

SERGIO DUARTE BRANDI

Eng. Metalurgista, Escola Politécnica da USP, 1981.

ANALISE DA TRANSFERENCIA METALICA NA SOLDAGEM
A ARCO ELETRICO COM ELETRODO REVESTIDO.

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da USP
para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia
Metalúrgica.

Orientador : Prof. Dr. Cêlio Taniguchi, Depto. Eng. Naval.

São Paulo, 1988.

"O homem é apenas o receptáculo da graça ;
não é a própria graça."

Caldwell, T. Médico de homens e almas,
11ª ed., Brasil, Ed. Record, 1987.

Dedico esta dissertação à minha esposa Sônia
pela paciência e compreensão e ao meu filho
Lucas pela alegria trazida.

Ofereço esta dissertação a meus pais
pelo esforço despendido para a
minha formação.

AGRADECIMENTOS.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Cêlio Taniguchi pela orientação e pelos exemplos de humildade que são tão úteis para o desenvolvimento tanto intelectual como pessoal. Agradeço ao prof. Dr. Renato Rocha Vieira pelo apoio dado no departamento de Eng. Metalúrgica. Agradeço ao prof. Emilio Wainer pelo incentivo dado e aos profs. Drs. José Deodoro Trani Capocchi e Ferdinando Luis Cavallante pelas discussões tão esclarecedoras.

Agradeço a FAPESP pelo apoio financeiro ; a Torsima S.A. pela execução dos ensaios de determinação de umidade do revestimento ; a ESAB pela doação dos eletrodos e a COPESP pelo apoio prestado para a execução deste trabalho.

Agradeço aos técnicos Laércio Alves Filho e Ayrton Roberto Mazucatto Leal pelo auxílio na execução das experiências e ao tecnólogo Elói Patinetti Filho pela ajuda prestada na execução do arranjo experimental. Agradeço ao Sr. Josué Macedo pelos primeiros ensinamentos na prática de soldagem e a química Maria de Lourdes Malanconi Sylvestre pelas discussões tão úteis para a realização deste trabalho.

Agradeço finalmente a todos aqueles que, de certa maneira, ajudaram direta ou indiretamente para que este trabalho fosse concluído.

LISTA DE FIGURAS.

1.1) Estrutura do arco elétrico para o processo TIG com argônio como gás de proteção.....	pg 2
1.2) Relação entre a curva característica estática do arco e do equipamento de soldagem.....	pg 3
1.3) Mudança das condições de soldagem mantendo-se a tensão do arco constante.....	pg 4
1.4) Ilustração dos diversos modos de transferência metálica.....	pg 9
1.5) Esquema das forças que agem na transferência metálica.....	pg 11
1.6) Valor dos fatores de correção $\psi(b/c)$ em função da relação (b/c) para um eletrodo de aço carbono.....	pg 13
1.7) Efeito da composição química de alguns elementos tenso-ativos na tensão superficial do aço.....	pg 13
1.8) Linhas de corrente no metal de adição e na gota associadas com a ação da força de compressão.....	pg 16
1.9) Efeito da pressão eletromagnética no escoamento do fluido no interior da gota.....	pg 16
1.10) Definição dos ângulos utilizados na equação de Greene.....	pg 17
1.11) Representação da força de arraste exercida pelo escoamento do plasma.....	pg 20
1.12) Regiões da mancha catódica de um arco elétrico em mercúrio segundo von Engel.....	pg 21
1.13) Volume do gás CO em função do teor de oxigênio da alma do eletrodo revestido.....	pg 23

1.14) Especificação do processo de soldagem com eletrodo revestido segundo a patente de Kjellberg.....	pg 25
1.15) Esquema do modelo de Lapidus para a adição de elementos de liga através do revestimento.....	pg 27
1.16) Esquema do modelo de Richter para a adição de elementos de liga através do revestimento.....	pg 28
1.17) Linhas de isoconcentração de cromo em uma gota na ponta de um eletrodo.....	pg 29
1.18) Mecanismo de transferência metálica segundo Conrad para a soldagem com eletrodo nu, em CCPD e na posição sobre-cabeça.....	pg 30
1.19) Mecanismo de expansão gasosa proposto por Larson	pg 31
1.20) Mecanismo de Becken para a transferência metálica com eletrodo rutilico, em CCPD e com alma de aço acalorado.....	pg 33
2.1) Algoritmo de Yates.....	pg 40
2.2) Detalhe do controle de automação da alimentação do eletrodo revestido.....	pg 57
2.3) Detalhe do mecanismo da parte de geração das gotas. Em (a) detalhe do disco de cobre e em (b) detalhe do acionamento.....	pg 58
2.4) Detalhe do recipiente de coleta das gotas. Em (a) vê-se o recipiente para soldagem na posição plana e em (b) para a não plana.....	pg 58
2.5) Fotografia mostrando o material depositado antes da separação da escória e das gotas metálicas.....	pg 66
2.6) Fotografia das gotas limpas preparadas para o	

ensaio granulométrico.....	pg 66
2.7) Separador de gotas para a amostragem para o ensaio granulométrico segundo a norma ASTM B-215.....	pg 67
2.8) Esquema para medida da profundidade da cratera na ponta do eletrodo pelo projetor de perfil.....	pg 73
4.1) Fotografia de uma gota na ponta de um eletrodo AWS E6011 com uma bolha de gás no seu interior.....	pg 91
4.2) Distribuição de temperatura na polaridade reversa (a) e na direta (b).....	pg 92
4.3) Circulação no interior da bolha de gás.....	pg 93
4.4) Circulação devido ao efeito Marangoni causado pela variação de temperatura.....	pg 94
4.5) Circulação devido a fenômenos convectivos gerados pelo gradiente de temperatura.....	pg 95
4.6) Circulação devido a pressão eletromagnética gerada pela força de compressão.....	pg 96
4.7) Efeito do diâmetro do eletrodo, da polaridade e da corrente de soldagem na velocidade de circulação de mercúrio.....	pg 96
4.8) Efeito da força devido a evaporação metálica e da ação da força de compressão na deformação da gota....	pg 98
4.9) Ação da força de compressão induzida pela força devido a evaporação metálica e pelas circulações internas.....	pg 99
4.10) Efeito da polaridade e do potencial aplicado na tensão superficial do mercúrio para diversos eletrólitos aquosos.....	pg 100

4.11) Efeito da corrente de soldagem na temperatura da gota metálica.....	pg 101
4.12) Efeito da densidade de corrente na temperatura da gota metálica.....	pg 103
4.13) Deformação da gota metálica na posição não plana.	pg 104
4.14) Efeito da tensão superficial e da viscosidade na formação do pescoço. Em (a) para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro e em (b) para o de 5,0 mm	pg 106
4.15) Efeito da área da cratera na ponta do eletrodo no direcionamento dos respingos para os dois diâmetros de eletrodos.....	pg 108
4.16) Efeito das circulações e da força devido a evaporação metálica na ação da força de compressão....	pg 109
4.17) Fotografia de uma gota na ponta de um eletrodo AWS E6013 com uma bolha de gás no seu interior.....	pg 111
4.18) Circulação na escória, na gota e na bolha.....	pg 113
4.19) Ação da força de compressão no momento do curto-circuito.....	pg 114
4.20) Efeito das circulações, da corrente e da posição de soldagem e da polaridade de soldagem na deformação da gota.....	pg 115
4.21) Efeito da força devido a tensão superficial entre a gota e a alma e a circulação da escória na deformação da gota.....	pg 116
4.22) Efeito da força de compressão no afilamento do pescoço no momento do curto-circuito.....	pg 117
4.23) Efeito da circulação da escória e da força devido a evaporação metálica na deformação da gota.....	pg 118

- 4.24) Efeito da polaridade e da circulação da escória na formação do pescoço. Em (a) CCPR e em (b) CCPD..... pg 119
- 4.25) Fotografia de uma gota na ponta de um eletrodo AWS E7018 com uma bolha de gás no seu interior..... pg 122
- 4.26) Efeito do ânion fluoreto na diminuição da mancha catódica..... pg 125
- 4.27) Efeito combinado da força de compressão, da força devido a evaporação metálica e das circulações na evaporação da parede da gota..... pg 127

LISTA DE TABELAS.

1.1) Classificação dos modos de transferência metálica de acordo com o IIW.....	pg 7
1.2) Classificação dos modos de transferência metálica dos processos de soldagem em função dos parâmetros de soldagem e de transferência.....	pg 24
2.1) Comparação entre a experimentação clássica e o delineamento fatorial.....	pg 38
2.2) Matriz do delineamento fatorial ⁴ 2 mostrando a combinação das variáveis em cada experimento.....	pg 39
2.3) Análise de variância para o delineamento ⁴ 2	pg 41
2.4) Função dos componentes do revestimento.....	pg 43
2.5) Faixa de composição percentual em peso dos revestimentos dos eletrodos.....	pg 44
2.6) Medida dos diâmetros dos revestimentos dos eletrodos.....	pg 45
2.7) Classificação das espessuras dos revestimentos segundo a norma DIN 1913 - parte 1.....	pg 46
2.8) Medidas dos diâmetros das almas dos eletrodos.....	pg 46
2.9) Análise química da alma dos eletrodos.....	pg 47
2.10) Faixa de corrente de soldagem recomendada.....	pg 48
2.11) Tensão do arco recomendada pelo fabricante.....	pg 49
2.12) Posições de soldagem que produzem soldas satisfatórias segundo AWS A-5.1.....	pg 49
2.13) Tipo de polaridade recomendada.....	pg 50
2.14) Variáveis escolhidas e faixas estudadas.....	pg 51

	4	
2.15)	Matriz do delineamento fatorial 2 ⁴ utilizado nos experimentos com os valores das variáveis escolhidas...	pg 51
2.16)	Comparação entre as técnicas de estudo da transferência metálica.....	pg 56
2.17)	Influência da velocidade de rotação do disco terra no diâmetro característico da gota.....	pg 59
2.18)	Velocidade de alimentação do eletrodo revestido em função dos parâmetros a serem estudados.....	pg 60
2.19)	Correlação entre a escala do regulador de rotação e a velocidade de alimentação do eletrodo.....	pg 61
2.20)	Condições de secagem e armazenamento recomendadas.....	pg 62
2.21)	Condições de secagem e armazenamento utilizadas..	pg 63
2.22)	Teor de umidade especificado e analisado nos revestimentos.....	pg 63
2.23)	Densidade ($\frac{g}{cm^3}$) e porosidade (%) aparentes médias das gotas metálicas para o eletrodo AWS E6011...	pg 70
2.24)	Densidade ($\frac{g}{cm^3}$) e porosidade (%) aparentes médias das gotas metálicas para o eletrodo AWS E6013...	pg 71
2.25)	Densidade ($\frac{g}{cm^3}$) e porosidade (%) aparentes médias das gotas metálicas para o eletrodo AWS E7018...	pg 71
3.1)	Exemplo do ensaio granulométrico para a determinação do diâmetro característico da gota para o eletrodo AWS E6011.....	pg 74
3.2)	Resultado dos diâmetros característicos das gotas (em mm) obtidos em cada experiência com o eletrodo AWS	

E6011.....	pg 75
3.3) Análise de variância dos diâmetros característicos das gotas para o eletrodo AWS E6011.....	pg 76
3.4) Resultado da quantidade de respingos obtida em cada experiência com o eletrodo AWS E6011.....	pg 77
3.5) Análise de variância da quantidade de respingos para o eletrodo AWS E6011.....	pg 77
3.6) Exemplo do ensaio granulométrico para a determinação do diâmetro característico da gota para o eletrodo AWS E6013.....	pg 79
3.7) Resultado dos diâmetros característicos das gotas (em mm) obtidos em cada experiência com o eletrodo AWS E6013.....	pg 80
3.8) Análise de variância dos diâmetros característicos das gotas para o eletrodo AWS E6013.....	pg 81
3.9) Resultado da quantidade de respingos obtida em cada experiência com o eletrodo AWS E6013.....	pg 82
3.10) Análise de variância da quantidade de respingos para o eletrodo AWS E6013.....	pg 82
3.11) Exemplo do ensaio granulométrico para a determinação do diâmetro característico da gota para o eletrodo AWS E7018.....	pg 84
3.12) Resultado dos diâmetros característicos das gotas (em mm) obtidos em cada experiência com o eletrodo AWS E7018.....	pg 85
3.13) Análise de variância dos diâmetros característicos das gotas para o eletrodo AWS E7018.....	pg 86
3.14) Resultado da quantidade de respingos obtida em	

cada experiência com o eletrodo AWS E7018..... pg 87

3.15) Análise de variância da quantidade de respingos
para o eletrodo AWS E7018..... pg 87

3.16) Medida da profundidade da cratera (em mm) na
ponta do eletrodo em função dos parâmetros estuda-
dos..... pg 89

INDICE.

Dedicat6ria.....	iii
Oferecimento.....	iv
Agradecimentos.....	v
Lista de figuras.....	vi
Lista de tabelas.....	xi
Resumo.....	xxi
Abstract.....	xxi
1- Introduo6o te6rica.....	pg 1
1.1) Noo6es b6sicas do arco el6trico.....	pg 1
1.2) Transfer6ncia met6lica.....	pg 5
1.2.1) Modos de transfer6ncia met6lica.....	pg 5
1.2.2) Foro6as atuantes na transfer6ncia met6lica.....	pg 10
1.2.2.1) Foro6a peso.....	pg 11
1.2.2.2) Foro6a devido a tens6o superficial.....	pg 12
1.2.2.3) Foro6a de compress6o.....	pg 14
1.2.2.4) Foro6a aerodin6mica.....	pg 19
1.2.2.5) Outras foro6as.....	pg 20
1.2.2.5.1) Foro6a devido a evaporao6o met6lica.....	pg 20
1.2.2.5.2) Foro6a devido a reaoo6es qu6micas.....	pg 22
1.2.3) Foro6as predominantes nos diversos processo de soldagem.....	pg 24
1.3) Transfer6ncia met6lica na soldagem com eletrodo revestido.....	pg 25
1.3.1) O desenvolvimento do eletrodo revestido.....	pg 25
1.3.2) Mecanismos relacionados 6 soldagem com eletrodo revestido.....	pg 26

1.3.2.1) Mecanismos de adição de elementos de liga.	pg 26
1.3.2.2) Mecanismos de transferência metálica.....	pg 29
1.3.3) Variáveis de processo que afetam a transferência metálica.....	pg 34
2- Materiais e métodos.....	pg 37
2.1) Procedimento para tratamento de dados.....	pg 37
2.1.1) Introdução.....	pg 37
2.1.2) Delineamento fatorial 2 ^k	pg 38
2.2) Escolha das variáveis a serem estudadas.....	pg 42
2.2.1) Tipo do revestimento do eletrodo.....	pg 42
2.2.2) Diâmetro do eletrodo.....	pg 46
2.2.3) Corrente de soldagem.....	pg 48
2.2.4) Tensão do arco.....	pg 48
2.2.5) Posição de soldagem.....	pg 49
2.2.6) Polaridade.....	pg 50
2.2.7) Resumo do valor das variáveis escolhidas.....	pg 50
2.3) Técnica experimental.....	pg 52
2.3.1) Revisão das técnicas de estudo da transferência metálica.....	pg 52
2.3.1.1) Filmagem em alta velocidade.....	pg 52
2.3.1.2) Método fotográfico.....	pg 53
2.3.1.3) Oscilograma.....	pg 53
2.3.1.4) Método da deposição sobre chapa metálica...	pg 54
2.3.1.5) Método do eletrodo duplo.....	pg 54
2.3.1.6) Método do eletrodo de carbono.....	pg 55
2.3.1.7) Comparação entre as técnicas utilizadas para o estudo da transferência metálica.....	pg 55

2.3.2) Arranjo experimental utilizado.....	pg 55
2.3.3) Técnica experimental utilizada.....	pg 59
2.3.3.1) Determinação da velocidade de rotação do disco terra.....	pg 59
2.3.3.2) Determinação da velocidade de alimentação do eletrodo revestido.....	pg 60
2.3.3.3) Procedimento para deposição do eletrodo...	pg 61
2.3.3.4) Procedimento para análise granulométrica..	pg 65
2.3.3.5) Procedimento para determinação do diâmetro característico da gota.....	pg 68
2.3.3.6) Procedimento para determinação da quantidade de respingos.....	pg 72
2.3.3.7) Procedimento para medida da profundidade da cratera na ponta do eletrodo.....	pg 72
3- Resultados obtidos.....	pg 74
3.1) Resultados obtidos para o eletrodo revestido AWS E6011.....	pg 74
3.1.1) Diâmetro característico da gota.....	pg 74
3.1.2) Quantidade de respingos.....	pg 76
3.2) Resultados obtidos para o eletrodo revestido AWS E6013.....	pg 79
3.2.1) Diâmetro característico da gota.....	pg 79
3.2.2) Quantidade de respingos.....	pg 81
3.3) Resultados obtidos para o eletrodo revestido AWS E7018.....	pg 84
3.3.1) Diâmetro característico da gota.....	pg 84
3.3.2) Quantidade de respingos.....	pg 86

3.4) Medida da profundidade da cratera na ponta do eletrodo revestido.....	pg 89
4- Discussão dos resultados.....	pg 90
4.1) Eletrodo revestido AWS E6011.....	pg 90
4.1.1) Diâmetro característico da gota.....	pg 92
4.1.1.1) Tratamento D (polaridade).....	pg 92
4.1.1.2) Tratamento B (corrente de soldagem).....	pg 100
4.1.1.3) Interação AC (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem).....	pg 102
4.1.1.4) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).....	pg 105
4.1.2) Quantidade de respingos.....	pg 107
4.1.2.1) Tratamento D (polaridade).....	pg 107
4.1.2.2) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).....	pg 107
4.1.2.3) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).....	pg 108
4.1.2.4) Tratamento B (corrente de soldagem).....	pg 109
4.1.2.5) Interação ACD (diâmetro do eletrodo+ posição de soldagem+polaridade).....	pg 110
4.2) Eletrodo revestido AWS E6013.....	pg 110
4.2.1) Diâmetro característico da gota.....	pg 112
4.2.1.1) Tratamento B (corrente de soldagem).....	pg 112
4.2.1.2) Interação BCD (corrente de soldagem+posição de soldagem+polaridade).....	pg 114
4.2.1.3) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).....	pg 116
4.2.1.4) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).....	pg 117
4.2.1.5) Tratamento D (polaridade).....	pg 118

4.2.1.6) Interação AC (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem).....	pg 119
4.2.2) Quantidade de respingos.....	pg 120
4.2.2.1) Tratamento B (corrente de soldagem).....	pg 120
4.2.2.2) Tratamento D (polaridade).....	pg 120
4.2.2.3) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).....	pg 121
4.3) Eletrodo revestido AWS E7018.....	pg 121
4.3.1) Diâmetro característico da gota.....	pg 123
4.3.1.1) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).....	pg 123
4.3.1.2) Tratamento D (polaridade).....	pg 124
4.3.1.3) Interação BCD (corrente de soldagem+posição de soldagem+polaridade).....	pg 126
4.3.1.4) Tratamento B (corrente de soldagem).....	pg 126
4.3.1.5) Interação ABC (diâmetro do eletrodo+corrente de soldagem+posição de soldagem).....	pg 127
4.3.1.6) Interação AD (diâmetro do eletrodo+polaridade).....	pg 128
4.3.1.7) Tratamento C (posição de soldagem).....	pg 128
4.3.1.8) Interação AC (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem).....	pg 128
4.3.1.9) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).....	pg 129
4.3.1.10) Interação ACD (diâmetro do eletrodo+ posição de soldagem+polaridade).....	pg 129
4.3.1.11) Interação BD (corrente de soldagem+polaridade).....	pg 129

4.3.1.12) Interação BC (corrente de soldagem+posição de soldagem).....	pg 130
4.3.2) Quantidade de respingos.....	pg 130
4.3.2.1) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).....	pg 130
4.3.2.2) Interação ABCD (diâmetro do eletrodo+corrente de soldagem+posição de soldagem+polaridade)..	pg 131
4.3.2.3) Interação BC (corrente de soldagem+posição de soldagem).....	pg 131
5- Conclusões.....	pg 132
6- Sugestão de trabalhos futuros.....	pg 133
7- Bibliografia.....	pg 134
Anexo.....	pg 145

RESUMO.

Este trabalho analisa a transferência metálica na soldagem com eletrodo revestido em função dos tipos de revestimento e parâmetros de soldagem.

Inicialmente são feitas algumas considerações a respeito dos tipos de forças que podem agir no processo e dos tipos de transferência metálica.

A seguir é feito um resumo das técnicas experimentais utilizadas para estudar a transferência metálica e, a partir daí, definida a técnica utilizada neste trabalho.

Foram feitas 192 experiências variando-se o tipo de revestimento e os parâmetros de soldagem.

Finalmente é feita a discussão dos resultados mais significativos em função do diâmetro característico da gota e da quantidade de respingos e correlacionados com o desempenho do eletrodo.

ABSTRACT.

The subject of this work is analysing the metal transfer in shielded metal arc welding related with the type of electrode coverings and welding parameters.

Initially, some general aspects about the forces acting during the process and the type of metal transfer are presented.

Next a summary of the metal transfer techniques used is made and then the technique utilized in this work is defined.

192 experiments were carried out changing the type of electrode covering and welding parameters.

Finally a discussion on the significant results is made trying to correlate the effects of electrode covering and welding parameters on the electrode performance.

1) INTRODUÇÃO TEÓRICA.

1.1) Noções básicas do arco elétrico.

O arco elétrico pode ser considerado como um meio gasoso condutor de eletricidade e que transforma energia elétrica em energia térmica [1,2,3] através de fenômeno similar ao efeito resistivo ou efeito Joule [2].

O arco elétrico utilizado em soldagem é caracterizado por uma corrente elevada e tensão baixa e pode ser dividido em três partes:

a) mancha catódica - parte do arco adjacente a parte negativa onde ocorre a emissão de elétrons. É a origem do arco elétrico e onde há uma queda de tensão de 30 a 50% da tensão do arco. Essa diferença de potencial é gerada em uma distância de 10^{-3} a 10^{-5} cm, produzindo um gradiente de tensão da ordem de 10^4 a 10^6 V/cm [4].

b) coluna do plasma - parte luminosa do arco onde há uma corrente bipolar, isto é, os elétrons e os íons negativos movimentam-se em uma direção e os íons positivos em direção contrária. A coluna de plasma consiste de um gás altamente ionizado, condutor de eletricidade e considerado eletricamente neutro. É uma região de temperaturas elevadas e gradiente de tensão da ordem de 10^1 V/cm [4,5,6].

c) mancha anódica - parte do arco adjacente a parte positiva onde os elétrons são absorvidos. Neste local há uma queda de tensão ao redor de 30% da tensão do arco e geralmente é menor que a queda de tensão catódica. A diferença de potencial é gerada em uma distância de 10^{-2} cm, ocasionando um gradiente de tensão da ordem

de 10^4 V/cm . A figura 1.1 esquematiza a estrutura do arco elétrico.

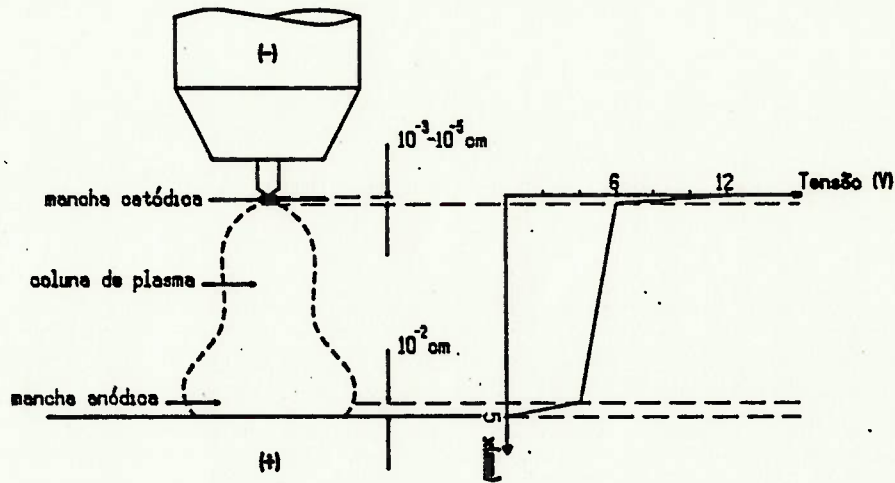


Fig. 1.1 - Estrutura do arco elétrico para o processo TIG com argônio como gás de proteção.

As características elétricas do arco foram estudadas por diversos autores e apresentados em algumas revisões [7,8]. A expressão obtida por Ayrton para eletrodos de carbono e correntes de soldagem baixas é dada por:

$$V = A + B.l + (C + D.l) / I \dots\dots\dots(1.1)$$

onde:

V = tensão do arco.

l = comprimento do arco.

I = corrente de soldagem.

A,B,C,D = constantes que dependem da natureza do gás de proteção e do eletrodo.

Da equação (1.1) observa-se que aumentando-se o comprimento do arco para corrente de soldagem constante, a tensão do arco aumenta. A curva característica estática do arco elétrico representada por essa equação está mostrada na figura 1.2.

As características elétricas do arco estão relacionadas também com o equipamento de soldagem. A curva característica estática do equipamento de soldagem está relacionada com a sua tensão em vazio (V_0), o débito de corrente desejado e a corrente de curto-circuito (I_{cc}). A corrente e a tensão real de soldagem (I_s e V_s) são determinadas pela intersecção das curvas características estáticas do arco, do tipo da equação (1.1), e do equipamento de soldagem representada pelo ponto A na figura 1.2. A curva característica estática do arco representada na figura 1.2 é para um comprimento l do arco constante.

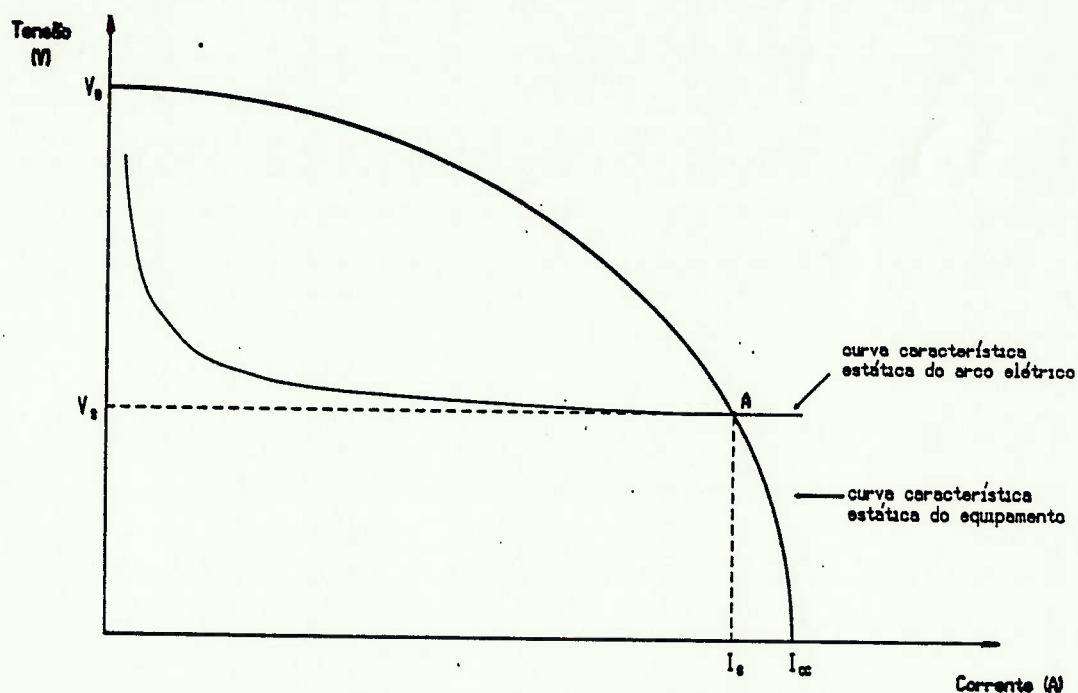


Fig. 1.2 - Relação entre a curva característica estática do arco e do equipamento de soldagem.

Com a mudança da regulagem da corrente de soldagem no equipamento, as suas curvas características estáticas mudam, porém mantendo-se a tensão em vazio praticamente inalterada. O ponto de intersecção entre elas muda junto com as condições de soldagem. Para manter a tensão do arco constante, por exemplo, o comprimento do arco tem que mudar caso a corrente de soldagem seja aumentada. A figura 1.3 ilustra este fato.

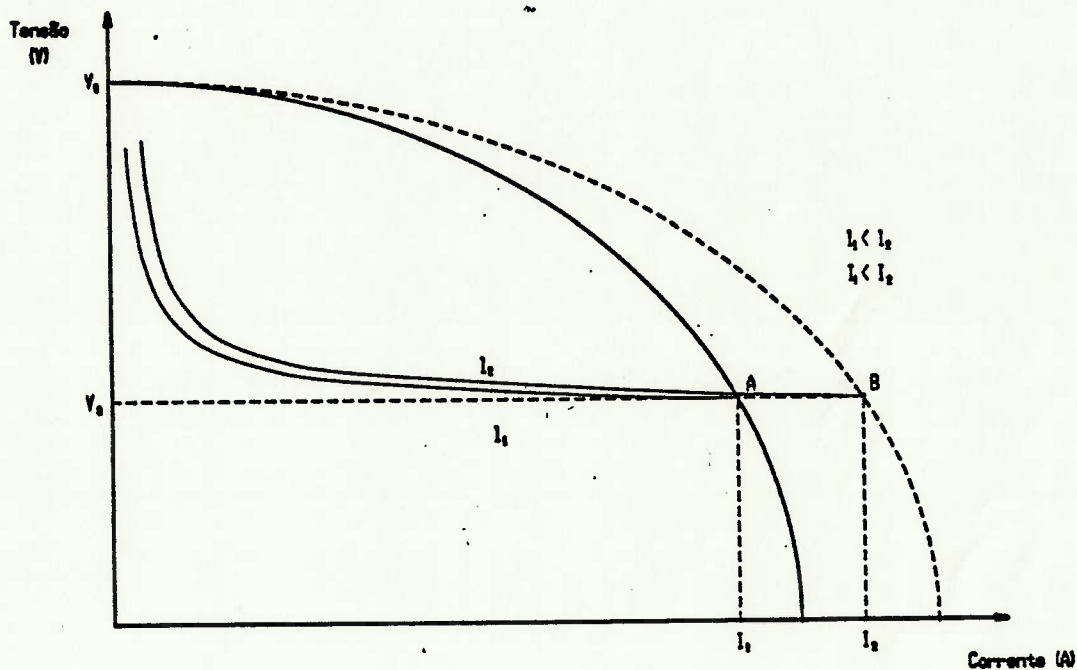


Fig. 1.3 - Mudança das condições de soldagem mantendo-se a tensão do arco constante.

Analisando a fig. 1.3 nota-se que para aumentar a corrente de soldagem o comprimento do arco aumenta de l_1 para l_2 para manter a mesma tensão do arco. A curva característica estática do equipamento de soldagem desenhada com linha contínua é para uma corrente regulada de I_1 enquanto que a curva tracejada é para I_2 .

1.2) Transferência metálica.

O fenômeno da transferência metálica começou a chamar a atenção dos estudiosos da área desde a descoberta dos processos de soldagem a arco elétrico no começo do século. A pergunta que se faz até hoje é por que que a gota metálica vai sempre na direção do metal de base qualquer que seja a posição de soldagem ? A resposta não foi dada com segurança até o presente momento devido a complexidade do fenômeno.

O modo de transferência metálica está ligado à soldabilidade de um dado material [9-14]. A estabilidade do arco, a posição de soldagem, a velocidade de soldagem e a quantidade de respingos estão mais ligadas ao processo de soldagem . A penetração, a qualidade da solda e o ciclo térmico de soldagem estão mais associados ao comportamento da solda em serviço. Todos esses aspectos estão relacionados com a transferência metálica.

O conhecimento de como se processa a transferência também tem sido utilizado para aperfeiçoar processos de soldagem ou estudar a automação destes [5].

1.2.1) Modos de transferência metálica.

De acordo com o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) a transferência metálica pode ser classificada em três grupos [15] : transferência por "voo livre", transferência por contato e transferência guiada pela escória.

A transferência por "voo livre" caracteriza-se pela passagem de uma gota através do arco sem nenhum contacto elétrico ou mecânico com a poça de fusão.

A transferência por contato é caracterizada por um toque entre a extremidade fundida do metal de adição e a poça de fusão.

A transferência guiada pela escória é associada aos processos que utilizam a proteção através de um fluxo granulado. Neste caso as gotas aderem ao fluxo fundido e são guiadas por este. A tabela 1.1 mostra a classificação completa dos modos de transferência.

A transferência globular é caracterizada por gotas com diâmetros maiores que o diâmetro do metal de adição e com uma frequência de destacamento baixa.

A transferência por gotas (a) é caracterizada pela ação do peso e da tensão superficial entre a gota e o metal de adição. Neste caso o diâmetro do metal de adição é muito menor que o da gota. A densidade de corrente para este modo de transferência é muito baixa.

A transferência por repulsão (b) ocorre graças a uma concentração da origem do arco elétrico com a presença do CO como gás de proteção. Ocorre uma força de repulsão que destaca e desvia a gota de sua trajetória devido a assimetria das forças que agem nela.

A transferência por projeção (c) ocorre devido a ação do peso e das forças de origem eletromagnética. O diâmetro da gota é equivalente ao diâmetro do metal de adição.

A transferência por pulverização axial (d) caracteriza-se pela formação de um jato de metal de adição fundido. Visto em câmara lenta este jato é constituído de gotas bem menores que o diâmetro do metal de adição. A frequência de destacamento das gotas é bem elevada. As forças que atuam são de origem eletromagnética, arraste devido ao plasma e mecânica. No caso da

Tabela 1.1 - Classificação dos modos de transferência metálica de acordo com o IIW [adap.ref. 15].

Designação do modo de transferência metálica	Exemplo de processo de soldagem
1) TRANSFERÊNCIA EM "VOO LIVRE".	
1.1) Transferência globular.	
1.1.1) Transferência por gotas.	MIG/MAG com densidade de corrente baixa.
1.1.2) Transferência por repulsão.	MAG com 100% de CO ₂
1.2) Transferência por pulverização.	MIG com argônio e MAG com argônio e até 15% de CO ₂ ou 5% de O ₂ .
1.2.1) Transferência por projeção.	MIG/MAG com densidade de corrente interm., MIG pulsado.
1.2.2) Transferência por pulverização axial.	MIG/MAG com densidade de corrente maior.
1.2.3) Transferência por pulverização rotacional.	MIG/MAG com densidade de corrente elevada, MIG plasma.
1.3) Transferência por explosão	Eletrodo revestido, MAG com CO ₂ .
2) TRANSFERÊNCIA POR CONTATO.	
2.1) Transferência por curto-circuito.	MAG com arco curto
2.2) Transferência por contato ininterrupto.	Soldagem com adição de metal (TIG).
3) TRANSFERÊNCIA PROTEGIDA PELA ESCÓRIA.	
3.1) Transferência guiada pela parede.	Soldagem ao arco submerso.
3.2) Outros modos	Eletrodo revestido, eletrodo contínuo tubular, etc.

transferência por pulverização axial o jato de metal líquido é na direção do eixo do metal de adição.

A transferência por pulverização rotacional (e) ocorre para valores elevados de densidade de corrente e para distâncias grandes do tubo de contacto à peça. A extremidade do metal de adição é aquecida e faz com que este perca a resistência mecânica. A ação do campo eletromagnético gera um efeito torsional fazendo com que as gotas do jato metálico sejam transferidas na direção radial da poça de fusão.

A transferência por explosão (f) é devido a formação de uma bolha de gás no interior da gota. Essa bolha de gás pode explodir e gerar um número grande de pequenas gotas. O tamanho das gotas não é uniforme para este tipo de transferência.

A transferência por curto-circuito (g), como o próprio nome diz, é causada por um curto-circuito entre a extremidade fundida do metal de adição e a poça de fusão. A gota é destacada pela ação das forças eletromagnéticas e da força devido a tensão superficial da poça de fusão.

A transferência guiada pela parede do fluxo fundido (h) ocorre devido a força gerada pela tensão superficial entre a gota e o fluxo fundido, a qual direciona as gotas para a poça de fusão.

Para esclarecer melhor os diversos modos de transferência metálica mostrados na tabela 1.1 e descritos acima basta observar a figura 1.4.

Conforme o processo de soldagem e as condições de soldagem opta-se por um modo de transferência metálica. Por exemplo, no caso da soldagem MIG de aço carbono [17], quando se utiliza a transferência por curto-circuito a peça se aquece pouco, pode-se

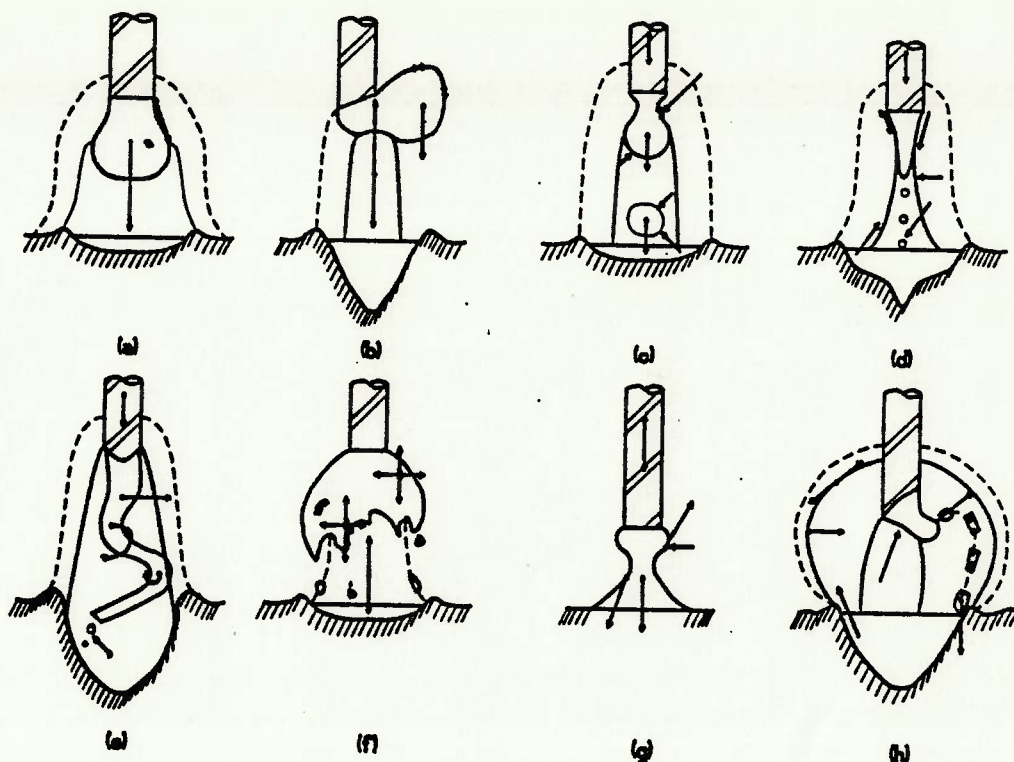


Fig. 1.4 - Ilustração dos diversos modos de transferência metálica [16].

soldar em todas as posições, a penetração é pequena, o arco é instável, a taxa de deposição é baixa e a quantidade de respingos é elevada. Já no caso da transferência por pulverização axial há um aquecimento acentuado da peça, solda somente na posição plana ou solda em ângulo na horizontal, tem grande penetração, arco bastante estável, taxa de deposição elevada e quantidade de respingos pequena.

No caso de soldagem pelo processo MAG há uma grande geração de respingos devido a transferência por repulsão associada a transferência por explosão. Para diminuir a quantidade de respingos é interessante que se tenha a transferência por cur-

to-circuito, visto que a tensão superficial da poça de fusão segura a gota antes que esta seja repelida.

O Instituto Internacional de Soldagem (IIW) elaborou um filme sobre transferência metálica para diversos processos de soldagem. O filme mostra que para o caso do eletrodo revestido na posição vertical ascendente a transferência por curto-circuito é a mais adequada.

1.2.2) Forças atuantes na transferência metálica.

As forças que agem na gota promovendo a transferência metálica são [9,15,16] :

- a) força peso (8).
- b) força devido a tensão superficial (tensão superficial entre a gota e o metal de adição e entre a gota e a poça de fusão) (7).
- c) força de compressão (força eletromagnética) (3,5,10).
- d) força aerodinâmica (força de arraste do plasma (11) e do gás de proteção (4)).
- e) forças devido a evaporação do metal (13) e a reações químicas (6).
- f) forças geradas por campos magnéticos externos (9,12) .
- g) forças mecânicas externas (1,2) .

Os números entre parênteses após cada força está relacionado com a figura 1.5 , que mostra esquematicamente cada um dos tipos de força listados.

A transferência metálica é influenciada pelo balanço das forças que predominam em uma dada situação. Esse balanço depende dos parâmetros de soldagem, geometria do metal de adição, tipo de metal de adição, geometria do arco, posição de soldagem,

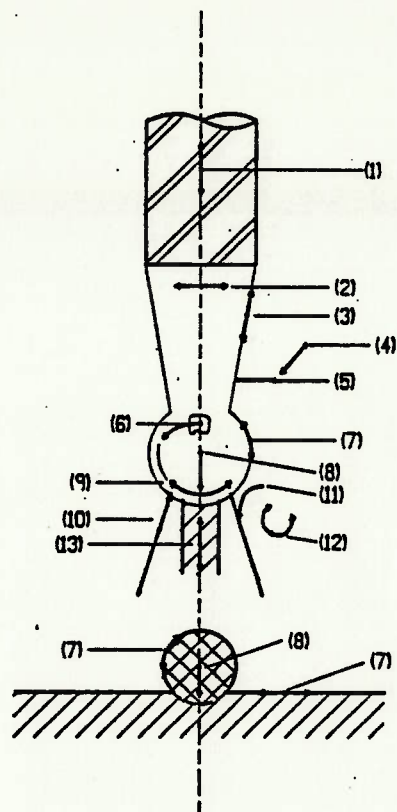


Fig. 1.3 - Esquema das forças que agem na transferência [16].

composição do revestimento ou fluxo, pressão atmosférica local e do equipamento de soldagem. A seguir descrever-se-á algumas das forças citadas anteriormente.

1.2.2.1) Força peso.

A força peso pode ser considerada como uma força que age no sentido de destacar a gota dependendo da posição de soldagem. A sua expressão é dada por :

$$F_g = d \cdot g \cdot V \dots\dots\dots (1.2)$$

onde:

d = densidade da gota.

g = aceleração da gravidade.

V = volume da gota.

1.2.2.2) Força devido a tensão superficial.

A força devido a tensão superficial entre a gota e o metal de adição atua no sentido de reter a gota, qualquer que seja a posição de soldagem.

No caso isotérmico o peso máximo da gota suportado pela tensão superficial pode ser obtido pela integração da equação de Laplace. Como essa integração não pode ser feita analiticamente, Lohnstein e colaboradores [9,16,18] resolveram-na numericamente. A expressão obtida foi :

$$F_t = 2 \cdot \pi \cdot b \cdot t \cdot \psi(b/c) \dots\dots\dots(1.3)$$

onde:

b = raio do metal de adição.

t = tensão superficial.

c = constante de capilaridade do metal = $t / (d \cdot g)$

O fator de correção $\psi(b/c)$ é uma função complexa que varia de 0,6 a 1,0 dependendo da relação entre b e c . A figura 1.6 mostra essa função para o caso de um eletrodo de aço carbono. Na figura a tensão superficial da gota é de 1 N/m e a constante de capilaridade é 5,1 mm .

Observando-se a figura 1.6 o fator de correção $\psi(b/c)$ diminui com o aumento do diâmetro do metal de adição.

No caso não isotérmico a equação de Laplace possui um termo adicional devido a variação da tensão superficial com a temperatura [9]. Essa variação da tensão superficial pode gerar uma convecção no líquido.

A tensão superficial pode variar ao longo da superfície da

gota por variações na composição química, principalmente de elementos tenso-ativos [16,19,20]. Este caso também não é previsto

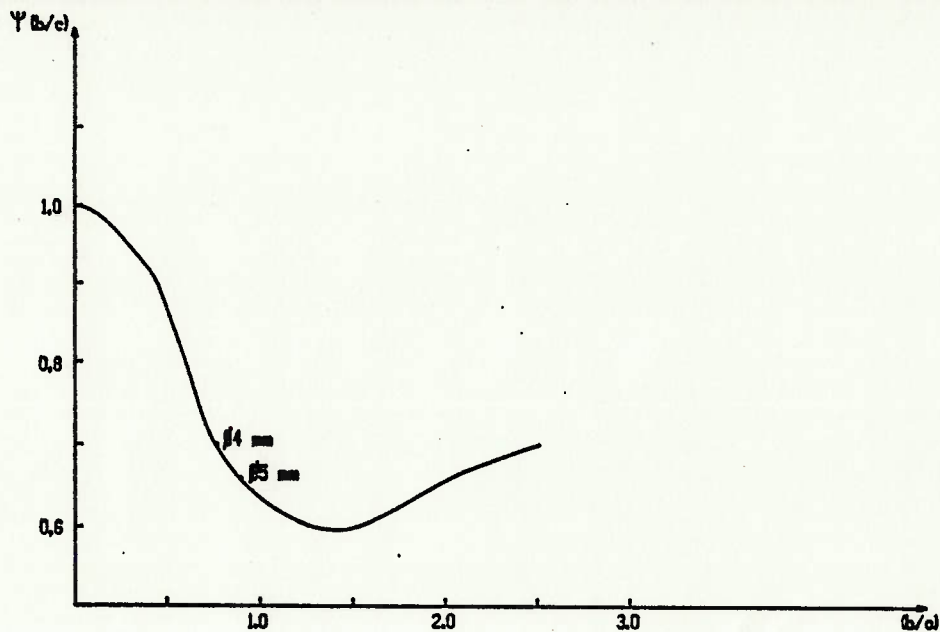


Fig. 1.6 - Valor do fator de correção $\psi(b/c)$ em função da relação (b/c) para um eletrodo de aço carbono [16].

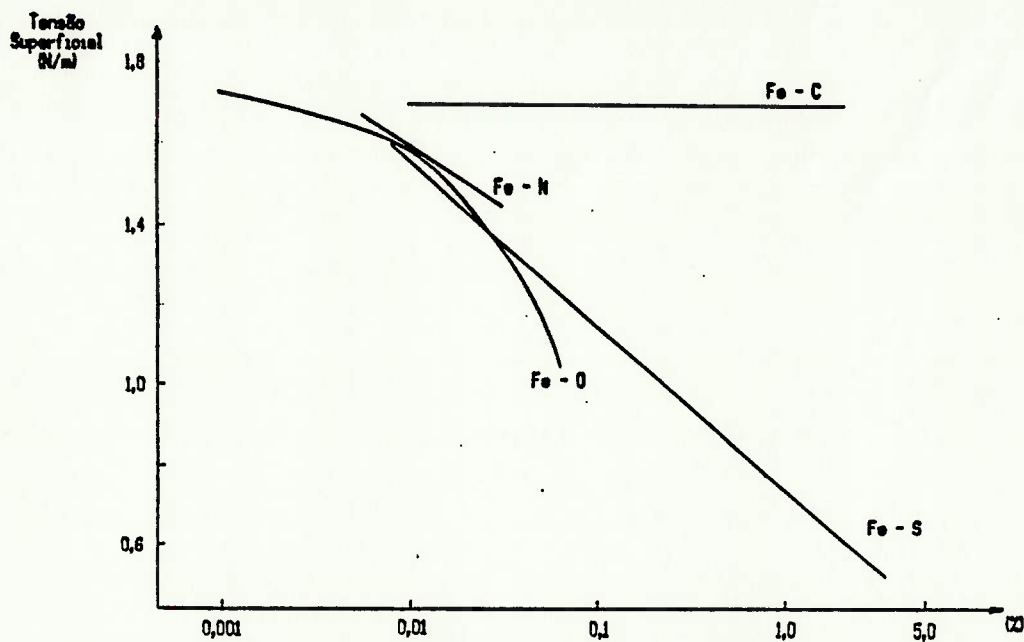


Fig. 1.7 - Efeito da composição química de alguns elementos tenso-ativos na tensão superficial do aço [19].

na resolução da equação (1.3) . A figura 1.7 mostra a variação da tensão superficial em função da composição química para alguns elementos tenso-ativos.

O gradiente de tensão superficial devido a variação de composição química também pode induzir uma convecção no líquido.

1.2.2.3) Força de compressão.

A força de compressão é devida a interação entre a corrente de soldagem e o campo eletromagnético gerado por ela. Essa força de origem eletromagnética causa uma compressão na gota líquida gerando o efeito de pinçamento (pinch effect).

A expressão geral da força de compressão é dada por:

$$F_c^* = j^* \times B^* \dots\dots\dots(1.4)$$

onde:

j^* = vetor densidade de corrente.

B^* = vetor campo eletromagnético.

O primeiro estudo a respeito da origem dessa força e da sua formulação foi feito por Creedy e colaboradores [21] em 1932. Concluíram que a força de compressão era dada por :

$$F_c = 0,035 \cdot I^2 / l^{1/2} \dots\dots\dots(1.5)$$

onde :

I = corrente de soldagem (A).

l = comprimento do arco (mm).

$[F_c]$ = dinas.

Um valor comum utilizado para a equação (1.5) é [21] :

$$F_c = I^2 / 200 \dots\dots\dots(1.6)$$

Sack [22] em 1932 modificou a equação obtida por Creedy. Examinando as linhas de corrente antes de formar a gota na ponta do eletrodo, concluiu que elas convergem para a parte ativa do arco. Deduziu uma nova expressão para a força de compressão dada por :

$$F_c = \frac{I^2}{200} \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \dots \dots \dots (1.7)$$

onde :

A_1 = área de entrada da corrente.

A_2 = área de saída da corrente.

A partir da equação (1.7) Sack deduziu que se a gota metálica for deformada, formando um pescoço por exemplo, a concentração das linhas de corrente nele acentua cada vez mais a ação da força de compressão até que haja a sua evaporação. Por outro lado se não houver a formação do pescoço a tendência da força de compressão é alongar a gota conforme mostra a figura 1.8 .

Maecker [23] em 1955 mostrou que uma das componentes da força de compressão gerava uma pressão no seio do fluido e esta causava um escoamento do mesmo. A equação proposta por ele é :

$$P_{mg} = \frac{\mu \cdot I \cdot j}{8 \cdot \pi} \dots \dots \dots (1.8)$$

onde :

μ = permeabilidade magnética no vácuo.

O escoamento induzido por essa diferença de pressão dá-se na direção da maior para a menor densidade de corrente. A ação dessa pressão eletromagnética no escoamento do fluido pode ser notada na figura 1.9 .

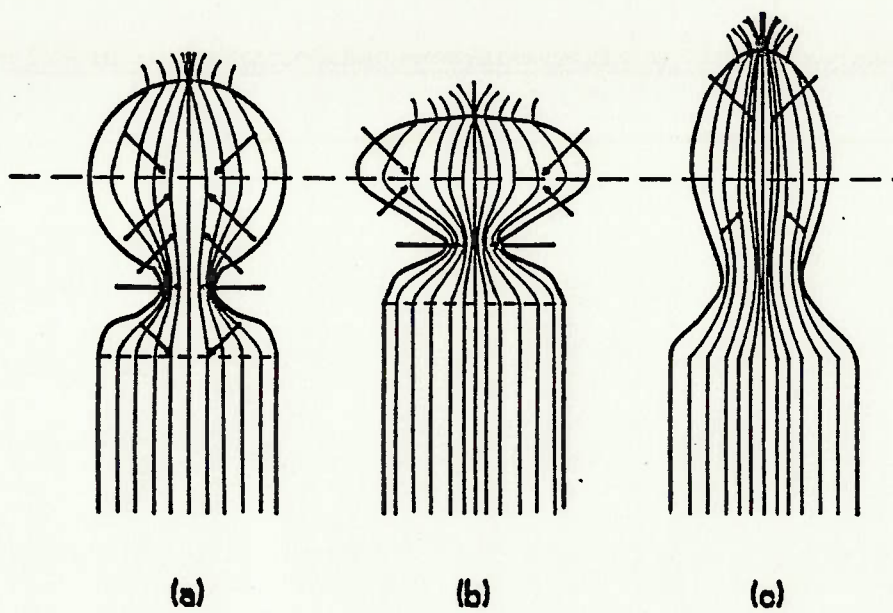


Fig. 1.8 - Linhas de corrente no metal de adição e na gota associadas com a ação da força de compressão [22].

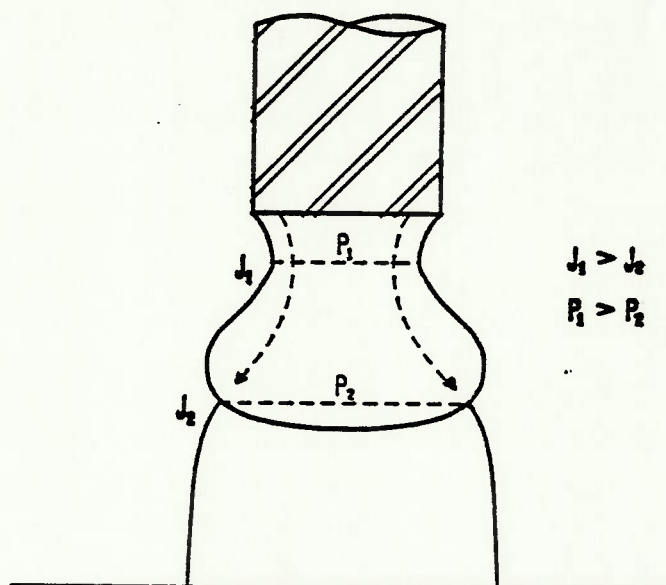


Fig. 1.9 - Efeito da pressão eletromagnética no escoamento do fluido no interior da gota [23].

Observando-se essa figura tem-se na região do pescoço uma densidade de corrente j_1 maior e conseqüentemente uma pressão p_1 também maior. Por outro lado, a pressão p_2 é menor devido a densidade de corrente j_2 ser menor.

No início dos anos sessenta Greene [24] propôs a seguinte equação para a força de compressão :

$$F_c = I^2 \left(\ln \left(\frac{\sin \theta}{\sin \psi} \right) - \frac{1}{4} + \frac{1}{(1 - \cos \theta)} + \left[\frac{2}{(1 - \cos \theta)} \right] \ln \left[\frac{2}{(1 + \cos \theta)} \right] \right) \dots (1.9)$$

As definições dos ângulos θ e ψ são mostrados na figura 1.10 .

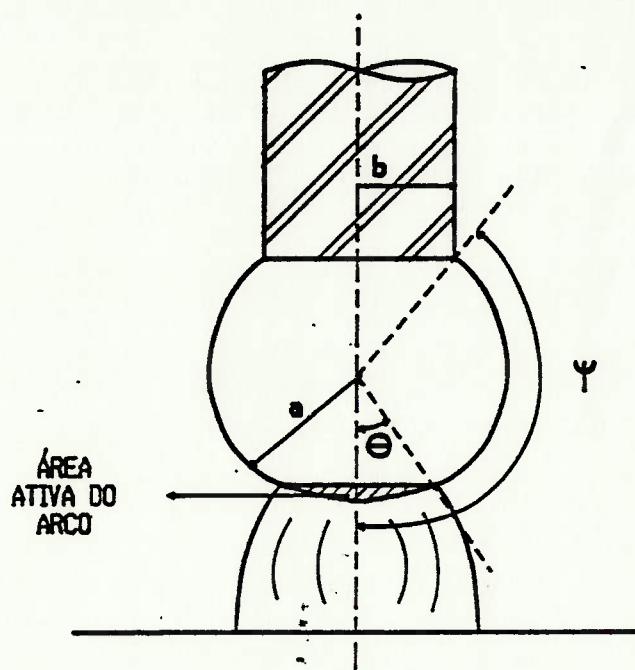


Fig. 1.10 - Definição dos ângulos utilizados na equação de Greene [23].

Amson [25] em 1965 aprimorou a equação obtida por Greene. Estudou diversos modos de transferência relacionando-os com o raio da gota e do metal de adição. No caso onde o raio da gota é

maior que o do metal de adição chegou-se a seguinte expressão:

$$F_c = \mu \cdot I^2 / 4 \cdot \pi \left\{ \log \left(\frac{a \cdot \sin \theta}{b} \right) - \frac{1}{4} - \frac{1}{(1 - \cos \theta)^2} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \cdot \log \left[\frac{2}{(1 + \cos \theta)} \right] \right\} \dots (1.10)$$

onde:

a = raio da gota.

b = raio do metal de adição.

θ = ver figura 1.10 .

No caso hemisférico a equação (1.7) mostra que $F_c = 0$. Esse resultado não concorda nem com a teoria nem com a prática.

Por outro lado, de acordo com Lancaster [26], para $\theta = 90^\circ$ a equação (1.10) transforma-se em :

$$F_c = \mu \cdot I^2 / 4 \cdot \pi \left[\log (a/b) + 0,137 \right] \dots (1.11)$$

Utilizando-se a expressão (1.11) para o caso hemisférico o valor da força de compressão é menor que a força calculada para um condutor cilíndrico . Segundo Lancaster [26] essa discrepância é devido a integração da componente longitudinal da força de compressão na equação (1.10) .

Uma outra abordagem do fenômeno da ação da força de compressão é feita através da magnetohidrodinâmica (MHD) [27-29]. Neste caso é estudada a instabilidade gerada pela passagem de corrente no sentido axial de um cilindro líquido. Se esta instabilidade crescer exponencialmente pode haver um fenômeno como o da ação da força de compressão no pescoço de uma gota. Essa instabilidade já foi observada na soldagem pelo processo MIG [29]. Neste modelo a instabilidade está relacionada com o valor da corrente axial e

com a curvatura da superfície do líquido.

De todas as equações apresentadas percebe-se que a força de compressão ou é diretamente proporcional ao quadrado da corrente de soldagem ou à densidade de corrente.

1.2.2.4) Força aerodinâmica.

A força aerodinâmica é originada pelo escoamento do plasma em volta da gota [9,10,30-32]. O escoamento causa uma força de arraste devido ao atrito entre o plasma e a superfície da gota e a diferença de pressão causada pela vorticidade. Essa força ajuda no destacamento e na aceleração da gota durante a sua passagem pelo arco elétrico. A expressão para a força de arraste é dada por :

$$F_d = C_d \cdot A_{go} \cdot d_g \cdot U^2 / 2 \dots \dots \dots (1.12)$$

onde :

C_d = coeficiente de arrasto.

A_{go} = área projetada da gota.

d_g = densidade do plasma.

U = velocidade do plasma.

O valor do coeficiente de arrasto foi determinado experimentalmente por Needham e colaboradores [30]. A relação obtido foi :

$$C_d = 13 / Re^{1/2} \quad \text{para } 10 < Re < 100 \dots \dots \dots (1.13)$$

A figura 1.11 mostra as linhas de fluxo ao redor da gota e como a força de arraste é exercida pelo escoamento do plasma. O ponto O representa o ponto de estagnação.

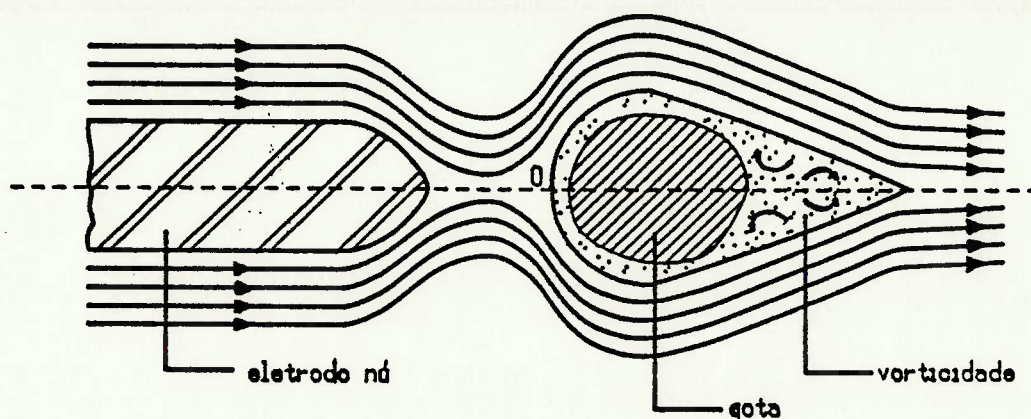


Fig. 1.11 - Representação da força de arraste exercida pelo escoamento do plasma [30].

1.2.2.5) Outras forças.

1.2.2.5.1) Força devido a evaporação metálica.

A força devido a evaporação metálica foi citada pela primeira vez por Conrady [33]. Segundo ele há uma pressão gerada pela mancha catódica que deforma a gota causando uma força de repulsão. A origem dessa pressão foi estudada por von Engel e seu colaborador [34]. Segundo eles a mancha catódica possui três regiões : a primeira (I) onde ocorre a aceleração dos elétrons e onde a densidade de vapor metálico é grande; a segunda (II) onde ocorre a ionização dos átomos e onde a densidade de vapor ainda é elevada e a terceira região (III) onde a densidade de vapor diminui rapidamente com a distância ao catodo. Essas regiões são mostradas na figura 1.12 .

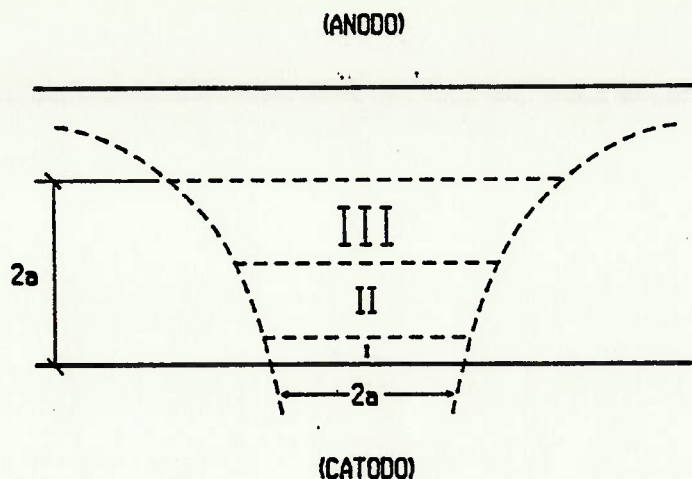


Fig. 1.12 - Regiões da mancha catódica de um arco em mercúrio segundo von Engel [34].

As dimensões das regiões da mancha catódica para um arco elétrico de 1 A em mercúrio são : $3 \cdot 10^{-6}$ cm para a região I, 10^{-3} cm para a região II e $4 \cdot 10^{-3}$ cm para a região III . O raio da mancha catódica é de $2 \cdot 10^{-3}$ cm .

von Engel [34] sugere que a pressão é devida ao choque elástico dos elétrons nos átomos do metal evaporado que ocorre na região II. Essa pressão é comunicada à região I pela perturbação no campo elétrico gerada pelos elétrons que retornam. O estudo de von Engel foi limitado somente à polaridade direta.

Uma tentativa de formulação para esta força foi feita por Lancaster [9,18,35]. Segundo ele, há uma evaporação da superfície do metal de adição se a densidade de corrente é elevada, independentemente de ser o anodo ou o catodo. A expressão para uma ponta de metal de adição com um bocal envolvente (caso do eletrodo revestido) é dada por :

$$F_j = 3.Q_0 \cdot I^2 / (2 \cdot \rho_v \cdot R^2) \dots\dots\dots (1.14)$$

onde :

Q_0 = massa de material evaporado por ampere por segundo.

ρ_v = densidade do vapor emitido.

R = raio externo do arco.

Lancaster [35] concluiu que a força de evaporação metálica pode superar as forças eletromagnéticas no caso do eletrodo revestido. Segundo Hummitzsch [36] chega-se a encontrar de 10 a 20% de vapor metálico na atmosfera do arco, mostrando a importância da ação desta força.

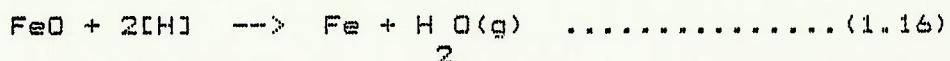
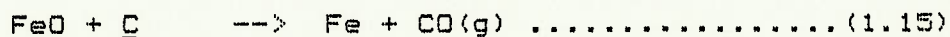
1.2.2.5.2) Força devido a reações químicas.

Essa força é gerada pela reação do oxigênio com elementos desoxidantes dissolvidos na gota, cujo produto gasoso se expande de uma forma explosiva no interior da gota.

A primeira menção a esse tipo de força foi feito por Doan [37] em 1932. Segundo ele a transferência metálica na posição sobre-cabeça só poderia acontecer para os eletrodos revestidos com alma feita de aço efervescente. A utilização do aço efervescente favoreceria essa transferência.

A ação dessa força continuou a ser pesquisada [11,38-43] porém Erdmann-Jesnitzer [40,42,43] foi quem a estudou com mais detalhes. Segundo ele [40] os gases presentes no interior da bolha podem ser CO , CO_2 , H_2 , H_2O e CH_4 . Para os eletrodos revestidos acredita-se que as bolhas de gás são predominantemente de CO [11,40-44].

As reações principais que geram as bolhas de gás são [9,41] :



De acordo com Erdmann-Jesnitzer [42] a quantidade de CO gerada aumenta linearmente com o teor de oxigênio dissolvido na alma conforme mostra a figura 1.13 .

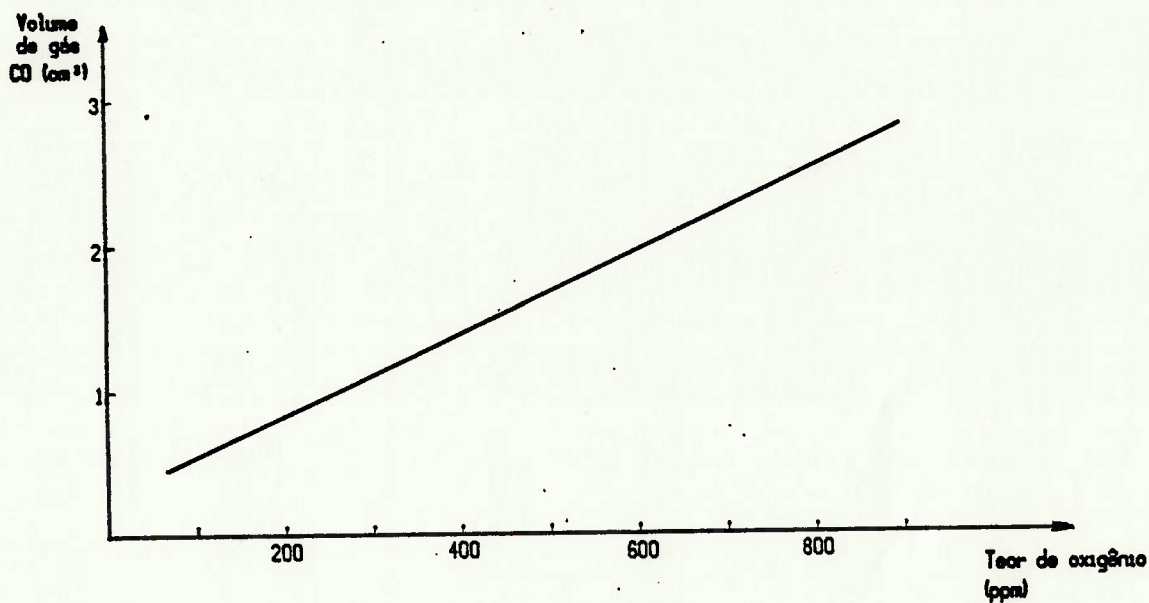


Fig. 1.13 - Volume de gás CO em função do teor de oxigênio da alma do eletrodo revestido [42].

Além do oxigênio, o teor de carbono da alma também pode influir na reação de formação do CO. Ishizaki e colaboradores [44] mostraram que o tamanho médio das gotas diminuem quando se aumenta o teor de carbono da alma, provavelmente devido a reação de formação do CO .

Não são somente as variações de composição química da alma que interferem na formação do CO . Analisando as curvas de energia livre de formação do CO, um aumento na temperatura causa um retardo na formação deste [42].

1.2.3) Forças predominantes nos diversos processos de soldagem.

As forças discutidas no item anterior não agem todas ao mesmo tempo em todos os processos de soldagem. Cada processo tem as suas características próprias e, conseqüentemente, um conjunto diferente de forças predominantes. A tabela 1.2 mostra diversos processos de soldagem e, em função de alguns parâmetros de soldagem, os parâmetros de transferência.

Tabela 1.2 - Classificação dos modos de transferência nos processos de soldagem em função dos parâmetros de soldagem e de transferência [adaptado da ref. 9].

processo de soldagem	parâmetros de soldagem			parâmetros de transferência							
	polaridade	densidade de corrente	gás de proteção	tipo de transferência	tamanho da gota	forças predominantes					
						P	T	C	J	A	G
ELETRODO REVESTIDO revestimento ácido revestimento rutílico revestimento básico	CCPI/CCPD	baixa	CO2	(C) - E - NA	P M G		X				X
				(C) - E - NA			X		X	X	
				C - E - NA			X		X	X	
MIG arco longo	CCPI CCPI CCPD	baixa alta -	inerte	Go - A	G P G	X	X				
				Pu - A					X		X
				R - NA					X	X	
arco curto	CCPI	baixa/alta		C	G		X	X			
arco pulsado	CCPI	-		Pr - A	P			X		X	
MAG arco longo	CCPI CCPI	baixa alta	CO2	Go - R - NA	G P	X	X			X	
				R - NA					X	X	X
				C				G	X		X
arco curto	CCPI	baixa/alta		C	G				X		
ELETRODO TUBULAR	CCPI	alta		R - NA	G		X	X		X	
ARCO SUBMERSO	CCPI/CCPD CCPI/CCPD	baixa alta	tipo CO2	F	G P	X	X				X
				F					X	X	

LEGENDA DA TABELA :

C = curto-circuito ; E = explosão ; Go = gotas ; R = repulsão ; Pu = pulverização ; Pr = projeção ; F = guiada pelo fluxo fundido ; P = peso ; T = tensão superficial ; C = força de compressão ; J = força do jato de vapor ; A = força de arraste ; G = força de expansão gasosa .

1.3) Transferência metálica na soldagem com eletrodo revestido.

1.3.1) O desenvolvimento do eletrodo revestido.

O processo de soldagem com eletrodo revestido surgiu em 1907 [45,46] através da patente de Oscar Kjellberg [47]. Segundo ela a soldagem deveria ser feita preferencialmente em CCPR e de acordo com o arranjo mostrado na figura 1.14 .

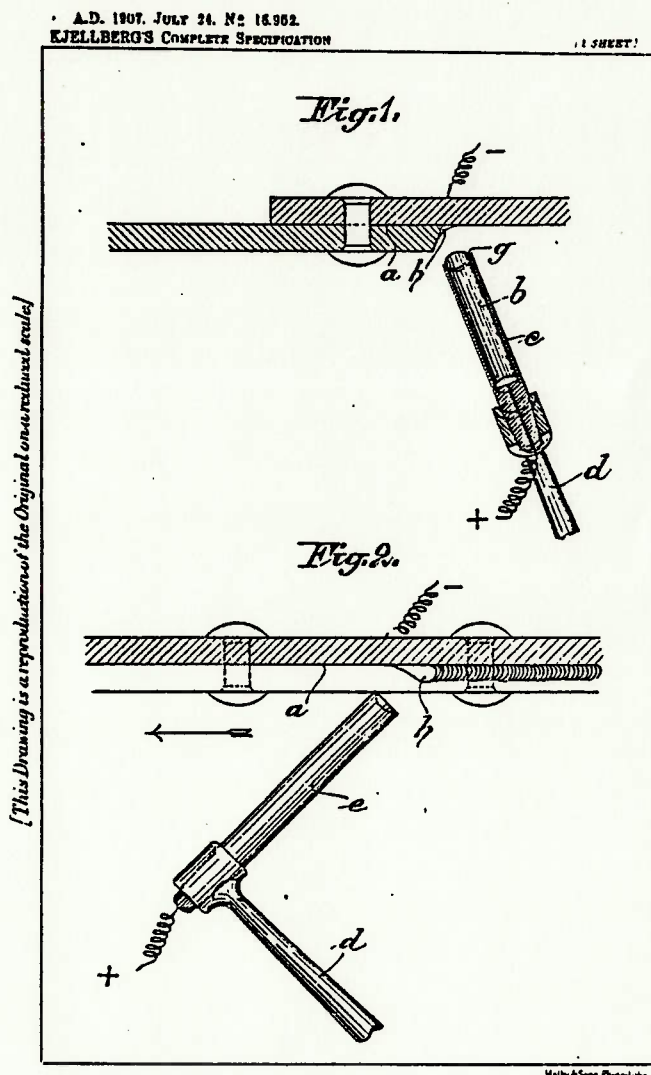


Fig. 1.14 - Especificação do processo de soldagem com eletrodo revestido segundo a patente de Kjellberg [47].

Na figura 1.14 as figuras 1 e 2 são uma vista lateral e

outra frontal da junta (a) . O eletrodo (e) é revestido por um material a prova de fogo (c) que se estende além do metal de adição (b), formando uma cratera na sua ponta (g) para direcionar o metal fundido para o cordão de solda (h). O eletrodo (e) é montado em um porta-eletrodo especialmente fabricado (d) .

Em 1912 Kjellberg produziu uma outra patente [48] onde ele descreve não só um eletrodo com revestimento único mas também com revestimento duplo e um tipo de eletrodo tubular.

Com o crescimento rápido da utilização dos processos de soldagem na fabricação de equipamentos, a necessidade de se ter uma classificação lógica dos eletrodos revestidos tornou-se necessária.

Segundo Morgan [49], um comite unindo a American Welding Society (AWS) e a American Society for Testing and Materials (ASTM) elaboraram em 1940 a primeira especificação que acabou gerando a primeira classificação aceita. Essa primeira especificação cobria os eletrodos revestidos tanto para aços carbono como para aços de baixa liga. Somente em 1948 é que a especificação foi dividida em duas : uma para aços carbono (AWS A5.1) e outra para aços carbono baixa liga (AWS A5.5). A partir de então essas duas especificações tem sido aprimoradas e largamente utilizadas.

1.3.2) Mecanismos relacionados à soldagem com eletrodo revestido.

1.3.2.1) Mecanismos de adição de elementos de liga.

Lapidus [19] mostrou que a adição dos elementos de liga através do revestimento ocorre entre a gota que está crescendo e

a escória que a envolve. Segundo ele existe uma região onde o carbonato de cálcio se decompõe no revestimento gerando o dióxido de carbono. Esse gás reage com os elementos de liga presentes no revestimento, oxidando-os e formando uma camada de escória que envolve a gota além do monóxido de carbono. Acaba ocorrendo então a partição dos elementos de liga entre a escória e a gota. A figura 1.15 mostra este mecanismo.

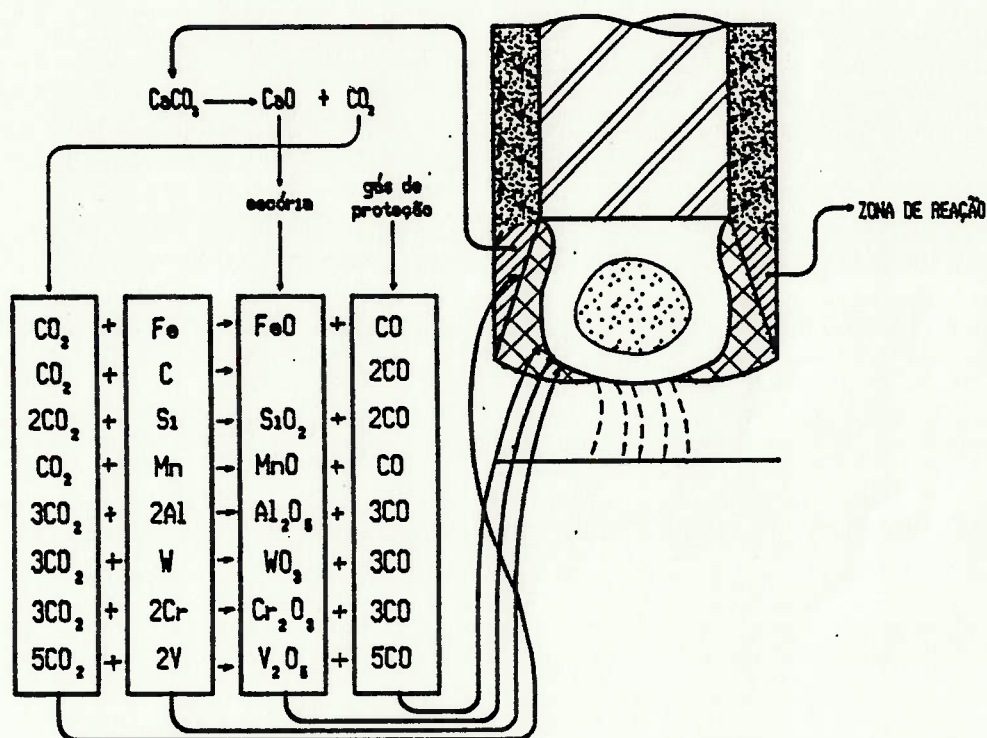


Fig. 1.15 - Esquema do modelo de Lapidus [19] para adição de elementos de liga através do revestimento.

Richter [50] estudou a adição de elementos de liga através do revestimento tipo básico do eletrodo. Segundo ele a adição do elemento de liga dá-se em uma região preferencial na cratera na ponta do eletrodo, o local de intersecção entre a alma, a gota e

o revestimento. Existe uma região no revestimento próximo a cratera que acaba sofrendo um processo de sinterização devido a temperatura elevada. A figura 1.16 esquematiza este modelo.

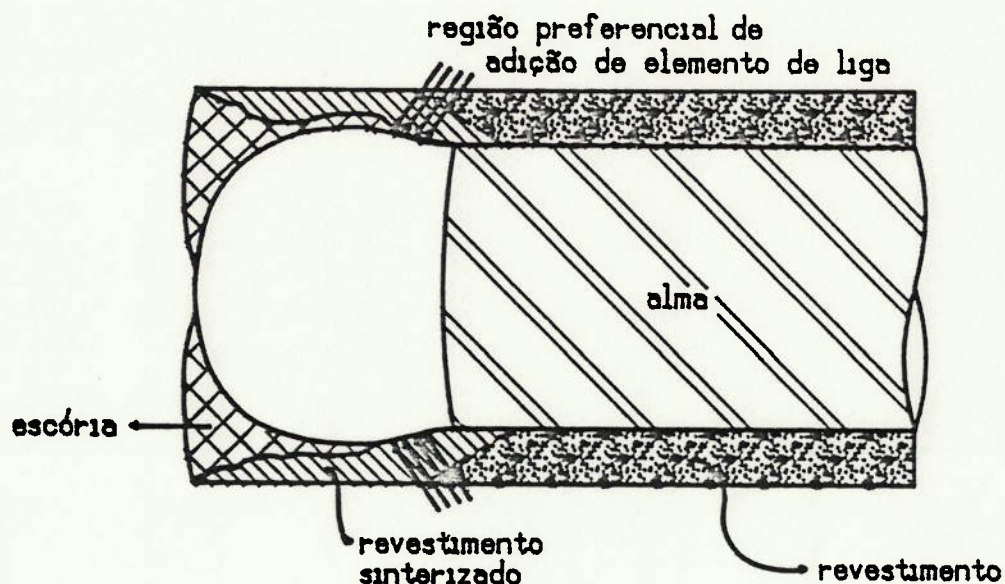


Fig. 1.16 - Esquema do modelo de Richter [50] para a adição de elemento de liga através do revestimento.

O trabalho de Richter [50] partiu de um eletrodo com alma de aço carbono comum com um revestimento que permitisse obter um depósito de um aço com alto teor de cromo. Foi obtida uma gota na ponta do eletrodo no momento da transferência e feito o mapeamento do teor de cromo no interior dela. O resultado obtido confirmou o seu modelo. A figura 1.17 mostra as linhas de isoconcentração de cromo na gota. Os números da figura representam a porcentagem de cromo obtidas.

Analisando a fig. 1.17 a região de maior concentração de

romo coincide com a região preferencial de adição de elemento de liga mostrada na figura 1.16.

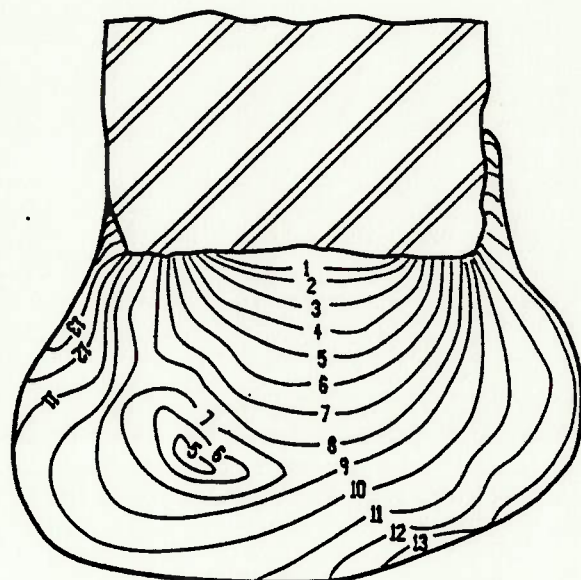


Fig. 1.17 - Linhas de isoconcentração de cromo em uma gota na ponta de um eletrodo [50].

1.3.2.2) Mecanismos de transferência metálica.

Um dos primeiros mecanismos propostos para explicar a soldagem com eletrodo nã na posição sobre-cabeça foi feito por Conrady [33] em 1940. Segundo ele na soldagem em CCPD a mancha catódica causava uma pressão na gota fundida na ponta do eletrodo. Essa pressão deformava a superfície da gota e a mancha catódica deslocava-se para a parte da gota mais próxima do metal de base, empurrando o metal líquido de novo contra a ponta do eletrodo. A

movimentação da mancha catódica gerava um movimento ondulatório na superfície da gota até que houvesse o contacto com a poça de fusão. Nesse momento a tensão superficial da poça de fusão associada com a força de compressão acabavam transferindo a gota. A figura 1.18 esquematiza este modelo.

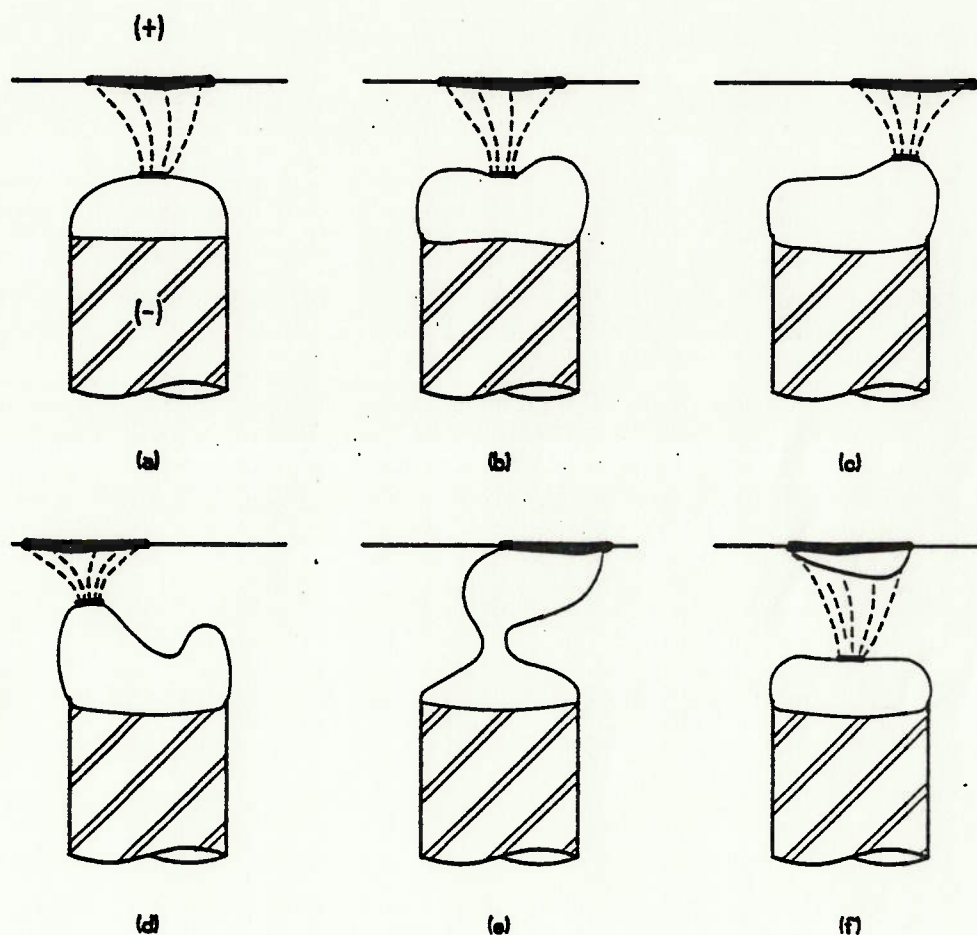


Fig. 1.18 - Mecanismo de transferência metálica segundo Conrady [33] para a soldagem com eletrodo nú em CCFD na posição sobre-cabeça.

Acredita-se que no caso do eletrodo revestido a cratera na ponta do eletrodo deve favorecer esse tipo de movimentação, uma vez que esta serve de sustentação para a gota quando da soldagem

na posição sobre-cabeça.

Larson [38] em 1942 propôs o modelo da expansão de uma bolha de gás no interior da gota como sendo o mecanismo atuante na soldagem com eletrodo revestido na posição sobre-cabeça. Baseado em resultados anteriores [37] de que a soldagem na posição sobre-cabeça só ocorria com almas de eletrodo feitas com aços efervescentes ele propôs o mecanismo. Segundo ele a bolha de gás no interior da gota pode se comportar de duas maneiras. Ela pode expandir e acabar por explodir a gota metálica sem que tenha sido

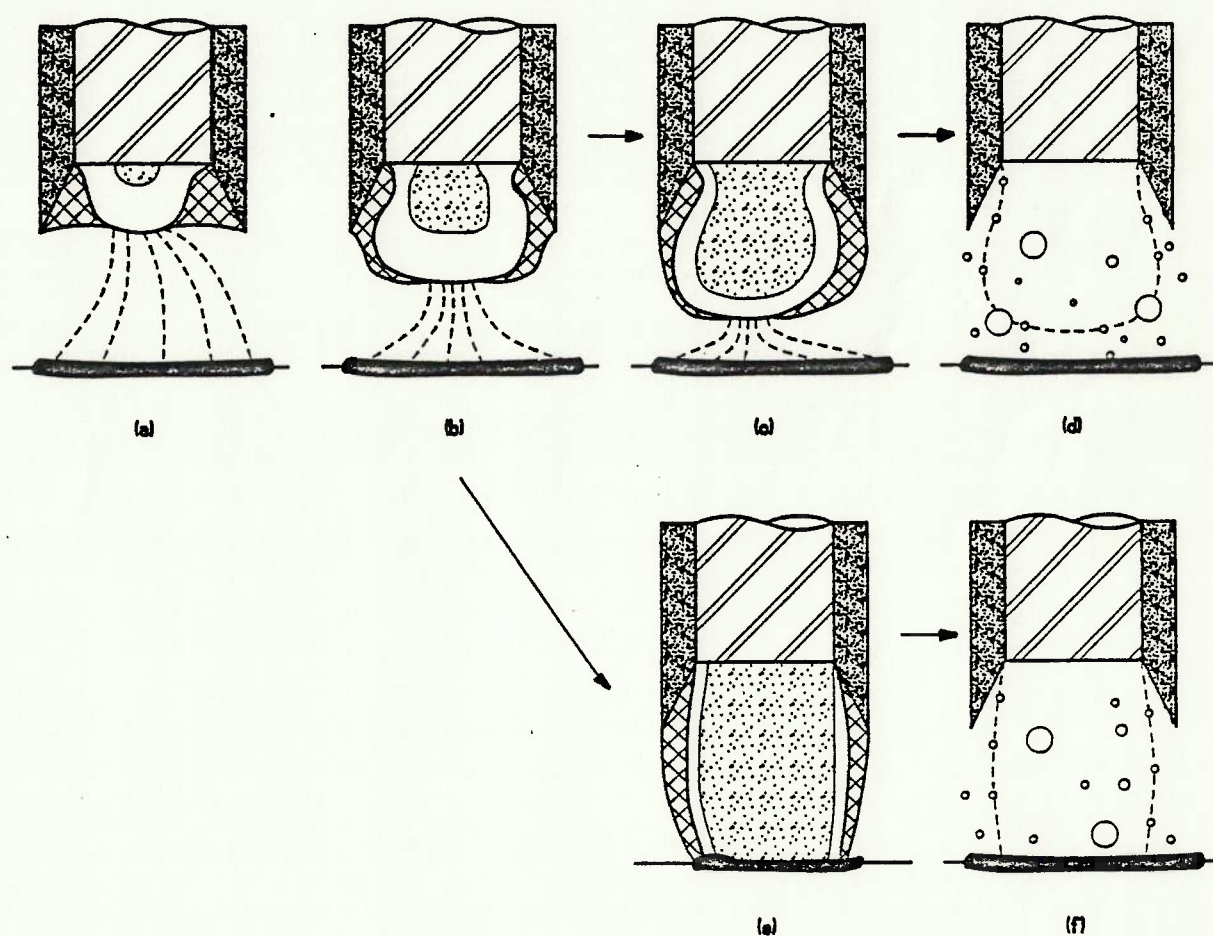


Fig. 1.19 - Mecanismo de expansão gasosa proposto por Larson [38].

formado um curto-circuito ou então expandir, tocar a poça de fusão e somente depois explodir a gota metálica. A figura 1.19 mostra o mecanismo proposto por Larson.

O tipo preponderante de transferência, com ou sem curto-circuito, depende da taxa de aquecimento e da formação de gás no interior da bolha [33].

Conforme discussão anterior, um aumento na temperatura provoca uma diminuição na quantidade de CO ou H₂O formado devido a reação ser exotérmica. Portanto no caso de um aumento de temperatura ocorre principalmente a expansão do gás formado no interior da gota.

Becken [51,52] no início dos anos setenta propôs um modelo alternativo. Segundo ele a escória vai sendo espalhada pela superfície da gota (a,b) à medida que o eletrodo vai fundindo. Caso a tensão superficial na interface entre a escória e o metal seja menor que a tensão superficial da escória (como é o caso da maioria dos revestimentos) há a deformação e a consequente formação de um embrião de gota (c). A pressão da mancha catódica ajuda na formação do pescoço da gota (d), enquanto que esta se desloca pela superfície do metal líquido e a distância do arco é diminuída. Se a pressão exercida pela mancha catódica associada a força de compressão são comparáveis com a tensão superficial entre a escória e a gota e a tensão superficial da escória ocorre a transferência mostrada em (e). Esse tipo de transferência é denominada arco simples.

Por outro lado, se as forças atuantes no pescoço da gota não são suficientes para um destacamento rápido da gota a transferência ocorre de outra maneira. Neste caso a escória é

forçada para um lado enquanto que a mancha catódica desloca-se para baixo, configurando a situação mostrada em (f). Na parte constricta da gota há uma diferença de pressão que acelera o material fundido nessa parte. Essa energia cinética supera a

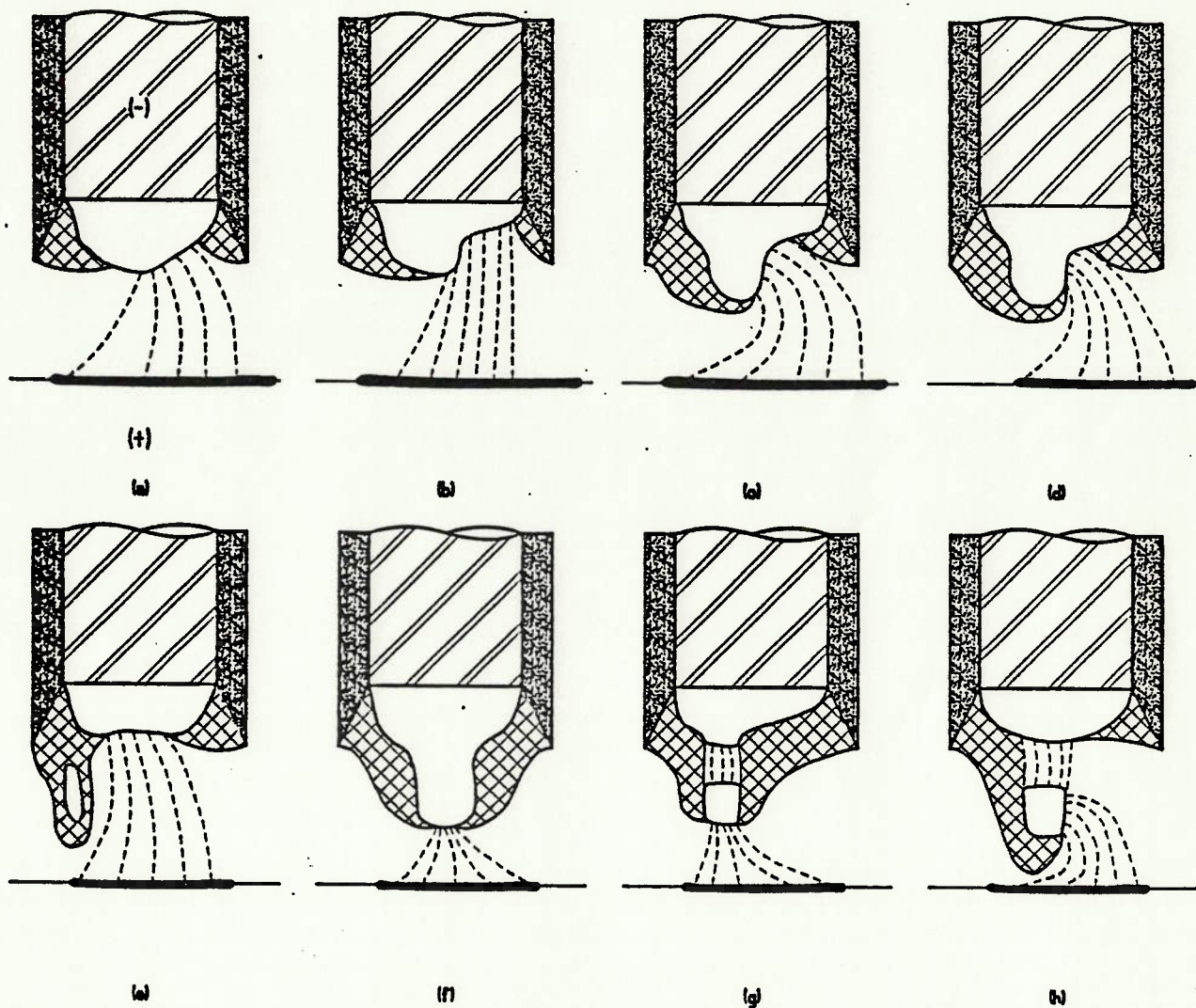


Fig. 1.20 - Mecanismo de Becken [51,52] para a transferência metálica com eletrodo rutilico, em CCPD e com alma de aço acalmado.

tensão superficial entre a gota e a escória e a tensão superficial da escória. A gota é alongada e o pescoço é formado. A ação da força de compressão continua reduzindo o pescoço até chegar em um ponto onde a densidade de corrente é tão elevada que ele é evaporado. A temperatura é tão elevada que favorece a ionização desse vapor metálico e há a formação de um segundo arco em série com o primeiro (g). A expansão do vapor acelera a gota, e, se houver um rompimento da da escória, acaba ocorrendo o fenômeno mostrado em (h) com o arco voltando a ser um só. Esse tipo de transferência é chamado de arco duplo por Becken e foi observado em eletrodos com revestimentos rutilicos com alma completamente desoxidada e em CCPD. A figura 1.20 mostra o mecanismo de Becken.

As evidências da formação do segundo arco foram obtidas através de oscilogramas. No momento da formação do segundo arco a tensão do arco aumenta enquanto que a corrente permanece praticamente constante.

1.3.3) Variáveis de processo que afetam a transferência metálica.

Conforme mencionado anteriormente, o modo de transferência mais indicado para a soldagem fora de posição com o eletrodo revestido é o curto-circuito. Para que haja o curto-circuito a gota deve ter um tamanho relativamente grande comparado ao comprimento do arco. No momento do curto-circuito o arco é interrompido causando uma instabilidade no mesmo. Na soldagem fora de posição, o arco deve ser o mais estável possível para que o soldador consiga realizar a solda sem muita dificuldade.

A estabilidade do arco é um fenômeno bastante estudado até hoje [53-58]. Um arco é considerado estável quando o escoamento de calor é uniforme e a deposição do material de adição é regular em face dos fenômenos transientes que ocorrem durante a transferência. Segundo Ludwig e seu colaborador [53] a instabilidade do arco pode ser devida, ou a uma perturbação na emissão de elétrons na mancha catódica devido ao transiente que ocorre durante a interrupção do arco ou a uma diminuição no gradiente de tensão na coluna do arco que dificulta a ionização no mesmo.

Pokhodnya e colaboradores [55,56] desenvolveram um parâmetro para a instabilidade do arco em corrente alternada dado por :

$$B_z = I_{ab} / (V_{ab} \cdot T_{ab}) \dots\dots\dots (1.17)$$

onde:

B_z = parâmetro de instabilidade = ohm⁻¹ s⁻¹.

I_{ab} = corrente média de abertura do arco.

V_{ab} = tensão média de abertura do arco.

T_{ab} = tempo médio de abertura do arco.

Quanto menor o valor de B_z mais estável é o arco. Assim quanto menor a corrente de abertura ou maior a tensão de abertura mais estável é o arco. Além disso, quanto maior o tempo de curto-circuito maior a instabilidade do arco.

Em estudos recentes Pokhodnya e colaboradores [57] mostraram que o tempo de curto-circuito é diretamente proporcional ao tamanho da gota transferida. Portanto quanto maior o tamanho da gota mais estável é o arco.

No caso do eletrodo revestido tem-se duas situações

A estabilidade do arco é um fenômeno bastante estudado até hoje [53-58]. Um arco é considerado estável quando o escoamento de calor é uniforme e a deposição do material de adição é regular em face dos fenômenos transientes que ocorrem durante a transferência. Segundo Ludwig e seu colaborador [53] a instabilidade do arco pode ser devida, ou a uma perturbação na emissão de elétrons na mancha catódica devido ao transiente que ocorre durante a interrupção do arco ou a uma diminuição no gradiente de tensão na coluna do arco que dificulta a ionização no mesmo.

Pokhodnya e colaboradores [55,56] desenvolveram um parâmetro para a instabilidade do arco em corrente alternada dado por :

$$B_z = I_{ab} / (V_{ab} \cdot T_{ab}) \dots\dots\dots (1.17)$$

onde:

B_z = parâmetro de instabilidade = $\text{ohm}^{-1} \text{s}^{-1}$.

I_{ab} = corrente média de abertura do arco.

V_{ab} = tensão média de abertura do arco.

T_{ab} = tempo médio de abertura do arco.

Quanto menor o valor de B_z mais estável é o arco. Assim quanto menor a corrente de abertura ou maior a tensão de abertura mais estável é o arco. Além disso, quanto maior o tempo de curto-circuito maior a instabilidade do arco .

Em estudos recentes Pokhodnya e colaboradores [57] mostraram que o tempo de curto-circuito é diretamente proporcional ao tamanho da gota transferida. Portanto quanto maior o tamanho da gota mais estável é o arco.

No caso do eletrodo revestido tem-se duas situações

antagônicas. Por um lado a soldagem fora de posição é feita preferencialmente através da transferência por curto-circuito e isso exige um tamanho de gota grande. Por outro lado o arco elétrico é mais estável para gotas pequenas do que para grandes.

Analisando do ponto de vista da instabilidade do arco quanto menor a gota mais estável é o arco. Segundo Zaruba e colaborador [58] quanto menor a gota maior a sua temperatura. Como a gota também transporta energia haveria um aumento na temperatura da poça de fusão aumentando a sua fluidez e dificultando a soldagem fora de posição.

Nos estudos realizados não é levado em conta o mecanismo que age durante a transferência. No caso do eletrodo revestido ocorre a explosão de bolhas de gás no interior da gota que pode diminuir o tamanho da gota mas gerar um transiente que influi na estabilidade do arco.

A quantidade de respingos também deve ser levado em consideração. Quanto maior a quantidade de respingos maior a possibilidade da deposição do metal de adição ser irregular e, conseqüentemente, mais instável será o arco.

Retomando a discussão deve-se levar em conta para avaliar a instabilidade do arco tanto o tamanho da gota como a quantidade de respingos. A situação ideal seria o menor tamanho de gota possível com a menor quantidade de respingos.

Portanto as variáveis de soldagem que influem no tamanho da gota e na quantidade de respingos são : diâmetro do eletrodo, tipo de revestimento, corrente de soldagem, polaridade e posição de soldagem. Essas variáveis serão abordadas e discutidas nos capítulos seguintes.

2) MATERIAIS E METODOS.

2.1) Procedimento para tratamento de dados.

2.1.1) Introdução.

A abordagem de um determinado fenômeno pode ser feita de duas maneiras: através da experimentação clássica ou da técnica do delineamento fatorial.

Na experimentação clássica estuda-se a relação entre a causa e o efeito. A partir do entendimento dessa relação tem-se para uma determinada causa um dado efeito em uma dada condição. Entretanto, na maioria dos casos, não se consegue estudar a possível interação entre as diversas causas estudadas e a sua influência nos efeitos obtidos.

Por outro lado, no delineamento fatorial não se conhece a relação entre a causa e o efeito. A modelagem é baseada nos dados experimentais que são tratados estatisticamente. Consegue-se, então, obter resultados com o dobro da precisão da experimentação clássica, informações devido a possibilidade de interação entre as diversas causas além do peso de cada interação significativa no efeito estudado [59-62]. A tabela 2.1 compara os dois tipos de técnica de abordagem de um fenômeno.

O delineamento fatorial tem sido utilizado para estudar, por exemplo, tratamento termo-mecânico de aços Ni-Cr-Mo e Cr-Ni-Si [63], distorção em engrenagens cementadas [64], tratamento termo-mecânico e efeito no endurecimento por precipitação de ligas Al-Mg-Si-Cu [65] e Al-Zn-Mg-Cu [66].

Tabela 2.1 - Comparação entre a experimentação clássica e o delineamento fatorial.

Experimentação clássica	Delineamento fatorial
-consegue uma relação entre uma dada causa e o efeito estudado	-a relação entre uma dada causa e o efeito estudado é linear no intervalo estudado. Caso esta relação não seja linear pode-se induzir a erros ao tentar prever o efeito no intervalo
-número de experiências pode ser menor	-número de experiências cresce exponencialmente com o número de causas, porém existem técnicas para diminuir esse número
-não prevê a interação entre as diversas causas	-prevê a interação entre as causas e pode estimar o peso de cada uma no efeito estudado
	-no caso de fenômenos desconhecidos e complexos serve para estimar as causas e interações mais significativas para estudo futuro mais detalhado

2.1.2) Delineamento fatorial 2^k .

O delineamento fatorial 2^k trabalha com k variáveis em dois níveis, um baixo e outro alto. As variáveis devem ser cuidadosamente escolhidas. As conclusões obtidas através da análise estatística são válidas somente entre os intervalos definidos pelas variáveis escolhidas.

No presente estudo optou-se pelo delineamento 2^4 . As variáveis escolhidas foram: diâmetro do eletrodo revestido (A), corrente de soldagem (B), posição de soldagem (C) e polaridade (D).

Cada variável representa uma medida indireta das forças que

podem atuar na transferência metálica. Assim, o diâmetro do eletrodo revestido está relacionado com a tensão superficial entre a gota e a alma; a corrente de soldagem com a força de compressão e a força devido a evaporação metálica; a posição de soldagem com a tensão superficial entre a escória e a gota metálica e a polaridade com a força devido a evaporação metálica.

A tabela 2.2 representa a combinação das variáveis a serem estudadas em cada experiência. O sinal (-) representa o nível baixo e o sinal (+) representa o nível alto.

Tabela 2.2 - Matriz do delineamento fatorial ⁴ 2 mostrando a combinação das variáveis em cada experimento [60-62].

Código da experiência	Diâmetro do eletrodo (A)	Corrente de soldagem (B)	Posição de soldagem (C)	Polaridade (D)
1	(-)	(-)	(-)	(-)
A	(+)	(-)	(-)	(-)
B	(-)	(+)	(-)	(-)
AB	(+)	(+)	(-)	(-)
C	(-)	(-)	(+)	(-)
AC	(+)	(-)	(+)	(-)
BC	(-)	(+)	(+)	(-)
ABC	(+)	(+)	(+)	(-)
D	(-)	(-)	(-)	(+)
AD	(+)	(-)	(-)	(+)
BD	(-)	(+)	(-)	(+)
ABD	(+)	(+)	(-)	(+)
CD	(-)	(-)	(+)	(+)
ACD	(+)	(-)	(+)	(+)
BCD	(-)	(+)	(+)	(+)
ABCD	(+)	(+)	(+)	(+)

Na aplicação deste método de análise as seguintes hipóteses são consideradas válidas :

- i) os fatores são fixos.
- ii) o delineamento é completamente aleatório.
- iii) as hipóteses quanto a distribuição normal usualmente

necessárias estão satisfeitas.

Para tratar estatisticamente os dados experimentais obtidos tem-se primeiro que postular um modelo:

$$y(i,j,k,\dots) = M + T(i) + B(j) + \dots + TB(i,j) + \dots + e(i,j,k,\dots)$$

onde:

$y(i,j,k,\dots)$ = resposta.

M = média.

$T(i)$ = efeito do i ésimo nível de A.

$B(j)$ = efeito do j ésimo nível de B.

$TB(i,j)$ = efeito da interação entre $T(i)$ e $B(j)$.

$e(i,j,k,\dots)$ = erro residual em n repetições.

A análise de variância testa as seguintes hipóteses [59] :

H_0 ($T(i) = 0$; $B(j) = 0$; ... ; $TB(i,j) = 0$; ...

H_1 ($T(i) \neq 0$; $B(j) \neq 0$; ... ; $TB(i,j) \neq 0$; ...

A análise de variância para o delineamento 2⁴ é mostrada na tabela 2.3.

A soma dos quadrados dos tratamentos e interações é obtida através do algoritmo de Yates [60,61,67,68]. Esse algoritmo está mostrado na figura 2.1 .

valores observados	coluna 1	coluna 2	...	coluna k
1	1+2=a	a+b=I		I+II
2	3+4=b	c+d=II		III+IV
3	5+6=c	e+f=III		V+VI
4	7+8=d	g+h=IV		VII+VIII
5	2-1=e	b-a=V		II-I
6	4-3=f	d-c=VI		IV-III
7	6-5=g	f-e=VII		VI-V
8	8-7=h	h-g=VIII		VIII-VII

Fig. 2.1 - Algoritmo de Yates [60,61,67,68].

Tabela 2.3 - Análise de variância para o delineamento 2 .

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo
tratamento A	SQa	1	QMa	Foa
tratamento B	SQb	1	QMb	Fob
interação AB	SQab	1	QMab	Foab
tratamento C	SQc	1	QMc	Foc
interação AC	SQac	1	QMac	Foac
interação BC	SQbc	1	QMbc	Fobc
interação ABC	SQabc	1	QMabc	Foabc
tratamento D	SQd	1	QMd	Fod
interação AD	SQad	1	QMad	Foad
interação BD	SQbd	1	QMbd	Fobd
interação ABD	SQabd	1	QMabd	Foabd
interação CD	SQcd	1	QMcd	Focd
interação ACD	SQacd	1	QMacd	Foacd
interação BCD	SQbcd	1	QMbcd	Fobcd
interação ABCD	SQabcd	1	QMabcd	Foabcd
erro	SQE	2k(n-1)	QME	
total	SQT	(n2k)-1		

A soma dos quadrados para cada tratamento ou interação é calculada elevando-se ao quadrado a késima coluna do algoritmo de Yates e dividindo-se o valor obtido por $n2^k$.

O cálculo de SQT e SQE é feito da seguinte maneira :

$$SQT = \sum (\text{cada valor observado})^2 - \frac{[\sum (\text{valores observados})]^2}{n2^k}$$

$$SQE = SQT - \sum (SQ\text{tratamentos e interações})$$

O quadrado médio é obtido pela divisão de cada valor da linha da coluna da soma dos quadrados médios pelo valor correspondente da linha da coluna do grau de liberdade. Caso alguma repetição seja perdida coloca-se a média das outras observações da mesma experiência no seu lugar e diminui-se o grau de liberdade do erro para cada valor que for substituído pela mē-

dia [68,69].

O valor de F_0 é conseguido através da divisão da coluna do quadrado médio pelo quadrado médio. Esse valor é então comparado com o $F(a, n_1, n_2)$ de Snedcor para o teste de significância a um nível "a%". Se $F_0 > F(a, n_1, n_2)$ a hipótese H_0 é rejeitada. Após o teste de significância pode-se avaliar o efeito de cada tratamento ou interação dividindo-se cada valor da coluna da soma dos quadrados por $n_2^{(k-1)}$. O valor obtido para o efeito do tratamento com todas as variáveis no nível baixo representado por (1) é a média de todos os resultados obtidos.

2.2) Escolha das variáveis a serem estudadas.

2.2.1) Tipo do revestimento do eletrodo.

Os componentes do revestimento do eletrodo tem as seguintes funções :

- a) ser mau condutor de eletricidade.
- b) facilitar a soldagem em diversas posições.
- c) estabilizar o arco elétrico.
- d) formar uma atmosfera protetora no arco.
- e) formar uma escória de densidade baixa, fluidez alta e ponto de fusão ligeiramente inferior ao do metal base.
- f) a escória produzida diminui a velocidade de resfriamento e protege o cordão contra a oxidação.
- g) promover reações de refino e desoxidação da poça de fusão.
- h) adicionar elementos de liga na poça de fusão.

Cada substância colocada no revestimento tem a sua função. A tabela 2.4 mostra as funções de algumas substâncias que geralmen-

te são colocadas no revestimento.

Tabela 2.4 - Função dos componentes do revestimento [70-72].

componentes	função										
	aglomerante	resistência mecânica do revestimento	extrusão	estabilização do arco	formação de escória	formação de gases	fluidez da escória	desoxidação	adição de elemento de liga	revestimento com baixo hidrogênio	taxa de deposição
celulose	II	II				I					
carbonato de cálcio				I	II	I				I	
fluorita					I		I				
dióxido de titânio				II	I		I			II	
titanato de potássio				I	II						
feldspato				II	I						
mica			I	II							
argila	II	II	I	II	I		II			II	
dolomita							I	II			
silica					I		II				
óxido de ferro				II	I		I				
óxido de manganês					I				II		
pb de ferro				II							I
ferro-silício								I			
ferro-manganês								II	I		
silicato de sódio	I			II							
silicato de potássio	II			I	I					II	

NOTA: I = função primária, II = função secundária.

A composição química do revestimento é um segredo industrial e varia de fabricante para fabricante. Foi feita uma análise qua-

litativa através de difração de raio-X dos revestimentos utilizados. Constatou-se a presença de fluorita somente no revestimento do eletrodo E7018. A tabela 2.5 mostra possíveis faixas de composição de revestimentos de eletrodos.

Tabela 2.5 - Faixa de composição percentual dos revestimentos dos eletrodos [72].

	Classificação AWS do eletrodo		
	E6011	E6013	E7018
Celulose	25-40	2-12	--
Carbonato de cálcio	--	0-5	15-30
Fluorita	--	--	15-30
Dióxido de titânio	--	--	0-5
Titanato de potássio	10-20	30-55	0-5
Feldspato	--	0-20	0-5
Mica	--	0-15	--
Argila	--	0-10	--
Pó de ferro	--	--	25-40
Ferro-silício	--	--	5-10
Ferro-manganês	5-10	5-10	2-6
Silicato de sódio	--	--	0-5
Silicato de potássio	20-30	5-15	5-10

Apesar da tabela 2.5 servir apenas de guia, os eletrodos escolhidos são todos com revestimentos ricos em potássio. Embora o eletrodo E6010 seja mais conhecido e utilizado ele não foi incluído neste estudo porque o seu revestimento é rico em sódio.

A norma AWS A-5.1 [73] não classifica os eletrodos de acordo com a espessura do revestimento. Foi utilizada a norma DIN 1913 - Parte 1 [74] para classificar as espessuras dos revestimentos, visto que estas podem ser importantes para a análise da transferência metálica [44].

Segundo a norma, os revestimentos podem ser classificados em fino, médio ou grosso de acordo com a seguinte relação:

$$D = (D_{er}/D_{ea}).100 \dots\dots\dots(2.1)$$

onde:

D_{er} = diâmetro externo do revestimento.

D_{ea} = diâmetro externo nominal da alma.

Se:

$D < 120\%$ = revestimento fino.

$155\% > D > 120\%$ = revestimento médio.

$D > 155\%$ = revestimento grosso.

A tabela 2.6 mostra os diâmetros externos dos revestimentos usados nas experiências. Foram feitas medidas dividindo-se o eletrodo em três partes iguais ao longo do seu comprimento e efetuando-se duas medidas defasadas de 90° uma da outra em cada parte. Mediu-se cinco eletrodos de cada tipo e de cada bitola.

Tabela 2.6 - Medidas dos diâmetros dos revestimentos dos eletrodos.

Classificação AWS do eletrodo	Diâmetro da alma (mm)	Diâmetro médio do revestimento (mm)
E6011	4,0	(5,49 ± 0,02)
	5,0	(6,84 ± 0,04)
E6013	4,0	(5,79 ± 0,03)
	5,0	(7,22 ± 0,03)
E7018	4,0	(6,47 ± 0,06)
	5,0	(8,14 ± 0,05)

A classificação da espessura dos revestimentos dos eletrodos é mostrada na tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Classificação da espessura dos revestimentos segundo a norma DIN 1913 - Parte 1 [74].

Classificação AWS do eletrodo	Diâmetro da alma (mm)	D (%)	Classificação do revestimento
E6011	4,0	137,6	médio
	5,0	137,3	médio
E6013	4,0	144,8	médio
	5,0	144,7	médio
E7018	4,0	162,2	grosso
	5,0	162,8	grosso

2.2.2) Diâmetro do eletrodo.

Os diâmetros escolhidos dos eletrodos foram 4,0 e 5,0 mm. Os eletrodos utilizados nos experimentos foram inspecionados dimensionalmente de acordo com a norma AWS A-5.1 [73]. Foram feitas duas medidas do diâmetro da alma defasadas de 90° uma da

Tabela 2.8 - Medidas dos diâmetros das almas dos eletrodos.

Classificação AWS do eletrodo	Diâmetro especificado (mm)	Diâmetro médio da alma (mm)
E6011	4,00	(3,99±0,02)
	5,00	(4,98±0,03)
E6013	4,00	(4,00±0,02)
	5,00	(4,99±0,02)
E7018	4,00	(3,99±0,02)
	5,00	(5,00±0,03)

outra em cinco eletrodos de cada diâmetro e cada tipo de revestimento. Os resultados obtidos estão na tabela 2.8.

O critério de aceitação da norma AWS A-5.1 [73] admite uma variação máxima de $\pm 0,05$ mm no diâmetro. Baseado nesse critério todos os eletrodos estão enquadrados dimensionalmente dentro da norma.

A norma AWS A-5.1 [73] recomenda que o aço da alma seja efervescente ou semi-acalmado. A composição química típica da alma segundo a norma é dada por:

C	$\pm 0,10\%$
Mn	$\pm 0,45\%$
S	$\pm 0,03\%$
P	$\pm 0,02\%$
Si	$\pm 0,01\%$

A análise química das almas dos eletrodos utilizados nas experiências é mostrado na tabela 2.9. O carbono, enxofre e oxigênio foram analisados em um equipamento tipo Lecco. O manganês, o silício e o fósforo foram analisados por via úmida.

Tabela 2.9 - Análise química da alma dos eletrodos.

Elemento químico	Classificação AWS do eletrodo		
	E6011	E6013	E7018
C	0,069%	0,076%	0,076%
Mn	0,51%	0,50%	0,42%
S	0,0037%	0,0078%	0,020%
P	< 0,01%	< 0,01%	< 0,01%
Si	0,015%	0,012%	0,010%
O	302ppm	311ppm	259ppm

2.2.3) Corrente de soldagem.

A corrente de soldagem esta relacionada com o diâmetro do eletrodo. A tabela 2.10 mostra a corrente de soldagem em função do diâmetro do eletrodo e da sua classificação.

Tabela 2.10 - Faixa de corrente de soldagem recomendada.

Classificação AWS do eletro- do	Diâmetro (mm)	Faixa de corrente (A)	
		AWS A-5.1 [73]	Fabricante
E6011	4,0	110 - 190	110 - 190
	5,0	140 - 240	120 - 240
E6013	4,0	105 - 180	100 - 200
	5,0	150 - 230	150 - 290
E7018	4,0	150 - 220	130 - 205
	5,0	200 - 275	160 - 265

Baseando-se na tabela 2.10 foram escolhidas as correntes de soldagem de 150 e 200 A. Dentro desta faixa somente os eletrodos E6011 diâmetro de 4,0 mm e E7018 diâmetro de 5,0 mm estão ligeiramente fora da faixa de utilização de acordo com o fabricante.

2.2.4) Tensão do arco.

A tabela 2.11 mostra as faixas de tensão do arco recomendadas pelo fabricante para os tipos de eletrodos.

A tensão média do arco escolhida foi de 25 V. Esse valor varia durante a soldagem devido o fenômeno da transferência metálica, mas sem introduzir efeitos consideráveis na estabilidade do arco.

Tabela 2.11 - Tensão do arco recomendada pelo fabricante.

Classif. AWS do eletrodo	Tensão do arco recomendada (V)
E6011	25 - 30
E6013	18 - 26
E7018	20 - 24

2.2.5) Posição de soldagem.

As experiências foram realizadas em duas posições de soldagem. Essas posições são definidas neste trabalho como o ângulo formado entre o plano horizontal e o eixo do eletrodo. Assim se o ângulo for de 90° equivale a posição plana (P). Se for de 0° equivale ou a posição vertical ou horizontal (NP). A tabela 2.12 mostra as posições recomendadas para soldagem.

Tabela 2.12 - Posições de soldagem que produzem soldas satisfatórias segundo AWS A-5.1 [73].

Classific. AWS do eletrodo	Posição recomendada (a)(b)
E6011	P, V, H, SC
E6013	P, V, H, SC
E7018	P, V, H, SC

notas: (a) as abreviaturas indicam as seguintes posições:

P = plana.

V = vertical.

H = horizontal.

SC = sobre-cabeça.

(b) V e SC para eletrodos E6011 e E6013 somente no caso de diâmetros menores que 5,0 mm. No caso do eletrodo E7018 somente para diâmetros menores que 4,0 mm.

2.2.6) Polaridade.

As experiências foram realizadas com corrente contínua em ambas polaridades, mesmo quando a polaridade não era recomendada. A tabela 2.13 mostra as polaridades recomendadas tanto pelo fabricante como pela norma AWS A-5.1 [73].

Tabela 2.13 - Tipo de polaridade recomendada.

Classific. AWS do eletrodo	Polaridade recomendada(a)
E6011	CCPR ou CA
E6013	CCPR, CCPD e CA
E7018	CCPR ou CA

nota: (a) CCPR = corrente contínua, polaridade reversa (+).

CCPD = corrente contínua, polaridade direta (-).

CA = corrente alternada.

Apesar de ser recomendada a corrente alternada, não foram conduzidas experiências para este tipo de corrente.

2.2.7) Resumo do valor das variáveis escolhidas.

A tabela 2.14 apresenta os valores das variáveis escolhidas para o presente estudo. Estes valores estão de acordo com a técnica experimental para tratamento e análise dos resultados utilizada, isto é, o delineamento fatorial.

Tabela 2.14 - Variáveis escolhidas e faixas estudadas.

Variável	Faixa de estudo	
	nível baixo	nível alto
Diâmetro do eletrodo (A)	4,0 mm	5,0 mm
Corrente de soldagem (B)	150 A	200 A
Posição de soldagem (C)	plana (P)	não plana (NP)
Polaridade (D)	CCPR(+)	CCPD(-)

A tabela 2.2 modificada com as variáveis escolhidas da tabela 2.14 é mostrada na tabela 2.15.

4

Tabela 2.15 - Matriz do delineamento fatorial 2⁴ utilizado nos experimentos com os valores das variáveis escolhidas.

Código da experiência	Diâmetro do eletrodo (A) (mm)	Corrente de soldagem (B) (A)	Posição de soldagem (C)	Polaridade (D)
1	4,0	150	(P)	(+)
A	5,0	150	(P)	(+)
B	4,0	200	(P)	(+)
AB	5,0	200	(P)	(+)
C	4,0	150	(NP)	(+)
AC	5,0	150	(NP)	(+)
BC	4,0	200	(NP)	(+)
ABC	5,0	200	(NP)	(+)
D	4,0	150	(P)	(-)
AD	5,0	150	(P)	(-)
BD	4,0	200	(P)	(-)
AED	5,0	200	(P)	(-)
CD	4,0	150	(NP)	(-)
ACD	5,0	150	(NP)	(-)
BCD	4,0	200	(NP)	(-)
ABCD	5,0	200	(NP)	(-)

2.3) Técnica experimental.

2.3.1) Revisão das técnicas de estudo da transferência metálica com eletrodo revestido.

As técnicas utilizadas no estudo da transferência metálica podem ser diretas ou indiretas. No primeiro grupo estão a filmagem em alta velocidade, a fotografia, a deposição em chapa metálica, o eletrodo duplo e o eletrodo de carbono. No segundo grupo está basicamente o oscilograma da tensão e corrente de soldagem.

2.3.1.1) Filmagem em alta velocidade.

O primeiro filme foi feito por Hilpert [75] em 1927. Utilizou um filme comum com 800 quadros/s. Não foi possível analisar a transferência devido a luminosidade do arco.

O primeiro resultado realmente positivo foi conseguido por Creedy e outros [21] em 1932. Filmaram um arco de 5 A de corrente a 32 quadros/s.

A dificuldade em separar o que é gota metálica do que é gota de escória no filme foi sanada por Sack [76] em 1936. Ele filmou o arco utilizando RX e com 50 quadros/s.

A primeira quantificação do tamanho da gota por esta técnica foi feita por van der Willigen e colaboradores [77] em 1953. Filmaram o arco com RX a 3000 quadros/s. Mediam o diâmetro da gota em cada quadro e estimavam o tamanho médio da gota para cada experimento realizado.

Klimant [78] em 1967 filmou o arco com filme comum e luz estroboscópica e com filme para RX. Em ambos os casos foi a primeira vez que foi utilizada a técnica de oscilogramas sincro-

nizada com a filmagem. Essa técnica foi repetida por Becken [51] em 1969 e Lancaster [11] em 1971, ambos somente com filme para RX sincronizado com oscilograma.

Erdmann-Jesnitzer e colaborador [40,79] em 1972 filmaram o arco porém com um eletrodo revestido com duas incisões laterais no revestimento. A filmagem era sincronizada com um contador e classificador eletrônico das gotas, chamado analisador de Hannover.

2.3.1.2) Método fotográfico.

Essa técnica foi empregada somente por Larson [38] em 1942. Através de um espaçamento entre duas chapas era feito um cordão na horizontal. As gotas que atravessavam pelo espaçamento tinham suas trajetórias fotografadas e comparadas com trajetórias teóricas. A partir de então o tamanho das gotas era estimado.

2.3.1.3) Oscilograma.

Baseia-se na variação da tensão do arco e da corrente de soldagem durante a formação e o destacamento da gota no arco.

O primeiro oscilograma foi obtido por Hilpert [75] em 1929. A partir de então essa técnica foi utilizada associada a filmagem [11,51,78] e a medida do diâmetro da gota por observação indireta [13,80].

Datta [81] utilizou esta técnica em 1973 para estudo da frequência de curto-circuito.

Bykov e colaboradores [82] em 1960 utilizaram uma técnica um pouco diferente da até então empregada. A medida da tensão e da corrente de soldagem era feita entre a alma do eletrodo revestido

e um fio condutor colocado no revestimento a uma distância fixa da alma .

2.3.1.4) Método da deposição sobre chapa metálica.

Aplicado pela primeira vez em 1932 por Doan e Weed [80]. Consistia de uma chapa de aço polida deslocando-se em alta velocidade em relação ao eletrodo revestido. As gotas depositadas na chapa tinham seu diâmetro medido. Esta técnica foi utilizada sincronizada com oscilogramas.

Sack [83] em 1937 repetiu a técnica da chapa de aço. Em 1939 ele substituiu o aço por cobre por que as gotas de aço não coalescem na chapa de cobre [22]. Foi medido o diâmetro e o peso das gotas e levantado um histograma diâmetro/peso da gota. O centro de massa do histograma indicava a massa e o diâmetro característico da gota da experiência.

Essers e colaboradores [13] em 1971 utilizaram um disco de cobre girando a alta velocidade. Estimaram o diâmetro da gota e construíram um histograma do número de gotas em função do diâmetro. Utilizaram também a técnica do oscilograma sincronizada com a deposição.

Shuyakov e outros [84] em 1979 modificaram a técnica de Essers [13]. Valeram-se de um disco de cobre com formato de uma calota esférica girando na vertical e com o eletrodo revestido alimentado a 45° em relação a horizontal pelo lado de baixo do disco.

2.3.1.5) Método do eletrodo duplo.

Esta técnica foi aplicada por Sunnen [85] em 1962. Utilizou

um arco aberto entre dois eletrodos revestidos isolados e soldando em corrente alternada. As gotas foram resfriadas em água, separou-se as gotas metálicas da escória, calculou-se o diâmetro da gota e fez-se o histograma da porcentagem em peso em função do diâmetro da gota.

2.3.1.6) Método do eletrodo de carbono.

Idealizado por Ishizaki e colaboradores [44] em 1962 este método consiste na abertura do arco entre um eletrodo de carbono e um eletrodo revestido. As gotas eram resfriadas em água, separada a escória, calculados os diâmetros da gotas e levantados os gráficos da porcentagem acumulada em função do diâmetro da gota. O diâmetro característico da gota da experiência era o que correspondia a 50% no gráfico da porcentagem acumulada.

2.3.1.7) Comparação entre as técnicas utilizadas para estudo da transferência metálica.

A comparação entre as diversas técnicas utilizadas no estudo da transferência metálica é mostrada na tabela 2.16 . Conforme se observa todos os métodos utilizáveis tem a sua limitação.

A partir do estudo de todas as técnicas utilizadas é que se chegou a escolha da adaptação mais adequada entre as técnicas aplicadas para o estudo da transferência metálica .

2.3.2) Arranjo experimental utilizado.

O arranjo experimental pode ser dividido em três partes: o controle da alimentação do eletrodo revestido, a geração e a

Tabela 2.16 - Comparação entre as técnicas de estudo da transferência metálica com eletrodo revestido.

Técnica	Vantagem	Desvantagem
-filmagem em alta velocidade	-observação direta do mecanismo de transferência	-dificuldade para quantificar o tamanho da gota -arranjo experimental muito complexo
-fotográfica	-quantificar o tamanho da gota -arranjo experimental simples	-método impreciso de calcular o tamanho das gotas -não consegue a separação entre gota metálica e escória
-oscilograma	-observação da variação da tensão e corrente de soldagem -arranjo experimental simples	-utilizada sozinha não dá muita informação do que ocorreu durante a transferência
-deposição sobre chapa metálica.	-quantificar o tamanho da gota	-não é uma condição real de soldagem por que a chapa nunca funde -gotas podem coalescer ou serem divididas no contacto com a chapa metálica
-eletrodo duplo	-arranjo experimental simples	-não é uma condição real de soldagem por que o que seria o anodo em cada meio ciclo está coberto de escória -não consegue avaliar a influência da polaridade na transferência
-eletrodo de carbono		-não é uma condição real de soldagem porque o carbono não se funde -atmosfera do arco pode ser alterada devido a oxidação do carbono no ar

coleta das gotas.

O mecanismo de alimentação do eletrodo utilizou um fuso com rosca de perfil quadrado acionado por um motor de corrente contínua com controle da rotação. No fuso estava engranzada uma bucha e nesta o dispositivo para fixação do porta-eletrodo. A bucha possuía também dois pinos guia. A figura 2.2 mostra o detalhe do dispositivo.

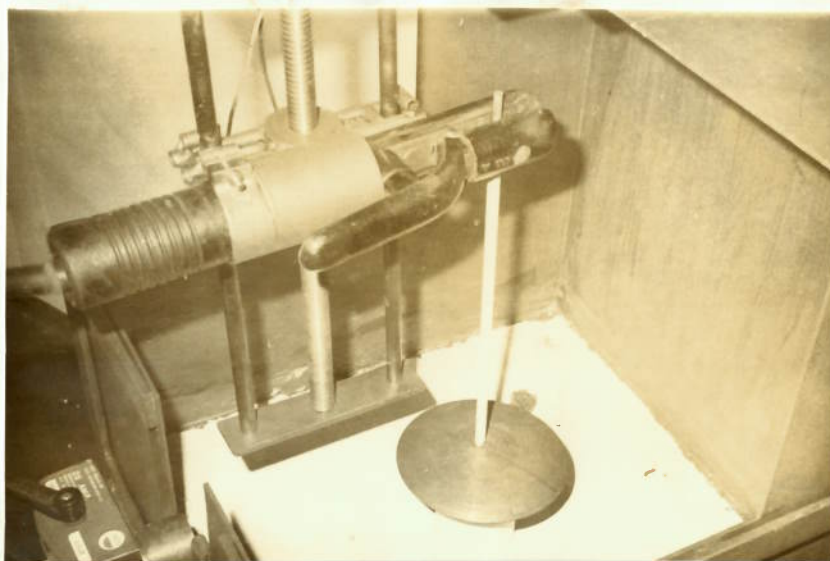


Fig. 2.2 - Detalhe do controle de automação da alimentação do eletrodo revestido.

A geração das gotas foi feita depositando-se o eletrodo em um disco de cobre giratório. Esse disco tinha um diâmetro de 120 mm e espessura central de 15 mm. O acionamento é feito por um eixo isolado movido por polias, correia e motor. O contacto elétrico foi feito através de um anel com três pistas acoplado ao eixo e escovas de cobre grafitado que fechavam o circuito com a fonte de energia. A figura 2.3 mostra o detalhe desta parte.

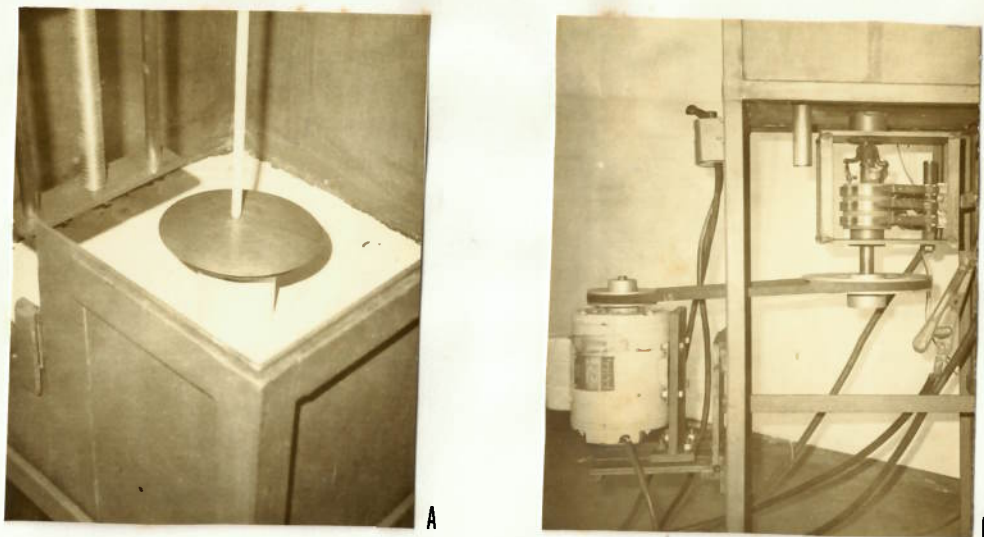


Fig. 2.3 - Detalhe do mecanismo da parte de geração das gotas. Em (a) detalhe do disco de cobre e em (b) detalhe do acionamento.

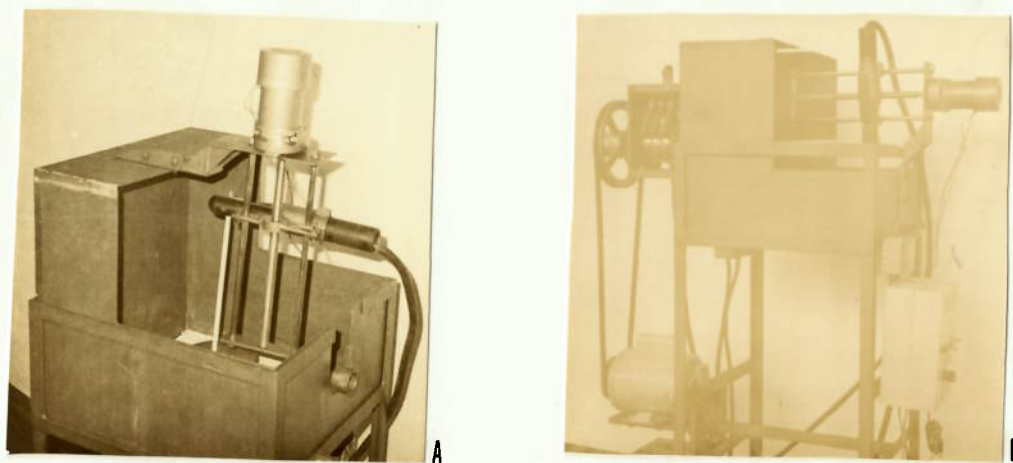


Fig. 2.4 - Detalhe do recipiente de coleta das gotas. Em (a) vê-se o recipiente para soldagem na posição plana e em (b) para a o não plana.

A coleta das gotas foi feita em um recipiente de alumínio de 400 x 400 mm com formato adequado para possibilitar a soldagem nas duas posições estudadas. Esse recipiente era cheio de água para resfriar as gotas. A figura 2.4 mostra o detalhe dessa caixa.

2.3.3) Técnica experimental utilizada.

2.3.3.1) Determinação da velocidade de rotação do disco terra.

Foram feitas medidas das rotações do motor e do disco terra com uma luz estroboscópica para duas combinações de polias.

Em seguida utilizando-se os eletrodos E6011 e E7018 fez-se duas deposições com cada eletrodo para cada combinação de polias. A deposição foi feita com eletrodo de diâmetro de 4 mm, 150 A, polaridade reversa e posição plana. Estimou-se então o diâmetro médio da gota. A tabela 2.17 mostra o resultado obtido.

Tabela 2.17 - Influência da velocidade de rotação do disco terra no diâmetro característico da gota.

Diâmetro da polia motriz (mm)	Diâmetro da polia movida (mm)	Rotação do motor (rpm)	Rotação do disco terra (rpm)	Diâmetro característico da gota (mm)
2"1/2 (63,5)	8" (203,2)	1800 ± 5	555±2,5	E6011 2,20
				E7018 3,42
4" (101,6)	8" (203,2)	1800 ± 5	890±2,5	E6011 2,13
				E7018 3,45

Os diâmetros característicos da gotas são praticamente iguais para as duas rotações do disco terra. Escolheu-se então

890 rpm devido a maior facilidade para abertura do arco e não coalescimento das gotas.

2.3.3.2) Determinação da velocidade de alimentação do eletrodo revestido.

As velocidades de alimentação dos eletrodos foram escolhidas de tal maneira que se tivesse uma tensão média de 25 V para as condições de soldagem de cada experiência. A tabela 2.18 mostra os valores obtidos.

Tabela 2.18 - Velocidade de alimentação do eletrodo revestido em função dos parâmetros a serem estudados (mm/s).

	diâmetro do eletrodo (mm)															
	4,0								5,0							
	corrente de soldagem (A)															
	150				200				150				200			
	(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)	
polaridade																
Eletrodo	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
E6011	5,17	6,10	4,37	5,63	6,59	7,09	5,63	7,09	2,42	3,13	2,76	3,13	5,17	6,10	4,31	5,63
E6013	4,31	4,37	3,51	3,90	4,10	6,59	4,37	5,63	3,13	3,90	2,76	3,13	4,37	5,63	3,90	4,31
E7018	3,13	2,76	3,51	3,13	5,17	4,31	4,37	5,17	2,09	1,77	2,09	2,42	3,51	3,13	3,13	3,51
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(AECD)

A correlação entre o valor de escala do regulador de rotação do fuso e o valor mostrado na tabela 2.18 foi obtida efetuando-se quatro medidas de tempo. Duas dessas medidas foram feitas com o dispositivo na posição plana e duas na posição não plana.

sendo todas em um comprimento de 150 mm. Esses valores estão mostrados na tabela 2.19.

Tabela 2.19 - Correlação entre a escala do regulador de rotação e a velocidade de alimentação do eletrodo.

% regulada	velocidade média (mm/s)
20	1,22 ± 0,04
30	1,73 ± 0,02
40	2,43 ± 0,05
50	3,08 ± 0,06
60	3,88 ± 0,10
70	4,77 ± 0,19
80	5,72 ± 0,11
90	6,52 ± 0,01

Foi feita uma regressão para correlacionar o valor da escala do regulador de rotação e a velocidade de alimentação do eletrodo. Obteve-se a seguinte equação :

$$v = 0,1998 + 4,2965 \cdot 10^{-2} \cdot (\%) + 3,1150 \cdot 10^{-4} \cdot (\%)^2 \dots\dots\dots (2.2)$$

com uma correlação $r = 0,9964$

onde:

v = velocidade de alimentação do eletrodo (mm/s).

$\%$ = porcentagem do regulador de rotação.

Através da equação (2.2) construiu-se a tabela 2.18.

2.3.3.4) Procedimento para deposição do eletrodo.

Os eletrodos revestidos tem procedimentos normalizados para secagem e armazenamento. Os valores recomendados dos eletrodos para aços carbono são mostrados na tabela 2.20.

Tabela 2.20 - Condições de secagem e armazenamento recomendadas.

Classificação AWS do eletrodo	Secagem	Armazenamento
E6011	não requerido	temperatura ambiente
E6013	$(135 \pm 15)^\circ \text{C} / 1\text{h}$	temperatura ambiente + 10 a 40°C
E7018	$(245 \pm 15)^\circ \text{C} / 2\text{h}$	temperatura ambiente + 30 a 140°C

As condições utilizadas no presente estudo estão mostradas na tabela 2.21.

Para verificar se os procedimentos utilizados de secagem e armazenamento não estavam discrepantes em relação a norma fez-se a determinação do teor de umidade dos revestimentos.

De acordo com a norma AWS A-5.1 [73] o valor da umidade de um revestimento celulósico está entre 3,0 e 7,0% em peso e para um revestimento básico o teor máximo é de 0,6% em peso. A norma não cita o teor de umidade para os revestimentos rutilicos porém, de acordo com o fabricante, a umidade do revestimento varia entre 1,5 e 4,5% em peso. A tabela 2.22 mostra o teor analisado de umidade nos revestimentos.

A umidade do revestimento os eletrodos E6011 e E6013 foi

determinada por uma balança de determinação de umidade por radiação infra-vermelha. Essa técnica não determina a porcentagem de

Tabela 2.21 - Condições de secagem e armazenamento utilizadas.

Classificação AWS do eletrodo	Secagem	Armazenamento
E6011	não realizada	temperatura ambiente, dentro de embalagem selada com fita adesiva
E6013		
E7018	$(245 \pm 5)^\circ \text{C} / 2\text{h}$	estufa com aquecimento elétrico na temperatura de $(120 \pm 10)^\circ \text{C}$

Tabela 2.22 - Teor de umidade especificado e analisado nos revestimentos.

Classificação AWS do eletrodo	Porcentagem em peso da umidade do revestimento		
	especificado	determinado	
		diâmetro (mm)	(%)
E6011	3,0 a 7,0%	4,0	5,7
		5,0	4,4
E6013	1,0 a 4,5%	4,0	2,9
		5,0	2,3
E7018	máx. 0,6%	4,0	0,43
		5,0	0,49

água de cristalização de alguns componentes do revestimento.

O método de análise consistia de uma amostra de aproximadamente 5g do revestimento. Essa amostra era colocada no prato da balança e, em seguida, zerava-se o equipamento. Ligava-se uma lâmpada infra-vermelha até atingir a temperatura de 100 - 120 °C. Após 5 min de aquecimento obtinha-se a perda de massa e calculava-se a porcentagem em peso da umidade.

A umidade do revestimento do eletrodo E7018 foi determinada de acordo com o procedimento descrito na norma AWS A-5.1 [73]. Resumidamente, segundo esse procedimento, uma amostra média de 4g do revestimento de três eletrodos é colocada em uma navete de cerâmica ou níquel previamente tarada. Esta navete é então colocada em um tubo aquecido a aproximadamente 1093 °C, pelo qual passa uma determinada vazão de oxigênio. O vapor de água que é liberado durante 30 min nessa temperatura é coletado em um tubo em U. Esse tubo é previamente cheio com perclorato de magnésio anidro e tarado. Decorrido o tempo de teste, o tubo é resfriado e pesado novamente. Por diferença de massa calculou-se o teor de umidade no revestimento.

Os eletrodos foram mantidos com um comprimento de 300mm. Utilizou-se um retificador monofásico com 55 a 63 V de tensão em vazio e corrente máxima de 175 A a 60% do ciclo de trabalho.

A temperatura do disco terra foi controlada de tal maneira que nenhuma experiência fosse realizada ou com o disco terra frio ou muito aquecido. O controle de temperatura foi feito com um termômetro digital de contacto. O valor médio da temperatura do disco terra foi de $(37 \pm 5,3)$ °C.

Observados estes requisitos depositava-se 200 mm do compri-

mento do eletrodo. Para isso fazia-se uma marca com serra manual no revestimento e parava-se a experiência quando chegasse nesta marcação.

A corrente de soldagem e a tensão do arco eram controladas por um voltímetro e um amperímetro ligados em série com o circuito. O voltímetro tinha um fundo de escala de 100 V com divisões de 2 em 2 V. O amperímetro tinha um fundo de escala de 500 A com divisões de 10 em 10 A.

Após a deposição, a ponta do eletrodo era preenchida com um adesivo apropriado para futura análise.

2.3.3.4) Procedimento para análise granulométrica.

O material depositado de cada eletrodo era colhido manualmente do recipiente com água através de um imã. O material colhido era composto de gotas metálicas, gotas metálicas revestidas com escória e pedaços de escória conforme mostra a figura 2.5.

Esse material era seco e peneirado manualmente com as peneiras ASTM nº 7, 10, 18, 35 e 70. Com isso conseguia-se separar as gotas dos pedaços grandes de escória.

Colocou-se as gotas retidas em cada uma das peneiras em um almofariz cerâmico. Essas gotas foram socadas levemente com um pistilo cerâmico para separar a escória aderida na gota. Com este procedimento as gotas metálicas eram separadas da escória conforme mostra a figura 2.6.

A massa das gotas obtidas em cada repetição de cada experiência após a separação da escória variava de 12 a 25 g. As gotas eram colocadas em um recipiente e em seguida separadas

através de um separador de pó baseado na norma ASTM B-215 [86].

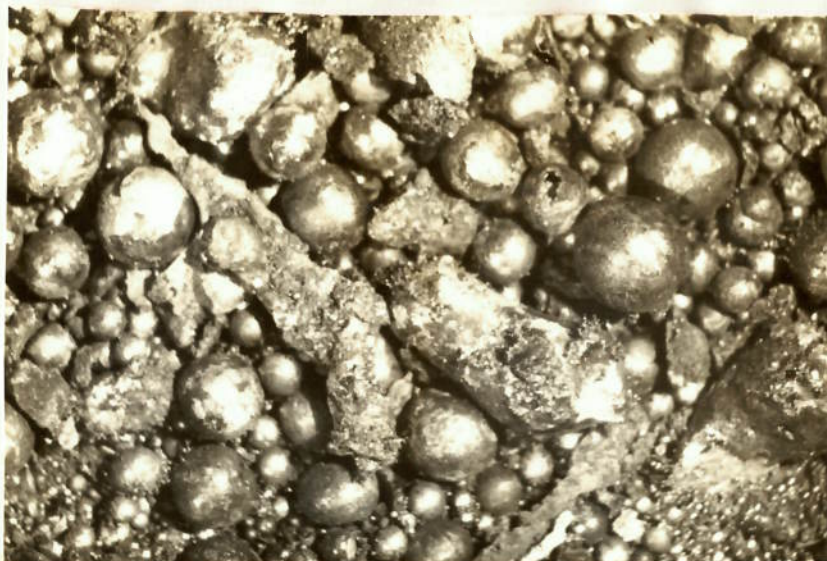


Fig. 2.5 - Fotografia mostrando o material depositado antes da separação da escória das gotas metálicas.



Fig. 2.6 - Fotografia das gotas limpas preparadas para o ensaio granulométrico.

Essa separação era feita até atingir uma massa para ensaio granulométrico ao redor de 3g para os eletrodos E6011 e E6013 e ao redor de 4 g para o eletrodo E7018. A diferença de massa é devido a diferença marcante entre os tipos de eletrodos. Além disso essas massas tinham um número de gotas bastante superior ao utilizado por Ishizaki [44] que era ao redor de 100 a 150 gotas. A figura 2.7 mostra o separador utilizado.

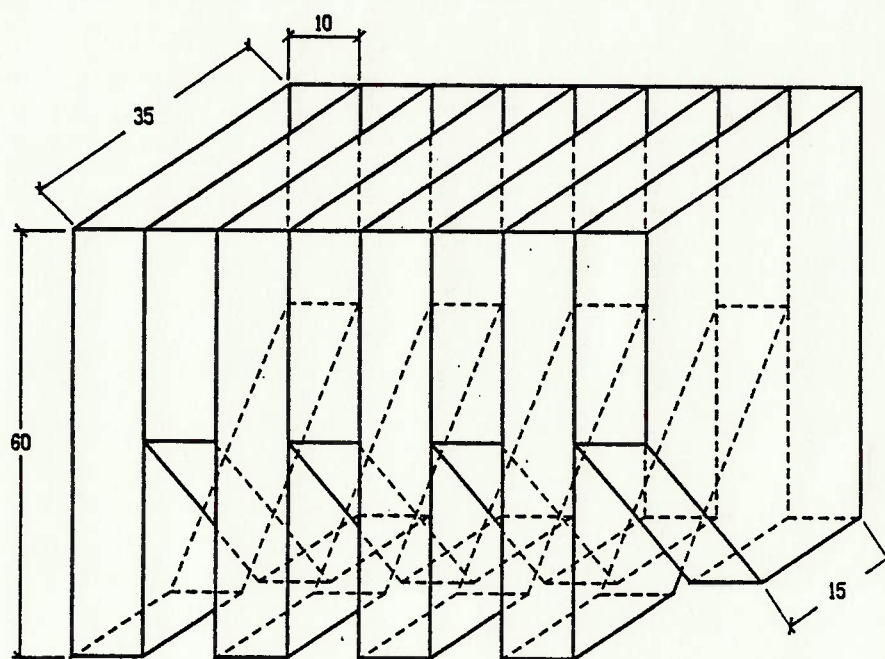


Fig. 2.7 - Separador de gotas baseado na norma ASTM B-215 [86].

Em cada amostra de cada experiência fez-se o ensaio granulométrico durante 15 min com as peneiras ASTM nº 5, 7, 10, 14, 18, 20 e 35. Contava-se o número de gotas de cada fração retida nas peneira. As gotas de cada fração retida eram colocadas em um envólucro previamente tarado. Esse envólucro era pesado novamente e, por diferença de massa, obtinha-se a massa das gotas retidas em cada peneira.

2.3.3.5) Procedimento para determinação do diâmetro característico da gota.

O cálculo do diâmetro característico da gota é feito supondo-se que a mesma tenha geometria esférica. A partir dessa hipótese e da definição de densidade determina-se o diâmetro da gota para cada uma das peneiras através da relação :

$$d = \sqrt[3]{6 \times m / (\pi \times D \times n)} \dots \dots \dots (2.3)$$

onde :

d = densidade aparente média da gota.

m = massa das gotas retidas em cada peneira.

m/n = massa média das gotas .

n = número de gotas retidas na peneira

D = diâmetro da gota.

O cálculo do diâmetro é feito através da seguinte equação :

$$D = \left[6 \times m / (\pi \times n \times d) \right]^{1/3} \dots \dots \dots (2.4)$$

O cálculo do diâmetro das gotas foi executado para todas as peneiras menos para a panela, devido a dificuldade em contar o número de gotas. Neste caso como as gotas eram passantes na peneira ASTM 35 e retidas na peneira ASTM 70, estimou-se o diâmetro médio das gotas como sendo o valor médio entre as duas malhas. O valor obtido foi 0,35 mm . A partir desse dado e da diferença de massa calculou-se o número de gotas para essa granulometria.

Na definição de densidade da equação (2.3) foi colocada a densidade aparente da gota para cada fração retida até a peneira

ASTM nº 18 e não a do aço visto que as gotas maiores possuem poros internos. Foram feitas experiências para saber até qual granulometria essa porosidade era significativa. Observou-se que somente até a peneira ASTM nº 18 a porosidade tinha alguma influência no diâmetro da gota. O valor da porosidade para esta peneira estava ao redor de 5% e para esse valor a alteração no diâmetro da gota era praticamente insignificante. A partir de então utilizou-se a densidade do aço $7,86 \text{ g/cm}^3$.

O cálculo da porosidade foi feito através da diferença de densidade entre a gota supostamente maciça e a densidade aparente da gota com a bolha de gás no seu interior.

A densidade aparente foi baseada em um método proposto na ASTM C-357 [87]. Por esse método tem-se para uma dada massa uma dada variação de volume de um líquido. Utilizou-se uma bureta de 10ml graduada de 0,05 em 0,05 ml. Através de uma massa conhecida e de um volume inicial de água determinou-se o volume final. A partir desses dados, calculou-se os valores da densidade aparente. Para evitar o aprisionamento de bolhas de ar na superfície externa das gotas adicionou-se uma pequena quantidade de um detergente tenso-ativo na água.

Os valores obtidos da densidade e porosidade aparentes médias estão mostrados nas tabelas 2.23, 2.24 e 2.25.

Utilizou-se para cada tipo de revestimento de eletrodo o valor médio das densidades aparentes de cada peneira.

Tendo a densidade aparente das gotas para cada peneira calculou-se o diâmetro das gotas utilizando-se a equação (2.4). Como a geometria das gotas é suposta esférica calculou-se o seu volume em cada peneira. Para calcular o diâmetro característico

da gota para uma dada experiência empregou-se a relação [77,78] :

$$V_c = \frac{\sum Ni \cdot Vi^2}{(\sum Ni \cdot Vi)} \dots \dots \dots (2.5)$$

onde:

V_c = volume característico da gota para cada experiência.

N_i = número de gotas em cada peneira.

V_i = volume da gota em cada peneira.

Os resultados da porcentagem da porosidade aparente obtidos estão próximos dos valores reportados por Ishizaki e colaboradores [44]. Obtiveram para um eletrodo com revestimento ácido soldado em corrente alternada um valor de aproximadamente 50% de porosidade aparente para um diâmetro de gota de 3,0 mm e 10% de porosidade para um diâmetro de 1,0 mm.

3
Tabela 2.23 - Densidade (g/cm³) e porosidade (%) aparentes médias das gotas metálicas para o eletrodo AWS E6011.

pen. ASTM	diâmetro do eletrodo (mm)																densidade aparente média	porosidade de apar. média
	4,0								5,0									
	corrente de soldagem (A)																	
	150				200				150				200					
	posição de soldagem																	
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)				
polaridade																		
(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	
5	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
7	4,97	5,04	6,12	---	5,75	---	6,94	4,45	5,73	5,42	5,75	5,32	4,89	6,10	4,01	6,73	5,73±0,76	27,10
10	5,24	6,52	6,69	6,68	7,42	7,42	6,89	7,01	6,46	6,05	6,67	6,63	6,55	6,56	5,73	7,45	6,75±0,40	14,12
14	7,30	7,15	7,38	7,29	7,32	7,44	7,05	7,50	7,25	7,28	7,24	7,38	7,49	7,39	7,24	7,39	7,32±0,13	6,97
18	7,65	7,21	7,98	7,57	7,41	7,89	7,33	7,79	7,27	7,30	7,51	7,02	7,36	7,17	7,19	7,34	7,45±0,28	5,22
Cod. exp.	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(AEC)	(AECD)		

3

Tabela 2.24 - Densidade (g/cm³) e porosidade (%) aparentes médias das gotas metálicas para o eletrodo AWS E6013.

		diâmetro do eletrodo (mm)																densidade aparente média	porosidade de apar. média
		4,0								5,0									
		corrente de soldagem (A)																	
		150				200				150				200					
		posição de soldagem																	
		(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)		
		polaridade																	
pen. ASTM		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)		
5		2,65	3,08	2,95	---	2,83	2,38	---	---	3,30	3,15	3,03	---	3,16	3,11	3,14	---		
7		4,25	4,54	4,70	4,35	3,94	3,93	3,84	3,78	4,72	5,21	4,24	4,85	4,16	4,22	4,16	4,39		
10		6,00	6,03	5,85	6,59	5,82	5,97	6,36	6,72	6,14	6,05	5,94	6,24	5,43	5,91	5,67	5,88		
14		6,97	7,18	7,45	7,47	7,16	7,98	7,24	7,59	7,57	7,14	6,81	7,30	7,30	6,99	7,21	7,01		
18		7,85	7,41	7,83	7,60	7,36	7,20	7,18	7,67	7,62	7,17	7,62	7,50	7,32	7,25	7,59	7,34		
Cod. exp.		(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)		

3

Tabela 2.25 - Densidade (g/cm³) e porosidade (%) aparentes médias das gotas metálicas para o eletrodo AWS E7018.

		diâmetro do eletrodo (mm)																densidade aparente média	porosidade de apar. média (%)
		4,0								5,0									
		corrente de soldagem (A)																	
		150				200				150				200					
		posição de soldagem																	
		(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)	(P)	(NP)		
		polaridade																	
pen. ASTM		(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)		
5		---	3,72	4,08	4,04	3,25	3,69	3,64	3,88	4,11	4,16	4,09	3,41	3,67	3,87	3,78	3,67		
7		3,92	5,03	4,86	4,99	4,37	4,54	4,62	4,93	5,14	5,07	5,11	4,99	4,95	4,93	4,67	4,98		
10		6,17	6,60	6,70	6,59	5,70	6,26	6,47	6,45	6,79	6,85	6,70	6,32	6,61	6,36	6,72	6,47		
14		7,27	7,63	7,27	7,17	7,32	7,02	7,23	7,15	7,49	7,28	7,31	7,37	7,19	7,48	7,20	7,25		
18		7,58	7,11	7,41	7,74	7,04	7,53	7,30	7,49	7,65	7,49	7,27	7,49	7,72	7,65	7,56	7,60		
Cod. exp.		(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)		

A equação (2.5) diminui a influência da quantidade de gotas menores no volume de gota característico da experiência. Com isso consegue-se estudar basicamente os tamanhos de gota que realmente fazem parte da transferência metálica eliminando-se a influência dos respingos .

Determinado o volume característico da gota para cada fração retida calculou-se o volume característico de gota para cada experiência. A partir do volume característico de gota determinou-se o diâmetro característico da gota partindo da hipótese de que as gotas tem geometria esférica.

2.3.3.6) Procedimento para determinação da quantidade respingos.

Durante a execução das experiências observou-se que os tamanhos de gota mais característicos do respingo eram os das duas últimas peneiras. Resolveu-se fazer um estudo da quantidade de respingo, adotando-se a soma do número de gotas das duas últimas peneiras como sendo a quantidade de respingos.

2.3.3.7) Procedimento para medida da profundidade da cratera na ponta do eletrodo .

Conforme foi dito anteriormente, ao final de cada experiência a ponta do eletrodo era preenchida com um adesivo. A função desse adesivo era evitar a desintegração do revestimento da ponta do eletrodo.

As pontas dos eletrodos foram embutidas em resina e, em seguida, cortadas com um cortador metalográfico com disco abrasivo de diamante tipo Isomet. O corte foi feito bem próximo

ao meio do eletrodo no sentido longitudinal ao seu eixo.

Esses corpos de prova foram colocados em um projetor de perfil para medir a profundidade da cratera. A figura 2.8 mostra como foram feitas as medidas.

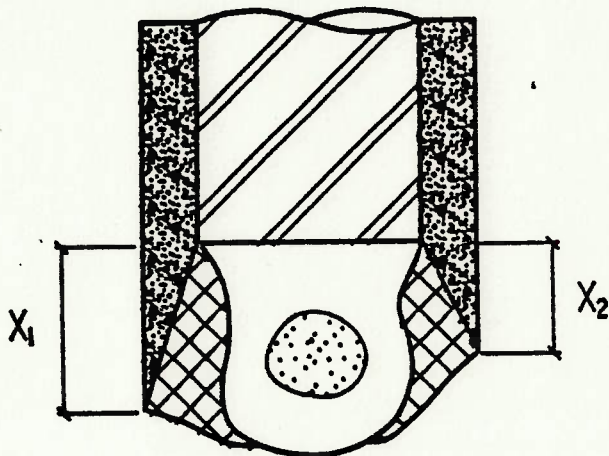


Fig. 2.8 - Esquema para medida da profundidade da cratera na ponta do eletrodo pelo projetor de perfil.

3) RESULTADOS OBTIDOS.

3.1) Resultados obtidos para o eletrodo revestido AWS E6011.

3.1.1) Diâmetro característico da gota.

A tabela 3.1 mostra um exemplo do resultado obtido dos ensaios granulométricos para a determinação do diâmetro característico da gota (D_c) para uma experiência.

Tabela 3.1 - Exemplo do ensaio granulométrico para a determinação do diâmetro característico da gota para o eletrodo AWS E6011.

Eletrodo AWS : E6011
repetição n 1

Código da experiência : A
repetição n 2

peneira ASTM	n	%	número	diâmetro
retido/passante	(g)	(peso)	de gotas	médio (mm)
5	4	---	---	---
7	5	0,322	10,43	4
10	7	1,150	37,27	23
14	10	0,771	24,98	40
18	14	0,304	9,85	41
20	18	0,135	4,37	43
35	20	0,241	7,81	219
PAN	35	0,163	5,28	906
total	3,086	99,99		$D_c = 2,18$

peneira ASTM	n	%	número	diâmetro
retido/passante	(g)	(peso)	de gotas	médio (mm)
5	4	---	---	---
7	5	---	---	---
10	7	0,952	32,17	20
14	10	0,855	28,89	41
18	14	0,449	15,17	58
20	18	0,211	7,13	49
35	20	0,322	10,88	251
PAN	35	0,170	5,75	944
total	2,959	99,99		$D_c = 1,88$

repetição n 3

peneira ASTM	n	%	número	diâmetro
retido/passante	(g)	(peso)	de gotas	médio (mm)
5	4	---	---	---
7	5	0,215	6,94	3
10	7	1,386	44,77	34
14	10	0,832	26,87	59
18	14	0,279	9,01	49
20	18	0,163	5,24	35
35	20	0,126	4,07	205
PAN	35	0,095	3,07	528
total	3,096	99,99		$D_c = 2,04$

repetição n 4

peneira ASTM	n	%	número	diâmetro
retido/passante	(g)	(peso)	de gotas	médio (mm)
5	4	---	---	---
7	5	0,165	5,49	1
10	7	0,830	28,60	20
14	10	0,909	31,32	47
18	14	0,444	15,30	49
20	18	0,142	4,89	30
35	20	0,243	8,37	216
PAN	35	0,169	5,82	939
total	2,902	99,99		$D_c = 2,11$

A tabela 3.2 resume os valores dos diâmetros característicos das gotas obtidos através de ensaios granulométricos similares aos da tabela 3.1 para cada experiência realizada.

A análise de variância para esses resultados é mostrada na tabela 3.3.

Tabela 3.2 - Resultado dos diâmetros característicos das gotas (em mm) em cada experiência com o eletrodo AWS E6011.

diâmetro do eletrodo (mm)																
4,0								5,0								
corrente de soldagem (A)																
150				200				150				200				
posição de soldagem																
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		
polaridade																
repetições	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	1,94	1,62	1,87	1,30	2,09	1,62	1,75	1,56	2,18	1,50	2,19	2,00	1,87	1,66	1,86	1,59
2	2,02	1,59	2,05	1,40	1,40	1,55	2,21	1,42	1,88	1,52	2,24	1,93	1,83	1,56	1,84	1,85
3	2,26	1,59	1,74	1,97	1,97	1,61	1,70	1,55	2,04	1,71	2,39	1,88	1,84	1,47	1,88	1,77
4	2,38	1,54	1,68	1,93	1,93	1,80	(1,89)	(1,51)	2,11	1,67	2,35	1,93	2,14	1,72	(1,86)	1,70
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)

nota : os valores entre parênteses representam a média dos outros valores da coluna.

Os resultados significativos da análise de variância são : experiência A com 2,5% de significância, experiência B com 0,5% de significância, interação AC com 1,0% de significância e experiência D com 0,1% de significância.

Analisando-se a coluna de estimativa do efeito para uma diminuição no tamanho característico da gota tem-se em ordem crescente de influência a experiência B e a experiência D. No caso de aumento no tamanho característico da gota tem-se em ordem crescente de influência a experiência A e a interação AC .

Tabela 3.3 - Análise de variância dos diâmetros característicos das gotas para o eletrodo AWS E6011.

Experiências	Soma dos valores observados	4ª coluna de Yates	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F ₀	Estimativa do efeito	
I	8,60	116,40	----	-	----	---	1,819	
A	8,21	3,52	0,1936	1	0,1936	7,02	0,1100	*(2,5%)
B	7,39	-4,40	0,3025	1	0,3025	10,97	-0,1375	*(0,5%)
AB	7,68	-1,76	0,0484	1	0,0484	1,76		
C	7,34	1,18	0,0218	1	0,0218	<1		
AC	9,17	3,94	0,2426	1	0,2426	8,90	0,1231	*(1,0%)
BC	7,55	-1,42	0,0351	1	0,0351	1,14		
ABC	7,44	-2,66	0,1106	1	0,1106	4,01		
D	6,34	-10,36	1,6770	1	1,6770	60,81	-0,3238	*(0,1%)
AD	6,40	0,28	0,00122	1	0,00122	<1		
BD	6,58	2,12	0,0702	1	0,0702	2,55		
ABD	6,41	0,76	0,00902	1	0,00902	<1		
CD	6,60	1,94	0,0588	1	0,0588	2,13		
ACD	7,74	0,30	0,00141	1	0,00141	<1		
BCD	6,04	-1,86	0,0541	1	0,0541	1,96		
ABCD	6,91	2,58	0,1040	1	0,1040	3,77		
ERRO			1,241	45	0,02758			
TOTAL			4,168	63				

3.1.2) Quantidade de respingos.

A quantidade de respingos das experiências está mostrada na tabela 3.4.

A análise de variância dos resultados da tabela 3.4 está mostrada na tabela 3.5.

Os resultados significativos são : experiência A com 0,1% de significância, experiência B com 1,0% de significância, experiência D com 0,1% de significância, interação CD com 1,0% de significância e interação ACD com 2,5% de significância.

Tabela 3.4 - Resultado da quantidade de respingos obtida em cada experiência com o eletrodo AWS E6011.

diâmetro do eletrodo (mm)																
4,0								5,0								
corrente de soldagem (A)																
150				200				150				200				
posição de soldagem																
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		
polaridade																
repetições	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	1146	2876	2454	2727	1526	3289	2440	3101	1125	2575	1341	1673	743	2665	1605	2668
2	1488	2501	1633	3594	1772	3691	1984	4105	1195	2204	1372	2218	1273	3593	1754	1797
3	2576	2224	1838	3645	2040	3837	2549	3408	733	2475	1417	1719	1268	2623	1625	1672
4	2332	3013	1977	2119	1781	2995	(2324)	(3538)	1155	3298	973	1544	1192	2508	(1661)	1936
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)

nota : os valores entre parênteses representam a média dos outros valores da coluna.

Tabela 3.5 - Análise de variância da quantidade de respingos para o eletrodo AWS E6011.

Experiências	Soma dos valores observados	4ª coluna de Yates	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F ₀	Estimativa do efeito
1	7542	140123	-----	--	-----	---	2189
A	4208	-24923	9705561,39	1	9705561,39	56,20	-778,85 * (0,1%)
B	7119	9803	1501543,89	1	1501543,89	8,70	306,34 * (1,0%)
AB	4476	-2671	111472,52	1	111472,52	<1	
C	7902	699	7634,39	1	7634,39	<1	
AC	5103	-7999	999750,02	1	999750,02	5,79	
BC	9297	2043	65216,39	1	65216,39	<1	
ABC	6645	669	6993,14	1	6993,14	<1	
D	10614	35539	19734695,70	1	19734695,70	114,28	1110,59 * (0,1%)
AD	10552	-2067	66757,64	1	66757,64	<1	
BD	13812	4239	280767,52	1	280767,52	1,63	
ABD	11389	-4347	295256,39	1	295256,39	1,71	
CD	12085	-10505	1724297,27	1	1724297,27	9,99	-328,29 * (1,0%)
ACD	7154	-9051	1280009,39	1	1280009,39	7,41	-282,85 * (2,5%)
BCD	14152	-4141	267935,64	1	267935,64	1,55	
ABCD	8073	1754	48235,14	1	48235,14	<1	
ERRO			7770807,17	45	172684,60		
TOTAL			43866733,60	63			

Analisando-se a coluna da estimativa do efeito para um aumento na quantidade de respingos tem-se em ordem crescente de influência a experiência B e a experiência D. No caso da diminuição na quantidade de respingos tem-se em ordem crescente de influência a interação ACD, a interação CD e a experiência A.

3.2) Resultados obtidos para o eletrodo AWS E6013.

3.2.1) Diâmetro característico da gota.

A tabela 3.6 mostra um exemplo do resultado obtido dos ensaios granulométricos para a determinação do diâmetro característico da gota (Dc) para uma experiência.

Tabela 3.6 - Exemplo do ensaio granulométrico para a determinação do diâmetro característico da gota para o eletrodo AWS E6013.

Eletrodo AWS : E6013
repetição n 1

Código da experiência : A
repetição n 2

peneira ASTM	m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
5	0,134	4,41	1	4,41
7	0,421	13,87	6	3,14
10	1,332	43,87	35	2,29
14	0,614	20,20	32	1,71
18	0,237	7,81	25	1,34
20	0,038	1,25	10	0,97
35	0,127	4,18	93	0,69
PAN	0,133	4,38	739	0,35
total	3,036	99,99		Dc = 2,69

peneira ASTM	m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
5	0,281	9,49	3	3,92
7	0,535	18,06	7	3,23
10	1,214	40,99	30	2,34
14	0,453	15,29	28	1,62
18	0,202	6,82	28	1,23
20	0,101	3,41	26	0,98
35	0,104	3,51	90	0,65
PAN	0,072	2,43	400	0,35
total	2,962	100,00		Dc = 2,86

repetição n 3

peneira ASTM	m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
5	0,110	3,67	1	4,13
7	0,415	13,85	5	3,32
10	0,903	30,14	29	2,14
14	0,813	27,14	52	1,60
18	0,495	16,52	54	1,33
20	0,107	3,57	24	1,03
35	0,076	2,54	58	0,68
PAN	0,077	2,57	428	0,35
total	2,996	100,00		Dc = 2,55

repetição n 4

peneira ASTM	m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
5	---	---	---	---
7	0,108	3,80	1	3,62
10	1,386	48,72	33	2,37
14	0,917	28,72	44	1,59
18	0,382	13,43	51	1,24
20	0,052	1,83	19	0,87
35	0,077	2,71	78	0,62
PAN	0,023	0,81	128	0,35
total	2,845	100,02		Dc = 2,24

A tabela 3.7 resume os valores dos diâmetros característicos das gotas obtidas através de ensaios granulométricos similares aos da tabela 3.6 para cada experiência.

Tabela 3.7 - Resultado dos diâmetros característicos das gotas (em mm) em cada experiência com o eletrodo AWS E6013.

diâmetro do eletrodo (mm)																
4,0								5,0								
corrente de soldagem (A)																
150				200				150				200				
posição de soldagem																
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		
polaridade																
repetições	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	2,54	2,35	2,17	2,29	1,88	2,09	1,90	1,93	2,69	2,07	2,41	2,58	1,92	2,14	2,40	1,95
2	2,65	1,85	2,18	2,18	1,73	2,02	1,93	2,10	2,86	1,93	2,40	2,79	2,01	1,98	2,35	1,74
3	2,55	1,91	2,20	2,64	2,19	1,97	1,80	1,87	2,55	2,07	2,59	2,57	2,02	1,98	2,26	1,99
4	2,17	1,87	2,18	2,39	2,22	2,14	1,73	2,06	2,24	2,09	2,78	2,45	2,08	1,97	2,04	1,92
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)

A análise de variância para os resultados apresentados na tabela 3.7 é mostrada na tabela 3.8.

Os resultados significativos são : experiência A com 0,5% de significância, experiência B com 0,1% de significância, interação AC com 2,5% de significância, experiência D com 0,1% de significância, interação CD com 1,0% de significância e interação BCD com 0,1% de significância.

Analisando-se a coluna da estimativa do efeito para uma diminuição no tamanho característico da gota tem-se em ordem crescente de influência a experiência D, a interação BCD e a experiência B. No caso de aumento no tamanho característico da

gotas tem-se em ordem crescente de influência a experiência A, a interação CD e a interação AC.

Tabela 3.8 - Análise de variância dos diâmetros característicos das gotas para o eletrodo AWS E6013.

Experiências	Soma dos valores observados	4ª coluna de Yates	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Fo	Estimativa do efeito	
I	9,91	139,50	---	-	---	---	2,180	
A	10,34	4,14	0,2678	1	0,2678	10,62	0,1294	*(0,5%)
B	8,02	-10,86	1,843	1	1,843	73,09	-0,3394	*(0,1%)
AB	8,03	-1,74	0,0473	1	0,0473	1,88		
C	8,73	2,02	0,0638	1	0,0638	2,53		
AC	10,18	3,18	0,1580	1	0,1580	6,27	0,0994	*(2,5%)
BC	7,36	-2,78	0,1208	1	0,1208	4,79		
ABC	9,05	-0,26	0,00106	1	0,00106	<1		
D	7,98	-3,74	0,2186	1	0,2186	8,67	-0,1169	*(1,0%)
AD	8,16	-3,02	0,1425	1	0,1425	5,65		
BD	8,22	2,54	0,1008	1	0,1008	4,00		
ABD	8,08	-1,38	0,0298	1	0,0298	1,18		
CD	9,50	3,98	0,2475	1	0,2475	9,82	0,1244	*(1,0%)
ACD	10,38	-2,22	0,0770	1	0,0770	3,05		
BCD	7,96	-6,18	0,5968	1	0,5968	23,67	-0,1931	*(0,1%)
ABCD	7,60	-1,58	0,0390	1	0,0390	1,55		
ERRO			1,210	48	0,02521			
TOTAL			5,164	63				

3.2.2) Quantidade de respingos.

A quantidade de respingos das experiências está mostrada na tabela 3.9.

A análise de variância dos resultados da tabela 3.9 está mostrada na tabela 3.10.

Tabela 3.9 - Resultado da quantidade de respingos obtida em cada experiência com o eletrodo AWS E6013.

diâmetro do eletrodo (mm)																
4,0								5,0								
corrente de soldagem (A)																
150				200				150				200				
posição de soldagem																
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		
polaridade																
repetições	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	787	952	669	724	1709	1489	1380	1212	832	896	679	1497	1185	1595	1215	659
2	539	1414	902	1712	779	1321	1590	1138	490	1303	302	940	1082	1350	959	1390
3	279	912	1354	752	947	1271	1175	1626	486	725	868	1277	812	1630	862	1065
4	699	1485	1137	782	604	1270	1868	1600	206	834	885	1123	768	1321	1570	1441
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)

Tabela 3.10 - Análise de variância da quantidade de respingos para o eletrodo AWS E6013.

Experiências	Soma dos valores observados	4ª coluna de Yates	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F ₀	Estimativa do efeito
1	2304	68325	-----	-	-----	---	1068
A	2014	-3831	229321,27	1	229321,27	2,59	
B	4039	11441	2045257,52	1	2045257,52	23,13	357,53 * (0,1%)
AB	3847	-319	1590,02	1	1590,02	<1	
C	4062	4381	299893,14	1	299893,14	3,39	
AC	2734	-1947	59231,39	1	59231,39	<1	
BC	6013	-1147	20556,39	1	20556,39	<1	
ABC	4606	-3615	204191,02	1	204191,02	2,31	
D	4763	9087	1290212,02	1	1290212,02	14,59	283,96 * (0,5%)
AD	3758	2603	105868,89	1	105868,89	1,20	
BD	5351	-3341	174410,64	1	174410,64	1,97	
ABD	5896	-357	1991,39	1	1991,39	<1	
CD	3970	-6041	570213,77	1	570213,77	6,45	-188,79 * (2,5%)
ACD	4837	2559	102320,02	1	102320,02	1,16	
BCD	5576	-1657	42900,77	1	42900,77	<1	
ABCD	4555	-3261	166158,14	1	166158,14	1,88	
ERRO			4243713,22	48	88410,69		
TOTAL			9557829,61	63			

Os resultados significativos são : experiência B com 0,1% de significância, experiência D com 0,5% de significância e interação CD com 2,5% de significância.

Analisando-se a coluna da estimativa do efeito para um aumento na quantidade de respingos tem-se em ordem crescente de influência a experiência D e a experiência B. No caso de diminuição da quantidade de respingos tem-se a interação CD.

3.3) Resultados obtidos para o eletrodo AWS E7018.

3.3.1) Diâmetro característico da gota.

A tabela 3.11 mostra um exemplo do resultado obtido dos ensaios granulométricos para a determinação do diâmetro característico da gota para uma experiência.

Tabela 3.11 - Exemplo do ensaio granulométrico para a determinação do diâmetro característico da gota para o eletrodo AWS E7018.

Eletrodo AWS : E7018
repetição n 1

peneira ASTM		m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
retido	passante				
5	4	0,514	12,88	3	4,40
7	5	0,709	17,76	5	3,83
10	7	1,068	26,76	18	2,59
14	10	0,823	20,62	35	1,83
18	14	0,302	7,57	35	1,30
20	18	0,148	3,71	32	1,04
35	20	0,281	7,04	253	0,65
PAN	35	0,146	3,66	811	0,35
total		3,991	100,00	Dc = 3,26	

Código da experiência : A
repetição n 2

peneira ASTM		m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
retido	passante				
5	4	0,814	20,09	4	4,66
7	5	0,674	16,64	5	3,76
10	7	0,516	12,74	9	2,56
14	10	0,748	18,46	34	1,79
18	14	0,446	11,01	50	1,31
20	18	0,215	5,31	45	1,05
35	20	0,372	9,18	336	0,65
PAN	35	0,266	6,57	1478	0,35
total		4,051	100,00	Dc = 3,54	

repetição n 3

peneira ASTM		m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
retido	passante				
5	4	0,425	10,26	2	4,72
7	5	1,020	24,62	8	3,69
10	7	1,143	27,59	18	2,65
14	10	0,606	14,63	30	1,74
18	14	0,393	9,49	43	1,32
20	18	0,171	4,13	40	1,01
35	20	0,274	6,61	220	0,67
PAN	35	0,111	2,68	618	0,35
total		4,143	100,01	Dc = 3,34	

repetição n 4

peneira ASTM		m (g)	% (peso)	número de gotas	diâmetro médio (mm)
retido	passante				
5	4	0,445	10,60	2	4,80
7	5	0,541	12,89	4	3,76
10	7	1,272	30,31	22	2,63
14	10	0,833	19,85	42	1,73
18	14	0,416	9,91	45	1,33
20	18	0,184	4,38	42	1,02
35	20	0,296	7,05	269	0,64
PAN	35	0,210	5,00	1167	0,35
total		4,197	99,99	Dc = 3,23	

A tabela 3.12 resume os valores dos diâmetros característicos das gotas obtidos através de ensaios granulométricos similares aos da tabela 3.11 para cada experiência.

Tabela 3.12 - Resultado dos diâmetros característicos das gotas (em mm) obtidos em cada experiência com o eletrodo AWS E7018.

diâmetro do eletrodo (mm)																			
4,0												5,0							
corrente de soldagem (A)																			
150								200								150		200	
posição de soldagem																			
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)					
polaridade																			
repetições	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)			
1	2,97	2,95	2,16	2,60	2,33	3,12	2,81	2,46	3,26	3,20	3,29	3,85	3,32	3,31	2,80	3,17			
2	2,81	3,17	2,20	3,37	2,50	3,19	2,21	2,56	3,54	3,25	3,07	3,80	3,37	3,17	2,50	2,79			
3	2,77	3,13	2,09	3,01	2,40	3,04	2,37	2,40	3,34	3,15	3,39	3,75	3,17	3,12	3,26	3,17			
4	(2,85)	3,08	2,01	2,95	2,23	2,87	2,30	2,55	3,23	3,07	3,09	4,14	3,63	3,24	3,13	3,03			
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)			

nota : os valores entre parênteses representam a média dos outros valores da coluna.

A análise de variância para os resultados apresentados na tabela 3.12 é mostrada na tabela 3.13.

Os resultados significativos da análise de variância são: experiências A,B e D e interações ABC e BCD com 0,1% de significância; experiência C e interações AC e AD com 0,5% de significância e interações CD e ACD com 1,0% de significância.

Analisando-se a coluna da estimativa do efeito para uma diminuição no tamanho característico da gota tem-se em ordem crescente de influência : experiência C, interação AD, interação ABC, experiência B, interação BCD, interação BC e interação BD.

No caso de aumento no tamanho característico da gota tem-se em ordem crescente de influência a interação ACD, interação CD, interação AC, experiência D e experiência A.

Tabela 3.13 - Análise de variância dos diâmetros característicos das gotas para o eletrodo AWS E7018.

Experiências	Soma dos valores observados	4ª coluna de Yates	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	Fo	Estimativa do efeito	
I	11,40	190,07	---	-	---	---	2,970	
A	13,37	19,15	5,7300	1	5,7300	177,95	0,5984	*(0,1%)
B	9,46	-7,03	0,7722	1	0,7722	23,98	-0,2197	*(0,1%)
AB	13,49	-1,47	0,0338	1	0,0338	1,05		
C	8,46	-5,51	0,4744	1	0,4744	14,73	-0,1722	*(0,5%)
AC	12,84	5,21	0,4241	1	0,4241	13,17	0,1628	*(0,5%)
BC	9,69	-3,49	0,1903	1	0,1903	5,91	-0,1091	*(2,5%)
ABC	11,69	-6,13	0,5871	1	0,5871	18,23	-0,1916	*(0,1%)
D	12,33	9,27	1,3430	1	1,3430	41,71	0,2897	*(0,1%)
AD	12,68	-5,61	0,4918	1	0,4918	15,27	-0,1753	*(0,5%)
BD	12,22	-3,55	0,1969	1	0,1969	6,11	-0,1109	*(2,5%)
ABD	12,84	-0,83	0,0108	1	0,0108	<1		
CD	11,93	4,57	0,3263	1	0,3263	10,13	0,1428	*(1,0%)
ACD	15,54	4,45	0,3094	1	0,3094	9,61	0,1391	*(1,0%)
BCD	9,97	-7,29	0,8304	1	0,8304	25,79	-0,2278	*(0,1%)
ABCD	12,16	2,75	0,1182	1	0,1182	3,67		
ERRO			1,5130	47	0,03220			
TOTAL			13,352	63				

3.3.2) Quantidade de respingos.

A quantidade de respingos das experiências está mostrada na tabela 3.14.

A análise de variância dos resultados da tabela 3.14 está mostrada na tabela 3.15.

Tabela 3.14 - Resultado da quantidade de respingos obtida em cada experiência com o eletrodo AWS E7018.

diâmetro do eletrodo (mm)																
4,0								5,0								
corrente de soldagem (A)																
150				200				150				200				
posição de soldagem																
(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		(P)		(NP)		
polaridade																
repetições	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
1	1104	1176	1228	1194	1309	949	1554	1701	1064	671	559	613	1097	932	1151	1065
2	1178	1523	840	998	1308	517	1074	1011	1814	541	578	826	427	1073	884	995
3	1227	1716	1140	1187	1349	1170	1415	1137	838	1416	937	1765	388	759	859	993
4	(1170)	1616	1388	544	1731	839	1198	1088	1436	904	1058	1255	840	726	1159	889
Código das experiências	(1)	(D)	(C)	(CD)	(B)	(BD)	(BC)	(BCD)	(A)	(AD)	(AC)	(ACD)	(AB)	(ABD)	(ABC)	(ABCD)

nota : os valores entre parênteses representam a média dos outros valores da coluna.

Tabela 3.15 - Análise de variância da quantidade de respingos para o eletrodo AWS E7018.

Experiências	Soma dos valores observados	4a coluna de Yates	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Quadrado médio	F ₀	Estimativa do efeito
1	4679	69091	-----	-	-----	---	1080
A	5152	-8067	1016820,14	1	1016820,14	12,30	-252,1 * (0,5%)
B	5697	-1917	57420,14	1	57420,14	<1	
AB	2752	-2159	72832,52	1	72832,52	<1	
C	4596	-525	4306,64	1	4306,64	<1	
AC	3132	1845	53187,89	1	53187,89	<1	
BC	5241	6043	570591,39	1	570591,39	6,90	188,84 * (2,5%)
ABC	4053	-351	1925,02	1	1925,02	<1	
D	6031	-1513	35768,27	1	35768,27	<1	
AD	3532	2181	74324,39	1	74324,39	<1	
BD	3475	-2285	81581,64	1	81581,64	<1	
ABD	3490	4125	265869,14	1	265869,14	3,22	
CD	3923	1991	61938,77	1	61938,77	<1	
ACD	4459	2205	75969,14	1	75969,14	<1	
BCD	4937	147	337,64	1	337,64	<1	
ABCD	3942	-7739	935814,39	1	935814,39	11,32	-241,85 * (0,5%)
ERRO			3886682,74	47	82695,38		
TOTAL			7195369,86	63			

Os resultados significativos são : experiência A e interação ABCD com 0,5% de significância e interação BC com 2,5% de significância.

Analisando-se a coluna de estimativa do efeito para um aumento na quantidade de respingos tem-se a interação BC. No caso de diminuição da quantidade de respingos tem-se em ordem crescente de influência a interação ABCD e a experiência A.

3.4) Medida da profundidade da cratera na ponta do eletrodo revestido.

As medidas da profundidade da cratera na ponta do eletrodo revestido foram feitas de acordo com o procedimento 2.3.3.7 e são mostradas na tabela 3.16. Os valores medidos apresentam, em alguns casos, desvios padrões elevados devido a assimetria durante a fusão do revestimento como indicado na figura 2.8. Analisando a tabela 3.16 percebe-se que essas variações são mais acentuadas para os eletrodos com revestimento mais grosso como o E7018.

Tabela 3.16 - Medida da profundidade da cratera (em mm) na ponta do eletrodo revestido em função dos parâmetros estudados.

		Classificação AWS do eletrodo		
		E6011	E6013	E7018
diâmetro (mm)	4,0	1,63±0,08	1,79±0,18	2,17±0,29
	5,0	1,64±0,19	2,08±0,16	2,98±0,15
corrente (A)	150	1,70±0,12	1,82±0,14	2,44±0,40
	200	1,59±0,06	1,91±0,18	2,68±0,36
posição	plana	1,53±0,05	1,68±0,23	2,52±0,42
	π plana	1,70±0,13	2,03±0,36	2,50±0,45
polaridade	CCPR	1,73±0,18	1,93±0,25	2,60±0,32
	CCPD	1,59±0,08	1,96±0,37	2,66±0,38

4) DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

A discussão será feita em ordem de importância de acordo com os resultados da análise de variância do capítulo 3.

Os efeitos devido às variações na corrente de soldagem devem ser encarados dinamicamente, apesar de, em alguns casos na discussão, serem analisados estaticamente para simplificar. Na realidade, com o crescimento da gota há um aumento na corrente de soldagem ditado pela curva característica do equipamento de soldagem utilizado.

Deve-se lembrar também que os efeitos discutidos neste capítulo são tendências que não representam o comportamento da transferência metálica como um todo. Em outras palavras, a influência dos efeitos estudados não é sobre todas as gotas transferidas, porém em relação a uma quantidade que seja suficiente para mudar o seu diâmetro característico.

4.1) Eletrodo revestido AWS E6011.

Para efeito de simplificação na análise dos resultados supor-se-á que o revestimento deste tipo de eletrodo praticamente não gera escória. Como as porcentagens da tabela 2.5 são em peso, o volume de celulose que compõe o revestimento é bem grande e ela se decompõe somente em gás de proteção.

Acredita-se que, pelo tamanho médio das gotas, uma grande quantidade delas devem explodir antes que haja o curto-circuito. Esse é um dos mecanismos propostos por Larson [38].

Existem evidências [40,41] da formação de bolhas de gás no interior da gota. Isso pode ser confirmado pela tabela 2.23 e

pela figura 4.1 . Pela tabela a densidade aparente das gotas diminui com o aumento dos seus diâmetros. O índice de porosidade das gotas é o menor para os três tipos de eletrodos estudados. Este fato pode ser um indicio de confirmação do mecanismo proposto por Larson.

A figura 4.1 mostra a ponta de um eletrodo com uma pequena bolha de gás no seu interior.

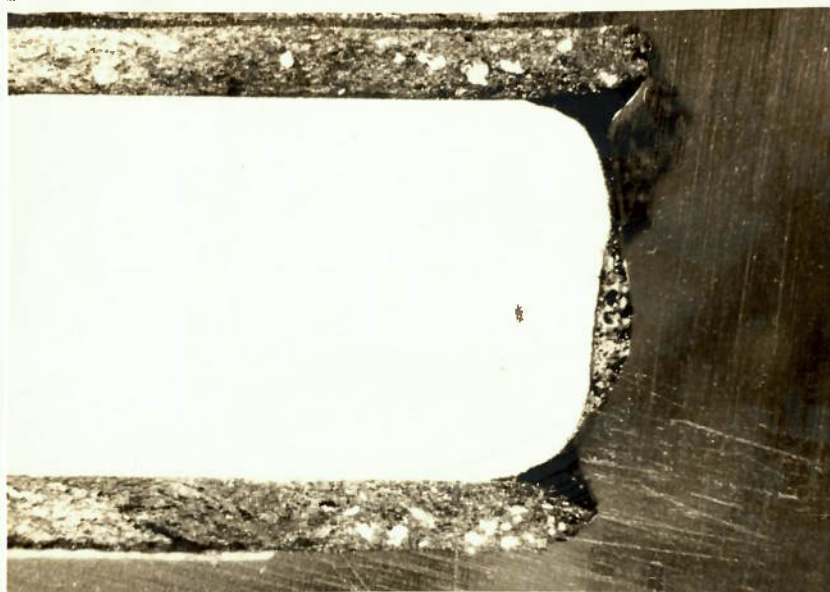


Fig. 4.1 - Fotografia de uma gota na ponta de um eletrodo AWS E6011 com uma bolha de gás no seu interior. Corrente = 150 A, 25 V, CCPD, 4,0 mm de diâmetro, posição plana. Ataque nital 1,5% . Aumento 4 X.

O diâmetro característico médio das gotas obtido foi de 1,82 mm de acordo com a primeira coluna da tabela 3.3 . Este resultado está próximo do valor de 1,73 mm obtido na literatura [54].

A atmosfera do arco é predominantemente redutora [12,88-90] devido a presença de H_2 gerado pela decomposição da celulose. Na temperatura da coluna do arco o gás hidrogênio dissocia-se em hidrogênio atômico.

4.1.1) Diâmetro característico da gota metálica.

4.1.1.1) Tratamento D (polaridade).

Observou-se uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica quando se troca da polaridade reversa (+) para a direta (-).

Nessa mudança de polaridade a origem do arco passa do metal base (disco de cobre) para a ponta do eletrodo, acarretando um aquecimento maior da mesma [1,3-8,36]. De uma maneira genérica a temperatura da gota está ao redor de 2000 a 2500 °C [9,91] enquanto que a da mancha catódica está entre 5000 e 6000 °C [36] e a da coluna de plasma ao redor de 4000 °C [41]. Neste capítulo supor-se-á que a temperatura da mancha anódica é a mesma da coluna de plasma. A figura 4.2 mostra as diferenças de temperatura.

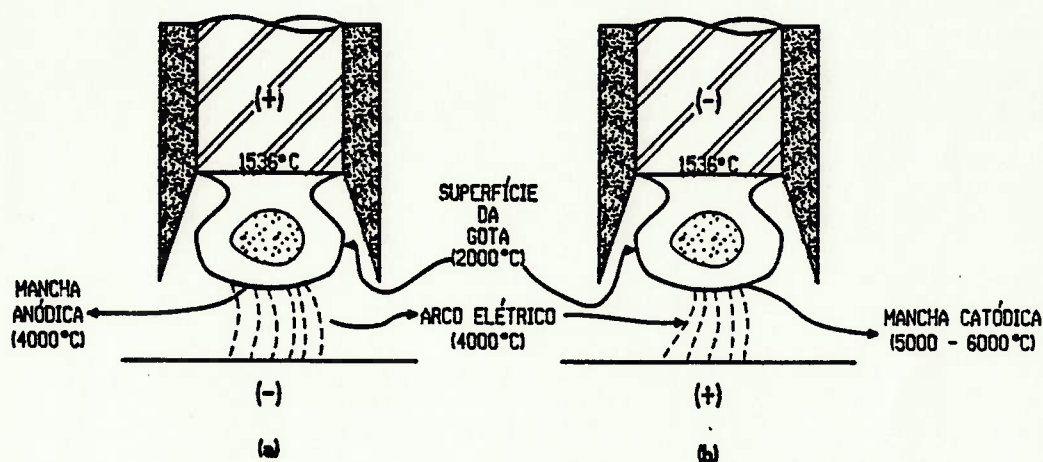


Fig. 4.2 - Distribuição de temperatura na polaridade reversa (a) e na direta (b).

Esse aumento de temperatura influi na ação das forças que são afetadas por condições térmicas [51].

Conforme foi dito anteriormente, as gotas são interiormente ocas. A bolha de gás no interior da gota possui circulação interna fazendo com que ela seja menos arrastada pela circulação na gota [92,93]. Supondo que a temperatura no centro da gota seja menor que a da superfície do líquido que a circunda, ocorre a circulação de gás mostrada na figura 4.3.

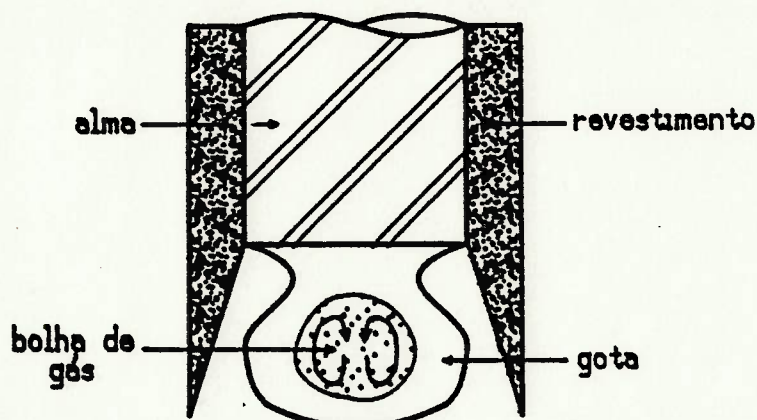


Fig. 4.3 - Circulação no interior da bolha de gás.

O efeito da circulação da bolha torna-se mais acentuado à medida que o seu tamanho fica comparável ao da gota.

Existem evidências da circulação interna da gota [9,10,19,21,23,51,94-96]. Como a mancha catódica é estabelecida em uma pequena área pode ocorrer uma instabilidade hidrodinâmica devido ao efeito Marangoni [95,97,98]. Esta instabilidade é gerada por gradientes abruptos de tensão superficial [92,95,97,98]. O fluxo de massa é da região de maior para a de menor tensão superficial. Neste caso o gradiente de tensão superficial é gerado pela diferença de temperatura e de composição química na superfície da gota. A circulação devido ao

efeito Marangoni causado pela distribuição de temperatura mostrada na figura 4.2 é apresentada na figura 4.4 .

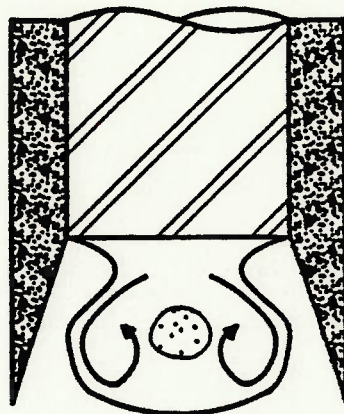


Fig. 4.4 - Circulação devido ao efeito Marangoni causado pela variação de temperatura.

O modelo de Lapidus [19] associado ao modelo de Richter [19] sugerem que as linhas de isoconcentração dos elementos desoxidantes possam ser semelhantes as linhas de isoconcentração de cromo mostrada por Richter [19]. Neste caso o teor dos elementos que diminuem a tensão superficial dissolvidos na superfície é maior na parte superior da gota que na parte inferior, gerando uma circulação idêntica a mostrada na figura 4.4 . Portanto a circulação devido ao efeito Marangoni por variação de temperatura e de composição química tem a direção mostrada na figura 4.4 .

O gradiente de temperatura também origina fenômenos convectivos. Ele gera transporte de calor acoplado ao de massa por convecção forçada. Para uma gota com uma bolha de gás no seu interior a circulação é mostrada na figura 4.5 .

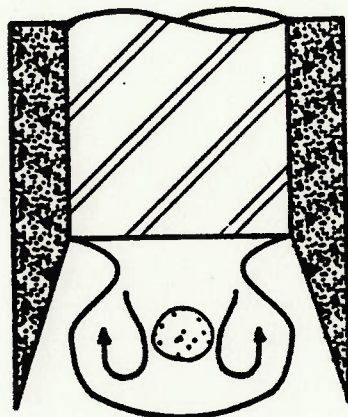


Fig. 4.5 - Circulação devido a fenômenos convectivos gerados pelo gradiente de temperatura.

Como a gota conduz corrente, o efeito da circulação gerada pelo campo eletromagnético também deve ser considerado.

A circulação eletromagnética no interior de um fluido que conduz corrente elétrica foi primeiramente estudada por Maecker [23] conforme discussão anterior. A circulação é na direção da maior para a menor densidade de corrente. A figura 4.6 esquematiza a direção da circulação devido ao campo eletromagnético.

Esta circulação foi estudada posteriormente para se conhecer a movimentação da poça de fusão [99-101]. Woods e Milner [99] confirmaram experimentalmente a previsão de Maecker usando mercúrio para simular a poça de fusão. Através da medida da velocidade de circulação concluíram que esta é diretamente proporcional ao quadrado da corrente, conforme mostra a figura 4.7 .

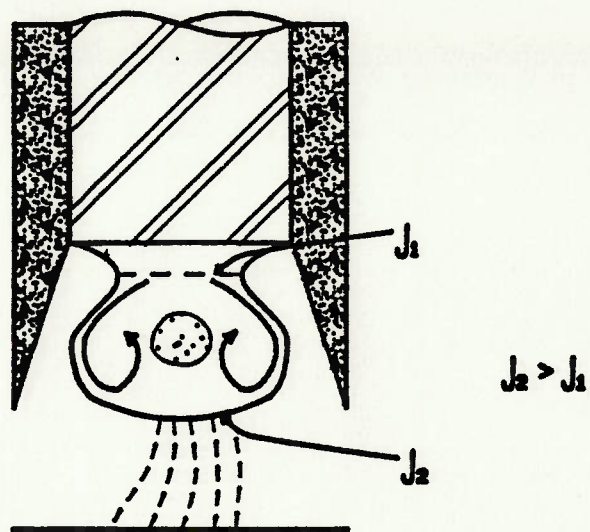


Fig. 4.6 - Circulação devido a pressão eletromagnética gerada pela força de compressão.

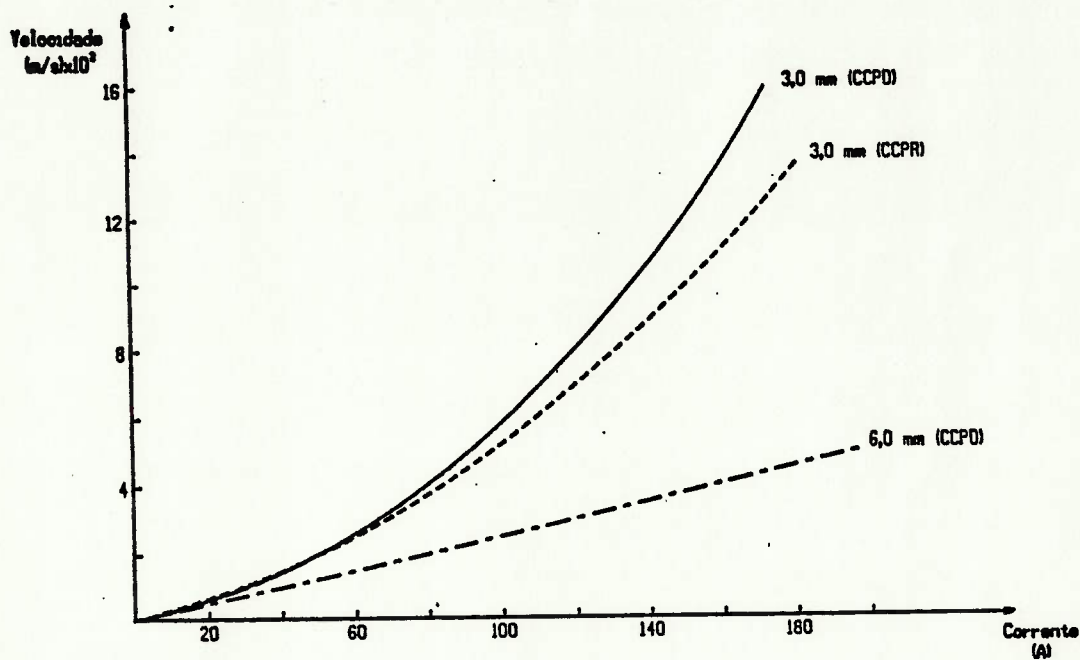


Fig. 4.7 - Efeito do diâmetro do eletrodo, da polaridade e da corrente de soldagem na velocidade de circulação do mercúrio [99].

Analisando-se a figura 4.7 observa-se que, para uma dada corrente, a passagem da polaridade reversa para a direta causa um aumento na velocidade de circulação do fluido.

Resta saber agora qual o sentido da circulação que é predominante. De um lado tem-se a circulação devido ao efeito Marangoni e a força de compressão e do outro a circulação devido a convecção forçada.

El-Kaddah e Szekely [102] estudaram a distribuição da força eletromagnética, a velocidade de circulação da gota e a distribuição de temperatura em uma gota de 1 g de aço levitada em um campo eletromagnético. A velocidade máxima na superfície da gota foi de 0,28 m/s. A diferença de temperatura medida foi de 10 C, mesmo com a elevada velocidade do fluido.

Tendo em vista que a gota do eletrodo revestido possui uma bolha de gás no seu interior e que a velocidade de circulação seja da ordem de grandeza da medida por Woods e Milner [99] ou por El-Kaddah e Szekely [102] o gradiente de temperatura na gota não deve ser tão intenso. Portanto a direção da circulação é ditada pelo efeito Marangoni e pelo efeito da força de compressão.

A suposição anterior é confirmada por diversos trabalhos [95,96] e pelas linhas de isoconcentração de cromo levantadas por Richter e Garner [19].

Retomando a discussão, a força devido a evaporação metálica pode acelerar a explosão da gota. Com a mancha catódica na ponta do eletrodo ocorre uma emissão maior de vapor. Isso é devido a temperatura da mancha catódica ser superior a temperatura de ebulição do aço e ao pequeno diâmetro da mancha catódica.

Com a aceleração desse jato de vapor pelo campo eletromagnético

tico gerado ao redor do arco, aumenta localmente a pressão na mancha catódica. A gota é empurrada para cima, dificultando a formação do pescoço e tornando-a deformada. A mancha catódica desloca-se para o lugar mais próximo do metal de base, empurrando esse local para cima e formando um movimento ondulatório. Se durante essa movimentação a bolha no seu interior for deslocada conforme mostra a figura 4.8, a força de compressão acaba por comprimir a parede da gota. Essa compressão rompe a parede da gota, consumando a sua transferência.

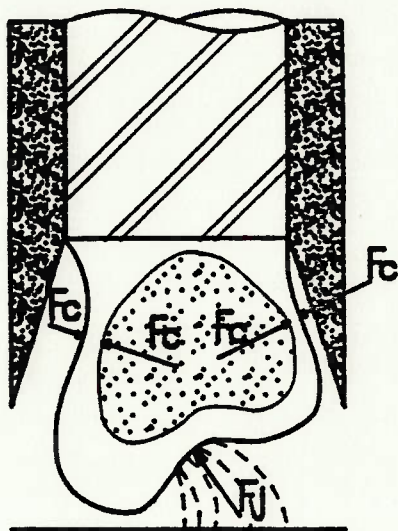


Fig. 4.8 - Efeito da força devido a evaporação metálica e da força de compressão na deformação da gota.

Além do efeito mostrado na figura 4.8 tem-se a circulação no interior da bolha que concorda com a da gota. Esta circulação é duplamente acentuada quando se passa para a polaridade direta. A medida que a bolha expande, a parede da gota é acelerada pelas

circulações. Com isso acaba-se diminuindo a espessura da parede da gota ajudada pela força devido a evaporação metálica e pela força de compressão. Acaba-se rompendo a parede da gota, conforme mostra a figura 4.9 .

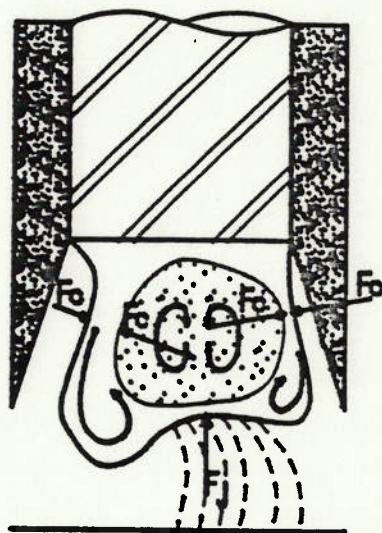


Fig. 4.9 - Ação da força de compressão devido a força de evaporação metálica e as circulações internas.

Além dos efeitos apresentados, a distribuição de cargas elétricas superficiais pode influir na tensão superficial[103-105]. Estudos de tensão superficial do mercúrio envolvido por um eletrólito aquoso aplicando-se uma pequena diferença de potencial mostraram uma variação na tensão superficial com o tipo de polaridade, de eletrólito e com o potencial aplicado. A figura 4.10 mostra este comportamento.

O resultado da figura 4.10 foi obtido em condições bastante diversas das observadas na soldagem. Como a evaporação é intensa devido a elevada temperatura, o conceito de tensão superficial

pode não ser diretamente aplicável. As diferenças de potencial observadas na soldagem também são maiores que as estudadas além

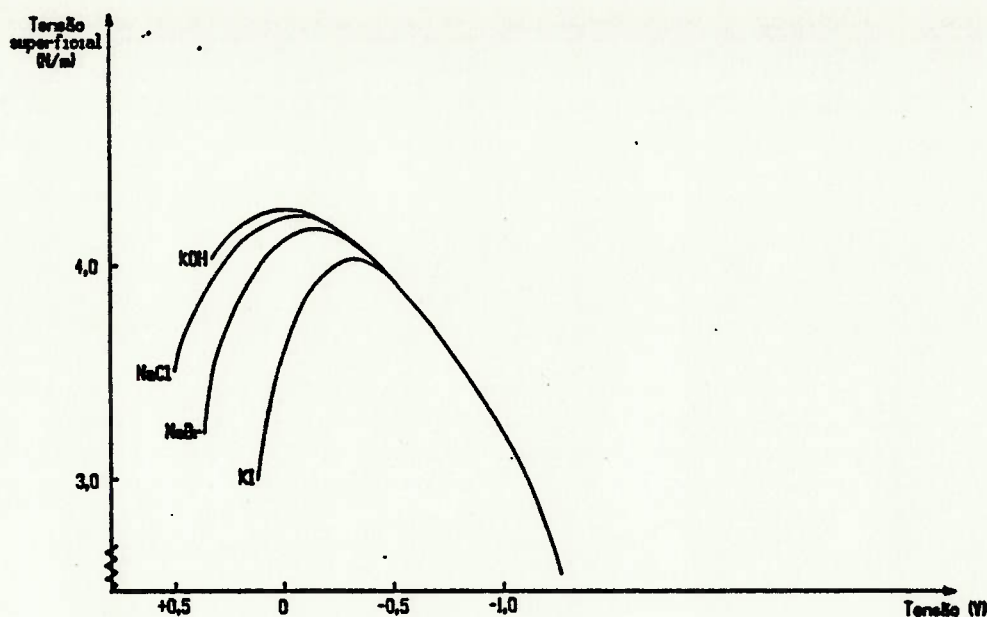


Fig. 4.10 - Efeito da polaridade e do potencial aplicado na tensão superficial do mercúrio para diversos eletrólitos aquosos [103].

desse fenômeno ser associado a distribuição estática de cargas. Apesar das restrições apresentadas acredita-se que um fenômeno semelhante ocorra na soldagem quando da mudança da polaridade.

A variação da tensão superficial com a carga elétrica também pode acentuar o fluxo de massa pelo efeito Marangoni e auxiliar na explosão da gota.

4.1.1.2) Tratamento E (corrente de soldagem).

Com o aumento da corrente de 150 para 200 A notou-se uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica.

A força devido a evaporação metálica é diretamente proporcional ao quadrado da corrente de soldagem. Com o aumento

da corrente há um aumento de aproximadamente 78% no módulo da força, mantendo-se os outros parâmetros constantes. Dessa maneira a gota é empurrada contra o eletrodo dificultando a formação do pescoço.

Por outro lado, a velocidade de circulação na gota devido ao campo eletromagnético aumenta com o quadrado da corrente de soldagem, conforme discussão anterior. O sentido de circulação da gota favorece a formação do pescoço.

A temperatura da gota metálica é função da corrente de soldagem [18,91]. Segundo Rykalin e Erokhin [91] para um dado diâmetro de eletrodo a temperatura da gota cresce com a corrente de soldagem, conforme mostra a figura 4.11 .

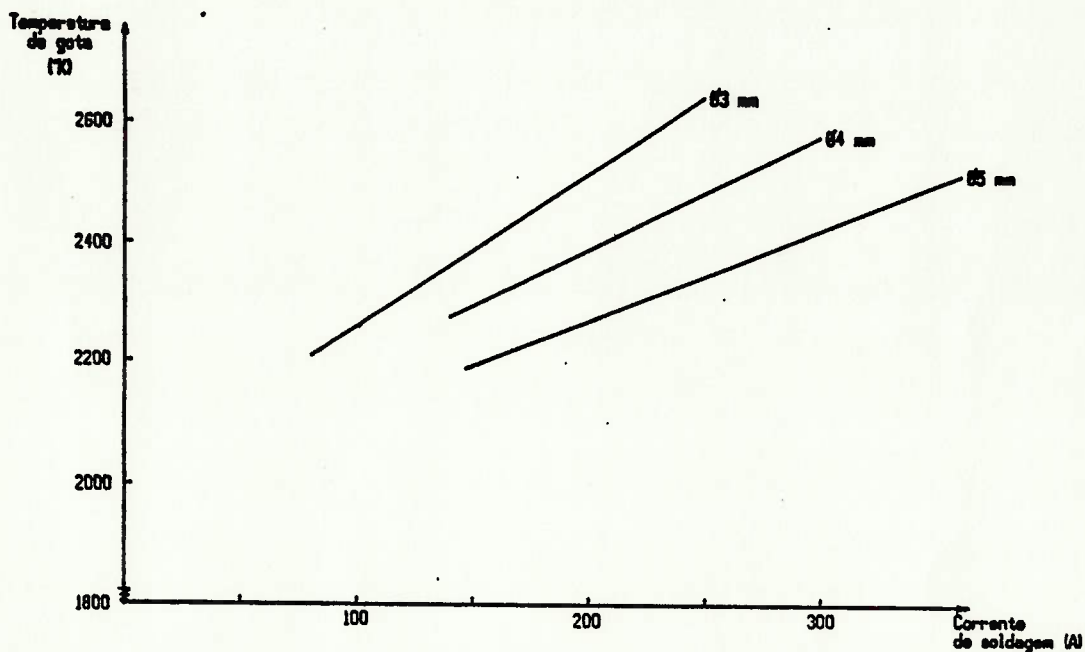


Fig. 4.11 - Efeito da corrente de soldagem na temperatura da gota metálica [91].

O aumento de temperatura devido ao aumento da corrente de soldagem favorece a evaporação de uma quantidade maior de metal.

Com isso a força devido a evaporação metálica é novamente acentuada.

A temperatura da bolha de gás também aumenta com o aumento da temperatura da gota. A circulação da bolha é acentuada junto com a sua pressão. Além disso, a viscosidade da gota diminui e a da bolha aumenta.

A medida que a bolha expande a circulação interna desta interage cada vez mais com a circulação interna da gota. Acaba ocorrendo um fenômeno como o mostrado na figura 4.8 .

4.1.1.3) Interação AC (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem).

A interação entre o aumento do diâmetro do eletrodo e a passagem da posição plana para a não plana causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

Isto significa que algumas gotas metálicas são transferidas antes que haja a sua explosão.

A temperatura da gota metálica aumenta com a densidade de corrente [91] mantendo-se o diâmetro do eletrodo constante. Esse efeito é mostrado na figura 4.12 .

A densidade de corrente para os eletrodos de diâmetro 4,0 e 5,0 mm e correntes de soldagem de 150 e 200 A são :

$$\begin{aligned}
 j_1 &= 150 / [3,14 \cdot (4,0)^2 / 4] = 11,94 \text{ A/mm}^2 \\
 j_2 &= 200 / [3,14 \cdot (4,0)^2 / 4] = 15,92 \text{ A/mm}^2 \\
 j_3 &= 150 / [3,14 \cdot (5,0)^2 / 4] = 7,64 \text{ A/mm}^2 \\
 j_4 &= 200 / [3,14 \cdot (5,0)^2 / 4] = 10,19 \text{ A/mm}^2
 \end{aligned}$$

Comparando j_1 com j_3 e j_2 com j_4 na figura 4.12 conclui-se

que a temperatura das gotas do eletrodo de 4,0 mm de diâmetro é sempre maior que a do de 5,0 mm, qualquer que seja a corrente de soldagem.

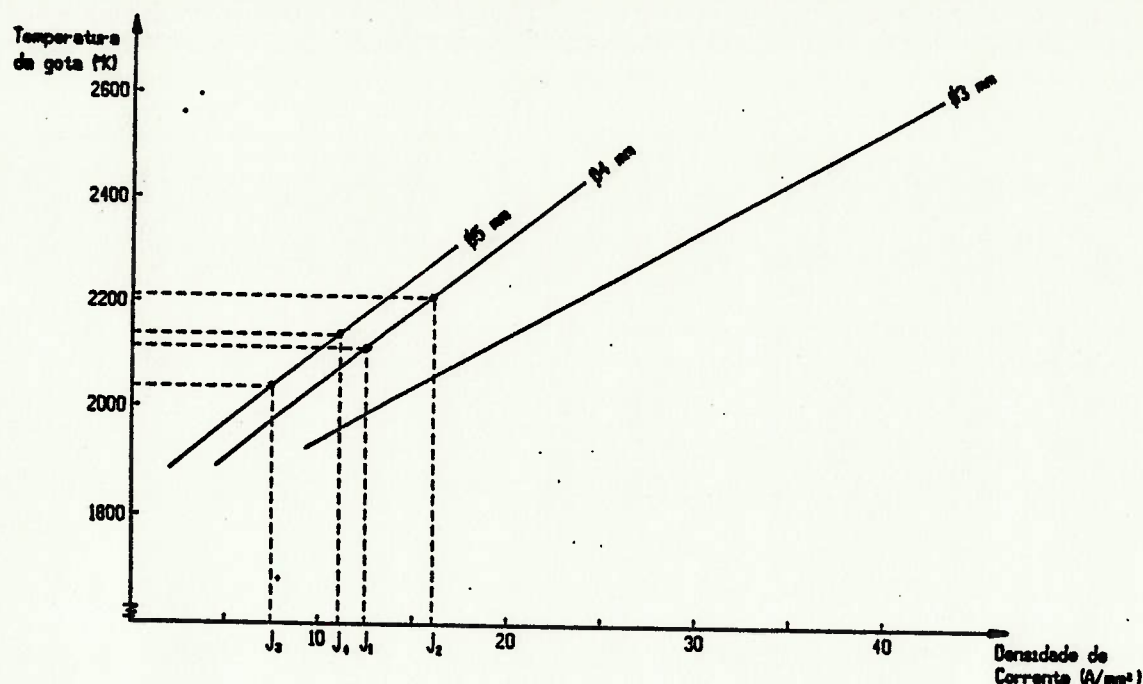


Fig. 4.12 - Efeito da densidade de corrente na temperatura da gota metálica [91].

Se a temperatura da gota é maior, a do interior da bolha também é maior conforme discussão anterior.

A velocidade de circulação da gota devido ao campo eletromagnético diminui bastante com o aumento do diâmetro do eletrodo, conforme mostra a figura 4.7. Segundo Woods e Milner [99] a velocidade de circulação é diretamente proporcional ao produto da corrente de soldagem pela densidade de corrente.

A força devido a tensão superficial entre a gota metálica e a alma aumenta com o diâmetro desta [9,11]. O aumento dessa força tende a favorecer a formação do pescoço além de manter a gota contra o eletrodo.

A mudança da posição plana para a não plana causa uma força de apoio da gota metálica sobre a parte não fundida na cratera do eletrodo. A direção da circulação da gota favorece a formação do pescoço.

No caso do eletrodo de 4,0 mm e posição plana como a temperatura da gota é maior, tem-se um fenômeno similar ao item 4.1.1.2 além de diminuir a tensão superficial entre a gota e a alma.

No caso do eletrodo de 5,0 mm de diâmetro e posição não plana a temperatura da gota é menor. A circulação na bolha é, conseqüentemente, menor que no caso anterior. A circulação da gota diminui conforme exposição anterior. A gota metálica está apoiada na parte não fundida do revestimento. Para o eletrodo de

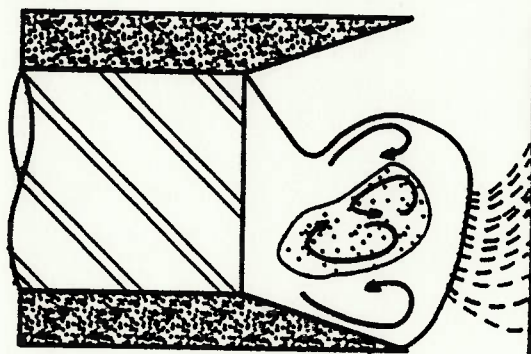


Fig 4.13 - Deformação da gota metálica na posição não plana.

5,0 mm de diâmetro o comprimento médio dessa parte é de $(1,64 \pm 0,19)$ mm de acordo com a tabela 3.16 comparado com um diâmetro médio de gota de 1,82 mm segundo a tabela 3.3.

A circulação acelera a gota como se fosse uma esfera rolando em um plano inclinado. A força devido a tensão superficial associada a viscosidade da gota se opõe a esse movimento, favorecendo a formação do pescoço.

Esse efeito é acentuado com o crescimento da bolha. A força devido a tensão superficial também acentua a formação do pescoço. Esses efeitos causam uma deformação na gota mostrada na figura 4.13 .

Essa deformação acaba favorecendo a ação da força de compressão que ajuda no destacamento da gota antes da sua explosão, conseqüentemente acarretando um aumento no diâmetro característico das gotas.

4.1.1.4) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).

Um aumento no diâmetro do eletrodo causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

Conforme já foi dito anteriormente, a gota do eletrodo de 4,0 mm de diâmetro é mais quente que a do de 5,0 mm. Devido a esse fato a viscosidade e a tensão superficial são menores. A diminuição da tensão superficial entre a gota e a alma diminui a força devido a ela. A associação destes efeitos dificultam a formação do pescoço. Isso já não ocorre com o eletrodo de 5,0 mm de diâmetro. Para ele a força devido a tensão superficial entre a gota e a alma e a viscosidade favorecem a formação do pescoço. A figura 4.14 mostra esse efeito.

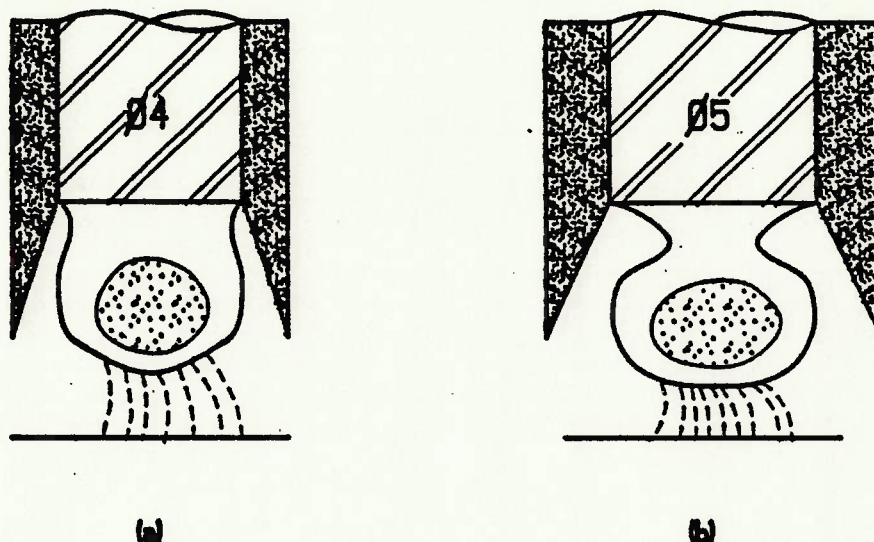


Fig. 4.14 - Efeito da tensão superficial e da viscosidade na formação do pescoço. Em (a) para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro e em (b) para o de 5,0 mm.

A circulação devido a força de compressão diminui com o aumento do diâmetro conforme discussão anterior. A circulação na bolha tem o mesmo comportamento, porém devido ao gradiente de temperatura.

Associando-se esses dois fatos com a expansão da bolha de gás, a força de compressão acaba agindo nas paredes da gota para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro, conforme mostrou a figura 4.7. Para o eletrodo de 5,0 mm de diâmetro a força de compressão acaba agindo no pescoço evaporando-o e transferindo a gota com a bolha de gás no seu interior.

4.1.2) Quantidade de respingos.

4.1.2.1) Tratamento D (polaridade).

Ao passar da polaridade reversa (+) para a direta (-) aumenta-se a quantidade de respingos.

Esse resultado concorda com a revisão de Sprarangen e Claussen [97]. A discussão é análoga ao item 4.1.1.1 visto que, ao explodir antes da transferência, a geração de respingos é bem maior.

Deve-se ressaltar que a viscosidade da gota também é um fator determinante na quantidade de respingos. Quanto menor esta for, maior a quantidade de respingos.

Além desses fatores, a profundidade da cratera na ponta do eletrodo é um pouco maior na polaridade reversa. Os valores medidos foram $(1,73 \pm 0,18)$ mm e $(1,59 \pm 0,08)$ mm respectivamente de acordo com a tabela 3.16. O diâmetro característico médio da gota é de aproximadamente 1,82 mm segundo a tabela 3.3. Portanto os respingos são mais restringidos pela cratera da ponta do eletrodo na polaridade reversa.

4.1.2.2) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).

Quando se aumenta o diâmetro do eletrodo diminui-se a quantidade de respingos. Os fatores que influenciam são análogos aos da discussão do item 4.1.1.4.

A profundidade da cratera é praticamente igual nos dois casos. Os valores obtidos da tabela 3.16 são $(1,63 \pm 0,08)$ mm para o eletrodo com 4,0 mm de diâmetro e $(1,64 \pm 0,19)$ mm para o de 5,0 mm. A tabela 2.6 mostra que as espessuras dos revestimentos

são diferentes. Para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro tem-se um valor de 0,75mm e para o de 5,0mm um valor de 0,92mm. Com isso obtém-se uma área de saída maior na cratera do eletrodo de 5,0 mm de diâmetro, direcionando mais os respingos. A figura 4.15 esquematiza esse efeito.

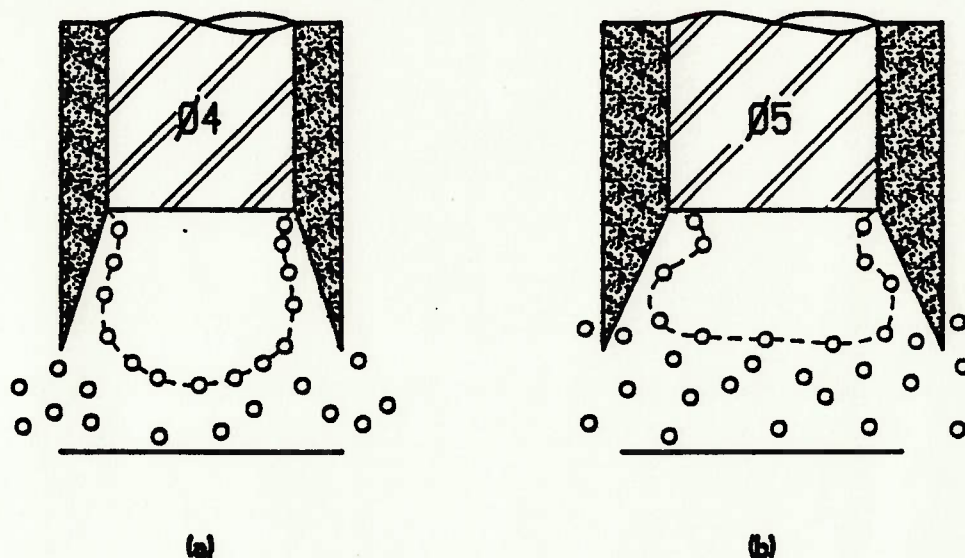


Fig. 4.15 - Efeito da área da cratera na ponta do eletrodo no direcionamento dos respingos para os dois diâmetros de eletrodo.

4.1.2.3) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).

A interação entre a mudança de posição de soldagem da plana para a não plana e passagem da polaridade reversa (+) para a direta (-) causa uma diminuição na quantidade de respingos.

A mudança da polaridade foi discutida no item 4.1.1.1. Associando-se os efeitos devido a circulação na gota e na bolha com a força devido a evaporação metálica e com a mudança da posição de

soldagem, a formação do pescoço é favorecida. A figura 4.16 mostra o descrito acima.

O pescoço vai afinando e a ação da força de compressão aumentando. Chega-se a um ponto onde o pescoço é evaporado e a gota é transferida com a bolha de gás no seu interior. Com isso a quantidade de respingos é diminuída.

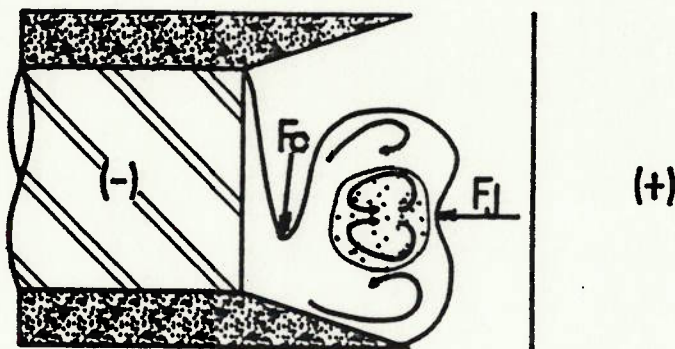


Fig. 4.16 - Efeito das circulações e da força devido a evaporação metálica na ação da força de compressão.

4.1.2.4) Tratamento B (corrente de soldagem).

Um aumento na corrente de soldagem causa um aumento na quantidade de respingos.

O resultado é confirmado pela norma AWS A-5.1 [73]. A discussão é análoga a do item 4.1.1.2.

A profundidade da cratera na ponta do eletrodo para as cor-

rentes de 150 e 200 A valem $(1,70 \pm 0,12)$ mm e $(1,59 \pm 0,06)$ mm, respectivamente segundo a tabela 3.16. A cratera da ponta do eletrodo para corrente de 150 A é, em média, um pouco mais profunda que a outra. Isso faz com que os respingos sejam melhor direcionados.

4.1.2.5) Interação ACD (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem+polaridade).

A interação entre o aumento do diâmetro do eletrodo, a mudança da posição plana para a não plana e da polaridade reversa (+) para a direta (-) causa uma diminuição na quantidade de respingos.

Analisando a figura 4.7 percebe-se que o efeito na velocidade de circulação devido a força de compressão é mais marcante para o aumento do diâmetro do que pela troca de polaridade. Com isso a circulação na gota deve ser mais intensa para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro na polaridade reversa do que o de 5,0 mm e polaridade direta.

A partir desta assunção, a discussão fica análoga a do item 4.1.1.3. A diferença é que, com a troca da polaridade reversa para a direta, a força devido a evaporação metálica ajuda na deformação da gota.

4.2) Eletrodo revestido AWS E6013.

A escória deste tipo de revestimento é pouco viscosa. Ela é uma escória ácida e, por isso, chamada de escória longa [19,106], isto é, a variação de viscosidade é bastante suave com a mudança de temperatura.

Existem suposições [11,41,90] que as gotas dos eletrodos com revestimento rutilico também possuem bolhas de gás no seu interior. Este fato é confirmado pela tabela 2.24 e pela figura 4.17. A tabela mostra a densidade aparente das gotas em função do seu tamanho. As gotas deste tipo de eletrodo apresentam a maior porosidade aparente quando comparada com os outros dois tipos.

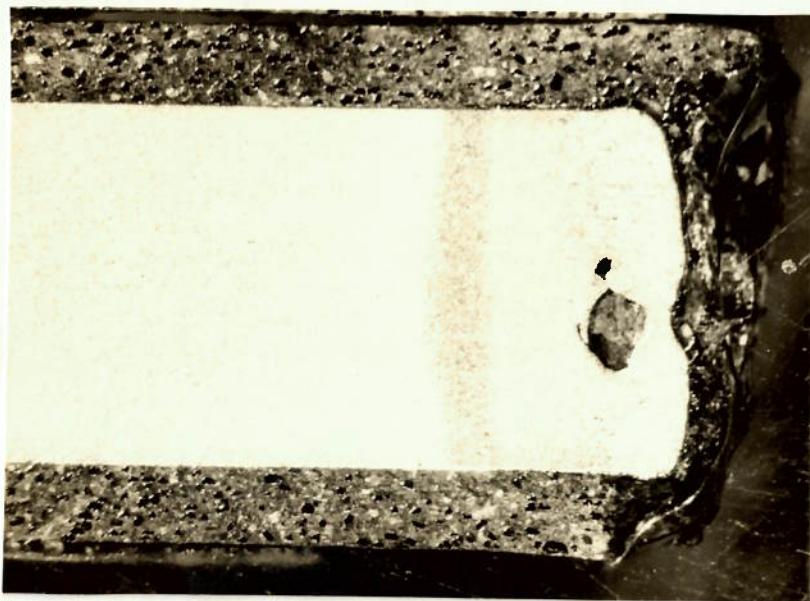


Fig. 4.17 - Fotografia de uma gota na ponta de um eletrodo AWS E6013 com uma bolha de gás no seu interior. Dados : 150 A, 25 V, CCPD, 4,0 mm de diâmetro, posição plana. Ataque nital 1,5% . Aumento 4 X.

A análise da transferência com oscilograma mostrou que a frequência de curto-circuito é maior que a do eletrodo básico [13,19,36,78,107]. O diâmetro característico médio da gota obtido da tabela 3.8 é de 2,18 mm. Esse valor está próximo do

encontrado na literatura através de outras técnicas e parâmetros de soldagem e que varia de 1,24 a 2,35 mm [13,57,77,78,108]. Isso evidencia que a gota ou explode após o curto-circuito ou é transferida com a bolha de gás no seu interior. Esse fato é um indicio de que o outro mecanismo proposto por Larson [38] pode ser válido para esse tipo de revestimento.

A atmosfera do arco é menos redutora que a do eletrodo celulósico [12]. Analisando-se a tabela 2.5 o revestimento do eletrodo rutilico tem menos celulose e uma grande quantidade de titanato de potássio o que torna a atmosfera mais oxidante.

4.2.1) Diâmetro característico da gota metálica.

4.2.1.1) Tratamento B (corrente de soldagem).

O aumento na corrente de 150 para 200 A causa uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é análoga com o item 4.1.1.2 . A diferença é que agora existe circulação na escória e a presença de forças de origem viscosa associadas com forças geradas pela tensão superficial.

A circulação da escória é induzida preferencialmente pelo gradiente de temperatura ao invés do gradiente de tensão superficial [106,109]. A circulação devido ao campo eletromagnético será desprezada visto que menos que 5% da corrente total é conduzida pela escória [51,78]. A figura 4.18 mostra a circulação na escória, na gota e na bolha de gás.

É interessante ressaltar que a circulação da escória é contrária a da gota metálica.

A tensão superficial entre a gota e a escória, associada a tensão superficial entre a escória e a cratera na ponta do eletrodo junto com a viscosidade da escória geram uma força que age contra o destacamento da gota [51].

Para o melhor entendimento da ação dessa força de origem viscosa far-se-á a seguinte explicação. A viscosidade da escória é muito maior que a do metal líquido. Devido a esse fato, para a gota, a escória forma um envoltório rígido que impede a transferência da gota.

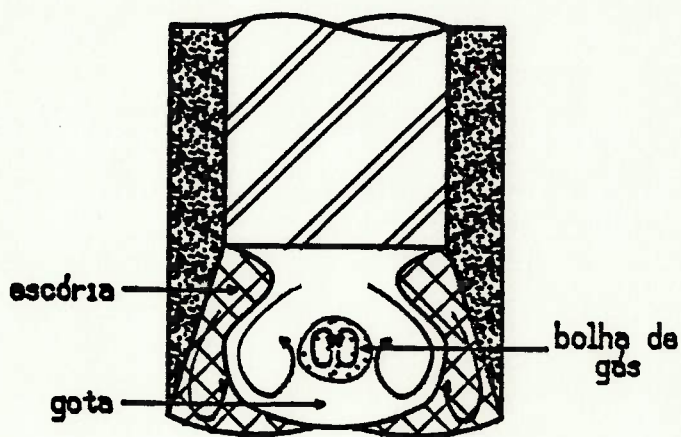


Fig. 4.18 - Circulação na escória, na gota e na bolha.

Com o aumento da corrente de soldagem há um aumento na temperatura da gota e no gradiente de temperatura da escória e da bolha de gás.

A força devido a evaporação metálica aumenta e acaba promovendo uma deformação na superfície da gota. A tendência do arco é ir para o local mais próximo do metal base, conforme o

modelo de Conrady [33] para a soldagem fora de posição. Os deslocamentos da origem do arco para essas posições acaba gerando um movimento ondulatório.

A gota vai crescendo e sendo mantida pelas forças viscosas geradas pela circulação da escória. Esta circulação favorece a formação do pescoço. Um instante antes do curto-circuito a corrente está mais alta aumentando as circulações conforme discussão anterior. Isso favorece o afinamento da gota e a ação da força de compressão, que acaba rompendo a parede da gota no momento do curto-circuito, conforme mostra a figura 4.19 .

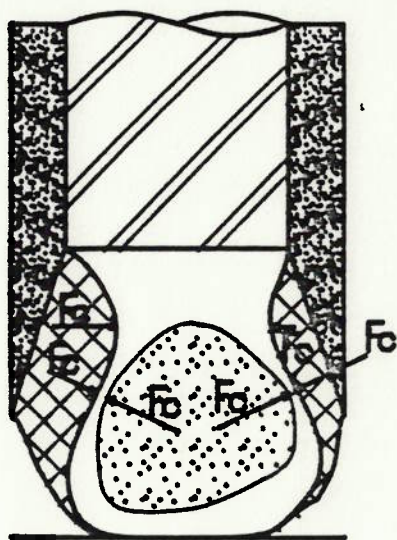


Fig. 4.19 - Ação da força de compressão no momento do curto-circuito.

4.2.1.2) Interação BCD (corrente de soldagem+posição de soldagem+polaridade).

Observou-se uma diminuição no tamanho característico da gota metálica quando se passa de 150 A, posição plana e polaridade

reversa (+) para 200 A, posição não plana e polaridade direta (-).

O aumento da corrente associado a troca da polaridade causam um aumento na temperatura da gota. Conseqüentemente há um aumento na velocidade de circulação da escória e da bolha de gás.

A mudança da corrente de soldagem e da polaridade também aumentam a circulação na gota e a força devido a evaporação metálica, conforme discussão anterior.

A passagem do eletrodo revestido para a posição não plana faz com que haja uma deformação na gota. A circulação devido a força de compressão e ao efeito Marangoni aceleram a gota conforme foi dito anteriormente.

A circulação da escória junto com a força devido a evaporação metálica impedem a gota de ser transferida. A figura 4.20 esquematiza o discutido acima.

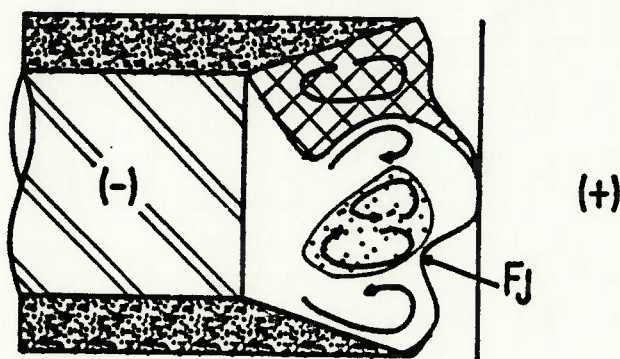


Fig. 4.20 - Efeito das circulações, da corrente, da posição e da polaridade de soldagem na deformação da gota.

Acaba ocorrendo um efeito similar ao discutido no item 4.2.1.1 e mostrado na figura 4.19 .

4.2.1.3) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).

Um aumento no diâmetro do eletrodo causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é parecida com a do item 4.1.1.4 . A diferença é que existe escória e esta tem circulação interna induzida pelo gradiente de temperatura.

A circulação na escória associada a força devido a tensão superficial entre a gota e a alma favorecem o afinamento do pescoço para a gota do eletrodo de 5,0 mm de diâmetro. Esse efeito é mostrado na figura 4.21 .

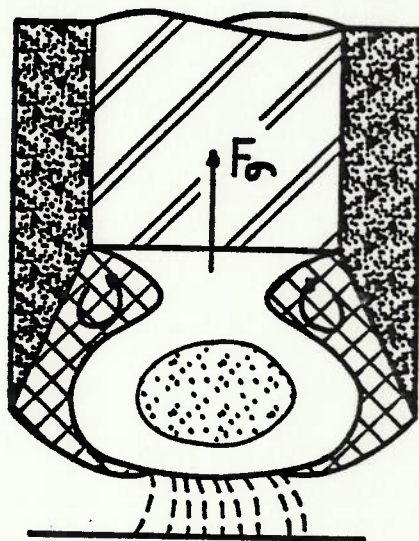


Fig. 4.21 - Efeito da força devido a tensão superficial entre a gota e a alma e a circulação da escória na formação do pescoço.

A força de compressão começa a agir no pescoço e, no momento do curto-circuito este é evaporado e a gota transferida com a bolha de gás no seu interior. Este efeito é mostrado na figura 4.22 .

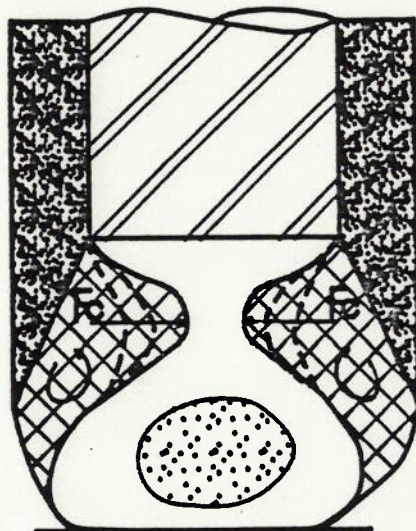


Fig. 4.22 - Efeito da força de compressão no afilamento do pescoço no momento do curto-circuito.

4.2.1.4) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).

A mudança da posição plana e polaridade reversa (+) para posição não plana e polaridade direta (-) causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é semelhante a do item 4.1.2.4 . A diferença é que a circulação da escória ajuda a formar o pescoço ao mesmo tempo em que retém a gota contra o eletrodo associada com a força devido a evaporação metálica. Esse efeito é esquematizado na

figura 4.23 .

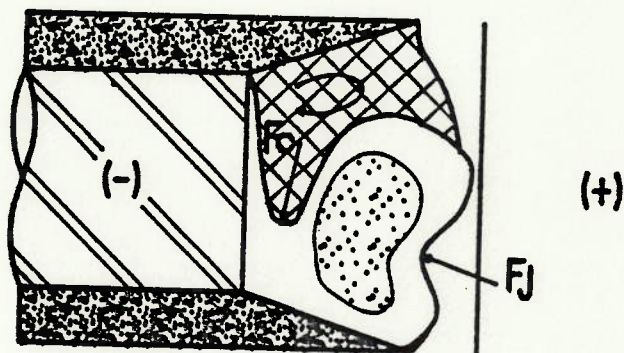


Fig. 4.23 - Efeito da circulação da escória e da força devido a evaporação metálica na deformação da gota.

No momento do curto-circuito o pescoço é evaporado podendo formar um segundo arco em série [51]. Esse segundo arco associado a expansão dos gases gerados na evaporação do pescoço transferem a gota com a bolha de gás no seu interior.

4.2.1.5) Tratamento D (polaridade).

A passagem da polaridade reversa (+) para a direta (-) causa uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é similar a do item 4.1.1.1 . Na polaridade reversa a temperatura da gota é menor, favorecendo a formação do pescoço pela ação da força devido a tensão superficial entre a gota e a alma, das forças de origem viscosa e pela circulação da escória, ocorrendo uma transferência como a da fig.4.22 .

Na polaridade direta a temperatura da gota é maior, aumentando a circulação da escória, da gota e da bolha. Acontece um tipo de transferência como o mostrado na figura 4.19. O efeito da troca de polaridade é mostrado na figura 4.24.

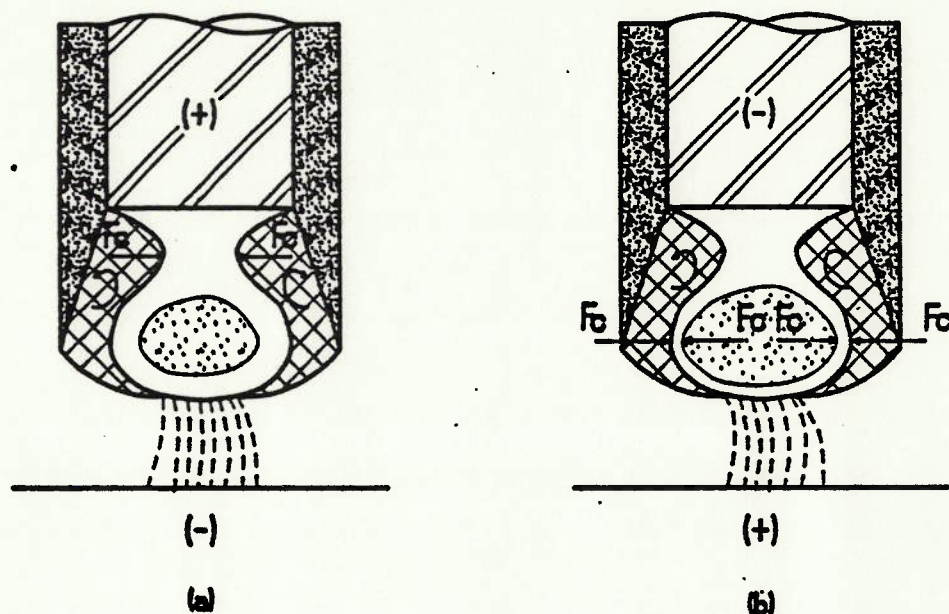


Fig. 4.24 - Efeito da polaridade e da circulação da escória na formação do pescoço. Em (a) CCPR(+) e em (b) CCPD(-).

4.2.1.6) Interação AC (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem).

O aumento de diâmetro associado com a passagem da posição plana para a não plana causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é análoga a do item 4.1.1.3. A diferença é que a circulação na escória favorece a formação do pescoço.

A gota é sustentada pela força viscosa gerada pela circulação

da escória . No momento do curto-circuito ocorre uma transferência como a mostrada na figura 4.22 .

4.2.2) Quantidade de respingos.

4.2.2.1) Tratamento B (corrente de soldagem).

Ao passar de 150 para 200 A aumenta-se a quantidade de respingos.

Os fatores que influem no aumento da quantidade de respingos são análogos ao da discussão do item 4.2.1.1 . No caso da transferência onde ocorra o curto-circuito existe também o efeito da curva característica do equipamento de soldagem. No momento do curto-circuito a corrente deve ser a menor possível para diminuir a quantidade de respingos.

A profundidade da cratera é praticamente a mesma para as duas correntes. Os valores medidos mostrados na tabela 3.16 foram $(1,82 \pm 0,14)$ mm para a corrente de 150 A e $(1,91 \pm 0,18)$ mm para a corrente de 200 A.

Comparando esses valores com o tamanho médio da gota, que é de 2,18 mm segundo a tabela 3.8 os respingos são mais direcionados para a corrente de soldagem de 150 A .

4.2.2.2) Tratamento D (polaridade).

A mudança da polaridade reversa (+) para a direta (-) causa um aumento na quantidade de respingos.

A discussão é semelhante a do item 4.2.1.5 . A profundidade da cratera é praticamente igual para ambas as polaridades. De acordo com a tabela 3.16 os valores medidos foram $(1,93 \pm 0,25)$ mm

para a polaridade reversa e $(1,96 \pm 0,37)$ mm para a direta.

Mesmo com valores de profundidade de cratera semelhantes, pelo tipo de transferência os respingos são mais restringidos na polaridade reversa.

4.2.2.3) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).

A mudança da posição plana e polaridade reversa (+) para posição não plana e polaridade direta (-) causa uma diminuição na quantidade de respingos.

A discussão é análoga a do item 4.2.1.4 . Segundo a tabela 3.16 a profundidade da cratera para a posição plana e polaridade reversa mede $(1,68 \pm 0,23)$ mm e $(1,93 \pm 0,25)$ mm , respectivamente. Já para a profundidade na posição não plana e polaridade direta os valores são $(2,03 \pm 0,36)$ mm e $(1,96 \pm 0,37)$ mm , respectivamente.

Comparando-se os pares de medidas percebe-se uma tendência a uma profundidade de cratera na ponta do eletrodo maior para o segundo par. Com isso, e com o tipo de transferência, os respingos são mais restringidos na posição não plana e polaridade direta.

4.3) Eletrodo revestido AWS E7018.

Este tipo de revestimento gera uma escória mais viscosa e mais abundante que o revestimento rutilico.

A escória deste tipo de eletrodo é básica e pode ser chamada de escória curta [19,106,109], isto é, uma pequena diminuição da temperatura causa um aumento brusco na viscosidade.

Há indícios de que as gotas possuem bolhas de gás no seu interior [12,77]. Esse fato pode ser confirmado pela tabela

2.25 e pela figura 4.25 . A tabela 2.25 mostra a densidade e a porosidade aparente da gota em função do diâmetro da gota. A figura 4.25 mostra a foto de uma ponta de eletrodo com uma gota um pouco antes da transferência.

O resultado da figura 4.25 foi observado em um número grande de pontas de eletrodo. Observar que a geometria da bolha de gás é bem deformada.

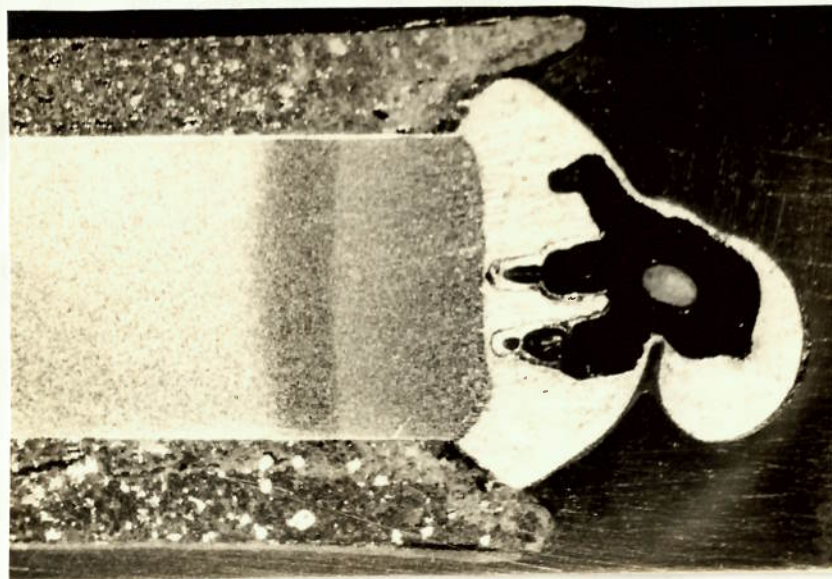


Fig. 4.25 - Fotografia de uma gota na ponta de um eletrodo AWS E7018 com uma bolha de gás no seu interior. Dados : 150 A, 25 V, CCPD, 5 mm de diâmetro , posição plana. Ataque nital 1,5% . Aumento 4 X.

O tipo de transferência é similar ao do eletrodo E6013. A diferença está na frequência de curto-circuito que é menor [13,19,36,78,107] e o tamanho da gota que é maior. O diâmetro característico médio da gota é de 2,97 mm de acordo com a tabela 3.13. Os valores encontrados na literatura estão na faixa de 2,0

a 3,0 mm [13,57,77,85,108,110]. A atmosfera do arco é oxidante [12,88,90] devido a presença de aproximadamente 46% de CO_2 em volume [88]. Na temperatura da coluna do arco esse CO_2 decompõe-se em CO e O [71]. Grande parte desse oxigênio está na forma de $[\text{O}]_2$ [111], que é bastante reativo.

4.3.1) Diâmetro característico da gota metálica.

4.3.1.1) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).

Ao se passar do eletrodo de 4,0 mm de diâmetro para o de 5,0mm de diâmetro observou-se um aumento no tamanho característico da gota.

A discussão é análoga ao item 4.2.1.3 , porém com diferenças quanto as características da escória e da atmosfera do arco.

A tabela 2.5 mostra que o revestimento dos eletrodos básicos possuem Fe-Si na sua formulação. A função do silício é combinar-se com o oxigênio dissolvido na gota, diminuindo o seu teor na mesma. O produto da desoxidação é provavelmente SiO que é evaporado no arco [94]. Esse SiO combina-se posteriormente com o CO e com o $[\text{O}]$ presentes na atmosfera do arco formando fumos que são despreendidos durante a soldagem.

A região onde o arco envolve a gota funciona como um local preferencial para a entrada dos elementos dissociados e ionizados no arco [94]. Devido a isso o teor de oxigênio dissolvido é maior que na região da gota em contato com a alma, gerando um gradiente de tensão superficial na gota. Esse gradiente acentua o efeito Marangoni.

Com relação ainda a efeitos na tensão superficial deve-se lembrar que a escória básica ajuda a abaixar o teor de enxofre e

fósforo na gota. A diminuição desses elementos também aumenta a tensão superficial da gota, acentuando ainda mais o efeito Marangoni.

Devido a esses aumentos na tensão superficial, a força devido a tensão superficial favorece a formação do pescoço junto com a circulação da escória. A força de compressão começa a agir até chegar em um ponto onde ocorre o curto-circuito e a gota é transferida como na figura 4.22.

4.3.1.2) Tratamento D (polaridade).

A mudança da polaridade reversa (+) para a direta (-) causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

A diferença de comportamento com os outros tipos de eletrodos está na presença de fluorita na composição do revestimento. A fluorita dissocia-se no arco formando ions F^- . Segundo Wegrzyn [41,90,112] esses ânions fluoreto dificultam a emissão de elétrons e a tendência deles é movimentar-se para o anodo.

Acredita-se, porém, que uma parte desses ânions fiquem na mancha catódica. A mancha catódica deve ter algumas camadas de ions positivos [3,113]. Essas camadas são compostas de átomos cujos elétrons acabaram de ser emitidos. Essa região é extremamente quente e está circundada por uma escória rica em fluorita. Pode haver a evaporação dela, uma vez que a sua temperatura de ebulição é de 2510 C [114]. Acaba-se criando uma região em volta da mancha catódica que é uma fonte de ânions fluoreto. Uma parte desses ânions acaba combinando com os átomos instantaneamente positivos, diminuindo a área da mancha catódica. A outra parte acaba compondo a atmosfera do arco e movimentando-se para o

anodo. A figura 4.26 esquematiza este efeito.

A figura 4.26(a) mostra que os ânions fluoreto ainda não combinaram com os ions positivos que compõe a mancha catódica. Na figura 4.26(b) ocorre a combinação e a consequente diminuição da mancha catódica. A emissão de elétrons fica mais difícil uma vez que os ânions fluoreto perturbam eletricamente a mancha catódica. A dificuldade na emissão de elétrons na mancha catódica foi prevista por Wegrzyn [41,90,112].

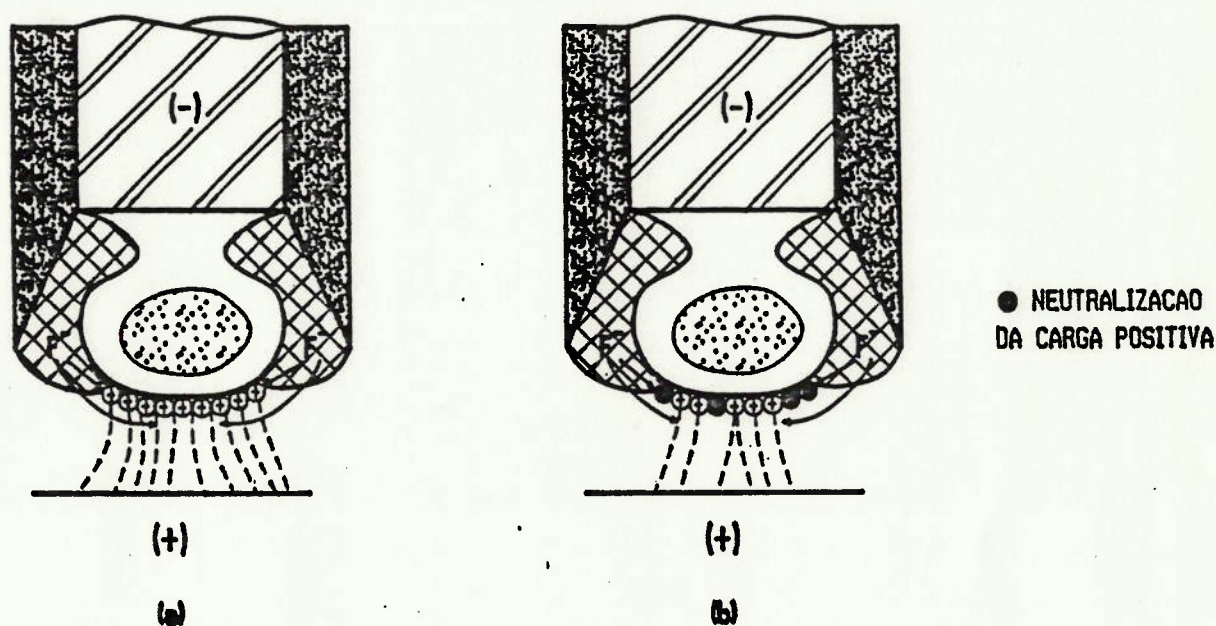


Fig. 4.26 - Efeito do ânion fluoreto na diminuição da mancha catódica.

Por este modelo a densidade de corrente no catodo aumenta, aumentando a temperatura do arco. A força devido a evaporação metálica aumenta deformando a superfície da gota e gerando um movimento ondulatório. Como a escória é viscosa ela pode restringir um pouco a mobilidade da mancha catódica [11].

A tensão superficial da gota associada com a força viscosa gerada pela escória, a tensão superficial entre a gota e a alma e as circulações presentes favorecem a formação do pescoço. Essas forças predominam nos estágios iniciais da transferência.

Com a formação do pescoço a força de compressão começa a agir. No momento do curto-circuito o pescoço é evaporado e a gota transferida com a bolha de gás no seu interior, conforme pode ser observado na fig. 4.22 .

4.3.1.3) Interação BCD (corrente de soldagem+posição de soldagem+polaridade).

Notou-se uma diminuição no tamanho característico da gota quando se passa de 150 A, posição plana e polaridade reversa (+) para 200 A, posição não plana e polaridade direta (-).

A discussão é análoga a do item 4.2.1.2 . A diferença é que a força devido a evaporação metálica é mais intensa. Além disso, a circulação devido a força de compressão é aumentada com o aumento na densidade de corrente na polaridade direta, conforme discussão anterior.

4.3.1.4) Tratamento E (corrente de soldagem).

O aumento da corrente de soldagem de 150 para 200 A diminui o diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é similar ao item 4.2.1.1 . No caso da escória do eletrodo básico menos que 0,2% da corrente de soldagem total é conduzida pela escória [78].

Deve-se lembrar ainda que os efeitos das forças geradas pela viscosidade e pelas tensões superficiais são mais acentuados

para o eletrodo básico.

4.3.1.5) Interação ABC (diâmetro do eletrodo+corrente de soldagem+posição de soldagem).

Observou-se uma diminuição do diâmetro característico da gota quando se passa de 4,0 mm de diâmetro do eletrodo, 150 A e posição plana para 5,0 mm de diâmetro, 200 A e posição não plana.

A temperatura da gota é maior para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro. Por outro lado a força devido a evaporação metálica e a força devido a tensão superficial entre a gota e a alma são maiores para o eletrodo de 5,0 mm de diâmetro.

O aumento da força devido a tensão superficial favorece a formação do pescoço enquanto que a força devido a evaporação metálica deforma e movimenta a superfície da gota.

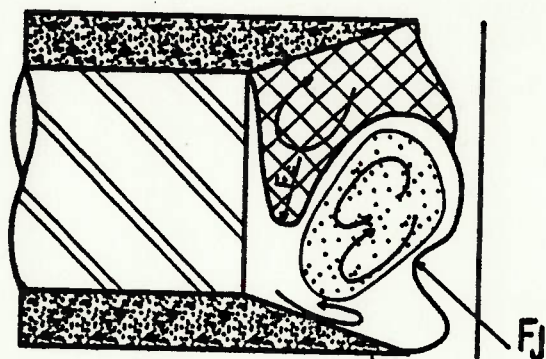


Fig. 4.27 - Efeito combinado da força de compressão, da força devido a evaporação metálica e das circulações na evaporação da parede da gota.

A bolha de gás expande-se no interior da gota. A força devido a evaporação metálica associada as circulações acabam por ajudar a diminuir a parede da gota na posição não plana. A força de compressão começa a agir e no momento do curto-circuito a corrente de soldagem é aumentada e a parede da gota acaba sendo evaporada. A figura 4.27 mostra este efeito.

4.3.1.6) Interação AD (diâmetro do eletrodo+polaridade).

Notou-se uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica quando se passa de 4,0 mm de diâmetro e polaridade reversa (+) para 5,0 mm de diâmetro e polaridade direta (-).

O efeito é similar ao discutido no item 4.3.1.5 . Neste caso o aumento da força devido a evaporação metálica é devido a troca de polaridade e não há mudança de posição de soldagem.

4.3.1.7) Tratamento C (posição de soldagem).

A passagem da posição plana para a não plana causa uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica.

Neste caso o afilamento da parede é devido as circulações presentes. Acaba ocorrendo o mesmo fenômeno mostrado na figura 4.27 .

4.3.1.8) Interação AC (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem).

Observou-se um aumento no diâmetro característico da gota metálica quando se troca do eletrodo de 4,0 mm de diâmetro e posição plana para 5,0 mm de diâmetro e posição não plana.

A discussão é semelhante a do item 4.2.1.6 . A diferença é

que não foi observado até o presente momento a formação do segundo arco para o eletrodo básico.

4.3.1.9) Interação CD (posição de soldagem+polaridade).

A mudança da posição plana e polaridade reversa (+) para a posição não plana e polaridade direta (-) causa um aumento no diâmetro característico da gota metálica.

A discussão é análoga ao item 4.2.1.4 . Neste caso também não foi observado a formação do segundo arco.

4.3.1.10) Interação ACD (diâmetro do eletrodo+posição de soldagem+polaridade).

Notou-se um aumento no diâmetro característico da gota quando se passa do eletrodo de 4,0 mm de diâmetro, posição plana e polaridade reversa (+) para 5,0 mm de diâmetro, posição não plana e polaridade direta (-).

Conforme já foi discutido, o efeito do aumento do diâmetro do eletrodo é mais marcante na circulação da gota que a troca de polaridade. Portanto a velocidade de circulação da gota é maior para o eletrodo de 4,0 mm de diâmetro.

A força devido a tensão superficial favorece a formação do pescoço para o eletrodo de 5,0 mm de diâmetro junto com as circulações. Durante o curto-circuito a gota é transferida de uma maneira parecida com a mostrada na figura 4.22 .

4.3.1.11) Interação BD (corrente de soldagem+polaridade).

A passagem da polaridade reversa (+) e 150 A para polaridade

direta (-) e 200 A acarreta uma diminuição no diâmetro característico da gota metálica.

A circulação devido a força de compressão é duplamente acentuada com o aumento da corrente de soldagem e com a troca de polaridade. A circulação na escória também é acentuada com o aumento de temperatura gerado por essas mudanças.

Associando-se os efeitos das circulações com o aumento da força devido a evaporação metálica a parede da gota acaba afinando e a força de compressão começa a agir e ocorre a transferência como mostrada na figura 4.19 .

4.3.1.12) Interação BC (corrente de soldagem+posição de soldagem).

Observou-se uma diminuição no diâmetro característico da gota quando se passa de 150 A e posição plana para 200 A e posição não plana.

O aumento da corrente causa um aumento na velocidade de circulação e na temperatura da gota. Esse aumento de temperatura acentua a circulação da escória. Acaba ocorrendo uma transferência conforme a figura 4.27 .

4.3.2) Quantidade de respingos.

4.3.2.1) Tratamento A (diâmetro do eletrodo).

Ao aumentar o diâmetro do eletrodo tem-se uma diminuição na quantidade de respingos.

A discussão é análoga ao item 4.3.1.1 . Além disso a profundidade da cratera na ponta do eletrodo é maior para o eletrodo de

5,0 mm de diâmetro, conforme mostra a tabela 3.16 . Isso faz com que os respingos sejam mais direcionados.

4.3.2.2) Interação ABCD (diâmetro do eletrodo+corrente de soldagem+posição de soldagem+polaridade).

A passagem de 4,0 mm de diâmetro, 150 A, posição plana e polaridade reversa (+) para 5,0 mm de diâmetro, 200 A, posição não plana e polaridade direta (-) causa uma diminuição na quantidade de respingos.

De acordo com Woods e Milner [99] a velocidade de circulação é diretamente proporcional ao produto entre a densidade de corrente e a corrente de soldagem. Além disso há um acréscimo na velocidade de circulação quando se troca para a polaridade direta.

Associando esse efeito com o aumento de temperatura na polaridade direta e com a mudança para a posição não plana causa um efeito como o da figura 4.27 . A partir daí a discussão é análoga a do item 4.3.1.10 .

4.3.2.3) Interação EC (corrente de soldagem+posição de soldagem).

Notou-se um aumento na quantidade de respingos quando se aumenta a corrente e passa da posição plana para a não plana.

Devido ao efeito discutido em 4.3.1.12 há a formação dos respingos. Como a cratera na ponta do eletrodo está na posição não plana ela também restringe menos os respingos.

5) CONCLUSÕES.

Para a técnica experimental, materiais e equipamentos utilizados é possível concluir que :

5.1) As gotas possuem porosidade interna para os três tipos de revestimentos estudados.

5.2) A transferência por explosão é predominante para os três tipos de revestimentos estudados. Esse fato é evidenciado pela heterogeneidade da distribuição do tamanho das gotas.

5.3) Para o eletrodo E6011 a polaridade é a variável de processo que mais influi no tamanho da gota e na quantidade de respingos.

5.4) Para o eletrodo E6013 a corrente de soldagem é a variável de processo que mais influi no tamanho da gota e na quantidade de respingos.

5.5) Para o eletrodo E7018 o diâmetro da alma do eletrodo é a variável de processo que mais influi no tamanho da gota e na quantidade de respingos.

5.6) A polaridade tem um efeito contrário ao observado para o eletrodo E7018. Esse efeito é devido a presença de fluorita no seu revestimento.

5.7) O eletrodo com arco mais estável é o E6013, porque consegue aliar um tamanho de gota relativamente pequeno com uma quantidade de respingos menor comparado com os outros dois eletrodos.

5.8) Para a abordagem empregada conseguiu-se efetuar uma boa estimativa dos efeitos dos parâmetros de soldagem e suas interações no desempenho dos eletrodos estudados.

6) SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.

Sugere-se como estudos complementares os seguintes tópicos :

6.1) Aprofundar o estudo das variáveis e interações significativas na transferência metálica dos eletrodos estudados.

6.2) Estudo da transferência metálica em corrente alternada.

6.3) Estudo da transferência metálica por deposição sobre o disco de cobre e com oscilograma para constatar a presença das explosões, associar o tempo de curto-circuito ao tamanho de gota e verificar a ocorrência do arco duplo para o eletrodo rutilico com alma de aço efervescente.

6.4) Repetir a técnica utilizada para um eletrodo com revestimento ácido.

6.5) Repetir a técnica utilizada para eletrodos com alma de aço inoxidável com revestimentos rutilico e básico e com eletrodos sintéticos.

7) BIBLIOGRAFIA.

- 1) American Welding Society. Welding handbook : welding technology, 8a ed., editor Connor, L.P., Estados Unidos . American Welding Society. 1987.
- 2) Szekely, J. An overview of plasma processing. In : Szekely, J. e Apelian, D. ed., Plasma processing and synthesis of materials symposium. Boston, Massachusetts, Estados Unidos. Nov. 1983.
- 3) Jackson, C.E . The science of arc welding - part I, II e III. Welding Journal, 39(4) : 129s-140s, abril 1960 ; 39(5) : 177s-190s, maio 1960 ; 39(6) : 225s-230s, junho 1960.
- 4) Lancaster, J.F. The physics of welding, 2a ed. , Inglaterra, Pergamon Press, 1986.
- 5) Glickstein, S.S. Basic studies of the arc welding process. IN : David, S.A. ed., ASM, Conference Trends in Welding Research in the United States. New Orleans Louisiana Estados Unidos, 16-18 nov. 1981.
- 6) Milner, D.R.; Apps, R.L. Introduction to welding and brazing, 1a ed. , Inglaterra, Pergamon Press, 1978.
- 7) Dennerly, F. ; Villeminot, F. Differents aspects de l'arc electrique. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-131-67 .
- 8) Sprangen, W ; Lengyel, B.A. Physics of the arc and the transfer of metal in arc welding. Welding Journal, 22(1) : 2s-42s, jan. 1943.
- 9) van Adrichem, Th.J. Metal transfer. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-171-69.
- 10) Waszink, J.W. ; Graat, L.H.J. Experimental investigation of the

- forces acting on a drop of weld metal. Welding Journal, 62(4) : 108s-116s, abril 1983.
- 11) Lancaster, J.F. The transfer of metal from coated electrodes. Metal Construction and British Welding Journal, 3(10) : 370-373, out. 1971.
- 12) Boniszewski, T. Manual metal arc welding - old process new developments-part II. Metallurgist and material technologist, 11(11) : 640-643, nov. 1979.
- 13) Essers, W.G. ; Jelmorini, G. ; Tichelaar, G.W. . Metal transfer form coated electrodes. Metal Construction and British Welding Journal, 3(4) : 151-154, abr. 1971.
- 14) Bentley, K.P. Pulsed arc welding of thick QT.35 plate. Welding and Metal Fabrication, 34(1) : 10-16, jan. 1966.
- 15) I.I.W. Classification des divers modes de transfert du métal en soudage à l'arc. Documento do Instituto Internacional de Soldagem ng XII-535-77.
- 16) Schellhase, M. Der Schweisslichtbogen - ein technologisches Werkzeug, 1a ed. , Duesseldorf Alemanha Federal, DVS, 1980.
- 17) American Society for Metals. Metals handbook : welding, brazing and soldering. 9a ed., coord. Nippes, E.F. .Ohio Estados Unidos. ASM, pg 153-181 1983.
- 18) Lancaster, J.F. Metallurgy of welding, brazing and soldering, 1a ed., Inglaterra, American Elsevier Publishing Co., 1965.
- 19) Boese, U. Das Verhalten der Staehle beim Schweiessen, 1a ed., Duesseldorf Alemanha Federal, DVS, 1980.
- 20) Keene, B.J. e colaboradores. Effects of interaction between surface active elements on the surface tension of iron. Canadian Metallurgy Quarterly, 21(4) : 393-403, dez. 1982.

- 21) Creedy, F. e colaboradores. Forces of electric origin in the iron arc. Transactions of AIEE, 79 part II : 191-194, dez. 1932.
- 22) Sack, J. Overhead welding. Philips Technical Review, 4(1) : 9-15, jan. 1939.
- 23) Maecker, H. Plasmastromungen in Lichtboegen infolge eigenmagnetischer Kompression. Zeitschrift fuer Physik vol. 141, pg 198-216, 1955.
- 24) Greene, W.J. An analysis of transfer in gas-shielded welding arcs. Electrical Engineer, 51(12) : 852-854, dez. 1932.
- 25) Amson, J.C. Lorentz force in the molten tip of an arc electrode. British Journal of Applied Physics, 16(8) : 1169-1179, agosto 1965.
- 26) Lancaster, J.F. Axial magnetic pressure and force in a non-flowing liquid conductor. Documento do Instituto Internacional de Soldagem ng 212-99-66.
- 27) Murty, G.S. Instability of a conducting fluid cylinder ... coaxial conducting cylinder. Arkiv fuer Physik, 19(35) : 483-497, 1960.
- 28) Murty, G.S. Instability of conducting fluid cylinder due to axial current. Arkiv fuer Physik, 18(14) : 241-250, 1960.
- 29) Lancaster, J.F. Metal transfer in fusion welding. IN : The Welding Institute. Symposium on Arc Physics and Weld Pool Behaviour. Londres Inglaterra . 8-10 maio 1979.
- 30) Needham, J.C. ; Cooksey, C.J. ; Milner, D.R. Metal transfer in inert-gas shielded-arc welding. British Welding Journal, 7(2) : 101-114, fev. 1960.
- 31) Wilkinson, J.B. ; Milner, D.R. Heat transfer from arcs. British Welding Journal, 7(2) : 115-128, fev. 1960.

- 32) Cooksey, C.J. ; Milner, D.R. Metal transfer in gas-shielded arc welding. IN : The Welding Institute. Symposium of Physics of the Welding Arc. Londres Inglaterra. 29 out. a 2 nov. 1966.
- 33) Conrady, H. Der Werkstoffuebergang im Schweisslichtbogen. Elektroschweissung, 11(7) : 109-114, jul. 1940.
- 34) von Engel, A. ; Robson, A.E. Excitation theory of arcs with evaporating cathodes. Proceedings Royal Society of London, 243(1233) série A : 217-236, dez. 1957.
- 35) Lancaster, J.F. The dynamics of the plasma jet in a free-burning arc. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-87-66.
- 36) Hummitzsch, W. Werkstoffuebergang im Schweisslichtbogen. IN : Koch, H. Handbuch der Schweisstechnologie, 1a ed., Duesseldorf Alemanha Federal, DVS, 1961.
- 37) Doan, G.E. IN : discussão de Creedy, F. e colaboradores. Forces of electric origin in the iron arc. Transactions of AIEE, 79 part II : 191-194, dez. 1932.
- 38) Larson, L.J. Metal transfer in the metallic arc. Welding Journal, 21(2) : 107s-112s, fev. 1942.
- 39) Fast, J.D. The part played by oxygen and nitrogen in arc welding. Philips Technical Review, 10(1) : 26-34, jul. 1948.
- 40) Erdmann-Jesnitzer, F. ; Rehfeldt, D. Investigations of droplet transfer from coated electrodes. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-244-72.
- 41) Wegrzyn, J. Specific properties of covered-electrode arc. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-292-73.
- 42) Erdmann-Jesnitzer, F. Cinetic of CO-reaction, influence of the C concentration and its contribution of the CO-melting

characteristic of welding wire. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-405-77.

43) Erdmann-Jesnitzer, F. Considerations on spontaneous CO-reactions of coated electrodes. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-412-77.

44) Ishizaki, K. ; Oishi, A. ; Kumagai, R. A method of evaluating metal transfer characteristics of welding electrodes. IN : The Welding Institute. Symposium of Physics of the Welding Arc. Londres Inglaterra. 29 out. a 2 nov. 1966.

45) Mercer, J.F. Trends in welding consumables : a preliminary centennial assessment. IN : International Institute of Welding. Conference in Trends in Steels and Consumables for Welding. Londres Inglaterra. 13-16 nov. 1978.

46) Miskoe, W.I. The centenary of modern welding 1885-1985 . . . a commemoration. Welding Journal, 65(4) : 19-24, abr. 1986.

47) Inglaterra, British patent no 16952 . Kjellberg, O. Improvements in or relating to electric welding or soldering. 24 jul. 1907.

48) Inglaterra, British patent no 3762 . Kjellberg, O. 1912 . ref. 7 citada na referencia 45.

49) Morgan, D.W. Classification and use of mild steel covered electrodes. Welding Journal, 55(12) : 1035-1038, dez. 1976.

50) Richter, J.I. ref. 12 citada na referencia 36.

51) Becken, O. Metal transfer from welding electrodes. Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-179-69.

52) Becken, O. Werkstoffuebergang bei Schweisselektroden. Shweissen und schneiden, 22(11) : 478-479, nov. 1970.

53) Ludwig, L.R. ; Silverman, D. Arc stability with DC welding

- generators. Transactions of AIEE, 52(12) : 987-996, dez. 1933.
- 54) Wyant, R.A. e colaboradores. An investigation of methods for evaluating welding arc stability and their application. Welding Journal, 27(10) : 502s-514s, out. 1948.
- 55) Pokhodnya, I.K. e colaboradores. Study of alternating current arc stability. IN : The Welding Institute. Symposium on Arc Physics and Weld Pool Behaviour. Londres Inglaterra . 8-10 maio 1979.
- 56) Pokhodnya, I.K. e colaboradores. Research into the special features of metal transfer and arc running stability in welding using basic-coated electrodes. Automatic Welding, 37(4) : 3-6, abr. 1984.
- 57) Pokhodnya, I.K. e colaboradores. Relationship between short-circuiting time and mass of electrodes droplets. Automatic Welding, 36(9) : 28-31, set. 1983.
- 58) Zaruba, I.I ; Dimenko, V.V. Effects of droplet metal transfer on the stability of the AC welding arc. Automatic Welding, 36(12) : 15-20. dez. 1983.
- 59) Torres, O.F. Notas de aula do curso PRO-710 "Delineamento de experimentos", EPUSP, 1982.
- 60) Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments, 1ª ed., Estados Unidos, John Willey & Sons Inc., 1976.
- 61) Duckworth, W.E. Statistical techniques in technological research, 1ª ed., Estados Unidos, Methuen & Co Ltd., 1968.
- 62) Natrella, M.G. Experimental statistics, 1ª ed., Estados Unidos, NBS, 1962.
- 63) Duckworth, W.E. ; Taylor, P.R. ; Leak, D.A. Ausforming behaviour of En24, En30B and an experimental 3%Cr-Ni-Si steel. Journal of

- Iron and Steel Institute, 202(2) : 135-142, fev. 1964.
- 64) Hopkins, A.D. ; Holland, N.H. A statistically designed experiment to determine ... distortion in case-hardening, Journal of Iron and Steel Institute, 200(4) : 308-316, abr. 1962.
- 65) Ganguly, R.I. ; Dhindaw, B.K. Application of statistical design of experiments to strengthening behaviour of thermomechanically processed Al-Mg-Si-Cu alloys, Metals Technology, 5(4) : 114-117, abr. 1978.
- 66) Ganguly, R.I. ; Dhindaw, B.K. ; Dhar, P.R. Application of statistical design ... of strengthening characteristics of Al-Zn-Mg-Si alloys, Metals Technology, 4(2) : 57-61, fev. 1977.
- 67) Box, G.E.P. e colaboradores. Statistics for experimenters, 1a ed., Estados Unidos, John Willey & Sons Inc., 1978.
- 68) Winer, B.J. Statistical principles in experimental design, 2a ed., Estados Unidos, McGraw-Hill Book Co., 1971.
- 69) Kempthorne, O. The design and analysis of experiments, 3a impr., Estados Unidos, John Willey & Sons Inc., 1962.
- 70) anônimo. Electrode coating secrets - data sheet no 383, Welding Engineer, 57(7) : 30, jul. 1972.
- 71) anônimo. Electrode coating functions - data sheet no 377, Welding Engineer, 57(1) : 46, jan. 1972.
- 72) American Society for Metals. Metals handbook : welding, brazing and soldering. 9a ed., coord. Nippes, E.F. .Ohio Estados Unidos. ASM, pg 75-95 1983.
- 73) American Welding Society. AWS A5.1 - Specification for covered carbon steel arc welding electrodes, Estados Unidos, ASTM, 1983.
- 74) Deutsch Industrie Normung. DIN 1913 - parte 1 Covered

electrodes for the joint welding of unalloyed and low alloy steel, Alemanha Federal, DVS, 1984.

75) Hilpert, A. Material transference in the welding arc, Welding Journal, 8(12) : 21-23, dez. 1929.

76) Sack, J. How does a welding electrode fuse ?, Philips Technical Review, 1(1) : 26-29, jan. 1936.

77) van der Willigen, P.C. ; Defize, L.F. The determination of droplet size in arc welding by high-speed cinematography, Philips Technical Review, 15(1) : 122-128, out. 1953.

78) Klimant, U. Beitrag zum Werkstoffuebergang beim Lichtbogenschweissen mit dick umhuelkten Elektroden, Documento do Instituto Internacional de Soldagem no 212-113-67.

79) Erdmann-Jesnitzer, F.; Refeldt, D. Ursachen unterschiedlichen Abschmelzcharakteristik umhuelter Stabelektroden, Schweiss-technik (Wien), 26(8) : 169-175, ago. 1972.

80) Doan, G.E. ; Weed, J.M. Metal deposition in electric arc welding, Electrical Engineer, 51(12) : 852-854, dez. 1932.

81) Datta, G.L. Arc-length, arc-voltage and mode of metal transfer in metal-arc welding with coated electrodes, Journal of the Institution of Engineering (India), vol. 53 parte ME4, pg. 181-187, mar. 1973.

82) Bykov, A.N. ; Erokhin, A.A. The nature of metal transfer when welding with coated electrodes, Welding Production, 13(2) : 15-19, fev. 1960.

83) Sack, J. Welding and welding rods, Philips Technical Review, 2(5) : 129-135, mai. 1937.

84) Shuyakov, V.I. ; Razikov, N.M. A method for the artificial separation of droplets of electrode metal in arc welding,

Automatic Welding, 32(12) : 43, dez. 1979.

85) Sunnen, J.F. Electrical parameters during metal transfer. IN : The Welding Institute. Symposium of Physics of the Welding Arc. Londres Inglaterra. 29 out. a 2 nov. 1966.

86) American Society for Testing Materials. ASTM E-215 - Standard methods of sampling finished lots of metal powders, Estados Unidos, ASTM, 1983.

87) American Society for Testing Materials. ASTM C-357 - Standard test method for bulk density of granular refractory materials, Estados Unidos, ASTM, 1983.

88) Fast, J.D. The function of the coating of welding rods, Philips Technical Review, 10(4) : 114-122, out. 1948.

89) ter Berg, J. ; Larigaldie, A. Melting rate of coated electrodes, Welding Journal, 31(5) : 268s-271s, mai. 1952.

90) Wegrzyn, J. Arc properties in manual welding with coated electrodes, Metal Construction, 12(7) : 326-333, jul. 1980.

91) Erokhin, A.A. ; Rykalin, N.N. Heat balance of electrode droplet melting process in arc welding. IN : The Welding Institute. Symposium of Physics of the Welding Arc. Londres Inglaterra. 29 out. a 2 nov. 1966.

92) Szekely, J. Fluid flow phenomena in metals processing, 1a ed., Estados Unidos, Academic Press, 1979.

93) Johnson, A.I. ; Hamielec, A.E. ; Houghton, W.T. Mass transfer with chemical reaction from single gas bubbles, A.I.Ch.E Journal, 13(2) : 379-383, mar. 1967.

94) Hiltunen, V. ; Pietikaeinen, J. Investigations and observations on material transfer in metal-inert-gas (MIG) welding. IN : The Welding Institute. Symposium on Arc Physics and Weld Pool

Behaviour. Londres Inglaterra . 8-10 maio 1979.

95) Waszink, J.H. ; van den Heuvel, J.P.M. Heat generation and heat flow in the filler metal in GMA welding, Welding Journal, 61(8) : 269s-282s, ago. 1982.

96) Waszink, J.H. ; Piena, M.J. Thermal processes in covered electrodes, Welding Journal, 64(2) : 37s-48s, fev. 1985.

97) Sprarangen, W. ; Claussen, G.E. Coatings and fluxes in the welding of steel, Welding Journal, 18(5) : 153-165, mai. 1939.

98) Sternling, C.V. ; Scriven, L.E. Interfacial turbulence : hydrodynamic instability and the Marangoni effect, A.I.Ch.E. Journal, 5(4) : 514-523, dez. 1959.

99) Woods, R.A. ; Milner, D.R. Motion in the weld pool in arc welding, Welding Journal, 50(4) : 163s-173s, abr. 1971.

100) Sozou, C. On fluid motions induced by an electric current source, Journal of Fluids Mechanics, vol. 46, parte 1 : 26-31, jan. 1971.

101) Athey, D.R. A mathematical model for fluid flow in a weld pool at high currents, Journal of Fluid Mechanics, vol. 98, parte 4 : 787-801, jun. 1980.

102) El-Kaddah, N. ; Szekely, J. The electromagnetic force field, fluid flow and temperature profiles in levited metal droplets, Metallurgical Transactions, 14B(3) : 401-410, set. 1983.

103) Davies, J.T. ; Rideal, E.K. Interfacial phenomena, 2a ed., Estados Unidos, Academic Press, 1963.

104) Adam, N.K. Physics and chemistry of surfaces, 3a ed., Inglaterra, Oxford University Press, 1941.

105) Adamson, A.W. Physical chemistry of surfaces, 2a ed., Estados Unidos, Interscience Publishers, 1960.

- 106) Rosenqvist, T. Principles of extractive metallurgy, 1a ed., Estados Unidos, McGraw-Hill Book Co., 1974.
- 107) Dorn, L. ; Rippl, P. A study of metal transfer in DC and AC manual arc welding, Schweissen und schneiden, 37(12) : 32-37, dez. 1985.
- 108) Lundqvist, B. Sandvik welding handbook, 1a ed., Suécia, Editora Sandvik AB, 1977.
- 109) -----, Schlacke atlas, 1a ed., Duesseldorf Alemanha Federal, editado por Verein Deutscher Eisenhuettenleute, 1981.
- 110) Almanar-Naess, M. Introduction au soudage à l'arc, Soudage et Techniques Connexes, 19(1/2) : 50-69, jan./fev. 1965.
- 111) Dembovsky, V. Plasma metallurgy - the principles, 1a ed., Tchecoslovàquia, Elsevier Science Publishing Co., 1985.
- 112) Wegrzyn, J. The covered-electrode arc. IN : The Welding Institute. Intern. Conf. on Weld Pool Chemistry and Metallurgy. Londres Inglaterra. 15-17 abril 1980.
- 113) Cobine, J.D. Gaseous conductors - theory and engineering, 2a ed., Estados Unidos, Dover Publication Inc., 1958.
- 114) Kubaschewski, O. ; Alcock, C.B. Metallurgical thermochemistry, 5a ed., Inglaterra, Pergamon Press, 1979.

Anexo A - Curva característica está-
tica do equipamento
de soldagem utilizado.

