

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM MOLHADA COM
ARAMES TUBULARES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ERWIN WERNER TEICHMANN

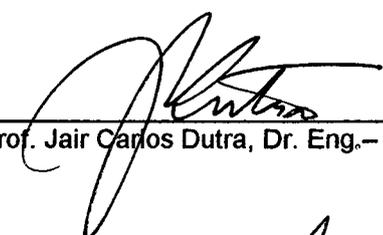
FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 2000

CONTRIBUIÇÃO AO DESENVOLVIMENTO DA SOLDAGEM MOLHADA COM
ARAMES TUBULARES

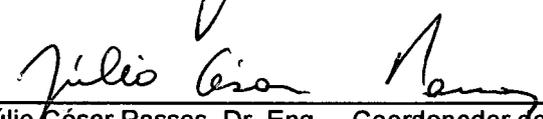
ERWIN WERNER TEICHMANN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA (ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
FABRICAÇÃO) E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. – Orientador

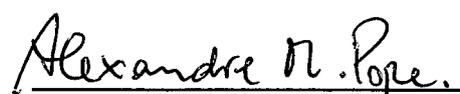


Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

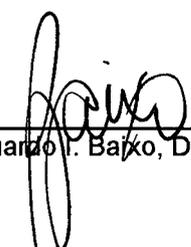
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Augusto J. de A. Buschinelli, Dr. Ing. – Presidente



Alexandre M. Pope, Ph. D. – Membro



Carlos Eduardo L. Baixo, Dr. Eng. – Membro

“Um ser humano é parte do todo por nós chamado de universo, uma parte limitada no tempo e no espaço. Nós experimentamos a nós mesmos, nossos pensamentos e sentimentos como parte separada do todo. Uma ilusão ótica de consciência. Esta ilusão é um tipo de prisão para nós, restringindo-nos aos nossos desejos pessoais e a afeição apenas às poucas pessoas que nos são próximas. Nossa tarefa tem que ser libertarmo-nos desta prisão ampliando o nosso círculo de compaixão para abraçar a todas as criaturas e a natureza em toda a sua beleza... Se a humanidade pretende sobreviver, ela precisa de uma maneira substancialmente nova de pensar.” - *Albert Einstein*

**Ao meu sobrinho: José Augusto
e à minha esposa Alice.**

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação não só durante a realização deste trabalho, mas em todo o período gratificante que passei no LABSOLDA;
- A todos os funcionários do LABSOLDA e do Departamento, Jean, Valério, Denise, Profa. Cleide, Sr. Irceu, Jair, Lucimar, Prof. Niño cujo apoio foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho;
- Aos Engs. Larry e Raul, pelo apoio no desenvolvimento e montagem dos equipamentos;
- Ao Eng. Carlos Baixo pela orientação e paciência;
- Ao Eng. Alexandre Pope do CENPES/PETROBRAS, pelo apoio técnico e financeiro;
- À ESAB pelo fornecimento de consumíveis;
- Ao CNPq e FINEP pela concessão de bolsas e financiamento.
- Ao estudante e amigo, Gustavo Manzoni, que apesar do pouco tempo que passou entre nós, colaborou muito na construção do protótipo do alimentador de arame e da bancada. Deste convívio sempre prazeroso que tivemos ficaram boas lembranças e ensinamentos (*In Memorium*).

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
SIMBOLOGIA	xv
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	3
2.1 – Justificativas.....	3
2.2 – Objetivos.....	6
3 – SOLDAGEM SUBMARINA	8
3.1 – Soldagem Molhada.....	9
3.1.1 – Eletrodos Revestidos.....	10
3.1.2 – Arames Tubulares.....	13
3.1.3 – TIG e MIG/MAG.....	16
3.1.4 – Soldagem por Fricção.....	20
3.2 – Considerações Sobre a Física do Arco na Soldagem Molhada.....	21
3.3 – Estado da Arte na Soldagem Subaquática Molhada com Arame Tubular.....	26
4 – ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS E DINÂMICAS DE FONTES DE SOLDAGEM	29
4.1 – Fontes de Corrente Constante.....	29
4.2 – Fontes de Tensão Constante.....	31

4.3 – Características Estáticas Utilizáveis em Soldagem Molhada.....	32
5 – DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DO ALIMENTADOR DE	
ARAME PARA A SOLDAGEM MOLHADA	36
5.1 – Concepção do Alimentador.....	36
6 – MONTAGEM DA BANCADA PARA ESTUDO DA SOLDAGEM	
MOLHADA COM ARAME TUBULAR	42
6.1 – Tanque de Soldagem.....	43
6.2 – Montagem do Sistema para Deslocamento Automático de Tocha.....	44
6.3 – Montagem e Calibração dos Sistemas de Aquisição de Dados e Controle da Fonte de Soldagem.....	44
6.3.1 – Montagem do Sistema de Controle das Variáveis de Soldagem.....	45
6.3.2 – Montagem do Sistema de Monitoração das Variáveis de Soldagem.....	47
6.3.3 – Procedimentos de Calibração.....	48
6.4 – Montagem do Retificador Adicional na Fonte de Soldagem INVERSAL 450.....	49
7 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	54
7.1 – Materiais.....	54
7.2 – Fonte de Soldagem.....	55
7.3 – Aquisição e Análise de Dados.....	57
7.4 – Métodos Estatísticos Utilizados.....	58
7.5 – Parâmetros de Soldagem.....	59
7.6 – Medição Geométrica.....	63
7.7 – Avaliação da Taxa de Deposição.....	63
7.8 – Teste de Campo.....	64

7.9 – Análise da Estabilidade do Arco.....	67
7.10 – Medições de Dureza e Microdureza.....	68
7.11 – Avaliação da Tenacidade.....	69
7.12 – Análise da Composição Química do Metal de Solda.....	69
8 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
8.1 – Efeito da Velocidade de Soldagem, Distância Bico de Contato/Peça, Velocidade do Arame e Corrente de Referência sobre a Estabilidade do Arco e Geometria dos Cordões para o Arame E-70 T1.....	71
8.2 – Efeito da Velocidade de Soldagem, Distância Bico de Contato/Peça, Velocidade do Arame e Corrente de Referência sobre a Estabilidade do Arco para o Arame Oxidante.....	77
8.3 – Efeito da Polaridade e da Tensão em Vazio de 130 V Sobre a Estabilidade.....	88
8.4 – Estimativa da Taxa de Deposição.....	91
8.5 – Influência da Característica Estática da Fonte de Soldagem sobre a Estabilidade do Arco na Soldagem Molhada com Arame Tubular.....	92
8.5.1 – Soldagem com Tensão Constante.....	92
8.5.2 – Soldagem com Corrente Constante.....	94
8.5.3 – Soldagem com Controle Adaptativo.....	97
8.6 – Resultados do Teste de Campo.....	97
8.6.1 – Análise do Desempenho dos Equipamentos.....	97
8.6.2 – Soldagem dos Corpos de Prova.....	98
8.7 – Propriedades Mecânicas das Juntas Soldadas.....	101
8.7.1 – Análise da Microestrutura e dos Defeitos Macro e Micrográficos.....	101
8.7.2 – Resultados de Dureza e Microdureza.....	105
8.7.3 – Tenacidade da Junta Soldada.....	108
8.8 – Composição Química do Metal de Solda.....	108

9 – CONCLUSÕES	109
10 – PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1 – Matriz de experimentos dos testes realizados para a verificação da influência da velocidade de soldagem, velocidade do arame e corrente de referência.....	60
Tabela 7.2 – Matriz de experimentos dos testes realizados para a verificação da influência da distância bico de contato-peça, velocidade do arame e corrente de referência.....	60
Tabela 7.3 – Matriz de experimentos dos testes realizados para a verificação da influência da distância bico de contato-peça, tensão em vazio e polaridade.....	61
Tabela 7.4 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem com o arame E-70 T1.....	62
Tabela 7.5 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes de campo com tensão constante.....	66
Tabela 7.6 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes de campo com imposição de corrente.....	66
Tabela 8.1 – Parâmetros de soldagem e resultados da soldagem com o arame E-70 T1.....	72
Tabela 8.2 – Análise de variância de DBCP sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).....	73
Tabela 8.3 – Análise de variância de Vs sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).....	73
Tabela 8.4 – Análise de variância de Iref sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).....	74

Tabela 8.5 – Análise de variância de V_a sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).....	74
Tabela 8.6 – Matriz de experimentos e resultados medidos nos testes realizados para a verificação da influência de V_s , V_a e I_{ref}	77
Tabela 8.7 – Análise de variância de V_s , V_a , IREF e interações entre estes efeitos sobre DPU, %ext e FreqCC.....	78
Tabela 8.8 – Matriz de experimentos e resultados dos testes realizados para a verificação da influência de DBCP, V_a e I_{ref}	85
Tabela 8.9 – Análise de variância de DBCP, V_a , IREF e interações entre estes efeitos sobre DPU, %ext e FreqCC.....	86
Tabela 8.10 – Matriz de experimentos e resultados dos testes realizados para a verificação da influência de DBCP, U_{vazio} e polaridade.....	88
Tabela 8.11 – Análise de variância de DBCP, U_{vazio} , polaridade e interações entre estes efeitos sobre DPU.....	89
Tabela 8.12 – Análise de variância de DBCP, U_{vazio} , polaridade e interações entre estes efeitos sobre %ext.....	89
Tabela 8.13 – Análise de variância de DBCP, U_{vazio} , polaridade e interações entre estes efeitos sobre FreqCC.....	90
Tabela 8.14 – Comparação das estimativas de taxa de deposição para o eletrodo revestido e o arame tubular oxidantes.....	91
Tabela 8.15 – Ensaio realizado com tensão constante.....	93
Tabela 8.16 – Ensaio realizado com imposição de corrente.....	96
Tabela 8.17 – Resultado dos ensaios de microdureza.....	105
Tabela 8.18 – Resultados dos ensaios Charpy a 0 °C.....	108
Tabela 8.19 – Composição química do metal de solda.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Trincas nos enrijecedores da união entre o “riser” e a monobóia.....	4
Figura 3.1 – Soldagem molhada com eletrodo revestido.....	11
Figura 3.2 – Concentração de hidrogênio na soldagem molhada em função do tipo de revestimento do eletrodo revestido.....	12
Figura 3.3 – Princípio do método de proteção do arco utilizado para a soldagem TIG em ambiente molhado.....	17
Figura 3.4 – Exemplo de bocal desenvolvido para operacionalizar a soldagem molhada com o processo MIG/ MAG.....	18
Figura 3.5 – Oscilogramas de tensão e corrente indicando o aumento da ocorrência de curtos-circuitos anormais com a elevação da profundidade de soldagem.....	23
Figura 3.6 – Taxa de resfriamento na soldagem molhada em diferentes posições ao longo do depósito.....	24
Figura 3.7 – Soldagem com arame tubular no tanque do TWI, Inglaterra.....	27
Figura 4.1 – Gráfico de característica estática típica de uma fonte eletromagnética de corrente constante.....	30
Figura 4.2 – Gráfico de característica estática da fonte eletrônica utilizada nos testes de soldagem molhada com arame tubular.....	31
Figura 4.3 – Característica estática de uma fonte de tensão constante.....	32
Figura 4.4 – Oscilograma de corrente e tensão de soldagem molhada com arame tubular utilizando uma fonte de tensão constante.....	33
Figura 4.5 – Oscilograma de corrente de soldagem convencional com eletrodo revestido utilizando um conversor rotativo.....	34

Figura 5.1 – Esquema do alimentador de arame desenvolvido para a soldagem molhada.....	37
Figura 5.2 – Passador utilizado no alimentador.....	40
Figura 5.3 – Foto do cabeçote alimentador mostrando o detalhe da micropistola Curva.....	41
Figura 5.4 – Tocha com micropistola reta.....	41
Figura 6.1 – Vista geral da bancada para soldagem molhada.....	42
Figura 6.2 – Tanque para soldagem automatizada.....	43
Figura 6.3 – Placa de aquisição de dados INTERDATA II.....	45
Figura 6.4 – Oscilograma de soldagem com o arame oxidante e imposição de corrente, mostrando uma extinção do arco.....	50
Figura 6.5 – Foto do retificador adicional.....	51
Figura 6.6 – Esquema de ligação do retificador adicional.....	52
Figura 6.7 – Oscilograma de corrente e tensão mostrando as extinções do arco na soldagem com a fonte de 130 V de tensão em vazio.....	53
Figura 7.1 – Junta em chapa de 19 mm soldada com arame tubular.....	55
Figura 7.2 – Oscilograma de corrente e tensão mostrando o princípio de funcionamento do controle adaptativo de corrente.....	56
Figura 7.3 – Curvas de característica estática tombante para diferentes correntes de referência.....	57
Figura 7.4 – Arquivo texto gerado pelo programa de tratamento de dados.....	58
Figura 7.5 – Macrografia de dois cordões depositados na posição plana através de soldagem molhada com arame tubular.....	63
Figura 7.6 – Vista frontal do tanque de mergulho do SENAI/RJ.....	64
Figura 7.7 – Vista superior do tanque de mergulho do SENAI/RJ.....	65

Figura 7.8 – Soldagem manual na posição plana.....	65
Figura 7.9 – Posição de extração dos corpos de prova para os ensaios de impacto....	69
Figura 8.1 – Comportamento da largura dos cordões em função da velocidade do arame (arames E-70 T1).....	75
Figura 8.2 – Comportamento da altura dos cordões em função da velocidade do arames (arames rutilicos).....	75
Figura 8.3 – Alteração do perfil do cordão com o aumento da velocidade do arame....	76
Figura 8.4 – Comportamento do desvio padrão da tensão em função de I_{ref} e V_s (a) e em função de V_a e V_s (b) para o arame oxidante.....	79
Figura 8.5 – Comportamento do desvio padrão da tensão em função de I_{ref} e de V_a para o arame oxidante.....	79
Figura 8.6 – Relação entre V_a e I_{ref} determinada experimentalmente.....	80
Figura 8.7 – Valores calculados de DPU para diferentes correntes de referência.....	81
Figura 8.8 – Aspecto superficial de cordões soldados com diferentes correntes de referência.....	83
Figura 8.9 – Junta de teste preenchida com passes depositados com corrente de referência de 150 A.....	84
Figura 8.10 – Comportamento do desvio padrão da tensão em função de I_{ref} e DBCP (a) e em função de V_a e DBCP (b) para o arame oxidante.....	87
Figura 8.11 – Comportamento do desvio padrão da tensão em função de U_{vazio} e polaridade para o arame oxidante.....	90
Figura 8.12 – Comportamento do %ext em função de U_{vazio} e polaridade (a) e de FreqCC em função de U_{vazio} e polaridade (b) para o arame oxidante.....	91
Figura 8.13 – Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com tensão constante..	93

Figura 8.14 – Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com imposição de corrente com efeito anti-colagem.....	95
Figura 8.15 - Soldagem com imposição de corrente e polaridade positiva.....	100
Figura 8.16 - Soldagem com imposição de corrente e polaridade negativa.....	100
Figura 8.17 – Análise micrográfica da junta preenchida por soldagem molhada com arame tubular.....	102
Figura 8.18 – Radiografia da junta soldada. No detalhe se percebe uma das inclusões de escória alongadas.....	103
Figura 8.19 – Micrografia mostrando inclusões de escória.....	103
Figura 8.20 – Aspecto superficial da junta soldada.....	104
Figura 8.21 – Foto indicando a posição dos ensaios de dureza.....	105
Figura 8.22 - Posição das medições de microdureza.....	106
Figura 8.23 – Perfil de microdurezas “ α ”.....	107
Figura 8.24 - Perfil de microdurezas “ β ”.....	107

SIMBOLOGIA

%ext	▶ Percentual de tempo de arco extinto sobre o tempo de aquisição
μ	▶ micrometros (10^{-6} m)
A	▶ Ampère
Al	▶ Alumínio
alt	▶ altura
AWS	▶ American Welding Society
Bar	▶ Unidade de pressão, 10 Bar= 1 Mpa (10^6 Pascal)
C	▶ Carbono
cm	▶ centímetros
cm/min	▶ centímetros por minuto (velocidade)
Co	▶ Cobalto
CO ₂	▶ Dióxido de Carbono
Coef. Rao	▶ Fator "F" calculado segundo Rao
Coef. Wilk's	▶ Resultado do teste "Lambda de Wilk's" para análise discriminante
CP	▶ Corpo de prova
Cr	▶ Cromo
Cu	▶ Cobre
DBCP	▶ Distância bico de contato - peça
DPI	▶ Desvio padrão da corrente
DPU	▶ Desvio padrão da tensão
F	▶ Resultado da análise de variância (estatística)
FCAW	▶ Flux Cored Arc Welding (Soldagem a arco com arame tubular fluxado)
Fe	▶ Ferro
FreqCC	▶ Freqüência dos curto circuitos
GL	▶ Grau de Liberdade (estatística)
H	▶ Hidrogênio
HV	▶ Dureza Vickers
I	▶ Corrente
Iarco	▶ Corrente de arco
Icc	▶ Corrente de curto-circuito
Ief	▶ Corrente eficaz

Im	▶ Corrente média
Iref	▶ Corrente de referência
J	▶ Joule
kg/h	▶ quilogramas por hora
larg	▶ largura
larg/alt	▶ relação largura sobre altura
m	▶ metros
m/min	▶ metros por minuto (velocidade)
MAG	▶ Metal Active Gas
MIG	▶ Metal Inert Gas
mm	▶ milímetros
Mn	▶ Manganês
Mo	▶ Molibdênio
ms	▶ milissegundos (10^{-3} m)
MS	▶ Média da soma quadrada (estatística)
Nb	▶ Nióbio
Ni	▶ Níquel
NOAA	▶ National Oceanic and Atmospheric Administration
Numext	▶ Número de extinções
O ₂	▶ Oxigênio
P	▶ Fósforo
penet	▶ penetração
ROV	▶ Remote Operated Vehicle (Veículo remotamente operado)
S	▶ Enxofre
Si	▶ Silício
Sn	▶ Estanho
SQ	▶ Soma quadrada (estatística)
Ti	▶ Titânio
TIG	▶ Tungsten Inert Gas
tmedCC	▶ Tempo médio dos curto-circuitos
U	▶ Tensão
Uef	▶ Tensão eficaz
Um	▶ Tensão média

- V ▶ Volts
- Va ▶ Velocidade de alimentação do arame
- Vs ▶ Velocidade de soldagem
- W ▶ Tungstênio
- X ▶ fator de aumento

RESUMO

Neste trabalho busca-se avaliar a influência da distância bico de contato-peça, velocidade do arame, velocidade de soldagem e corrente de referência, tanto sobre o aspecto e geometria dos cordões, quanto sobre a estabilidade do arco na soldagem molhada com eletrodos tubulares. Através de técnicas de planejamento de experimentos e análise estatística, foram estudados dois tipos de eletrodo tubular, um arame rútilico e um arame oxidante desenvolvido especialmente para a soldagem molhada, ambos de fabricante nacional. Além destes aspectos, foram estudadas as vantagens da utilização de um controle adaptativo da corrente em comparação com a soldagem com as características estáticas de corrente constante e tensão constante. Os ensaios indicam que o sistema de controle pode ser aplicado à soldagem manual, mostrando-se pouco sensível a variações da distância bico de contato-peça e velocidade de soldagem para ambos os arames. Os trancamentos do arame, problema ocasionado pela soldagem do arame no bico de contato, foram eliminados. Do ponto de vista de defeitos, foram observados inclusões de escória alongadas apesar da solda ter ficado isenta de trincas ou porosidades de grandes dimensões. Tanto a resistência ao impacto, quanto os ensaios de microdureza, ficaram dentro dos critérios especificados pela norma AWS D3.6:1999M.

ABSTRACT

This work is an attempt to evaluate the influence of contact tip-to-work distance, wire speed, travel speed and reference current, not only on bead geometry but on arc stability as well. Through experimental design techniques and statistics analysis, two types of flux-cored wire were studied: the E-70 T1 wire and an oxidizing flux wire, both of them developed especially for wet welding. Besides, the advantages of a current control algorithm were studied in comparison with constant voltage and constant current techniques. The experiments revealed that the power source control algorithm works efficiently for manual welding and is not sensitive to contact tip-to-work distance and travel speed changes for both electrode types. The wire jamming, caused by micro-weldments between the contact tip and the wire, were not observed. There were no cracks nor large porosity, however, the incidence of elongated slag inclusions was observed. The toughness and micro hardness results were AWS D3.6:1999M standard criteria compliant.

1 - Introdução

A grande crise do petróleo no início da década de 70, causada principalmente pela redução da venda de petróleo pelos países do Oriente Médio e, por estudos alarmistas que indicavam que as reservas de “ouro negro” terminariam na virada do milênio [1], serviu de catalisador para a busca de novas jazidas e para o aumento da sua produção em alto mar. Apesar da continuidade do embargo promovido pelos países produtores de petróleo, ao contrário do que se previa, “o petróleo não morreu”. Um dos motivos para a não concretização destas previsões pode ter sido o crescimento explosivo da quantidade de óleo produzida em locação “offshore”. Este quadro trouxe reflexos também para o Brasil, onde levantamentos recentes indicam que 56% das reservas de petróleo e gás natural atualmente em exploração, estão em localização “offshore” (fora da costa), situadas em águas rasas (lâmina d’água até 400 metros), águas profundas (lâmina d’água entre 400 e 1000 m) e águas ultraprofundas (lâmina d’água superiores a 1000 m) [2]. Devido ao grande potencial em locação “offshore”, a manutenção e o aumento da capacidade de exploração comercial das atuais reservas, além da viabilização da exploração das jazidas futuras, passa pela capacidade de executar reparos das instalações produtivas (plataformas, oleodutos, cais de atracação, embarcações), tanto em ambientes de pequena lâmina d’água (profundidades em torno de 35 metros), o que permite intervenções através do mergulho raso, quanto em águas profundas e ultraprofundas, o que demanda por sistemas automatizados de soldagem. Para atender a esta demanda, esforços tem sido concentrados no desenvolvimento de tecnologias de soldagem para ambiente subaquático, capazes de atender às exigências mecânicas requeridas das juntas.

Os resultados destes esforços aparecem sob a forma de novos processos de soldagem e união, voltados especificamente para a aplicação em ambiente submarino.

No Japão, por exemplo, tem sido dedicados tempo e recursos para aprimorar a soldagem MAG com cortina de água [3]. O objetivo destas pesquisas é utilizar o processo na construção de estruturas flutuantes gigantes (sigla em inglês VLFS – Very Large Floating Structures) no projeto chamado de “Mega-float”. O projeto visa a criação de maior espaço em regiões próximas a grandes cidades, ocupando grandes áreas no mar. A construção destas estruturas está sendo feita de forma modular, em vários estaleiros. A maior parte das soldas será feita na vertical descendente, sendo que metade da solda fica abaixo da linha d’água. A soldagem MAG com cortina d’água surgiu como uma alternativa que permite a automatização das soldagens, reduzindo tempo e custos.

2 - Objetivos e Justificativas

2.1 - Justificativas

A costa brasileira permite a aplicação da soldagem molhada em muitas situações. Isto principalmente devido a temperatura amena das águas, que facilita as operações de mergulho e, no caso da soldagem, produz ciclos térmicos mais lentos se comparados aos que ocorrem na soldagem em águas muito frias, como as do Mar do Norte por exemplo. Segundo afirmativas de técnicos da PETROBRAS, cerca de 80 % dos reparos ocorrem em profundidades de até 30 m, ou seja, dentro da faixa de operação da soldagem molhada com eletrodos revestidos ou arames tubulares. Para dar uma noção da potencialidade da soldagem molhada, podem ser citados dois exemplos de intervenções bem sucedidas utilizando esta técnica, uma delas realizada no Brasil e a outra no Golfo do México.

A primeira refere-se ao reparo da monobóia de Marimbá realizado pela PETROBRAS em 1996 [4]. A monobóia é um flutuador que recebe um tubo, ou "riser", e o distribui para várias tubulações na superfície. Com a ação das marés e a ondulação do mar, surgiu um esforço de fadiga na união do "riser" com a monobóia. Neste caso em particular, o esforço deu origem a uma série de trincas na região dos enrijecedores (figura 1.1).

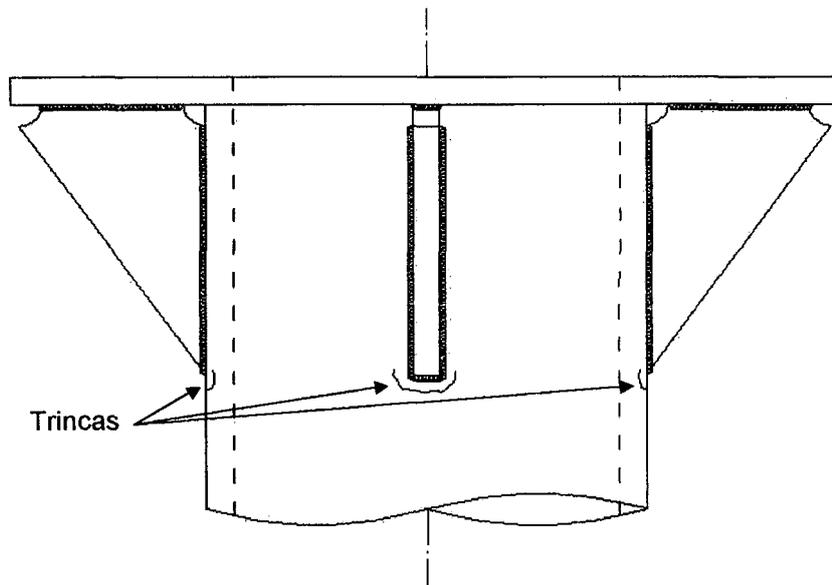


Figura 1.1 – Trincas nos enrijecedores da união entre o “riser” e a monobóia.

Foram realizadas duas intervenções sem a parada da produção, uma para a recuperação das trincas e outra para a colocação de novos enrijecedores, ambas utilizando soldagem molhada com eletrodos revestidos, especialmente desenvolvidos pela PETROBRAS. Devido ao bom desempenho dos reparos, a previsão inicial para a docagem da monobóia foi estendida de 1998 para 1999. Caso não fosse possível a realização do reparo, a produção seria desviada com uma redução significativa de produção por um período não inferior a quatro meses até a fabricação de outra monobóia. Tal quebra na produção resultaria em uma perda de U\$ 6,5 milhões.

A segunda, está relacionada ao reparo dos danos causados pelo furacão “Andrew” no golfo do México no ano de 1992 [5,2]. Na ocasião, o furacão deu origem a ventos de 264 km/h e ondas de 23 m de altura que causaram desde rachaduras até o total colapso de inúmeras estruturas utilizadas na produção e transporte de petróleo e gás natural. Uma destas estruturas, um coletor de gás para vários poços, sofreu sérios

danos e exigiu a substituição de dois nós das treliças abaixo da linha d'água. A substituição dos nós foi realizada por soldagem molhada com eletrodos revestidos em um período de 21 dias, e resultou em uma economia de 40% a 60% em comparação a soldagem hiperbárica a seco e a montagem de uniões mecânicas, respectivamente.

A importância da pesquisa da soldagem molhada com eletrodos tubulares, também fica evidenciada na "Lista de Prioridades para as Pesquisas e Desenvolvidos Necessários à Soldagem Submarina", formulada durante o "International Workshop of Underwater Welding of Marine Structures" [6] realizado em New Orleans/ USA em 1994. Das várias propostas para temas de pesquisa apresentadas uma pode ser destacada, servindo de base para a formulação dos objetivos acima citados:

- "A utilização dos arames tubulares possui um grande potencial para a aplicação na soldagem molhada. Trabalhos voltados ao desenvolvimento de consumíveis, alimentadores de arame e fontes de soldagem, em uma abordagem sistêmica, são enfaticamente recomendados."

Apesar do tempo decorrido desde a realização deste encontro, vários temas de pesquisa apresentados continuam atuais, praticamente inexplorados e relevantes no âmbito da soldagem submarina, uma vez que a exploração dos problemas, identificados como prioridades por usuários e pesquisadores envolvidos com o assunto, poderá contribuir para a aplicação das técnicas de soldagem hiperbárica molhada no Brasil.

Mesmo com toda a sua potencialidade de utilização na soldagem molhada, a aplicação de eletrodos tubulares ainda tem se dado de forma bem mais modesta que os eletrodos revestidos. Poucos trabalhos abordam a aplicação destes eletrodos e somente o Instituto Patton [7] relata a aprovação de procedimentos de soldagem pela técnica molhada (para as posições de soldagem 1G, 2G e 3G) segundo os critérios da AWS D3.6-89 [8]. Entretanto, apesar destes resultados satisfatórios, os eletrodos desenvolvidos pelo Instituto Patton parecem ainda não ter alcançado um amplo mercado consumidor, uma vez que os relatos de aplicação destes eletrodos se limitam aos trabalhos do Instituto.

2.2 - Objetivos

Este trabalho foi idealizado tendo como principal objetivo o planejamento de ações que busquem criar uma infra-estrutura instalada no LABSOLDA capaz de gerar, tanto para este trabalho, quanto para trabalhos futuros, desenvolvimentos voltados para o estudo da soldagem subaquática molhada. Para tanto, a proposta contempla não somente a instalação e ampliação da capacidade de testes em bancadas, visando à execução de ensaios pela técnica da soldagem em ambiente molhado, mas também compor um volume de informações que sirvam de subsídio para a geração de produtos, sejam estes, trabalhos publicados, programas computacionais ou equipamentos.

Assim sendo, foram propostos os objetivos específicos visando a resolução de problemas encontrados em trabalhos anteriores [9] e o levantamento de informações que permitam a aplicação prática da técnica no Brasil. Estes objetivos compreendem:

- a – Estudar e reduzir ou eliminar os trancamentos de arame, principalmente os que levam a interrupção do processo de soldagem;
- b - A obtenção de informações que sirvam, tanto à definição de procedimentos de soldagem pela técnica da soldagem molhada com arames tubulares, quanto ao projeto de equipamentos dedicados às características desta técnica de soldagem;
- c – A determinação da característica estática mais apropriada à soldagem molhada com arames tubulares;
- d – Analisar a aplicabilidade de algoritmos para o controle da transferência metálica;
- e – O desenvolvimento de métodos que permitam a avaliação da estabilidade do arco na soldagem molhada com arames tubulares;
- f – Analisar o desempenho do arame experimental oxidante.

3 - Soldagem Submarina

A técnica da soldagem molhada teve, durante muito tempo, sua aplicação limitada a uniões de elementos de pouca responsabilidade devido às dificuldades encontradas em produzir depósitos livres de defeitos, sendo vetado o seu uso em uniões estruturais. Só recentemente este quadro foi modificado. Também são conhecidos relatos da aplicação de processos mais recentemente desenvolvidos, como a soldagem MIG com cortina d'água e TIG em campânula, que sofrem uma certa crise de identidade sendo hora citados como soldagem molhada e hora como soldagem a seco. Estes relatos porém, provavelmente devido a limitações dos processos, são escassos. Por estes motivos, uma das técnicas que apresenta grande volume em aplicação para reparos em águas rasas ainda é a da soldagem a uma atmosfera, utilizando eletrodos revestidos. Uma vez que o ambiente criado pelo encapsulamento é seco e a pressão ambiente é de uma atmosfera, a solda produzida possui propriedades mecânicas equivalentes àquelas realizadas na superfície, sendo por isto, utilizada na união de componentes estruturais. Embora a soldagem a uma atmosfera produza resultados plenamente satisfatórios, possui baixa produtividade e limita-se a aplicações onde sejam viáveis, tanto o mergulho humano, quanto o encapsulamento da região da junta. Estes aspectos criam dificuldades operacionais e, principalmente, elevam os custos, e justificando os esforços para o desenvolvimento da soldagem pela técnica molhada.

3.1 – Soldagem Molhada

O desenvolvimento da técnica de soldagem hiperbárica molhada, ou simplesmente soldagem molhada, é hoje a que concentra o maior volume de pesquisas, envolvendo a formulação de procedimentos, consumíveis e equipamentos. Tamanho interesse se justifica pela facilidade de aplicação da técnica, que dispensa o encapsulamento da região da solda, reduzindo custos e tornando a execução do reparo, em muitos casos, mais rápida do que a soldagem a uma atmosfera, ou hiperbárica a seco. Em contrapartida a estas vantagens operacionais, a pressão hidrostática e o contato da água com o arco elétrico e a poça de fusão, acabam por conduzir à produção de depósitos irregulares com inclusões e poros [10]. Além destes problemas, ainda existe a tendência à formação de microestruturas com dureza mais elevada, devido a um ciclo térmico mais rápido, e o surgimento de trincas a frio, causadas principalmente pela grande quantidade de hidrogênio disponibilizada na região da poça de fusão pela dissociação da água no arco voltaico [11].

Apesar dos vários fenômenos que podem conduzir ao aparecimento de falhas nos depósitos, os avanços obtidos nas últimas décadas já viabilizaram sua aplicação em procedimentos de reparo de estruturas “offshore” e embarcações. Estes resultados ainda se concentram na soldagem realizada com eletrodos revestidos que, apesar de sua grande versatilidade e confiabilidade, apresenta baixa produtividade, o que ainda encarece bastante a execução dos reparos. Numa tentativa de reduzir o tempo de soldagem e, com isso, o tempo de mergulho, pesquisas vem sendo realizadas para a substituição dos eletrodos revestidos por arames tubulares.

3.1.1 – Eletrodos Revestidos

Ao longo dos últimos anos vários processos de soldagem a arco tem sido testados para o emprego na soldagem molhada, alguns com grande viabilidade de aplicação, outros nem tanto. Devido a maior simplicidade operacional, o processo já consagrado para aplicação na soldagem molhada é o eletrodo revestido. A soldagem com arames tubulares, vêm tentando se firmar como alternativa econômica, despertando interesse principalmente devido a algumas características que são compartilhadas pelos dois processos [10,12]. Estas características são: ambos os processos se mostraram operacionais sem a necessidade de encapsulamento do ambiente de soldagem ou fornecimento de gás por fonte externa e a possibilidade de adicionar ao revestimento, ou fluxo, elementos químicos que permitam minimizar a instabilidade da transferência e melhorar propriedades mecânicas.

Notadamente, o processo de soldagem com eletrodos revestidos (figura 3.1) domina as pesquisas e desenvolvimentos na busca de procedimentos aplicáveis à soldagem molhada.

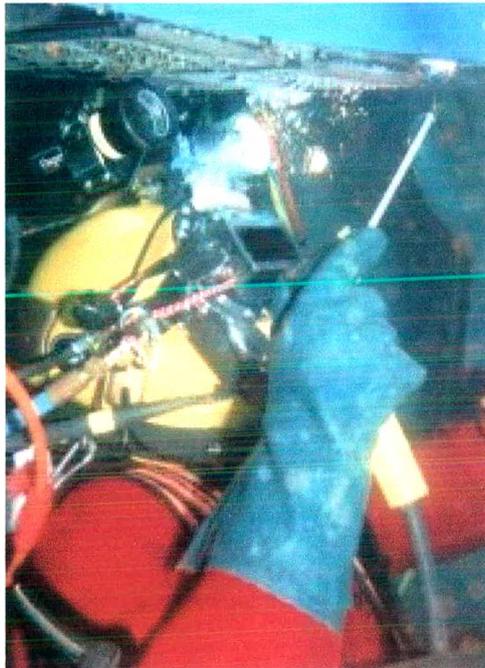


Figura 3.1 – Soldagem molhada com eletrodo revestido [13].

A justificativa para tal predominância também se encontra em características operacionais demonstradas na soldagem com eletrodos revestidos na superfície:

- Produção de soldas de boa qualidade em todas as posições de soldagem;
- Fácil operação em campo, pois o processo não exige equipamentos sofisticados ou complexos, além de permitir a soldagem em lugares de difícil acesso;
- Processo de soldagem aplicável mesmo em condições climáticas extremas, como baixa temperatura ou sob a ação de ventos.

A combinação destes fatores levou a uma ampla aceitação dos eletrodos revestidos para aplicação na construção de estruturas soldadas. Em função desta grande aceitação surgiu no mercado uma grande diversidade de composições de eletrodos,

abrangendo uma ampla gama de materiais de base e atendendo requisitos mecânicos e metalúrgicos para as mais variadas aplicações. Por ser o processo de soldagem que acumula o maior volume em aplicação, refletindo a confiabilidade que nele se deposita, é natural que este processo desperte um grande interesse para a aplicação na soldagem submarina. Szelagowski [10] relata a utilização de eletrodos rútilicos comerciais na execução de ensaios em pressões equivalentes a 100 metros de coluna d'água. Pope [14] apresenta resultados de reparos simulados em tubos, realizados a profundidades de 12 metros, onde foram utilizados eletrodos oxidantes, com resultados satisfatórios, em especial, no parâmetro tenacidade do metal de solda. Apesar dos eletrodos oxidantes produzirem soldas com menor teor de Si e Mn, apresentam menor tendência a trincas por hidrogênio [15], uma vez que a quantidade de hidrogênio depositado é muito inferior à obtida com eletrodos rútilicos ou básicos (figura 3.2).

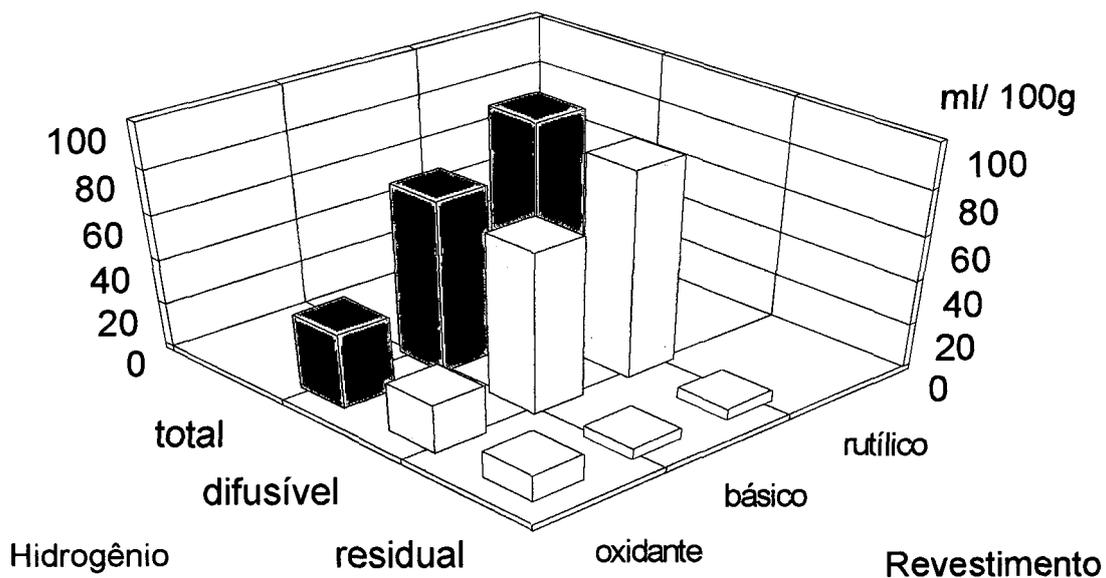


Figura 3.2 - Concentração de hidrogênio na soldagem molhada em função do tipo de revestimento do eletrodo revestido [15].

3.1.2 - Arames Tubulares

A soldagem com arames tubulares se caracteriza por utilizar um arame consumível contínuo de geometria tubular e que acomoda em seu interior um fluxo compactado. A fusão do eletrodo tubular é produzida pela ação de um arco voltaico, formado entre o eletrodo e a peça-obra. O processo se subdivide em duas variantes:

- Com proteção adicional, onde um gás, normalmente CO₂, é adicionado pelo bocal da pistola com o objetivo de proteger a transferência e a poça metálica;
- Autoprotegido, onde o gás de proteção é gerado a partir da fusão dos constituintes do fluxo.

Uma vez que o espaço disponível para acomodar o fluxo é limitado, a opção por arames autoprotegidos ou não autoprotegidos está intimamente relacionada às propriedades metalúrgicas e mecânicas desejadas nos depósitos. Para os arames não autoprotegidos, a composição do fluxo é direcionada, basicamente, para a obtenção de propriedades metalúrgicas e mecânicas. Já nos arames autoprotegidos são adicionados compostos que servirão, tanto à formação de gás de proteção da poça metálica e das gotas em transferência, quanto a uma ação de estabilização do arco. Ao contrário dos arames não autoprotegidos, a adição de elementos para produzir propriedades metalúrgicas na solda tem caráter secundário. Como consequência, via de regra, os arames autoprotegidos possuem propriedades mecânicas inferiores àquelas observadas em eletrodos não autoprotegidos. Conciliar os efeitos de estabilização e propriedades mecânicas em arames de diâmetro pequeno (1.2 ou 1.6

mm), que permitem a aplicação em todas as posições de soldagem, constitui a grande arte no desenvolvimento de eletrodos tubulares.

Apesar da semelhança quanto à possibilidade de variação da composição do revestimento, ou do fluxo, os eletrodos revestidos e tubulares guardam particularidades que não devem ser desconsideradas no instante da decisão da mudança de um para o outro. Em meados da década de 80 houve uma rápida difusão da soldagem com arames tubulares, motivada pelo interesse em utilizar um processo com maior produtividade. Este processo passou a ser visto como um potencial substituto dos eletrodos revestidos. Analisando a soldagem com arames tubulares em uma empresa fabricante de estruturas "offshore" no Reino Unido, Rodgers e Lochhead [16] relatam que, após a rápida difusão inicial, verificou-se a grande influência do procedimento de soldagem sobre as propriedades mecânicas da junta, o que levou os contratantes a aumentarem as exigências para aceitação de soldas realizadas com eletrodos tubulares. Como exemplo dos problemas encontrados, citam um procedimento para a soldagem na posição vertical ascendente em que foram aplicadas técnicas de deposição semelhantes às aquelas anteriormente utilizadas com eletrodos revestidos e que resultaram, ao contrário do esperado, na formação de microestruturas de baixa tenacidade. Ensaio posteriores indicaram a baixa velocidade de soldagem como o parâmetro decisivo na definição da baixa tenacidade dos depósitos. Após a redefinição do procedimento, feito com base nas características da soldagem com arames tubulares e na experiência acumulada quanto aos valores mínimos nas propriedades mecânicas, houve a correção do problema de baixa tenacidade no metal depositado. Esta situação demonstra que os eletrodos tubulares exigem uma técnica de soldagem diferente da empregada com eletrodos revestidos. Enquanto estes possuem uma faixa

de corrente relativamente estreita, os eletrodos tubulares permitem deposições com valores muito superiores de corrente, o que implica, também, em uma maior velocidade de alimentação do arame, e, portanto, uma maior quantidade de metal adicionado. Tal característica poderá levar, caso se mantenha a velocidade de soldagem constante, a necessidade de execução de um movimento de tecimento largo para evitar a formação de depósitos com grande altura de reforço. Entretanto, se a geometria do depósito for o parâmetro a ser mantido constante, poderá existir uma dificuldade do soldador em impor uma velocidade de soldagem compatível com o permitido pelas suas habilidades manuais. Considerando que os processos possuem características que são muito distintas (mecanismos de transferência, modo de transferência, proteção da poça, taxa de deposição, entre outros), a definição de um novo procedimento para a soldagem com eletrodos tubulares não deve levar em consideração apenas o aporte de calor, como normalmente é feito na soldagem com eletrodos revestidos, mas a combinação de parâmetros e variáveis que permita associar produção com propriedades mecânicas na junta. A mudança no processo de soldagem torna necessária a redefinição de todo o procedimento, sob risco de não se usufruir das vantagens oferecidas por um processo que possui a característica de maior produção. Segundo Rorvik [17], as propriedades do metal de solda não se constituem em um fator limitante para aplicar procedimentos de soldagem com alto aporte de energia na soldagem de estruturas "offshore".

3.1.3 - TIG e MIG/MAG

Apesar de várias tentativas, nenhum outro processo de soldagem demonstrou tamanha simplicidade operacional e resultados tão favoráveis na soldagem molhada quanto os eletrodos revestidos. Processos como TIG ou MIG/ MAG foram operacionalizados mediante a utilização de artefatos acoplados ao bocal da pistola com o objetivo de isolar o ambiente do arco da água. Escovas rotativas [18], cortina d'água [19] ou "hydro-box" [20] foram artificios empregados para viabilizar processos de soldagem a arco com proteção gasosa adicional. Cabe observar que, a rigor, como nestas aplicações o ambiente em que se forma o arco possui pressão hidrostática equivalente á altura da coluna d'água, caberia a classificação dos processos na técnica de soldagem hiperbárica a seco. Entretanto, para manter a classificação original dos autores, considera-se aqui como processos aplicados á soldagem molhada.

Seguindo esta linha de desenvolvimento, Li [21] procurou demonstrar a aplicabilidade do processo TIG com metal de adição pré-colocado e arco protegido por campânula (figura 3.3), mas restringindo sua aplicação a soldagem de superfícies planas ou de grande raio de curvatura. Apesar de não ter sido considerado pelos autores, a presença da campânula também contribui para reduzir a visibilidade da região da solda, que já tende a ser prejudicada pelo borbulhamento constante durante a soldagem. O problema da visibilidade da região da solda é um fator importante a ser considerado, especialmente em uma técnica que deverá ser aplicada com soldagem manual. Considerando as limitações operacionais que se tornam necessárias para a aplicação do processo TIG na soldagem submarina em ambiente molhado, caso o processo venha a ser utilizado, parece restrito a situações muito específicas, como a

soldagem de passes de raiz, e limitado a uma geometria de peça adequada a funcionalidade da campânula de proteção.

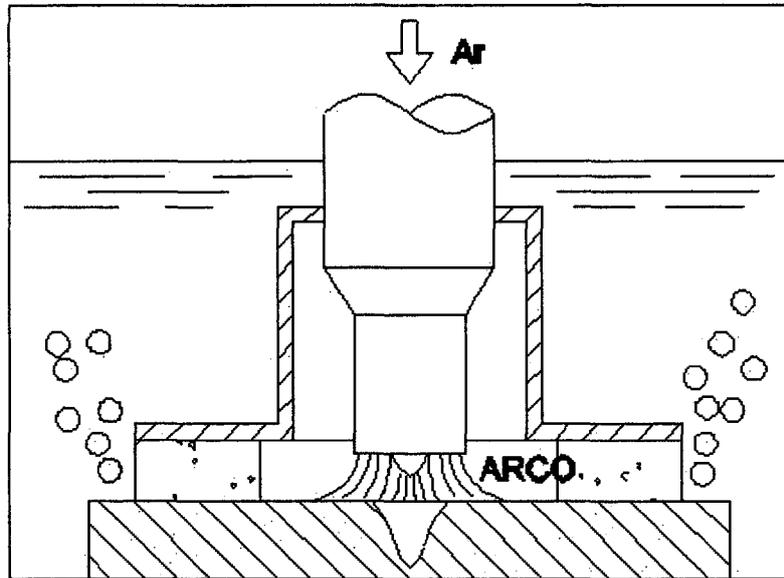


Figura 3.3 - Princípio do método de proteção do arco utilizado para a soldagem TIG em ambiente molhado [21].

De forma semelhante ao anteriormente descrito, também se encontra na literatura tentativas de aplicar o processo MIG/ MAG em procedimentos de soldagem molhada, mediante a utilização de campânulas de proteção. Neste sentido, Almeida e Machado [22] desenvolveram um bocal em que uma cortina d'água isola o ambiente do arco do meio externo (figura 3.4).

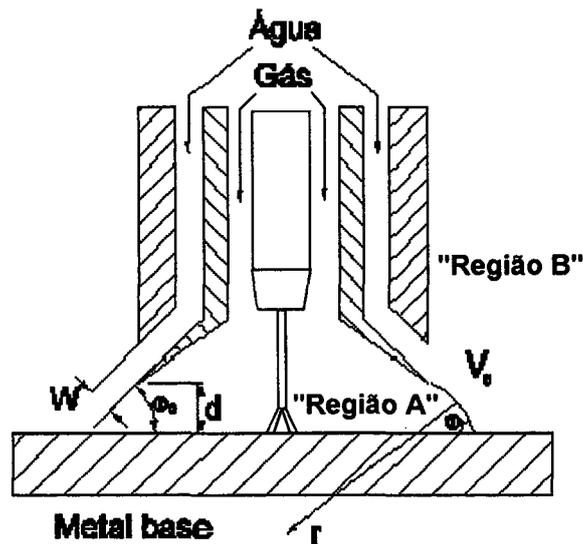


Figura 3.4 - Exemplo de bocal desenvolvido para operacionalizar a soldagem molhada com o processo MIG/ MAG [22].

Chandiramini [23] considerou viável a utilização do processo MIG/ MAG em reparos a pequenas profundidades de mergulho, no caso, reparos em embarcações. Utilizando uma campânula para isolar o ambiente do arco e proteção de CO_2 , o autor relata a obtenção de depósitos com níveis aceitáveis de defeitos, sem considerar, contudo, as exigências da norma AWS D3.6-89. Apesar dos resultados terem fornecido indícios favoráveis à utilização do processo MIG/ MAG em pequenas profundidades, existem problemas, além da necessidade da campânula, que não permitem generalizar sua utilização em reparos pela técnica molhada. Ao contrário de Chandiramini, Gooch [24] apresenta resultados obtidos com a soldagem MIG/ MAG realizada com eletrodos a base de níquel (AWS A5.14-76, ERNiCrMo-3, diâmetro: 1,2 mm) que resultaram em índices elevados de defeitos. Com relação à proteção gasosa, os depósitos sem proteção não apresentaram trincas por hidrogênio, mas, em contrapartida, apresentaram os efeitos adversos da geometria desfavorável e da grande quantidade

de poros. Sob proteção da mistura gasosa de Ar e O₂ (arco protegido por campânula), os depósitos apresentaram geometria do reforço favorável, mas pouca penetração e risco de falta de fusão. A substituição da atmosfera de Ar e O₂ por CO₂ corrigiu o problema da penetração, mas produziu resultados semelhantes às soldas sem adição de gás de proteção: depósitos com geometria ruim e grande quantidade de poros. Segundo Gooch, estes problemas não podem ser solucionados através da alteração das condições de soldagem, sendo considerados pelo autor como intrínsecos ao processo de soldagem MIG/ MAG. Apesar de se reconhecer que a soldagem MIG/ MAG convencional é problemática em algumas aplicações, discorda-se da opinião sobre o caráter intrínseco dos problemas encontrados, uma vez que o número de parâmetros para controlar a soldagem é muito grande e nem todos bem dominados. Com um trabalho mais extenso e dedicado à análise do processo de transferência acredita-se que estes problemas possam ser solucionados, visto o relato de outros pesquisadores que obtiveram resultados mais favoráveis ao processo com o recurso da campânula de proteção. Entretanto, é necessário analisar também se o esforço realmente compensa, visto que outros processos demonstraram melhores condições de aplicação na soldagem molhada, devido a sua maior simplicidade operacional. Comparativamente, o processo com eletrodo tubular compete com o processo MIG/ MAG nesta aplicação e com potenciais vantagens. Além deste fato, a soldagem MIG/ MAG de peças de grandes dimensões, se executada com o processo operando no modo curto-circuito sem pré-aquecimento, exige um procedimento de soldagem criterioso dado à tendência ao aparecimento de problemas de instabilidade e má formação nos depósitos devido a grande dissipação térmica do calor da poça de fusão. Variações do processo, como a soldagem com corrente pulsada, apresentam menor

sensibilidade a este problema, mas, de forma semelhante ao processo TIG, acredita-se que também estarão limitadas a aplicações muito específicas na soldagem molhada.

3.1.4 - Soldagem por Fricção

Outra linha de desenvolvimento que vem atraindo a atenção de inúmeros centros de pesquisa é a da soldagem por fricção [25]. Neste tipo de soldagem o calor gerado pelo atrito entre as partes que estão sendo soldadas plastifica a ambas. Este efeito, associado à aplicação de pressão, produz a união das partes sem que seja atingida a temperatura de fusão e sem a adição de material. As principais vantagens deste processo são:

- A possibilidade de aplicação em ambiente molhado, sendo necessário apenas o isolamento térmico que pode ser feito através de uma espuma aplicada sobre o local a ser soldado.
- O alto nível de automação do processo permite a operação dos equipamentos remotamente através de ROVs (veículos remotamente operados).
- Aplicabilidade em profundidades bem superiores às permitidas para o mergulho humano (em torno de 300 m).

Uma das novas técnicas de soldagem por fricção é a Soldagem por Fricção Radial, ou RFW (Radial Friction Welding) . Este tipo de soldagem é aplicado principalmente para a

recuperação de tubulações submarinas através da substituição das partes danificadas. O processo RFW permite a união de tubos de aço carbono, ligas resistentes à corrosão, materiais dissimilares e titânio [26]. A união é produzida através da rotação de um anel na região da junta até que se atinja a plastificação do metal. Neste ponto, o movimento de rotação é interrompido e um mandril pressiona o anel contra o tubo. Para evitar o colapso na união, um componente interno ao tubo pressiona a região plastificada para fora, gerando um perfil suave na parte interna do tubo.

A soldagem de pinos por fricção, ou FSW (Friction Stud Welding), é uma das variantes do processo que possui maior número de equipamentos e fornecedores disponíveis. É normalmente aplicada para a soldagem de ânodos de sacrifício, reparo de tubos e recuperação de embarcações.

3.2 – Considerações Sobre a Física do Arco na Soldagem Molhada

Na soldagem molhada, o arco voltaico se forma em meio a bolhas de vapor, compostas por átomos de hidrogênio e oxigênio dissociados [27] e gases provenientes da vaporização do metal e/ou fluxo do arame [28]. Por se formar neste ambiente, a estabilidade do arco e do processo de transferência passam a ser diretamente influenciadas pela dinâmica de formação e destacamento destas bolhas. Se durante a soldagem as bolhas se mantiverem envolvendo o arco, o processo de transferência tende a se manter estável. Entretanto, se ocorrer o desprendimento das bolhas, o arco extingue e cria uma situação de instabilidade no processo de transferência. A ocorrência do desprendimento das bolhas pode se dar, tanto durante o período de

arco, quanto em períodos de extinção do arco, como por exemplo, durante um curto-circuito. Considerando a natureza das extinções, Pokhonya [27] identificou dois tipos de curtos-circuitos na soldagem molhada com eletrodos tubulares. O primeiro, denominado de curto-circuito normal, ocorre pelo contato da gota, ainda presa no eletrodo, na poça de fusão. O segundo tipo de curto-circuito, classificado como anormal, se dá a partir do desprendimento das bolhas de vapor em meio a um período de arco. A identificação deste tipo de curto-circuito é importante devido a possibilidade de provocar a extinção do arco, conduzindo o eletrodo tubular a um choque contra a poça de fusão.

Devido a sua origem, a ocorrência dos curtos-circuitos anormais na soldagem com eletrodos tubulares não encontra similaridade na soldagem de superfície, restringindo-se, portanto, a soldagem molhada. A ocorrência destes curtos-circuitos sugere que as instabilidades na transferência não estão relacionadas diretamente com o ajuste das variáveis do processo, mas com o aparecimento de uma perturbação de caráter "aleatório". Assim, um regime de transferência regular pode ser levado a uma situação de instabilidade devido ao destacamento das bolhas onde se forma o arco. A rigor, o processo de destacamento das bolhas não é aleatório, mas regido pela física de formação e destacamento das bolhas [28]. Entretanto, como pouco se conhece sobre este mecanismo, em especial para a situação onde existe um elemento ativo como o arco voltaico, pode-se assumir que o processo de destacamento possui um caráter aleatório, ou, pelo menos, não controlável. A existência das bolhas está vinculada a capacidade da pressão hidrostática dos gases e vapores compensarem a altura de coluna d'água. Segundo Pokhonya [27], o aumento da instabilidade em profundidades crescentes decorre da incapacidade da pressão hidrostática do gás gerado na fusão do

eletrodo equilibrar a pressão do meio, levando ao colapso das bolhas e a maior frequência de ocorrência de curtos-circuitos anormais (figura 3.5).

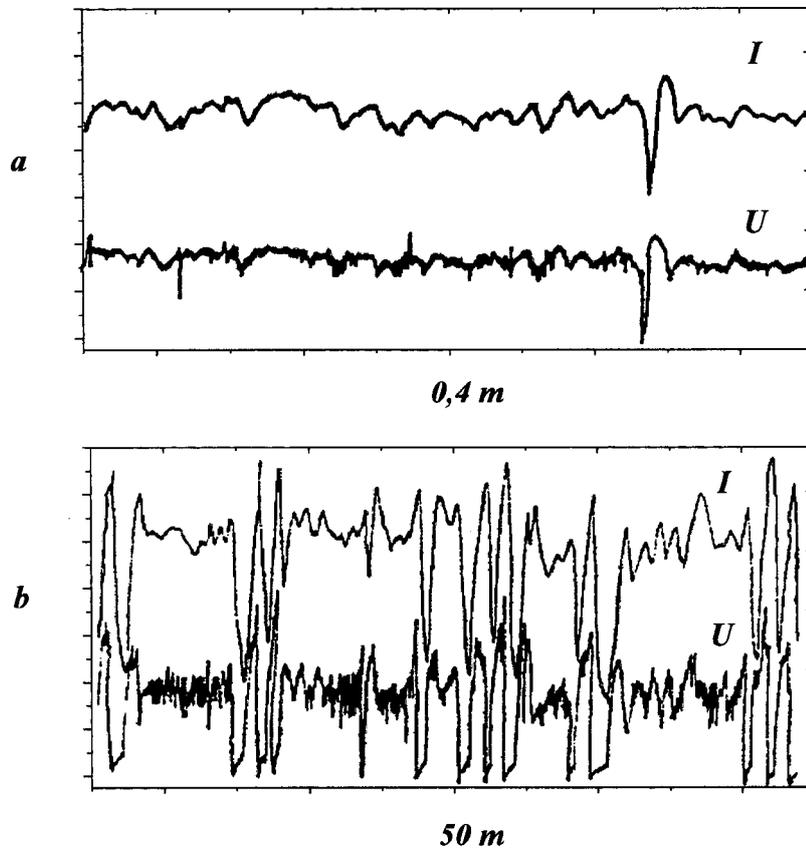


Figura 3.5 - Oscilogramas de tensão e corrente indicando o aumento da ocorrência de curtos-circuitos anormais com a elevação da profundidade de soldagem (a - 0,4 m; b - 50 m) [27].

Além da presença das bolhas de gás e vapor ser fundamental para a manutenção do arco voltaico, também exerce efeito sobre a taxa de resfriamento da poça de fusão. Segundo Pope [29], nos instantes iniciais do resfriamento a poça se encontra protegida pela bolha de vapor, o que torna o resfriamento mais lento. Com o deslocamento das bolhas, que acompanha o movimento do arco voltaico, o resfriamento tende a ocorrer

de forma mais rápida devido ao contato direto do cordão com a água a temperatura ambiente (figura 3.6). Desta forma, o processo de resfriamento da poça ocorre sob dois regimes. Em temperaturas elevadas ($T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), sob proteção das bolhas de vapor, a velocidade de resfriamento é mais lenta do que a observada em temperaturas inferiores. Uma vez que a maior tendência ao aparecimento de poros está intimamente relacionada com taxas de resfriamento mais rápidas, é possível que um ciclo térmico ocorrido na transferência por curto-circuito permita o aprisionamento das bolhas de gás no interior do metal fundido.

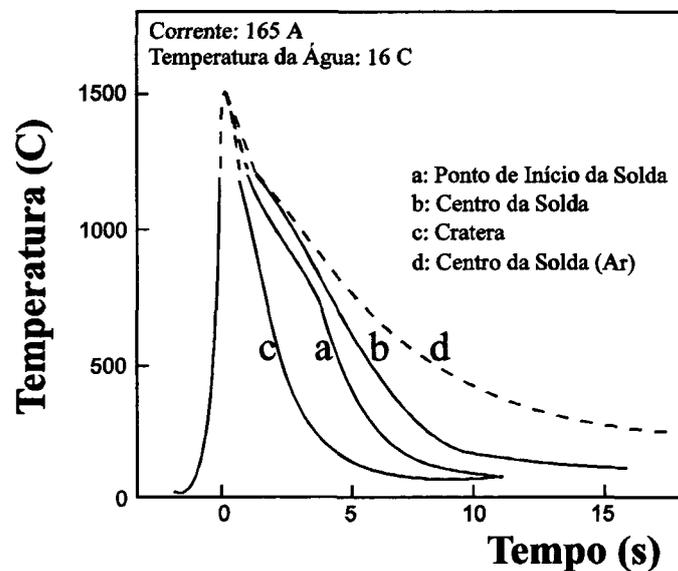


Figura 3.6 - Taxa de resfriamento na soldagem molhada em diferentes posições ao longo do depósito [28].

Outras situações de instabilidade, que ocorrem por mecanismos distintos dos curtos-circuitos anormais, podem ser identificadas na soldagem MIG/ MAG e estendidos à soldagem com eletrodos tubulares. Yamada e Tanaka [30] verificaram que flutuações na velocidade de alimentação do arame surgem devido ao atrito do arame contra a

superfície do bico de contato e na curvatura da pistola. O atrito do arame na superfície interna do bico promove uma adesão que retém o arame e danifica a sua superfície (formação de riscos, depósitos e microfusões). Andrade [9], descreve o problema dos trancamentos do arame na soldagem molhada com eletrodos tubulares, creditando a sua ocorrência principalmente a existência de água na região de contato elétrico entre o arame e o bico de contato. Relatos não documentados no LABSOLDA descrevem a ocorrência de interrupções na soldagem MIG com arames de alumínio devido à adesão do eletrodo no bico de contato. Nesta situação, a origem da adesão foi associada à presença de áreas fortemente oxidadas na superfície dos arames. Especificamente em relação aos arames tubulares, deve-se ainda considerar dois problemas adicionais que promovem flutuações na velocidade de alimentação do arame. O primeiro decorrente de variações dimensionais da seção do arame. Em situações menos críticas, as variações dimensionais são localizadas em segmentos ao longo da extensão do arame, o que aumenta a força de atrito na passagem pelo bico, promovendo flutuações na velocidade do mesmo. Entretanto, em situações mais críticas, a variação dimensional é tal que o tracionador não possui mais condições de empurrar o arame pelo bico, promovendo, ou a extinção do arco, ou a fusão do bico de contato. O segundo problema que promove instabilidade na transferência se relaciona com o deslizamento dos rolos tracionadores sobre a superfície do arame. Mesmo que não existam variações dimensionais na seção do arame, os eletrodos tubulares normalmente geram um atrito maior ao longo do tubo condutível, em especial na região onde a pistola de soldagem apresenta uma curvatura. Esta característica torna praticamente inviável o uso deste tipo de pistola com arames tubulares de diâmetro superior a 2 mm. Para minimizar a ocorrência do deslizamento, independente do tipo de pistola ou diâmetro do arame tubular, é recomendável a utilização de roletes tracionadores ranhurados

para aumentar a eficiência de transmissão de força sem a necessidade de esmagar o eletrodo.

3.3 - Estado da Arte na Soldagem Subaquática Molhada com Arame Tubular

Os relatos mais comuns de aplicações bem sucedidas da soldagem molhada com arame tubular são provenientes do Instituto Patton na Ucrânia, e estão principalmente relacionados a sua utilização em reparos de caráter emergencial em oleodutos corroídos [31]. Mais recentemente a associação entre o Instituto Patton e TWI (World Centre for Material Joining Technology) resultou na realização de alguns novos testes em laboratório (figura 3.7) e um Workshop [31]. Apesar da existência destes relatos, a aplicação prática do processo, fora da Rússia, ainda não ocorreu. Tal constatação leva a crer que existam ainda dificuldades de ordem técnica que devem ser superadas.

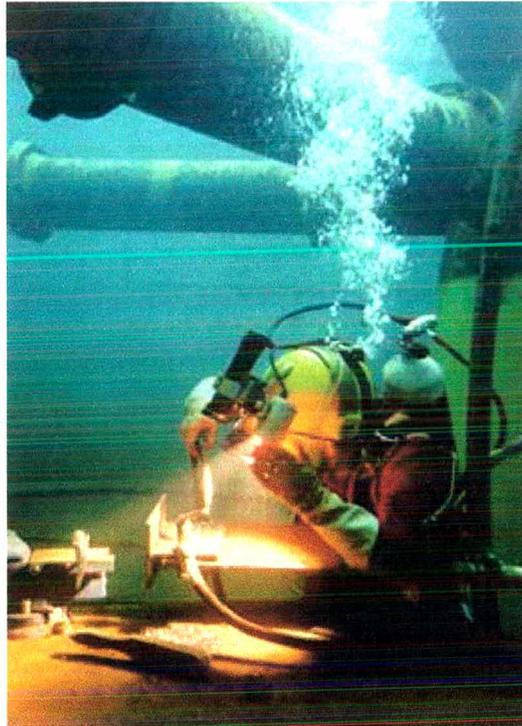


Figura 3.7 – Soldagem com arame tubular no tanque do TWI, Inglaterra [32].

Dois outros trabalhos em soldagem molhada foram desenvolvidos na Universidade Estadual de Ohio nos EUA com o apoio do Sea Grant, que é uma parceria entre as Universidades e a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA). No primeiro, concluído em 98, foi desenvolvido um algoritmo de controle para o processo de soldagem “molhada” com arames tubulares. O objetivo do trabalho foi desenvolver um programa para controle da fonte de soldagem através de computador. Este programa foi desenvolvido, levando em consideração o mecanismo de formação das bolhas de gás onde se gera o arco voltaico e a transferência metálica, através na monitoração dos parâmetros elétricos e filmagem do arco [33]. O segundo, concluído em 2000, visava o desenvolvimento de um sistema de seguimento de junta para a soldagem “molhada” com arames tubulares baseado em microprocessadores. Este sistema utiliza um sistema mecânico complexo que faz girar o bico de contato. Como

este último fica em uma posição descentralizada, é gerado um movimento similar ao do tecimento em um sentido transversal ao da junta. A monitoração dos parâmetros elétricos permite a determinação aproximada do posicionamento da tocha em relação à junta [34]. Note-se que para ambos os trabalhos, apesar de citada a soldagem molhada

4 - Estudo das Características Estáticas e Dinâmicas de Fontes de Soldagem

É muito comum a classificação das fontes de soldagem de acordo com o comportamento estático que estas apresentam. Este comportamento estático, ou característica estática está relacionado à forma como variam a corrente e a tensão, diante de uma variação de carga em regime estático [35]. As características estáticas mais conhecidas são: corrente constante e tensão constante. Durante muito tempo, este comportamento estático das fontes de soldagem dependeu exclusivamente de características físicas do transformador utilizado. Com surgimento das fontes de soldagem eletrônicas, foi possível o desenvolvimento de circuitos de controle eletrônicos, digitais ou analógicos, que permitem a obtenção de praticamente qualquer tipo de característica estática.

4.1 - Fontes de Corrente Constante

As fontes de corrente constante, se caracterizam por apresentarem uma pequena variação da corrente (ΔI), se comparada à variação de tensão (ΔU), quando se altera a carga imposta ao circuito [35]. Na figura 4.1 é mostrado o comportamento de uma fonte eletromagnética com característica estática de corrente constante, nota-se que em fontes deste tipo, o ajuste de corrente está sujeito a variações com a mudança da impedância do circuito. Na soldagem com eletrodos revestidos, por exemplo, esta mudança de impedância pode ser causada por vários fatores, como a troca do tipo ou bitola do eletrodo utilizado e a variação do comprimento do arco e do comprimento do eletrodo (à medida que ele se consome).

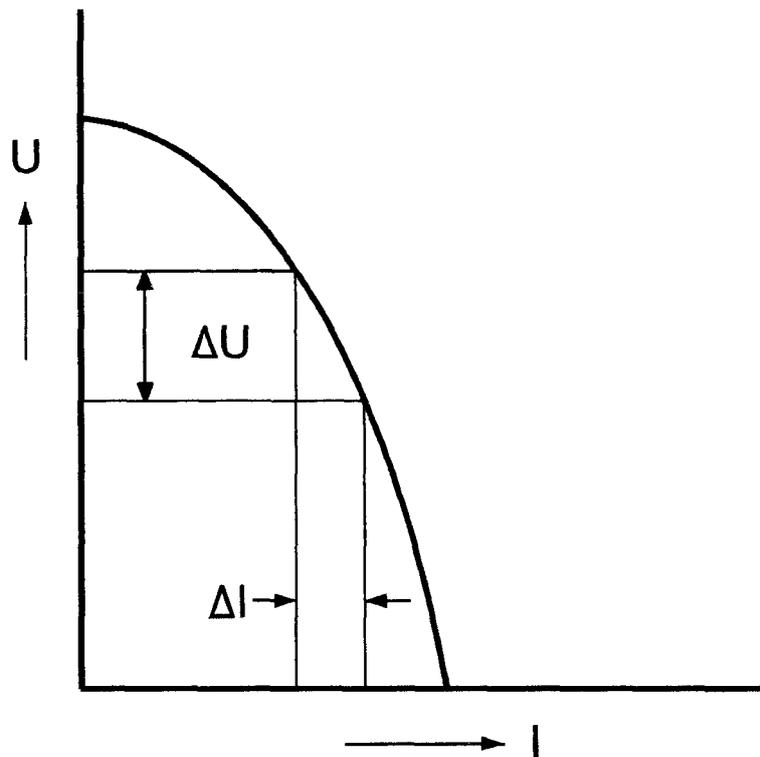


Figura 4.1 – Gráfico de característica estática típica de uma fonte eletromagnética de corrente constante.

As fontes de soldagem eletrônicas de corrente constante, apresentam curvas de característica estática diferenciadas das fontes eletromagnéticas. Na figura 4.2 é apresentado o comportamento estático da fonte de soldagem utilizada neste trabalho nos ensaios de soldagem molhada com arame tubular.

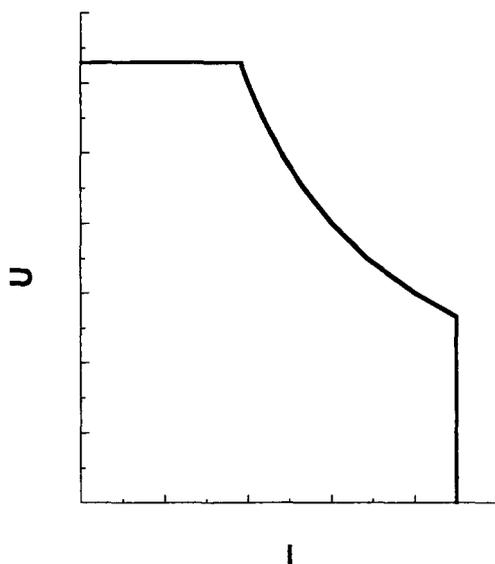


Figura 4.2 – Gráfico de característica estática da fonte eletrônica utilizada nos testes de soldagem molhada com arame tubular.

4.2 - Fontes de Tensão Constante

Nas fontes de tensão constante, ao contrário das fontes de corrente constante, a corrente sofre grandes variações (ΔI), para pequenas variações de tensão (ΔU) (figura 4.3). Como a corrente é a variável que influencia mais fortemente o processo de soldagem, fontes deste tipo são normalmente aplicáveis a processos que utilizam arames contínuos [35].

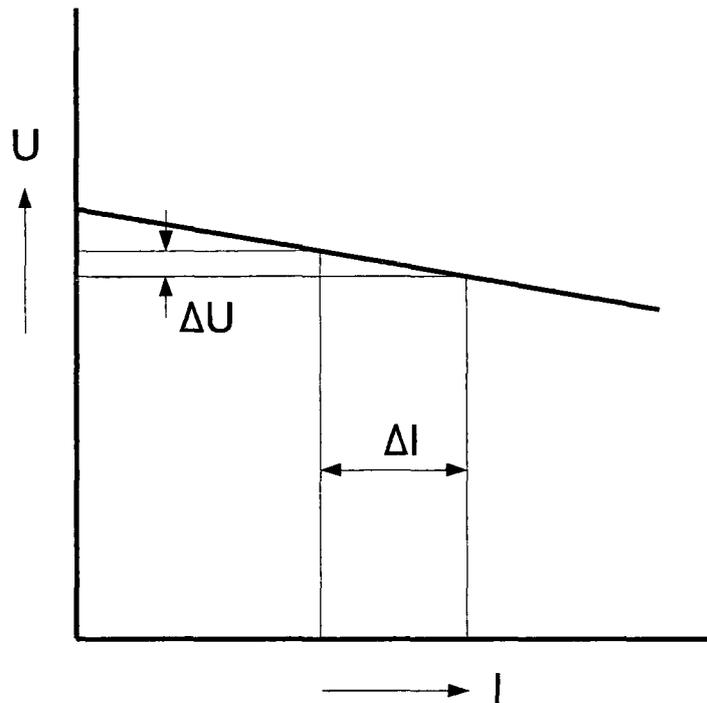


Figura 4.3 – Característica estática de uma fonte de tensão constante.

4.3 – Características Estáticas Utilizáveis em Soldagem Molhada

Além de permitir a obtenção de várias características estáticas em uma mesma fonte de soldagem, a utilização de controles eletrônicos, ainda possibilita a atuação nas características de resposta dinâmica da fonte de soldagem. Um exemplo que pode ser citado é o ajuste eletrônico da indutância na soldagem com tensão constante em modernas fontes de energia. Estas fontes podem ainda responder a alterações momentâneas do arco de solda, como a ocorrência de um curto circuito, onde se pode saltar diretamente para a fase de pulso da corrente, mesmo durante a corrente de base [36]. Estas possibilidades abrem um vasto campo de aplicações, como a soldagem

com curto circuito controlado na soldagem MIG/MAG hiperbárica a seco [37], controle da transferência metálica na soldagem MIG/MAG pulsada [38], entre outros.

Para a aplicação específica em soldagem molhada, existem relatos da utilização de vários tipos de características estáticas. No LABSOLDA, os ensaios iniciais foram feitos, na sua maioria, com uma fonte operando em tensão constante [9]. Na figura 4.4 é mostrado um oscilograma da soldagem molhada com arame tubular utilizando tensão constante de um destes ensaios.

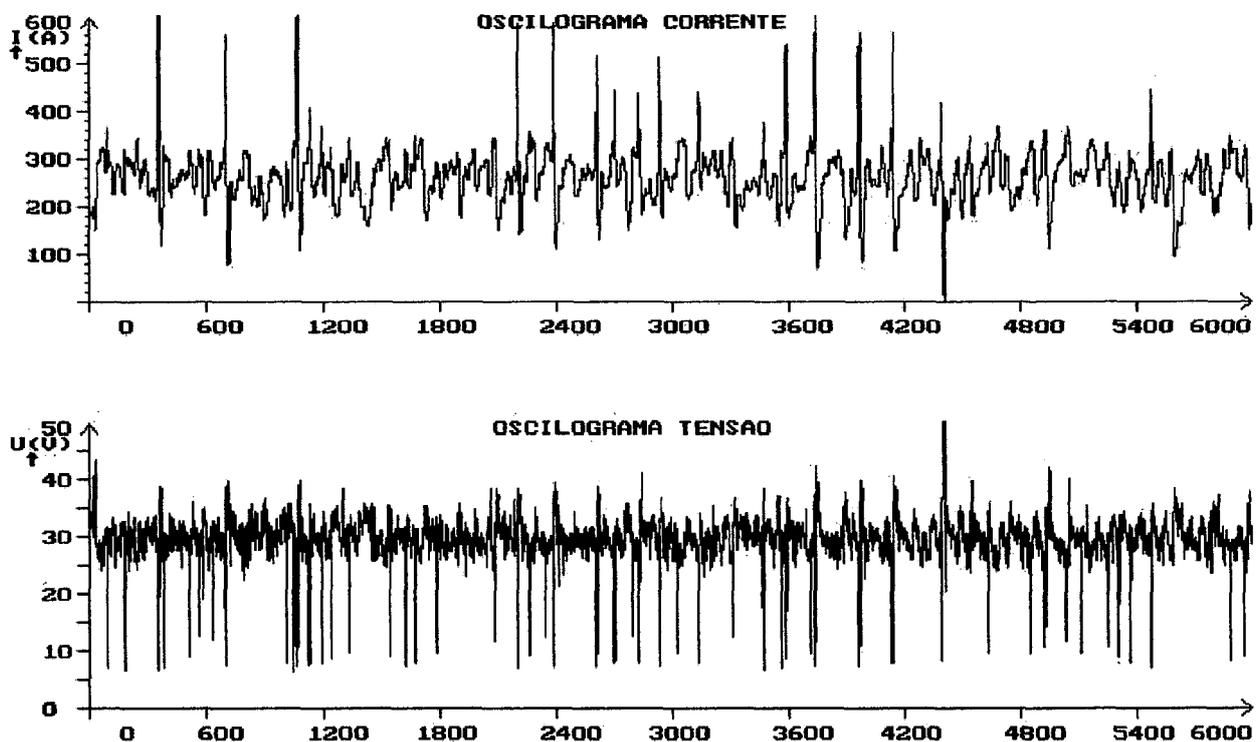


Figura 4.4 – Oscilograma de corrente e tensão de soldagem molhada com arame tubular utilizando uma fonte de tensão constante.

O aspecto que mais chama a atenção na figura 4.4 é o valor atingido pela corrente durante os curto-circuitos, que chega a 600 A.

Outro equipamento de soldagem muito utilizado na soldagem molhada com eletrodos revestidos é o conversor rotativo. Os conversores, apesar de normalmente possuírem um comportamento estático de corrente constante, tem uma característica que facilita a manutenção do arco na soldagem molhada. Esta característica favorável, consiste na produção de surtos de corrente durante os curto-circuitos, o que contribui para a estabilidade do processo (figura 4.5).

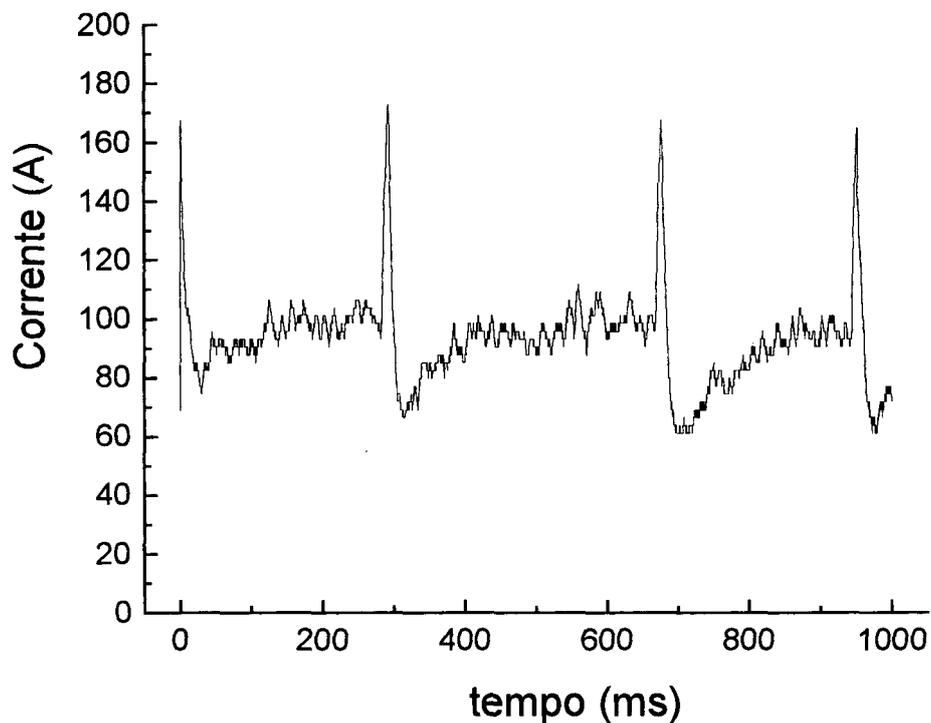


Figura 4.5 – Oscilograma de corrente de soldagem convencional com eletrodo revestido utilizando um conversor rotativo.

Pope [39], cita as vantagens da utilização destes surtos de corrente na soldagem molhada com eletrodos revestidos oxidantes, utilizando uma fonte eletrônica. Mais recentemente, Baixo [40], relata a utilização com sucesso de uma fonte de soldagem eletrônica desenvolvida especificamente para a soldagem molhada com um

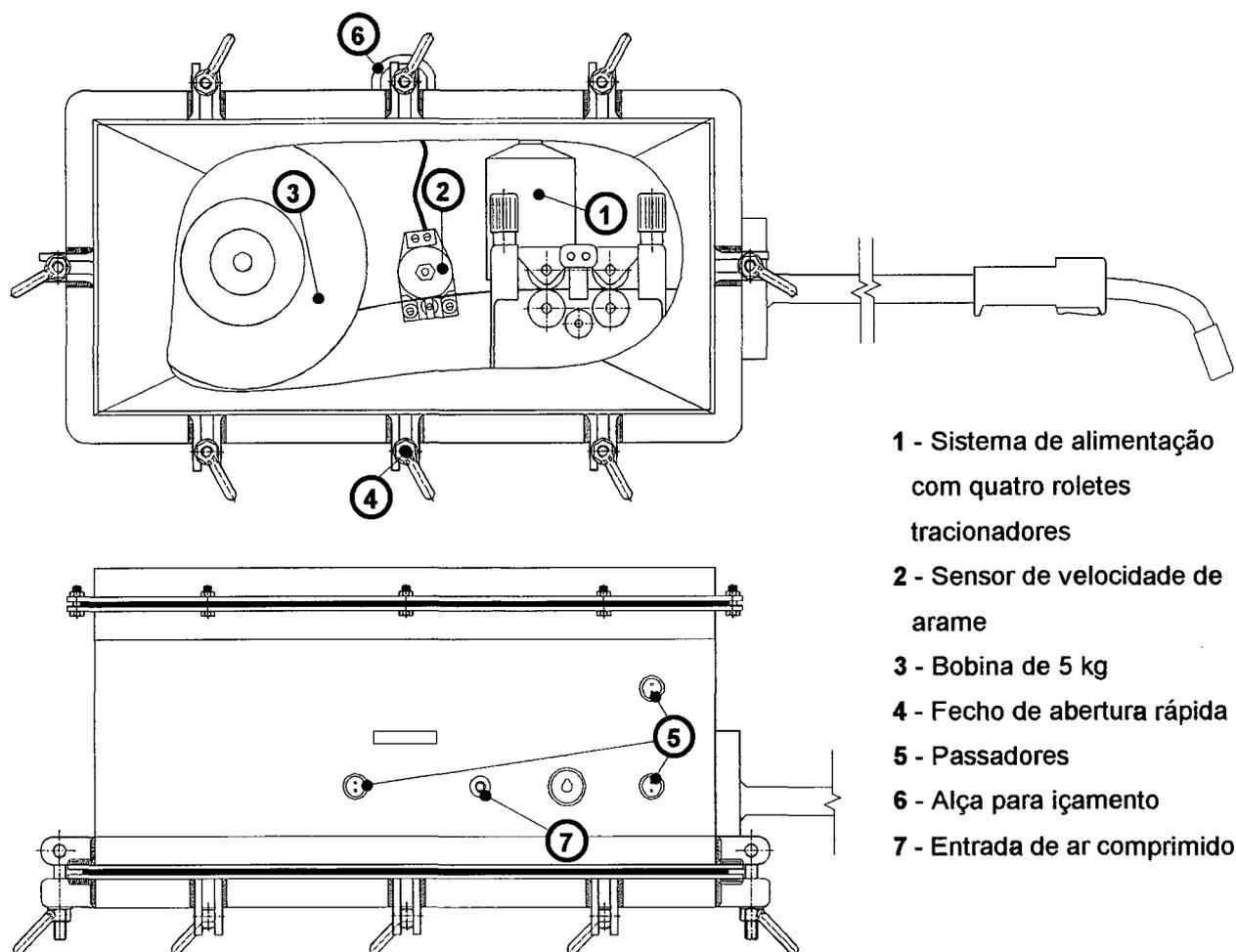
comportamento dinâmico e estático adaptado às necessidades da soldagem neste ambiente.

5 - Desenvolvimento e Construção do Alimentador de Arame para a Soldagem Molhada

Em face às dificuldades operacionais encontradas em trabalhos anteriores do LABSOLDA na soldagem molhada com arame tubular, foram levantadas uma série de sugestões para a continuidade do trabalho de desenvolvimento, principalmente as relacionadas com a alimentação do arame-eletrodo [9, 41]. Entre estas sugestões pode-se destacar o projeto e construção de um alimentador de arame dedicado a soldagem subaquática molhada [42].

5.1 - Concepção do Alimentador

Dentro do programa desenvolvido no LABSOLDA para produzir equipamentos de soldagem destinados ao uso em ambiente subaquático, está a construção de um alimentador de arame para aplicação em profundidades de até 30 m. Na figura 5.1 é apresentado um esquema do equipamento.



- 1 - Sistema de alimentação com quatro roletes tracionadores
- 2 - Sensor de velocidade de arame
- 3 - Bobina de 5 kg
- 4 - Fecho de abertura rápida
- 5 - Passadores
- 6 - Alça para içamento
- 7 - Entrada de ar comprimido

Figura 5.1 – Esquema do alimentador de arame desenvolvido para a soldagem molhada.

A ocorrência de interrupções na soldagem causadas por trancamentos do arame foi um dos problemas que prejudicou fortemente a realização dos ensaios iniciais com soldagem molhada. À época, a origem dos trancamentos foi principalmente creditada a presença de água na região de contato elétrico entre o arame e o bico de contato associada ao alto valor de corrente de pico atingido durante os curto-circuitos na soldagem com fonte de tensão constante (figura 4.4). Estas condições produziam micro-soldagens entre o eletrodo e bico de contato [9]. Em uma tentativa para minimizar ou eliminar o problema, foi desenvolvido e construído, um cabeçote

pressurizado com ar comprimido. O excesso de gás é forçado a sair pela folga entre o arame e orifício do bico de contato. Desta forma, fica impedida a entrada de água na região de transferência de corrente da pistola para o eletrodo. A pressurização do cabeçote também gerou um ambiente permanentemente seco que protege o motor e o tracionador de arame, reduzindo os riscos de dano ou acidente. Para não prejudicar a visibilidade do soldador, a quantidade de ar comprimido injetado no interior do alimentador de arame é suficiente apenas para impedir a entrada de água pelo bico de contato. Este primeiro protótipo é constituído de uma estrutura monobloco totalmente fabricada em aço inox 304 para garantir uma boa resistência a corrosão causada pelo agressivo ambiente marinho. As partes foram soldadas pelo processo TIG, sendo o gabinete formado por dois compartimentos estanques. No compartimento esquerdo se encontra o motor, e do lado oposto, o sistema tracionador, o transdutor de velocidade de alimentação de arame e a bobina de arame (figura 5.1). Completam a estrutura do sistema duas tampas de acesso aos compartimentos, sendo que a do compartimento da bobina de arame, possui um sistema de abertura rápida para facilitar a troca do eletrodo. A utilização de dois compartimentos estanques prevê a possibilidade de inundação do tracionador, permitindo a retirada, em caráter permanente, da tampa de acesso a este compartimento. Esta característica facilita a substituição das bobinas de arame dentro da água. O motor fica no outro compartimento, isolado do ambiente aquoso.

O forte atrito entre o arame e o interior do conduíte da pistola de soldagem, também gera problemas na alimentação de arame [42]. Tal dificuldade ocorre na soldagem com arames tubulares em geral, e normalmente se deve a curvaturas exageradas sofridas pelo arame no interior do conduíte da tocha e a liberação de pó do preenchimento do

arame que acaba por se depositar no conduíte [43]. Esta forte atrito, leva normalmente a um aumento do ajuste de pressão dos roletes sobre o arame, que piora ainda mais a situação, pois qualquer deformação sofrida pelo arame, vai impedi-lo de passar pelo bico de contato dando origem a uma nova causa para trancamentos. Para minimizar o problema, a primeira medida adotada consistiu na substituição do conduíte normal de aço por um de teflon, que, além de reduzir o atrito, ainda tem a vantagem adicional de não sofrer oxidação. A segunda medida consistiu na substituição dos roletes lisos por quatro roletes ranhurados para aumentar o atrito dos roletes com o arame. Apesar do sistema utilizado já possuir quatro roletes tracionadores, apenas os dois roletes inferiores, fornecidos pela Universidade Federal do Ceará, eram ranhurados. Foi então necessário o projeto e construção de roletes ranhurados também para o par tracionador superior. Estes roletes foram usinados em aço 1040 e tiveram a sua superfície recartilhada para aumentar o atrito com o arame. Posteriormente, os roletes foram temperados em água, revenidos e nitretados por plasma para garantir uma boa resistência ao desgaste.

Como o projeto eletro-eletrônico do equipamento derivou do cabeçote STA-20 desenvolvido para a soldagem de superfície, são utilizados todos os componentes eletrônicos do sistema original [44]. A principal modificação introduzida foi o desmembramento do subsistema de acionamento e tracionamento do subsistema de controle. Enquanto o primeiro acompanha o cabeçote alimentador, o subsistema de controle, acondicionado em uma unidade especial, permanece na superfície. A passagem dos cabos de alimentação, controle e aquisição de dados para o interior do cabeçote alimentador é feita por dispositivos chamados de passadores (figura 5.2) que foram desenvolvidos especialmente para as dimensões do equipamento.

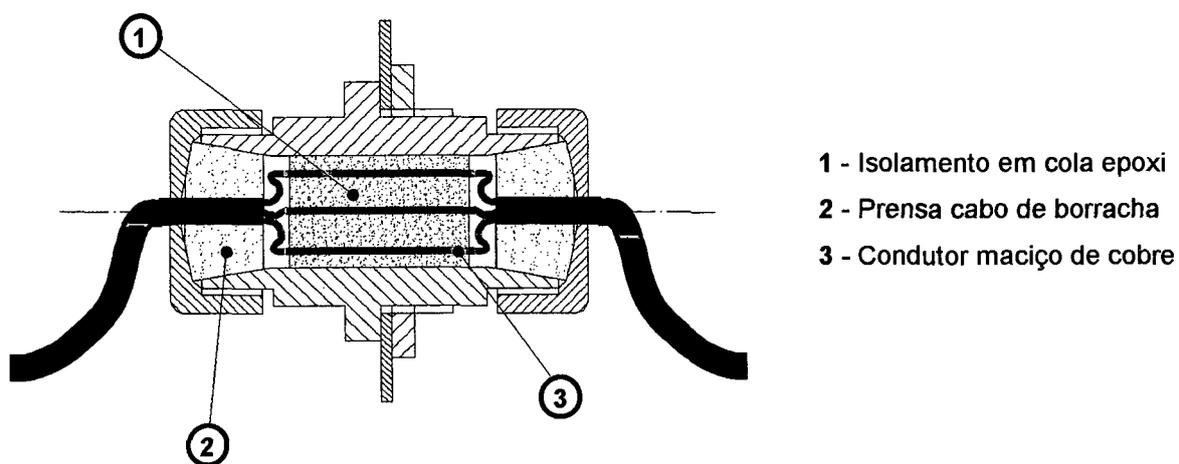


Figura 5.2 – Passador utilizado no alimentador.

Neste protótipo foram montados 20 m de cabo, o que limita a autonomia do alimentador a aproximadamente 15 m. A tocha de soldagem utilizada é uma tocha MIG sem sistema de refrigeração para a soldagem em superfície, com algumas adaptações. A principal delas é a substituição da micropistola (figura 5.3) para a soldagem manual (curva) por uma para a soldagem automática (reta) que facilita o tracionamento do arame e a fixação da tocha nos ensaios com soldagem automática (figura 5.4).

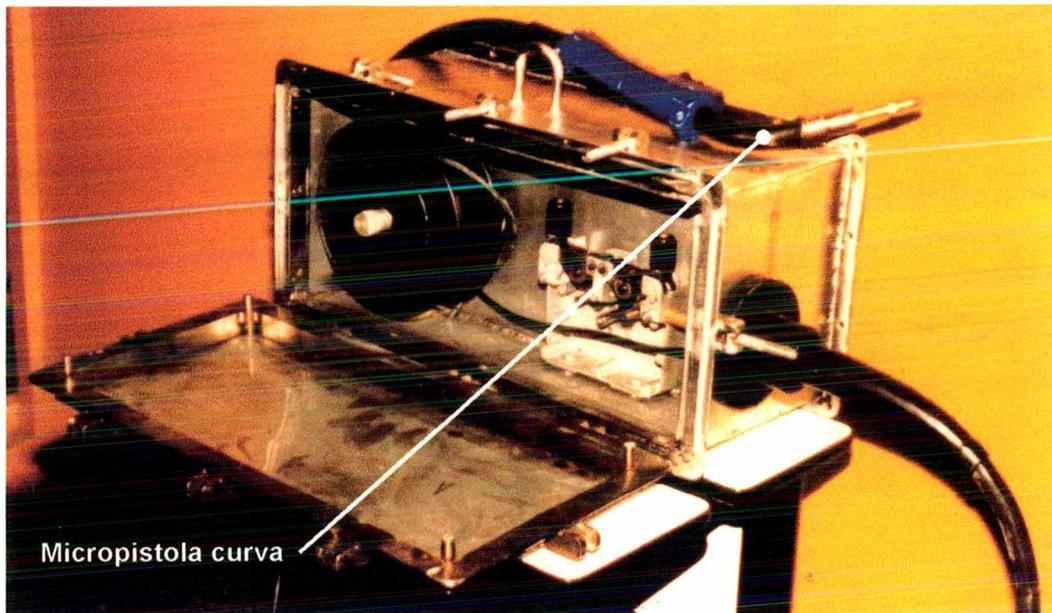


Figura 5.3 – Foto do cabeçote alimentador mostrando o detalhe da micropistola curva.

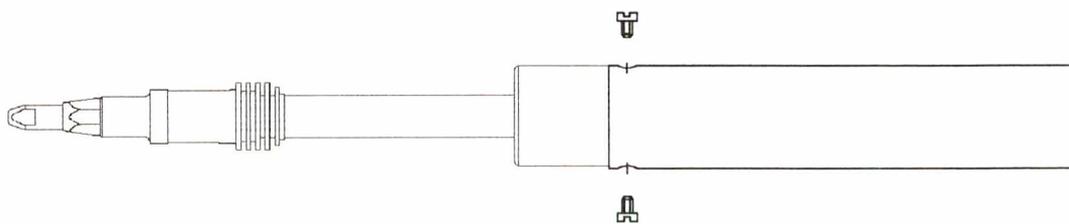


Figura 5.4 – Tocha com micropistola reta.

6 - Montagem da Bancada para Estudo da Soldagem Molhada com Arame Tubular

Conforme especificado nos objetivos do trabalho, foi criada uma infra-estrutura para a realização de ensaios, tanto por soldagem automatizada, quanto manual. Esta infra-estrutura é composta de sistemas para aquisição de dados e controle da fonte de soldagem, programas, equipamento de soldagem, sistema de deslocamento de tocha de soldagem e tanques para soldagem manual e automatizada (figura 6.1). Neste capítulo são descritas as etapas que levaram a montagem de cada equipamento da bancada.

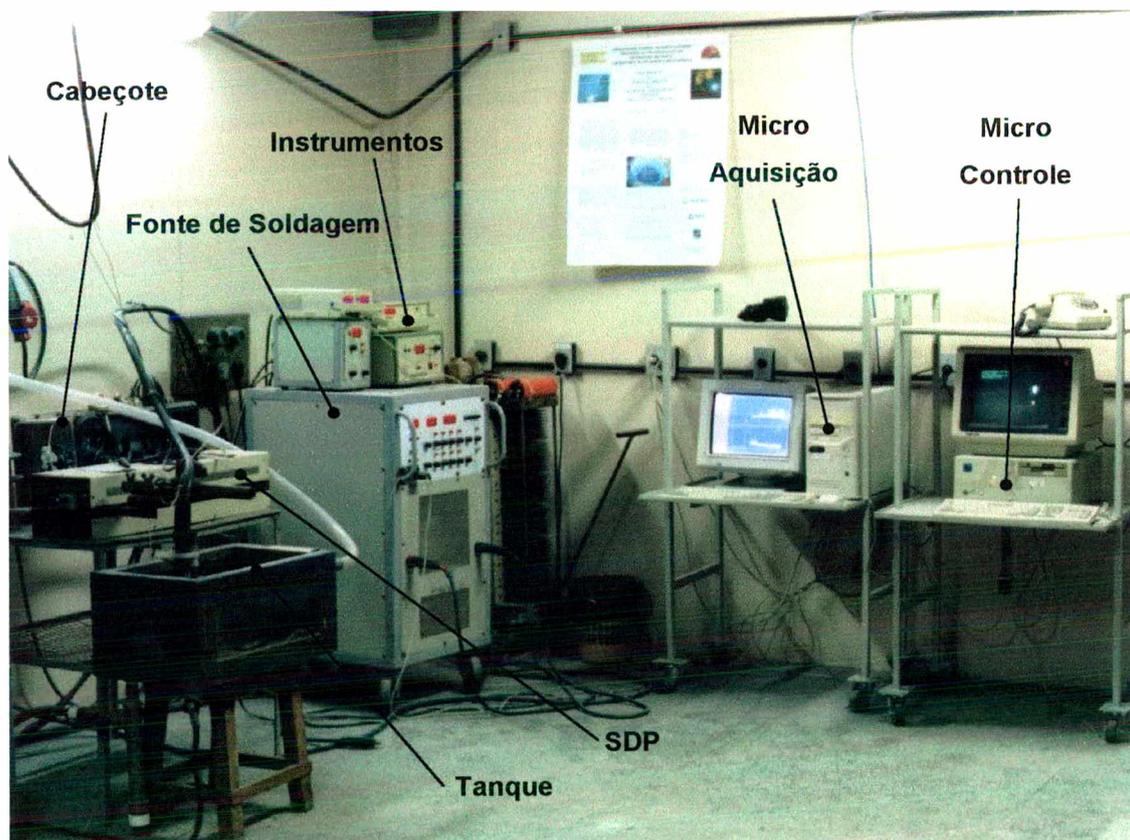


Figura 6.1 – Vista geral da bancada para soldagem molhada.

6.1 - Tanque de Soldagem

Para a soldagem automatizada, é utilizado um tanque com 15 cm de lâmina d'água (figura 6.3).

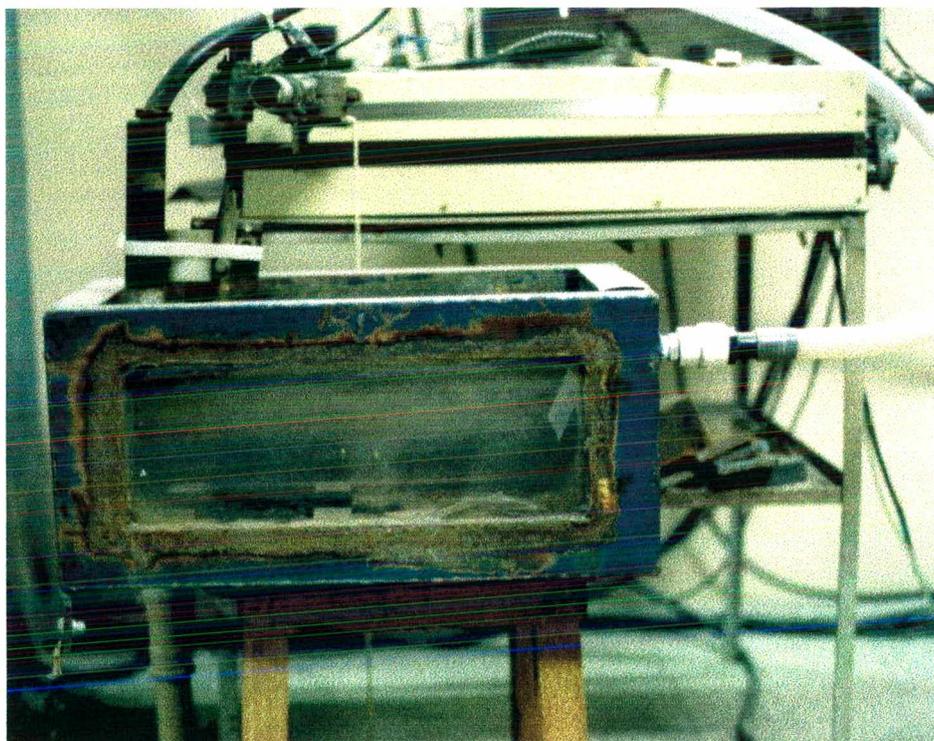


Figura 6.2 – Tanque para soldagem automatizada.

Alguns autores atribuírem a água salgada uma melhor abertura de arco, principalmente devido à maior condutividade elétrica e melhores condições de ionização da região aonde este irá se formar. A salinidade, também segundo estes autores, influencia positivamente a geometria do cordão, aumentando ligeiramente a sua largura e a penetração [45,46,47]. Apesar destes aspectos positivos da soldagem em água salgada, todos os ensaios foram conduzidos em água doce.

6.2 - Montagem do Sistema para Deslocamento Automático de Tocha

O LABSOLDA já desenvolveu um sistema para deslocamento automático de pistola que foi adaptado às necessidades impostas pelos testes com soldagem molhada. A utilização de um sistema automatizado de deslocamento de tocha elimina uma série de causas de variabilidade que são normalmente encontrados na soldagem manual, e que têm influência determinante no resultado dos ensaios. Duas possíveis fontes de variabilidade são, a variação da distância bico de contato-peça e a variação da velocidade de soldagem. As adaptações do sistema se concentraram no dispositivo de fixação da tocha de soldagem, sendo conduzidas de forma a permitir a soldagem com diferentes ângulos de inclinação da tocha. O sistema foi adaptado apenas para a utilização em conjunto com o tanque de soldagem com 15 cm de lâmina d'água, uma vez que o tanque maior se destina apenas a soldagem manual.

6.3 - Montagem e Calibração dos Sistemas de Aquisição de Dados e Controle da Fonte de Soldagem

A utilização de sistemas de aquisição de dados na soldagem molhada tem grande importância, principalmente devido à dificuldade de se utilizar métodos mais convencionais de monitoração da soldagem como a visão e a audição. Estes métodos também não permitem uma análise mais científica da estabilidade do arco, que é um dos pontos críticos da soldagem molhada com arame tubular. Além disso, a aquisição de dados também foi utilizada no sistema de controle da fonte de soldagem por microcomputador, uma vez que este “escolhe” a corrente de soldagem adequada para

cada valor de tensão lido [48]. Outro aspecto importante foi a monitoração da velocidade de avanço do arame-eletrodo, no intuito de observar a ocorrência de trancamentos do arame [9,41].

6.3.1 – Montagem do Sistema de Controle das Variáveis de Soldagem

Todo o sistema de aquisição e controle das variáveis de soldagem é baseado em placas INTERDATA II (figura 6.4) desenvolvidas no LABSOLDA [49].

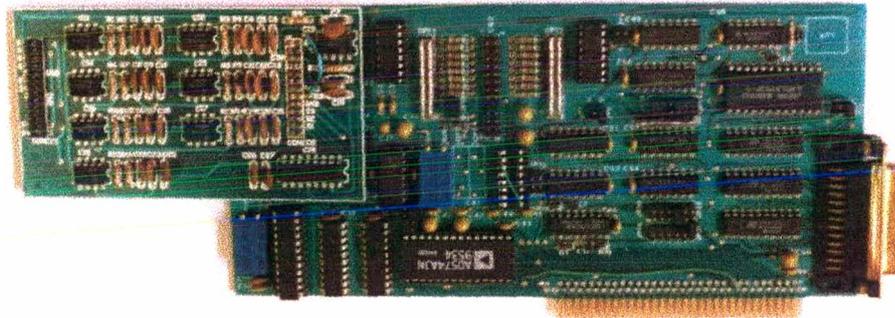


Figura 6.3 – Placa de aquisição de dados INTERDATA II.

Estas placas servem como interfaces de aquisição e controle de dados, sendo sua principal função converter os sinais analógicos, que são gerados pelas unidades de medição e tratamento, em sinais digitais. Uma vez processados, estes sinais serão convertidos em sinais analógicos que serão utilizados para o controle da fonte de

soldagem. A placa tem um conector compatível com o barramento de 16 bit de qualquer computador da linha IBM/PC e possui as seguintes unidades:

- Um conversor A/D de 16 canais, com 14 canais plenamente disponíveis para a aquisição de dados;
- Um conversor D/A de 8 canais, que é utilizado para o controle de equipamentos;
- Um freqüencímetro;
- Uma porta digital com 8 entradas e 8 saídas que são utilizadas para ativar e desativar equipamentos ou realizar comunicação digital de dados.

Devido à necessidade de alta velocidade de processamento das informações que são coletadas para o controle da fonte de energia durante a soldagem, é usado um computador com uma placa INTERDATA exclusivamente para este fim. Neste caso, um programa faz o que se pode chamar de controle adaptativo da característica dinâmica do equipamento de soldagem. O tempo médio consumido entre cada coleta de dados, processamento e envio do sinal de controle é de aproximadamente 200 μ s, o que inviabiliza a utilização do mesmo computador para a exibição de oscilogramas. Para o controle da dinâmica do equipamento de soldagem em tempo real foi necessário o desenvolvimento do programa "Molhada.exe". O programa é composto por vários "caminhos" que podem ser escolhidos de acordo com os dados elétricos coletados durante a soldagem. Cada "caminho" resulta em um valor de corrente que é enviado ao equipamento de soldagem. Dentro do programa também está inserida a equação de consumo do arame, que relaciona a corrente de soldagem com a velocidade de alimentação do arame. Desta forma, quando se seleciona uma corrente de soldagem, o programa automaticamente calcula a velocidade de alimentação do

arame-eletrodo. Esta capacidade visa facilitar a operação do equipamento, conferindo um certo sinergismo ao sistema.

6.3.2 – Montagem do Sistema de Monitoração das Variáveis de Soldagem

O sistema de monitoração das variáveis de soldagem é composto por um computador conectado a um sistema de medição de corrente e tensão TC-1 marca IMC e a um sistema de medição de velocidade do arame MVA-1 do mesmo fabricante. Este sistema é responsável pela aquisição de dados para gravação em disco rígido e geração de oscilogramas. Foram desenvolvidos vários programas para a monitoração do processo de soldagem, alguns deles são listados abaixo:

- Osciva.exe – Programa para aquisição de corrente, tensão e velocidade de alimentação do arame. Permite a aquisição dos sinais sempre dois a dois, por exemplo, corrente e tensão, tensão e velocidade do arame ou corrente e velocidade do arame. O programa foi utilizado principalmente para a observação do comportamento da velocidade do arame através de oscilogramas, com o objetivo de observar os trancamentos do arame [9,41].
- Oscilos4.exe – Evolução do programa anterior, sendo possível aquisitar quatro canais simultaneamente. Com este programa é possível gerar oscilogramas de corrente, tensão e velocidade do arame em função do tempo, com uma única aquisição de dados.
- Caligen.exe – Gera funções de transferência que são utilizadas pelos programas de controle e aquisição de dados. As funções de transferência são necessárias para

converter os valores numéricos gerados pela placa de aquisição de dados (números entre Zero e 4096) na grandeza física que está sendo medida ou controlada.

- Itdinst60.exe – Programa instalador da placa INTERDATA que realiza uma série de auto-testes da placa. Este programa gera um arquivo chamado “placa.ini” que contém dados do computador no qual a placa está instalada. O arquivo “placa.ini” é utilizado por todos os programas de controle e aquisição de dados.
- Itdte60.exe – Programa utilizado para testar todas as funções da placa INTERDATA.

6.3.3 – Procedimentos de Calibração

Devido à conotação fortemente experimental do trabalho, foram definidos procedimentos para a calibração da instrumentação de controle e aquisição de dados. É importante salientar que apesar de não terem sido utilizados padrões rastreáveis para a calibração, a utilização de um procedimento contribui para a redução dos erros inevitáveis em qualquer medição. Tal procedimento foi definido e está descrito no trabalho “Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco” do Eng. Meng. Marcelo de Assis Corrêa [50]. Apesar da importância do tema, os objetivos não englobam a discussão de aspectos metrológicos dos experimentos, e portanto, este assunto não é discutido neste trabalho.

6.4 - Montagem do Retificador Adicional na Fonte de Soldagem INVERSAL 450

Já nos primeiros ensaios com a bancada, foi observada uma tendência a extinção do arco. Estas extinções influenciam fortemente o aspecto visual dos cordões de solda e a estabilidade do arco. É comum observar-se falhas de preenchimento no cordão, cuja dimensão depende do tempo que o arco leva para reabrir. A primeira explicação que surgiu para as extinções do arco foi a falta de tensão em vazio do equipamento de soldagem para manter a corrente, e conseqüentemente, o arco. Esta explicação foi corroborada pela observação oscilográfica do comportamento do arco, que revelou que a maioria das extinções do arco ocorre devido a um aumento crescente da impedância do sistema arco-eletrodo. Assim, para manter a corrente constante, a tensão sobe até a tensão limite da fonte para a dada corrente, quando então ocorre a redução da corrente e extinção do arco (figura 6.5).

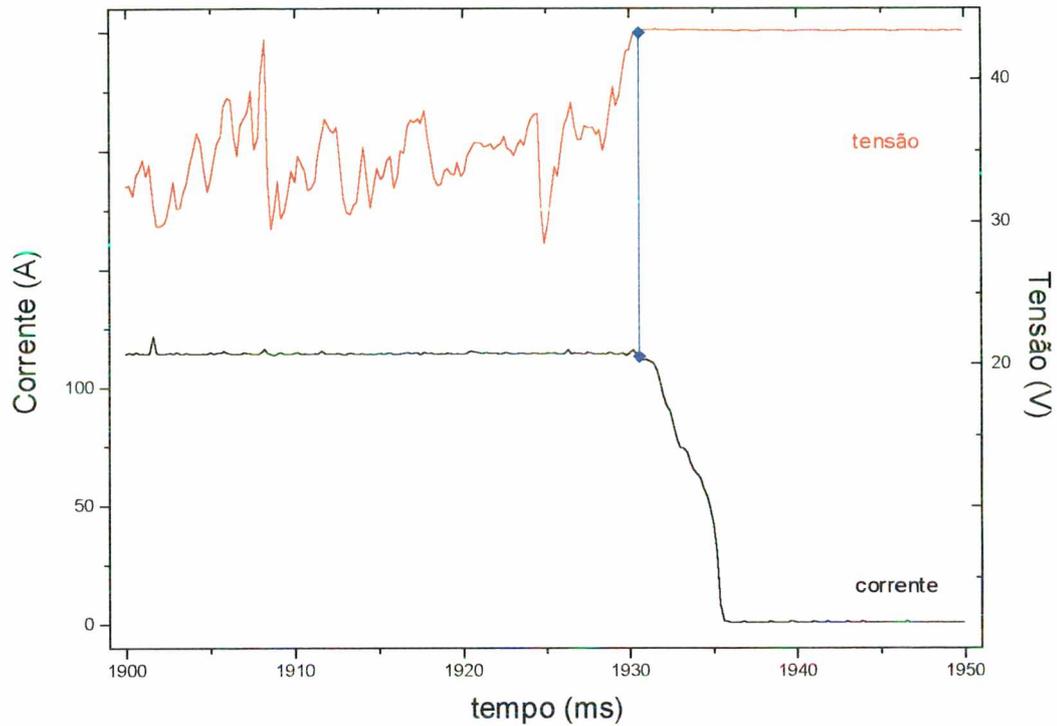


Figura 6.4 – Oscilograma de soldagem com o arame oxidante e imposição de corrente, mostrando uma extinção do arco.

Com o objetivo de minimizar o número de extinções, foi acoplado um retificador adicional em série com a fonte de soldagem INVERSAL 450 de forma a obter uma tensão em vazio de 130 V. O retificador adicional foi montado com um transformador de fonte de soldagem ligado a uma ponte retificadora e um banco de capacitores (figura 6.6).

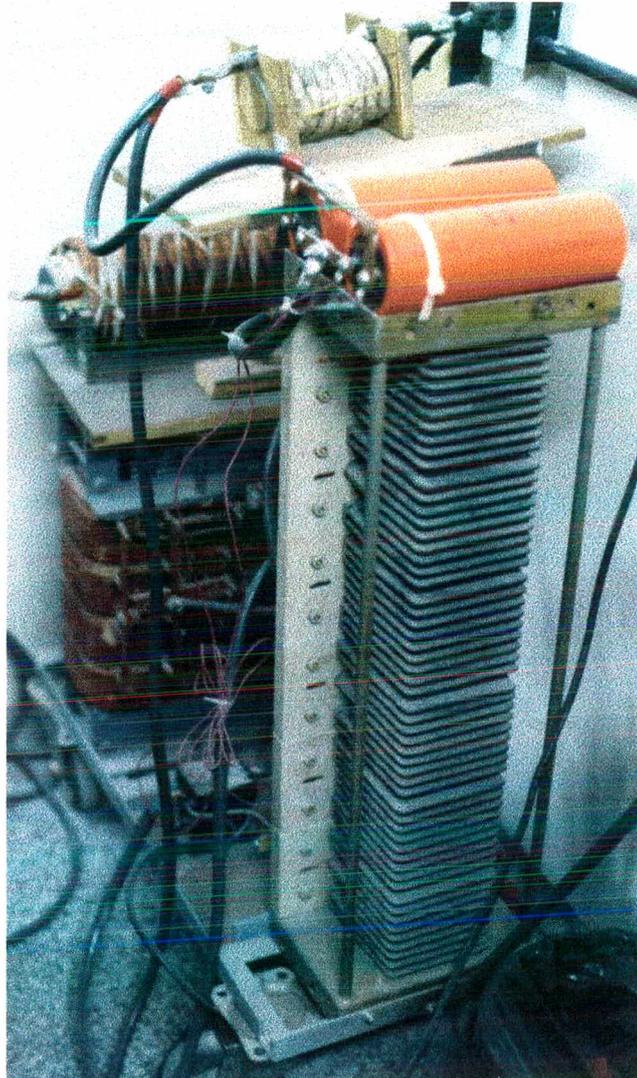


Figura 6.5 – Foto do retificador adicional.

O retificador adicional é acoplado em série ao retificador da INVERSAL 450 como mostra o esquema da figura 6.7.

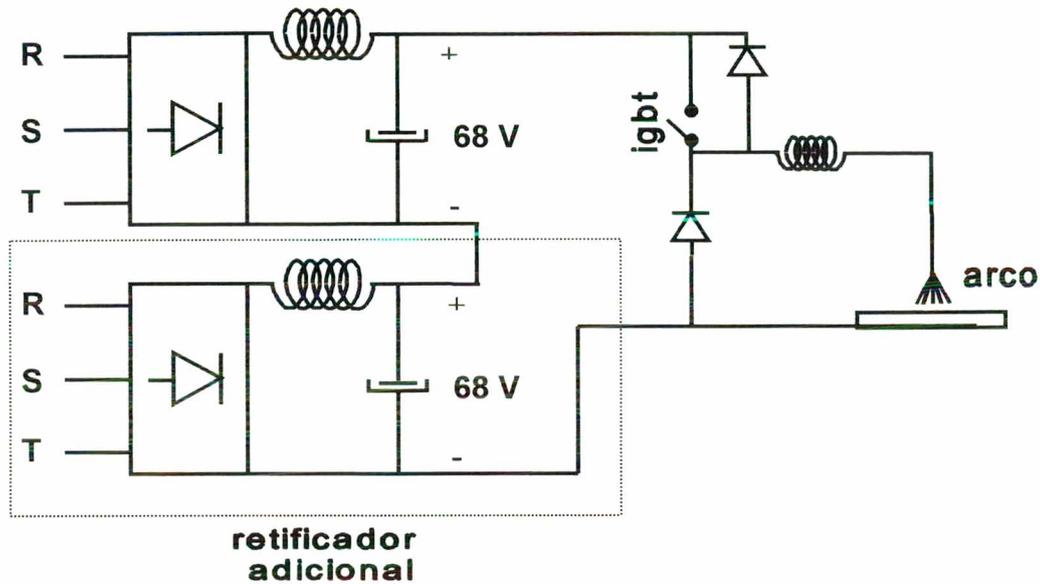


Figura 6.6 – Esquema de ligação do retificador adicional.

Como o controle da fonte de soldagem é feito através de um conversor chaveado a transistores IGBT's [36], a utilização de uma tensão na entrada do conversor com o dobro do valor de projeto, acarretaria o chaveamento em uma frequência também duas vezes maior. Para evitar a sobrecarga dos componentes, foi acrescentado um indutor ao circuito que reduziu a taxa de subida e descida da corrente nos chaveamentos do transistor, reduzindo conseqüentemente a frequência. Os novos ensaios realizados com o retificador adicional mostraram que a maior disponibilidade de tensão não influenciou significativamente os períodos de extinção do arco (figura 6.8), fato que se tenta explicar com maior profundidade no capítulo 7.

Para as soldagens realizadas utilizando a fonte de soldagem com 130 V de tensão em vazio, foi necessária uma adaptação do sistema de aquisição de tensão de soldagem. Como o sistema de medição de corrente e tensão TC-1 está limitado à medição de

tensões inferiores a 100 V, foi montado um divisor de tensão resistivo composto de dois resistores de 10 Ω . O objetivo do divisor é reduzir a tensão pela metade, porém devido a relação de impedâncias entre o divisor resistivo e a entrada de medição do TC-1, a tensão foi reduzida a um terço da tensão real. Apesar da **redução de tensão** acima do **previsto**, o valor de tensão lido pelo sistema de medição ainda está dentro da faixa ótima de medição do TC-1 e o efeito da redução foi plenamente compensado pela recalibração do sistema com a geração de novas funções de transferência.

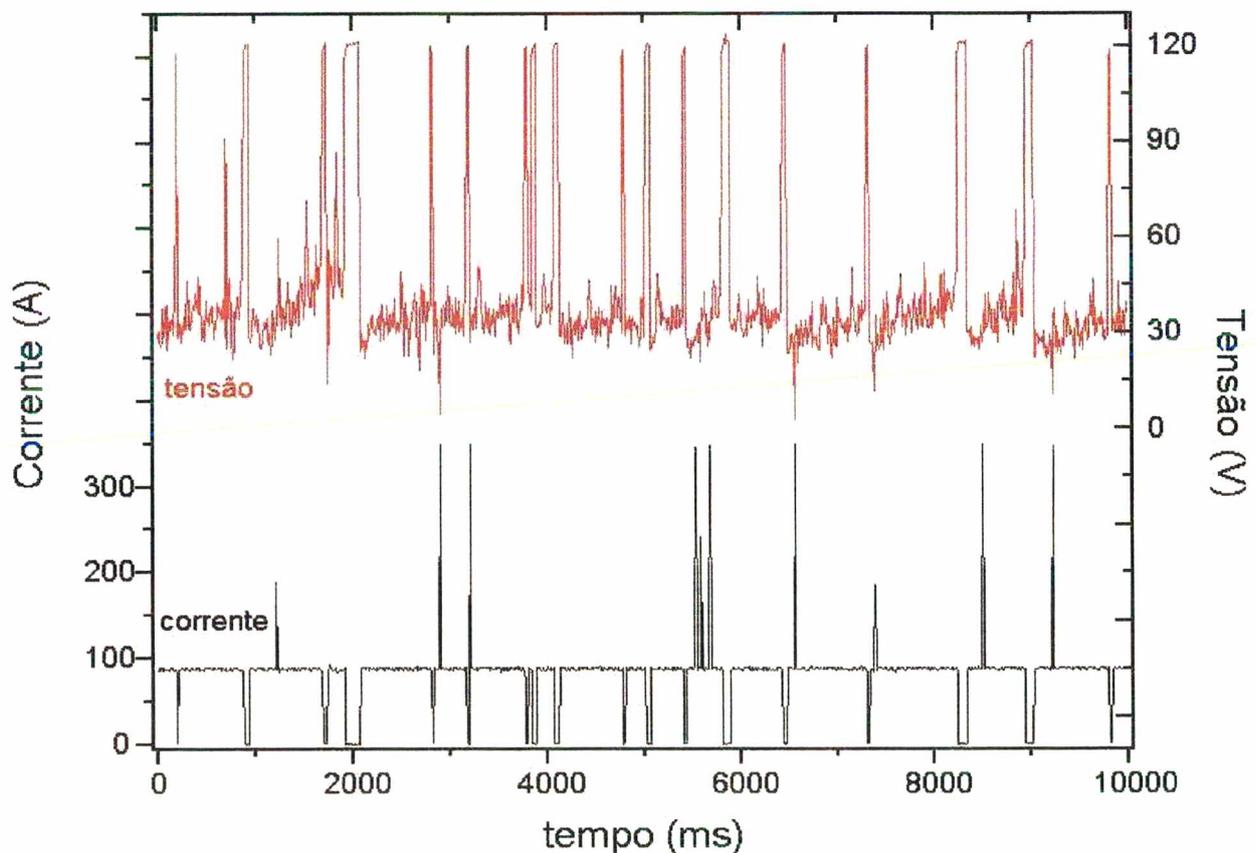


Figura 6.7 – Oscilograma de corrente e tensão mostrando as extinções do arco na soldagem com a fonte de 130 V de tensão em vazio.

7 - Metodologia Experimental

7.1 - Materiais

Neste trabalho são analisados dois tipos de arames tubulares autoprotégidos. Um oxidante produzido experimentalmente para a soldagem molhada pela empresa ESAB sob o código T508P3 e um arame E-70 T1 convencional, ambos de 1,6 mm de diâmetro. Os cordões depositados com os arames tubulares foram soldados de forma mecanizada. De modo a comparar o desempenho da soldagem com arames tubulares ao da soldagem com eletrodos revestidos, ambos oxidantes, foi determinada a taxa de deposição para os dois processos. O eletrodo revestido utilizado, foi um eletrodo de 3,2 mm de diâmetro, desenvolvido para a soldagem submarina, sendo os cordões depositados por solda manual. Os ensaios foram conduzidos em um tanque com 10 cm de lâmina d'água, por simples deposição em chapas de aço ABNT 1020 com 12 mm de espessura na posição plana. Para analisar a influência das variáveis sobre o processo de soldagem, foram realizados ensaios de simples deposição em chapas de aço ABNT 1020 com 10 mm de espessura.

Para a realização dos ensaios mecânicos, foram utilizados corpos de prova também em aço ABNT 1020, porém, com espessura de 19 mm. Estas chapas foram preparadas com junta em 'V' a 60°, com cobre-junta e cachorros para sujeição das peças (figura 7.1).

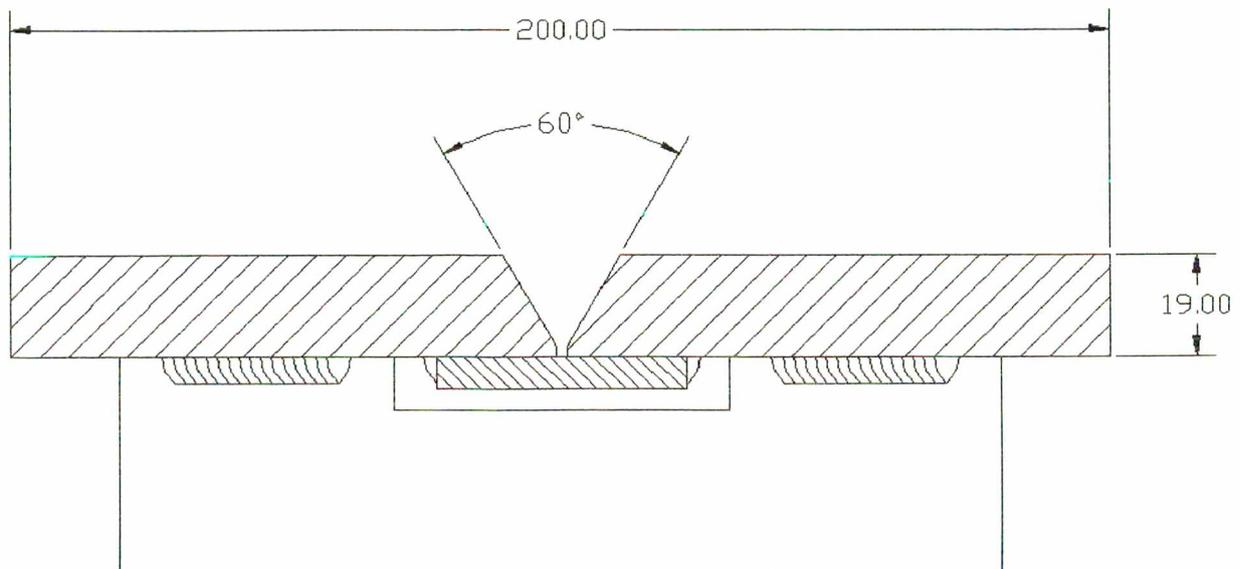


Figura 7.1 – Junta em chapa de 19 mm soldada com arame tubular.

7.2 - Fonte de Soldagem

Para a soldagem dos corpos de prova foi utilizada uma fonte de soldagem transistorizada controlada por computador. Este controle, chamado de controle adaptativo de corrente de soldagem, consiste de um programa de computador que monitora o valor de tensão de soldagem e calcula o valor de corrente instantânea para cada valor de tensão medido. O comportamento do controle adaptativo é mostrado na figura 7.2. A área sombreada em verde, indica os limites de tensão dentro dos quais atua a característica estática tombante. Dentro desta área, a corrente de soldagem instantânea é calculada em função da corrente de referência (I_{ref}) e da tensão instantânea. A relação entre a tensão e a corrente de controle é inversamente

proporcional, ou seja, quanto maior o valor atingido pela tensão, menor o valor de corrente enviado para a fonte de soldagem (figura 7.3). Para tensões baixas (área azul), é produzido um surto de corrente para redução do tempo de duração do curto-circuito. Após um curto circuito ou abertura de arco, o controle impõe a corrente de referência por 10 ms para permitir a estabilização do arco.

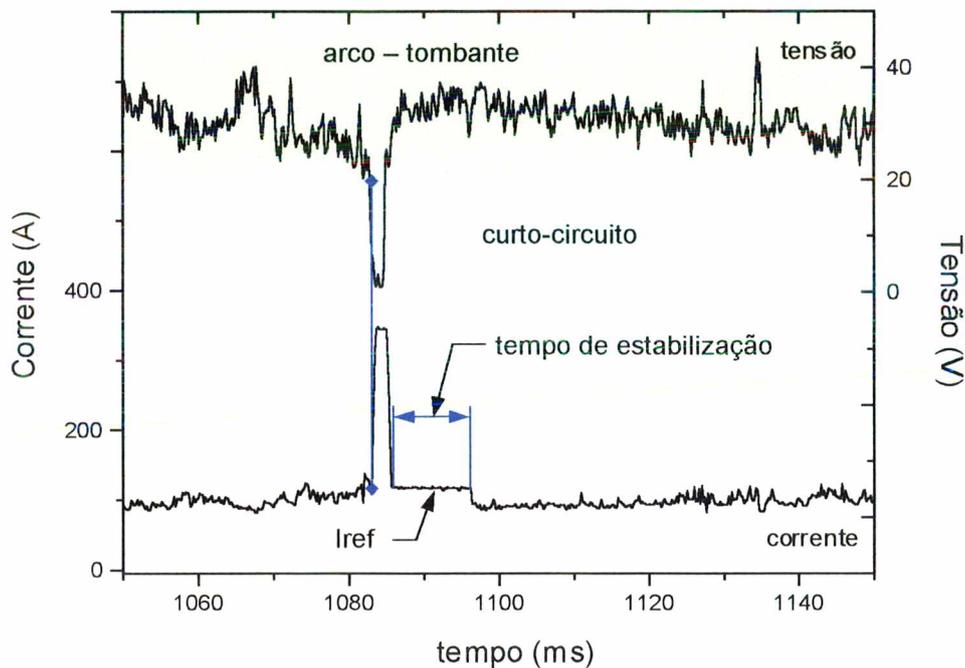


Figura 7.2 – Oscilograma de corrente e tensão mostrando o princípio de funcionamento do controle adaptativo de corrente.

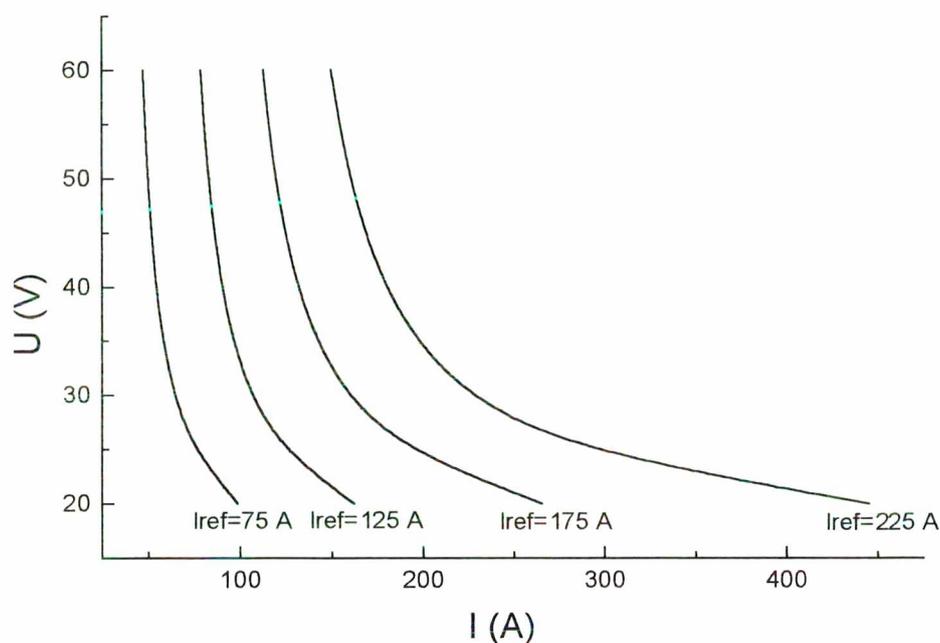


Figura 7.3 – Curvas de característica estática tombante para diferentes correntes de referência.

7.3 - Aquisição e Análise de Dados

Para cada conjunto de parâmetros estudado foram realizados dois cordões, sendo feita para cada cordão uma aquisição de corrente e tensão de 20 segundos. Os dados de corrente e tensão foram então tratados por um programa que calculou os valores de corrente média (I_m), corrente eficaz (I_{ef}), desvio padrão da corrente (DPI), tensão média (U_m), tensão eficaz (U_{ef}), desvio padrão da tensão (DPU), percentual do tempo de extinção do arco sobre o tempo total de aquisição (%ext), número de extinções no período de aquisição (Numext), frequência dos curto-circuitos (freqCC) e tempo médio

dos curto-circuitos (t_{medCC}). Na figura 7.4 é mostrado um exemplo dos dados de saída do programa.

```

Res-0208.txt - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Pesquisar  Ajuda

0208991.dat  Im= 135 A Ief= 144 A DPI= 49 A
             Um=24.6 V Uef=25.1 V DPU=4.8 V
             %ext= 0 Numext= 0 freqCC= 23.3 Hz tmedCC= 1.64 ms

0208992.dat  Im= 137 A Ief= 146 A DPI= 52 A
             Um=24.5 V Uef=25.1 V DPU=5.3 V
             %ext= 0 Numext= 1 freqCC= 25.5 Hz tmedCC= 1.66 ms

0208993.dat  Im= 144 A Ief= 157 A DPI= 63 A
             Um=23.7 V Uef=24.3 V DPU=5.6 V
             %ext= 0 Numext= 0 freqCC= 29.9 Hz tmedCC= 2.05 ms

0208994.dat  Im= 165 A Ief= 186 A DPI= 87 A
             Um=21.6 V Uef=22.7 V DPU=6.8 V
             %ext= 0 Numext= 0 freqCC= 36.4 Hz tmedCC= 3.21 ms

0208995.dat  Im= 148 A Ief= 163 A DPI= 68 A
             Um=23.3 V Uef=24.0 V DPU=5.9 V
             %ext= 0 Numext= 0 freqCC= 33.8 Hz tmedCC= 2.17 ms

0208996.dat  Im= 156 A Ief= 186 A DPI=102 A
             Um=25.5 V Uef=28.7 V DPU=13.1 V
             %ext= 6 Numext=15 freqCC= 32.7 Hz tmedCC= 3.82 ms
  
```

Figura 7.4 – Arquivo texto gerado pelo programa de tratamento de dados.

7.4 – Métodos Estatísticos Utilizados

Para o arame E-70 T1 de 1,6 mm foi feita uma análise de variância para verificar se a distância bico de contato-peça (DBCP), velocidade de soldagem (V_s), velocidade do arame (V_a), e corrente de referência (I_{ref}), influenciam a estabilidade do arco medida através do desvio padrão da tensão. Já para o arame oxidante, foi utilizado um planejamento experimental fatorial 2^n [51] que gera uma matriz de experimentos definindo a ordem e valor das variáveis estudadas antes da realização dos ensaios

(tabelas 7.1, 7.2 e 7.3). Esta metodologia permite calcular também interações entre as variáveis, que não podem ser determinadas através de uma análise de variância simples. Para o arame oxidante, portanto, foi possível analisar a influência da distância bico de contato-peça (DBCP), da velocidade de soldagem (V_s), da velocidade do arame (V_a), da corrente de referência (I_{ref}) e as interações entre estes fatores, sobre a estabilidade do arco medida através do desvio padrão da tensão, tempo médio dos curto-circuitos e frequência dos curto-circuitos. No segundo experimento fatorial, conduzido com o arame oxidante, foi possível o estudo do efeito da polaridade e da tensão em vazio de 130 V sobre a estabilidade do arco. Como pretendia-se estudar o efeito de apenas duas variáveis, poderia ser utilizado um experimento fatorial 2^2 , resultando em um total de 8 ensaios (com duas replicações). Para aumentar o número de experimentos, e conseqüentemente a confiabilidade dos resultados, foi incluída mais uma variável independente, a distancia bico de contato / peça (DBCP). Foi, portanto, utilizado um experimento fatorial 2^3 com um total de 16 ensaios (com duas replicações). Através deste experimento foi possível avaliar a influência da polaridade, da tensão em vazio de 130 V e da distância bico de contato / peça (DBCP) sobre a estabilidade do arco medida através do desvio padrão da tensão.

7.5 - Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros utilizados na soldagem com o arame oxidante são mostrados nas tabelas 7.1, 7.2 e 7.3, consistindo nas matrizes de experimentos. Para todos os ensaios foi utilizada a técnica de passe estreito, sendo a tocha mantida perpendicular a chapa.

Tabela 7.1 – Matriz de experimentos dos testes realizados para a verificação da influência da velocidade de soldagem, velocidade do arame e corrente de referência.

ARAME OXIDANTE			
	Vs (cm/min)	Va (m/min)	Iref (A)
1	15(-)	2,3(-)	125(-)
2	15(-)	2,3(-)	125(-)
3	25(+)	2,3(-)	125(-)
4	25(+)	2,3(-)	125(-)
5	15(-)	3,0(+)	125(-)
6	15(-)	3,0(+)	125(-)
7	25(+)	3,0(+)	125(-)
8	25(+)	3,0(+)	125(-)
9	15(-)	2,3(-)	150(+)
10	15(-)	2,3(-)	150(+)
11	25(+)	2,3(-)	150(+)
12	25(+)	2,3(-)	150(+)
13	15(-)	3,0(+)	150(+)
14	15(-)	3,0(+)	150(+)
15	25(+)	3,0(+)	150(+)
16	25(+)	3,0(+)	150(+)

Tabela 7.2 – Matriz de experimentos dos testes realizados para a verificação da influência da distância bico de contato-peça, velocidade do arame e corrente de referência.

ARAME OXIDANTE			
	DBCP (mm)	Va (m/min)	Iref (A)
1	10(-)	2,3(-)	125(-)
2	20(+)	2,3(-)	125(-)
3	10(-)	3,0(+)	125(-)
4	20(+)	3,0(+)	125(-)
5	10(-)	2,3(-)	150(+)
6	20(+)	2,3(-)	150(+)
7	10(-)	3,0(+)	150(+)
8	20(+)	3,0(+)	150(+)
9	10(-)	2,3(-)	125(-)
10	20(+)	2,3(-)	125(-)
11	10(-)	3,0(+)	125(-)
12	20(+)	3,0(+)	125(-)
13	10(-)	2,3(-)	150(+)
14	20(+)	2,3(-)	150(+)
15	10(-)	3,0(+)	150(+)
16	20(+)	3,0(+)	150(+)

Tabela 7.3 – Matriz de experimentos dos testes realizados para a verificação da influência da distância bico de contato-peça, tensão em vazio e polaridade.

ARAME OXIDANTE			
	DBCP (mm)	Uvazio (V)	Polar.
1	10 (-)	60 V(-)	neg (-)
2	20 (+)	60 V(-)	neg (-)
3	10 (-)	130 V(+)	neg (-)
4	20 (+)	130 V(+)	neg (-)
5	10 (-)	60 V(-)	pos (+)
6	20 (+)	60 V(-)	pos (+)
7	10 (-)	130 V(+)	pos (+)
8	20 (+)	130 V(+)	pos (+)
9	10 (-)	60 V(-)	neg (-)
10	20 (+)	60 V(-)	neg (-)
11	10 (-)	130 V(+)	neg (-)
12	20 (+)	130 V(+)	neg (-)
13	10 (-)	60 V(-)	pos (+)
14	20 (+)	60 V(-)	pos (+)
15	10 (-)	130 V(+)	pos (+)
16	20 (+)	130 V(+)	pos (+)

Na soldagem com o arame E-70 T1 não foi utilizado um planejamento de experimentos fatorial, existe portanto, uma faixa de parâmetros de soldagem que é mostrada na tabela 7.4. Como estes foram os primeiros ensaios realizados com o controle adaptativo da corrente, não se tinha idéia da dificuldade que surgiria posteriormente para a análise da estabilidade do arco através do desvio padrão da tensão. Isto porque, os valores de desvio padrão calculados ficaram muito próximos, atingindo valores mais elevados apenas para velocidades de arame incompatíveis com a corrente de referência. Esta constatação, impedia uma avaliação da influência da velocidade do arame sobre a estabilidade do arco para uma dada corrente de referência. A adoção de um planejamento fatorial 2^n nos testes com o arame oxidante corrigiu esta deficiência. Para a estimativa da taxa de deposição foi utilizada a mesma corrente média de 125 A, tanto na soldagem com eletrodos revestidos, quanto com arame tubular. Todos os

cordões foram depositados na posição plana sem tecimento. O ângulo utilizado entre a tocha e a peça foi de 90° .

Tabela 7.4 – Parâmetros de soldagem utilizados na soldagem com o arame E-70 T1.

ARAME RUTÍLICO				
	DBCP (mm)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	Iref (A)
1	15	15	1,9	125
2	15	15	2	125
3	15	15	2	125
4	15	15	2,1	125
5	15	15	2,1	125
6	15	15	2,1	125
7	15	15	2,1	125
8	15	15	2,3	125
9	15	15	2,3	125
10	15	15	2,3	125
11	15	15	2,3	125
12	15	15	2,4	125
13	15	15	2,4	125
14	15	15	2,9	125
15	15	15	2	125
16	15	15	2,1	125
17	15	15	2,3	125
18	15	15	2,4	125
19	15	15	2,6	125
20	15	15	3,0	125
21	15	20	2,1	125
22	15	20	2,1	125
23	15	20	2,3	125
24	15	20	2,3	125
25	15	20	2	125
26	15	20	2	125
27	10	20	2,3	125
28	10	20	2,3	125
29	15	20	2,9	175
30	15	20	2,9	175
31	15	20	3,1	175
32	15	20	3,1	175
33	15	20	2,8	175
34	15	20	2,8	175
35	10	20	2,9	175
36	10	20	2,3	125

7.6 - Medição Geométrica

Depois de soldadas, as chapas foram cortadas para a preparação de macrografias que foram fotografadas. A medição geométrica dos cordões foi feita utilizando um software de CAD (desenho auxiliado por computador), tomando por base as macrografias digitalizadas (figura 7.5).

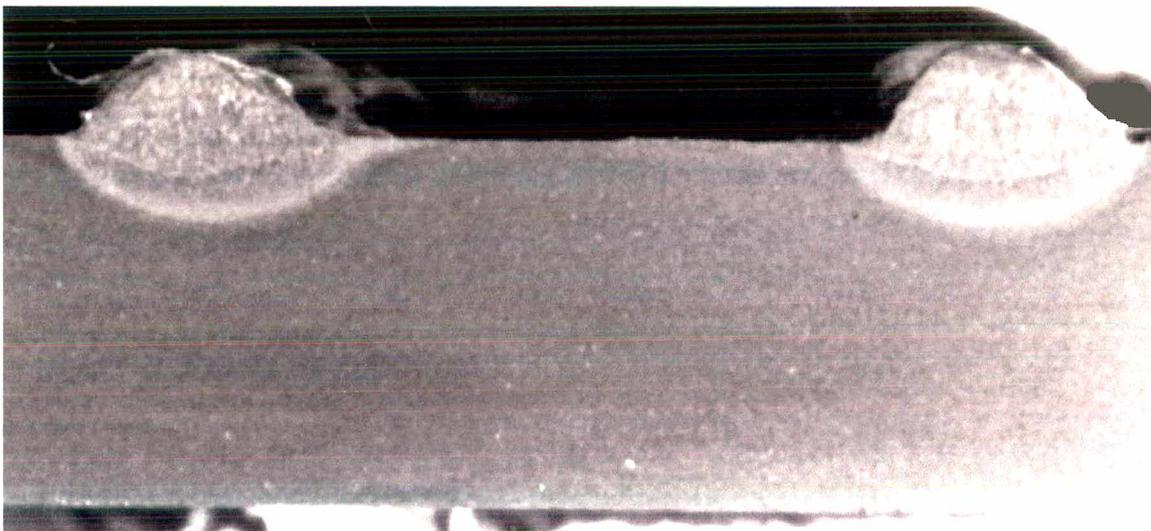


Figura 7.5 – Macrografia de dois cordões depositados na posição plana através de soldagem molhada com arame tubular.

7.7 - Avaliação da Taxa de Deposição

Para estimar a taxa de deposição, os eletrodos revestidos utilizados foram pesados e medidos, antes e depois, da realização dos ensaios. Os corpos de prova também foram pesados antes e depois da deposição dos cordões. Na soldagem com o eletrodo tubular foi adotado o mesmo procedimento, porém com corpos de prova soldados de

forma mecanizada, sendo medida a metragem de arame consumida. Tanto para a soldagem com arame tubular, quanto para a soldagem com eletrodos revestidos, foi mantida uma corrente média de 125 A.

7.8 - Teste de Campo

Para a realização dos ensaios em campo foram utilizados os mesmos materiais e equipamentos utilizados na bancada de laboratório. Os ensaios foram realizados em um tanque de água doce para treinamento de soldadores do Serviço Nacional de Aprendizado Industrial (SENAI/RJ), com 4 m de profundidade (figuras 7.6 e 7.7).

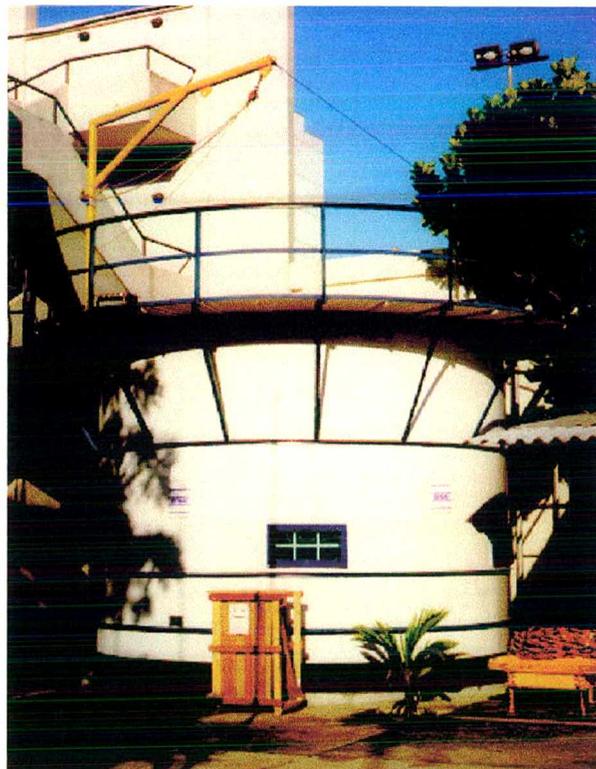


Figura 7.6 - Vista frontal do tanque de mergulho do SENAI/RJ.

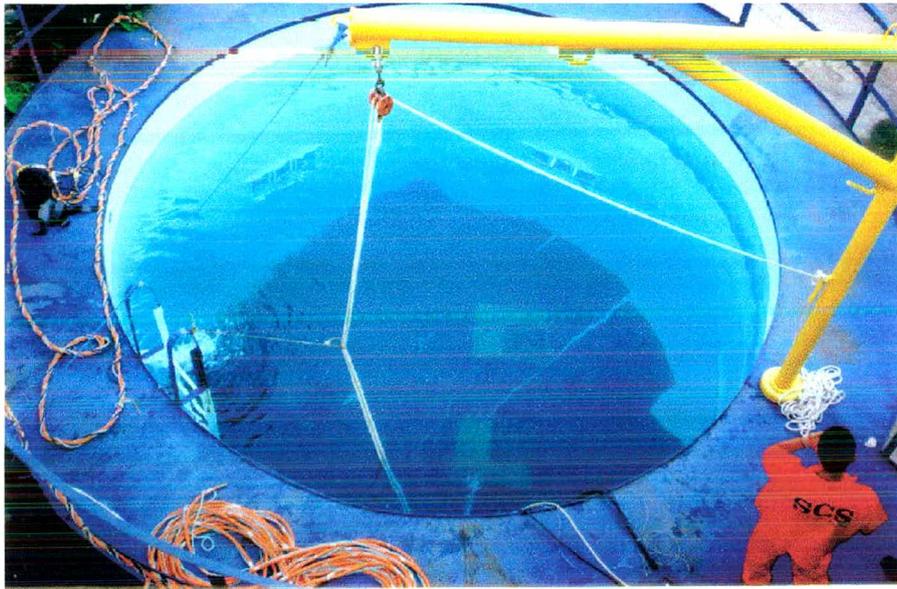


Figura 7.7 - Vista superior do tanque de mergulho do SENAI/RJ.

Nos testes de campo foi utilizado apenas o arame tubular oxidante autoprottegido de 1,6 mm. Os testes para avaliação da estabilidade do arco foram feitos em chapa de aço ABNT 1020 de 6 mm de espessura com soldagem na posição plana (figura 7.8).



Figura 7.8 - Soldagem manual na posição plana.

Durante estes testes a fonte de soldagem foi ajustada, tanto para a soldagem com modulação em tensão, quanto em corrente. Os parâmetros de soldagem utilizados foram os mesmos levantados em laboratório, com pequenas alterações para adaptação à soldagem manual (tabelas 7.5 e 7.6).

Tabela 7.5 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes de campo com tensão constante.

	U (V)	Va (m/min)
1	32 V	2,8
2	43 V	2,6
3	38 V	2,9
4	32 V	2,6
5	39 V	2,7

Tabela 7.6 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes de campo com imposição de corrente.

	Iarco (A)	Icc (A)	Va (m/min)
1	115	375	1,3
2	115	295	1,3
3	115	295	1,4
4	115	295	1,5
5	115	295	1,6
6	115	295	1,7
7	115	295	1,8
8	115	295	2,0
9	115	295	2,7
10	115	295	2,9
11	115	295	3,7

Durante os ensaios considerou-se o conjunto de parâmetros número 4 como o melhor adaptado à soldagem manual. Com base nestes parâmetros foi soldado um corpo de prova para análise da operacionalidade em aço ABNT 1020 com 19 mm de espessura e junta em "V" 60° (figura 7.1), também na posição plana.

7.9 – Análise da Estabilidade do Arco

Um dos aspectos que influencia fortemente a sanidade dos cordões obtidos pela técnica da soldagem molhada com arame tubular é a estabilidade do arco. Observa-se que a ocorrência de extinções do arco, e a conseqüente pobre estabilidade, leva ao surgimento de descontinuidades no cordão de solda que podem afetar a resistência das juntas soldadas [48,52]. A análise da estabilidade do arco é uma tarefa complexa, sendo dissertada em vários trabalhos. De Souza [53], propõe um método para avaliação da estabilidade e faz um retrospecto de alguns trabalhos. Um dos pontos em comum entre vários deles, é a constatação de que normalmente cada processo analisado tem as suas particularidades e exige uma abordagem diferente. Farias [54] propõe, para a avaliação da estabilidade, critérios baseados na análise da regularidade periódica da transferência de carga elétrica e de massa na soldagem a seco com eletrodos revestidos. O caráter aleatório dos curto-circuitos na soldagem molhada com arames tubulares, porém, praticamente inviabiliza a utilização de critérios baseados na regularidade temporal da sua ocorrência. Tal constatação levou a proposição de métodos alternativos para a análise da estabilidade do arco que se ajustem adequadamente à soldagem molhada com arames tubulares. Vários índices foram testados, todos calculados com base na aquisição de dados de corrente e tensão do

arco. Dentre estes índices, três foram considerados mais representativos da estabilidade do arco: percentual de tempo de extinção do arco em relação ao tempo de aquisição (%ext), número de extinções (Numext) e desvio padrão da tensão (DPU) [52]. Para efeito de cálculo dos índices, o tempo de extinção é definido pela soma do tempo de cada ponto no qual o valor de corrente é inferior a 25 A. Estes indicativos foram utilizados para fazer o ajuste fino dos parâmetros de soldagem e sua escolha se baseou, tanto na correlação com a regularidade dos cordões de solda obtidos, quanto na consistência dos resultados dos testes estatísticos.

7.10 – Medições de Dureza e Microdureza

As medições de dureza Vickers foram realizadas em um durômetro Heckert 308 com carga de 10 kg. Para os ensaios de microdureza Vickers foi utilizado um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV-2000 com carga de 200 g. Antes das medições de microdureza, foi realizada a calibração do equipamento utilizando um padrão com dureza entre 683 e 707 HV_{0,2}. Com base no procedimento adotado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAT), foram feitas 7 medidas de dureza em um padrão. A média das medidas foi comparada a dureza do padrão, resultando em um fator de correção de 1,05 que deve ser multiplicado pelo valor medido. Foram feitos dois perfis com um total de 19 medidas, realizadas a cada 200 µm. Para ambas as medições foram preparadas amostras metalográficas com reagente nital 5%.

7.11 – Avaliação da Resistência ao Impacto

Para avaliação da tenacidade das soldas, foram feitos ensaios Charpy a 0 °C. Os corpos de prova para os ensaios foram retirados da junta nas posições indicadas na figura 7.9. Os entalhes foram posicionados no centro do cordão de solda.

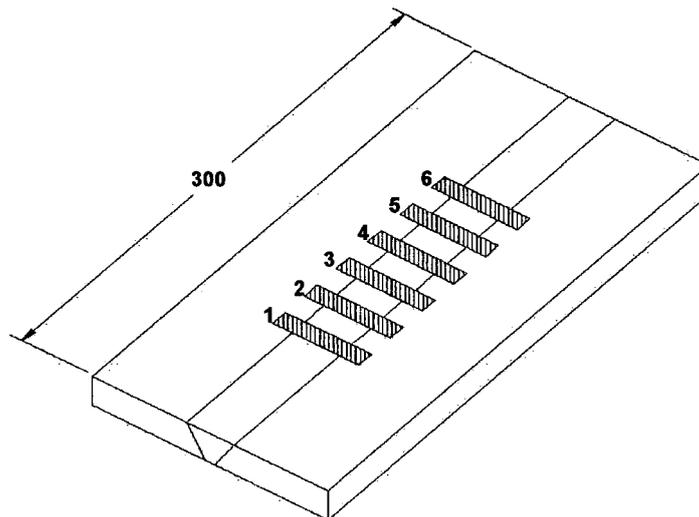


Figura 7.9 – Posição de extração dos corpos de prova para os ensaios de impacto.

7.12 – Análise da Composição Química do Metal de Solda

A análise de composição do metal de solda foi feita na empresa Precicast, situada no município de São José/SC. Esta empresa dispõe de um espectrômetro Spectrocast para a determinação da composição química de aços. A incerteza média do equipamento é 1% para o carbono e elementos metálicos (Si, Cr, Ni,...) e de 2 a 4% para fósforo e enxofre [55]. A última aferição deste equipamento foi realizada em 03/08/2000, ou seja, aproximadamente duas semanas antes da realização dos ensaios.

A análise foi realizada sobre uma seção da junta soldada (figura 7.1). Esta seção teve os últimos passes esmerilhados e lixados para produzir uma face plana com aproximadamente 25 mm de largura. A medição de composição foi realizada na parte central desta região em uma área com aproximadamente 6 mm de diâmetro.

8 - Análise dos Resultados

8.1 - Efeito da Velocidade de Soldagem, Distância Bico de Contato/Peça, Velocidade do Arame e Corrente de Referência sobre a Estabilidade do Arco e Geometria dos Cordões para o Arame E-70 T1

A análise de variância dos dados coletados na soldagem com o arame E-70 T1 revelou que, para as faixas de valores estudadas (tabela 7.4), a variação da distância bico de contato-peça, da velocidade de soldagem e da corrente de referência, não exercem influência significativa nos resultados de desvio padrão da tensão. Todos os cálculos de variância apresentados neste trabalho foram realizados utilizando o software "Estatística".

Os resultados dos ensaios com o arame rutilico, são mostrados na tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Parâmetros de soldagem e resultados da soldagem com o arame E-70

T1.

	DBCP (mm)	Vs (cm/min)	Va (m/min)	Iref (A)	Im (A)	Ief (A)	Um (V)	Uef (V)	DPU (V)	Larg (mm)	Alt (mm)	larg/alt (mm)	Penet (mm)
1	15	15	1,9	125	98	102	37	40,9	17,3	9,7	3,1	3,1	1,4
2	15	15	2	125	111	114	30,9	32,4	9,8	10,2	3,4	3,0	1,1
3	15	15	2	125	115	119	30	31,9	10,8	9,9	3,7	2,7	1,4
4	15	15	2,1	125	121	126	28,3	29,2	6,9	10,4	2,7	3,9	1,6
5	15	15	2,1	125	123	129	27,6	28,4	6,8	9	3,2	2,8	0,9
6	15	15	2,1	125	124	130	27,6	28,3	6,2	9,2	2,9	3,2	0,9
7	15	15	2,1	125	121	127	28,1	28,8	6,4	9,7	2,9	3,3	1,1
8	15	15	2,3	125	132	140	25,9	26,3	4,9	10,8	4,4	2,5	0,8
9	15	15	2,3	125	126	132	26,9	27,5	5,6	9,4	4,1	2,3	1
10	15	15	2,3	125	128	134	26,5	26,8	4,5	10,7	4	2,7	1,5
11	15	15	2,3	125	138	147	25	25,4	4,5	10,5	3,8	2,8	1,6
12	15	15	2,4	125	137	145	25	25,5	5	10	3,2	3,1	1,6
13	15	15	2,4	125	174	192	22,2	22,9	5,6	11	4,4	2,5	1,7
14	15	15	2,9	125	183	203	21,7	22,6	6,2	11	4,4	2,5	1,7
15	15	15	2	125	112	116	29,9	30,5	6,2	9,4	3	3,1	1,4
16	15	15	2,1	125	115	119	28,6	29,1	5,2	9,4	3,5	2,7	1,3
17	15	15	2,3	125	123	128	26,6	27	4,5	9,2	3,6	2,6	1,1
18	15	15	2,4	125	127	132	25,8	26,2	4,5	10,6	4,1	2,6	1,3
19	15	15	2,6	125	132	139	24,9	25,4	4,7	10,5	4,6	2,3	1,1
20	15	15	3,0	125	133	139	24,6	25	4,4	10,1	5,1	2,0	0,8
21	15	20	2,1	125	121	126	27,2	27,8	5,7	7,8	3,1	2,5	1,6
22	15	20	2,1	125	124	129	26,6	27,2	5,9	7,8	3,1	2,5	1,6
23	15	20	2,3	125	145	157	23,3	23,9	5,6	8,3	2,9	2,9	1,5
24	15	20	2,3	125	145	158	23,2	23,9	5,7	8,3	2,9	2,9	1,5
25	15	20	2	125	119	124	27,9	28,7	6,4	8,2	2,8	2,9	1,8
26	15	20	2	125	120	125	27,3	27,9	5,5	8,2	2,8	2,9	1,8
27	10	20	2,3	125	143	156	23,5	24,2	5,6	8,2	3,3	2,5	0,9
28	10	20	2,3	125	146	158	22,9	23,5	5,4	8,2	3,3	2,5	0,9
29	15	20	2,9	175	161	164	30,4	30,9	5,3	12,7	3,6	3,5	2,1
30	15	20	2,9	175	162	164	30,3	30,7	5	12,7	3,6	3,5	2,1
31	15	20	3,1	175	181	186	26,6	27	4,7	11,8	3,4	3,5	2
32	15	20	3,1	175	183	187	26,3	26,8	4,9	11,8	3,4	3,5	2
33	15	20	2,8	175	157	160	31,4	31,9	5,4	11,3	2,6	4,3	2,4
34	15	20	2,8	175	163	165	30	30,4	5	11,3	2,6	4,3	2,4
35	10	20	2,9	175	167	169	29	29,4	4,4	10,4	2,6	4,0	2,6
36	10	20	2,3	125	135	144	24,6	25,1	4,8	7,8	3,5	2,2	1,2

A velocidade do arame influenciou os valores de desvio padrão e conseqüentemente a estabilidade. A análise geométrica dos cordões depositados com o arame E-70 T1 foi grandemente dificultada pela irregularidade dos depósitos. Uma análise de variância sobre ensaios realizados alterando-se apenas a velocidade de alimentação do arame, ou seja, mantendo-se a I_{ref} , V_s e DBCP constantes, mostrou que a primeira grandeza (I_{ref}) influi significativamente apenas na altura dos cordões depositados.

A análise de variância apresentou os seguintes resultados:

Tabela 8.2 – Análise de variância de DBCP sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).

Análise de variância Variáveis consideradas significativas.								
	SQ do efeito	GL do efeito	MS do efeito	SQ do erro	GL do erro	MS do erro	fator F	Nível de Signific.
LARGURA	6,916962	1	6,916962	58,51061	35	1,671732	4,137603	0,049574

Tabela 8.3 – Análise de variância de V_s sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).

Análise de variância Variáveis consideradas significativas.								
	SQ do efeito	GL do efeito	MS do efeito	SQ do erro	GL do erro	MS do erro	fator F	Nível de Signific.
PENET	2,048919	1	2,048919	6,07	35	0,173429	11,81419	0,001533

Tabela 8.4 – Análise de variância de Iref sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).

Análise de variância Variáveis consideradas significativas.									
	SQ do efeito	GL do efeito	MS do efeito	SQ do erro	GL do erro	MS do erro	fator F	Nível de Signific.	
LARGURA	28,67233	1	28,67233	36,75524	35	1,05015	27,30309	8,11E-06	
PENET	4,514967	1	4,514967	3,603952	35	0,10297	43,84737	1,18E-07	

Tabela 8.5 – Análise de variância de Va sobre DPU, largura, altura, largura/altura e penetração (arame E-70 T1).

Análise de variância Variáveis consideradas significativas.									
	SQ do efeito	GL do efeito	MS do efeito	SQ do erro	GL do erro	MS do erro	fator F	Nível de Signific.	
DPU	114,2133	1	114,2133	126,0693	32	3,939666	28,99061	6,49E-06	
ALTURA	2,181538	1	2,181538	14,63376	32	0,457305	4,770422	0,036394	

Apesar da dispersão dos valores medidos, na figura 8.1 pode-se observar uma tendência da largura em se manter inalterada enquanto a altura dos depósitos tende a aumentar com a elevação do valor de velocidade do arame (figura 8.2).

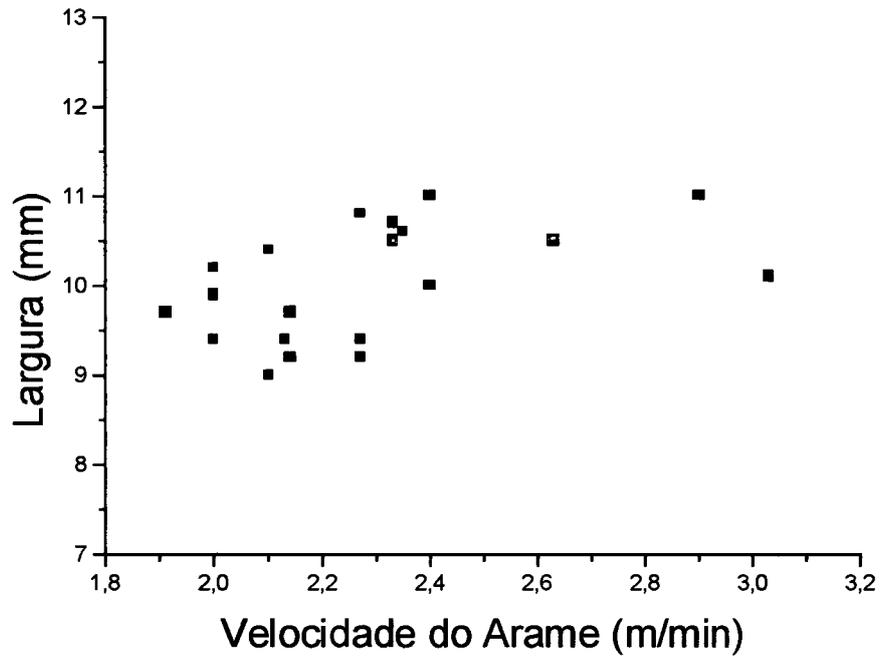


Figura 8.1 - : Comportamento da largura dos cordões em função da velocidade do arame (arame E-70 T1).

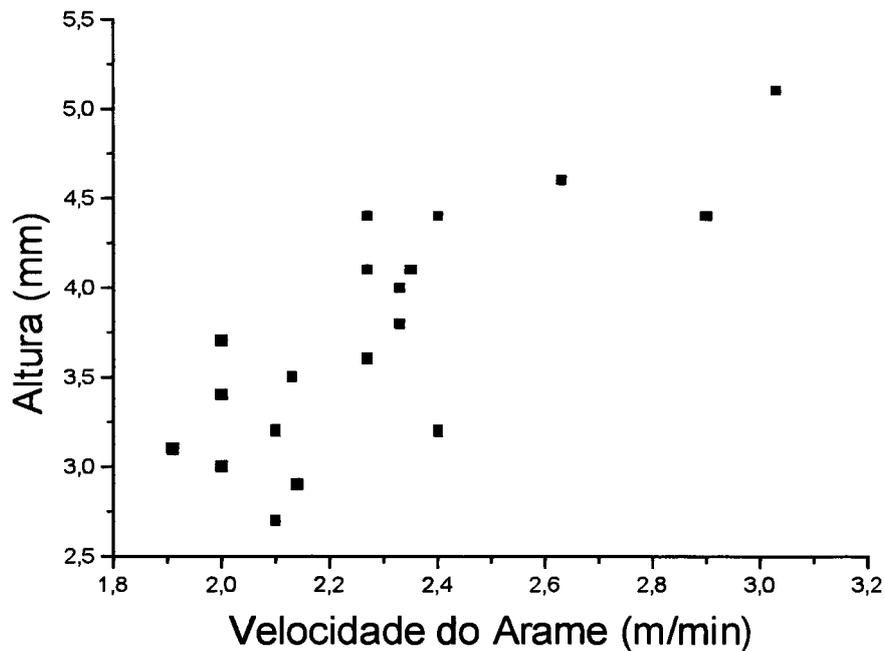


Figura 8.2 - Comportamento da altura dos cordões em função da velocidade do arame (arame rutilico).

Outra observação importante é o perfil assumido pelos cordões à medida que se aumenta a velocidade do arame, sem a alteração da corrente de referência. Os depósitos deixam de ter um formato arredondado, passando a apresentar um perfil quase triangular (figura 8.3 “a” e “b”, respectivamente).

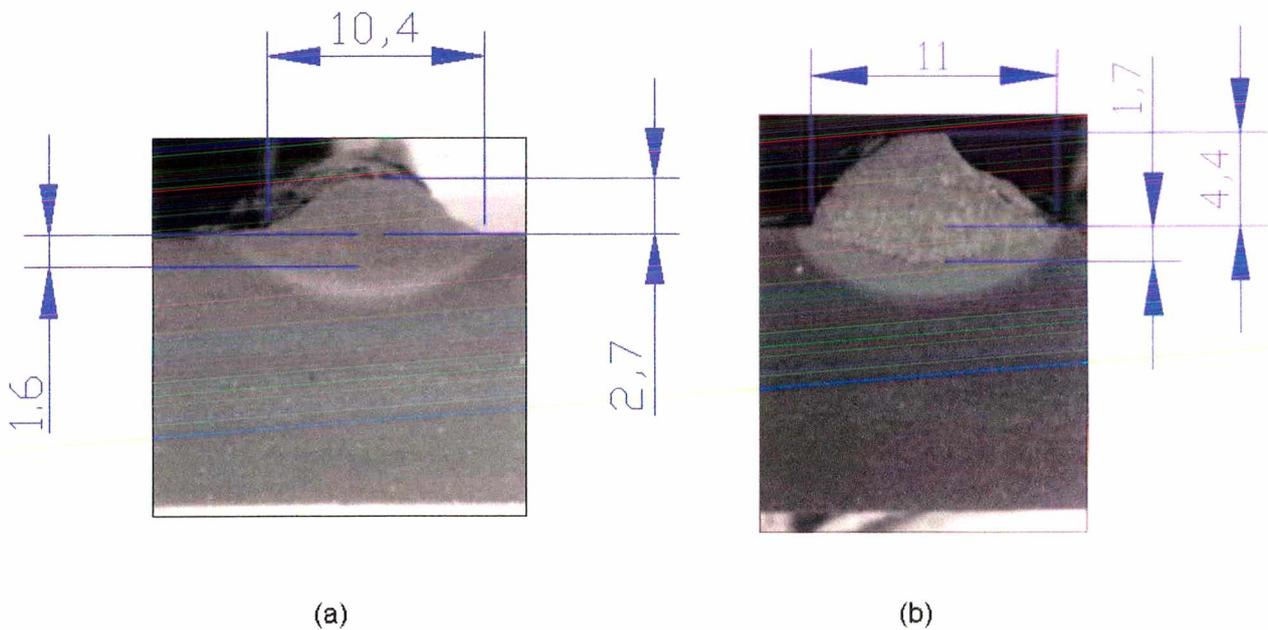


Figura 8.3 - Alteração do perfil do cordão com o aumento da velocidade do arame.

Condições: **(a)** $I_{ref}=125$ A, $V_a= 2,1$ m/min, arame rutilico.

(b) $I_{ref}=125$ A, $V_a= 2,9$ m/min, arame rutilico.

8.2 - Efeito da Velocidade de Soldagem, Distância Bico de Contato/Peça, Velocidade do Arame e Corrente de Referência sobre a Estabilidade do Arco para o Arame Oxidante

Na tabela 8.6 são mostrados os resultados medidos e os parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para verificação da influência da Velocidade de Soldagem (V_s), Velocidade do arame (V_a) e Corrente de referência (I_{ref}).

Tabela 8.6 – Matriz de experimentos e resultados medidos nos testes realizados para a verificação da influência de V_s , V_a e I_{ref} para o arame oxidante:

DBCP = 15 mm

	V_s (cm/min)	V_a (m/min)	I_{ref} (A)	I_m (A)	I_{ef} (A)	DPI (A)	U_m (V)	U_{ef} (V)	DPU (V)	%ext (%)	Numext	FreqCC (Hz)	TmedCC (ms)
1	15(-)	2,3(-)	125(-)	110	113	24	30,2	30,7	5,2	0,7	111	6,6	1,08
2	15(-)	2,3(-)	125(-)	118	123	35	28,5	28,9	4,8	0,2	41	11,6	1,43
3	25(+)	2,3(-)	125(-)	112	114	22	29,3	29,5	4	0,1	21	7,2	0,96
4	25(+)	2,3(-)	125(-)	122	128	39	27,2	27,6	4,6	0,1	21	14,7	1,5
5	15(-)	3,0(+)	125(-)	165	186	87	21,9	23,3	8,1	1,1	31	47,5	2,49
6	15(-)	3,0(+)	125(-)	177	198	90	21,2	22,4	7,4	0,2	1	82,7	1,68
7	25(+)	3,0(+)	125(-)	154	169	69	22	22,7	5,5	0	1	36,9	1,87
8	25(+)	3,0(+)	125(-)	166	185	82	20,8	21,8	6,4	0	1	62,7	1,96
9	15(-)	2,3(-)	150(+)	110	114	29	38,6	39,3	7,2	5,6	601	1,5	0,73
10	15(-)	2,3(-)	150(+)	123	125	23	34,3	34,8	5,5	1	131	4,3	1,21
11	25(+)	2,3(-)	150(+)	125	127	22	32,6	33,1	5,6	1,6	161	3,2	0,77
12	25(+)	2,3(-)	150(+)	115	118	27	36,6	37,2	6,7	3,4	301	2,1	0,98
13	15(-)	3,0(+)	150(+)	145	149	36	28,4	28,8	4,8	0	1	14,9	1,18
14	15(-)	3,0(+)	150(+)	144	149	39	29,2	29,6	5	0	1	24,6	0,86
15	25(+)	3,0(+)	150(+)	151	160	52	27,2	27,9	6	0,6	31	11,9	3,07
16	25(+)	3,0(+)	150(+)	140	143	30	28,8	29,1	4,1	0	1	8,4	1,57

Para o arame oxidante repetiram-se algumas das constatações feitas para o arame E-70 T1. A velocidade do arame, que no primeiro caso influi na resposta de desvio padrão da tensão, também influiu no segundo. Nas soldagens com o arame oxidante

um dos fatores que influencia fortemente os resultados de estabilidade do arco é a interação entre a velocidade de arame e a corrente de referência. Esta observação é confirmada pela figura 8.5, onde os valores mais baixos de DPU são conseguidos para os pares 2,3/125 e 3,0/150 de velocidade de arame e corrente de referência, respectivamente. A conjugação diferente destes valores leva a uma elevação do valor de DPU. Outra observação importante, e um dos objetivos específicos da realização deste conjunto de ensaios, é de que a velocidade de soldagem (V_s), dentro da faixa analisada (15 a 25 cm/min), não tem influência sobre a estabilidade do arco.

Na tabela 8.7 são mostrados os resultados da análise da variância dos efeitos V_s , V_a e I_{ref} sobre DPU (desvio padrão da tensão), %ext (percentual de tempo de arco extinto sobre o tempo de soldagem) e FreqCC (frequência dos curto-circuitos).

Tabela 8.7 – Análise de variância de V_s , V_a , IREF e interações entre estes efeitos sobre DPU, %ext e FreqCC para o arame oxidante.

Análise de variância; Variáveis consideradas significativas. 1-Vs, 2-Va, 3-IREF					
	Coef. de Wilks	Coef. de Rao	GL 1	GL 2	Nível de Signific.
2	0,176993	9,299872	3	6	0,011293
3	0,259563	5,705257	3	6	0,034313
23	0,212744	7,400962	3	6	0,019304

Nas figuras 8.4 e 8.5 pode-se fazer uma análise comparativa entre os efeitos combinados dois a dois, de cada um dos fatores estudados, DBCP, V_a , e I_{ref} sobre o desvio padrão da tensão na soldagem com o arame oxidante.

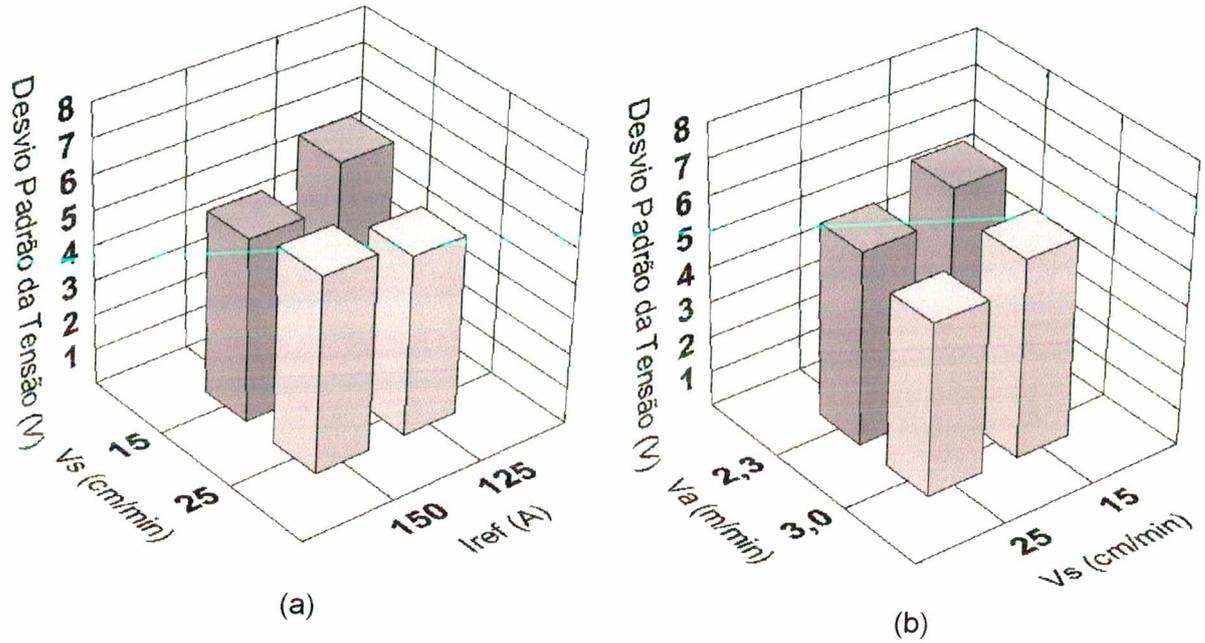


Figura 8.4 - Comportamento do desvio padrão da tensão em função de I_{ref} e V_s (a) e em função de V_a e V_s (b) para o arame oxidante.

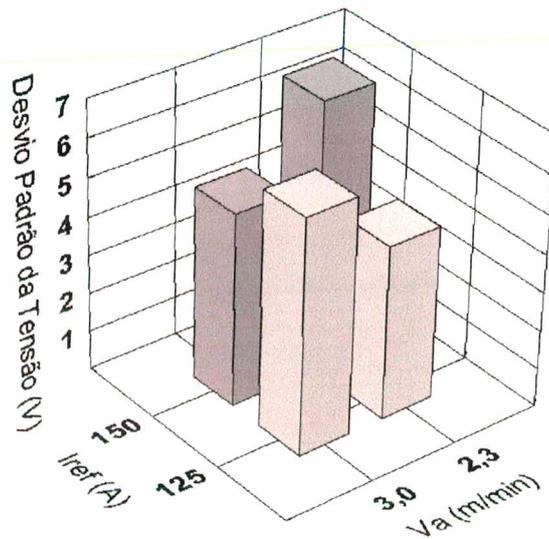


Figura 8.5 - Comportamento do desvio padrão da tensão em função de I_{ref} e de V_a para o arame oxidante.

Devido à importância do inter-relacionamento entre I_{ref} e V_a sobre a estabilidade do arco, foram realizados novos ensaios aplicando uma técnica experimental diferenciada. Nestes ensaios, foram testadas várias retas relacionando I_{ref} e V_a , verificando-se a resposta no valor de desvio padrão da tensão (DPU). A reta que resulta em valores mais regulares de DPU é apresentada na figura 8.6. Na figura 8.7 são apresentados os valores de DPU para a faixa coberta pela função que foi determinada.

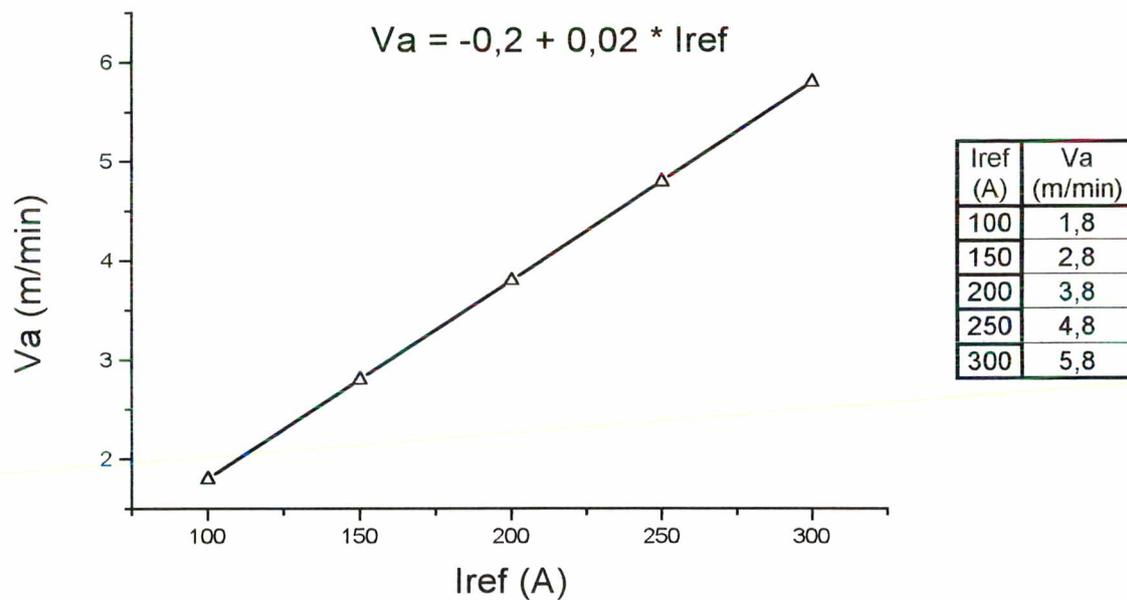


Figura 8.6 – Relação entre V_a e I_{ref} determinada experimentalmente (arame oxidante 10 cm de lâmina d'água).

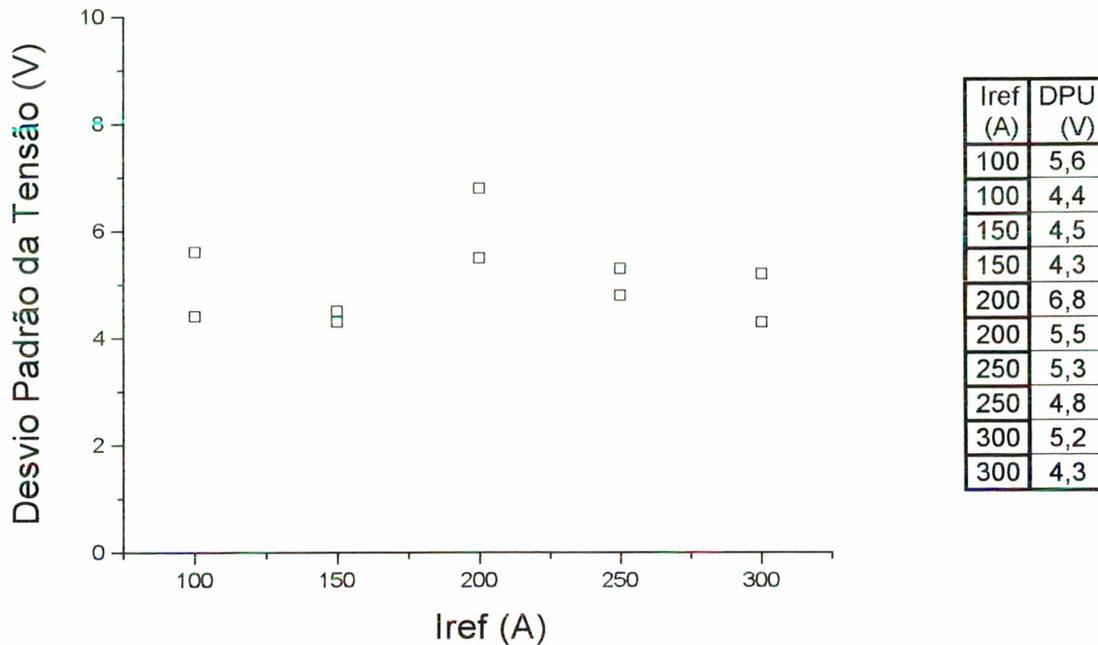


Figura 8.7 – Valores calculados de DPU para diferentes correntes de referência (arame oxidante 10 cm de lâmina d'água).

A função mostrada na figura 8.6, é válida para as condições nas quais foram realizados os ensaios, ou seja, para o arame oxidante a 10 cm de lâmina d'água.

O aspecto superficial dos cordões produzidos com 100, 125, 150, 200, 250 e 300 A de corrente de referência soldados utilizando a função de relacionamento entre I_{ref} e V_a que foi determinada é mostrado na figura 8.8. Para $I_{ref} = 100$ A, é obtido um cordão estreito e alto, com pequena molhabilidade. Para as correntes maiores, o perfil do cordão torna-se mais favorável, com uma boa relação largura/altura. A partir de 150 A começam a aparecer ressaltos no cordão que prejudicam a superposição de passes. O

aumento da corrente de referência aumenta ligeiramente a altura destes ressaltos, porém ocorre um aumento significativo da quantidade de salpicos e para a $I_{ref} = 300 \text{ A}$, começam a surgir inclusões de escória no centro do cordão. Na figura 8.9 pode-se observar alguns passes depositados em uma junta de teste com a corrente de referência de 150 A . Como na junta teste apareceram ressaltos que poderiam comprometer a composição dos passes da junta mostrada na figura 7.1, optou-se pela utilização da corrente de referência de 125 A , que resultou em bom aspecto superficial (figura 8.20).

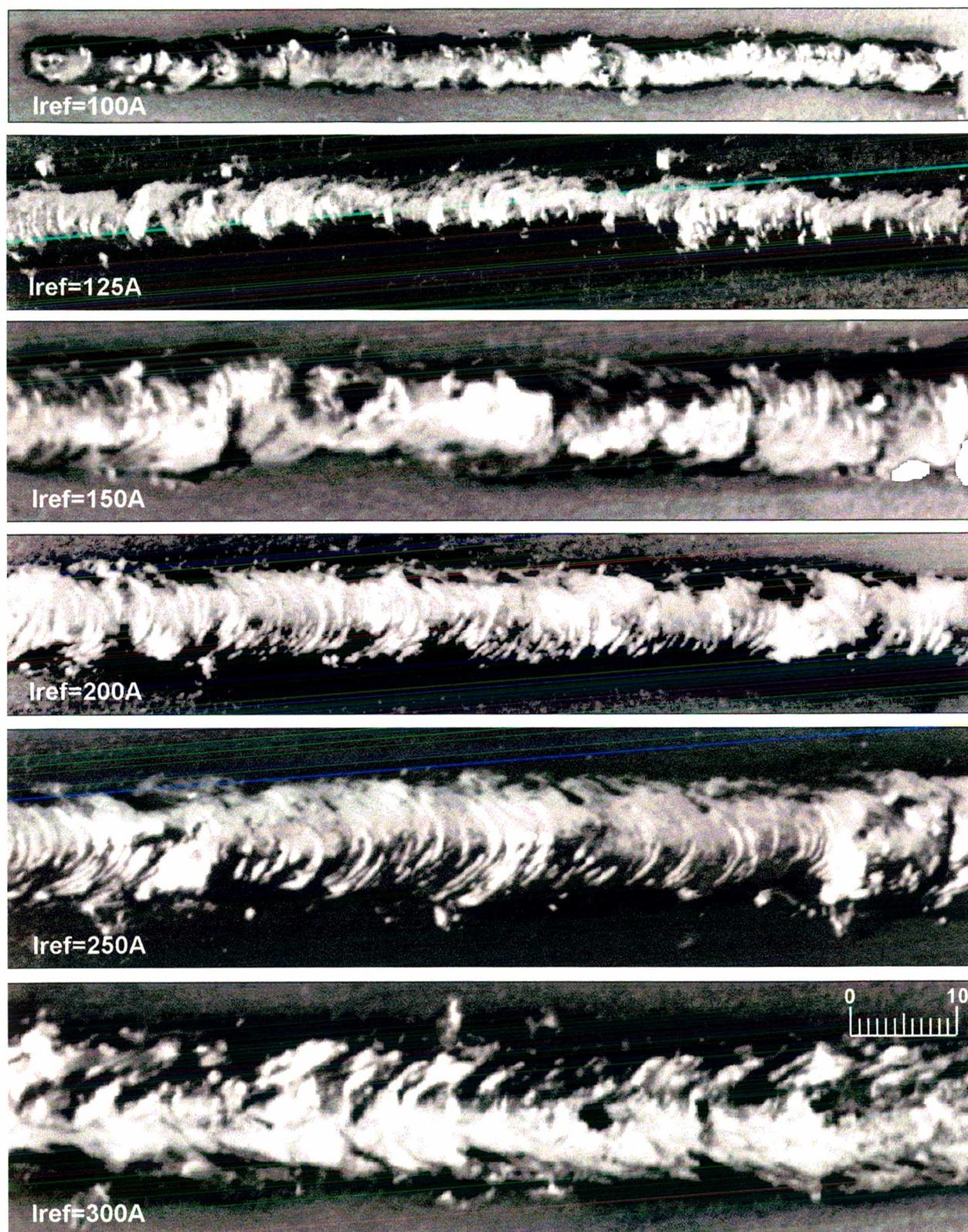


Figura 8.8 – Aspecto superficial de cordões soldados com diferentes correntes de referência (Arame oxidante).

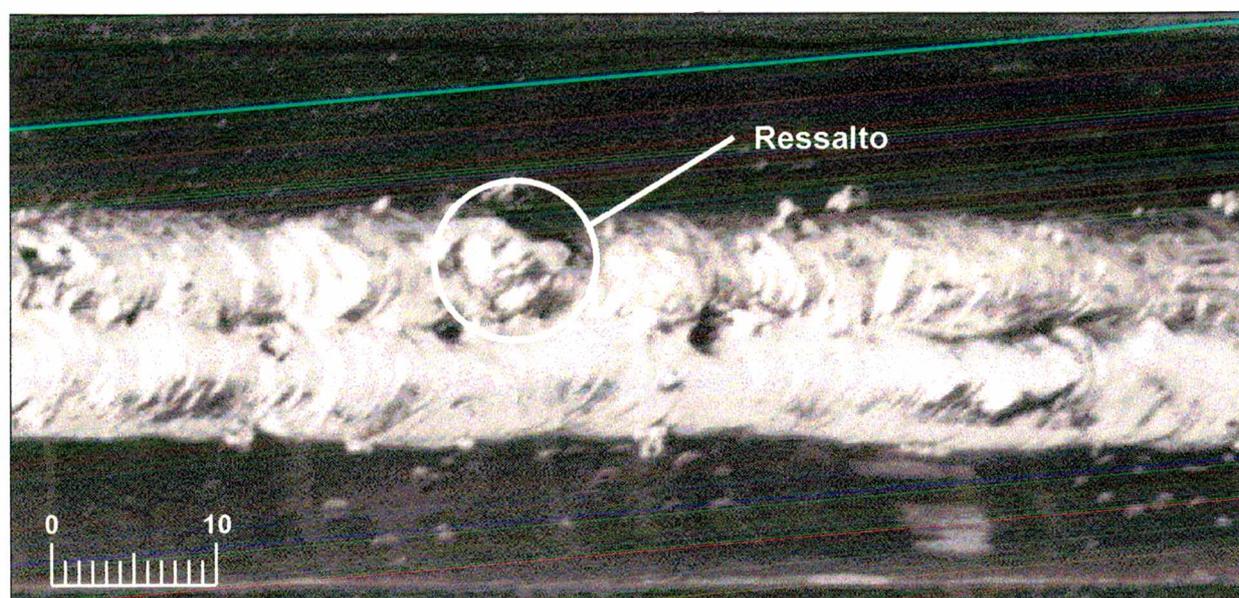


Figura 8.9 – Junta de teste preenchida com passes depositados com corrente de referência de 150 A (Arame oxidante).

Na tabela 8.8 são mostrados os resultados medidos e os parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para verificação da influência da distância bico de contato/peça (DBCP), velocidade do arame (V_a) e corrente de referência (I_{ref}).

Tabela 8.8 – Matriz de experimentos e resultados dos testes realizados para a verificação da influência de DBCP, V_a e I_{ref} :

$V_s = 25$ cm/min

	DBCP (mm)	V_a (m/min)	I_{ref} (A)	I_m (A)	I_{ef} (A)	DPI (A)	U_m (V)	U_{ef} (V)	DPU (V)	%ext (%)	Numext	FreqCC (Hz)	TmedCC (ms)
1	10(-)	2,3(-)	125(-)	118	121	27	27,8	28,1	4,3	0,2	61	7,7	1,38
2	20(+)	2,3(-)	125(-)	109	111	23	30,7	31	4,9	0,7	121	5	1,24
3	10(-)	3,0(+)	125(-)	164	182	79	21,5	22,4	6,3	0	1	26,2	3,5
4	20(+)	3,0(+)	125(-)	147	157	57	22,8	23,4	4,9	0	1	25,5	2,08
5	10(-)	2,3(-)	150(+)	110	115	35	38,1	39	8,1	9,4	811	2,1	1,29
6	20(+)	2,3(-)	150(+)	117	121	30	35,7	36,4	7,3	5,2	411	2,3	1,22
7	10(-)	3,0(+)	150(+)	147	149	28	27,3	27,5	3,9	0	11	6,7	1,92
8	20(+)	3,0(+)	150(+)	150	155	40	26,8	27,3	5,1	0,1	21	10,4	2,57
9	10(-)	2,3(-)	125(-)	114	116	22	28,6	28,8	4,1	0,3	31	5,1	1,22
10	20(+)	2,3(-)	125(-)	121	124	27	27	27,3	3,9	0	21	8,4	1,46
11	10(-)	3,0(+)	125(-)	152	164	61	22	22,5	4,9	0	1	28,7	2,05
12	20(+)	3,0(+)	125(-)	160	175	69	21,2	21,9	5,2	0	1	36,1	2,25
13	10(-)	2,3(-)	150(+)	118	122	31	35,3	36,1	7,6	6,2	441	2,5	1,01
14	20(+)	2,3(-)	150(+)	113	118	32	37	37,8	7,6	6,8	451	1,9	1,41
15	10(-)	3,0(+)	150(+)	151	160	27	27,2	27,9	6	0,6	31	11,9	3,07
16	20(+)	3,0(+)	150(+)	149	157	23	27,6	28,5	7,2	1,9	41	7,6	4,41

Apesar de terem sido realizados dois conjuntos de ensaios diferenciados para avaliar a influência de DBCP e V_s , os resultados da análise de variância referentes a I_{ref} e V_a foram os mesmos. DBCP e V_s não influem significativamente na estabilidade do arco medida através do desvio padrão da tensão.

O comportamento dos curto-circuitos foi analisado para o arame oxidante através da sua frequência e do seu tempo médio de duração. A frequência dos curto-circuitos é dependente da corrente de referência, da velocidade do arame e da interação entre as duas variáveis. O tempo médio dos curto-circuitos, foi influenciado apenas pela velocidade do arame.

Na tabela 8.9 são mostrados os resultados da análise da variância dos efeitos DBCP, V_a e I_{ref} sobre DPU (desvio padrão da tensão), %ext (percentual de tempo de arco extinto sobre o tempo de soldagem) e FreqCC (frequência dos curto-circuitos).

Tabela 8.9 – Análise de variância de DBCP, V_a , IREF e interações entre estes efeitos sobre DPU, %ext e FreqCC:

Análise de variância; Variáveis consideradas significativas. 1-DBCP, 2- V_a , 3-IREF					
	Coef. de Wilks	Coef. de Rao	GL1	GL2	Nível de Signif.
2	0,066512	28,06967	3	6	0,000627
3	0,07786	23,68723	3	6	0,001002
23	0,111458	15,94397	3	6	0,002899

Na figura 8.10 pode-se fazer uma análise comparativa entre os efeitos combinados dois a dois, de cada um dos fatores estudados, DBCP, V_a , e I_{ref} sobre o desvio padrão da tensão na soldagem com o arame oxidante.

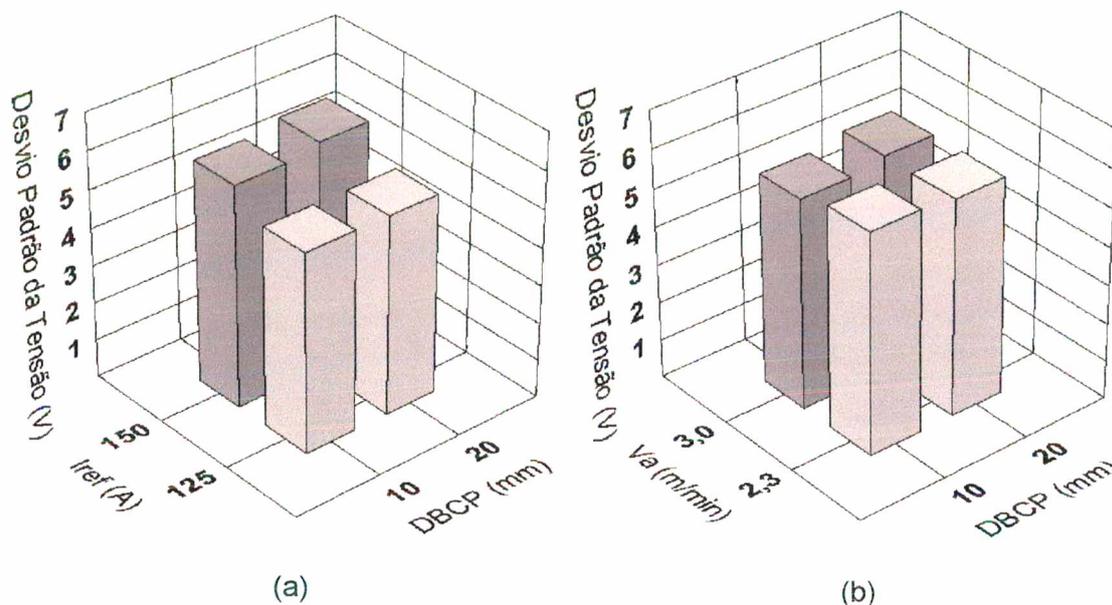


Figura 8.10 - Comportamento do desvio padrão da tensão em função de I_{ref} e DBCP

(a) e em função de V_a e DBCP (b) para o arame oxidante.

8.3 - Efeito da Polaridade e da Tensão em Vazio de 130 V Sobre a Estabilidade na Soldagem com o Arame Oxidante

Neste item são mostrados os resultados da soldagem com fonte operando com tensão em vazio aumentada de 60 V para 130 V. Na tabela 8.10 são mostrados os resultados medidos e os parâmetros de soldagem utilizados nos ensaios para verificação da influência da distância bico de contato/peça (DBCP), tensão em Vazio (Uvazio) e polaridade.

Tabela 8.10 – Matriz de experimentos e resultados dos testes realizados para a verificação da influência de DBCP, Uvazio e polaridade:

	DBCP (mm)	Uvazio (V)	Polar.	Im (A)	Ief (A)	DPI (A)	Um (V)	Uef (V)	DPU (V)	%ext (%)	Numext	FreqCC (Hz)	TmedCC (ms)
1	10 (-)	60 V(-)	neg (-)	97	99	17	32,3	32,7	5,3	1,3	171	2,2	0,51
2	20 (+)	60 V(-)	neg (-)	103	105	22	30,2	30,7	5,1	0,9	118	3,3	1,1
3	10 (-)	130 V(+)	neg (-)	96	97	17	34,5	35,2	7	0,2	51	1,5	0,62
4	20 (+)	130 V(+)	neg (-)	113	116	28	29,1	29,7	5,8	0,1	21	6	0,59
5	10 (-)	60 V(-)	pos (+)	106	108	20	28,8	29,1	4,2	0,1	21	6,4	0,61
6	20 (+)	60 V(-)	pos (+)	114	117	29	27,1	27,5	4,6	0,4	21	9,9	1,02
7	10 (-)	130 V(+)	pos (+)	118	123	35	27,6	28	4,6	0	1	9,3	0,83
8	20 (+)	130 V(+)	pos (+)	119	124	35	27,1	27,5	4,6	0	1	9,6	0,91
9	10 (-)	60 V(-)	neg (-)	99	101	23	32,4	33,1	6,5	1,6	181	3,6	0,88
10	20 (+)	60 V(-)	neg (-)	119	119	39	28,7	29,7	7,5	2	201	9,3	1,36
11	10 (-)	130 V(+)	neg (-)	97	99	22	34,7	36,5	11,3	1,2	71	2	0,75
12	20 (+)	130 V(+)	neg (-)	116	123	43	29,2	29,8	6,1	0	1	5,1	2,76
13	10 (-)	60 V(-)	pos (+)	126	133	44	25	25,4	4,7	0	1	18,6	1,41
14	20 (+)	60 V(-)	pos (+)	124	132	45	25,3	25,8	5	0	1	14,9	1,74
15	10 (-)	130 V(+)	pos (+)	119	123	33	27,2	27,6	4,4	0	1	7,5	0,77
16	20 (+)	130 V(+)	pos (+)	123	130	42	26,7	27,1	4,9	0	1	12,4	1,14

Os resultados da análise de variância mostram que a polaridade influencia a estabilidade do arco. A polaridade negativa aumenta o valor de DPU (figura 8.11). Esta polaridade também aumenta significativamente o %ext para a tensão em vazio de 60 V (figura 8.12 a). A frequência dos curto-circuitos também é reduzida na polaridade

negativa independentemente da tensão em vazio utilizada. Apesar de não influenciar a estabilidade do arco, a tensão em vazio reduz muito o %ext na polaridade negativa quando se utiliza o valor mais alto (130 V).

Nas tabelas 8.11, 8.12 e 8.13 são mostrados os resultados da análise da variância dos efeitos DBCP, Uvazio e polaridade sobre DPU (desvio padrão da tensão), %ext (percentual de tempo de arco extinto sobre o tempo de soldagem) e FreqCC (frequência dos curto-circuitos).

Tabela 8.11 – Análise de variância de DBCP, Uvazio, polaridade e interações entre estes efeitos sobre DPU:

Análise de variância; Variáveis consideradas significativas. 1-DBCP, 2-UVAZIO, 3-POLARI						
	GL efeito	SQ efeito	GL erro	SQ erro	fator F	Nível de Signific.
3	1	19,36	8	1,645	11,769	0,008947

Tabela 8.12 – Análise de variância de DBCP, Uvazio, polaridade e interações entre estes efeitos sobre %ext:

Análise de variância; Variáveis consideradas significativas. 1-DBCP, 2-UVAZIO, 3-POLARI						
	GL efeito	SQ efeito	GL erro	SQ erro	fator F	Nível de Signific.
2	1	1,44	8	0,155	9,290322	0,015869
3	1	2,89	8	0,155	18,64516	0,002553
23	1	0,9025	8	0,155	5,822581	0,04231

Tabela 8.13 – Análise de variância de DBCP, Uvazio, polaridade e interações entre estes efeitos sobre FreqCC:

Análise de variância; Variáveis consideradas significativas. 1-DBCP, 2-UVAZIO, 3-POLARI						
	GL efeito	SQ efeito	GL erro	SQ erro	fator F	Nível de Signific.
3	1	193,21	8	13,99625	13,80441	0,00591

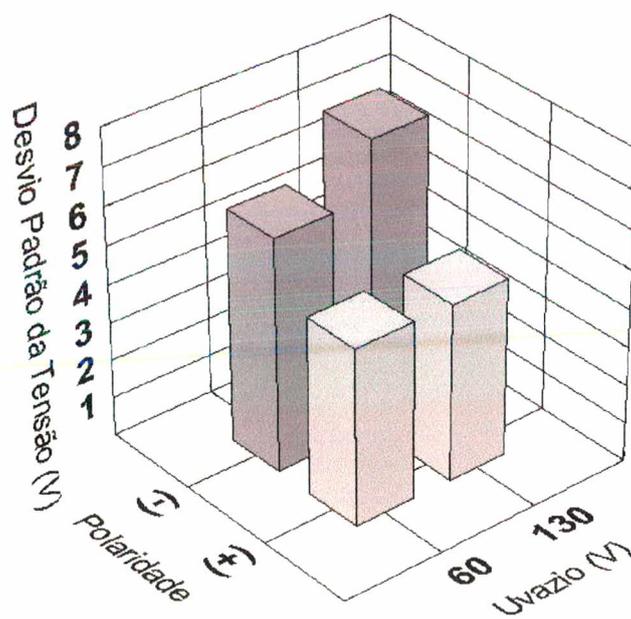


Figura 8.11 - Comportamento do desvio padrão da tensão em função de Uvazio e polaridade para o arame oxidante.

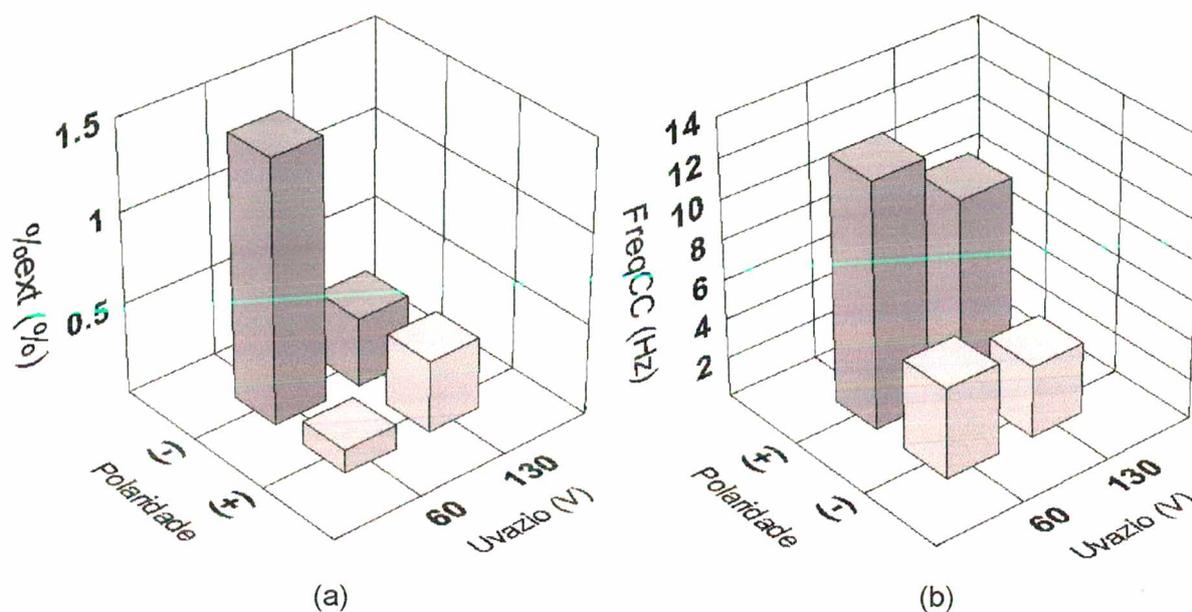


Figura 8.12 - Comportamento do %ext em função de Uvazio e polaridade (a) e de FreqCC em função de Uvazio e polaridade (b) para o arame oxidante.

8.4 – Estimativa da Taxa de Deposição para o Eletrodo Oxidante

A estimativa da taxa de deposição é mostrada na tabela 8.14. Observa-se que o valor da taxa de deposição do eletrodo tubular, nas condições estudadas, é 51% maior do que a do eletrodo revestido.

Tabela 8.14 - Comparação das estimativas de taxa de deposição para o eletrodo revestido e o arame tubular oxidantes:

	Rendimento (%)	Produção (kg/h)
Eletrodo Revestido	39,0	0,60
Arame Tubular	61,4	1,07

8.5 - Influência da Característica Estática da Fonte de Soldagem Sobre a Estabilidade do Arco na Soldagem Molhada com Arame Tubular Rutilico

8.5.1 - Soldagem com Tensão Constante

A soldagem com tensão constante, tanto em laboratório, quanto em campo, não produziu bons resultados, principalmente devido à liberdade com que a corrente varia durante a soldagem. Na soldagem com arco aberto, as variações de corrente (figura 8.13) tornam difícil à manutenção do arco e a sua reabertura. A maior dificuldade encontrada na soldagem com tensão constante, está na irregularidade do processo, que alterna períodos de relativa estabilidade, com a ocorrência de seguidas extinções e reignições do arco, prejudicando fortemente a estabilidade do processo. Normalmente, depois de se atingir um período de instabilidade, o processo dificilmente se recupera.

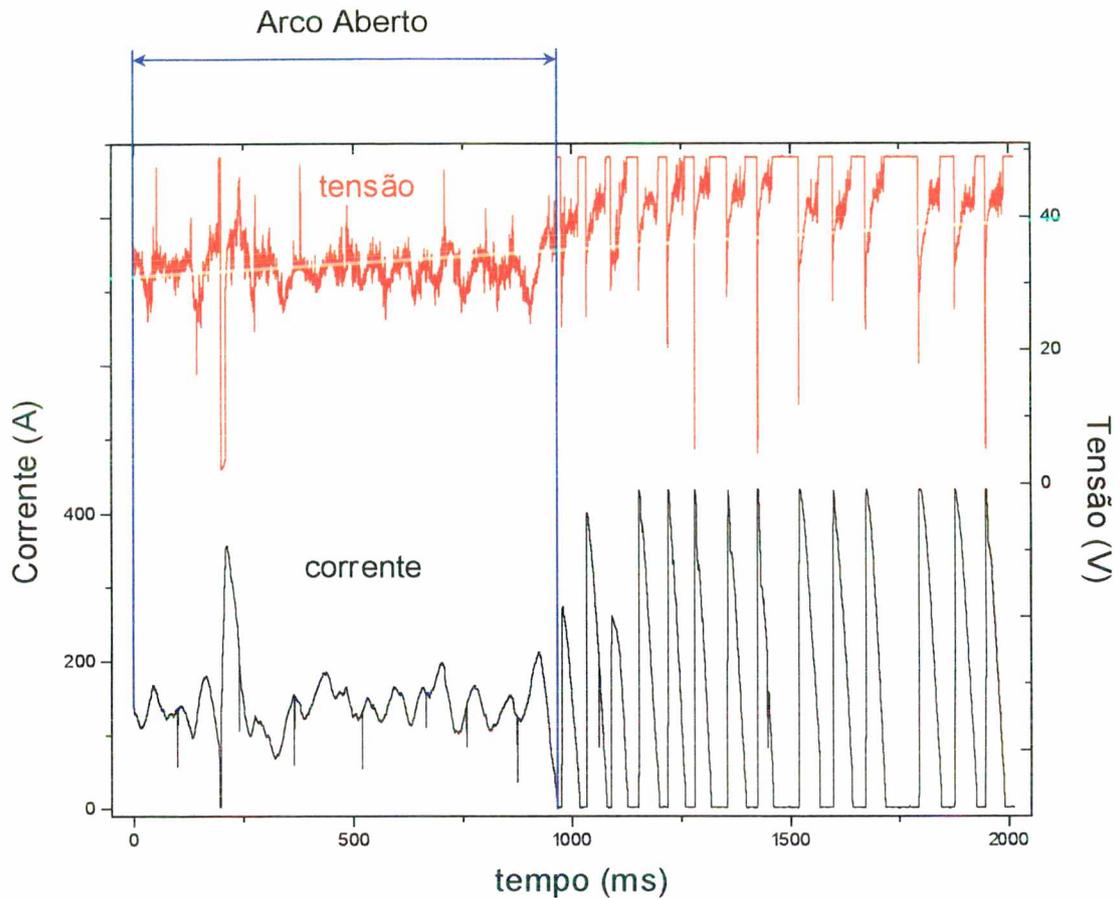


Figura 8.13 – Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com tensão constante.

Na tabela 8.15 são apresentados alguns índices calculados para ensaios realizados com tensão constante.

Tabela 8.15 – Ensaios realizados com tensão constante.

	Va (m/min)	U (V)	Im (A)	Ief (A)	DPI (A)	Um (V)	Uef (V)	DPU (V)	%ext (%)	Numext	FreqCC (Hz)	TmedCC (ms)
1	2,8	32 V	142	181	112	38,2	39,0	7,8	22,2	151,0	2,5	2,9
2	2,6	43 V	137	204	151	44,4	44,8	5,5	45,6	271,0	6,0	1,0
3	2,9	38 V	146	213	155	43,4	43,8	6,1	44,0	211,0	3,5	0,7
4	2,6	32 V	136	172	105	36,8	37,6	8,1	18,2	141,0	5,0	2,6
5	2,7	39 V	138	209	157	43,5	43,9	6,1	47,4	201,0	4,0	0,7

O índice que melhor exprime a dificuldade de se soldar com tensão constante encontra-se no %ext que apresenta uma média de 35%, e valores entre 18 e 47%, ou seja, em uma soldagem de 100 segundos o arco fica entre 18 e 47 segundos apagado.

8.5.2 – Soldagem com Corrente Imposta

Nas soldagens com corrente imposta foi utilizada uma fonte com sistema anti-colagem. Este sistema altera o valor da corrente de soldagem com base no monitoramento da tensão do arco. Quando esta atinge valores muito baixos, indicando a ocorrência de um curto-circuito, o equipamento impõe o valor de corrente I_{cc} (corrente de curto-circuito), que, por possuir magnitude elevada, conduz a reabertura do arco (figura 8.14).

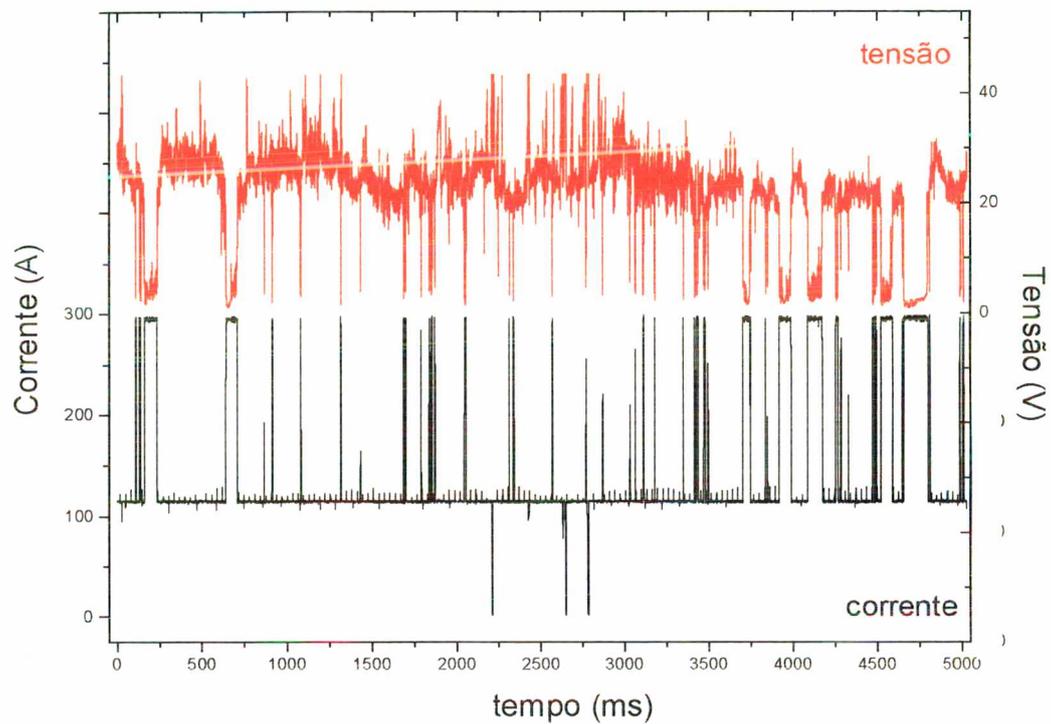


Figura 8.14 – Oscilograma de corrente e tensão da soldagem com imposição de corrente com efeito anti-colagem.

Alguns resultados e parâmetros de soldagem com imposição de corrente são mostrados na tabela 8.16.

Tabela 8.16 – Ensaios realizados com imposição de corrente.

	Va (m/min)	Iarco (A)	Icc (A)	Im (A)	Ief (A)	DPI (A)	Um (V)	Uef (V)	DPU (V)	%ext (%)	Numext	FreqCC (Hz)	TmedCC (ms)
1	1,3	115	375	81	97	54	34,9	35,7	7,5	29,9	431	5,2	1,2
2	1,3	115	295	83	98	52	33,8	34,7	7,8	27,0	451	3,0	1,4
3	1,4	115	295	84	99	53	32,6	33,7	8,6	26,8	431	6,8	0,9
4	1,4	115	295	85	99	51	34,3	35,1	7,5	25,4	491	4,2	1,0
5	1,4	115	295	85	101	54	31,3	32,7	9,4	26,3	521	6,0	1,2
6	1,4	115	295	86	100	51	33,5	34,4	7,9	24,8	621	4,2	1,2
7	1,4	115	295	86	100	51	33,3	34,2	7,6	25,2	351	6,0	1,0
8	1,4	115	295	87	102	53	31,1	32,4	8,9	24,8	521	7,2	1,3
9	1,5	115	295	88	104	55	32,4	33,5	8,6	24,7	401	5,8	2,1
10	1,5	115	295	90	102	49	32,9	33,9	8,0	22,0	411	6,6	0,8
11	1,5	115	295	90	103	51	33,4	34,3	7,8	23,0	421	7,0	1,4
12	1,5	115	295	90	105	54	32,2	33,3	8,5	23,2	461	6,4	2,3
13	1,5	115	295	90	102	48	33,2	34,1	7,4	21,3	341	4,4	0,8
14	1,5	115	295	92	107	56	31,3	32,6	9,1	22,7	411	9,1	2,1
15	1,5	115	295	92	105	51	33,4	34,2	7,3	20,8	311	3,6	2,8
16	1,6	115	295	92	112	63	31,9	33,2	9,4	25,0	461	4,8	7,6
17	1,6	115	295	92	105	49	33,1	34,0	7,5	19,7	461	6,8	1,3
18	1,6	115	295	95	112	60	32,8	34,0	8,9	22,1	291	3,6	9,4
19	1,6	115	295	95	105	47	31,9	32,7	7,4	17,9	441	5,4	1,4
20	1,6	115	295	95	114	64	30,5	32,2	10,1	24,0	571	7,8	5,3
21	1,6	115	295	95	117	69	31,4	33,0	10,3	25,4	261	5,0	10,8
22	1,6	115	295	95	106	46	29,2	30,4	8,4	17,3	611	4,4	1,0
23	1,6	115	295	95	114	63	30,3	31,9	9,9	22,8	611	6,4	6,3
24	1,6	115	295	96	114	62	31,0	32,4	9,6	22,4	491	8,1	4,8
25	1,7	115	295	98	118	66	30,3	32,0	10,3	22,1	571	8,1	6,1
26	1,7	115	295	99	120	68	32,9	34,4	10,2	22,0	261	4,4	13,1
27	1,8	115	295	100	112	50	30,9	31,9	8,2	15,0	351	6,4	3,2
28	2,0	115	295	111	124	55	28,0	29,5	9,0	10,9	381	12,7	3,3

Apesar de alcançar resultados muito superiores à soldagem com curto-circuito, a soldagem com imposição de corrente ainda apresenta períodos de extinção do arco. Neste conjunto de ensaios, este índice ficou entre 11 e 30% com uma média de 23%.

8.5.3 – Soldagem com Controle Adaptativo

A utilização de um controle adaptativo das características de resposta estática e dinâmica da fonte de soldagem se mostrou eficiente na redução drástica das extinções e melhoria da estabilidade do arco no processo arame tubular molhado. Esta melhoria fica visível através do índice %ext que situou-se entre 0 e 9% com média de 1%, nos 36 ensaios mostrados nas tabelas 8.6, 8.8 e 8.10. O aumento de estabilidade ficou refletido, tanto na redução dos valores de desvio padrão da tensão, quanto no aspecto dos cordões. Em consequência disto, os níveis de desvio padrão de tensão foram reduzidos, ficando com uma média de 5,7 V, contra os 8,6 V da soldagem com imposição de corrente.

8.6 – Resultados do Teste de Campo

8.6.1 - Análise do Desempenho dos Equipamentos

Um problema observado logo no início dos ensaios, foi o grande desconforto sentido pelo soldador-mergulhador na soldagem com arame tubular, causado por choques elétricos. Como nos testes iniciais com arame tubular este desconforto estava um pouco acima do normal, estes foram interrompidos, partindo-se então para uma análise comparativa à soldagem com eletrodo revestido. Além da diferença de polaridade entre os dois processos (direta no eletrodo revestido e inversa no arame tubular), observou-se que o porta-eletrodo utilizado na soldagem com eletrodo revestido é normalmente isolado com fita isolante especial, o que limita a área de contato entre a água e as

partes energizadas. No caso da tocha de soldagem foi providenciada apenas uma vedação com cola à base de silicone, permanecendo entretanto, algumas partes metálicas em contato direto com a água. A solução encontrada para resolver o problema, foi refazer o isolamento da tocha, utilizando a mesma fita isolante. Com relação ao desempenho do alimentador de arame, não foram observados trancamentos do arame [9,41] até o final dos testes. O sistema de injeção de ar comprimido [42] mostrou-se eficiente e impediu a entrada de água pelo conduíte do arame. Foi observada porém, a falta de um dispositivo de controle da vazão de ar comprimido, problema que pode ser facilmente equacionado com a colocação de um regulador de pressão na linha.

8.6.2 - Soldagem dos Corpos de Prova

A soldagem em campo com a fonte operando no modo de tensão, produziu efeitos muito semelhantes aos encontrados na soldagem em laboratório. O soldador apontou uma certa dificuldade em manter o processo. Para valores de tensão abaixo de 30 V e velocidade de arame de 2,6 m/min, fica praticamente impossível a soldagem, enquanto que para valores mais altos de tensão, ocorre uma grande instabilização do processo gerando a ruptura do arame na altura do bico de contato. Tal ruptura deve-se a brusca elevação da corrente durante os curto-circuitos (figura 8.13) que leva a um aquecimento localizado do arame, resultando no seu rompimento.

Para a soldagem com imposição de corrente foi utilizado o recurso do efeito anti-colagem, onde são ajustadas duas correntes, uma de soldagem (larco) e outra de curto

circuito (I_{cc}). No momento em que a tensão atinge um valor inferior a 5 V , indicando a iminência de um curto-circuito, o ajuste de corrente passa do valor de corrente de soldagem para o valor de corrente de curto-circuito. Como o valor da corrente de curto-circuito é bem superior ao da corrente de soldagem, o curto-circuito é desfeito.

A soldagem com imposição de corrente com polaridade negativa no eletrodo reduziu a intensidade dos choques sentidos pelo soldador, porém os cordões de solda resultantes ficaram mais convexos e com profundas mordeduras. Este último efeito deve-se em grande parte a elevação observada na tensão média do arco que saltou de um valor em torno dos 31 V para 43 V. Na soldagem a seco a uma atmosfera, este aumento da tensão está relacionado com a maior dificuldade de transferência do metal do eletrodo para a peça, que normalmente também resulta em elevação do consumo de eletrodo. A corrente média teve que ser elevada para manter o processo, passando de 120 A na soldagem com polaridade positiva (figura 8.15) para 188 A na soldagem com polaridade negativa (figura 8.16). Como consequência da associação do aumento da corrente média e da mudança de polaridade, ocorreu um aumento da velocidade de avanço do arame-eletrodo, que passou de 1,9 m/min para 3,9 m/min.

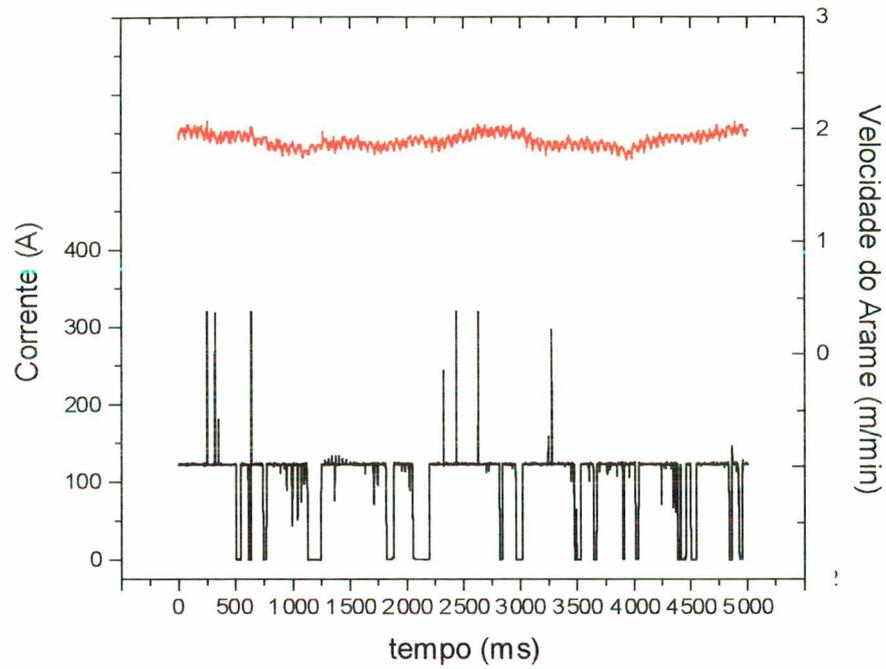


Figura 8.15 - Soldagem com imposição de corrente e polaridade positiva.

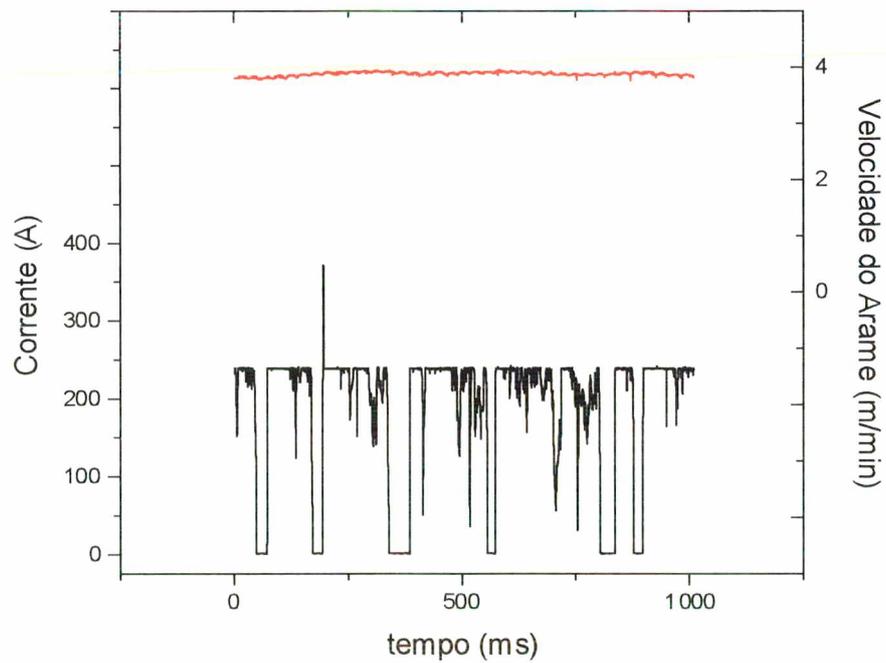


Figura 8.16 - Soldagem com imposição de corrente e polaridade negativa.

A soldagem manual com imposição de corrente e polaridade positiva foi a que mostrou melhores resultados com boa continuidade e aparência dos cordões. Na composição dos passes, o soldador-mergulhador observou que os cordões laterais mais próximos à borda da junta não se fundiam adequadamente, ficando muito convexos. A solução encontrada foi incidir o arco perpendicularmente a junta. Os passes centrais foram depositados com a tocha na posição vertical.

8.7 - Propriedades Mecânicas das Juntas Soldadas com o Arame Oxidante

8.7.1 – Análise da Microestrutura e dos Defeitos Macro e Micrográficos

Foram preenchidas duas juntas como as indicadas na figura 7.1, com 30 passes cada em média. Os teste foram realizados no tanque com 10 cm de lâmina d'água, utilizando o controle adaptativo da corrente. Depois de soldadas estas juntas foram analisadas através de ensaios micrográficos que mostraram uma microestrutura predominantemente ferrítica com grãos pequenos no metal de solda (figura 8.17 "B"). A figura 8.17 "D" também mostra que ocorreu refinamento de grão nos passes intermediários, decorrente dos ciclos térmicos gerados pelos passes subseqüentes. Este fato é comprovado pela microestrutura bruta de solidificação encontrada no último passe, que não sofreu o reaquecimento seguido de resfriamento rápido dos passes intermediários (figura 8.17 "C"). A figura 8.17 "E", mostra a microestrutura do metal base.

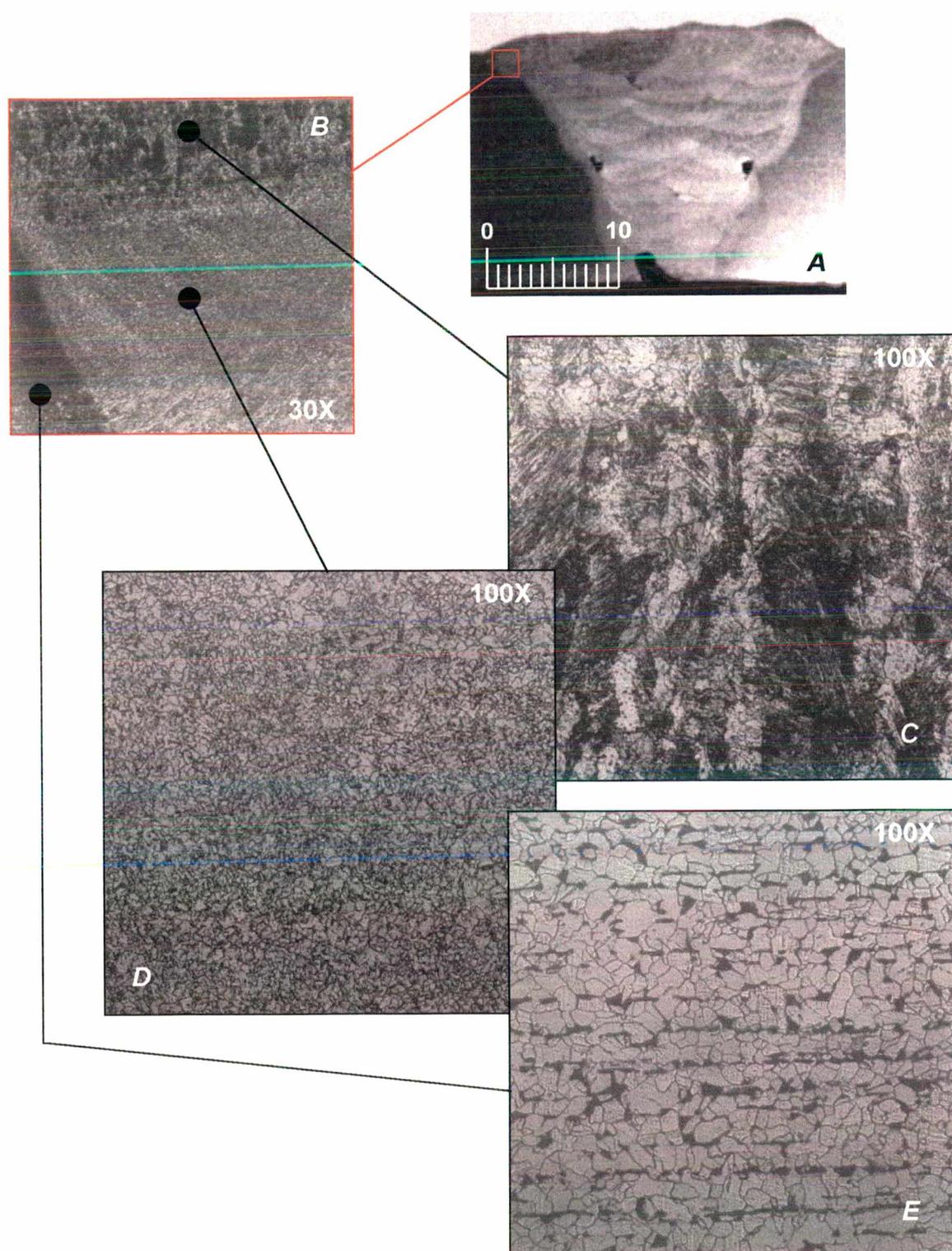


Figura 8.17 – Análise micrográfica da junta preenchida por soldagem molhada com arame tubular.

Também foram feitas radiografias de ambas as juntas soldadas, que apresentaram defeitos similares. Estes defeitos consistem de inclusões de escória alongadas (figura 8.17 "A" e 8.18) e também esféricas, estas últimas normalmente de pequenas dimensões (figura 8.19). As radiografias não apontaram a existência de poros de grandes dimensões ou trincas.



Figura 8.18 – Radiografia da junta soldada. No detalhe se percebe uma das inclusões de escória alongadas.

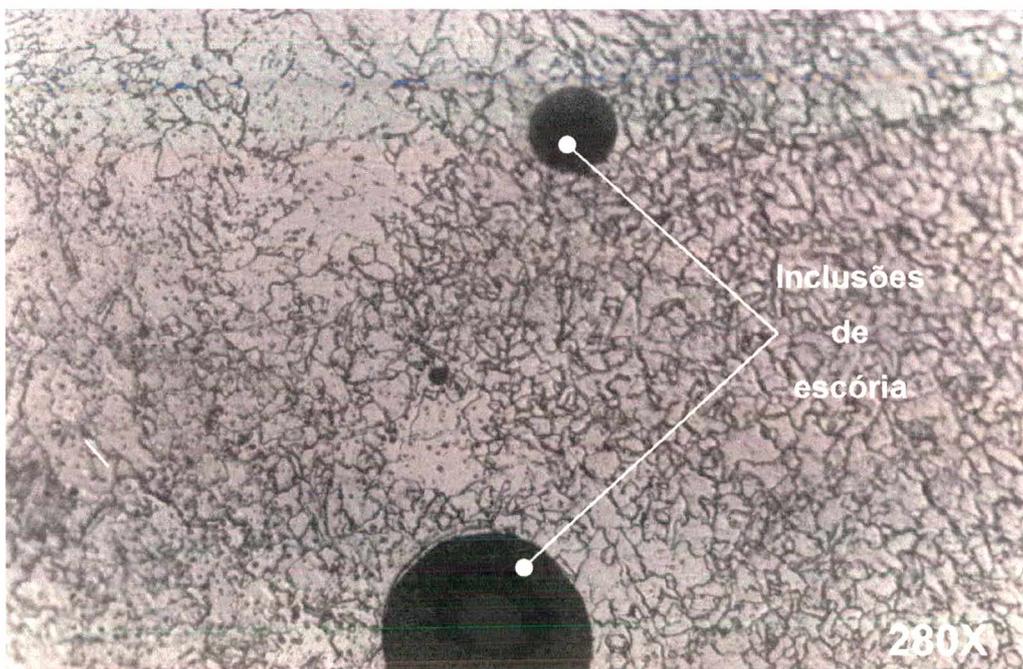


Figura 8.19 – Micrografia mostrando inclusões de escória.

O aspecto superficial da junta soldada é mostrado nas figuras 8.20.

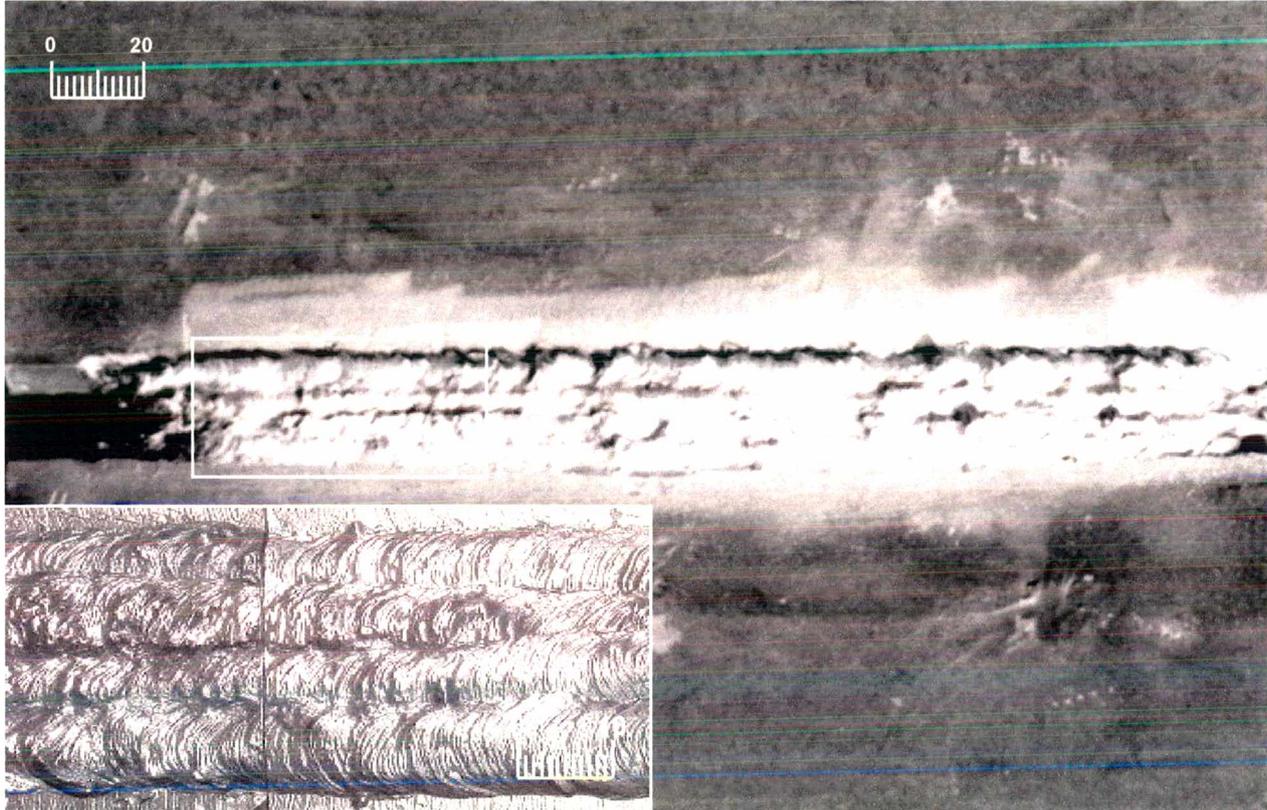


Figura 8.20 – Aspecto superficial da junta soldada.

Os cordões apresentaram boa molhabilidade, com poucos defeitos superficiais mostrados pelo ensaio de líquidos penetrantes.

8.7.2 – Resultados de Dureza e Microdureza

Foram realizados ensaios de dureza em várias posições da seção do corpo de prova (figura 8.21). Estes ensaios mostraram um valor máximo de 129 HV10. Os valores de dureza dos demais ensaios são mostrados na tabela 8.17.

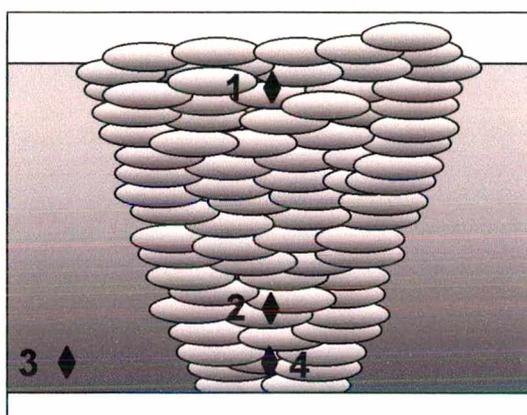


Figura 8.21 – Figura indicando a posição dos ensaios de dureza.

Tabela 8.17 – Resultado dos ensaios de dureza.

Ponto	HV10
1	129
2a(*)	112
2b(*)	112
2c(*)	121
2d(*)	113
3a(*)	114
3b(*)	116
4a(*)	120
4b(*)	127
4c(*)	126

(*) As letras indicam que para a mesma região foram feitas várias medições.

As posições das medições de microdureza são mostradas na figura 8.22. Foram feitos dois perfis de microdureza. O perfil "α" (figura 8.23), começa no último passe (região de grãos grosseiros) e termina na ZAC do último passe sobre o metal de base. O perfil "β" (figura 8.24), inicia também no último passe, atravessa o passe "A", que foi revenido pelo passe "B" e pelo último passe, e termina na ZAC do metal de base.

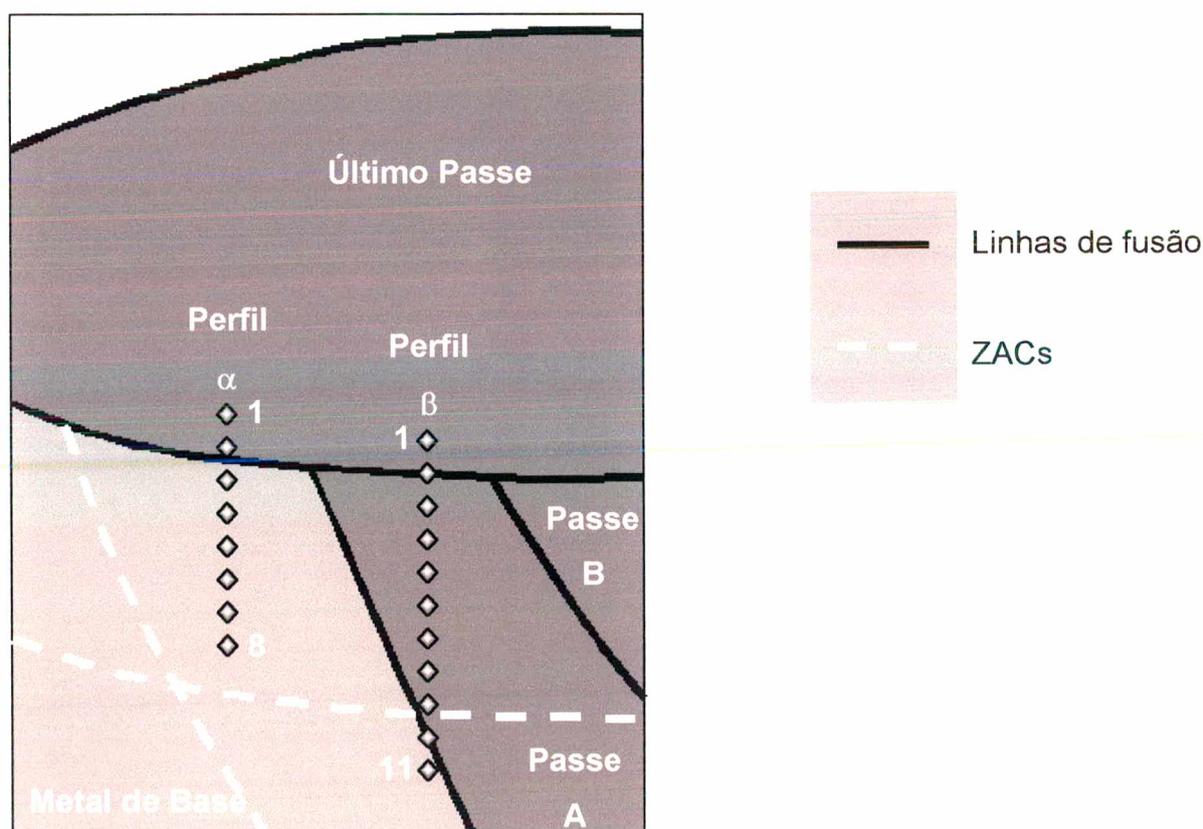


Figura 8.22 - Posição das medições de microdureza.

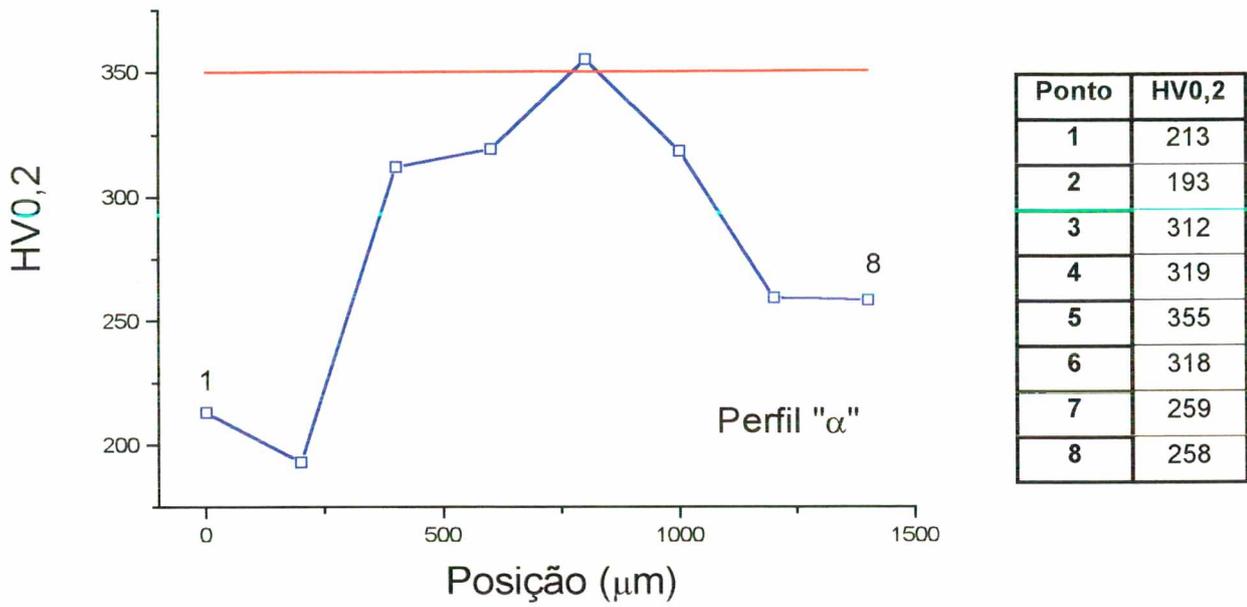


Figura 8.23 – Perfil de microdurezas “α”.

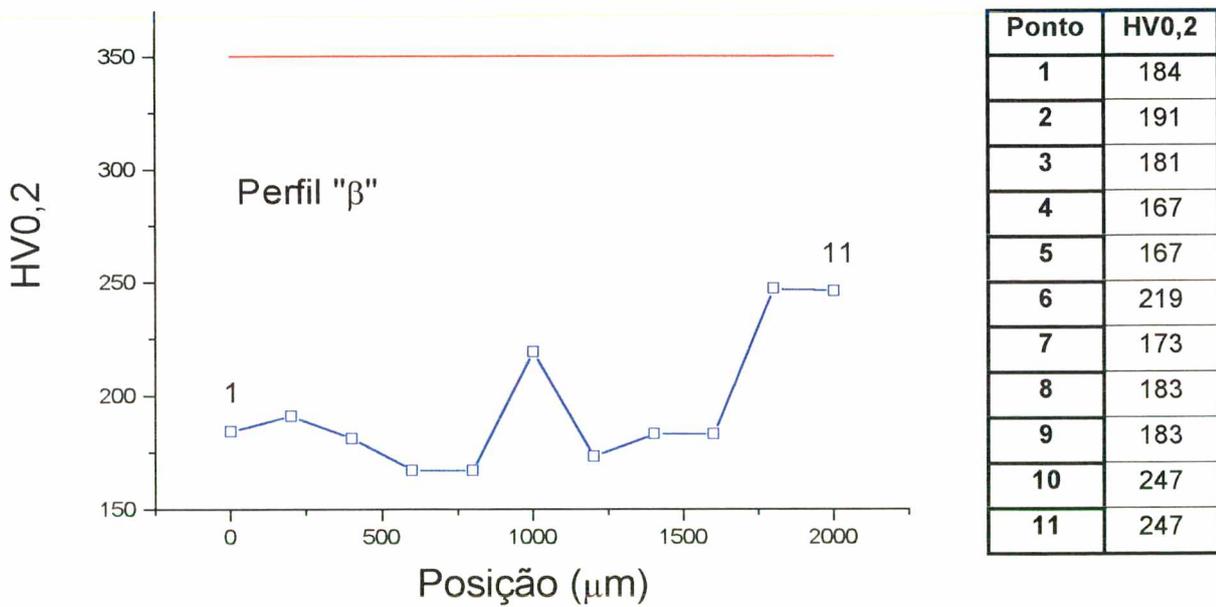


Figura 8.24 - Perfil de microdurezas “β”.

8.7.3 – Tenacidade da Junta Soldada (Eletrodo Oxidante)

O mínimo valor observado para os ensaios Charpy a 0 °C foi de 26 J, sendo que a média dos resultados se situou nos 34 J (tabela 8.18). Estes resultados são comparáveis aos obtidos nos testes com o eletrodo revestido oxidante.

Tabela 8.18 – Resultados dos ensaios Charpy a 0 °C.

CP	Charpy
1	29
2	48
3	35
4	26
5	35
6	33
Média	34

8.8 – Composição Química do Metal de Solda

Os resultados da análise química do metal de solda são mostrados na tabela 8.19, e ficaram dentro do esperado, consistindo basicamente de uma liga ferro/níquel.

Tabela 8.19 – Composição química do metal de solda.

medida	C	Si	Mn	P	S	Ni
1	0,03	<0,01	0,13	0,019	0,0089	2,23
2	0,02	<0,01	0,12	0,021	0,0082	2,17
Média	0,03	<0,01	0,12	0,020	0,0086	2,20
Incert.	1%	1%	1%	4%	4%	1%

9 – Conclusões

A soldagem com a fonte operando em tensão constante (Ucte) e corrente constante (Icte), não apresentou bons resultados. A fonte com controle adaptativo do arco alcançou comparativamente melhores índices de estabilidade do arco e melhor aspecto dos cordões.

Os objetivos de criação de infra-estrutura e conhecimentos no âmbito da soldagem molhada com arame tubular foram atingidos e estão materializados na forma de bancadas e equipamentos em plena operação, trabalhos publicados em vários congressos de soldagem, e projetos de pesquisa aprovados e concluídos.

A experiência obtida durante o teste de campo levou a algumas alterações no alimentador do arame, das quais destacam-se:

- Utilização de bobinas de 15 kg;
- Reprojeto da tocha de soldagem;

Os trancamentos de arame foram eliminados. Vários foram os fatores que contribuíram para se atingir esta meta, dentre os quais pode-se destacar:

- A maior resistência mecânica do eletrodo de 1,6 mm facilitou a alimentação do arame;
- A utilização de uma tocha reta, que reduz a deformação do arame na micropistola já próximo do bico de contato;
- O tracionador com quatro roletes ranhurados, que reduz a pressão imposta aos roletes, reduzindo o risco de deformação do arame;

- A utilização de técnicas de controle da corrente, que contribuíram para a estabilização do processo evitando picos de corrente elevados e o choque da ponta do arame contra a peça.

Os índices desvio padrão da tensão e percentual de extinção (%ext), mostraram-se como representativos da estabilidade do arco nas condições aplicadas nos ensaios de soldagem molhada com arame tubular.

O fato de não ter sido observada para ambos os arames testados influência significativa, tanto da distância bico de contato-peça, quanto da velocidade de soldagem sobre a estabilidade do arco, indica que o controle adaptativo pode ser aplicado também para a soldagem manual e não apenas na soldagem mecanizada.

O aumento da velocidade do arame sem mudança da corrente de referência altera os resultados de estabilidade do arco e a geometria do cordão obtidos na soldagem com o arame rutilico. Nestas condições, ocorre um aumento da convexidade dos cordões de solda, devido ao aumento dos períodos de curto-circuito em detrimento dos períodos de arco aberto.

A determinação da função que relaciona a velocidade do arame com a corrente de referência, permite a utilização de um programa sinérgico no ajuste do equipamento de soldagem.

A polaridade negativa influenciou fortemente os valores de Desvio Padrão da Tensão (DPU), piorando a estabilidade do arco. A tensão em vazio de 60 V associada à

polaridade negativa também resultou em um aumento significativo do tempo de arco extinto sobre o tempo de arco aberto (%ext). O menor valor de %ext, foi alcançado com polaridade positiva e tensão em vazio de 60 V. A polaridade positiva, portanto, resulta nos menores valores de DPU e %ext, e é conseqüentemente, a mais favorável.

A tensão em vazio não influenciou significativamente o valor de DPU e conseqüentemente a estabilidade do arco. Do ponto de vista do %ext, a tensão em vazio tem pouca influência na polaridade positiva, mas aumenta a sua importância para a soldagem com polaridade negativa.

A taxa de deposição na soldagem com arame tubular, como era esperado, foi 51% superior a alcançada pelo eletrodo revestido. Com a utilização prática dos arames tubulares, espera-se manter esta vantagem, uma vez que o processo com arame contínuo permite um período maior de soldagem sem interrupções.

Do ponto de vista de análise visual, radiográfica e macrográfica, a solda se enquadra dentro dos critérios de aceitação da norma AWS D3.6M:1999 Classe B [56].

A maioria dos defeitos observados estava relacionada a inclusões de escória, principalmente na junção entre um cordão e outro. Tal constatação remete ao estudo de uma nova formulação de fluxo que melhore a destacabilidade da escória. Pode-se simultaneamente analisar a introdução de elementos comerciais que sirvam para melhorar a estabilidade do arco.

Os mesmos ensaios de micro dureza também apontaram que existe um forte efeito positivo do reaquecimento causado pela superposição de passes.

A resistência ao impacto do metal de solda ficou, na média, acima do requerido pela norma AWS D3.6M:1999 Classe A, que exige um valor médio de 20 J para uma tensão de ruptura de 485 MPa ou menos, e um valor mínimo dos ensaios de 14 J. O valor relativamente mais baixo (26 J) apresentado em um dos ensaios Charpy 0 °C deve-se provavelmente à presença de inclusões de escória no interior do corpo de prova. Mesmo assim, este ainda se enquadra dentro dos critérios de aceitação da norma.

A composição química do metal depositado ficou dentro do esperado pelo fornecedor do arame.

10 – Propostas para Novos Trabalhos

Ainda há muito por fazer na área da soldagem molhada com arames tubulares para que o processo atinja a aplicabilidade do eletrodo revestido. Este deve ser um dos objetivos da pesquisas voltadas para o tema, e apesar de ambicioso, tem possibilidades de ser alcançado. Neste contexto, pode-se levantar algumas sugestões para a continuidade dos trabalhos nesta linha de desenvolvimento:

- O desenvolvimento de eletrodos que possam mesclar características dos, já consagrados, eletrodos revestidos oxidantes com as de arames tubulares comerciais, visando melhorar a estabilidade do arco;
- O teste de eletrodos tubulares de 2 e 2,4 mm;
- A utilização de corrente pulsada na soldagem com o controle adaptativo do arco, uma vez que a transferência se dá praticamente apenas por vôo livre;
- O treinamento de um soldador e a aplicação do processo em um teste de campo.

Referências Bibliográficas

- [1] – PEREIRA, R. – “O Petróleo está Morrendo”. Revista Quatro Rodas, no. 102, pag. 52, Jan. 1969.
- [2] – SANTOS, V. R., JORGE, J. C. F., SANTOS, J. F. – “Soldagem Hiperbárica: Perspectivas do Processo MIG/MAG para Aplicação em Reparos de Dutos Submarinos em Águas Profundas”. Anais do XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Blumenau - SC, pgs. 741-751, 1996.
- [3] – OGAWA, Y., KAGAWA, T., TAKAHIRO, I., ONO, Y., MATSUSHITA, H., SATO, I. – “Effect of Shielding Gas on Underwater CO₂ Welding”. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Lisbon – Portugal, 1998.
- [4] – TEIXEIRA, J. C. G., POPE, A. M., DEL VECCHIO, C. J. M., BARETA, A. P., KASTER, F. - “Reparo da Monobóia de Marimbá por Soldagem Molhada”, CD-ROM, Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Fortaleza - CE, 1998.
- [5] - MAGHES, A., REYNOLDS, T. and SMITH, R. – “Hurricane ‘Andrew’ Damedged Platform Repaired by Wet Welding”. Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. American Bureau of Shipping. New Orleans, Louisiana – USA, pgs. 279-293, 1994.
- [6] – “International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures”. American Bureau of Shipping, Stephen Liu, David Olson, Charles Smith, John Spencer., USA, Dec., 1994.
- [7] - GRETSKII, Y., KONONENKO, V., MAXIMOV, S. – “Wet Mechanized Underwater Welding With a Self-Shielding Flu-Cored Wire”, E. O. Patton Eletric Welding Institute of the Ukranie, Kiev. March, 1992.

- [8] - AWS – AWS D3.6:1989, Specification for Underwater Welding, American Welding Society, Miami, FL - USA, 1989.
- [9] - ANDRADE, L. P. C. S. – “Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Set. 1995.
- [10] - SZELAGOWSKI, P., STUHFF, H., LOEBEL, P., BLIGHT, J., DONELLY, C., SCHAFSTALL, H. – “Properties of Wet Welded Joints”. 21st Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas - USA, OTC5890, pgs. 77-86. 1989.
- [11] - OGDEN, D., JOOS, T. – “Specifications Stirrs Underwater Electrode Development”. Welding Journal, AWS, USA, pgs. 59 - 61, Aug 1990.
- [12] - CHRISTENSEN, N. – “The Metallurgy of Underwater Welding”. Underwater Welding IIW Conference, Pergamon Press, Trondheim – Norway, pgs. 71-94, 1983.
- [13] - TWI – The Welding Institute Connect Magazine, “ Underwater welding work expands at TWI North”. Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/connect/july96/july96f.html>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.
- [14] - POPE, A. M., TEIXEIRA, J. C., PIZA, M. T e SANTOS, V. R. – “Soldagem Submarina Molhada: Desenvolvimentos Recentes e Perspectivas de Aplicação em Reparos Submarinos”. Anais do XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Blumenau - SC, pgs. 707-716, 1996.
- [15] - LIU, S., POPE, A., DAEMEN, R. – “Welding Consumables and Weldability. Wet Welding”, Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, American Bureau of Shipping, New Orleans, Louisiana – USA, pgs. 321-350, 1994.
- [16] - RODGERS, K. J., LOCHHEAD, J. C. – “Self-Shielded Flux Cored Arc Welding - The Route to Good Fracture Toughness”, Welding Journal, AWS, USA, pgs. 49-59, Jul. 1987.

- [17] - RORVIK, G., ONSOEN, M, KLUKEN, M., AKSELSEN, O. – “High Heat Input Welding of Offshore Structures - Procedures and Weld Properties”, *Welding Journal*, AWS, USA, pgs. 331s-339s, Sept. 1992.
- [18] - HAMAZAKI, M., SAKAKIBARA, J. – “Development of Underwater Automatic Welding with Local Cavity Formation Method”, 8th Annual Offshore Technology Conference, Houston - USA, OTC 2646, 1976.
- [19] - ARATA, J, HAMAZAKI, M., SAKAKIBARA, J. – “Water Curtain Type Underwater MIG Arc Welding (The 2 report)”, *Journal of I.W.S*, V. 46, n 8-12, 1977.
- [20] - SCHAFSTALL, H. G. and SCHAEFER, R. – “Naßschweißen Unter Wasser – Entwicklungsaktivitäten”. *Schweißen und Schneiden*, v. 31, n 5, 1979.
- [21] - LI, S., MEI, F., LI, Z. – “Study on Underwater GTA Welding”, *International Conference on Underwater Welding*, New Orleans, Louisiana - USA, pgs. 135 – 143, 1991.
- [22] - ALMEIDA, D. e MACHADO, I. G. – “Soldagem Subaquática Molhada com o Processo MIG”. *Anais do XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem* , Caxias do Sul - RS, pgs. 373 - 388. 1995.
- [23] - CHANDIRAMINI, D. – “Hydrogen Reduced in Wet Underwater GMA Welds”, *Welding Journal*, AWS, USA, pgs. 45-49, Mar. 1994.
- [24] - GOOCH, T. – “Properties of Underwater Welds - Part 1: Procedure Properties”, *Metal Construction*, pgs. 164-167, Mar. 1993.
- [25] - NICHOLAS, D. – “Friction Welding Techniques”, *International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures*, American Bureau of Shipping, USA, pags. 297-300, Dec., 1994.
- [26] – SANTOS, J. F., TORSTER, F., HUTT, G., KOQAK, M. - “Metallurgical and Mechanical Properties of Radial Friction Welded Ti-6Al-4A-0.1Ru Risers”. 17th

International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Lisbon – Portugal, 1998.

[27] - POKHONYA, I., GORPENYUK, V., KONONENKO, V., PONOMAREV, V., MAKSIMOV, S. – “Some Peculiarities of Arc Burning and Metal Transfer in Wet Underwater Self-shielding Fluxcored Wire Welding”, IIW Conference - Welding Under Extreme Conditions, pgs. 151-160, 1989.

[28] - TSAI, C., MASUBUCHI, K. – “Mechanisms of Rapid Cooling in Underwater Welding”, Applied Ocean Research, V. 2, n. 2, pgs. 99 – 110, 1979.

[29] - POPE, A. M. – “Oxygen and Hydrogen Control in Shielded Metal Underwater Welding”, PhD Thesis, Colorado School of Mines, May. 1995.

[30] - YAMADA, T., TANAKA, O. – “Fluctuations of the Wire Feed Rate in Gas Metal Arc Welding”, Welding Journal, AWS, USA, pgs. 35-42, Sept 1987.

[31] – TWI – The Welding Institute Technology File, “Joint Seminar on Underwater Welding and Cutting a Great Success”. Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/connect/june97/june97g.html>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.

[32] - TWI – The Welding Institute Connect Magazine, “New projects support use of diving tank facilities”, Disponível em: <<http://www.twi.co.uk/connect/nov99/c1038b.html>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.

[33] – The Ohio State University, PROJECT RECORD FORM - Completion Report, “Control Algorithm for Underwater Wet Flux-Cored Arc Welding Process”, Disponível em: <<http://www.sg.ohio-state.edu/Project/ROE-13.htm>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.

[34] - The Ohio State University, PROJECT RECORD FORM - Completion Report, “Development of a Microprocessor-Based Joint Tracking and Operation Guidance

System for Underwater Welding”, Disponível em: <<http://www.sg.ohio-state.edu/Project/ROE-14.htm>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.

[35] – QUITES, A., DUTRA, J. C. – “Tecnologia da Soldagem”, LABSOLDA/UFSC, Apostila, Capítulo 4, Florianópolis, Fev. 1998.

[36] - GOHR JR., R. – “Projeto e Realização de Uma Fonte de Energia para Soldagem Multiprocesso”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Out. 1992.

[37] – BAIXO, C. E. I. – “Estudo da Soldagem MIG/MAG pela Técnica Hiperbárica a Seco Visando sua Aplicação em Procedimentos de Reparo Submarino”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Dez. 1999.

[38] - WANG, Q. L.; LI, P. J. – Arc Light Sensing of Droplet Transfer and its Analysis in Pulsed GMAW Process, Welding Research Supplement, Welding Journal, AWS, USA, pgs. 458s-469s, Nov. 1997.

[39] – POPE, A. M., TEIXEIRA, J. C., BAIXO, C. E. I., TEICHMANN, E. W., DUTRA, J. C. – “Influence of Power Supply Dynamic Response on Underwater Wet Welding Arc Stability”. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Lisbon – Portugal, 1998.

[40] - Informativo CIMM (Centro de Informação Metal Mecânica), “Qualificação de Procedimentos de Soldagem Submarina Empregando Equipamento Desenvolvido no LABSOLDA”, Disponível em: <<http://200.237.239.32/curiosidades/cur56.htm>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.

[41] - ANDRADE, L. P. C. S; DUTRA, J. C.; TEIXEIRA, J. C.; SANTOS, V. R. – “Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem Subaquática Molhada com

- Eletrodo Tubular”, Anais do XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, Contagem - MG, pgs. 483-498, 1994.
- [42].- TEICHMANN, E. W.; BAIXO, C. E. I.; DUTRA, J. C.; SANTOS, R. S.; TEIXEIRA, J. C. – “Desenvolvimento de Equipamentos para Incrementar a Soldagem Subaquática Molhada com Arame Tubular”, Anais do XXII Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, Blumenau – SC, pgs. 717-727, Jul. 1996.
- [43] – TEICHMANN, E. W. – “Reparo de Cavitação da Turbina nº 2 da Usina Hidrelétrica de Salto Santiago”, Relatório Técnico LABSOLDA, UFSC, Florianópolis – SC, Nov. 1997.
- [44] - OLLÉ, L. F. – “Manual de Operação do Alimentador de Arame STA-20”, Manual do Usuário, versão 1.0, Florianópolis – SC, LABSOLDA, 2001.
- [45] - MADATOV, N.M. e POTAPEVSKII, A.G. – “Features of the Underwater Thin Wire Process”. Welding Production, no.2, 1967.
- [46] - POTAPEVSKII, A.G e MADATOV, N.M. – “Melting and Transfer of Metal During Underwater Welding with Fine Electrode Wire”. Automatic Welding, vol. 20, no.12; pg.10-13, Dec. 1967.
- [47] - MADATOV, N.M. – “Shape Relationships for Underwater Welding”. Welding Production, vol. 16, no. 3; Mar. 1969.
- [48] - TEICHMANN, E. W., BAIXO, C. E. I., DUTRA, J. C., POPE, A. M., TEIXEIRA, J. C. – “Influência de Parâmetros e Variáveis Sobre a Deposição com Eletrodos Tubulares Pela Técnica da Soldagem Molhada”, Anais do XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, Fortaleza – CE, CD-ROM, 1998..
- [49] - GOHR, R. – “Interdata, Interface de Aquisição e Controle da Dados”, Manual do Usuário, versão 3.0, Florianópolis – SC, LABSOLDA, 1997.

- [50] – CORREA, M. A. – “Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Set. 1999.
- [51] - MOUNTGOMERY D. C., “Design and Analysis of Experiments”, Arizona State University, 4th edition, USA, 703 pgs., 1997.
- [52] - TEICHMANN E.W., BAIXO C.E.I., DUTRA J.C., POPE A.M., TEIXEIRA J.C.G. – “Utilização de Técnicas de Controle Visando a Melhoria da Estabilidade do Arco na Soldagem Molhada com Eletrodo Tubular”. Anais do XXV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, ABS, São Paulo – SP, CD-ROM, 1999.
- [53] – DE SOUZA, P. C. R. D. – “Análise da Transferência Metálica na Soldagem com Arame Tubular”, Tese de Doutorado, USP, São Paulo – SP, 1998.
- [54] - FARIAS, J. P – “Magnésio Metálico Como Componente do Revestimento na Soldagem com Eletrodos ao C-Mn-Ni”, Tese de Doutorado, UFSC, Dezembro 1993.
- [55] – SPECTROCAST – “Spectroreport, Application Sheet 47 - Analysis of Steel”, Disponível em: <<http://www.spectro-ai.com>>, Acesso em: 15 de Fevereiro de 2001.
- [56] - AWS – “AWS D3.6M:1999, Specification for Underwater Welding”, American Welding Society, Miami, FL - USA, 1999.