais influente, de acordo com a Tabela 6.16, foi a posição de soldagem (apesar de bem atrás da corrente média). Como se vê na Fig. 6.32, ocorreu uma variação de quase 10% na taxa de fusão como resultado da mudança da posição de soldagem. Esta influência da posição de soldagem também era esperada, em virtude da variação do efeito gravitacional que esta mudança acarreta. Acredita-se que a força gravitacional dificulte o crescimento da gota e sua conseqüente transferência na posição sobrecabeça.

A participação do fator tipo de eletrodo na taxa de fusão foi da mesma ordem da posição de soldagem. Acredita-se que a influência do tipo de eletrodo está relacionada com a transferência metálica própria de cada classe de eletrodo, o que deve influir nas suas características econômicas. Como exemplo, pode-se citar a freqüência e a duração dos curtos-circuitos para dois tipos de eletrodos: básico e celulósico. Enquanto o primeiro transfere gotas grandes em poucos curtos, o segundo apresenta grande número de curtos com gotas relativamente pequenas.

Outro aspecto importante das características econômicas a considerar é a geração de respingos. Não há vantagem em se aumentar a taxa de deposição com maior geração de respingos, já que a limpeza dos mesmos acarreta um aumento de tempo e custos. Também tem o efeito econômico, ou seja, quanto mais respingo, maior é a quantidade de eletrodo desperdiçada (Farias, 1998).

Em soldagem com eletrodo revestido, a avaliação de respingos não é uma tarefa fácil, já que juntamente com eles há perdas por escória e volatilização de constituintes do revestimento. Entretanto, o uso da eficiência de deposição pode ser considerado eficaz para esta avaliação, já que do ponto de vista econômico da produtividade, não importa muito se parte do eletrodo comprado se perde por respingos ou por outro meio. Desta forma, a eficiência de deposição deve ser analisada como uma importante característica de qualidade (Farias, 1998).

A Tabela 6.17 mostra a análise de variância para o índice eficiência de deposição (ED). Aqui somente três fatores mostraram-se influentes na composição da resposta: posição de soldagem, a interação corrente de curto-circuito versus tensão de referência ($I_{cc} \times U_{rc}$) e corrente média. Ou seja, tipo de eletrodo e corrente de curto-circuito, que afetaram a taxa de fusão, não apresentaram significância na eficiência de deposição. Na Fig. 6.33 verifica-se, através de gráficos das médias, o sentido do efeito de cada fator sobre a eficiência de deposição.

Tabela 6.17 - Análise de variância para o índice ED

Fator	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado médio	F	Razão SQ (%)
Posição	1	934,17	934,17	30,20	41,8
Eletrodo	2	135,34	67,67	2,19	6,1
$I_{cc} \times U_{rc}$	2	299,25	149,62	<u>4,84</u>	13,4
I_m	2	488,01	244,00	<u>7,89</u>	21,9
Eletrodo $\times U_{rc}$	2	8,43	4,21	0,14	0,4
$I_m \times U_{rc}$	2	3,30	1,65	0,05	0,1
I_{cc}	2	26,46	13,23	0,43	1,2
U_{rc}	2	24,81	12,41	0,40	1,1
Posição $\times U_{rc}$	2	34,81	17,40	0,56	1,6
Erro	9	278,44	30,94		
Total	26	2233,01	85,89		

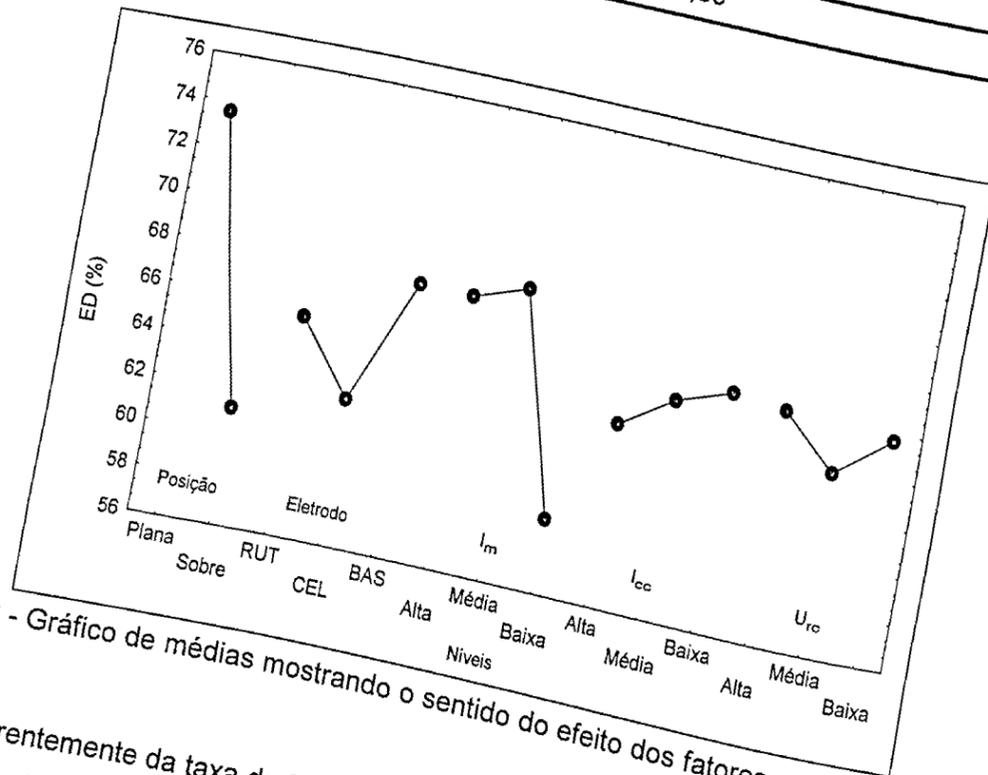


Figura 6.33 - Gráfico de médias mostrando o sentido do efeito dos fatores sobre a eficiência de deposição

Diferentemente da taxa de fusão, o fator posição de soldagem foi o maior responsável pela variação da eficiência de deposição. Acredita-se que o efeito da posição neste índice esteja relacionado com a força gravitacional atuante sobre as gotas de metal fundido. Tem-se que, na posição sobrecabeça, gotas são desviadas do corpo de prova em direção ao solo pela força da gravidade. Como pode-se observar na Fig. 6.33, é na posição sobrecabeça que se encontraram os menores valores para a eficiência de deposição.

O segundo fator mais influente foi a corrente média. A Fig. 6.33 mostra que os maiores valores de eficiência de deposição foram obtidos para os ajustes de corrente mais altos (média e alta).

A interação ($I_{cc} \times U_{rc}$) apresentou uma maior participação na eficiência de deposição (cerca de 13%) do que na taxa de fusão. Deste forma, uma otimização dos ajustes da corrente de curto-circuito e da tensão de referência pode levar a uma redução da salpicagem.

Quanto à não influência do fator tipo de eletrodo, acredita-se que uma análise mais detalhada da equação 5.3 possa esclarecer esta questão. A eficiência de deposição é calculada dividindo-se a quantidade de material depositado na chapa pela quantidade de eletrodo fundido. Seria esperado que o eletrodo básico apresentasse maior eficiência de deposição devido ao pó de ferro no seu revestimento. Entretanto, no cálculo de eletrodo fundido, este mesmo pó de ferro foi considerado, ao contrário dos cálculos convencionais que levam em conta apenas a massa da alma. De forma análoga, o celulósico do qual é esperado convencionalmente a menor ED, a massa de revestimento é pequena e quase toda transformada em gases (aproximando-se mais dos respingos). Desta forma, ressalta-se a diferença existente entre ED e níveis de respingos.

6.5 Confirmação do Método Taguchi

Efetuada os ensaios de confirmação, de um total de 15 índices avaliados (entre estabilidade do arco e características econômicas dos eletrodos), todos apresentaram concordância entre os valores previstos teoricamente e os valores reais. Estes resultados podem ser vistos no ANEXO II. Todos os valores foram estimados com o uso da transformada "sensitividade", anteriormente mencionada (item 5.7). Deste modo, fica demonstrado a validade do modelo aditivo. No entanto, alguns índices, apesar de estarem dentro do intervalo de confiança, apresentaram um grau menor de proximidade. Isto pode ser creditado à existência de interações entre os parâmetros, do tipo sinérgica.

6.6 - Considerações Gerais

Um dos trabalhos realizados neste trabalho foi a comparação entre as técnicas...

dos índices avaliados com o simulador. Poderia-se concluir, então, que a soldagem por simulador é a técnica adequada para pesquisas envolvendo os aspectos operacionais do processo de soldagem com eletrodo revestido. Mas existem alguns detalhes que surgiram durante os ensaios da Segunda Fase que merecem ser considerados. Tem-se, por exemplo, a questão do desvio de arco verificado nos eletrodos celulósicos em corrente alta e a instabilidade do cordão de solda nos eletrodos rútilicos em corrente média. Acredita-se que um soldador experiente facilmente corrigiria estes problemas, devido ao seu maior controle sobre o processo (tecimento, variação da velocidade de soldagem etc.).

Ainda com relação às instabilidades acima citadas (desvio do arco e irregularidades no cordão de solda), vale destacar que, apesar delas, não foram detectadas alterações nem nos oscilogramas, nem nos índices de estabilidade do arco e nem nas características econômicas dos eletrodos. Desta forma, fica comprovada a ineficácia dos índices de estabilidade do arco empregados em captar estas instabilidades do cordão de solda nos eletrodos rútilicos e celulósicos.

A soldagem por simulador também apresentou problemas relacionados à abertura do arco. Esta abertura é feita com o auxílio de uma pequena quantidade de palha de aço compactada entre a ponta do eletrodo e a peça a soldar. Ocorre que na soldagem com chapa chanfrada, esta palha dificilmente faz seu primeiro contato elétrico com o fundo do chanfro. Na maioria das vezes, o arco é iniciado na lateral do mesmo. Quando a soldagem é feita com eletrodos que apresentam efeito canhão, o arco é naturalmente movido para o fundo do chanfro, apesar de sua abertura ter sido feita na lateral. Mas quando o eletrodo apresenta proteção essencialmente gasosa (celulósico, por exemplo), o arco tende a permanecer entre a ponta do eletrodo e a lateral, sendo o cordão em muitos casos depositado totalmente na parede do chanfro, o que inviabiliza o estudo da geometria do cordão. Vale ressaltar que esta situação ocorreu em conjunto com o desvio de arco para o eletrodo celulósico.

A posição de soldagem mostrou-se um fator muito importante na pesquisa com o processo de soldagem com eletrodos revestidos. Ela afetou significativamente diversos índices de instabilidade do arco (F_{ccT} , F_{cc} , F_{tm} , R_{ccT} e R_{tmT}) e também as características econômicas dos eletrodos (TF e ED). Em todos os casos, os níveis de valores foram menores para a posição sobrecabeça. Acredita-se que a força gravitacional seja uma das responsáveis por essa diminuição nos valores dos índices de transferência metálica, dificultando o crescimento da gota e sua conseqüente transferência.

Conforme visto nos itens anteriores (6.2, 6.3 e 6.4), a U_{rc} e a I_{cc} afetaram individualmente apenas quatro índices: FE_{1T} e FE_1 foram afetados pela U_{rc} e F_{tmT} e F_{tm} pela I_{cc} (a TF também foi afetada pela I_{cc} , mas considera-se o efeito da I_{cc} desprezível devido a baixa contribuição à resposta). As Figuras 6.34 a 6.37 mostram os gráficos para estes índices,

relacionando o efeito de U_{rc} e I_{cc} com a posição de soldagem. Vê-se pelas figuras 6.34 e 6.35 que o efeito do ajuste individual de U_{rc} sobre os índices FE_{1T} e FE_1 possuiu importância aproximadamente igual nas duas posições, ou seja, mudanças nos níveis de U_{rc} , permanecendo I_{cc} fixa, causam alterações de mesma ordem nas duas posições.

O mesmo aconteceu com o ajuste de I_{cc} . Como vê-se nas Figuras 6.36 e 6.37, a mudança nos níveis de I_{cc} provocou para os índices F_{tm} e F_{tmT} variações aproximadamente proporcionais para as duas posições. Conclui-se, desta forma, que o efeito do ajuste individual de I_{cc} ou U_{rc} tendeu a ser o mesmo, tanto na posição plana como na posição sobrecabeça.

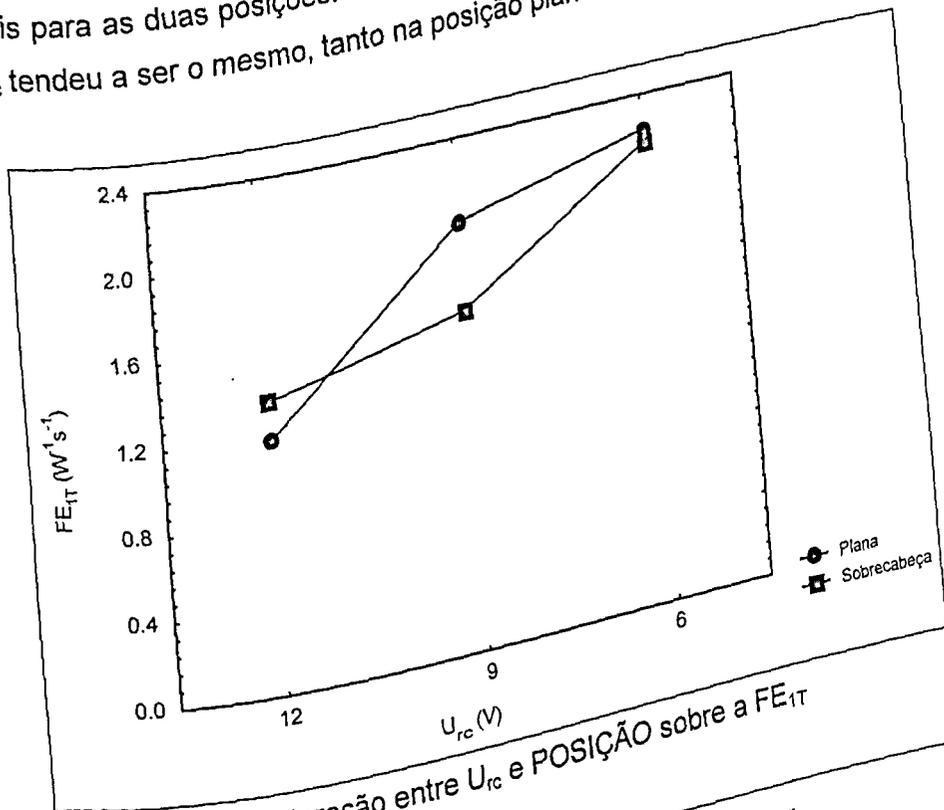


Figura 6.34 – Influência da interação entre U_{rc} e POSIÇÃO sobre a FE_{1T}

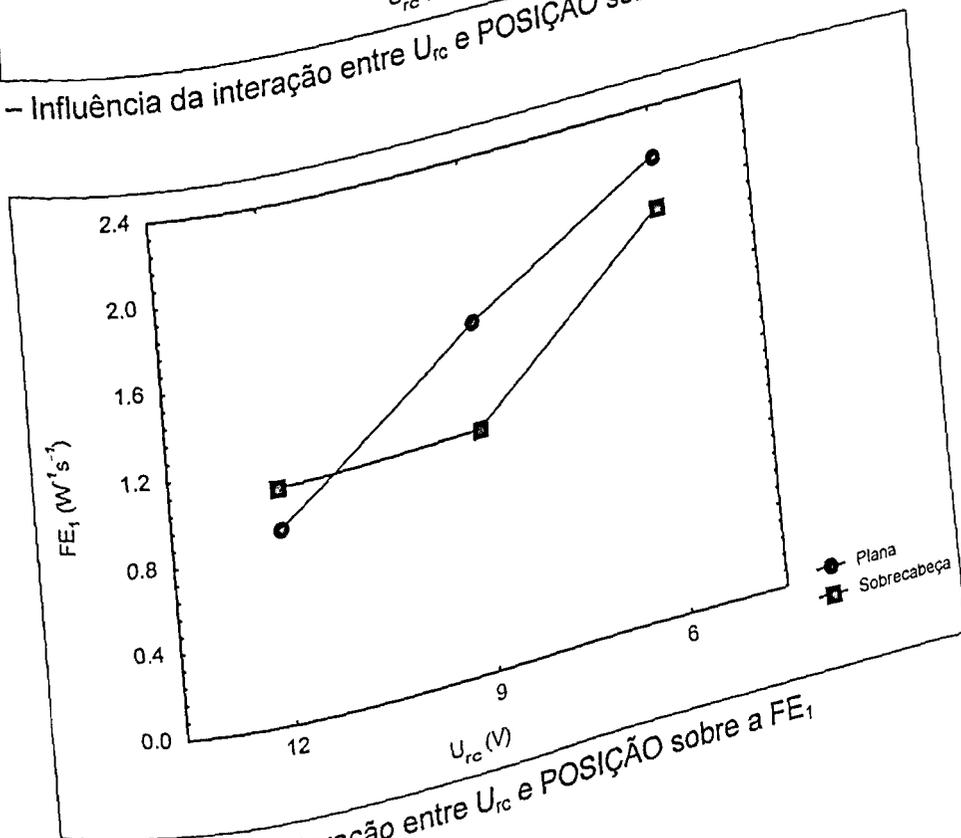


Figura 6.35 – Influência da interação entre U_{rc} e POSIÇÃO sobre a FE_1

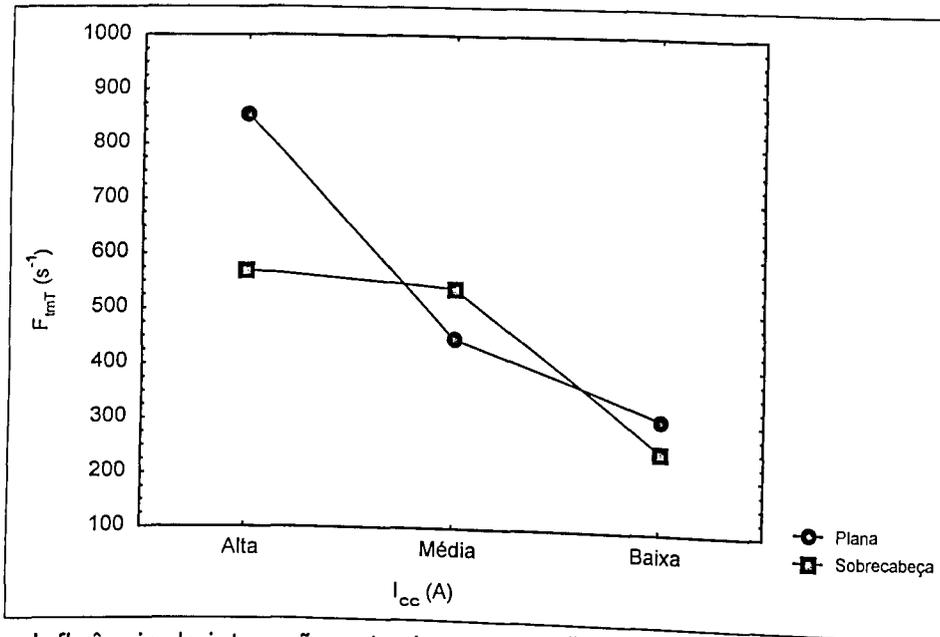


Figura 6.36 – Influência da interação entre I_{cc} e POSIÇÃO sobre a F_{tmT}

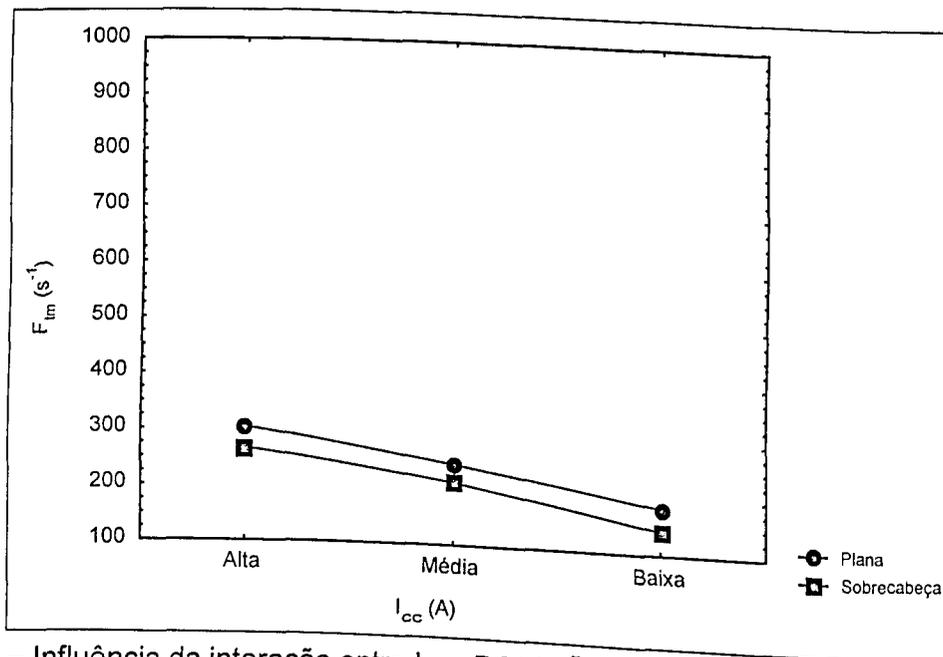


Figura 6.37 – Influência da interação entre I_{cc} e POSIÇÃO sobre a F_{tm}

Quanto ao ajuste conjunto, a interação $I_{cc} \times U_{rc}$ afetou significativamente os seguintes índices: F_{cc} e R_{tmT} (estabilidade) e ED (econômicas). Novamente, considera-se que o efeito da interação sobre a TF é desprezível devido à baixa contribuição na resposta. As Figuras 6.38 a 6.43 mostram os gráficos de interação para estes índices. Vê-se que no caso de F_{cc} , é na posição plana que ocorreram as maiores variações (Figura 6.38 e 6.39), ou seja, o ajuste

conjunto de I_{cc} e U_{rc} foi mais crítico na posição plana. Já o índice R_{TMT} apresenta níveis de variações aproximadamente iguais, sendo pois, o ajuste $I_{cc} \times U_{rc}$ de mesma importância nas duas posições (Figura 6.40 e 6.41).

No caso das características econômicas, tem-se que em ED, o ajuste $I_{cc} \times U_{rc}$ tende a ser um pouco mais influente na posição sobrecabeça (Figuras 6.42 e 6.43).

Utilizando-se o processo de soldagem com eletrodo revestido, o ajuste $I_{cc} \times U_{rc}$ pode ajudar a otimizar a soldagem, tanto na posição plana quanto na posição sobrecabeça, principalmente no quesito estabilidade do arco. Desta forma, fica mantida a observação anterior (item 6.4), onde acredita-se que no futuro será economicamente viável a implementação nas fontes de energia dos ajustes de I_{cc} e U_{rc} .

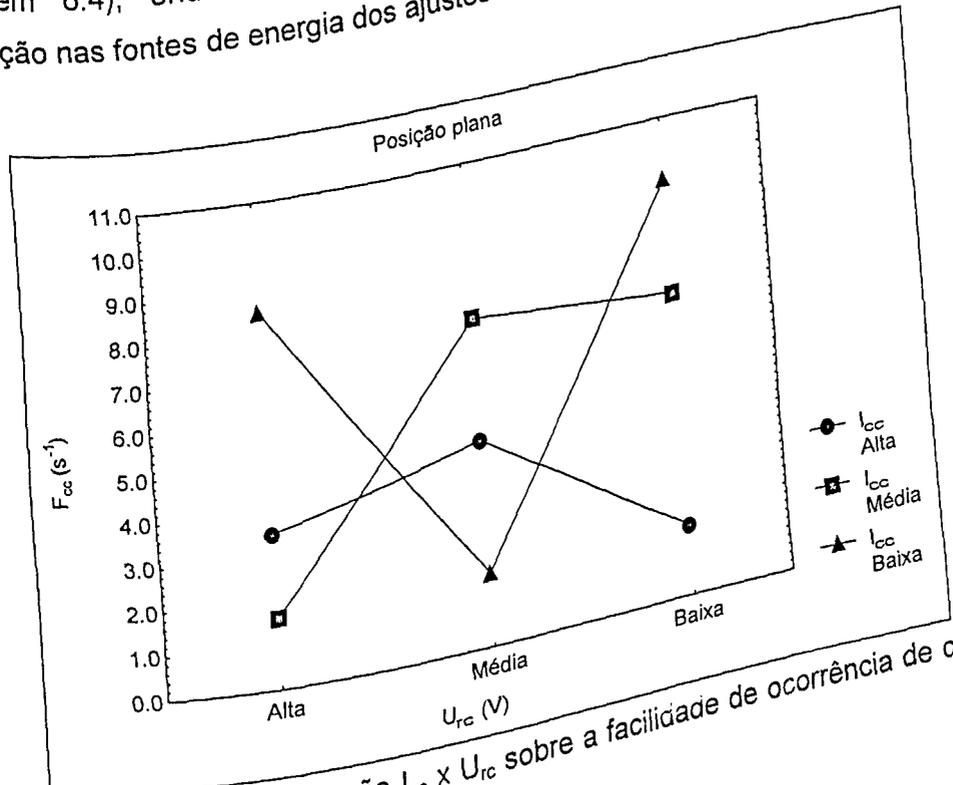


Figura 6.38 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a facilidade de ocorrência de curto-circuito (posição plana)

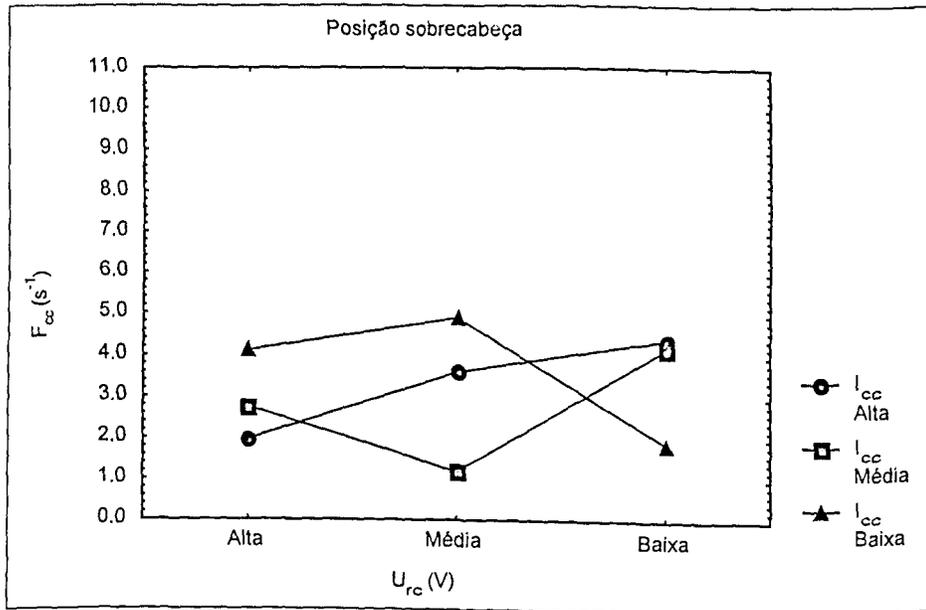


Figura 6.39 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a facilidade de ocorrência de curto-circuito (posição sobrecabeça)

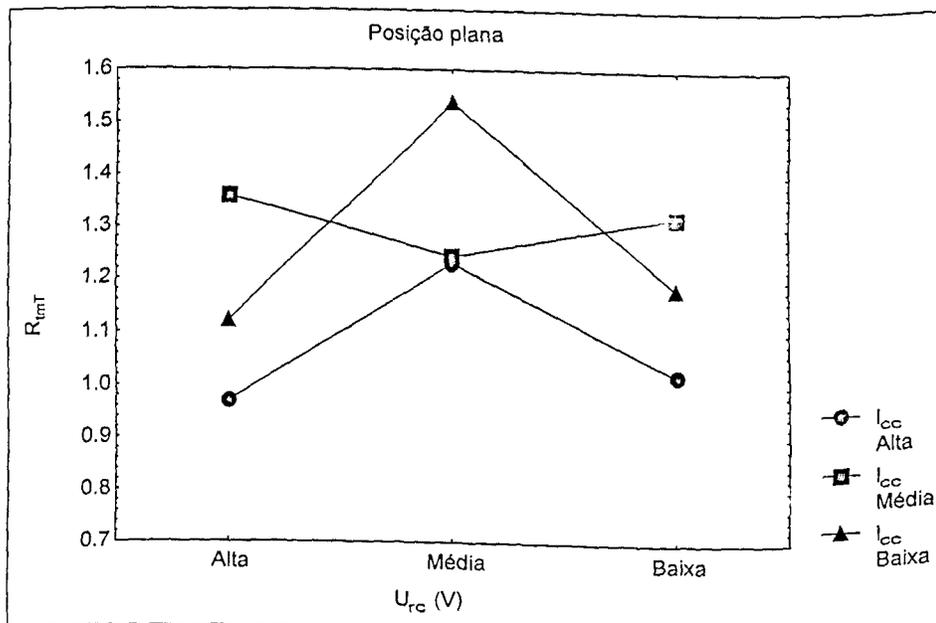


Figura 6.40 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a regularidade de transferência metálica total (posição plana)

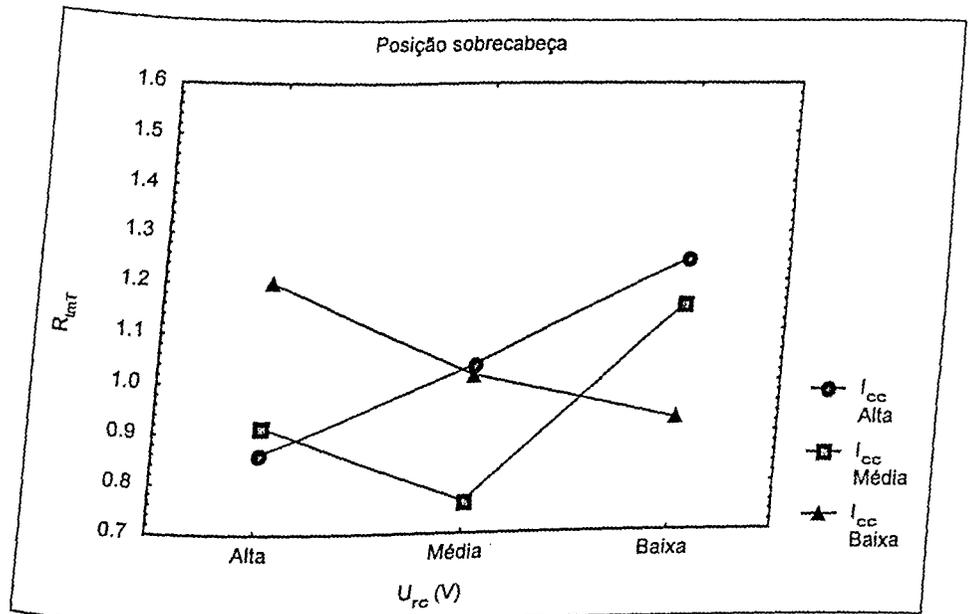


Figura 6.41 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a regularidade de transferência metálica total (posição sobrecabeça)

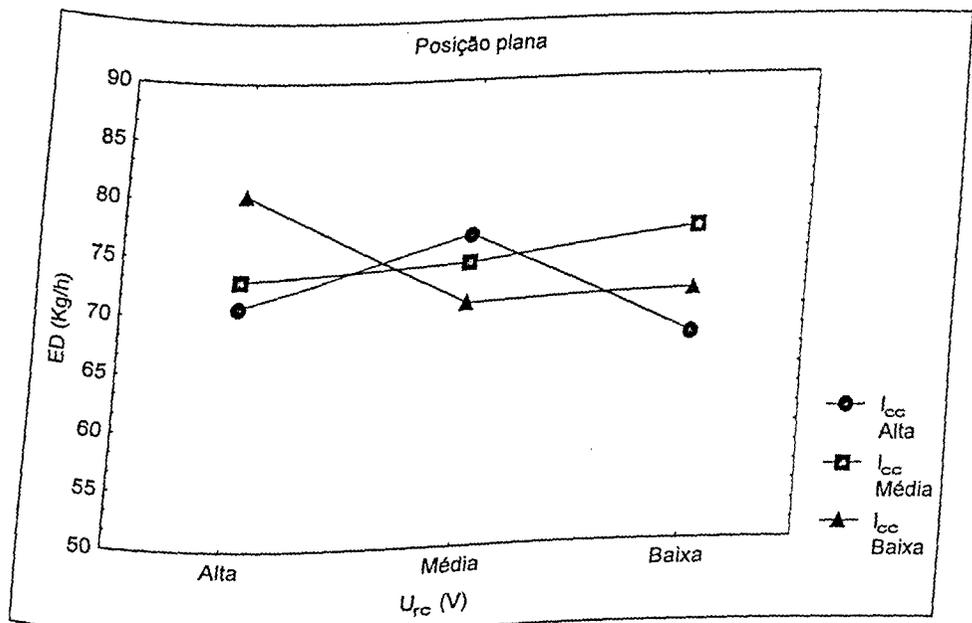


Figura 6.42 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a eficiência de deposição (posição plana)

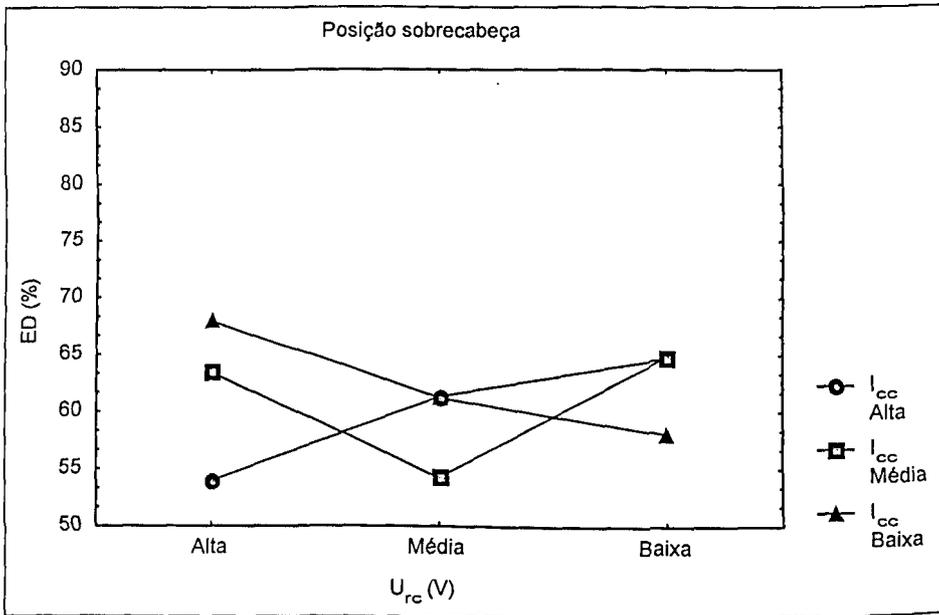


Figura 6.43 – Influência da interação $I_{cc} \times U_{rc}$ sobre a eficiência de deposição (posição sobrecabeça)

Capítulo VII

Conclusões

- ✓ A soldagem por simulador pode ser utilizada, sem prejuízo dos resultados, para a pesquisa da estabilidade do arco e das características econômicas dos eletrodos revestidos.
- ✓ O método experimental robusto (Taguchi) é válido para fins de pesquisa científica, mas a análise dos resultados obtidos deve ser extremamente criteriosa, afim de se evitar que problemas relacionados com interações não previstas afetem as conclusões.
- ✓ O ajuste da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle do curto-circuito é importante para a busca de uma melhor estabilidade do arco durante a soldagem.
- ✓ Quanto às características econômicas dos eletrodos, o ajuste da corrente de curto-circuito e da tensão de referência para controle do curto-circuito não afetou significativamente os índices estudados (TF e ED).
- ✓ Os índices empregados para a avaliação da estabilidade do arco devem ser aprimorados para expressar também possíveis instabilidades do cordão de solda.
- ✓ A posição de soldagem é uma variável importante no estudo do processo de soldagem com eletrodos revestidos, afetando diversos índices de estabilidade do arco e também as características econômicas dos eletrodos.

Capítulo VIII

Propostas para Trabalhos Futuros

- ✓ Conforme foi visto no Capítulo VI, os critérios utilizados para quantificar a transferência metálica e de carga elétrica não foram capazes expressar as instabilidades ocorridas nas soldagens dos eletrodos rutilicos e celulósicos. Deste modo, é proposto o desenvolvimento de um critério de avaliação da estabilidade do arco que possua relação com a geometria do cordão de solda.
- ✓ Ainda com relação às instabilidades ocorridas com os eletrodos rutilicos e celulósicos, é proposta a realização de experimentos na posição sobrecabeça com chapas chanfradas, relacionando a geometria do cordão de solda com os parâmetros de soldagem causadores de tais instabilidades nos eletrodos referidos, com o intuito de se investigar as possíveis causas.

Capítulo IX

Bibliografia

- ASM, 1993, ASM Handbook, ASM International, "Welding, Brazing and Soldering", vol.6, 1229 p..
- AWS, 1991, Welding Handbook, vol. 1 e 2, "Welding Processes", 8ª Edição, AWS.
- Boniszewski, T., 1979, "Manual Metal Arc Welding – Old Process, New Developments. Part II. Understanding MMA Electrodes", The Metallurgist and Materials Technologist, pp 15 – 18, nov.
- Brandi, S. D.; Taniguchi, C., 1989, "Revisão das Forças que Atuam na Transferência Metálica e a Ação nos Mecanismos de Transferência Metálica na Soldagem com Eletrodos Revestidos", Anais do XV ENTS, São Paulo.
- Brandi, S. D.; Taniguchi, C. and Liu, S., 1991, "Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding", Welding Journal, p. 261-270, October.
- Correia, D. S., 1999, "Relatório de Oscilogramas e Histogramas relativos à Dissertação de Mestrado", documento do Laprosolda - Laboratório para o Desenvolvimento de Processos de Soldagem, UFU, Uberlândia, MG.
- Doan, G. E., 1932, "Forces of Electric Origin in the Iron Arc", Transactions of AIEE, 79 part II: 191-194.
- ESAB, 1995, Svetsaren, vol. 49, No. 1, pp. 4 – 6.
- Essers, W. G.; Jelmorini, G. and Tichelaar, G. W., 1971, "Metal Transfer from Coated Electrodes", Metal Construction and British Welding Journal, april, pp. 151-154.
- Farias, J. P., 1993, "Magnésio Metálico como Componente do Revestimento na Soldagem com Eletrodos ao C-Mn-Ni", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Farias, J. P., 1998, "Desempenho da Fonte de Energia na Soldagem ao Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos", Tese para concurso de Professor Titular, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

- Farias, J. P.; Scotti, A. e Ferraresi, V. A., 1998, "Fontes Eletrônicas para a Soldagem com Eletrodos Revestidos: Avaliação de um Controle de Curto-Circuito", Trabalho apresentado no XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Fortaleza.
- Gadotti, I., 1994, "Controle Dedicado para o Sistema Automático de Soldagem por Eletrodo Revestido (SASER)", Relatório de Atividades IC/CNPq/UFU, Nº 12/94, Uberlândia, 19p.
- Gotal'skii, Y. N. and Stertovich, A. D., 1976, "The Mechanism of Formation of the Bond between Slag Crust and Weld Metal", Svar. Proiz, Nº 11, pp. 54-56.
- Hazlett, T. H., 1956, "Coating Ingredients Influence on Surface Tension, Arc Stability and Bead Shape", AWS National Fall Meeting, Cleveland.
- Kobayashi, Y., 1986, "Influência da Composição do Revestimento de Eletrodos Básicos nas Características Econômicas e Operacionais", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Lancaster, J. F., 1971, "The Metal Transfer from Coated Electrodes", Metal Construction and British Welding Journal, october, pp. 370-373.
- Lancaster, J. F., 1984, "The Physics of Welding". Edited by Lancaster. p. 134 -203.
- Lipei, J., Jingchang, L. and Zhihuan, W., "The Effect of the Dynamic Behavior of Welding Rectifiers on Spatter", Welding International, Nº 3, pp. 263-268.
- Mc Connell, I. A. and Mc Pherson N. A., 1997, "The Application of Statistical Process Design to a FCAW Process", Welding Journal, pp. 412-416, october.
- Modenesi, P. J. et al, 1984, "Transferência de Metal de Adição na Soldagem com Eletrodos Revestidos", Anais do X ENTS, Vitória-ES, pp. 285-296, outubro.
- Modenesi, P. J., 1996, Apostila "Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais", Curso pós-graduação, UFMG.
- Norrish, J., 1992, "Advanced Welding Processes", IOP Publishing Ltd, New York, USA.
- Norrish, J. and Richardson, I. F., 1988, "Back to Basics: Metal Transfer Mechanisms", Welding & Metal Fabrication. Jan-Fev, pp. 17-22.
- Patchett, B. M., 1974, "Some Influences of Slag Compositions on Heat Transfer and Arc Stability", Welding Journal, Nº 5, pp. 203-210.

- Phadke, M. S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", Printice Hall, USA, 334p.
- Pistorius, P. G. H. and Liu, S., 1997, "Changes in Metal Transfer Behavior during Shielded Metal Arc Welding", Welding Journal, pp. 305-315, august.
- Pokhodnya, I. K.; Gorpenyuk, V. N.; Milichenko, S. S.; Makarenko, V. D. and Ponomarev, V. E., 1987, "Technological Properties of Basic Electrodes and Methods of Their Measuring", International Institute of Welding, IIW Doc. XII-1040-87, 10p.
- Pokhodnya, I. K.; Gorpenyuk, V. N.; Milichenko, S. S.; Makarenko, V. D. and Ponomarev, V. E., 1985, "Ways of Improving Metal Transfer during Welding using Electrodes with a Basic Coating", Automatic Welding, january, pp. 29-32.
- Pokhodnya, I. K.; Gorpenyuk, V. N.; Ponomarev, V. E. and Milichenko, S. S., 1984, "Relationship between the Formation of Pores and the Parameters of the Arc in Welding using Basic Coated Electrodes", Avt. Svarka, (12), pp. 19 - 22.
- Pokhodnya, I. K.; Gorpenyuk, V. N.; Milichenko, S. S.; Ponomarev, V. E.; Starodubtsev, V. L. and Shivachko, V. I., 1991, "Welding Arc Stability", Metallurgy of Arc Welding, Vol. 1, Arc Processes and Electrode Melting, Abington, Cambridge, UK, pp. 56-103.
- Quites, A. M., 1989, "Soldagem MAG de Chapas Finas: Controle Adaptativo", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Quites, A. M. e Dutra, J. C., 1979, "Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico", Florianópolis, EDEME, 248p.
- Santos, M. G., 1995, "Metodologia para Comparação entre Fontes Inversora e Eletromagnética para Eletrodo Revestido", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Scotti, A., 199-a, "Apostila Processo Eletrodo Revestido", Curso pós-graduação em Engenharia Mecânica, LAPROSOLDA/UFU, Uberlândia.
- Scotti, A., 199-b, "Apostila Fontes de Soldagem a Arco Voltaico", Curso pós-graduação em Engenharia Mecânica, LAPROSOLDA/UFU, Uberlândia.
- Silva, C. L. M., 1998, "Caracterização Operacional e Econômica de Eletrodos Rutílicos com Magnésio Metálico na Soldagem", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém.

Wegrzyn, J., 1980, "The Covered-Electrode Arc", Weld Pool Chemistry and Metallurgy, International Conference, Cambridge, The Welding Institute, pp.241-250.

Zaruba, J. I., 1970, "Mechanism of Metal Spatter during Arc Welding", Avt. Svarka, N^o 11, pp. 12-16.

ANEXO I

Resultados da Primeira Fase

(Comparação das Técnicas de Soldagem – Soldador x Simulador)

Resultados da Primeira Fase – Soldagem Manual

ANEXO I 102

Estabilidade do Arco (Totalidade dos Curtos-Circuitos)											
POS	ELET	I_n (A)	I_{cc} (A)	I_m (A)	U_m (V)	FE_{1T} (W.s) ⁻¹	RE_{1T}	F_{ccT} (s ⁻¹)	F_{tmT} (s ⁻¹)	R_{ccT}	R_{tmT}
Plana	BAS	130	325	133	23.4	1.45	1.31	10.51	720.05	0.79	0.65
Plana	BAS	130	325	135	23.2	1.13	1.45	9.18	483.68	0.77	0.86
Plana	BAS	130	325	134	23.5	1.22	1.22	8.40	518.40	0.89	0.79
Plana	CEL	110	275	114	28.5	1.42	1.56	15.42	877.35	0.99	1.24
Plana	CEL	110	275	114	28.2	1.33	1.70	14.59	770.83	1.04	1.26
Plana	CEL	110	275	114	28.3	1.49	1.65	14.80	925.24	0.93	1.07
Sobre	CEL	110	275	114	27.9	1.61	1.51	15.92	961.91	0.75	0.99
Sobre	CEL	110	275	113	28.6	1.25	1.86	9.11	804.18	0.85	1.00
Sobre	CEL	110	275	113	28.6	1.49	1.62	12.34	867.00	0.70	0.97
Sobre	BAS	130	325	135	23.1	1.38	1.12	10.30	503.60	0.70	0.76
Sobre	BAS	130	325	136	23.1	1.48	1.18	14.65	651.64	0.60	0.71
Sobre	BAS	130	325	135	23.0	1.30	1.03	10.31	541.45	0.68	0.75

Resultados da Primeira Fase – Soldagem Manual

ANEXO I 103

Estabilidade do Arco (Curtos-Circuitos com Transferência)										
ELET	I_n (A)	I_{cc} (A)	I_m (A)	U_m (V)	FE_1 (W.s) ⁻¹	RE_1	F_{cc} (s ⁻¹)	F_{tm} (s ⁻¹)	R_{cc}	R_{tm}
BAS	130	325	133	23.4	0.67	3.24	2.04	191.82	1.52	2.69
BAS	130	325	135	23.2	0.66	3.27	3.30	207.61	1.52	2.47
BAS	130	325	134	23.5	0.63	2.24	2.33	184.07	2.01	3.20
CEL	110	275	114	28.5	0.73	5.30	3.12	366.80	1.29	5.96
CEL	110	275	114	28.2	0.76	5.04	3.67	364.74	0.98	4.42
CEL	110	275	114	28.3	0.81	3.76	2.98	347.10	1.35	5.77
CEL	110	275	113	27.9	0.78	3.68	2.92	331.21	1.07	4.37
CEL	110	275	113	28.6	0.79	5.18	2.52	330.61	1.07	3.66
BAS	130	325	135	23.1	0.80	5.05	2.91	327.20	1.07	4.19
BAS	130	325	136	23.1	0.68	3.02	3.12	179.61	1.43	2.51
BAS	130	325	136	23.1	0.70	2.91	3.37	199.36	1.36	2.71
BAS	130	325	135	23.0	0.61	3.80	3.10	193.48	1.61	2.44

Resultados da Primeira Fase – Soldagem Manual

Características Econômicas

POS	ELET	I_n (A)	I_{cc} (A)	I_m (A)	U_m (V)	TF (kg/h)	TD (Kg/h)	ED (%)
Plana	BAS	130	325	133	23.4	1.49	0.92	61.59
Plana	BAS	130	325	135	23.2	1.46	0.94	64.24
Plana	BAS	130	325	134	23.5	1.46	0.90	61.94
Plana	CEL	110	275	114	28.5	1.41	1.01	71.52
Plana	CEL	110	275	114	28.2	1.44	1.05	73.17
Plana	CEL	110	275	114	28.3	1.45	1.07	73.75
Plana	CEL	110	275	114	27.9	1.40	0.97	69.64
Sobre	CEL	110	275	113	28.6	1.48	0.98	66.18
Sobre	CEL	110	275	113	28.6	1.48	0.99	66.67
Sobre	CEL	110	275	113	23.1	1.50	0.99	66.29
Sobre	BAS	130	325	135	23.1	1.50	0.99	66.29
Sobre	BAS	130	325	136	23.1	1.51	1.00	66.12
Sobre	BAS	130	325	135	23.0	1.46	0.91	62.57

Resultados da Primeira Fase – Soldagem Automática

Estabilidade do Arco (Totalidade dos Curtos-Circuitos)

ELET	I_n (A)	I_{cc} (A)	I_m (A)	U_m (V)	FE_{1T} (W.s) ⁻¹	RE_{1T}	F_{ccT} (s ⁻¹)	F_{tmT} (s ⁻¹)	R_{ccT}	R_{tmT}
BAS	130	325	134	23.6	1.37	1.20	9.97	569.93	0.85	0.73
BAS	130	325	134	23.7	1.31	1.30	8.58	592.10	0.89	0.77
BAS	130	325	135	23.2	1.21	1.33	11.01	537.78	0.80	0.77
CEL	110	275	116	28.0	1.21	2.38	19.72	769.65	1.07	1.13
CEL	110	275	116	28.4	1.21	2.61	20.28	785.79	1.03	1.16
CEL	110	275	115	28.1	1.03	2.54	15.90	684.18	1.19	1.28
CEL	110	275	112	28.2	1.53	1.70	5.72	996.81	0.90	0.89
CEL	110	275	113	28.3	1.35	1.91	8.23	826.43	0.99	1.25
CEL	110	275	113	28.4	1.43	1.54	8.80	823.52	1.17	1.14
BAS	130	325	136	22.9	1.37	1.28	13.61	595.27	0.69	0.85
BAS	130	325	136	23.0	1.31	1.31	10.81	552.76	0.73	0.73
BAS	130	325	136	23.0	1.23	1.26	10.69	478.68	0.84	0.81

Estabilidade do Arco (Curtos-Circuitos com Transferência)											
POS	ELET	I _n (A)	I _{cc} (A)	I _m (A)	U _m (V)	FE ₁ (W.s) ⁻¹	RE ₁	F _{cc} (s ⁻¹)	F _{tm} (s ⁻¹)	R _{cc}	R _{tm}
Plana	BAS	130	325	134	23.6	0.62	2.63	2.13	174.60	2.10	2.64
Plana	BAS	130	325	134	23.7	0.64	2.49	2.14	200.77	2.32	2.86
Plana	BAS	130	325	135	23.2	0.61	3.33	2.93	184.18	1.70	3.01
Plana	CEL	110	275	116	28.0	0.88	3.68	5.10	340.33	1.70	3.92
Plana	CEL	110	275	116	28.4	0.92	3.92	5.72	349.33	1.93	4.06
Plana	CEL	110	275	115	28.1	0.76	5.32	5.94	359.05	1.51	5.14
Sobre	CEL	110	275	112	28.2	0.67	13.58	0.62	265.19	2.33	7.09
Sobre	CEL	110	275	113	28.3	0.83	6.09	2.05	384.60	1.48	4.46
Sobre	CEL	110	275	113	28.4	0.74	4.45	2.08	353.51	1.85	3.89
Sobre	BAS	130	325	136	22.9	0.70	3.74	4.10	231.48	1.35	2.86
Sobre	BAS	130	325	136	23.0	0.69	2.93	2.57	181.33	1.87	2.29
Sobre	BAS	130	325	136	23.0	0.65	3.41	3.33	183.44	2.13	2.82

Resultados da Primeira Fase – Soldagem Automática

Características Econômicas								
POS	ELET	I _n (A)	I _{cc} (A)	I _m (A)	U _m (V)	TF (kg/h)	TD (Kg/h)	ED (%)
Plana	BAS	130	325	134	23.6	1.46	0.92	63.08
Plana	BAS	130	325	134	23.7	1.47	0.94	64.12
Plana	BAS	130	325	135	23.2	1.45	0.90	61.90
Plana	CEL	110	275	116	28.0	1.44	1.08	75.00
Plana	CEL	110	275	116	28.4	1.40	1.05	75.00
Plana	CEL	110	275	115	28.1	1.39	1.05	75.71
Sobre	CEL	110	275	112	28.2	1.35	0.81	60.00
Sobre	CEL	110	275	113	28.3	1.40	0.88	63.12
Sobre	CEL	110	275	113	28.4	1.33	0.81	60.51
Sobre	BAS	130	325	136	22.9	1.54	0.95	61.88
Sobre	BAS	130	325	136	23.0	1.47	0.98	66.47
Sobre	BAS	130	325	136	23.0	1.44	0.92	63.95

ANEXO II

Confirmação do Método Taguchi – Comparação entre Valores Estimados e Experimentais

CONDIÇÃO INICIAL 1
(Posição sobrecabeça, I_m médio, I_{cc} médio e U_{rc} médio)

Totalidade dos Curtos-Circuitos

	FE_{1T} ($W^{-1}s^{-1}$)	RE_{1T}	F_{ccT} (s^{-1})	F_{tmT} (s^{-1})	R_{ccT}	R_{tmT}
Previsão	1.58 ± 0.42	1.92 ± 0.45	6.90 ± 6.07	555.34 ± 330.28	1.19 ± 0.36	1.01 ± 0.10
Real	1.21 ± 0.20	1.98 ± 0.14	11.53 ± 0.12	510.68 ± 85.09	1.18 ± 0.60	1.07 ± 0.02

Curtos-Circuitos com Transferência

	FE_1 ($W^{-1}s^{-1}$)	RE_1	F_{cc} (s^{-1})	F_{tm} (s^{-1})	R_{cc}	R_{tm}
Previsão	1.09 ± 0.46	3.71 ± 1.26	3.44 ± 1.53	247.18 ± 52.23	2.77 ± 2.77	2.95 ± 2.29
Real	0.84 ± 0.03	4.72 ± 0.13	3.24 ± 0.34	295.4 ± 33.18	1.64 ± 0.29	4.32 ± 0.11

Características Econômicas

	TF (Kg/h)	TD (Kg/h)	ED (%)
Previsão	1.28 ± 0.40	0.84 ± 0.07	66.00 ± 5.93
Real	1.30 ± 0.03	0.85 ± 0.02	65.35 ± 0.66

CONDIÇÃO INICIAL 2
(Posição sobrecabeça, I_m baixa, I_{cc} alta e U_{rc} alta)

Totalidade dos Curtos-Circuitos

	FE_{1T} ($W^{-1}s^{-1}$)	RE_{1T}	F_{ccT} (s^{-1})	F_{tmT} (s^{-1})	R_{ccT}	R_{tmT}
Previsão	1.37 ± 0.42	1.26 ± 0.45	3.12 ± 3.67	373.19 ± 330.28	1.12 ± 0.30	0.93 ± 0.15
Real	0.98 ± 0.02	1.28 ± 0.10	3.59 ± 0.59	282.53 ± 45.83	1.10 ± 0.48	0.81 ± 0.18

Curtos-Circuitos com Transferência

	FE_1 ($W^{-1}s^{-1}$)	RE_1	F_{cc} (s^{-1})	F_{tm} (s^{-1})	R_{cc}	R_{tm}
Previsão	0.65 ± 0.46	2.89 ± 0.65	2.48 ± 0.91	134.00 ± 52.23	2.77 ± 2.73	3.32 ± 0.59
Real	0.50 ± 0.06	2.55 ± 1.32	1.76 ± 0.36	115.98 ± 32.89	2.94 ± 1.15	3.53 ± 1.30

Características Econômicas

	TF (Kg/h)	TD (Kg/h)	ED (%)
Previsão	1.05 ± 0.03	0.54 ± 0.07	53.08 ± 5.41
Real	1.04 ± 0.03	0.58 ± 0.01	56.27 ± 1.40