

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

SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ELETRODO TUBULAR

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

LEONE PETER CORREIA DA SILVA ANDRADE

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1995

SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA COM ELETRODO TUBULAR

LEONE PETER CORREIA DA SILVA ANDRADE

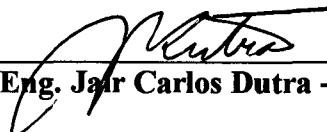
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

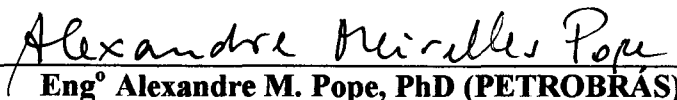


Prof. Dr. Eng. Antônio F. C. da Silva - Coord. do Curso



Prof. Dr. Eng. Jair Carlos Dutra - Orientador

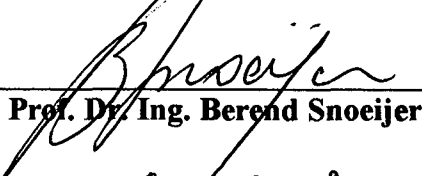
BANCA EXAMINADORA



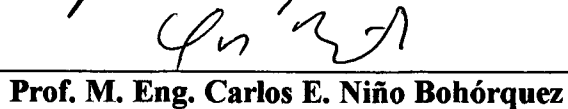
Eng^o Alexandre M. Pope, PhD (PETROBRÁS)



Prof. Dr. Eng. Almir Monteiro Quites



Prof. Dr. Ing. Berend Snoeijer



Prof. M. Eng. Carlos E. Niño Bohórquez



Eng^o José Claudio G. Teixeira, M. Sc. (PETROBRÁS)

*Aos meus pais: Paulo Hora e Laura,
aos meus irmãos: Paulo Jr. e Lauro,
e à minha esposa Tere*

AGRADECIMENTOS

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

- À minha família, pelo grande apoio e constante incentivo, principalmente nos momentos mais difíceis;
- Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação;
- A todos os integrantes do LABSOLDA/UFSC e, principalmente, aos Eng^{os} Larry Fiori Ollé, Raul Gohr Jr. e Cleide Marqueze, além do Técnico Valério de Oliveira Quadros, pelo inestimável apoio durante a fase de preparação e realização dos experimentos;
- Aos Eng^{os} do CENPES/PETROBRÁS - José Cláudio Teixeira, Valter Rocha dos Santos e Macelo Piza - pelas valiosas discussões e co-orientação;
- Aos Professores Augusto J. A. Buschinelli, Almir M. Quites e, especialmente, ao Prof Carlos E. Niño, pelas consultas, “dicas” e esclarecimentos de dúvidas;
- Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, pelos ensinamentos;
- Aos Professores Herman A. Lepikson (UFBA) e Walter L. Weingaertner, pela inspiração e incentivo para a inscrição no Mestrado;
- Ao CNPq, pela concessão de bolsa;
- Ao CENPES/PETROBRÁS pelo apoio financeiro e realização de alguns ensaios;
- À minha esposa Tere, a todo o pessoal do LAMI/UFBA e ao colega Cláudio Castelo Branco pelo grande apoio e incentivo na reta final deste trabalho;
- A toda a “galera” do LABSOLDA e do CPGEM, em especial aos grandes amigos Reginaldo, Paulinho, Ossimar, Ricardo, Armando, Genisson, Geraldo, Raúl, Niño, Ramón e Jesualdo pelos momentos de descontração.

SUMÁRIO

<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>ix</u>
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>x</u>
<u>SIMBOLOGIA</u>	<u>xiii</u>
<u>RESUMO</u>	<u>xvii</u>
<u>ABSTRACTS</u>	<u>xviii</u>
<u>I - INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
<u>II - OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS</u>	<u>3</u>
2.1 - Objetivo	3
2.2 - Justificativas	3
<u>III - SOLDAGEM SUBAQUÁTICA</u>	<u>5</u>
3.1 - Histórico	5
3.1.1 -1910 a 1959: Nascimento da Tecnologia da Soldagem Subaquática e Seu Pequeno Crescimento	5
3.1.2 - 1960 a 1983: Rápida Expansão	6
3.1.3 - 1984 ao Presente: Maturidade, mas Tecnologia Crescendo Lentamente	7
3.2- Classificação	7
3.2.1 - Quanto a Técnica Operacional Empregada	7
3.2.1.1 - Divisão Clássica	8
3.2.1.2 - Divisão da AWS	12
3.2.2 - Quanto ao Processo de Soldagem Empregado	14
3.2.2.1 - Soldagem com Eletrodo Revestido	14

3.2.2.2 - Soldagem TIG.....	15
3.2.2.3 - Soldagem MIG/MAG.....	16
3.2.2.4 - Soldagem com Eletrodo Tubular	17
3.2.2.5 - Soldagem Plasma	18
3.2.2.6 - Outros.....	19
3.2.3 - Quanto à Qualidade da Solda Obtida	19
3.3 - Aplicações.....	20
3.4 - Vantagens e Desvantagens da Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular	23
3.5 - Segurança	25
3.5.1 - Doenças do Mergulho	26
3.5.2 - Choques Elétricos	26
3.6 - Automação.....	27
IV - SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA	29
4.1 - Introdução	29
4.2 - Aspectos Operacionais	29
4.2.1 - Estabilidade do Arco e Visibilidade.....	29
4.2.2 - Variáveis de Soldagem	30
4.2.3 - Parâmetros de Soldagem	30
4.2.4 - Corrente Pulsada	30
4.3 - Aspectos Metalúrgicos	31
4.3.1 - Mudanças na Composição Química do Metal de Solda	31
4.3.2 - Surgimento de Trincas a Frio.....	32
4.3.3 - Porosidades.....	32
4.3.4 - Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas.....	33
4.4 - Métodos para Diminuir a Velocidade de Resfriamento.....	36
4.5 - Aços e Consumíveis mais Adequados à Soldagem Molhada.....	38
4.5.1 - Aços HSLA e TMCP	38
4.5.2 - Eletrodos Austeníticos e à Base de Níquel.....	39
4.6 - Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular	39
4.6.1 - Eletrodos Tubulares Austeníticos	40
4.6.2 - Eletrodos Tubulares com Boa Estabilidade de Arco.....	41

4.6.3 - Eletrodos "Dual-Tube"	42
4.6.4 - Propriedades Mecânicas e Qualidades de Solda Obtidas	42

V - METODOLOGIA EXPERIMENTAL 44

5.1 - Introdução	44
5.2 - Infra-estrutura Básica	44
5.2.1 - Banco de Ensaio SISDATASOLDA 1	45
5.2.2 - Banco de Ensaio SISDATASOLDA 2	47
5.2.3 - "Softwares"	48
5.3 - Materiais Empregados	48
5.3.1 - Metais de Base	48
5.3.2 - Consumíveis	48
5.4 - Procedimentos Adotados	50
5.4.1 - Procedimento Geral de Soldagem	50
5.4.2 - Procedimentos Específicos e Dados de Soldagem	51

VI - RESULTADOS E DISCUSSÃO 65

6.1 - Influência da Água sobre a Estabilidade do Processo	65
6.1.1 - Efeito do Vapor D'Água	72
6.1.2 - Modo de Transferência	72
6.2 - Efeito da Injeção de Gás	75
6.3 - Influência do Material do Bico de Contato	75
6.4 - Efeito da Mudança do Diâmetro do Eletrodo	81
6.5 - Verificação da Influência da Indutância da Fonte	81
6.6 - Efeito da Aceleração do Arame na Abertura do Arco	84
6.7 - Levantamento da Faixa de Trabalho de Variáveis e Parâmetros	84
6.8 - Levantamento das Curvas de Produção de Material de Adição	91
6.9 - Ensaio de Macro e Microdureza	91
6.10 - Análises Macro e Micrográficas	92
6.11 - Análise da Susceptibilidade de Trincas a Frio	96
6.12 - Influência de Variáveis/Parâmetros sobre o Surgimento de Defeitos	102
6.13 - Ensaio Mecânicos	104

6.13.1 - Ensaio de Dobramento Lateral.....	105
6.13.2 - Ensaio de Dobramento de Raiz.....	105
6.13.3 - Ensaio de Tração.....	106
6.13.4 - Ensaio de Resistência ao Impacto.....	106
6.14 - Corrente Pulsada.....	106
<u>VII- CONCLUSÕES</u>	114
<u>VIII - PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS</u>	117
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Classificação da soldagem subaquática	8
Tabela 02 - Vantagens e desvantagens das técnicas operacionais de soldagem subaquática.....	25
Tabela 03 - Limite a fadiga em soldas	34
Tabela 04 - Susceptibilidade às trincas a frio (em termos da tensão crítica)	36
Tabela 05 - Propriedades mecânicas de juntas soldadas com ET austenítico	40
Tabela 06 - Propriedades mecânicas do ET “dual-tube” e de outros processos	43
Tabela 07 - Variáveis de soldagem recomendadas para o E71T-1, na superfície	49
Tabela 08 - Propriedades mecânicas do E71T-1, na superfície.....	49
Tabela 09 - 1º estudo do material do bico.....	80
Tabela 10 - 2º estudo do material do bico.....	80
Tabela 11 - Dados de soldagem e quantificação dos poros obtidos nos cordões da figura 53	104
Tabela 12 - Dados de soldagem e quantificação dos poros obtidos nos cordões da figura 54	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Tendência mundial na determinação da técnica e do processo empregados na soldagem subaquática	4
Figura 02 - Técnica da soldagem subaquática a 1 (um) atmosfera	9
Figura 03 - Técnica da soldagem subaquática hiperbárica	11
Figura 04 - Técnica da soldagem subaquática molhada	12
Figura 05 - Testes de impacto Charpy em soldas molhadas com ER.....	35
Figura 06 - Dureza em soldas molhadas com ER	35
Figura 07 - Banco de ensaios SISDATASOLDA 1 (1ª parte).....	45
Figura 08 - Banco de ensaios SISDATASOLDA 1 (2ª parte).....	46
Figura 09 - Bico de contato com prolongamento cerâmico.....	52
Figura 10 - Curvas de aceleração do arame na abertura do arco (potenciômetro de acendimento suave).....	54
Figura 11 - Seção transversal do CP1 com a localização dos pontos de análise micrográfica	57
Figura 12 - Localização dos CP's na junta soldada nº 2	62
Figura 13 - Localização dos CP's na junta soldada nº 3	62
Figura 14 - Corpo de prova de tração	63
Figura 15 - Corpo de prova de dobramento	63
Figura 16 - Corpo de prova de impacto Charpy-V.....	64
Figura 17 - Oscilogramas de soldagem a seco	66
Figura 18 - Oscilogramas de soldagem subaquática molhada sem gás	67
Figura 19 - Cordões de solda com e sem trancamentos fortes.....	69
Figura 20 - Cordões de solda com e sem trancamentos do tipo médio.....	69
Figura 21 - Cordões de solda com trancamentos do tipo fraco	70
Figura 22 - Oscilogramas de uma soldagem com trancamentos do tipo fraco.....	71
Figura 23 - Cordões de bom aspecto visual (com microtrancamentos)	74
Figura 24 - Geometria e localização das gotas na extinção do arco.....	74
Figura 25 - Oscilogramas de soldagem subaquática molhada com gás.....	76
Figura 26 - Oscilogramas de soldagem com bico de grafite (1º lugar).....	77

Figura 27 - Oscilogramas de soldagem com bico de cobre (2° lugar).....	78
Figura 28 - Oscilogramas de soldagem com bico de bronze (3° lugar).....	79
Figura 29 - Oscilogramas de soldagem molhada com arame de 1,2 mm.....	82
Figura 30 - Oscilogramas de soldagem molhada com arame de 1,0 mm.....	83
Figura 31 - Baixo valor do potenciômetro (alta aceleração do arame nas reaberturas do arco).....	85
Figura 32 - Alto valor do potenciômetro (baixa aceleração do arame nas reaberturas do arco).....	86
Figura 33 - Baixo valor do potenciômetro (alta aceleração do arame na abertura do arco).....	87
Figura 34 - Alto valor do potenciômetro (baixa aceleração do arame na abertura do arco).....	88
Figura 35 - Faixa de trabalho da velocidade do arame e tensão de comando (eletrodo ϕ 1,0 mm).....	90
Figura 36 - Faixa de trabalho da velocidade do arame e tensão de comando (eletrodo ϕ 1,2 mm).....	90
Figura 37 - Faixa de trabalho da velocidade do arame e tensão de comando (eletrodo ϕ 1,6 mm).....	90
Figura 38 - Influência do diâmetro do arame e da corrente sobre o consumo de arame.....	93
Figura 39 - Influência da corrente e polaridade sobre o consumo de arame.....	93
Figura 40 - Dureza na direção horizontal da seção transversal e margeando a trinca.....	94
Figura 41 - Dureza ao longo da seção transversal (direção vertical) e dados geométricos da solda.....	94
Figura 42 - Macrografia do CP1, de simples deposição sobre chapa. Seção de melhor aspecto visual.....	97
Figura 43 - Macrografia do mesmo cordão da figura 42 (CP1). Seção de pior aspecto visual.....	97
Figura 44 - Macrografia do CP2 soldado de ambos os lados em ensaio de simples deposição sobre chapa.....	98
Figura 45 - Metal de base. Microestrutura correspondente ao ponto “a” da figura 11.....	98
Figura 46 - Transição entre metal de base (direita) e ZAC de granulação fina (esquerda). Microestrutura do ponto “b” da figura 11.....	99
Figura 47 - Transição entre ZAC de granulação grosseira (direita) e cordão de solda (esquerda). Microestrutura do ponto “c” da figura 11.....	99
Figura 48 - Cordão de solda. Microestrutura correspondente ao ponto “d” da figura 11.....	100
Figura 49 - Trinca a frio na ZAC de granulação grosseira e, pouco acima, linha de fusão.....	100
Figura 50 - Porosidade no interior do primeiro cordão de solda da figura 44.....	101

Figura 51 - Macrografia da 1ª junta soldada. Corte transversal.....	101
Figura 52 - Macrografia da 1ª junta soldada. Corte longitudinal.....	107
Figura 53 - Ensaio radiográfico em soldas de simples deposição em chapa (dados na tabela 11).....	107
Figura 54 - Ensaio radiográfico em soldas de simples deposição em chapa (dados na tabela 12).....	108
Figura 55 - Radiografia da junta soldada nº 1 (1/2").....	108
Figura 56 - CP's após ensaios Charpy, com características crescentes de fratura frágil da esquerda para a direita.....	110
Figura 57 - Oscilogramas de soldagem com modulação convencional (comando de tensão).....	111
Figura 58 - Oscilogramas na soldagem com corrente pulsada no modo misto (corrente na base e tensão no pulso).....	112
Figura 59 - Oscilograma de corrente da figura 58, expandido de 2 a 2,3 s.....	113
Figura 60 - Pistola com bico de contato auto-ajustável de grafite, específica para a SSMET.....	118

SIMBOLOGIA

"	→ Polegada (25,4 mm)
σ_e	→ Limite de escoamento
σ_r	→ Limite de resistência à tração
ϕ	→ Diâmetro do arame-eletrodo
Ω	→ Ohm
$^{\circ}\text{C}$	→ Grau Celsius
A	→ Ampère
ABNT	→ Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	→ "American Petroleum Institute"
<u>apud</u>	→ Citado por, conforme, segundo
Ar	→ Argônio (gás)
ASME	→ "American Society of Mechanical Engineers"
ASTM	→ "American Society for Testing Materials"
atm	→ Atmosfera
AWS	→ "American Welding Society"
C	→ Carbono
CA	→ Corrente alternada
CC	→ Corrente contínua
CC +	→ Corrente contínua com polaridade positiva
CC -	→ Corrente contínua com polaridade negativa
Ceq	→ Carbono equivalente
cm	→ Centímetro (10^{-2}m)
CO	→ Monóxido de carbono
CO ₂	→ Dióxido de carbono
CP	→ Corpo de prova
dcp	→ Distância contato-peça

DP	→ Desvio padrão
E	→ Aporte térmico
Ed.	→ Edição
END	→ Ensaio não destrutivo
ER	→ Eletrodo revestido
et al.	→ Et alli (entre outros)
ET	→ Eletrodo tubular
FCAW	→ "Flux cored arc welding"
G	→ Poro de tamanho grande
GG	→ Poro de tamanho super grande
GMAW	→ "Gas metal arc welding"
GTAW	→ "Gas tungsten arc welding"
H	→ Hidrogênio (elemento atômico)
H ₂	→ Hidrogênio (gás)
H ₂ O	→ Água
H _D	→ Hidrogênio difusível
HSLA	→ "High strength low alloy"
HV ₁₀	→ Dureza Vickers com carga de 10 kgf
I	→ Corrente elétrica
I _b	→ Corrente de base
IBP	→ Instituto Brasileiro do Petróleo
IIW	→ "International Institute of Welding"
I _m	→ Corrente média
IMAC	→ Interface modular de aquisição e controle
INTERDATA 2	→ Placa de aquisição de dados
I _p	→ Corrente de pulso
J	→ Joule
JWS	→ "Japan Welding Society"
kgf	→ Quilograma-força (9,8 N)
kgf/mm ²	→ Quilograma-força por milímetro quadrado (9,8 x 10 ⁶ Pa)
kHz	→ Quilohertz (10 ³ Hz)

km	→	Quilômetro (10^3 m)
LDA	→	Lâmina d'água
m	→	Metro
<i>m</i>	→	Poros de tamanho médio
mA	→	Miliampére (10^{-3} A)
MAG	→	"Metal active gas"
MIG	→	"Metal inert gas"
min	→	Minuto (60 s)
MIT	→	"Massachusetts Institute of Technology"
mm	→	Milímetro (10^{-3} m)
Mn	→	Manganês
MPa	→	Megapascal (10^6 Pa)
ms	→	Milissegundo (10^{-3} s)
N_{cc}	→	Número de curtos-circuitos
Ni	→	Níquel
O	→	Oxigênio (elemento atômico)
<i>p</i>	→	Poros de tamanho pequeno
P&D	→	Pesquisa e desenvolvimento
PAW	→	"Plasma arc welding"
PS	→	Profundidade de solda
R	→	Raio
<i>R</i>	→	Resistência elétrica
s	→	Segundo
Si	→	Silício
SISDATASOLDA 1 e 2	→	Bancos de ensaio automatizados nº 1 e 2, respectivamente
SM	→	Sistema de medição
SMAW	→	"Shielded metal arc welding"
SSMET	→	Soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular
$t_{8/3}$	→	Tempo de resfriamento entre 800 e 300 °C
$t_{8/5}$	→	Tempo de resfriamento entre 800 e 500 °C
t_b	→	Tempo de base

t_{cc}	→	Duração dos curtos-circuitos
Ti	→	Titânio
TIG	→	"Tungsten inert gas"
TMCP	→	"Thermo-mechanical control process"
t_p	→	Tempo de pulso
Trad.	→	Tradução
U	→	Tensão
U_b	→	Tensão de base
U_o	→	Tensão em vazio
U_p	→	Tensão de pulso
V	→	Volt
Va	→	Velocidade de alimentação do arame-eletrodo
Vs	→	Velocidade de soldagem
ZAC	→	Zona afetada pelo calor

RESUMO

Apresentam-se diversos aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular. O estudo foi realizado sob uma lâmina d'água de 10 cm, num banco de ensaios completamente automatizado, baseando-se em análises metalográficas e, principalmente, em oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de avanço do arame. Sob o ponto de vista operacional, procura-se identificar as causas básicas de interrupção do processo e da instabilidade do arco voltaico, além de estudar alternativas e propor soluções para as mesmas. Dentre as alternativas pesquisadas estão: aumento do diâmetro do eletrodo; injeção de gás sob pressão entre o bico de contato e o arame para expulsar a água da região de contato elétrico; aumento da aceleração do arame na abertura do arco; mapeamento de uma faixa de trabalho adequada das variáveis e parâmetros do processo; e emprego de corrente pulsada. Quanto aos aspectos metalúrgicos, apresentam-se resultados de macro e microdureza, análises metalográficas, e um estudo da influência das variáveis/parâmetros sobre o surgimento de defeitos, especialmente porosidades, através de ensaios radiográficos. Finalmente, com o objetivo de avaliar a qualidade final das juntas obtidas, realizaram-se ensaios mecânicos em corpos de prova retirados de juntas soldadas em condições próximas da real. Os resultados dos ensaios de dobramento foram aquém do esperado. Entretanto, os ensaios de tração e Charpy a 0 °C apresentaram resultados muito bons, devido ao efeito de refino do metal de solda, produzido pelos passes subsequentes, atuando sobre cordões que tiveram parte do seu reforço removido por esmerilhamento.

ABSTRACT

Some operational and metalurgical aspects of underwater wet welding are presented. Tests were done under a 10 cm water level using a completely automated control and data acquisition system. The current, voltage and electrode feed velocity behaviour were analyzed, as well as the resultant macro and microstructures. From the operational point of view, two major causes for the process interruptions and arc instability were identified, along with the study of alternatives of solutions for those problems. Among the alternatives studied were: increment of electrode diameter, gas injection under pressure between the contact tip and the electrode in order to keep away water from the electric contact region, the electrode acceleration rising during the arc ignition, map of the variables / parameters work regions, and the use of pulsed current. Relative to the metalurgical aspects, results of macro and micro hardness, metalographical analysis and study of the influence of the variables/parameters over the discontinuities (particularly porosities) through radiographic tests are presented. Mechanical tests in coupons extracted from welded joints simulating near real conditions were done in order to evaluate the quality of the welds obtained. Finally, it was found that the tensile and Charpy impact results were very good, (in contrast to the bending ones), and it seems to be due to the refining effect produced by the successive thermal cycles imposed by subsequent weld layers over the bead partially removed by grinding.

INTRODUÇÃO

Atualmente cerca de 60% do petróleo produzido no Brasil é proveniente de poços localizados no mar. Isto se deve principalmente ao fato de que a PETROBRÁS vem realizando importantes descobertas de campos petrolíferos situados em águas profundas da Bacia de Campos e em águas rasas da Bacia de Santos [1, 2]. Dentre estes campos, destacam-se: Albacora, em 1984 (poço RJS -305, a 437 m de lâmina d'água - LDA); Marlim, em 1985 (poço RJS-219, a 853 m de LDA); e Sul de Marlim, em 1987 (poço RJS-382, a 1120 m de LDA). Estes campos estão localizados a cerca de 110 km da costa, em profundidades que variam de 300 a 2030 m [3]. Tais descobertas, aliadas ao declínio da produção de muitos poços terrestres, indicam que o percentual de petróleo proveniente do mar deverá aumentar ainda mais nos próximos anos. Portanto, é importante que se disponha de técnicas de montagem e reparo expeditas e confiáveis para garantir a continuidade operacional e a redução dos custos de manutenção "offshore" das estruturas e dutos submersos [1]. Uma destas técnicas é a soldagem submarina, que pode ser: a seco (também chamada hiperbárica); molhada; e a 1 atm.

A pressão hidrostática e a presença de água são os fatores que mais dificultam a realização da soldagem e deterioram as propriedades das soldas submarinas. A cada 10 m de profundidade a pressão hidrostática aumenta em 1 bar, influenciando as reações pirometalúrgicas que ocorrem na poça de fusão da solda. Tais reações irão determinar a composição química e a microestrutura do metal de solda, bem como influenciar as características do arco elétrico. No caso da soldagem molhada, adicionalmente tem-se a influência da dissociação da água no arco elétrico, que faz com que grandes quantidades de hidrogênio e oxigênio sejam dissolvidos no metal de solda fundido, promovendo a formação de poros e aumentando os riscos de trincas a frio induzidas pelo hidrogênio. Outro aspecto relevante, inerente à soldagem molhada, é o acentuado aumento da velocidade de resfriamento devido ao contato direto com a água. Isto favorece bastante a formação, na ZAC, de microestruturas do tipo martensítica, que são muito suscetíveis à fissuração a frio. Como resultado, as soldas subaquáticas molhadas tendem a possuir propriedades mecânicas inferiores, especialmente a ductilidade, comparadas às realizadas em ambiente seco. Mas, devido ao alto custo e, em alguns casos, devido à inviabilidade prática de instalar dispositivos para soldas hiperbáricas secas, a soldagem molhada torna-se uma excelente alternativa [1].

No Brasil, até o presente momento, tem-se utilizado nas soldas molhadas o eletrodo revestido, que tem demonstrado ser uma opção para diversas aplicações a pequenas profundidades. Entretanto,

este processo apresenta baixa produtividade, especialmente para profundidades superiores a 20 m. Por isso, o eletrodo tubular surge como uma promissora alternativa para as mesmas condições, devido às suas características de elevada produtividade e maior conforto ao soldador [4]. A maior produtividade se deve principalmente à maior densidade de corrente, típica dos processos de alimentação contínua do eletrodo. Já o maior conforto ao soldador é propiciado pelas menores interrupções do processo, pois não existe a necessidade de se trocar eletrodos [5, 6]. Estas características são particularmente importantes nas soldas acima de 20 m, uma vez que, nestas condições reduz-se muito o tempo de mergulho e, conseqüentemente, eleva-se muito o custo nas intervenções para reparos navais, de dutos, plataformas e outras estruturas "offshore".

Um outro aspecto favorável ao eletrodo tubular é que o mesmo é um processo totalmente automatizável, o que é muito importante levando-se em consideração que a tendência é que se explore águas cada vez mais profundas. Nestas condições, a aplicação do eletrodo revestido torna-se crítica devido à grande dificuldade, chegando até a inviabilidade, de se ter soldadores trabalhando em águas muito profundas [1].

II

OBJETIVO E JUSTIFICATIVAS

2.1 - Objetivo

Estudar a soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular para identificação dos problemas de ordem operacional e metalúrgica, propondo soluções para os mesmos. As pesquisas aqui descritas fazem parte de um projeto maior, desenvolvido pelo LABSOLDA/UFSC em parceria com o CENPES/PETROBRÁS, que tem por finalidade viabilizar a aplicação prática deste processo, ou seja, utilizá-lo em condições reais de operação.

2.2 - Justificativas

Das três técnicas de soldagem subaquática, a que propicia melhor qualidade de solda é a soldagem a 1 atm. Qualidade de solda aqui significa aspecto visual do cordão (geometria e acabamento), além da resistência mecânica. A razão disto é que a soldagem a 1 atm é realizada em condições de pressão e atmosfera de proteção exatamente iguais às soldas feitas na superfície. Este ambiente é obtido através da instalação de uma câmara hermética no local de trabalho. Após a instalação e vedação, retira-se a água do interior da câmara e injeta-se gás até alcançar a pressão de 1 atm, que é a pressão que se tem na superfície, ao nível do mar. As grandes desvantagens, responsáveis pelo uso limitado desta técnica, são o altíssimo custo e o enorme tempo de preparação.

A segunda técnica em qualidade de solda é a soldagem hiperbárica, ou a seco. Neste caso, a água é expulsa do local de trabalho através da injeção de gás no topo de uma câmara de fundo aberto. Logo, a pressão é dependente da profundidade e aumenta em aproximadamente 1 atm a cada 10 m. Este aumento de pressão é o responsável pelo desempenho inferior deste processo em relação à soldagem a 1 atm. Mesmo assim, a qualidade de solda desta técnica operacional é considerada boa, o que faz com que a mesma seja muito utilizada. Apesar do seu custo ser inferior à soldagem a 1 atm, a soldagem hiperbárica ainda apresenta um alto custo e um longo tempo de preparação em relação à soldagem molhada.

Devido ao elevadíssimo custo das intervenções subaquáticas, a maior economia de tempo e dinheiro propiciada pela soldagem molhada torna-se bastante atraente. Tal fato tem provocado um

significativo aumento de pesquisa e desenvolvimento desta técnica a nível mundial, procurando melhorar a sua qualidade de solda, que é apenas regular.

Dentro da soldagem molhada o processo que mais tem sido utilizado é o eletrodo revestido. Entretanto, devido a sua baixa produtividade, o eletrodo tubular tende a ocupar a posição de principal processo em soldagens molhadas. Uma outra grande vantagem do eletrodo tubular é que este processo é automatizável, podendo ser aplicado a profundidades cada vez maiores, à medida que os problemas de qualidade da solda molhada sejam resolvidos. Já com o eletrodo revestido ocorre justamente o contrário, pois com o aumento da profundidade diminui muito o tempo de mergulho, sem falar que existe uma profundidade limite para o trabalho de mergulhadores, mesmo com saturação.

Baseando-se em todos estes fatos, elaborou-se a figura 1 que resume a tendência mundial na escolha da técnica e do processo empregados em soldagens subaquáticas. Percebe-se que a tendência é que se consiga soldar em águas cada vez mais profundas; que a soldagem molhada aumente a sua faixa de aplicação e que, dentro desta, o eletrodo tubular ocupe a posição de destaque (primeiro processo a ser citado na figura).

Acredita-se que há muito o que fazer para contribuir com o desenvolvimento da soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular em nosso país, pois não existem equipamentos, consumíveis e procedimentos específicos para esta técnica. Para tanto, ao invés de simplesmente importar (materiais e serviços), é importante que se comece a desenvolver trabalhos na área para evitar a contínua dependência externa.

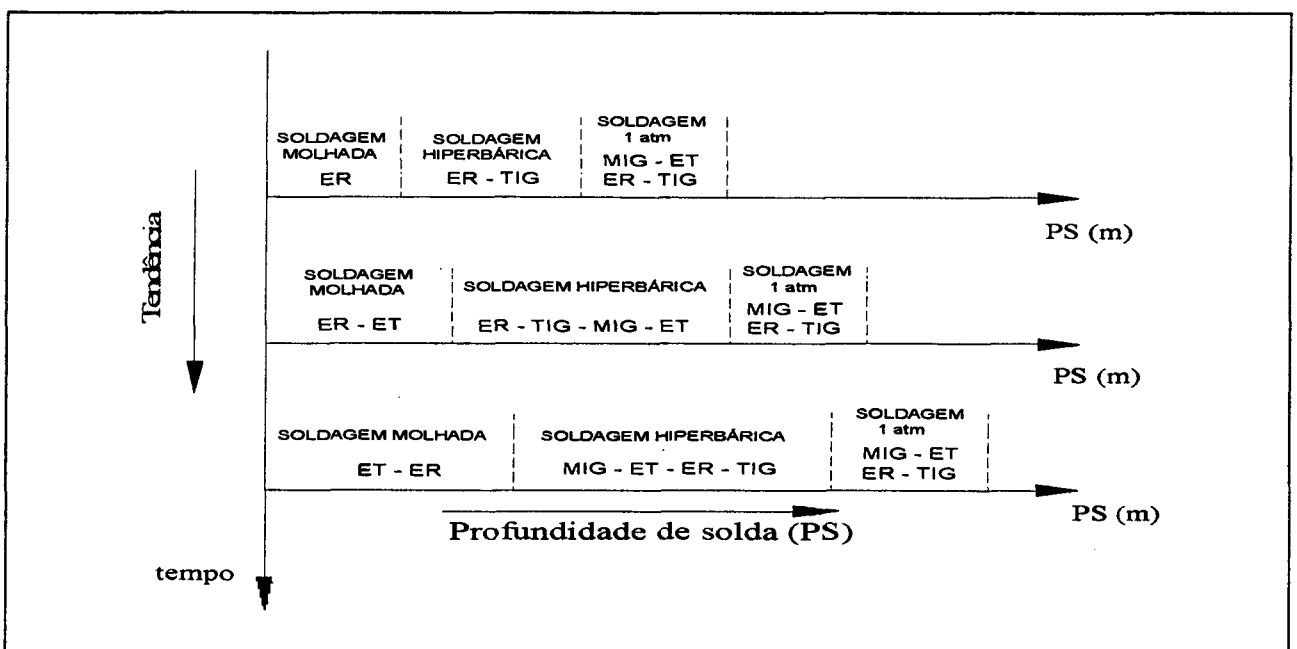


Figura 01 - Tendência mundial na determinação da técnica e do processo empregados na soldagem subaquática.

III

SOLDAGEM SUBAQUÁTICA

3.1 - Histórico

Dificuldades associadas à soldagem subaquática, especialmente aquelas com eletrodo revestido na condição molhada, começaram a ser experimentadas na década de 10. Desde então, a grande maioria das aplicações das técnicas de soldagem subaquática tem sido relacionadas com reparo e construção de plataformas oceânicas e tubulações subaquáticas. Portanto, as atividades de soldagem subaquática (pesquisa e desenvolvimento e as atuais aplicações) estão estritamente relacionadas com as atividades oceânicas de extração de petróleo. Em 1962 existiam apenas 62 equipamentos perfurando poços de petróleo no mundo, mas este número aumentou para 470 em 1978, conforme Masubuchi, Gaudiano e Reynolds apud [7].

Este drástico aumento das atividades de extração de petróleo no mar foi devido ao significativo aumento do preço do petróleo, causado pelo embargo das nações integrantes da OPEP, na década de 70. Entretanto, no final de 1984, o preço do petróleo caiu consideravelmente, resultando num decréscimo a nível mundial da exploração oceânica de petróleo, reduzindo também as atividades de P&D em soldagem subaquática durante os últimos anos.

O Brasil não seguiu esta tendência porque foi justamente na década de 80 que a PETROBRÁS intensificou a pesquisa e exploração de petróleo no mar, descobrindo importantes reservas na Bacia de Campos [2, 3], e tornando-se líder mundial na tecnologia de extração de petróleo em águas profundas.

A natureza e a extensão das atividades de soldagem subaquática podem ser avaliadas desde o seu surgimento até os dias atuais, através das publicações e atividades das sociedades profissionais e outras organizações. Os três sub-itens a seguir foram baseados no artigo de Koichi Masubuchi [7], segundo o qual o histórico da soldagem subaquática pode ser dividido em três fases distintas:

3.1.1 - 1910 a 1959: Nascimento da Tecnologia da Soldagem Subaquática e Seu Pequeno Crescimento

As atividades de pesquisa e desenvolvimento em soldagem subaquática foram realizadas por um pequeno grupo de pessoas. Por exemplo, uma revisão bibliográfica realizada no MIT por C. L. Tsai

et al. identificou apenas dez artigos de soldagem subaquática publicados entre 1933 e 1959 (uma média de 0,37 artigos por ano).

Eletrodos com arames nus, sem revestimento, cobertos com verniz para proteção contra a água foram utilizados durante a I Guerra Mundial, segundo Tsai e Masubuchi *apud* [7]. Tais soldagens foram utilizadas na recuperação de navios da marinha britânica que se encontravam avariados [8]. Em 1946, Van der Willigan desenvolveu eletrodos revestidos com proteção contra água, segundo Silva e Hazlett *apud* [7]. Durante os 15 anos seguintes alguns pesquisadores realizaram esforços adicionais para melhorar a qualidade das soldas subaquáticas. A técnica utilizada era principalmente a soldagem molhada usando eletrodo revestido, embora a soldagem subaquática de prisioneiros ("stud welding") tenha sido realizada em 1946, segundo J. Jenkins e C. J. von Alt *apud* [7]. Estas técnicas foram utilizadas somente para reparos temporários de navios e estruturas marítimas, e em operações de salvamento. A soldagem subaquática de tubulações em ambiente seco iniciou-se em 1954, patenteada por Osborn. Ele desenvolveu o projeto de um recipiente subaquático que foi o precursor das câmaras de soldagem empregadas atualmente.

3.1.2 - 1960 a 1983: Rápida Expansão

Um significativo aumento no interesse pela soldagem subaquática iniciou-se por volta de 1960, principalmente para atender as necessidades da indústria petrolífera "offshore". Por exemplo, em 1965 diversas companhias que estavam envolvidas em manutenção de equipamentos no mar e atividades afins construíram vários tipos de habitáculos para soldagem subaquática, com os quais realizaram reparos em plataformas e tubulações oceânicas, segundo Masubuchi, Gaudiano e Reynolds *apud* [7]. A revisão bibliográfica do MIT, mencionada anteriormente, identificou 53 artigos publicados entre 1960 e 1969 (uma média de 5,3 artigos por ano), e 119 artigos publicados entre 1970 e 1976 (uma média de 17 artigos por ano). A maioria destas publicações foram geradas nos Estados Unidos, Reino Unido e na extinta União Soviética. A revisão inclui também 20 artigos do Japão.

Em 1974, A. J. Brown et al. *apud* [7] realizaram, através do "MIT Sea Grant Program", um amplo relatório sobre pesquisa básica em soldagem que, segundo Masubuchi, foi o primeiro extenso documento sobre soldagem subaquática publicado nos Estados Unidos. Também em 1974, a AWS - "American Welding Society" criou o subcomitê D3b - Soldagem Subaquática, vinculado ao Comitê D3 - Soldagem em Construções Marítimas, que existiu por muitos anos. A principal tarefa deste subcomitê, consistiu na elaboração da especificação para soldagem subaquática da AWS, que foi publicada em 1983 [9]. De acordo com [7] esta foi a primeira especificação sobre soldagem subaquática. O "Welding Research Council" publicou em 1977 um explicativo relatório sobre

soldagem subaquática, "WRC Bulletin 224" apud [7], que foi o primeiro amplo relatório sobre soldagem subaquática largamente divulgado. Ainda segundo [7], em 1980 a AWS realizou uma conferência sobre soldagem subaquática de plataformas e tubulações marítimas, cujos anais possuem 14 artigos.

O IIW - "International Institute of Welding" estabeleceu em 1977 o Comitê de Soldagem Subaquática. Em 1983, o IIW realizou uma conferência internacional sobre soldagem subaquática durante sua assembléia anual em Trondheim, Noruega. Os anais desta conferência, que possuem 33 artigos de diversos países, oferecem uma boa idéia do progresso da soldagem subaquática nas principais nações industrializadas do mundo, naquela época.

O jornal da Sociedade Japonesa de Soldagem (JWS) publica a cada ano um amplo resumo da soldagem no Japão, utilizando informações presentes em artigos técnicos publicados no ano anterior. Tal resumo em 1983 pela primeira vez incluiu uma seção de soldagem subaquática citando 11 artigos publicados em 1982.

3.1.3 - 1984 ao Presente: Maturidade, mas Tecnologia Crescendo Lentamente

Segundo Masubuchi, a tecnologia da soldagem subaquática alcançou um estágio de maturidade, mas foi afetada com o pequeno decréscimo das atividades oceânicas de extração de petróleo. Por exemplo, uma recente pesquisa bibliográfica realizada no MIT levantou 41 artigos durante um período de 4 anos, de 1984 a 1987 (uma média de 10,3 artigos por ano), Hirono apud [7]. O jornal da JWS contém um total de 33 artigos sobre soldagem subaquática em 5 resumos anuais publicados entre 1984 a 1988 (uma média de 6,6 artigos por ano).

3.2 - Classificação

As operações de soldagem subaquática podem ser classificadas de duas formas: segundo a técnica operacional empregada, e segundo o processo de soldagem utilizado. O nível de qualidade das soldas obtidas pode ser classificado baseando-se no aspecto visual, defeitos e propriedades mecânicas do cordão. A tabela 1 apresenta uma visão geral desta classificação:

3.2.1 - Quanto à Técnica Operacional Empregada

Diversas técnicas de soldagem subaquática têm sido propostas e empregadas. Entretanto, à medida que a profundidade aumenta, poucas técnicas tornam-se aplicáveis. A classificação de tais

técnicas depende do ambiente no qual a operação de soldagem é realizada: molhado ou seco; com pressão dependente da profundidade ou não; e em ambiente pequeno ou grande. Devido a este grande número de variáveis, surgiram duas diferentes classificações: divisão clássica e divisão da AWS.

CLASSIFICAÇÃO SOLDAGEM SUBAQUÁTICA	QUANTO À TÉCNICA OPERACIONAL EMPREGADA	DIVISÃO CLÁSSICA	* SOLDAGEM A 1 ATM * SOLDAGEM HIPERBÁRICA * SOLDAGEM MOLHADA
		DIVISÃO DA AWS	* SOLDAGEM A 1 ATM * SOLDAGEM EM HABITAT * SOLDAGEM EM CÂMARA SECA * SOLDAGEM SECA TIPO SPOT * SOLDAGEM MOLHADA
	QUANTO AO PROCESSO EMPREGADO	* ELETRODO REVESTIDO (ER) * TIG * MIG/MAG * ELETRODO TUBULAR (ET) * PLASMA * OUTROS	
	QUANTO À QUALIDADE DE SOLDA OBTIDA	* TIPO "A" * TIPO "B" * TIPO "C" * TIPO "O"	

Tabela 01 - Classificação da soldagem subaquática.

3.2.1.1 - Divisão Clássica

É adotada pela maioria dos autores e subdivide a soldagem subaquática em três técnicas: soldagem a uma atmosfera, soldagem hiperbárica e soldagem molhada. Tem-se a seguir a explanação destas três técnicas, conforme o artigo de Nixon e Billingham [8].

a) Soldagem a uma atmosfera

A técnica de soldagem a uma atmosfera é baseada na hipótese óbvia de que se as condições ambientais do local de reparo forem idênticas às da superfície, as diversas técnicas de soldagem utilizadas para construir a estrutura em terra firme podem também ser utilizadas para repará-la na condição subaquática. Portanto, o local de trabalho fica no interior de uma câmara capaz de resistir à pressão hidrostática da lâmina d'água em questão (figura 2).

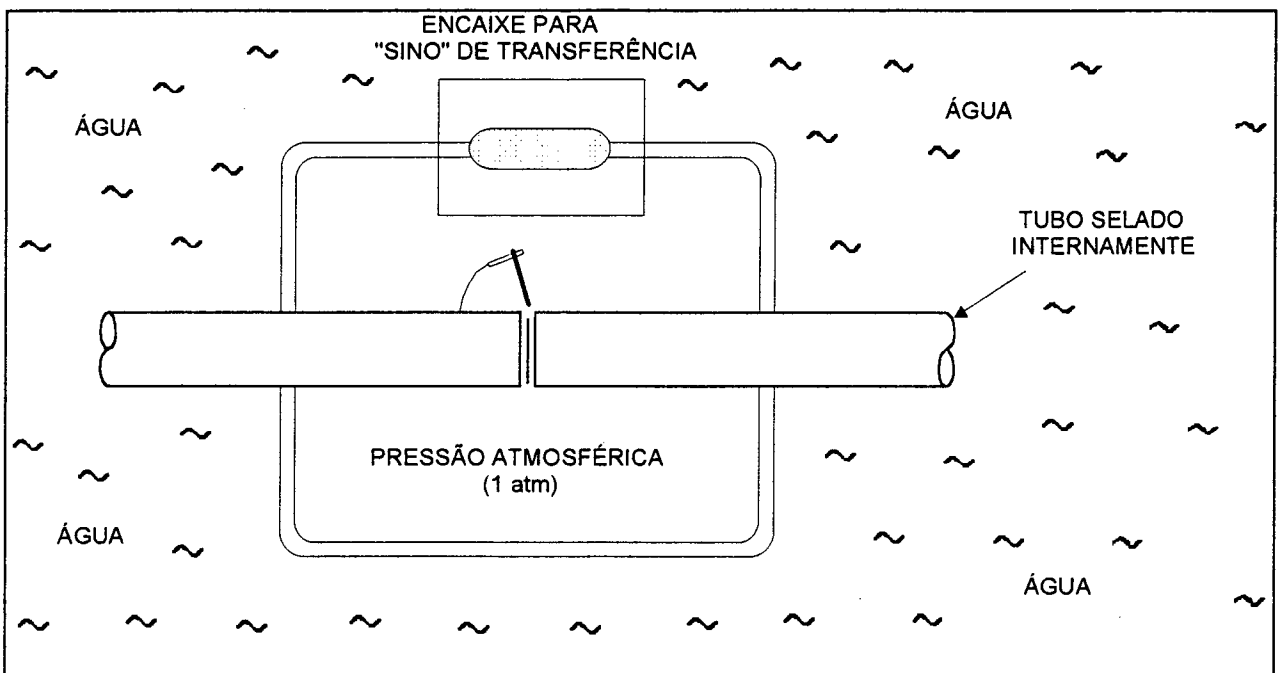


Figura 02 - Técnica da soldagem subaquática a 1 (um) atmosfera [8].

Uma vez que esta câmara é posicionada e selada, a água é retirada e a pressão interna é reduzida a 1 bar (1 atm). Tal câmara é equipada com uma escotilha especial que possibilita o acoplamento do vaso em forma de sino, possibilitando os mergulhadores-soldadores entrarem no local de trabalho. Como pode ser imaginado, são grandes os problemas para selar apropriadamente a câmara devido à pressão externa da água, especialmente para grandes profundidades. Portanto, para altas pressões, esta técnica tem sido utilizada operacionalmente somente quando dispositivos especiais podem ser empregados na junção. Exemplos de sua utilização: quando duas tubulações em direções opostas são unidas para formar uma única linha, ou quando uma tubulação é acoplada a uma estrutura "offshore".

A soldagem a uma atmosfera é uma técnica extremamente cara, mas tem a grande vantagem de que a profundidade de operação e o fato de ser realizada embaixo d'água não exercem qualquer

influência sobre o processo de soldagem. Portanto, à medida que a profundidade de trabalho aumenta, esta técnica torna-se mais atrativa. Até o presente momento, trabalhos de engenharia em larga escala não têm sido tentados a profundidades inacessíveis para mergulhadores, logo é natural que os esforços de desenvolvimento tecnológico têm sido concentrados nas técnicas de mergulho. A exploração de grandes campos petrolíferos, em profundidades que excedam a milhares de metros, será requerida no futuro, o que poderá tornar a soldagem a uma atmosfera uma das melhores opções dentre as técnicas operacionais existentes.

b) Soldagem hiperbárica

A soldagem hiperbárica é uma técnica de soldagem subaquática a seco, como a soldagem a uma atmosfera. O local de trabalho é também protegido por uma câmara, só que esta é relativamente leve, simples e de construção barata, além de ser aberta no fundo. A água é removida do interior da câmara através da injeção de gás no topo da mesma, até que a região de trabalho fique exposta, a seco (figura 3). Através de considerações hidrostáticas sabe-se que as pressões do gás e da água são quase idênticas na interface entre os dois fluidos, logo a pressão no interior da câmara é ligeiramente superior à externa, por poucos décimos de bar. Tais diferenças de pressão podem facilmente ser contidas por uma estrutura fina de aço, e a estanqueidade pode ser conseguida com uma selagem simples utilizando borracha.

Atualmente as soldas subaquáticas de melhor qualidade são realizadas através da técnica hiperbárica, já que a mesma não apresenta todos os problemas metalúrgicos da solda molhada, nem é tão complexa sob o ponto de vista de engenharia como a soldagem a uma atmosfera. As câmaras de soldagem podem variar enormemente em tamanho e forma, desde unidades portáteis não superiores a um pequeno balde, no interior da qual o soldador coloca apenas uma mão, até complexos sistemas de 10 metros de altura, que abrigam muitos soldadores. Entretanto, o princípio de operação de tais vasos é essencialmente o mesmo.

Enquanto tais câmaras representam uma boa escolha sob o ponto de vista operacional, um fator complica a sua utilização: as mesmas operam numa pressão dependente da profundidade do local de trabalho, o que pode afetar as características físicas, químicas e térmicas de quaisquer processos de soldagem utilizados. Portanto, é necessário investigar os efeitos da pressão sobre os vários processos de soldagem empregados e sobre a qualidade das soldas produzidas. Realizar tais pesquisas em condições reais de operação (isto é, embaixo d'água), é completamente inviável devido ao elevadíssimo custo das operações subaquáticas. Logo, estes estudos são realizados em centros hiperbáricos que possuem câmaras especiais onde é possível simular essas condições reais de operação [10, 11].

Cumprе lembrar que, através de um projeto de pesquisa desenvolvido em parceria entre o LABSOLDA/UFSC e o CENPES/PETROBRÁS, o CENPES repassou ao LABSOLDA um simulador de soldagem hiperbárica para pressões de até 50 bar [12].

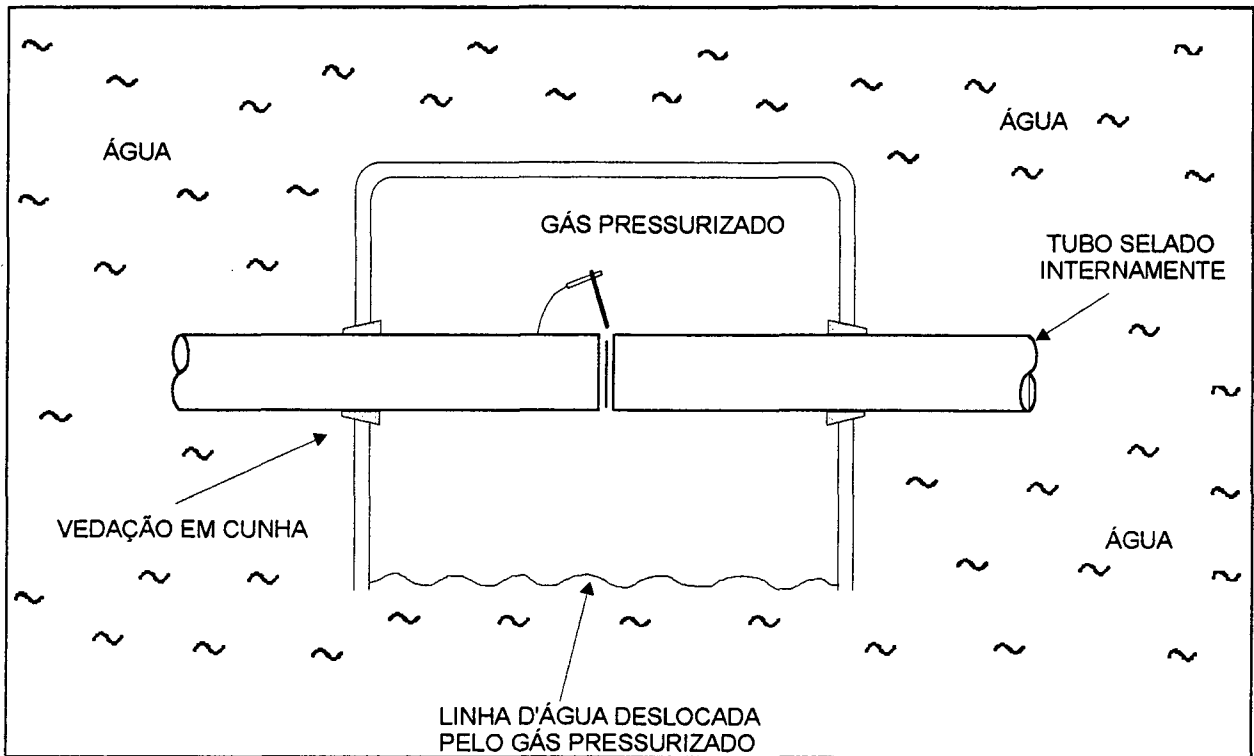


Figura 03 - Técnica da soldagem subaquática hiperbárica [8].

c) Soldagem molhada

Na soldagem molhada, como o próprio nome sugere, o arco voltaico fica em contato direto com a água (figura 4). Esta foi a primeira técnica operacional a ser utilizada, e é a mais simples, barata e rápida de se realizar de todas as técnicas atualmente existentes. Infelizmente, os tipos de aços utilizados nas construções de instalações marítimas não são especialmente adequados para serem soldados por este processo. Suas propriedades mecânicas são afetadas pelas altas taxas de resfriamento inerentes a esta técnica, já que a água que envolve o arco produz um forte resfriamento do cordão imediatamente após a soldagem. Resfriamentos rápidos provocam o surgimento de regiões duras próximas à solda que podem romper de uma forma frágil e, portanto, perigosa.

O arco voltaico permanece em contato direto com a água, o que faz com que parte desta seja dissociada pelo calor do arco, gerando hidrogênio. Este hidrogênio pode difundir-se dentro do metal

que está sendo fundido, e desta forma vir a fragilizar o material. A combinação dos efeitos do hidrogênio e de altas taxas de resfriamento nos aços comumente utilizados nas estruturas "offshore" cria condições nas quais podem ocorrer trincas, tornando as soldas inadequadas às especificações de projeto, já que a integridade estrutural da instalação é afetada.

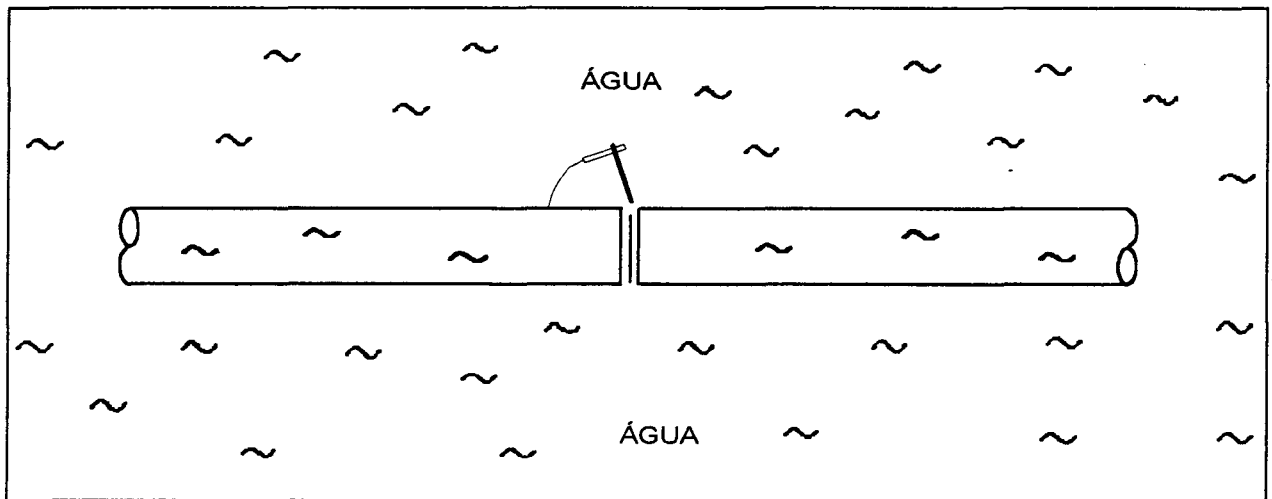


Figura 04 - Técnica da soldagem subaquática molhada [8].

Embora os desenvolvimentos recentes de eletrodos [13, 14, 15] tenham melhorado expressivamente a qualidade das soldas molhadas, os mesmos ainda não alcançaram os níveis requeridos de propriedades mecânicas para as juntas críticas de estruturas "offshore", segundo [16]. Entretanto, esta técnica já é bastante empregada em juntas não críticas. Um outro fato importante é que no Paton Welding Institute já se obteve juntas soldadas na condição subaquática molhada que podem ser utilizadas em aplicações cujas tensões de projeto são comparáveis às dos respectivos elementos acima d'água [17]. Isto significa que esta técnica também pode ser empregada para juntas críticas.

3.2.1.2 - Divisão da AWS

De acordo com a AWS [9], as técnicas de soldagem subaquática normalmente empregadas são classificadas em cinco métodos básicos, descritos a seguir:

a) Soldagem a uma atmosfera

Soldagem num vaso de pressão no qual a pressão é reduzida a aproximadamente uma atmosfera, independentemente da profundidade do local de trabalho.

b) Soldagem em habitat

A soldagem é realizada no interior de uma grande câmara, de onde a água é retirada. A pressão no local de trabalho depende da profundidade e a atmosfera da câmara permite que o soldador/mergulhador trabalhe sem equipamento de mergulho.

c) Soldagem em câmara seca

A soldagem é realizada numa simples câmara seca de fundo aberto que acomoda, no mínimo, a cabeça e os ombros do soldador/mergulhador, que necessita de um equipamento de mergulho completo. A pressão é dependente da profundidade.

d) Soldagem seca em câmara tipo spot

A soldagem é realizada em um pequeno recipiente transparente preenchido com gás, sendo que o soldador/mergulhador permanece na água, do lado de fora do mesmo. A pressão dentro do recipiente é dependente da profundidade.

e) Soldagem molhada

A soldagem é realizada sem qualquer barreira física entre a água e o arco voltaico. Logo, o soldador-mergulhador também fica dentro d'água, e a pressão é dependente da profundidade. A PETROBRÁS faz uma distinção entre a soldagem molhada e a soldagem molhada com cortina gasosa [18, 19], sendo que nesta o arco elétrico é protegido por uma cortina gasosa ou aquosa.

Segundo a AWS, não existe uma distinção precisa entre estes cinco métodos, já que são utilizados níveis intermediários de proteção da solda e do soldador contra a água.

Comparando-se estas duas classificações percebe-se que a AWS subdividiu a técnica de soldagem hiperbárica (item b de 3.2.1.1) nos itens b, c e d acima descritos, diferenciando-os apenas pelo tamanho da câmara empregada.

3.2.2 - Quanto ao Processo de Soldagem Empregado

Cinco diferentes processos de soldagem são utilizados para montagens e reparos subaquáticos: eletrodo revestido (SMAW); TIG (GTAW); MIG/MAG (GMAW); eletrodo tubular (FCAW) e plasma (PAW). O mais conhecido de todos os processos de soldagem, soldagem oxi-acetilênica, não é empregado em soldagens subaquáticas. Isto é devido as propriedades físicas do acetileno, que se torna instável e potencialmente explosivo quando comprimido. Para armazená-lo em cilindros, deve-se dissolvê-lo em acetona e empregar reguladores de pressão especiais para prever os riscos de explosão. Para profundidades superiores a 10 metros, o uso de acetileno torna-se inaceitável [8].

3.2.2.1 - Soldagem com Eletrodo Revestido

A soldagem com eletrodo revestido é um processo familiar para a maioria das pessoas, pois pode ser realizada com um simples transformador e um alicate de solda. Nixon e Billingham [8] afirmam que na condição hiperbárica a tensão do arco desse processo não aumenta muito, pois o fluxo que compõe o revestimento contém materiais de fácil ionização que aumentam a condutividade do arco. Por outro lado, segundo Swetnam e Pandey *apud* [8], soldando-se com polaridade positiva em condições hiperbáricas, percebe-se um significativo aumento do consumo do eletrodo com o aumento da pressão de trabalho. Não porque a quantidade total de energia disponível aumente, mas porque ocorre uma redistribuição da energia entre o eletrodo e a peça de trabalho, que é interpretada pelos soldadores como um aumento da fluidez da poça metálica. Isto faz com que soldagens em qualquer outra posição que não a plana sejam bastante difíceis e só possam ser realizadas mediante a redução do tamanho da poça metálica. Este fato, infelizmente, pode aumentar a velocidade de resfriamento, provocando o surgimento de zonas duras próximas à solda, parecidas com as da solda molhada, embora não tão severas [8].

Além disso, a pressão pode causar mudanças de composição química no material depositado. Alguns eletrodos revestidos protegem a poça de fusão através da ação de carbonetos presentes no

material do fluxo (revestimento). Sobre a ação do arco voltaico, tais carbonetos são dissociados e formam monóxido e dióxido de carbono, produtos gasosos que protegem a poça de fusão da contaminação atmosférica. A termodinâmica das reações químicas prevê que sob condições de aumento de pressão o ponto de equilíbrio destas reações poderia mover-se, deixando de gerar tais produtos gasosos. O resultado disto é o aumento do percentual de carbono do metal de solda depositado, Allum *apud* [8]. Sob o ponto de vista metalúrgico, tal fato é indesejável pois aumenta a sensibilidade da junta soldada à velocidade de resfriamento e ao hidrogênio, gerando outros problemas.

Se os eletrodos revestidos são expostos à umidade por um certo período de tempo, esta é absorvida pelo revestimento e é transferida para a atmosfera do arco voltaico, quando o eletrodo é utilizado, aumentando muito o percentual de hidrogênio na junta soldada.

Para evitar tal problema, na soldagem molhada os eletrodos recebem uma camada de verniz para protegê-los da água. Já na soldagem hiperbárica, os mesmos são secados em estufas e transportados em recipientes herméticos para a câmara de soldagem, onde ainda são guardados em ambientes aquecidos. Caso os mesmos não sejam utilizados durante um período especificado de tempo, tais eletrodos retornam à superfície para ressecagem ou descarte [8].

3.2.2.2 - Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG é bastante utilizado na condição subaquática seca, ou seja, nas técnicas de soldagem a 1 atm e, principalmente, hiperbárica.

A tocha inclui um bocal através do qual passa gás que protegerá o arco voltaico e a poça metálica contra a contaminação da atmosfera da câmara, em soldagens hiperbáricas. Além da tocha, o soldador segura uma vareta de material de adição em sua outra mão e manipulando adequadamente as duas, pode ter um grande controle sobre a forma e tamanho do cordão de solda em qualquer posição [20]. Em terra, a soldagem TIG é utilizada para muitas aplicações de precisão, onde este alto nível de controle é obtido devido à baixa taxa com que o metal é depositado.

Allum afirma em sua tese de doutorado *apud* [8] que, à medida que a pressão do ambiente aumenta, a tensão do arco aumenta de acordo com a seguinte relação:

$$V_p = V_f + E_o \sqrt{pL} \quad (1)$$

onde V_p é a tensão do arco; V_f é uma tensão independente da pressão e é associada com a energia requerida para transferir os elétrons do eletrodo para a peça de trabalho, estabelecendo o arco voltaico. Seu valor está entre 8 e 9 Volts; E_o é a intensidade do campo elétrico do arco TIG a uma atmosfera, fator dependente da composição do gás de proteção, (por exemplo, é aproximadamente de 0,8 Volts/mm para o Hélio); L é o comprimento do arco, isto é, a distância entre o eletrodo e a peça de trabalho, e p é a pressão absoluta em bar.

Tal aumento da tensão pode ser atribuído às mudanças que ocorrem no ambiente do arco. A elevadas pressões, maior quantidade de moléculas de gás estão presentes na região do arco, e uma parte destas deverá obrigatoriamente ser ionizada para possibilitar que a corrente passe através do arco. Além disso, uma atmosfera densa favorece a perda de calor através da superfície externa do arco, reduzindo o diâmetro efetivo da passagem de corrente. Elevada pressão também reduz a estabilidade do arco, embora este não seja o maior problema nas atuais profundidades de operação [8].

Alguns defensores do TIG hiperbárico, como Nixon e Billingham, afirmam que se a eficiência do processo TIG for medida, pode-se perceber que enquanto esta decresce do nível do mar (1 bar) para profundidades de aproximadamente 8 bar, após este valor a eficiência permanece aproximadamente constante, Allum *apud* [8]. Como a tensão do arco está aumentando, o calor gerado pelo processo na poça de fusão e, conseqüentemente, a facilidade do processo de fundir o metal de adição, também aumenta com a profundidade. Desta forma, a profundidades de 200 metros ou mais, a técnica TIG pode depositar material tão rápido quanto qualquer outra técnica de soldagem hiperbárica, e isto tem proporcionado um aumento de sua utilização nestas condições [8].

3.2.2.3 - Soldagem MIG/MAG

É fato conhecido que a soldagem MIG/MAG é mais produtiva que o eletrodo revestido. Isto porque, segundo Nixon e Billingham, na soldagem MIG/MAG o arame-eletrodo é alimentado continuamente. O arco é estabelecido entre o final deste eletrodo e a peça de trabalho, de forma que ambos fundem simultaneamente. Como o eletrodo é contínuo, ao contrário do eletrodo revestido que é relativamente curto, é possível ter longos períodos de arco aberto, sem perda de tempo trocando eletrodos. Esta mesma justificativa é apresentada em [21]. Sabe-se, entretanto, que esta não é a principal causa da maior produtividade do MIG/MAG em relação ao eletrodo revestido (ER). Almir Quites e Jair Dutra afirmam em [22] que a maior densidade de corrente, até 300 A/mm², dos processos de alimentação contínua é quem determina a maior produtividade destes processos em relação ao ER.

A soldagem MIG/MAG, na sua forma padrão, inicialmente não teve sucesso em aplicações hiperbáricas. Originalmente desenvolvido como um processo para soldagem de chapas relativamente finas, não foi possível realizar soldas de qualidade aceitável nos aços de grande espessura, utilizados nas estruturas marítimas. Além disso, as altas taxas de resfriamento causadas pela densa atmosfera da câmara hiperbárica tornou a situação ainda pior [8].

Somente por volta de 1985 estas dificuldades foram superadas e o processo MIG/MAG tornou-se interessante para aplicações hiperbáricas. Isto porque este processo de soldagem tem sofrido enormes avanços tecnológicos à pressão ambiente, baseados na aplicação de fontes de soldagem transistorizadas controladas eletronicamente. Tal fato tem possibilitado controlar, de forma muito eficiente, a transferência metálica através do arco, além da fusão do eletrodo e forma do cordão [23]. É óbvio que se tais conceitos pudessem ser aplicados à soldagem hiperbárica, seria possível que a utilização de arames sólidos viesse a ser aceita na indústria "offshore". Desde então intensos trabalhos têm sido realizados e os seus resultados iniciais foram promissores. O Brasil, através da PETROBRÁS, faz parte deste seleto grupo de países que pesquisam a soldagem subaquática hiperbárica com o processo MIG. Além de um importante projeto de desenvolvimento deste processo, realizado no CENPES - Centro de Pesquisas da PETROBRÁS, esta empresa mantém um outro projeto em parceria com o LABSOLDA/UFSC para P&D na área.

3.2.2.4 - Soldagem com Eletrodo Tubular

Os processos de soldagem MIG/MAG e ET estão intimamente relacionados, inclusive nos seus desenvolvimentos históricos. O equipamento utilizado é exatamente o mesmo. A única diferença entre estes processos é o consumível: MIG/MAG utiliza um arame sólido, enquanto que no ET o arame é oco, em forma de tubo [20]. Como os consumíveis são diferentes, é natural que a taxa de fusão dos mesmos também seja. Segundo [24], os eletrodos tubulares apresentam taxas de fusão 30 a 35% superiores às dos arames sólidos de aço carbono. Caso isto também ocorra na soldagem subaquática, será um fator importante a favor do ET em relação ao processo MIG.

O Cranfield Institute of Technology foi um dos primeiros centros de pesquisa a estudar o ET na condição hiperbárica, em 1975. A escolha por este processo foi decorrente dos problemas iniciais do MIG/MAG para soldar aços "offshore" de grande espessura. Na época foi determinado que se ao invés de se utilizar um arame sólido, um eletrodo tubular fosse empregado, seria possível fabricá-lo com determinados materiais no fluxo que produzissem características adequadas à soldagem hiperbárica. Segundo Pinfeld, Nixon e Dorling *apud* [8], o fluxo poderia conter estabilizadores de arco e elementos formadores de escória para proteger a poça, além de outros constituintes. Para profundidades de até 70

metros, foi possível utilizar eletrodos comerciais, mas para maiores profundidades, foram requeridos consumíveis especialmente formulados para esta condição.

Como resultado deste programa de desenvolvimento de consumíveis, foi possível formular e produzir eletrodos para soldas de boa qualidade até profundidades de 250 metros. Infelizmente, o custo desses eletrodos especiais, que tinham que ser fabricados em pequenas quantidades para serem testados e aprovados, era elevado e por isso a sua produção foi interrompida naquela época quando técnicas alternativas, como o processo TIG, tornaram-se suficientemente desenvolvidas [8]. Atualmente, o processo ET hiperbárico voltou a ser pesquisado, chegando inclusive ao desenvolvimento de procedimentos de soldagem para profundidades entre 600 e 1100 m [25, 26]. O estudo foi realizado no instituto alemão GKSS e, dentre outras conclusões, afirma que as equações de equilíbrio que determinam o percentual de carbono e oxigênio do metal de solda, também podem ser aplicadas na condição hiperbárica. Os mesmos autores publicaram um outro artigo [27] onde pesquisaram a microestrutura e tenacidade do metal de solda obtido com o eletrodo C - Mn - 1% Ni, quando usado em condições hiperbáricas.

O Paton Welding Institute foi o primeiro centro de pesquisas a estudar o uso do ET na condição subaquática molhada e hoje ocupa posição de vanguarda na tecnologia mundial deste processo. Além do desenvolvimento de equipamentos específicos, como um alimentador de arame [17], o Paton conseguiu produzir um eletrodo tubular próprio para a soldagem molhada, que possibilitou a obtenção de soldas molhadas que podem ser utilizadas em aplicações cujas tensões de projeto são comparáveis às dos respectivos elementos acima d'água [28,29].

3.2.2.5 - Soldagem Plasma

O processo de soldagem ao arco elétrico denominado de Soldagem Plasma pode ser considerado uma evolução do processo TIG. Isto porque em ambos os casos tem-se um eletrodo não-consumível de tungstênio e uma proteção gasosa do arco voltaico contra a contaminação atmosférica. A principal diferença é que na soldagem plasma, o eletrodo fica confinado, concentrando mais o arco tanto sob o ponto de vista de energia, quanto de dimensões da coluna do arco [20].

O corte por plasma é largamente utilizado em todo mundo. Porém, devido aos altos índices de ruído, luminosidade e poluição gasosa gerados, cada vez mais estas operações de corte por plasma são realizadas embaixo de uma pequena lâmina d'água [30]. Isto tem ocorrido em diversas indústrias que não possuem nenhuma relação com soldagem subaquática, ou seja, o corte é realizado embaixo d'água

não por necessidade, mas por opção para reduzir a poluição. Este "know-how" de corte com pequenas lâminas d'água foi adaptado para as operações subaquáticas de corte a altas profundidades.

É natural que devido ao sucesso do corte subaquático por plasma pesquisadores também procurem aplicar a soldagem, a aspersão térmica ("plasma spraying") e o recobrimento ("plasma surfacing") embaixo d'água, isto é, na condição molhada. Em 1987, Lugscheider apud [30] realizou com sucesso uma aspersão térmica por plasma em águas rasas (30 a 50 cm).

A soldagem subaquática molhada por plasma tem sido pesquisada na China e, principalmente, no Japão [30, 31]. As características e os fenômenos que envolvem o arco plasma em águas rasas foram estudados por Junyue et al. [30], utilizando a mesma tocha do "plasma surfacing". Dentre os resultados obtidos, destacam-se: a) a característica estática tensão-corrente é ascendente, e b) a fonte de energia para a soldagem plasma subaquática deve possuir maior tensão de arco aberto, maior tensão de trabalho, maior indutância e característica estática descendente com grande inclinação, em relação à fonte para soldagem na superfície [30]. Fukushima et al. estudaram a soldagem plasma subaquática molhada utilizando metal de adição [31]. Os testes foram realizados em água doce, a 100 m de profundidade (aproximadamente 10 atm). O principal resultado obtido foi uma sensível melhora na ductilidade de juntas duplo V, preenchidas com metal de adição Fe-Si-Mn de extra-baixo carbono, e com este mesmo consumível com adição de 0,59% de Ti em peso.

3.2.2.6 - Outros

Além dos principais processos de soldagem ao arco elétrico, pesquisadores têm desenvolvido outros processos como: "Stud Welding", que é um tipo de soldagem por resistência de prisioneiros, e soldagem por fricção [8].

3.2.3 - Quanto à Qualidade da Solda Obtida

A especificação da AWS [9] inclui 4 tipos de soldas: A, B, C e O, dependendo da qualidade das mesmas, como descrito abaixo:

a) Tipo "A"

Soldas subaquáticas que podem ser utilizadas em aplicações cujas tensões de projeto são comparáveis às dos respectivos elementos acima d'água, através de uma especificação semelhante de propriedades e requerimentos de testes.

b) Tipo "B"

Soldas subaquáticas destinadas às aplicações menos críticas onde baixa ductilidade, maior porosidade e outras descontinuidades podem ser toleradas.

c) Tipo "C"

Soldas subaquáticas que satisfazem a requerimentos menos exigentes que as soldas tipo "A", "B" e "O". Podem ser utilizadas em aplicações onde suportar cargas não é uma consideração primária.

d) Tipo "O"

Soldas subaquáticas que satisfazem os requerimentos de outros códigos e especificações, assim como requerimentos adicionais deste código, para abranger os diversos ambientes e condições de trabalho da soldagem subaquática.

3.3 - Aplicações

Conforme citado anteriormente, as principais aplicações das técnicas de soldagem subaquática têm sido e continuam sendo a construção e reparo de plataformas e tubulações oceânicas. Outras aplicações incluem:

- a) reparos de navios;
- b) instalação e reparo de pilares de pontes, portos e outras estruturas marítimas; e
- c) reparos de componentes de reatores nucleares.

A referência [7] comenta aplicações práticas da soldagem hiperbárica seca em "habitat" (baseando-se nas experiências da Taylor Diving and Salvage Co.) e da soldagem molhada com eletrodo revestido (baseando-se principalmente nas experiências da Sea Con Services, Inc.). A maioria das atividades destas companhias ocorreram no Golfo do México. Conforme Masubuchi, poucas mudanças aconteceram nas aplicações práticas da soldagem subaquática desde então. A seguir são descritos alguns exemplos de novos esforços baseando-se em informações publicadas.

1) Thomas e Smith relatam experiências no Mar do Norte com sistemas de soldagem e reparos submarinos. Além de dois sistemas padrões de soldagem subaquática em habitat, tipo UWH17 ("underwater welding habitat") e SPAR5 ("submarine pipeline and alignment rig"), um novo sistema

chamado de CHAS ("combined habitat and alignment system") tem sido desenvolvido por Wharton Williams Taylor, segundo Thomas e Smith apud [7]. O emprego da soldagem subaquática TIG orbital é descrita por Henon e Hayes em [32], onde tubos de aço inoxidável duplex foram soldados com sucesso, e por Valter R. dos Santos que relata testes na PETROBRÁS do sistema TIG Orbital "MOSS" desenvolvido no GKSS, [2]. Um artigo de Madeira e Cunha apresentado no XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem descreve em linhas gerais o procedimento utilizado pela PETROBRÁS para a recuperação de tubulações através da soldagem molhada [33]. A empresa já utiliza esta técnica em águas rasas.

2) Gerhard e Jung apud [7] descrevem novas fontes de energia adequadas a soldagem subaquática hiperbárica. As fontes de energia para serem utilizadas em soldagens oceânicas, em comparação com as condições padrões de soldagem a arco em terra firme, devem levar em consideração:

- A transferência de altas correntes em longos cabos;
- A influência da pressão na estabilidade do arco, a transferência de gotas através do arco, e a proteção gasosa;
- Maior segurança do operador;
- Seleção infinita de variáveis e parâmetros através de controle remoto ou controles programáveis livres.

Segundo Masubuchi, o artigo descreve fontes de energia da série "ZUW" que podem ser utilizadas para eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG na condição hiperbárica seca, assim como também para eletrodo revestido na condição molhada.

Holdsworth, et al. alegam que enquanto tem sido verificado um grande desenvolvimento de técnicas de soldagem, eletrodos e meios de proteção contra a água, não se tem dado a devida atenção às fontes de soldagem, especialmente aquelas destinadas à soldagem molhada [34]. Com o objetivo de se determinar o melhor tipo de fonte de soldagem para algumas aplicações subaquáticas molhadas, os autores realizaram diversos testes com cinco diferentes concepções de fontes. Os resultados preliminares demonstraram uma grande diferença nas características operacionais e na qualidade das soldas obtidas, mudando-se o tipo de fonte. Dos Santos et al. afirmam que desenvolvimentos recentes de novas fontes de energia transistorizadas têm possibilitado um maior controle sobre a transferência metálica, particularmente através do uso de corrente pulsada [35]. Isto tem possibilitado expandir a aplicação (profundidade) e melhorar a qualidade das soldas MIG hiperbáricas.

3) Um artigo de DeLaune intitulado "Inspection - White Paper" e um artigo de Watson intitulado "Inspection - Session Report", apresentados em 1985 durante o Colorado International Workshop, fornecem uma visão geral das técnicas de ensaios não-destrutivos (END) para inspeção subaquática [7]. As técnicas correntemente em uso incluem inspeção visual, inspeção por partículas magnéticas, inspeção radiográfica e inspeção por ultra-som. A PETROBRÁS utiliza bastante estas técnicas de END, tanto que elaborou procedimentos próprios para a realização das mesmas [36, 37]. Importantes códigos internacionais que regulamentam atividades subaquáticas, como o Det Norske Veritas (DNV) da Noruega, dedicam seções inteiras às técnicas de END. Na edição de 1981 da norma para tubulações submarinas [38], o DNV estabelece critérios de aceitação para inspeção visual e radiográfica de soldas em tubulações.

Chedister [39] descreve um equipamento especialmente projetado para inspeção por partículas magnéticas que tem sido muito utilizado em aplicações subaquáticas. O referido equipamento já vem equipado com um dispositivo para limpeza da superfície a ser inspecionada. Segundo Krnic e Anzulovic a técnica de inspeção por partículas magnéticas é bastante eficaz na inspeção subaquática [40]. Uma outra técnica frequentemente empregada é o ultra-som, pois a mesma permite uma fácil automatização do processo. Por exemplo, Applegate e Rokhlin [41], utilizaram um dispositivo para realizar automaticamente a inspeção por ultra-som de soldas molhadas feitas com eletrodo tubular, de modo que era possível fazer o controle computadorizado em tempo real da penetração do cordão, para melhorar a qualidade da solda.

4) Diversos artigos citam exemplos do uso da soldagem subaquática em outras áreas, além da exploração oceânica de petróleo. Nos trabalhos de reparo em pilares de cais em Houston, foi utilizada extensivamente a soldagem subaquática hiperbárica [42, 43]. West e Mitchell apud [7] analisa os resultados de um projeto para determinar a adequabilidade da soldagem subaquática para reparar navios da marinha americana. Oito tipos de eletrodos revestidos comercialmente disponíveis foram avaliados por uma série de testes. O emprego da soldagem subaquática na recuperação de navios também é relatado em [44]. Dois artigos de O'Sullivan discutem o uso da soldagem subaquática para reparar trincas em um componente estrutural de um vaso de pressão numa usina nuclear [45, 46]. O reparo foi realizado utilizando-se eletrodos revestidos inoxidáveis de baixo carbono. O material de base era aço inoxidável A240 dos tipos 304 e 304L. As soldas foram realizadas para atender os requerimentos das soldas tipo B da especificação de soldagem subaquática da AWS [9]. Máhan cita outro exemplo da utilização da soldagem molhada em usinas nucleares [47].

3.4 - Vantagens e Desvantagens da Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular

A soldagem molhada tem sido cada vez mais empregada em operações subaquáticas, apesar de não possuir a mesma qualidade de solda das técnicas operacionais a seco. A explicação para este fato é o seu baixo custo e reduzido tempo de preparação/execução. Só para se ter uma idéia da importância destes dois fatores, segue uma descrição sucinta de duas técnicas de mergulho comumente utilizadas em operações subaquáticas abaixo de 50 m de profundidade: a técnica do "gás misturado" e a do "mergulho com saturação".

Os primeiros poços de petróleo a serem explorados no oceano estavam localizados na Plataforma Continental. Esta é uma extensão da massa terrestre, com profundidade máxima de 200 metros, que pode distanciar da costa algumas dezenas de quilômetros. Afastando-se muito da costa, a profundidade da água pode crescer rapidamente até milhares de metros, aumentando consideravelmente os problemas de projetos de sistemas subaquáticos.

Como citado anteriormente, a pressão hidrostática aumenta com a profundidade, na relação de aproximadamente 1 bar a cada 10 metros. Portanto, na Plataforma Continental pode-se encontrar pressões de até 20 bar. O efeito deste aumento de pressão sobre o processo de soldagem e o soldador pode ser significativo.

Uma divisão natural, devido à fisiologia humana, ocorre a 50 metros. Até esta profundidade, é possível que os mergulhadores trabalhem enquanto respiram ar comprimido. Entretanto, o nitrogênio torna-se narcótico (anestésico) à medida que a pressão ambiental aumenta. Para maiores profundidades o mergulhador pode tornar-se desorientado, e até chegar ao ponto de correr perigo de vida. Para evitar tal problema, o nitrogênio é substituído por hélio na mistura gasosa que o mergulhador respira, na técnica de mergulho conhecida como "gás misturado", o que aumenta consideravelmente o custo da operação [8].

Esta técnica é frequentemente combinada com o uso de "sistemas de mergulho saturados", que utilizam câmaras pressurizadas no vaso-suporte de mergulho nas quais os grupos de soldadores ficam por um extenso período a uma pressão próxima da existente no local de trabalho. Eles são então transferidos para o local de trabalho em um vaso em forma de sino, cujo fundo é aberto somente quando uma apropriada profundidade é alcançada. Como o mergulhador é mantido a uma pressão constante, é possível eliminar os procedimentos de descompressão, exceto no final da operação de mergulho, o que aumenta muito a produtividade do mergulhador. Tais técnicas de mergulho têm tornado possível as atividades de engenharia nas profundidades existentes na plataforma continental [8].

O uso de mergulho com saturação requer que o navio utilizado na operação de instalação e reparo da estrutura submersa seja equipado com uma grande quantidade de equipamentos especializados. Além disso, tal navio pode ter sido construído especialmente para servir de suporte ao mergulho, pois possui vasos de pressão nos quais a equipe de mergulho permanece durante o reparo. O ambiente em que esta equipe permanece deve ser controlado por vários técnicos especializados trabalhando todo o tempo que, por sua vez, devem receber o suporte de serviços técnicos e refeições 24 horas por dia. É prática normal, para uma câmara em trabalho contínuo, ter no mínimo duas equipes de mergulhadores em saturação e, conseqüentemente, dois times de apoio para as operações de superfície.

Portanto, segundo Nixon e Billingham, durante todo o tempo de reparo, para cada homem no local de trabalho talvez 40 ou 50 outras pessoas podem estar dando-lhe apoio. Isto explica o custo muito alto das operações subaquáticas que podem chegar até a algumas centenas de milhares de dólares por dia, a depender de sua complexidade.

Devido ao altíssimo custo envolvido nas operações subaquáticas, qualquer redução no tempo da intervenção representa uma economia significativa de dinheiro. Portanto, é essencial um alto nível de planejamento e treinamento prévio para poupar tempo durante a operação "offshore" de reparo. Além disso, deve-se escolher uma técnica operacional que reduza o tempo de preparação e instalação de dispositivos. É justamente nesta etapa que a soldagem molhada leva grande vantagem sobre as outras técnicas, pois não requer a instalação de nenhum dispositivo tipo câmaras pressurizadas, vedação, etc. Tanto que P. T. DeLaune, engenheiro sênior da Taylor Diving and Salvage Company e um dos maiores defensores da soldagem hiperbárica, afirma em [48] que concorda com aqueles que prevêem que, num futuro próximo, a soldagem molhada será largamente utilizada em reparos subaquáticos.

Um outro fato relevante a ser levado em consideração é que a redução do tempo de preparação e execução do serviço é importante não só porque reduz o custo, mas também porque em certas situações um minuto a mais pode determinar o fracasso da operação. Um exemplo típico são os vazamentos de óleo no mar e as operações de salvamento de navios. Nestes casos, perder tempo instalando diversos dispositivos e pressurizando câmaras pode ser fatal: o vazamento de óleo atingir grandes áreas; e o navio afundar.

Apesar da técnica de soldagem molhada poder ser executada utilizando-se diversos processos, o eletrodo revestido (ER) e o eletrodo tubular são os processos que têm sido empregados em condições reais de operação. O MIG/MAG não tem a flexibilidade metalúrgica do ET, ou seja, não permite uma livre adição de elementos químicos na sua composição para melhorar as propriedades das soldas. A soldagem plasma ainda está numa fase inicial de desenvolvimento e por ser necessário trabalhar com alimentação do metal de adição [31], dificulta a operacionalidade do processo (conforto do soldador).

Comparando-se agora os processos ET e ER, o primeiro possui uma grande vantagem sobre o segundo que é uma maior produtividade. Conforme visto anteriormente, esta maior produtividade é devido não somente à alimentação contínua do arame que dispensa a troca de eletrodos, mas principalmente por causa da maior densidade de corrente deste processo [22].

Com base nestas considerações, pode-se concluir que:

a) Em pequenas profundidades só se deve utilizar outras técnicas operacionais quando a soldagem molhada realmente não atender às especificações de serviço (em juntas de alto risco, por exemplo);

b) Quando empregar a solda molhada, dar preferência ao eletrodo tubular, principalmente para trabalhos longos.

A tabela a seguir dá uma idéia do exposto neste item.

TÉCNICA OPERACIONAL	QUALIDADE DE SOLDA	TEMPO DE PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO	CUSTO
1 atm	EXCELENTE	↑↑↑↑↑↑	↑↑↑↑↑
HIPERBÁRICA	BOA	↑↑↑↑	↑↑↑
MOLHADA	REGULAR A BOA	↑	↑

Tabela 02 - Vantagens e desvantagens das técnicas operacionais de soldagem subaquática.

3.5 - Segurança

Como citado anteriormente, o aumento de pressão sobre o soldador é significativo, podendo chegar ao expressivo valor de 10 atm se o mergulho for a 100 m de profundidade. Para que o ser humano possa suportar tais pressões, foram desenvolvidas as técnicas de gás misturado e de mergulho saturado. Já foi visto o quanto estas técnicas são complexas e perigosas. Portanto, qualquer falha humana, operacional ou de equipamentos pode resultar na morte do soldador-mergulhador. Entretanto, mesmo que tudo ocorra bem, a ação prolongada da pressão sobre o corpo humano pode causar diversas doenças.

3.5.1 - Doenças do Mergulho

Durante muitos anos tem sido notado que os mergulhadores sofrem uma forte redução de sua capacidade de mergulho em profundidades que excedem 250 metros. A extensão de tal redução não pode ser prevista e depende de muitos fatores. Além disso, os distúrbios de curta duração provenientes de mergulho, como a “síndrome nervosa de alta pressão”, que pode causar tonturas, náuseas e tremuras das extremidades, aliadas às doenças ocupacionais de longa duração como a “necrose dos ossos longos”, têm causado uma grande preocupação quanto à dificuldade e ao perigo de mergulhos profundos, McCallum *apud* [8].

Devido o alto risco envolvido nestas operações subaquáticas, o Ministério do Trabalho regulamentou estas atividades através de portaria, pela norma NR 15 [49]. Esta norma estabelece diversos procedimentos para trabalho sob condições hiperbáricas, incluindo tabelas que determinam o tempo mínimo de decompressão em função do tempo de mergulho e da pressão de trabalho.

3.5.2 - Choques Elétricos

Um outro grande perigo ao qual o soldador está constantemente exposto é o choque elétrico. Embaixo d'água este perigo torna-se ainda maior, já que a água reduz a resistência da pele à passagem de corrente elétrica. Devido a isto uma associação de empresas de mergulho "offshore" estabeleceu um código para o uso adequado da eletricidade em condições subaquáticas [50].

O valor de segurança tradicionalmente aceito para a resistência do corpo humano dentro d'água era de 500Ω . Entretanto, por considerar este valor muito conservador, esse código estabelece os valores de $R = 750 \Omega$ para tensões (U) de até 50 V, e $R = 500 \Omega$ para U maior que 50 V. Isto ocorre tanto para a soldagem molhada quanto para a hiperbárica, pois nesta o nível de umidade pode elevar-se perigosamente. Também é recomendado que a circulação de corrente elétrica pelo corpo do soldador não ultrapasse 40 mA para a soldagem em corrente contínua (CC). Da Lei de Ohm conclui-se então, que a máxima tensão permissível é de $U = R * I = 750 * 0,040 = 30 \text{ V}$. É evidente que este valor é facilmente alcançado numa soldagem subaquática. Portanto, é imprescindível que o soldador-mergulhador utilize um macacão de borracha, além de um par de luvas grossas de borracha sobre outro par mais fino, também de borracha [50].

3.6 - Automação

Os esforços de pesquisa e desenvolvimento em soldagem subaquática têm sido direcionados principalmente para o desenvolvimento de tecnologias capazes de produzir soldas satisfatórias em águas profundas [7]. Para tanto, é imprescindível o desenvolvimento de sistemas automáticos e o uso de robôs [51].

Como a tecnologia apropriada para a substituição completa do arriscado mergulho saturado levará muitos anos, partiu-se para uma solução intermediária, de forma que o mergulhador seria encarregado apenas de instalar e ajustar um equipamento de soldagem que pudesse ser controlado remotamente na superfície. Tal equipamento foi inicialmente desenvolvido para operar em áreas radioativas de usinas nucleares, logo grande parte desta tecnologia estava disponível. O primeiro destes equipamentos a ser oferecido comercialmente foi o "OTTO", desenvolvido por Sub Sea Offshore, [7, 8]. Desde então, várias empresas têm anunciado que estão desenvolvendo sistemas semelhantes. O sistema "OTTO" de soldagem hiperbárica mecanizada TIG Orbital inclui um dispositivo que segue um caminho pré-fixado e possibilita soldar tubos a seco em águas profundas para reparos em tubulações danificadas. Os componentes do "OTTO" são sofisticados e incluem computadores e tecnologia de fibra ótica para controle remoto e filmagem da soldagem [7].

A longo prazo deverão ser desenvolvidos sistemas que substituam completamente os mergulhadores em saturação. Os pesquisadores do MIT estão criando um novo conceito de dispositivos para soldagem subaquática, o "Instamatic". Este é um sistema instantâneo de união onde a soldagem é realizada num recipiente fechado, enclausurado. O sistema mantém a peça a ser soldada num "cassete" similar ao cassete do filme da Câmara Polaroid. Nos métodos convencionais, a peça a ser soldada é primeiramente montada. Só então o soldador ou o dispositivo automático de soldagem vem ao local para realizar a soldagem. Ao contrário, este novo conceito automaticamente realiza o serviço de soldagem pré-estabelecido através de um simples apertado do botão que ativa o mecanismo [7].

Uma das restrições óbvias deste novo equipamento é que tais sistemas só podem realizar aqueles trabalhos para os quais tenham sido concebidos. Entretanto, Masubuchi acredita que com uma adequada seleção das juntas normalmente utilizadas, uma série de sistemas "Instamatic" podem ser desenvolvidos, de tal forma que possam realizar uma considerável parcela dos trabalhos de soldagem necessários às atuais construções e reparos. A idéia parece ser boa porque a agência aeroespacial americana NASA - National Aeronautics and Space Administration - tem mostrado interesse nessa idéia para aplicações espaciais [7].

A indústria como um todo é atualmente dominada pelo preço do petróleo e, até que este volte a subir, existirão poucos projetos como estes de pesquisa e desenvolvimento em águas profundas, por serem de alto custo [8].

Felizmente o Brasil não tem seguido esta tendência mundial, pois a PETROBRÁS tem investido consideráveis recursos no desenvolvimento de uma célula flexível de soldagem subaquática para altas profundidades. Isto porque o escoamento da produção na Bacia de Campos é feito através de uma rede de dutos que atualmente atinge 2.300 km e com uma extensão crescente em profundidades inacessíveis ao homem, considerando os limites atuais da tecnologia de mergulho em águas profundas [2].

SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA

4.1 - Introdução

O grande número de programas de pesquisa que têm sido desenvolvidos nos últimos anos indicam a importância que a soldagem subaquática molhada possui atualmente [16]. Como já foi visto, a razão deste interesse pela solda molhada é devido ao seu baixo custo e reduzido tempo de preparação/execução. Entretanto, esta técnica possui uma qualidade de solda inferior às demais, devido principalmente, à presença da água. Alguns aspectos operacionais e metalúrgicos decorrentes da pressão e da água são descritos a seguir.

4.2 - Aspectos Operacionais

O efeito do aumento de pressão sobre as soldas subaquáticas tem sido bastante estudado na condição hiperbárica, pois nela é possível analisar separadamente o efeito da pressão, já que a água é retirada do local de trabalho. Entretanto, estes resultados são válidos para a soldagem molhada porque também nesta técnica a pressão é dependente da profundidade. Como citado anteriormente, o aumento de pressão torna o arco voltaico mais constricto, além de reduzir a sua estabilidade [8].

4.2.1 - Estabilidade do Arco e Visibilidade

A presença da água reduz ainda mais a estabilidade do arco [52], pois a mesma possui um potencial de ionização maior que o da atmosfera gasosa usada na soldagem a seco. Além disto, a dissociação da água e a queima do fluxo geram muitos gases, e com isto reduzem a visibilidade do arco. Sob este ponto de vista, é desaconselhável o emprego de processos como o MIG/MAG e o plasma na soldagem molhada, pois os mesmos utilizam proteção gasosa, o que aumenta ainda mais a quantidade de gases nas proximidades do arco. Entretanto, o eletrodo tubular, de forma similar ao eletrodo revestido, pode trabalhar sem gás de proteção [53].

4.2.2 - Variáveis de Soldagem

A influência das variáveis de processo sobre a estabilidade do arco e o surgimento de defeitos como porosidade é relatada em [53] e [54]. Christensen afirma que o menor nível de porosidades para a soldagem molhada com proteção de CO_2 é obtido usando uma tensão de 26 V. Abaixando-se ou aumentando-se a tensão o número de poros aumenta, sendo que para tensões maiores de 26 V o aumento é mais significativo [53]. Esta informação não é muito válida, pois o autor fornece apenas o valor da tensão sem citar a corrente correspondente. Em outro estudo Gooch diz que para que o arco voltaico tenha uma estabilidade razoável na soldagem molhada, é necessário que se trabalhe com valores de tensões e correntes superiores aos utilizados na superfície [52], mesmo que isto cause mais defeitos. Em outro estudo, Ibarra et al. verificaram a influência da corrente (I) e da tensão (U) sobre o percentual de hidrogênio difusível (H_D) introduzido no metal de solda, chegando à seguinte conclusão: o aumento da tensão é prejudicial pois aumenta o teor de H_D , enquanto que o aumento da corrente reduz a quantidade de H_D [54].

4.2.3 - Parâmetros de Soldagem

Ibarra et al. mostram que não só as variáveis de processo, mas também os parâmetros, são importantes sob a ótica operacional. Isto porque o tipo de corrente, *alternada (CA) ou contínua (CC)*, e a polaridade, *positiva (CC+) ou negativa (CC-)*, influenciam a estabilidade do arco. Eles afirmam que a polaridade CC-, em relação à CC+, produz menor variação na composição química do metal de solda com aumento da profundidade [54].

4.2.4 - Corrente Pulsada

Uma outra forma de se melhorar a estabilidade do arco é através do uso da corrente pulsada, que também permite otimizar o aporte térmico (E), segundo [54]. A corrente pulsada também é defendida por Masubuchi quando relata os estudos realizados por Suga e Hasui, segundo os quais o arco mais estável é obtido quando: (a) o tempo de pulso é aproximadamente igual à duração da transferência da gota metálica na condição convencional (sem pulso); e (b) o valor médio da corrente pulsada é igual à corrente adequada para a condição de corrente constante. Quando estas condições são satisfeitas, uma gota é transferida a cada pulso, resultando na formação de um arco estável [7].

4.3 - Aspectos Metalúrgicos

Sob o ponto de vista metalúrgico, o principal efeito da pressão na soldagem subaquática molhada é a mudança na composição química do metal depositado, como descrito a seguir.

4.3.1 - Mudanças na Composição Química do Metal de Solda

Com o aumento da profundidade de trabalho, os percentuais de silício e manganês do metal depositado decrescem significativamente, enquanto que os teores de carbono e oxigênio aumentam [55]. Analisando-se separadamente os efeitos da variação destes quatro elementos, percebe-se que o resultado final é desfavorável. A explicação para este fato é que a redução do Si e Mn diminui as propriedades mecânicas da junta, o aumento do percentual de C torna a solda mais sensível às altas velocidades de resfriamento, e o acréscimo do teor de O reduz a tenacidade. Isto ocorre tanto nas soldas molhadas quanto nas hiperbáricas. Só para se ter uma idéia do quanto a pressão afeta as soldas subaquáticas, Ibarra et.al. afirmam em [55] que a 3 bar o percentual de Mn diminui 0,35 % em peso, ao passo que a quantidade de Si reduz 0,05 % em peso. Já os teores de C e O aumentam mais de duas vezes ao se comparar as soldas feitas na superfície com as hiperbáricas realizadas a aproximadamente 300 m de profundidade. Entretanto, este dado não corresponde aos valores encontrados por Christensen, pois este afirma que o percentual de C não varia muito com o aumento da profundidade [53].

Além da dissociação da água, a decomposição dos carbonetos presentes no fluxo dos eletrodos revestidos e tubulares é fonte de oxigênio. Isto porque, ao ser queimado, o fluxo gera alguns gases dentre os quais o monóxido de carbono (CO) que, por sua vez, é dissociado pelo calor do arco voltaico em C e O, conforme a equação a seguir:



É natural relacionar este acréscimo de O com a redução dos teores de Mn e Si acima descritos. Segundo Ibarra et al., é realmente o oxigênio quem determina esta redução, através da oxidação destes elementos. Ainda conforme Ibarra et al., até 50 m de profundidade existe uma correlação perfeitamente linear entre o carbono do metal de solda e o oxigênio produzido. Isto sugere que a decomposição do CO controla o teor de oxigênio e este, por sua vez, determina a redução do Si e Mn.

Entre 50 e 100 m esta relação linear não mais existe. Como o Si e o Mn continuam diminuindo, os mesmos ainda são oxidados pelo O. Entretanto, este é fornecido por alguma outra fonte e não pelo

monóxido de carbono. De fato, para profundidades maiores de 50 m, é a água quem controla o processo [55], através da reação dada pela equação (3).

Apesar da água não ser a principal fonte de oxigênio nas pequenas profundidades, sempre ocorre uma dissociação da mesma no interior do arco voltaico mesmo com poucos centímetros de lâmina d'água. Isto também explica o alto teor de hidrogênio difusível das soldas molhadas, já que o hidrogênio molecular da equação (3) transforma-se em hidrogênio atômico segundo a equação (4).

O hidrogênio normalmente presente no metal depositado das soldas molhadas é classificado como alto ("high") por Coe em [56]. Entretanto, num levantamento realizado por Christensen aparecem duas exceções - um eletrodo revestido especial e o eletrodo tubular auto-protégido - classificadas como de H_D médio ("medium"), [53].



4.3.2 - Surgimento de Trincas a Frio

Além do elevado hidrogênio difusível, a soldagem molhada resulta em altas velocidades de resfriamento que conduzem a uma elevada dureza, especialmente na ZAC. Estes fatores, juntamente com as tensões residuais inerentes ao processo de soldagem podem causar trincas a frio na junta soldada [57].

4.3.3 - Porosidades

A elevada quantidade de gases gerada pela queima do fluxo e decomposição da água, ao ser absorvida pelo metal fundido causa porosidades, além dos problemas anteriormente expostos. A porosidade do metal de solda é particularmente importante na soldagem subaquática molhada, pois o tamanho e a quantidade destes poros podem determinar a aprovação ou não da junta soldada [54].

De acordo com Ibarra et al, a exigência física para a formação de poros é que a soma das pressões parciais dos gases dissolvidos no metal de solda (P_{gi}), seja:

$$\sum_i P_{g_i} \geq P_a + P_h + P_b \quad (5)$$

onde P_a é a pressão atmosférica; P_h é a pressão hidrostática e P_b é o aumento de pressão devido à curvatura do poro, sendo calculado pela seguinte equação:

$$P_b = \frac{2\gamma}{r} \quad (6)$$

onde γ é a tensão superficial entre o metal fundido e o gás no poro; e r é o raio do poro. Para a soldagem subaquática P_h é o termo de maior magnitude e que, portanto, controla a formação dos poros.

Um critério comumente adotado para a formação de uma bolha gasosa é o raio crítico, r_c . Se o raio crítico for excedido, o poro irá nuclear de forma homogênea e crescer espontaneamente sem limites de dimensões, dependendo da disponibilidade de elementos gasosos [54]. Como na soldagem molhada estes elementos gasosos não faltam, o tamanho do poro dependerá apenas do tempo que o metal de solda permaneça fundido que, por sua vez, é determinado pelas variáveis de soldagem, especialmente pelo aporte térmico (E). Devido ao rápido resfriamento que ocorre nas soldas subaquáticas molhadas, o metal de solda permanece fundido por um tempo muito pequeno. Logo, a maioria dos poros formados são pequenos, com diâmetro pouco superior ao raio crítico [54].

4.3.4 - Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas

Yara et al. *apud* [7] determinaram algumas propriedades mecânicas e metalúrgicas de soldas de topo subaquáticas molhadas. O material de base utilizado foi chapa de aço de alta resistência HT60, isto é, com resistência mínima à tração de 588 MPa (60 kgf/mm²).

O consumível foi o eletrodo revestido JIS D 5003. Alguns dos resultados estão resumidos a seguir:

a) Tenacidade

A figura 5 mostra os resultados (em percentual de fratura dútil) de testes de impacto Charpy em "V". As amostras foram soldadas em 4 diferentes condições: ao ar com 1 e 2 passes, e molhada com 1 e 2 passes. Os corpos de prova foram retirados de modo a localizar o entalhe na ZAC ou no metal de

solda. Como a chapa usada era de 9 mm (3/8") de espessura, utilizaram-se corpos de prova reduzidos, de seção 4 x 4 mm e comprimento de 55 mm.

b) Dureza

A figura 6 mostra a distribuição de dureza nas proximidades da linha de fusão. Como já era esperado, a dureza na ZAC é bem superior a encontrada no metal de base. Percebe-se, entretanto, que para a solda molhada esta diferença é mais acentuada. Isto porque o rápido resfriamento desta técnica operacional favorece a formação de estruturas mais duras.

c) Resistência à fadiga

Foram retirados corpos de prova cilíndricos de 8 mm de diâmetro na seção reduzida, transversalmente ao cordão de solda. Após diversos testes, obtiveram-se os seguintes valores aproximados para o limite de fadiga:

AMOSTRA	LIMITE DE FADIGA
Metal de base	25 kgf/mm ² (245 MPa)
Solda realizada ao ar	23 kgf/mm ² (225 MPa)
Solda realizada sob água	15 kgf/mm ² (147 MPa)
NOTA: Os corpos de prova soldados fraturaram-se no metal de solda.	

Tabela 03 - Limite a fadiga em soldas [7].

d) Susceptibilidade às trincas a frio

A susceptibilidade as trincas a frio foi estudada através de testes de tração tipo TRC ("Tensile Restraint Cracking") e testes de implante. Os valores aproximados da tensão crítica, abaixo da qual não ocorreram trincas mesmo após um longo tempo, estão descritos na tabela 4.

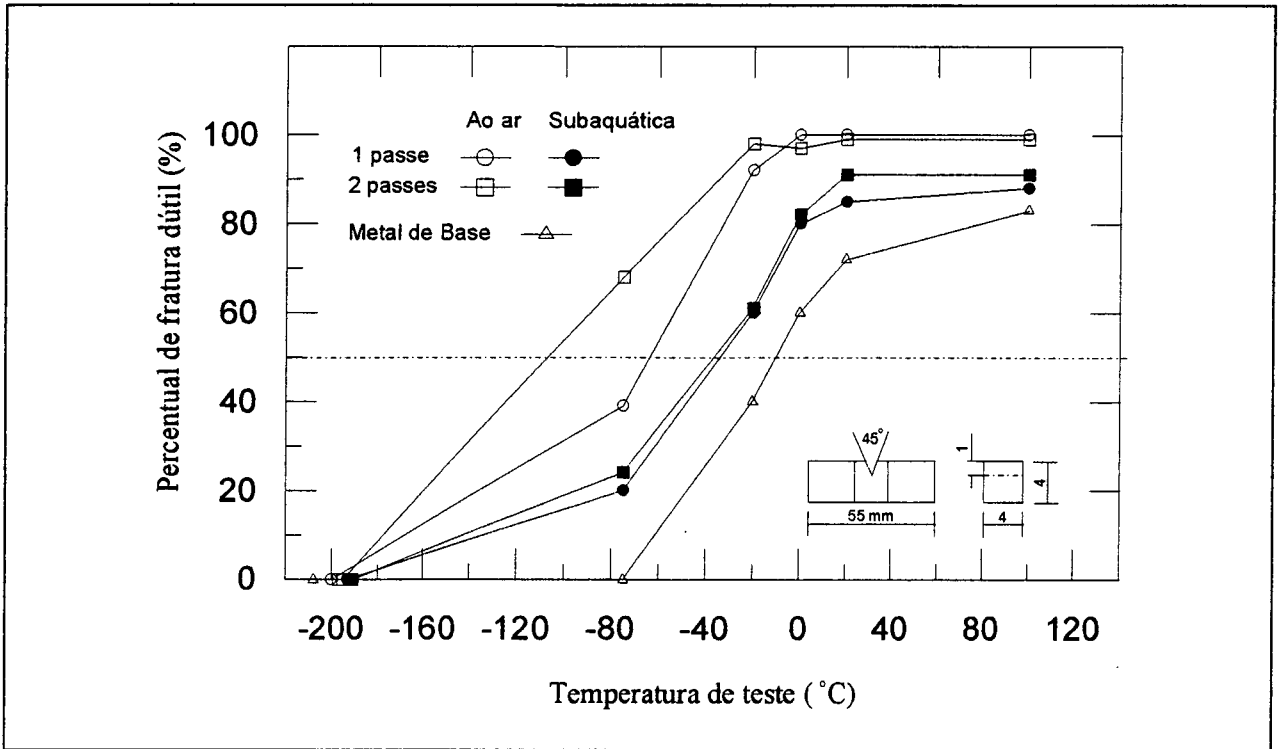


Figura 05 - Testes de impacto Charpy em soldas molhadas com ER. Adaptada de [7].

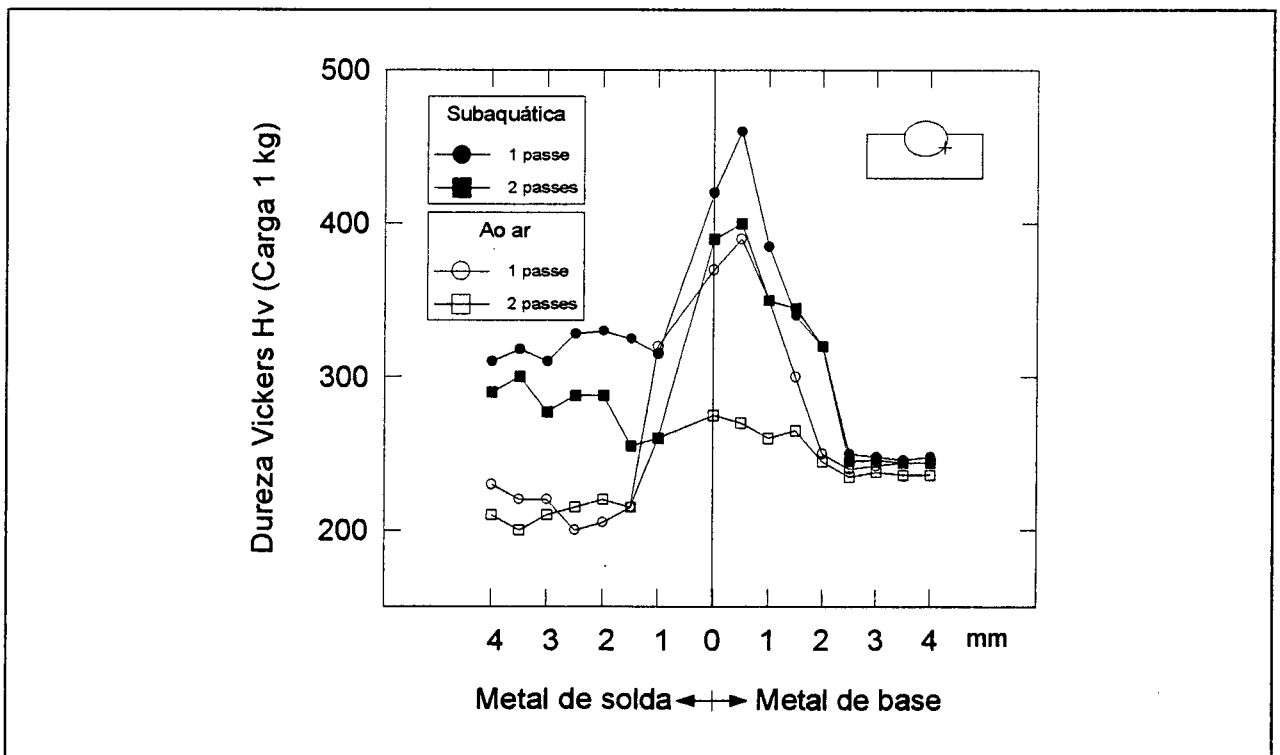


Figura 06 - Dureza em soldas molhadas com ER [7]

TIPO DE SOLDA	TIPO DE JUNTA	TENSÃO CRÍTICA [Kgf/mm ²] / [MPa]
REALIZADA AO AR	“Y maiúsculo” (Y)	71 / 696
	“Y minúsculo” (y)	68 / 667
	"V" a 45°	21 / 206
SUBAQUÁTICA	“Y maiúsculo” (Y)	19 / 186
	“Y minúsculo” (y)	15 / 147
	"V" a 45°	11 / 108

Tabela 04 - Susceptibilidade às trincas a frio (em termos da tensão crítica) [7].

Como se pode observar, as soldas subaquáticas são mais sensíveis às trincas a frio que as soldas realizadas ao ar. Quanto aos efeitos da geometria da junta sobre a susceptibilidade às trincas, Yara et al. apud [7] acreditam que as diferenças obtidas foram causadas principalmente pelo grau de concentração de tensões na raiz da solda.

4.4 - Métodos para Diminuir a Velocidade de Resfriamento

Muitos pesquisadores têm estudado métodos para diminuir as altas velocidades de resfriamento associadas às soldas subaquáticas molhadas através de meios que isolem pelo menos uma parte do material soldado da água. Só para se ter uma idéia deste problema, soldas realizadas num ambiente hiperbárico resfriam de 800 a 500 °C em 8 a 24 segundos, enquanto que numa solda molhada esse tempo é de 3 a 7 segundos [7].

Suga apud [7] estudou um método que aumenta as propriedades mecânicas das soldas subaquáticas molhadas através da redução da velocidade de resfriamento, utilizando uma proteção adequada para o arco. Regiões próximas da solda foram cobertas com (a) proteção refratária e (b) proteção com massa de vedação utilizada por vidraceiros. Os principais resultados são resumidos a seguir:

(1) A velocidade de resfriamento e a dureza da ZAC de uma solda subaquática reduziram significativamente com o uso desses métodos de proteção.

(2) Trincas sob o cordão que ocorrem em soldagens subaquáticas do aço SM50 com espessuras menores que 9 mm, podem ser evitadas reduzindo-se a velocidade de resfriamento a 500 °C a valores menores que 35 °C/s e a dureza máxima da ZAC a valores abaixo de aproximadamente 360 Vickers. Estas condições foram obtidas através do uso do sistema de proteção com massa de vedação, desenvolvido nesta pesquisa.

(3) São citadas fórmulas desenvolvidas para estimar (a) a velocidade de resfriamento, R , a 500 °C; e (b) os tempos de resfriamento de 800 a 500 °C, $t_{8/5}$, e de 800 a 300 °C, $t_{8/3}$, como a seguir:

$$R = 625 \times 10^3 \alpha E^{-0,95} t \beta \quad [^{\circ}\text{C/s}] \quad (7)$$

$$t_{8/5} = 455 a R^{-1,09} \quad [s] \quad (8)$$

$$t_{8/3} = 780 b R^{-1,09} \quad [s] \quad (9)$$

sendo:

E = aporte térmico (J/cm)

t = espessura da chapa (mm)

$\alpha = 1$; $\beta = 0,17$; $a = 1$ e $b = 1$ → Para soldagem sem proteção.

$\alpha = 0,28$; $\beta = 0,45$; $a = 1$ e $b = 1$ → Para soldagem com proteção refratária.

$\alpha = 0,036$; $\beta = 1$; $a = 0,67$ e $b = 0,80$ → Com proteção com massa de vedação.

(4) Juntas soldadas obtidas através do uso de proteção com massa de vedação apresentaram propriedades mecânicas quase iguais às soldas realizadas ao ar.

Diversos outros métodos para diminuir a velocidade de resfriamento das soldas molhadas têm sido propostos, sendo a proteção por cortina de água o mais conhecido [7, 53]. Entretanto este método tem o inconveniente de que o metal fundido absorve um alto teor de hidrogênio, resultando em fissuração a frio e porosidades [53]. Um outro aspecto desfavorável ao emprego da cortina de água é que a geração de gases é tão intensa que a visibilidade fica bastante prejudicada. Esta é a razão pela qual a PETROBRÁS não tem adotado esta técnica em seus reparos com solda molhada.

4.5 - Aços e Consumíveis mais Adequados à Soldagem Molhada

Devido aos problemas da soldagem molhada, atualmente esta técnica só é empregada para aços de baixo carbono equivalente ($C_{eq} < 0,40$) e para soldagens em pequenas profundidades. Infelizmente, em algumas regiões como o Mar do Norte, a maioria das plataformas petrolíferas foram construídas com aços de grande espessura e com carbono equivalente superior a 0,40. Tem sido verificado que soldar estes aços de alta resistência com eletrodos ferríticos tradicionais resulta em trincas na ZAC [58]. Para resolver estes problemas pesquisadores têm procurado utilizar aços e consumíveis mais adequados à soldagem subaquática molhada.

4.5.1 - Aços HSLA e TMCP

É largamente conhecido que quando o nível de resistência de um aço aumenta, o mesmo torna-se mais difícil de ser soldado sem que ocorram trincas. Enormes esforços têm sido realizados em vários países do mundo para desenvolver aços de alta resistência com boa resistência a fratura e soldabilidade. Por exemplo, a marinha americana tem estado interessada no desenvolvimento e utilização de aços de alta resistência e baixa liga (HSLA - High Strength Low Alloy), [59]. Siderúrgicas japonesas em cooperação com estaleiros têm desenvolvido aços com controle termo-mecânico do processo (TMCP - Thermo-Mechanical Control Process) que permitem a obtenção de grãos refinados através do abaixamento da temperatura de laminação e, às vezes, mediante resfriamento acelerado [7, 59].

Comparando-se os aços convencionais de alta resistência com os aços TMCP de mesmo nível de resistência, os TMCP apresentam melhor soldabilidade por possuir menor carbono equivalente. Tomemos, por exemplo, um aço convencional de alta resistência com tensão máxima de 490 MPa (50 kgf/mm^2) e C_{eq} da ordem de 0,40. Este aço necessita ser pré-aquecido no mínimo a 150 °C para evitar trincas a frio. Entretanto, a temperatura mínima de soldagem sem trincas a frio pode ser reduzida utilizando-se aços TMCP, para:

- a) Aproximadamente 50 °C para aços TMCP com $C_{eq} = 0,36$;
- b) Aproximadamente 0 °C para aços TMCP processados com resfriamento acelerado e com $C_{eq} = 0,32$.

Portanto, é natural assumir que os aços TMCP podem ter melhor soldabilidade embaixo d'água do que os aços convencionais de alta resistência [7, 59].

4.5.2 - Eletrodos Austeníticos e à Base de Níquel

Dependendo do tipo do depósito, os eletrodos revestidos comerciais para a soldagem subaquática podem ser classificados em: ferríticos, austeníticos e a base de níquel. Os eletrodos ferríticos têm sido utilizados na soldagem de aços de baixo a médio carbono, com carbono equivalente inferior a 0,4 [60]. Para a soldagem de aços com alto C_{eq} , os eletrodos austeníticos e a base de níquel são mais adequados [58, 60].

As soldas austeníticas são capazes de reter hidrogênio em solução sólida, diminuindo a probabilidade de trincas por hidrogênio na ZAC. Entretanto, estudos mostraram que a soldagem com aço inoxidável austenítico resulta em trincas durante a solidificação devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do metal de base ferrítico e do metal de solda austenítico, o que limita um pouco sua utilização. Já os eletrodos a base de níquel, além de também diminuir a ocorrência de trincas por hidrogênio na ZAC, possuem um coeficiente de dilatação térmica mais próximo daquele do metal de base ferrítico. Isto faz com que as soldas obtidas com estes eletrodos sejam menos suscetíveis a trincas de solidificação do que as obtidas com eletrodos austeníticos. Entretanto, os eletrodos a base de níquel só produzem soldas de boa qualidade até profundidades de 10 m. Para maiores profundidades o nível de porosidades cresce muito, especialmente para a soldagem fora da posição plana [58, 60]. É importante ressaltar que mesmo com essas discontinuidades o alto nível de tenacidade das soldas a base de níquel torna seu uso atrativo [60].

Segundo Liu et al., os recentes avanços no desenvolvimento de eletrodos mostram que é potencialmente possível produzir soldas molhadas de boa qualidade até aproximadamente 100 m de profundidade, e que isto deverá ocorrer na prática em breve [60].

4.6 - Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular

Atualmente o eletrodo revestido (ER) ainda é o processo mais empregado nas soldagens subaquáticas molhadas. Entretanto, a frequente troca de eletrodos causa um sério problema, que não existe no processo eletrodo tubular: uma significativa mudança da microestrutura nos pontos de interrupção do arco. Se um mergulhador pára, por exemplo, durante o aperto de um parafuso, o tempo requerido para a operação de aperto aumenta, mas o estado final do parafuso não é modificado. Por outro lado, caso este mesmo mergulhador interrompa a execução de uma solda, a história dos ciclos térmicos de toda uma seção da junta é alterada, podendo gerar microestruturas e defeitos indesejados [8].

Como a técnica operacional em questão, soldagem molhada, é a mesma para o ER e o ET, todos os problemas inerentes a esta técnica que foram discutidos neste capítulo 4, ocorrem em ambos os processos. Entretanto, por se tratar de um processo de alimentação contínua, o eletrodo tubular não gera defeitos e microestruturas desfavoráveis devido às fortes mudanças de ciclos térmicos causadas pelas constantes trocas de eletrodos, além de ser mais produtivo e propiciar um maior conforto ao soldador. Estes fatos tornam-se ainda mais importantes devido a reduzida capacidade de mergulho dos soldadores. Isto explica o grande número de pesquisas e, conseqüentemente, o desenvolvimento que o eletrodo tubular apresenta nos últimos anos, conforme descrito a seguir.

4.6.1 - Eletrodos Tubulares Austeníticos

Já foi citado que os aços com $C_{eq} \geq 0,40$, ao serem soldados com eletrodos ferríticos na condição molhada, dificilmente apresentam uma junta livre de defeitos, especialmente trinca a frio sob o cordão. Da mesma forma que no eletrodo revestido, este problema tem sido solucionado na soldagem molhada com eletrodo tubular através da utilização de eletrodos que geram uma estrutura austenítica no metal de solda.

Os resultados obtidos em alguns estudos são bons (ver tabela 5), pois: (a) as tensões de escoamento e de ruptura foram aproximadamente iguais às do metal de base; (b) os valores de alongamento e da redução de área foram altos; e (c) a resistência ao impacto, principalmente na ZAC que normalmente é baixa, também apresentou um alto valor [61].

PROPRIEDADES MECÂNICAS	TENSÃO DE ESCOAMENTO [MPa]	TENSÃO MÁXIMA [MPa]	ALONGAMENTO [%]	REDUÇÃO DE ÁREA [%]	RESISTÊNCIA AO IMPACTO a 20 °C na ZAC [J]
METAL DE SOLDA	346	623	38 - 40	55,6	183,4
METAL BASE API X-65	449 - 450	597 -604	33,3 - 38,0	55,8	196,1

Tabela 05 - Propriedades mecânicas de juntas soldadas com ET austenítico [61].

A distribuição da dureza em juntas soldadas com eletrodos tubulares austeníticos e ferríticos é similar, e a dureza máxima na ZAC é praticamente a mesma. De uma forma geral, se todos os outros

parâmetros e variáveis de soldagem permanecerem constantes, não são observadas trincas a frio sob o cordão nas soldas com microestrutura austenítica, enquanto que nas ferríticas estas trincas aparecem.

4.6.2 - Eletrodos Tubulares com Boa Estabilidade de Arco

Um dos mais importantes aspectos operacionais da soldagem molhada com ET é a estabilidade do arco. Isto porque a pressão e a presença da água, fatores inerentes a técnica operacional da soldagem molhada, dificultam muito a abertura e manutenção do arco. Com o objetivo de melhorar esta estabilidade de arco, o Paton Electric Welding Institute desenvolveu um eletrodo tubular rutilico-básico específico para a condição subaquática molhada. Este eletrodo possui pequenas quantidades de metais terras-raras como elementos estabilizadores de arco [28, 29].

Para avaliar o desempenho deste novo eletrodo, foram realizados testes comparativos com um eletrodo rutilico comercial, nas profundidades de 0,5; 10; 20 e 50 m. Para todos os testes a tensão do arco foi de 29-30 V e a corrente variou entre 120 e 220 A. A regularidade da transferência metálica foi estimada através da duração dos curtos-circuitos (t_{cc}) e da sua frequência (N_{cc}). Os autores constataram um grande número de pequenos curtos-circuitos sem transferência metálica ($t_{cc} < 4$ ms) e poucos curtos-circuitos de longa duração com transferência de metal ($t_{cc} > 16$ ms). Em ambos os eletrodos a duração dos curtos aumenta com a profundidade, só que no eletrodo especial o t_{cc} máximo (de 3 ms) só é atingido a 50 m, enquanto que para o eletrodo comercial o t_{cc} máximo é de 11 ms e é obtido na pequena profundidade de 10 m. Também foi verificado que com o aumento da pressão aumenta a frequência dos curtos-circuitos (N_{cc}) sem transferência, o que indica uma redução da estabilidade do arco. Estes dois fatores, crescimento do N_{cc} sem transferência e do t_{cc} , agindo concomitantemente reduzem muito o tempo de arco aberto, o que causa uma diminuição da produtividade. O eletrodo especial apresentou um tempo de arco aberto duas vezes superior ao eletrodo convencional [28, 29].

Pokhodnya et al. afirmam que a maior duração do curto-circuito na soldagem molhada é decorrente do alto teor de hidrogênio na atmosfera do arco. Isto porque o hidrogênio possui uma alta condutividade térmica e um elevado potencial de ionização, que causam uma contração na coluna do arco voltaico e promove o aumento da força eletrodinâmica. Esta, por sua vez, retém a gota por mais tempo na ponta do eletrodo, favorecendo o seu crescimento e aumentando o tempo de curto-circuito com transferência metálica. A adição de metais terras-raras na composição do fluxo do eletrodo tubular melhora muito a estabilidade do processo, pois reduz o número e a duração das extinções do arco, e transfere gotas menores, [28, 29]. Um importante fato a ser considerado é que o teor de hidrogênio na atmosfera do arco subaquático é sempre alto, independente da composição do fluxo.

Porém, a adição desses elementos além de melhorar a estabilidade pode reduzir o hidrogênio difusível, pois diminui o tamanho das gotas transferidas, e quanto menor é o tamanho das gotas, menor é o tempo que as mesmas permanecem no interior do arco absorvendo hidrogênio.

4.6.3 - Eletrodos "Dual-Tube"

Heinz Haferkamp et al. afirmam que a geração de gás de proteção, fumos, escória e gotas metálicas no mesmo local e no mesmo instante conduzem a diversos mecanismos simultâneos de proteção e transferência metálica, que acabam interagindo negativamente um sobre outro [57]. Portanto, os autores defendem o emprego de eletrodos tubulares duplos ("dual-tube") ao invés de eletrodos de tubo simples como os descritos até aqui. Isto porque, segundo os autores, os eletrodos simples apresentam boa proteção apenas quando só elementos formadores de gás ou só formadores de escória estão presentes. Quando ambos os elementos, geradores de gás e escória, são colocados ao mesmo tempo a proteção não é satisfatória. Este problema é solucionado através da utilização dos eletrodos "dual-tube", pois neste caso os dois grupos permanecem separados, um no tubo interno e outro no externo, concêntrico ao primeiro.

A pesquisa demonstrou que os eletrodos "dual-tube" apresentam uma microestrutura mais favorável, devido a melhor proteção do arco durante a transferência metálica. Isto faz com que os mesmos também possuam melhores propriedades mecânicas, conforme tabela 6.

Além da reduzida dureza, o ET "dual tube" apresentou ótimos valores de tenacidade e hidrogênio difusível (tabela 6). A tenacidade do ET "dual tube" é praticamente o dobro da apresentada pelo ET simples que, por sua vez, é maior que a do eletrodo revestido (ER). Este resultado é tão expressivo que a tenacidade do ET "dual tube" é praticamente igual a do ET soldado a seco, sem água. Quanto ao hidrogênio difusível, os dados são parecidos, sendo que a pior condição foi apresentada pelo ER. Estes resultados invalidam o principal argumento dos defensores da utilização do eletrodo revestido na soldagem subaquática molhada: de que apenas este processo resultaria em propriedades mecânicas satisfatórias.

4.6.4 - Propriedades Mecânicas e Qualidades de Solda Obtidas

Além dos dados apresentados nos itens anteriores, Asnis et al. realizaram um estudo comparativo entre juntas soldadas com eletrodo revestido ao ar e com um eletrodo tubular especial na condição subaquática molhada. O eletrodo tubular apresentou um bom desempenho: (a) a tensão de ruptura foi de 85 % da verificada para o ER ao ar; (b) a tensão de escoamento, o alongamento e a

PROCESSO E CONDIÇÃO DE SOLDAGEM	DUREZA [Hv]		TENACIDADE Charpy-V a -20 °C [J]	H DIFUSÍVEL (ml/100 g de metal de solda)
	ZAC	SOLDA		
ER (SMAW)	380 - 470	200 - 400	25 - 40	34 - 60
ET (FCAW) COM CORTINA GASOSA	310 - 490	220 - 266	30 - 70	3 - 36
ET (FCAW) HIPERBÁRICO SECO, 1 bar	----	----	47 - 80	----
ET (FCAW) COM ELETRODO SIMPLES	256 - 430	225 - 300	27 - 49	19 - 33
ET (FCAW) COM ELETRODO "DUAL-TUBE"	238 - 380	180 - 255	43 - 77	9 - 21

Tabela 06 - Propriedades mecânicas do ET "dual-tube" e de outros processos [57].

redução de área foram aproximadamente iguais; e (c) a tenacidade foi de 75 % da solda a seco [62]. Os autores concluem que a resistência das juntas soldadas ao ar e na condição molhada com eletrodo tubular não diferem muito, especialmente quanto a fadiga e resistência ao impacto.

Um outro trabalho realizado no Paton Welding Institute, por Gretskii et al., relata que juntas soldadas com eletrodo tubular na condição molhada apresentam resistência equivalente à do metal de base ASTM A 36, e que a tenacidade do metal de solda a -20 °C é superior à do metal de base. Os testes foram realizados em C.P.'s retirados de juntas de 12,7 mm, preenchidas através de um sistema semi-automático de soldagem molhada com ET, e os resultados de propriedades mecânicas obtidas correspondem aos requerimentos da Classe "A" da Especificação para Soldagem Subaquática da AWS, [17].

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1 - Introdução

No sentido de estudar a soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular, procurou-se: (a) verificar a influência de diversas variáveis e parâmetros de soldagem sobre a estabilidade do processo; (b) determinar os melhores valores destas variáveis e parâmetros para as condições em estudo; e (c) realizar ensaios mecânicos para avaliar os resultados obtidos.

Os ensaios e análises realizadas compreenderam:

⇒ Análises Metalográficas.

- Macrografia;
- Microscopia ótica.

⇒ Ensaios Mecânicos.

- Macro e microdureza;
- Tração;
- Dobramento lateral e de raiz;
- Charpy-V a 0 °C.

⇒ Análises Químicas do metal de base.

- Teores de C, S, P, Mn, Si, Cr, Ni, e Mo.

⇒ Ensaios Radiográficos.

- Em cordões depositados sobre chapa;
- Em juntas reais.

5.2 - Infra-estrutura Básica

A infra-estrutura de experimentação utilizada consistiu basicamente de um banco de ensaios automatizado para soldagem, o SISDATASOLDA 1, desenvolvido no próprio LABSOLDA, Laboratório de Soldagem da UFSC. Também fazem parte da infra-estrutura, um pequeno aquário,

onde são realizados os testes, "softwares" desenvolvidos em Turbo Pascal, e uma placa de aquisição de dados, a INTERDATA 2, do banco de ensaios SISDATASOLDA 2.

5.2.1- Banco de Ensaios SISDATASOLDA 1

O banco de ensaios SISDATASOLDA 1 é composto por uma fonte de soldagem, um alimentador de arame, um sistema de deslocamento automático da pistola, um microcomputador com impressora e, finalmente, um sistema automatizado de medição e controle das variáveis de processo, denominado de IMAC - Interface Modular de Aquisição e Controle. O microcomputador controla e adquire os dados do processo através da IMAC [63]. Na figura 7 pode-se ver a fonte de soldagem, o microcomputador e a impressora utilizada para a elaboração de oscilogramas, além da IMAC. Já a figura 8 mostra de baixo para cima: a mesa de soldagem, o aquário, a pistola de soldagem e o seu sistema automático de deslocamento, o exaustor para gases e o cabeçote de soldagem (alimentador de arame).

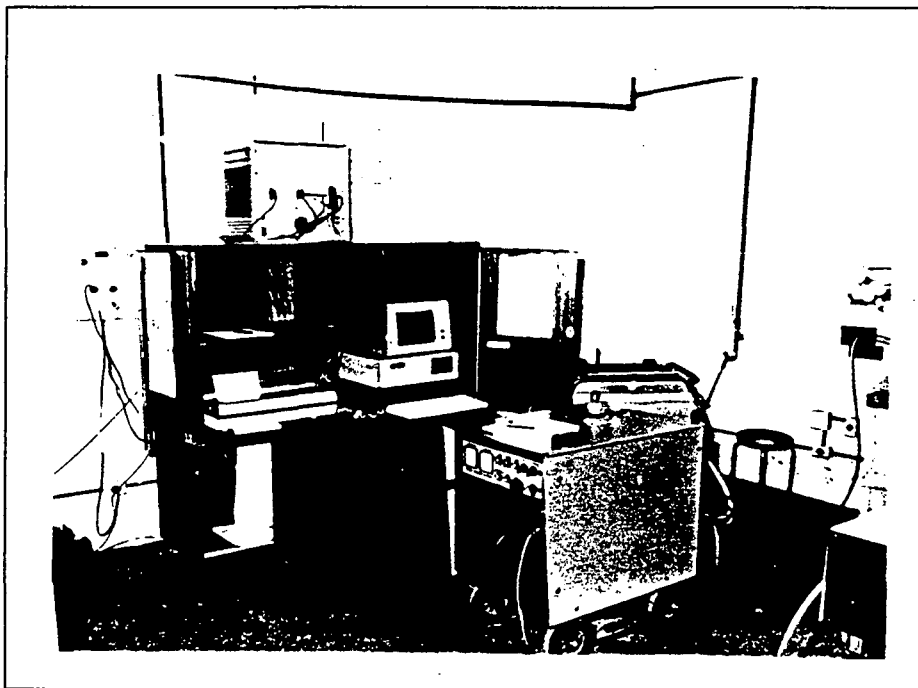


Figura 07 - Banco de ensaios SISDATASOLDA 1 (1ª parte).

Os equipamentos utilizados possuem as seguintes características:

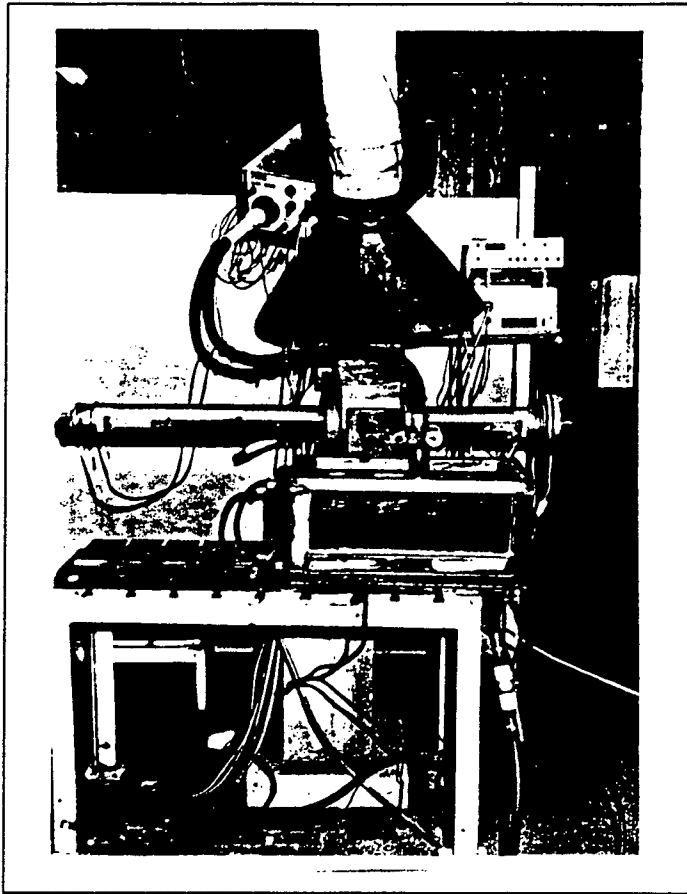


Figura 08 - Banco de ensaios SISDATASOLDA 1
(2ª parte).

⇒ Fonte de soldagem

Tipo	: Transistorizada analógica;
Fabricante	: ELMA TECHNIK;
Modelo	: C400P-A;
Tensão em vazio	: 60 V;
Capacidade de trabalho	: 400 A a 60%; 320 A a 100%;
Potência	: 22 kVA;
Característica estática	: Tensão constante e corrente constante.

⇒ Alimentador de arame

Fabricante	: ELMA TECHNIK;
------------	-----------------

Modelo : DRIVE DSG;

Possui sistema para acendimento suave do arco;

Equipado com circuito para controle externo (para soldagem com fonte de corrente constante).

⇒ Sistema de medição (SM)

Para a medição dos valores de corrente e tensão foram utilizados dois sensores de efeito "Hall" de 300 e 80 A, respectivamente. Após a leitura, o sinal passa por uma unidade de tratamento onde é amplificado, filtrado e já sai com seus valores instantâneo, médio e eficaz separados. As variáveis velocidade de alimentação (V_a) e velocidade de soldagem (V_s) possuem SM específicos que foram mostrados na figura 8.

⇒ IMAC

Para aquisições em baixa frequência, a IMAC realiza em 12 bit a leitura de até 8 canais e nas aquisições em alta frequência, realiza em 8 bit a leitura de até 50 mil pontos em 1 ou 2 canais. Nos ensaios realizados fez-se a leitura em 8 bit de 2 canais, adquirindo portanto 25 mil dados para cada variável. Como o tempo de aquisição foi de 6008,3 ms, a frequência de aquisição foi de aproximadamente 4 kHz por variável [5, 63].

5.2.2 - Banco de Ensaio SISDATASOLDA 2

Este banco de ensaios tem uma configuração semelhante ao primeiro, exceto que no lugar da IMAC é utilizada a placa de aquisição de dados INTERDATA 2. Esta placa é encaixada diretamente no barramento de dados do microcomputador, enquanto que a IMAC é um módulo separado deste.

⇒ INTERDATA 2

Esta placa pode fazer aquisições em alta frequência, utilizando vários canais, com a vantagem de que a taxa de leitura dos dados é programável (não é fixa como na IMAC). A velocidade de aquisição e o tempo de leitura dependem apenas do "hardware" que esteja sendo utilizado, ou seja, dependem da velocidade ("clock") do processador e da memória "RAM" do microcomputador onde a placa está

instalada. Nos testes que utilizaram a INTERDATA 2, a leitura de dados também foi realizada em 8 bit e com uma frequência de 4 kHz. Entretanto, foram lidos três canais (corrente e tensão instantâneas e velocidade de avanço do arame), durante um tempo total de aquisição de 33 segundos [5].

5.2.3 - "Softwares"

Os "softwares" desenvolvidos para este trabalho foram: TUBIMAC e TUBVAR para o banco de ensaios SISDATASOLDA 1 e o TUBINTER para aquisição de dados utilizando a INTERDATA 2. O TUBIMAC, que foi o primeiro programa a ser utilizado, comanda o processo e adquire dados de corrente e tensão instantâneas, traçando a seguir os oscilogramas. Verificou-se porém, que baseando-se só nos oscilogramas de corrente e tensão não era possível provar a existência de trancamentos do eletrodo no bico de contato, causados por microfusões. Para que fosse possível identificá-los e tentar eliminá-los, tornou-se imprescindível a leitura da velocidade de avanço do arame porque esperava-se um decréscimo desta quando ocorressem as microfusões. Desenvolveu-se então o programa TUBVAR que comanda o processo e adquire corrente instantânea e velocidade de avanço do arame, e traça os respectivos oscilogramas.

Como citado anteriormente, nos testes realizados utilizando-se a placa INTERDATA 2, leu-se corrente e tensão instantâneas, além da velocidade de avanço de arame, todas numa frequência de 4 kHz, durante 33 segundos. Para tanto, foi necessário desenvolver o "software" TUBINTER (-baseando-se no MIGREV, já existente no LABSOLDA) [5].

5.3 - Materiais Empregados

5.3.1 - Metais de Base

Para os testes dos itens 6.1 a 6.12, e do 6.14, foram utilizadas chapas de aço ABNT 1020 de 6,35 mm (1/4") espessura. Em 6.10 também foram empregadas chapas de aço ABNT 1020 de 12,7 mm (1/2"). Já para os ensaios mecânicos do item 6.13 o metal de base foi o aço API 5LX70 de 25,4 mm (1") de espessura.

5.3.2 - Consumíveis

Foram usados, nesse estudo, os seguintes consumíveis:

a) Eletrodos

O arame-eletrodo utilizado foi o eletrodo tubular E71T-1 de diâmetros 1,0; 1,2 e 1,6 mm. O primeiro é de procedência alemã, enquanto que os dois últimos foram fabricados no Brasil.

Segundo o fabricante brasileiro, o eletrodo E71T-1 possui fluxo rutilico, e é projetado para soldar na superfície aços doces ("mild") e de média resistência ($\sigma_r \leq 510$ MPa), em todas as posições [64]. O fabricante também recomenda a utilização de dois tipos de gases de proteção: Ar + 20% CO₂ ou CO₂ puro. Portanto, este eletrodo não é um eletrodo tubular auto-protetido, ou seja, aquele cujos gases gerados pelo fluxo são suficientes para conferir estabilidade ao arco e proteção à poça fundida.

As faixas de corrente e tensão recomendadas e as propriedades mecânicas típicas conseguidas em soldagens na superfície são as fornecidas nas tabelas 7 e 8, respectivamente.

Diâmetro ϕ [mm]	Corrente I [A]	Tensão U [V]
1,2	130 - 300	20 - 30
1,6	150 - 360	24 - 32

Tabela 07 - Variáveis de soldagem recomendadas para o E71T-1, na superfície [64].

PROPRIEDADES MECÂNICAS	σ_e [MPa]	σ_r [MPa]	Alongamento [%]	Tenacidade [J] (Charpy V, -20 °C)
com Ar + 20% CO ₂	540	570	26	70
com CO ₂ puro	520	560	26	70

Tabela 08 - Propriedades mecânicas do E71T-1, na superfície [64].

A opção pelo eletrodo E71T-1 é explicada pelos seguintes fatos: (a) por não ser auto-protetido gera menos gases, melhorando a visibilidade; (b) forma escória, protegendo um pouco mais as gotas metálicas e a poça de fusão contra a ação da água; e (c) pelo fato de se retirar elementos formadores de gases, sobra mais espaço para se adicionar, juntamente com os formadores de escória, outros constituintes como elementos-liga e estabilizadores de arco.

b) Gás

O gás, utilizado apenas no estudo do efeito da injeção de gás na expulsão da água do contato elétrico, foi o CO₂ puro. A pressão na saída do cilindro foi mantida em 5 bar, mas devido ao problema de vazamento (retorno) do gás para o cabeçote, sua pressão ao passar pelo bico de contato foi bem menor que este valor.

c) Bicos de contato

Para todo o trabalho foram utilizados bicos tradicionais de cobre niquelado. Entretanto, para os testes do item 6.3, estudo da influência do material do bico de contato, também foram empregados bicos de grafite e de bronze grafitado.

5.4 - Procedimentos Adotados

Um procedimento geral de soldagem foi empregado em todas as etapas deste trabalho. Além deste, procedimentos específicos foram adotados para alguns estudos, conforme a seguir.

5.4.1 - Procedimento Geral de Soldagem

Os testes foram de simples deposição sobre chapas, realizados na condição subaquática molhada com uma pequena lâmina d'água de 10 cm. Soldou-se na polaridade inversa (CC+), impondo-se diversas velocidades de avanço do arame para alguns valores de tensão de comando e velocidade de soldagem, até que fossem determinadas as variáveis mais adequadas à realização do ensaio. Todas as soldagens foram executadas de forma completamente automatizada, já que o arame eletrodo era continuamente alimentado pelo cabeçote e a pistola era conduzida pelo sistema automático de deslocamento da pistola. Ambos os sistemas (alimentação do arame e deslocamento da pistola), além da fonte de soldagem, eram comandados pelo microcomputador.

A fonte, embora universal, foi utilizada na modulação de característica estática de tensão constante. Logo, para a maioria dos testes, a tensão de comando (U) e a velocidade de avanço do arame (V_a) são variáveis independentes, enquanto que a corrente média (I_m) é uma variável dependente.

Em todos os ensaios foi realizada a leitura, seguida da impressão dos oscilogramas, de um dos seguintes grupos de variáveis: (a) corrente e tensão, utilizando o "software" TUBIMAC; (b) corrente e velocidade de avanço do arame, através do TUBVAR; ou (c) corrente, tensão e velocidade do arame, utilizando o TUBINTER.

5.4.2 - Procedimentos Específicos e Dados de Soldagem

Além do que já foi descrito no item 5.4.1, para o estudo de alguns dos tópicos abaixo relacionados foram adotados procedimentos específicos.

(a) *Verificação da influência da água*

Além das soldas molhadas de simples deposição sobre chapa, também foram realizadas soldagens a seco com as mesmas variáveis e parâmetros da solda molhada, para poder compará-las. A análise foi feita através de oscilogramas de corrente (I) e velocidade de avanço do arame (Va). As variáveis/parâmetros adotados foram:

Tensão de comando (U)	: 30 V
Velocidade do arame (Va)	: 6,0 m/min
Velocidade de soldagem (Vs)	: 25,0 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 20 mm
Eletrodo	: E71T-1, ϕ 1,0 mm
Polaridade	: CC+

Um estudo semelhante foi desenvolvido para estabelecer a influência do vapor d'água (e não mais da água) na região de contato elétrico. Para tanto, foi projetado e fabricado um bico de contato especial com prolongamento cerâmico, ver figura 9. O procedimento de soldagem é semelhante ao anterior, à exceção da dcp que aumentou significativamente e da coluna de água que neste caso é de poucos centímetros, suficiente apenas para cobrir a ponta do bico. Desta forma o arco fica dentro d'água e a região de contato elétrico fora da água, sofrendo apenas os efeitos do vapor.

(b) *Efeito da injeção de gás*

Para verificar a eficácia da injeção de gás pressurizado na expulsão de água da região de contato elétrico, foi necessário adaptar a pistola de soldagem, tapando os orifícios que conduziam o gás para o bocal. Desta forma, o CO₂ era forçado a passar pela pequena folga existente entre o bico de contato e o eletrodo. A avaliação foi feita através de oscilogramas de I e Va. As variáveis/parâmetros adotados foram idênticos aos do item (a), exceto pela presença do gás.

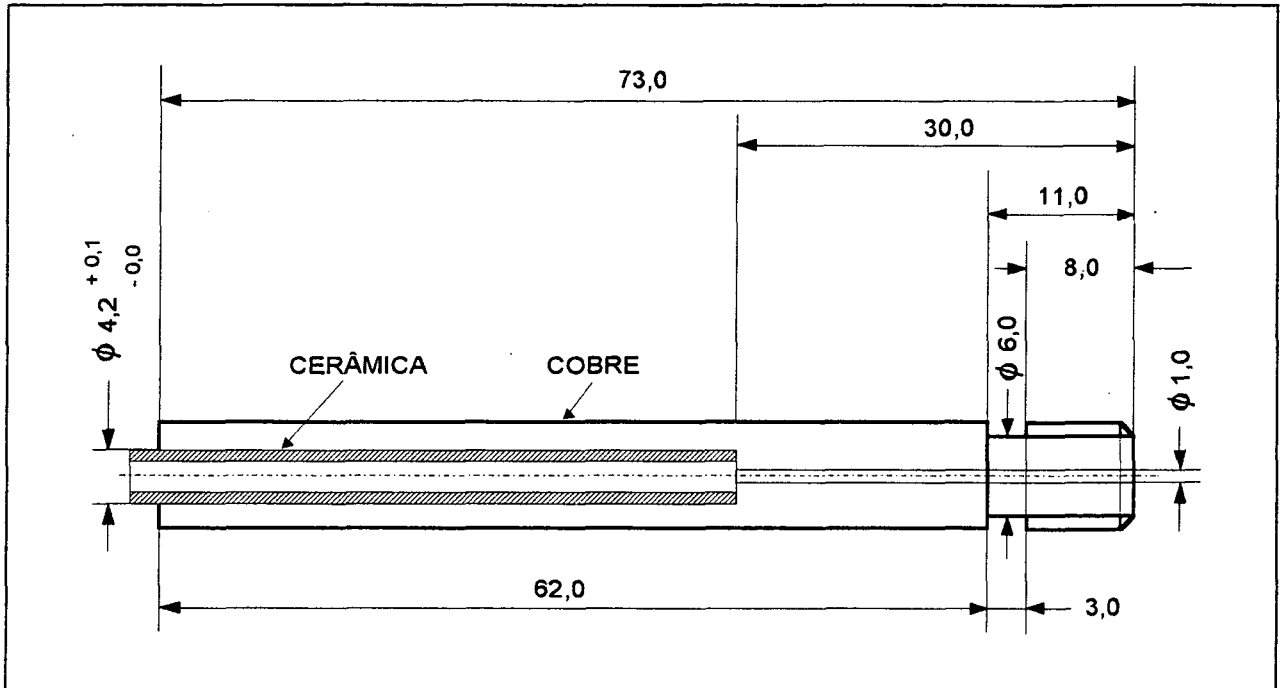


Figura 09 - Bico de contato com prolongamento cerâmico.

(c) Influência do material do bico de contato

O procedimento geral do item 5.4.1 foi empregado para três tipos de bicos (cobre, bronze grafitado e grafite). O estudo foi realizado baseando-se em oscilogramas de I e V_a e as variáveis e parâmetros de soldagem utilizados estão descritos abaixo. Em todos os outros estudos deste trabalho foram utilizados bicos convencionais de cobre.

Tensões de comando (U)	: 30, 32 e 34 V
Velocidade do arame (V_a)	: 6,0; 8,0 e 10,0 m/min, respectivamente.
Velocidade de soldagem (V_s)	: 25 cm/min
Distância contato-peça (d_{cp})	: 20 mm
Eletrodo	: E71T-1, ϕ 1,0 mm
Polaridade	: CC+

(d) Influência do diâmetro do eletrodo

O procedimento adotado foi o do item 5.4.1. O estudo foi realizado através de oscilogramas de I e V_a . Apesar das variáveis de soldagem mudarem com a mudança do diâmetro do eletrodo, procurou-se realizar os testes com as mesmas condições de soldagem, conforme a seguir:

Tensão de comando (U)	: 34 V
Velocidade do arame (Va)	: 10,0 m/min
Velocidade de soldagem (Vs)	: 25 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 20 mm
Eletrodo	: E71T-1, ϕ 1,0 e 1,2 mm
Polaridade	: CC+

(e) Mudança da indutância da fonte

O procedimento adotado foi o do item 5.4.1 e realizaram-se ensaios com diferentes valores de U e Va para cada um de três valores da indutância da fonte (10, 50 e 90% da faixa de operação). Os dados de soldagem empregados foram:

Tensão de comando (U)	: 33 V
Velocidade do arame (Va)	: 4,0 m/min
Velocidade de soldagem (Vs)	: 25 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 20 mm
Eletrodo	: E71T-1, ϕ 1,6 mm
Polaridade	: CC+

(f) Efeito da aceleração do arame na abertura do arco

O procedimento adotado foi semelhante ao do item 5.4.1, com as seguintes modificações: adquiriu-se três variáveis (I, U, Va) através do "software" TUBINTER, por um tempo total de 33 segundos ao invés dos 6 segundos dos outros testes. Devido ao maior tempo de leitura, utilizaram-se corpos de prova bastante longos que, para evitar uma deformação excessiva, tiveram que ser bem fixados por sargentos. Foi empregada toda a infra-estrutura do banco de ensaios SISDATASOLDA 1, mas a leitura dos dados foi feita pela placa INTERDATA 2 instalada no microcomputador do banco SISDATASOLDA 2. Portanto, foram utilizados dois micros, um para comandar o processo e outro para realizar a leitura das variáveis. Isto porque, conforme já citado no item 5.2.1, a IMAC não permite realizar aquisições de três variáveis em alta frequência.

Diferentes acelerações do eletrodo foram ajustadas diretamente no alimentador de arame, que possui um potenciômetro para acendimento suave do arco. Ao se alterar o valor do potenciômetro, estar-se-á modificando a taxa de crescimento da velocidade de avanço do arame na abertura e reaberturas do arco. A figura 10 ilustra esse fato. Nela pode-se verificar que após o início do processo,

o eletrodo sempre parte em direção à peça com 30% da velocidade do arame imposta. Quando o mesmo alcança o CP e ocorre a abertura do arco, a velocidade de avanço aumenta até chegar a 100% de V_a imposta. É exatamente a intensidade deste aumento de velocidade (aceleração) que é ajustado no potenciômetro. Ajuste em zero (ver figura 10) significa uma rampa de subida da V_a bastante inclinada, teoricamente vertical, enquanto que o potenciômetro em dez indica uma subida bem suave (baixa aceleração).

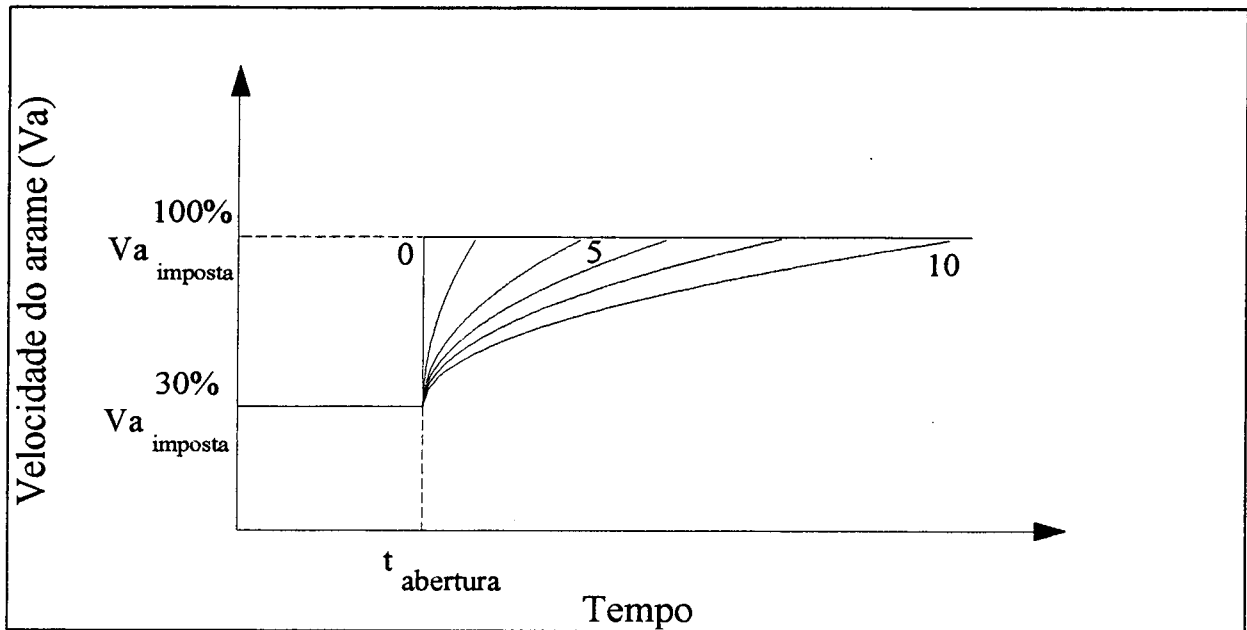


Figura 10 -Curvas de aceleração do arame na abertura do arco (potenciômetro de acendimento suave).

Para este estudo foram realizados diversos ensaios com o potenciômetro ajustado nos valores 1, 5 e 9, representando uma aceleração alta, média e baixa, respectivamente. As variáveis e parâmetros adotados foram:

Tensão de comando (U)	: 35 V
Velocidade do arame (V_a)	: 5,0 m/min
Velocidade de soldagem (V_s)	: 25 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 17 mm
Eletrodo	: ϕ 1,6 mm
Polaridade	: CC+

(g) Levantamento da faixa de trabalho de variáveis e parâmetros

Foi utilizado o procedimento geral de soldagem descrito no item 5.4.1, com eletrodos de diâmetros 1,0; 1,2 e 1,6 mm na polaridade CC+. Procurou-se realizar o mapeamento das faixas de trabalho da velocidade de avanço (V_a) e da tensão (U), sem variar muito a velocidade de soldagem e a distância contato-peça. Durante a determinação dos valores aceitáveis de V_a e U , fixava-se a velocidade de avanço e variava-se a tensão até chegar aos seus limites mínimo e máximo. Isto é, quando a continuidade do processo era afetada. Em seguida era estabelecido um novo valor para V_a e se repetia o processo. O levantamento estava completo quando também eram obtidos os valores mínimo e máximo da velocidade de avanço (V_a).

(h) Curvas de produção de material de adição

O levantamento das curvas de produção de material de adição foi realizado para diferentes diâmetros de eletrodo e polaridades, dentro dos limites das faixas de trabalho das variáveis/parâmetros anteriormente citados. Determinou-se a tensão média para algumas velocidades de avanço e manteve-se os mesmos valores de distância contato-peça (d_{cp}) e velocidade de soldagem (V_s) do item (g). A corrente média (I_m), que é uma variável dependente, foi lida durante o processo.

Os corpos de prova foram preparados com as menores dimensões possíveis (180 x 25 x 6,35 mm) para se ter uma boa resolução na medição da quantidade de material depositado. Ou seja, procurou-se evitar medir alguns gramas em CP's de vários quilogramas. Os corpos de prova foram pesados antes e depois dos ensaios, sendo que a diferença obtida foi a massa de material depositado. Dividindo-se este valor pelo tempo de realização do ensaio (tempo de arco aberto), obteve-se a produção em kg/h. As variáveis/parâmetros de processo utilizados durante os testes foram:

- Para eletrodo de ϕ 1,0 mm:

Velocidade do arame (V_a) : 4; 6; 8 e 10 m/min;
 Tensão de comando (U) : 30; 31; 33 e 34 V, respectivamente;
 Polaridade : CC+

- Para eletrodo de ϕ 1,2 mm:

Velocidade do arame (V_a) : 3; 4; 5; 6; 7 e 8 m/min;
 Tensão de comando (U) : 29; 30; 32; 33; 34 e 34 V, respectivamente;
 Polaridade : CC+

- Para eletrodo de ϕ 1,6 mm:

Velocidade do arame (V_a) : 3; 4; 5; 6; 7 e 8 m/min

Tensão de comando (U)	: 30; 32; 33; 35; 36 e 37V, respectivamente
Polaridade	: CC+

Em todos os testes os valores de dcp e Vs foram os mesmos do item (g).

Na verificação da influência da polaridade sobre a produção de material de adição, o eletrodo utilizado foi de ϕ 1.6 mm e todas as variáveis/parâmetros de processo foram os mesmos acima citados, exceto pela mudança de polaridade.

(i) Ensaios de macro e microdureza

Foram realizados ensaios de dureza Vickers com carga de 10 kgf (HV_{10}) e microdureza com carga de 40 g, numa seção transversal de um corpo de prova de simples deposição sobre chapa (CP1), que foi soldado nas seguintes condições:

Velocidade de avanço do arame (V_a)	: 16 m/min
Tensão de comando (U)	: 43 V
Velocidade de soldagem (V_s)	: 30 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 20 mm
Polaridade	: CC+
Eletrodo	: ϕ 1.0 mm

Procurou-se soldar numa condição não ideal (altos valores de V_a , U e V_s) para verificar a susceptibilidade da solda molhada ao surgimento de defeitos.

Primeiramente foram realizadas as medições de dureza HV_{10} ao longo de uma reta horizontal na seção transversal do corpo de prova. A seguir, as medições foram feitas na direção vertical da mesma seção. Como foi detectada a presença de uma trinca, decidiu-se então realizar mais quatro medições margeando a mesma.

Os ensaios de microdureza (40 g) foram realizados bem próximos à trinca, dentro dos grãos da ZAC de granulação grosseira.

(j) Análises metalográficas

Foram realizadas análises metalográficas em corpos de prova de simples deposição sobre chapa e em seções de juntas preenchidas com múltiplos passes.

Nos CP's de simples deposição sobre chapa foram feitas macro e micrografias para se ter uma noção dos dados geométricos de largura, reforço e penetração, além da microestrutura obtida. Foram realizados dois cortes transversais num mesmo cordão, nas seções de melhor e pior condição da sua superfície. O corpo de prova utilizado foi o mesmo dos ensaios de dureza (CP1), portanto, as variáveis e parâmetros desta solda são os mesmos do item (i). Um outro corpo de prova (CP2) foi soldado de ambos os lados e também cortado transversalmente ao cordão. Nestes dois passes os dados de soldagem também foram os mesmos do item (i), à exceção da $V_s = 25$ cm/min e $U = 40$ V. Na seção de melhor condição da superfície de solda do CP1, além da macrografia também foram feitas micrografias em quatro áreas distintas: metal de base, transição metal base/ZAC, transição ZAC de granulação grosseira/metal de solda e interior do metal de solda. A figura 11 é um desenho esquemático do cordão de solda do CP1, com localização destes pontos de análise micrográfica.

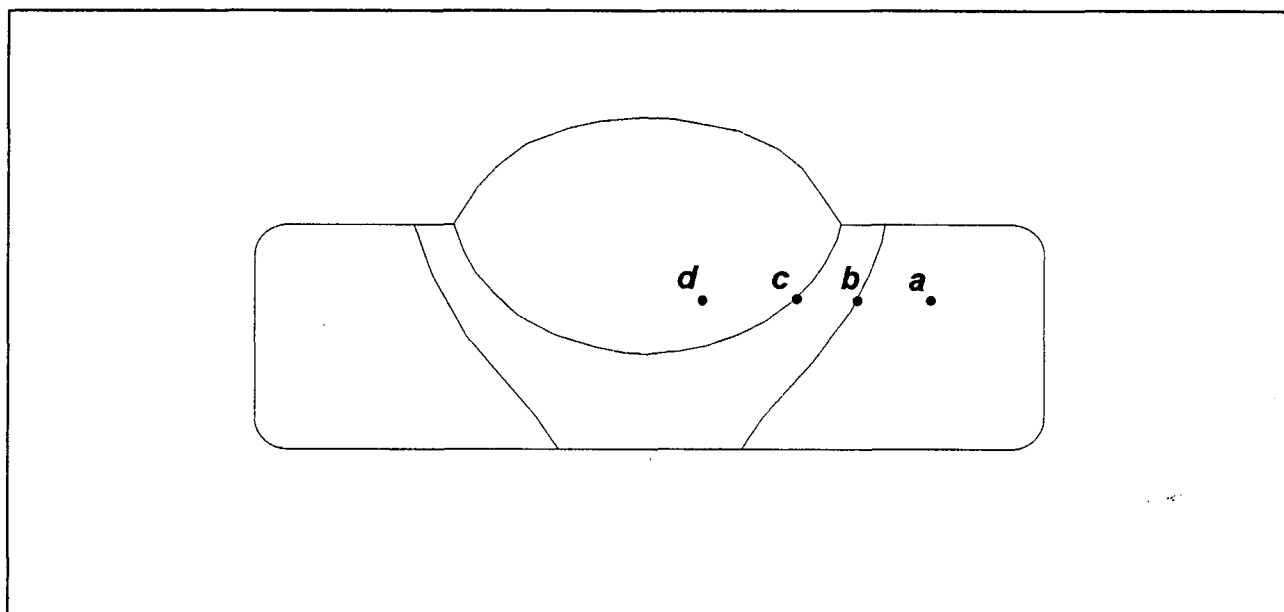


Figura 11 - Seção transversal do CP1 com a localização dos pontos de análise micrográfica.

Uma junta de 12,7 mm (junta soldada n° 1) foi preenchida com diversos passes e cortada nas direções longitudinal e transversal ao cordão, para realização de macrografias e verificação do surgimento de porosidades. As chapas de 1/2" foram chanfradas com ângulo de 45° em relação à vertical e ponteadas sobre um cobre-juntas com folga de 5 mm entre ambas (junta em V de 90°). Antes da realização da soldagem as chapas foram fixadas por "cachorros" para evitar um empenamento excessivo. A condição ideal sob a ótica da estabilidade foi:

Velocidade de avanço do arame (V_a)	: 5 m/min
Tensão de comando (U)	: 37 V
Velocidade de soldagem (V_s)	: 20 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 15 a 20 mm
Polaridade	: CC+
Eletrodo	: ϕ 1.6 mm

(k) Análise da susceptibilidade às trincas a frio

Além dos ensaios de dureza HV_{10} e microdureza com carga de 40 g descrito no item (i), foi realizada análise química do metal de base para determinação do carbono equivalente, obtendo assim mais dados para o estudo do surgimento de trincas. Apesar de ser um importante parâmetro, não foi feito o teste de hidrogênio difusível.

(l) Influência das variáveis/parâmetros sobre o surgimento de defeitos

O estudo da relação entre as variáveis de soldagem e os defeitos foi realizado baseando-se em ensaios radiográficos. O procedimento de soldagem adotado foi o mesmo do item 5.4.1, ou seja, os ensaios foram de simples deposição sobre chapas de 6,35 mm sem preenchimento de junta. Isto reduziu bastante o tempo de preparação e as dimensões dos corpos de prova, fatores importantes devido ao grande número de CP's necessários ao estudo. Além do procedimento geral adotou-se a seguinte metodologia:

- ⇒ mudar o valor de só uma variável ou parâmetro, enquanto as demais permaneciam fixas;
- ⇒ identificar e radiografar os CP's;
- ⇒ classificar por tamanhos os poros presentes nas radiografias;
- ⇒ contar o número de poros em cada classe de tamanho;
- ⇒ comparar os resultados baseando-se nas classes e quantidades de poros.

Para a classificação dos poros por tamanhos utilizou-se a seguinte terminologia:

p = poro pequeno ($\phi \leq 0,5$ mm);

m = poro médio ($0,5 \leq \phi < 1,0$ mm);

G = poro grande ($1,0 \leq \phi < 2,0$ mm);

GG = poro super grande ($\phi \geq 2,0$ mm).

Por exemplo, $3p$ significa três poros pequenos e $10GG$ corresponde a dez poros super grandes. As fases de classificação dos poros por tamanhos e contagem do número de poros em cada classe foram realizadas utilizando-se um negatoscópio. As radiografias foram executadas com seis corpos de prova dispostos lado a lado para racionalizar a utilização de filmes radiográficos, já que o custo destes ensaios é elevado.

As variáveis e parâmetros em estudo foram a velocidade de avanço do arame (V_a), a tensão (U), a polaridade e o diâmetro do eletrodo.

(m) Ensaios mecânicos

Para a realização dos ensaios mecânicos duas juntas de 25,4 mm de espessura (juntas soldadas n^{os} 2 e 3) foram preenchidas com múltiplos passes e cortadas transversalmente ao cordão para a retirada dos corpos de prova.

As chapas de 1" foram chanfradas com ângulo de 30° em relação à vertical e ponteadas sobre um cobre-juntas com folga de 5 mm entre ambas, formando uma junta em V de 60°. O comprimento do cobre-juntas excedia as chapas em 10 cm (5 cm de cada lado), o que possibilitava o acendimento e a extinção do arco fora das mesmas. Antes da realização da soldagem as chapas foram fixadas por "cachorros" de modo a limitar o empenamento máximo a 5°, conforme exigência da norma AWS A5.5-81 [65]. Como a junta soldada n° 1 deformou bastante mesmo com a utilização de dois "cachorros" de mesma espessura das chapas (12,7 mm ou 1/2"), decidiu-se preencher as juntas 2 e 3 com três "cachorros" de 1" de espessura para evitar tal problema e atender à norma acima citada.

Foram necessários diversos passes para o completo preenchimento das juntas e, ao término de cada um destes, a escória era completamente retirada através de martelamento, escovação e esmerilhamento. Esta última operação, além da retirada da escória, tinha a função de desbastar cerca de 40% do reforço do cordão com o objetivo de deixar a sua superfície mais uniforme, antes da realização dos passes subsequentes. O ângulo de inclinação da pistola foi de 45° em relação à vertical, nos cordões das extremidades. Desta forma, procurou-se direcionar o eletrodo para os chanfros da junta e evitar o defeito de falta de fusão. Nos demais passes a pistola foi mantida perpendicularmente à peça.

Conforme citado anteriormente, a junta soldada n° 1 de 1/2" de espessura teve por função fornecer uma idéia do nível de defeitos e dificuldades operacionais durante o preenchimento de uma junta real. Portanto, antes da realização das análises metalográficas do item (j), a referida junta foi radiografada para verificar a quantidade de poros. Como o nível de porosidades foi elevado, decidiu-se reduzir um pouco o valor da tensão de 37 para 35 V, apesar do primeiro valor ter sido considerado

melhor sob a ótica da estabilidade do arco. Logo, as condições de soldagem para o preenchimento das juntas 2 e 3 foram:

Velocidade de avanço do arame (V_a)	: 5 m/min
Tensão de comando (U)	: 35 V
Velocidade de soldagem (V_s)	: 20 cm/min
Distância contato-peça (d_{cp})	: 15 a 20 mm
Polaridade	: CC+
Eletrodo	: ϕ 1.6 mm

Para a realização do ensaio radiográfico na junta soldada de 1/2" , removeu-se o reforço do cordão com uma esmerilhadeira e retirou-se o cobre-juntas numa fresadora, de modo que as duas superfícies ficassem planas e paralelas.

O carretel do arame-eletrodo era guardado numa estufa para evitar oxidação da sua superfície, pois já haviam sido constatados problemas de estabilidade de arco num eletrodo que apresentava sua superfície bastante oxidada.

Primeiramente foram retirados quatro CP's para ensaio Charpy e dois para ensaio de tração da junta soldada nº 2, conforme figura 12. Devido à alta dispersão dos valores obtidos, decidiu-se repetir estes seis ensaios, retirando os novos CP's da outra junta (junta soldada nº 3). Realizaram-se também quatro ensaios de dobramento de raiz (dois CP's para cada junta) e um ensaio de dobramento lateral. A localização dos corpos de prova nas juntas é apresentada nas figuras 12 e 13.

O corpo de prova utilizado nos ensaios de tração é apresentado na figura 14 e segue as recomendações do código ASME - Seção IX [66]. Nestes ensaios foram determinados alguns valores da tensão limite de resistência à tração (σ_r). A extração do CP's foi realizada no sentido transversal do metal de solda, de tal forma que o cordão ficasse no centro dos mesmos, ver figura 14, conforme [66].

A figura 15 ilustra o corpo de prova utilizado nos ensaios de dobramento de raiz e lateral, sendo que o mesmo também está em conformidade como o código ASME [66]. O reforço da solda, que é transversal ao CP, foi totalmente removido por usinagem, ficando no mesmo plano do metal base (chapas soldadas). O restante do material foi retirado do lado da raiz da solda, até que se atingiu a espessura desejada (3/8"). O dobramento transversal de raiz foi realizado dobrando o CP de forma que a raiz da solda ficasse na superfície convexa (externa) do CP dobrado. Idem para o dobramento transversal lateral, só que neste a lateral do CP é que se tornou a superfície convexa (externa).

O corpo de prova utilizado nos ensaios de impacto Charpy-V é apresentado na figura 16 e segue

as recomendações da norma ASTM [67]. Os CP's foram retirados de tal forma que o entalhe ficasse no centro do cordão de solda. A temperatura de realização dos ensaios foi de 0 (zero) ° C .

(n) Corrente pulsada

O procedimento adotado foi o do item 5.4.1, e foram utilizados dois dos quatro diferentes modos de modulação da corrente e/ou tensão na soldagem com corrente pulsada, que são: a) Imposição da corrente na base e no pulso; b) Comando de tensão na base e no pulso; e o modo misto que pode ser com c) Imposição de corrente na base e tensão no pulso e d) Tensão na base e corrente pulso. O primeiro modo a ser empregado foi o da imposição de corrente na base e no pulso, sendo que a melhor condição foi obtida para:

Corrente de pulso (I_p)	: 180 A
Tempo de pulso (t_p)	: 2 ms
Corrente de base (I_b)	: 150 A
Tempo de base (t_b)	: 4 ms
Velocidade do arame (V_a)	: 5,4 m/min
Velocidade de soldagem (V_s)	: 20 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 20 mm
Eletrodo	: ϕ 1,6 mm
Polaridade	: CC+

Devido à dificuldade inicial de se ajustar tais variáveis, decidiu-se então utilizar o modo misto com imposição de corrente na base e tensão na fase de pulso. A melhor condição obtida foi para:

Velocidade do arame (V_a)	: 5 m/min
Tensão de pulso (U_p)	: 35 V
Tempo de pulso (t_p)	: 2 ms
Corrente de base (I_b)	: 180 A
Tempo de base (t_b)	: 4 ms
Velocidade de soldagem (V_s)	: 20 cm/min
Distância contato-peça (dcp)	: 20 mm
Eletrodo	: ϕ 1,6 mm
Polaridade	: CC+

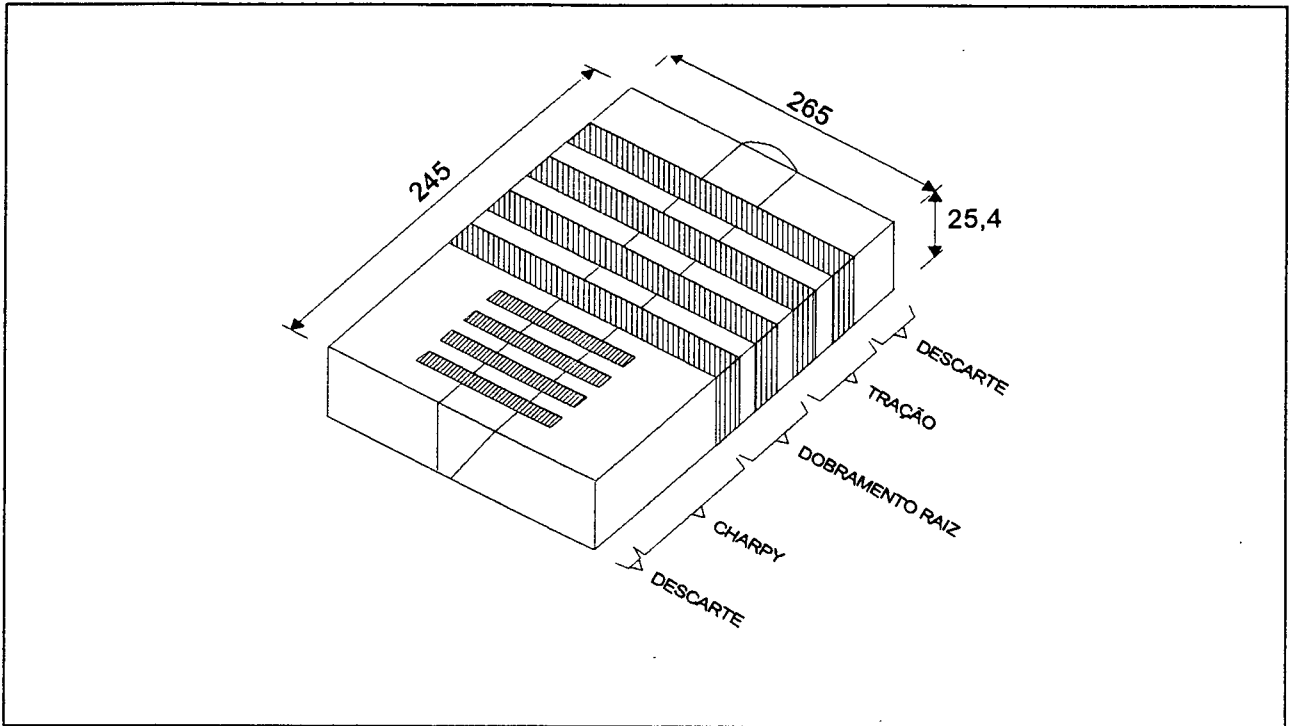


Figura 12 - Localização dos CP's na junta soldada n° 2.

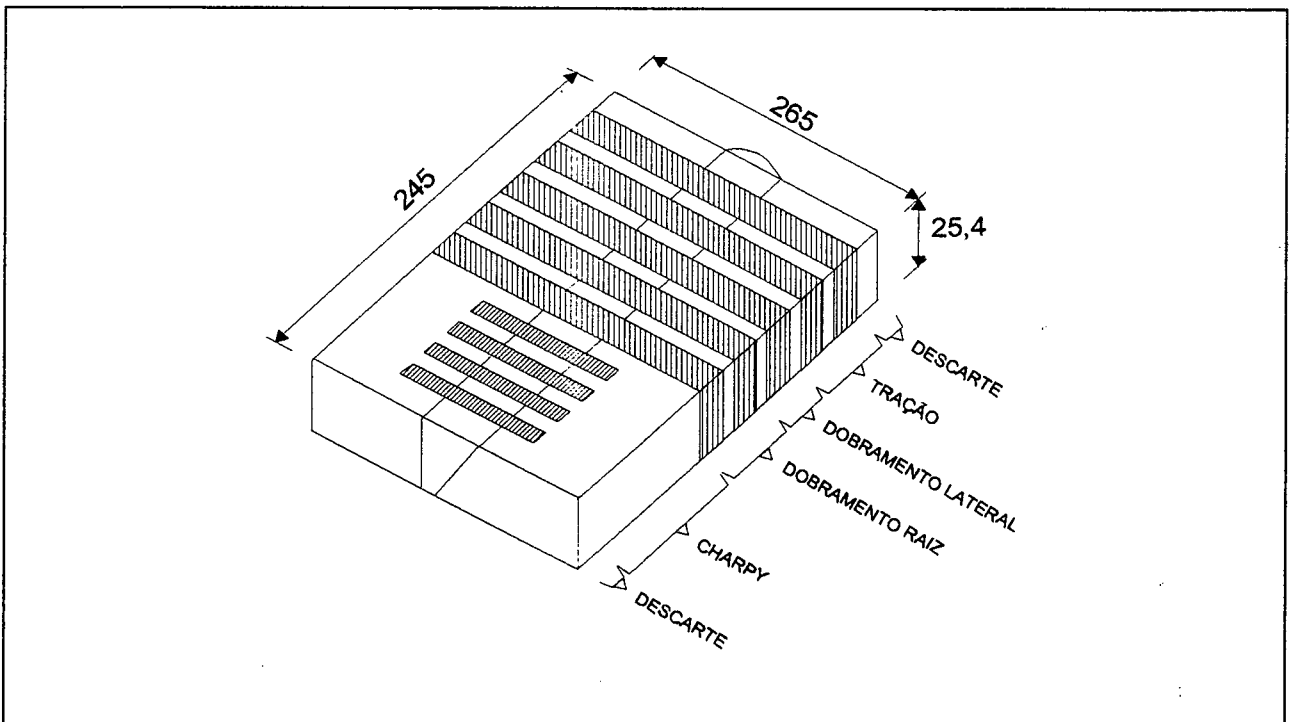


Figura 13 - Localização dos CP's na junta soldada n° 3.

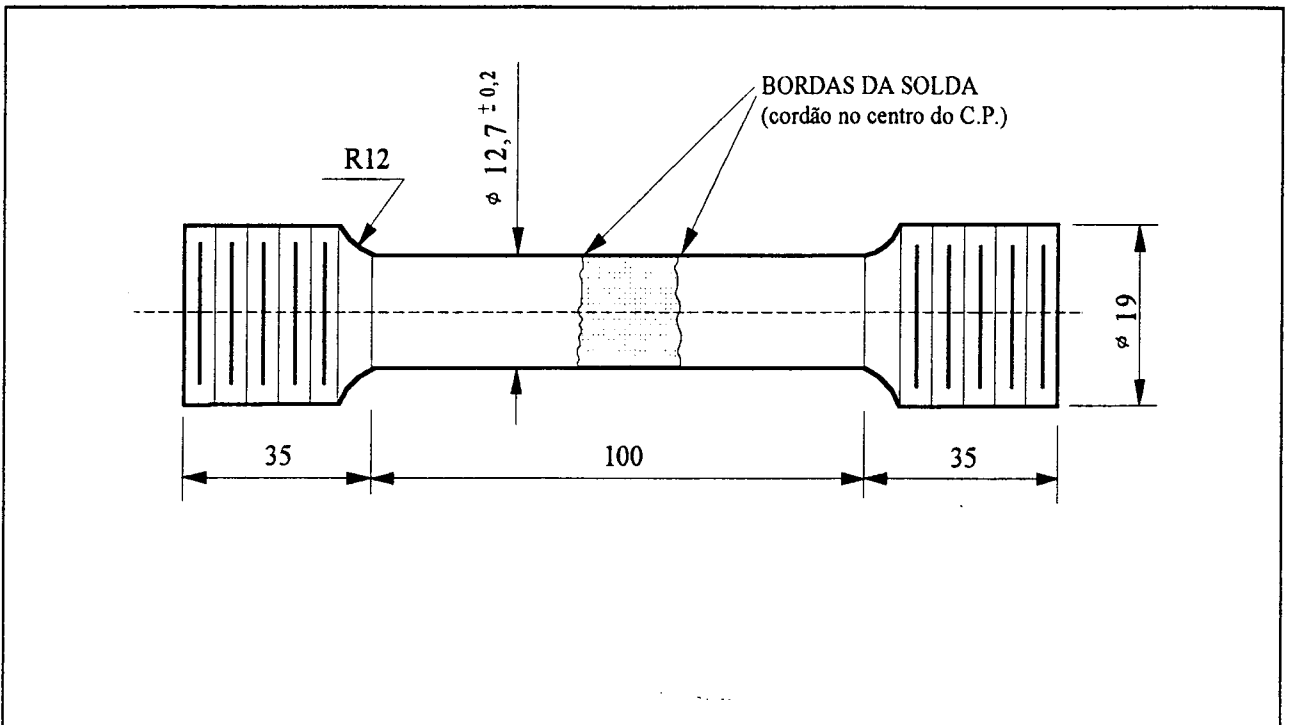


Figura 14 - Corpo de prova de tração.

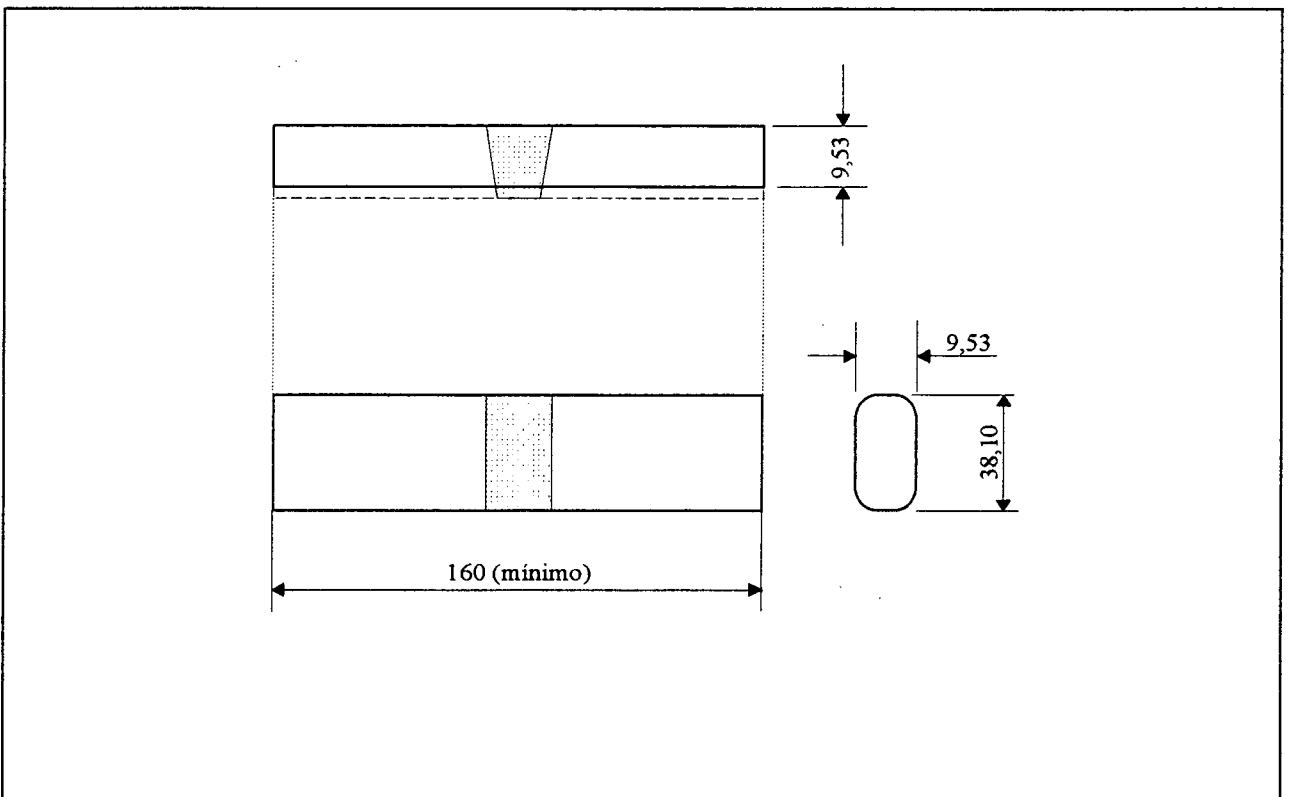


Figura 15 - Corpo de prova de dobramento.

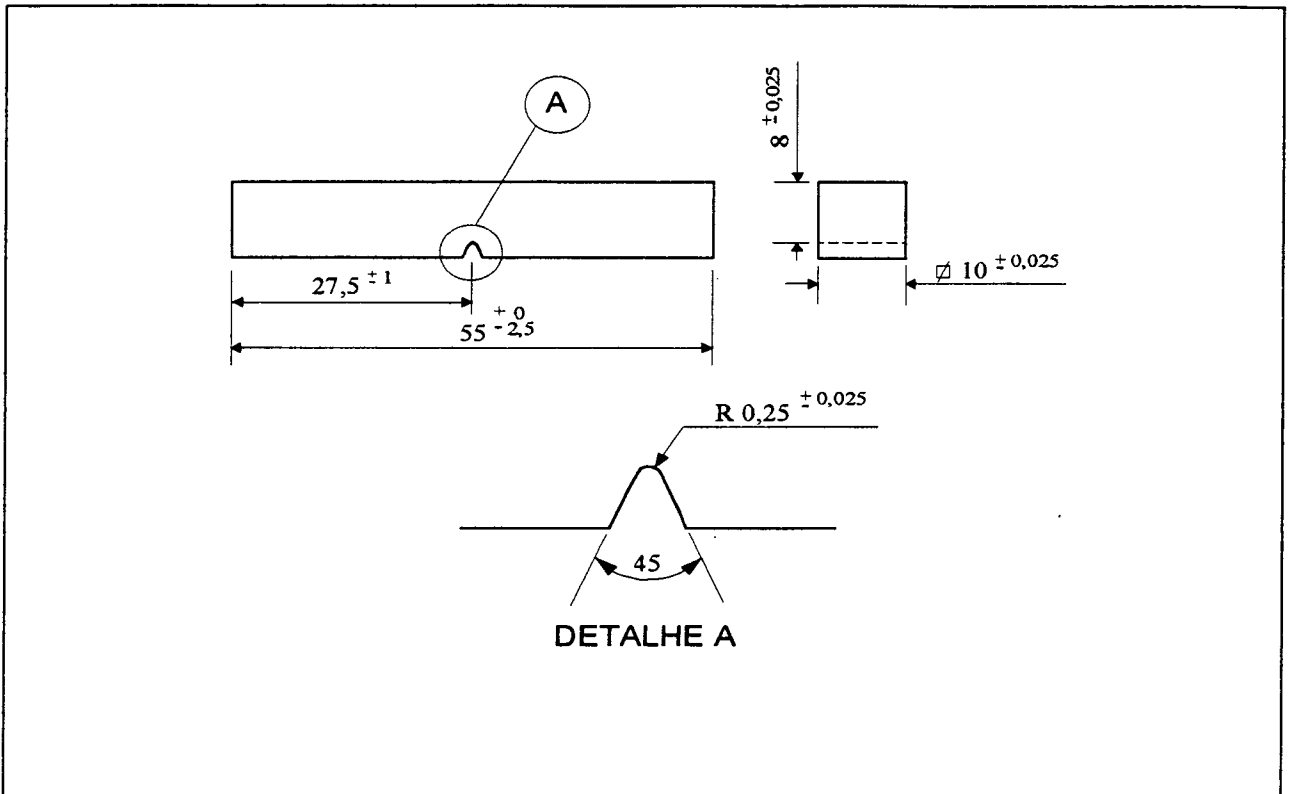


Figura 16 - Corpo de prova de impacto Charpy - V.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - Influência da Água sobre a Estabilidade do Processo

Sabia-se de antemão que a soldagem subaquática molhada é mais problemática que a soldagem a seco no que se refere à estabilidade do arco e altas taxas de resfriamento, o que leva a uma maior dureza, menor resistência mecânica da junta e pior aspecto visual do cordão [7, 8, 16]. Também eram esperados problemas operacionais relacionados com a manutenção do arco (continuidade do processo) mas, antes de tomar decisões, era necessário quantificar ou, pelo menos, ter uma idéia da intensidade destes problemas. Por esta razão fizeram-se alguns testes preliminares, uns completamente a seco e outros na condição subaquática molhada, para efeito de comparação [5, 6]. Os oscilogramas das figuras 17 e 18 ilustram os dois casos, sendo que em ambos a única variável foi a presença da água, tudo o mais permanecendo constante. O “software” utilizado foi o TUBVAR, e as variáveis e parâmetros adotados constam no item 5.4.2 (a).

Pode-se observar na figura 17 que na soldagem a seco o desvio padrão da corrente (DP) foi baixo (igual a 18 A) e não ocorreram extinções do arco durante o processo. Já na soldagem subaquática molhada (ver figura 18) aconteceram diversas extinções de arco (corrente nula) e um alto DP da corrente em relação à corrente média obtida, além de trancamentos do eletrodo no bico de contato, facilmente detectados no oscilograma da velocidade de avanço do arame. Percebe-se, portanto, que a presença da água reduz consideravelmente a estabilidade do arco na soldagem subaquática molhada.

Verificou-se que durante a transferência de corrente, devido a presença da água, ocorrem faiscamentos que causam microfusões do arame no bico de contato. Isto explica as interrupções do processo evidenciadas nos oscilogramas da figura 18. Em alguns casos, estas microfusões provocaram fortes trancamentos do eletrodo no bico, com a consequente interrupção do processo, conforme pode ser visto nos cordões superiores da figura 19.

Após alguns desenvolvimentos do processo, conseguiu-se realizar soldas sem interrupção do arco, com boa molhabilidade e penetração, e escória de fácil remoção. Além disso, obteve-se cordões de bom aspecto visual para uma solda molhada. Entretanto, foi verificado através dos

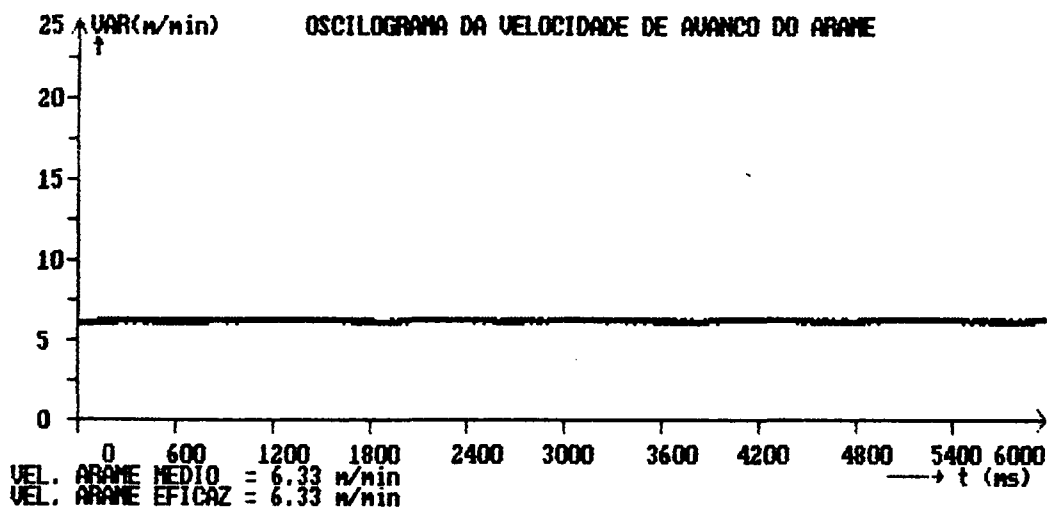
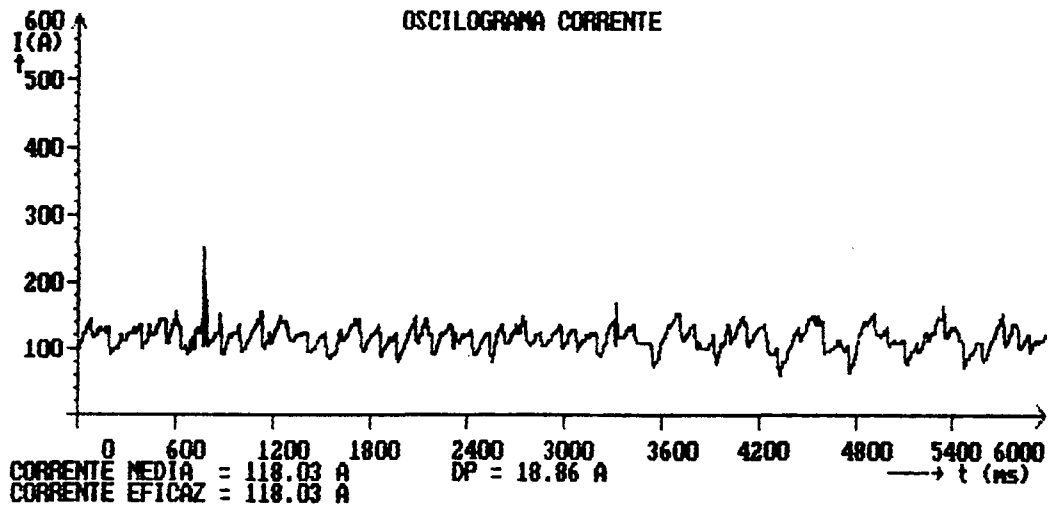


Figura 17 - Oscilogramas de soldagem a seco, [5, 6].

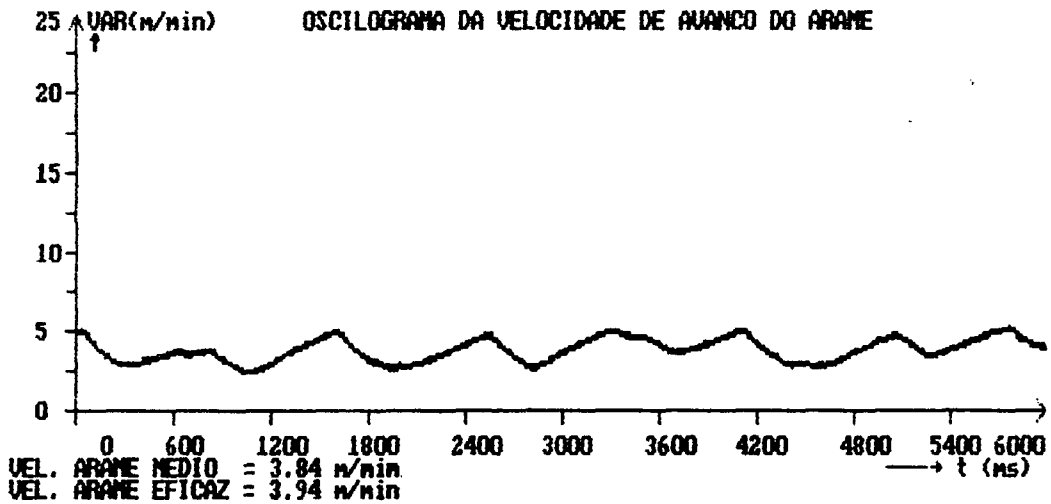
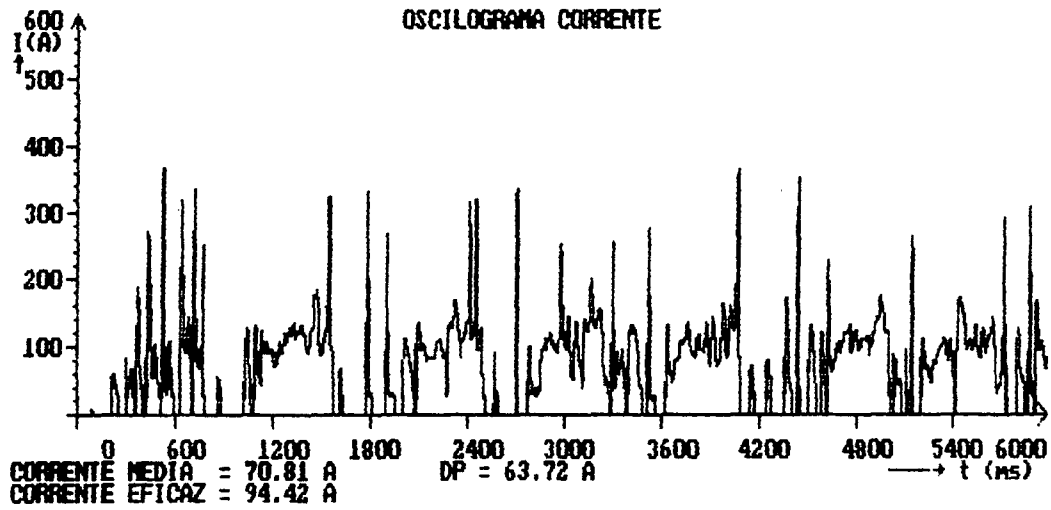


Figura 18 - Oscilogramas de soldagem subaquática molhada sem gás, [5, 6].

oscilogramas que mesmo nestes testes que apresentaram bons resultados, ocorriam microfusões do eletrodo no bico de contato. Como estas são resultantes da transferência de um alto valor de corrente na presença da água, situação típica da soldagem molhada, as microfusões são inerentes ao próprio processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular. Portanto, foi constatado que sempre ocorrem microfusões do eletrodo no bico de contato, que podem chegar a causar trancamentos. Desta forma, um dos fatores que determina a diferença entre uma solda de boa qualidade e uma outra ruim é a intensidade destes trancamentos, que podem ser dos seguintes tipos:

a) forte (ou trancamento com interrupção do processo) - ocorre a interrupção definitiva do processo e o cordão nem chega a se formar. Os cordões superiores da figura 19 são exemplos deste tipo;

b) médio - ocorre uma interrupção parcial do processo, que é restabelecido logo em seguida. A solda apresenta uma falha no local do trancamento, conforme ilustra o 2º cordão da figura 20;

c) fraco (ou microtrancamento) - o processo ocorre sem qualquer problema aparente para a solda, que apresenta um bom aspecto visual, conforme a figura 21.

O estudo da estabilidade do arco foi realizado não somente através da observação do aspecto visual dos cordões de solda obtidos, mas também, e principalmente, baseando-se nos oscilogramas de corrente, tensão e velocidade de avanço do arame (isto é, dos valores instantâneos destas variáveis ao longo do tempo). Oscilogramas de uma soldagem com trancamentos fortes já foram apresentados na figura 18, onde percebem-se longos tempos de arco extinto (corrente nula). No oscilograma de corrente da figura 22 podem ser observados seis trancamentos fracos (ou microtrancamentos), por volta de 2.400, 4.500 e 6.000 ms (pontos onde $I=0$). Diferentemente do que ocorre na figura 18, percebe-se que na figura 22 o tempo em que a corrente se anula é bastante reduzido, porque os trancamentos são fracos e, conseqüentemente, fáceis de serem vencidos pela força do alimentador do arame. A solda que corresponde a estes oscilogramas pode ser vista no cordão do meio da figura 23, onde percebe-se um bom aspecto visual e ausência de interrupções.

Os oscilogramas da figura 22 foram gerados pelo “software” TUBIMAC que foi o primeiro programa a ser utilizado neste trabalho. Conforme citado no item 5.2.3, foi verificado que baseando-se só nos oscilogramas de corrente e tensão do TUBIMAC não é possível provar a existência de trancamentos durante o processo. A razão para isto é que quando ocorre um

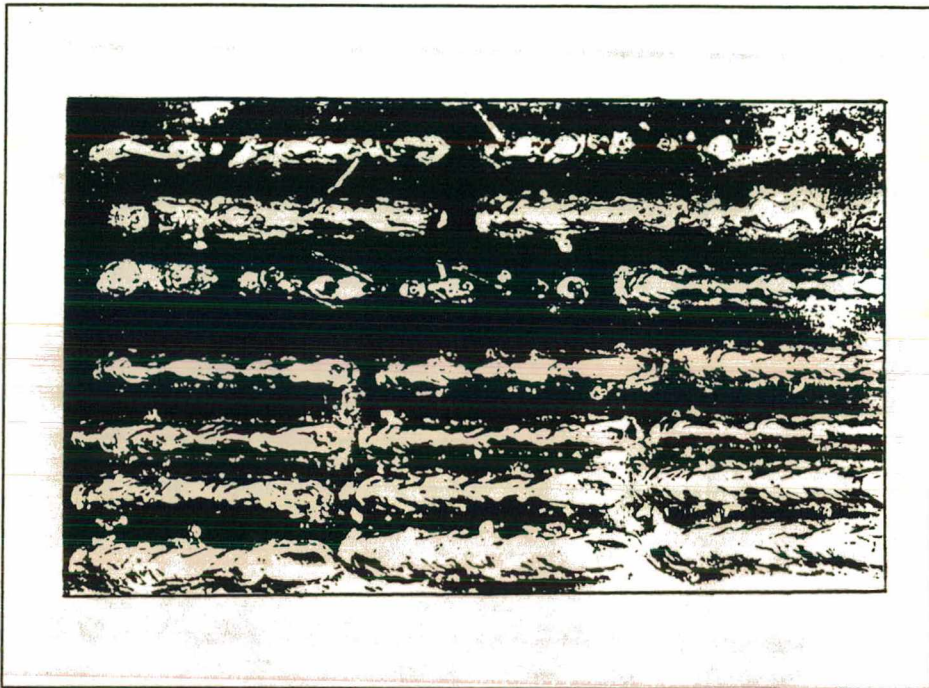


Figura 19 - Cordões de solda com e sem trancamentos fortes.

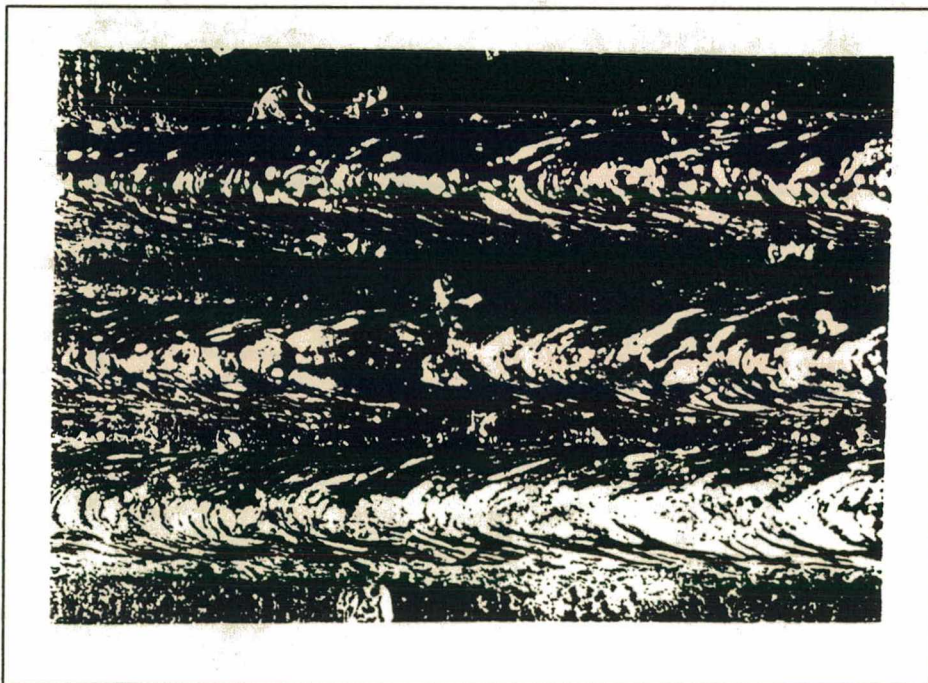


Figura 20 - Cordões de solda com e sem trancamentos do tipo médio.

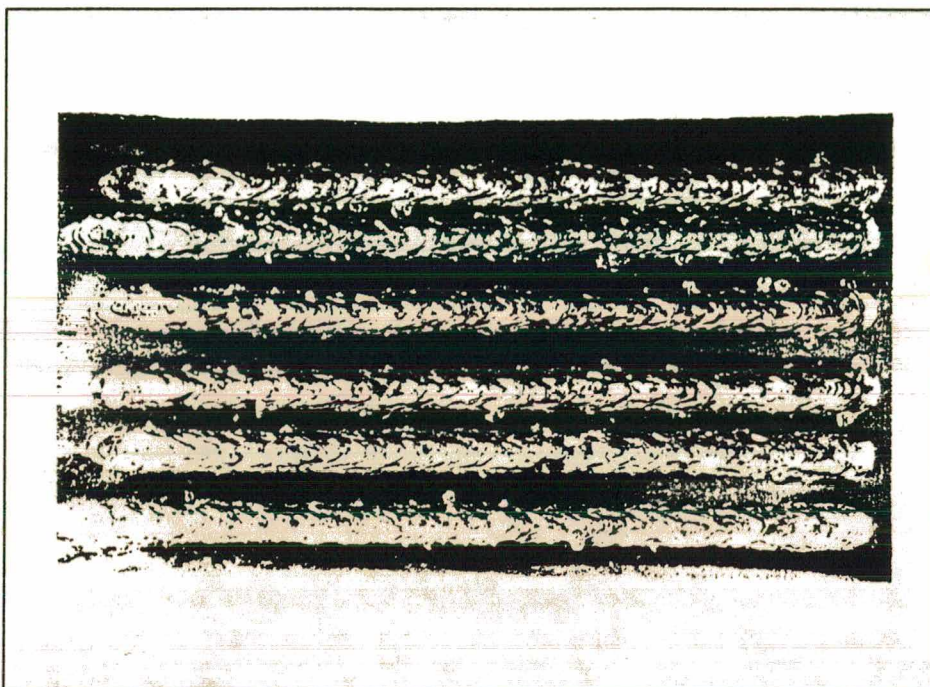


Figura 21 - Cordões de solda com trancamento tipo fraco.

trancamento a corrente se anula ($I=0$) e a tensão sobe para a tensão de arco aberto ($U=U_0$), e esta condição sempre ocorre quando há extinção do arco, mesmo que seja por um outro motivo qualquer. Desenvolveu-se então o “software” TUBVAR, que além da leitura da corrente (I), lê a velocidade de avanço do arame (V_a), pois esperava-se que V_a fosse nula quando ocorresse uma microfusão ($V_a=0$ quando $I=0$). Entretanto, foi constatado nestes oscilogramas que mesmo obtendo valores nulos de corrente, a velocidade correspondente não chegava a zero (ver figura 18). O motivo de tal problema é que quando o arame tranca no bico, o motor que fica no cabeçote, continua alimentando o eletrodo, que acaba se acumulando dentro do conduíte. Isto faz com que o arame exerça uma grande força sobre o bico, rompendo a microfusão e desprendendo-se deste, antes que a sua alimentação real chegue a zero. Como o medidor de velocidade de avanço fica no cabeçote ele não acusa velocidade nula, mas apenas um decréscimo. Além disso, para que se possa ler a velocidade de avanço do arame utiliza-se um conversor frequência-tensão que funciona como um filtro para o sinal, devido à sua base de tempo (isto é, tempo de contagem dos pulsos para posterior conversão em frequência) [5, 6].

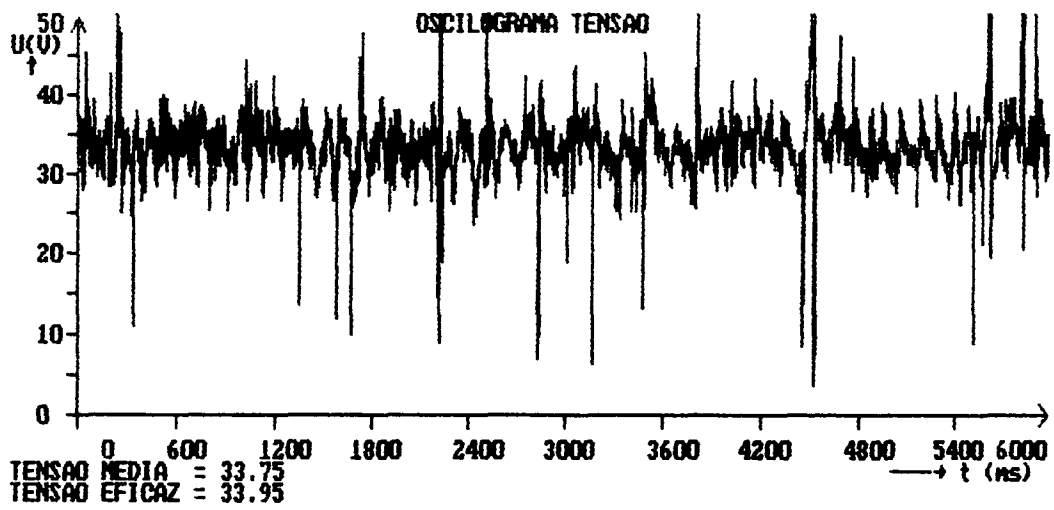
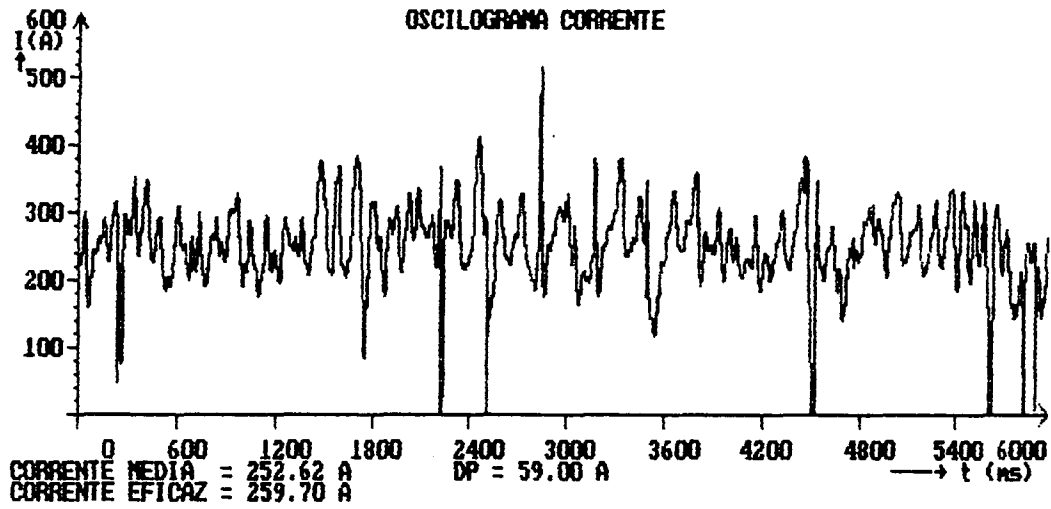


Figura 22 - Oscilogramas de uma soldagem com trancamentos do tipo fraco.

6.1.1 - Efeito do Vapor D'Água

Para a verificação da influência do vapor d'água (e não mais da água) na região de contato elétrico, foi projetado e construído um bico de contato especial com prolongamento cerâmico, conforme figura 9. Como a cerâmica é um material não condutor, conseguiu-se uma maior distância entre o arco voltaico e o contato elétrico (distância contato-peça), o que possibilitou realizar testes subaquáticos com apenas o arco voltaico e a ponta da pistola dentro d'água, e o contato elétrico fora da água.

Os resultados obtidos aproximaram-se dos fornecidos pela figura 18, ou seja, o vapor d'água na região de contato elétrico também provoca microfusões, reduzindo muito a estabilidade do processo. Para o mesmo tempo de aquisição, de 6 segundos, foi verificado um maior número de trancamentos, alguns deles tão intensos que o eletrodo fundiu dentro do bico e não mais saiu. Sabe-se entretanto, que este aumento do número e intensidade dos trancamentos também é devido ao excessivo aquecimento e conseqüente dilatação do arame dentro do bico, decorrente da grande distância contato-peça, que aumentou em 43 mm (que é o comprimento do prolongamento cerâmico).

6.1.2 - Modo de Transferência

Devido à formação de bolhas gasosas na região do arco é mais difícil determinar o modo de transferência do arame tubular na soldagem molhada do que na soldagem a seco. Mesmo com este agravante, constatou-se que o modo de transferência metálica é curto-circuito, o que concorda com afirmações da literatura [28,29]. Esta constatação foi feita de duas formas:

- através dos oscilogramas de corrente, tensão e velocidade do arame;
- através da observação do arco de forma direta, de forma indireta (projetado em tela), ou através de filmagem com câmera submarina.

Da análise dos oscilogramas percebe-se não somente que o modo de transferência é por curto-circuito, mas também que ocorrem dois tipos de curtos-circuitos: sem transferência metálica e com transferência metálica. O primeiro tipo aparece em maior número e é decorrente de um arco voltaico pequeno e estreito. Este arco, por sua vez, é devido à presença da água que torna a atmosfera menos ionizável que uma atmosfera gasosa a seco, além de favorecer uma grande perda de calor pelas laterais do arco. Este comprimento de arco bem pequeno faz com que a gota, em

fase de crescimento, toque constantemente a poça de fusão sem que seja transferida para a mesma. Estes contínuos toques da gota na poça, curtos-circuitos sem transferência, é que causam uma oscilação de pequena amplitude e alta frequência nos oscilogramas de corrente e tensão. Tal fato pode ser notado ao longo dos oscilogramas da figura 22, por exemplo entre 600 e 1.200 ms. O outro tipo de curto-circuito, curto com transferência metálica, é caracterizado por um aumento da corrente e um decréscimo da tensão ($I \rightarrow \infty$ e $U \rightarrow 0$). Destas duas variáveis a que sofre uma mudança mais significativa é a tensão, conforme pode ser visto, também na figura 22, por volta de 1300 ms. Portanto, o oscilograma da tensão é indispensável na diferenciação entre os curtos-circuitos com e sem transferência de metal.

A outra forma adotada no estudo da transferência metálica, observação do arco, foi realizada de três maneiras: a) observando diretamente o arco através do vidro do aquário, com o auxílio de uma máscara de soldador; b) projetando o arco numa tela situada fora do aquário, com o auxílio de uma lente e c) filmando o arco. Na primeira forma, observação direta do arco, percebeu-se apenas uma contínua oscilação em sua luminosidade, devido à instabilidade do processo. Na segunda forma, projeção do arco, colocou-se a tela a 1 m do aquário, o que possibilitou uma ampliação da imagem. Entretanto, além da imagem ficar invertida, não foi possível gravar ou ver a soldagem em câmera-lenta. Portanto, esta técnica de estudo, não acrescentou muito em relação à primeira. A última das técnicas de observação, a filmagem do arco, foi a que apresentou melhores resultados. Foi empregada uma câmera específica para filmagens subaquáticas, resistente a até 50 atm ou 500 m de profundidade, emprestada pelo CENPES/PETROBRÁS. Como a saída desta câmera era um sinal de vídeo, utilizou-se um vídeo cassete para gravar a soldagem e fazer a conversão para sinal de televisão. Portanto, além de observar a imagem num monitor de TV, foi possível gravá-la e revê-la em câmera-lenta. O principal benefício desta técnica foi a observação da mudança de luminosidade em alguns trechos do cordão. De forma geral foi observado um arco de pequena luminosidade intercalado por curtos períodos escuros seguidos de grande luminosidade. Estes intervalos escuros seguidos de outros bem claros podem ser os curtos-circuitos com transferência metálica. Infelizmente, não foi possível ver realmente a gota sendo transferida, devido à baixa velocidade de abertura do obturador da câmera, associado ao fato de que a câmera-lenta do vídeo é limitada. Acredita-se que com o uso de uma câmera que filme em alta velocidade seja possível ver a transferência.

Devido a estas limitações no equipamento de filmagem, decidiu-se cortar e recolher as pontas do eletrodo ao término de cada cordão. Organizaram-se os pedaços de eletrodo em ordem crescente do tamanho da gota que ficava presa na ponta, conforme figura 24. É importante observar que esta foto representa a geometria da gota durante a extinção do arco, o que não



Figura 23 - Cordões de bom aspecto visual (com microtrancamentos).

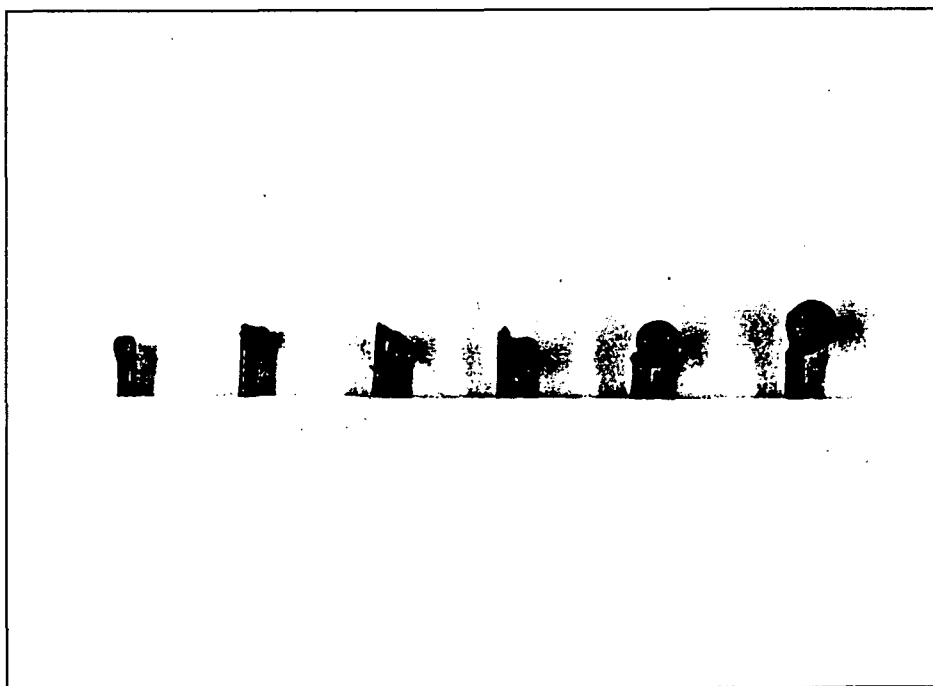


Figura 24 - Geometria e localização das gotas na extinção do arco.

implica que durante a soldagem ocorra o mesmo. Apesar disto, a figura 24 é representativa pois fornece uma boa idéia do tamanho das gotas e sua localização em relação ao eletrodo. Quanto ao tamanho, percebe-se que é grande, chegando até a três vezes o diâmetro do eletrodo. No que se refere à localização da gota, nota-se que as mesmas são formadas sempre na lateral do eletrodo, já que no centro do mesmo não existe material metálico.

6.2 - Efeito da Injeção de Gás

A verificação da influência do gás para expulsar a água da região de contato elétrico pode ser feita comparando-se os oscilogramas das figuras 18 e 25. Ambas as soldagens foram realizadas em condições idênticas exceto pela presença do gás, conforme descrito no item 5.4.2 (b). Percebe-se uma pequena melhora da estabilidade do arco com a utilização do gás, pois o número de extinções do arco ($I=0$) passou de aproximadamente 38 para 31, as correntes média e eficaz aumentaram e a velocidade de avanço médio também aumentou [5, 6].

Nas soldagens com gás foi utilizado o CO_2 a uma pressão de 5,0 bar e com a vazão máxima possível porque, devido a limitações construtivas do próprio cabeçote de soldagem, o gás ao invés de fluir todo pela folga existente entre o bico e o eletrodo, retornava em grande quantidade pelo conduto do arame (conduíte), escapando dentro do cabeçote. Para que se quantifique melhor o ganho com a utilização do gás e também se determinem os valores ideais de pressão e vazão, é necessário que seja utilizado um cabeçote totalmente enclausurado. Neste caso, o retorno do gás seria eliminado e poder-se-ia soldar com diversos valores de vazão e pressão.

6.3 - Influência do Material do Bico de Contato

Acredita-se que este estudo da influência do material do bico sobre a estabilidade do processo seja inédito, pois na bibliografia pesquisada não existe qualquer referência a respeito.

Foram feitos ensaios com bicos de cobre, grafite e um terceiro material com características intermediárias (bronze grafitado), para três valores distintos de tensão de controle e velocidade de avanço do arame, conforme item 5.4.2 (c).

Esperava-se que os melhores resultados fossem obtidos com bicos de grafite, seguidos dos bicos de bronze grafitado e, por último, os bicos de cobre. Porém, após classificação final das estabilidades de arco em 1°, 2° e 3°, os resultados não foram os esperados, como demonstrado na tabela 9. A análise dos resultados foi realizada baseando-se nos oscilogramas de corrente e velocidade de avanço do arame e no aspecto visual do cordão de solda. As figuras 26 a 28 são os

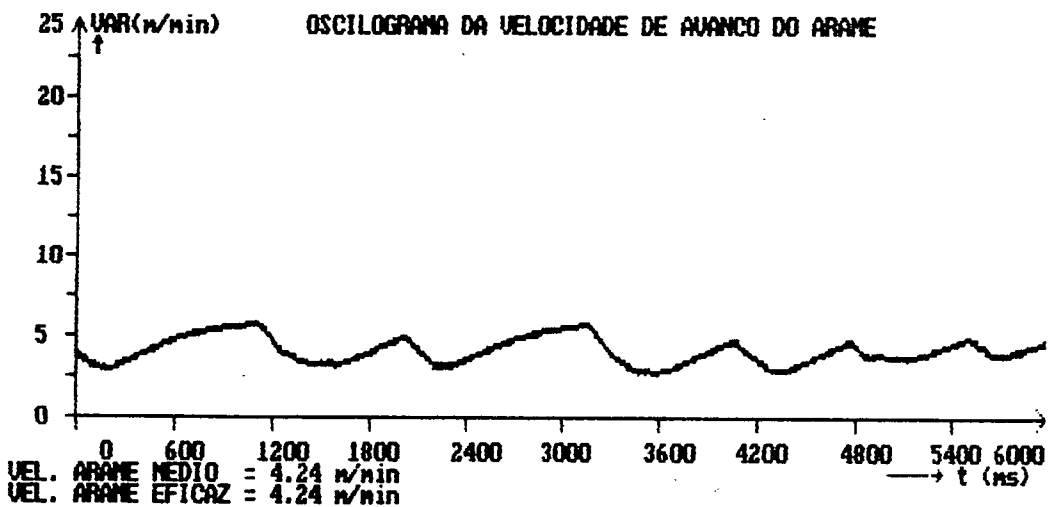
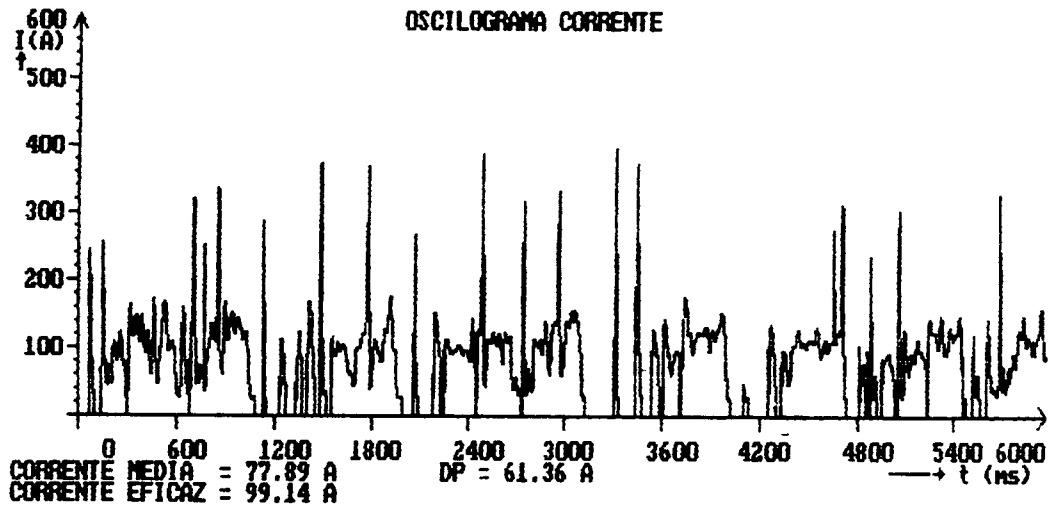


Figura 25 - Oscilogramas de soldagem subaquática molhada com gás, [5, 6].

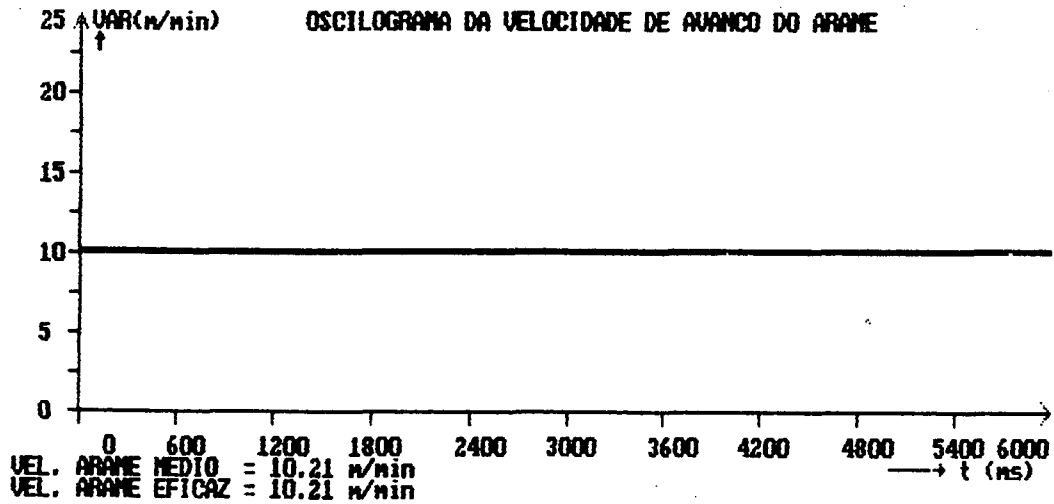
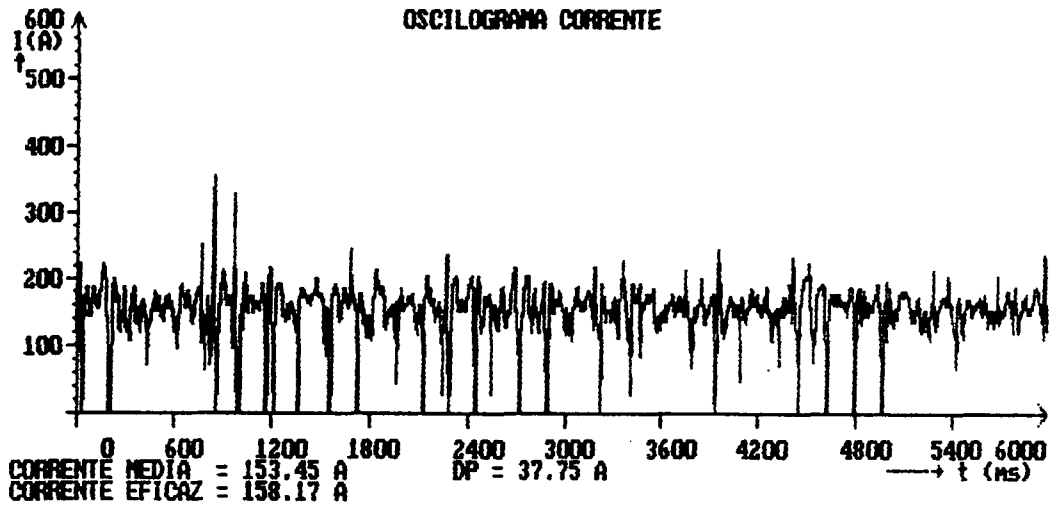


Figura 26 - Oscilogramas de soldagem com bico de grafite (1º lugar).

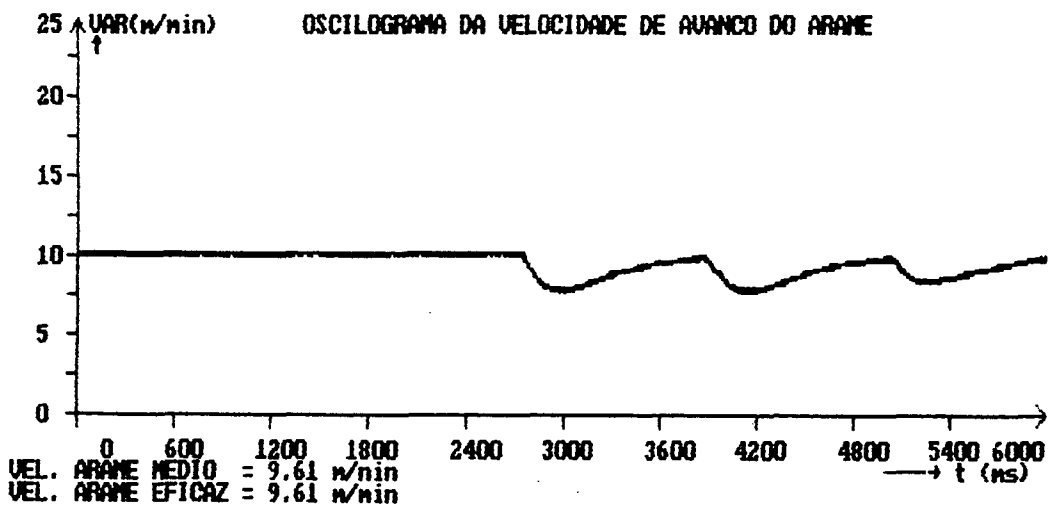
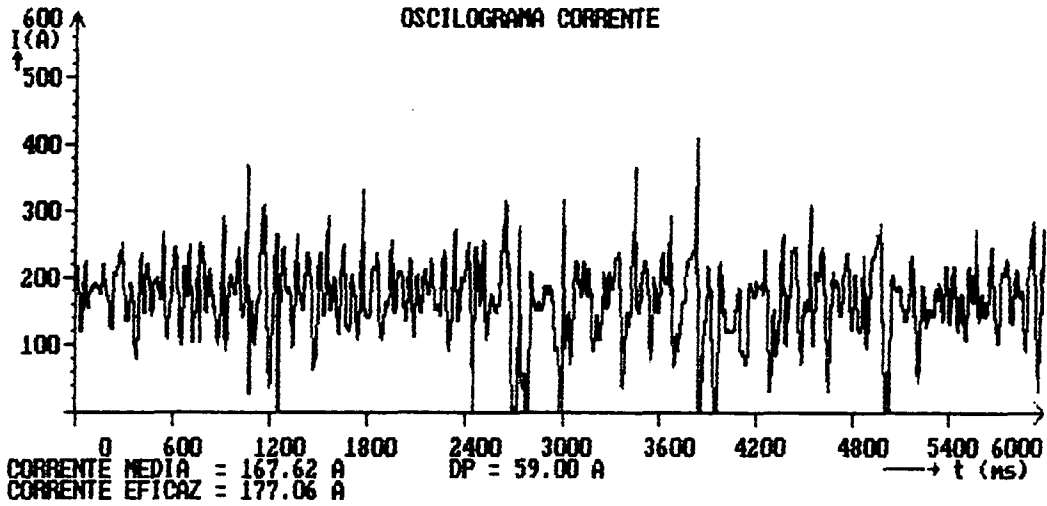


Figura 27 - Oscilogramas de soldagem com bico de cobre (2º lugar).

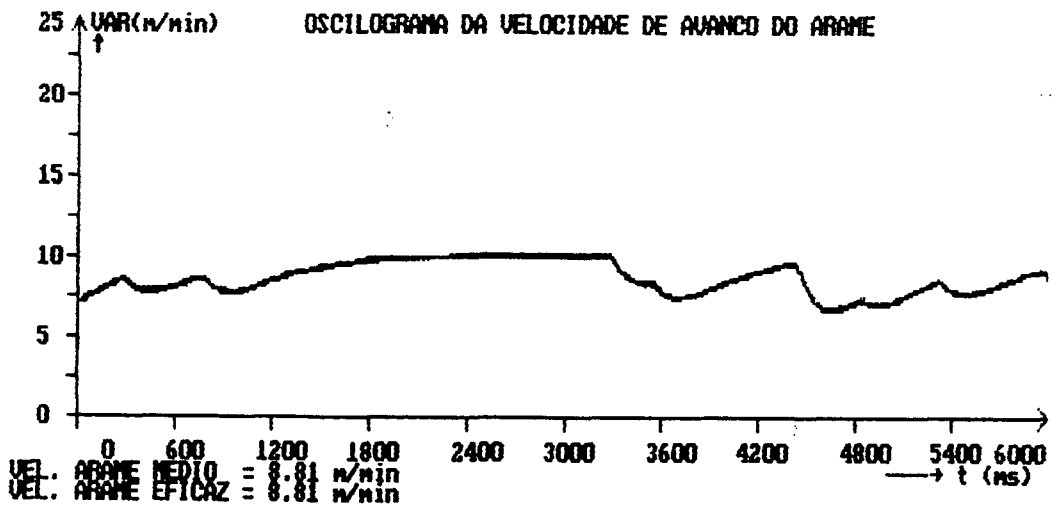
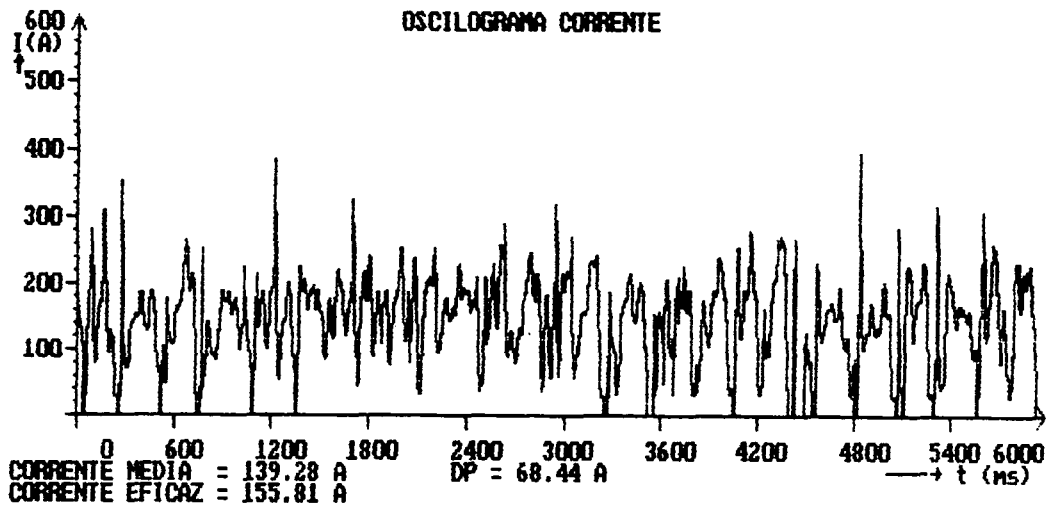


Figura 28 - Oscilogramas de soldagem com bico de bronze (3º lugar).

oscilogramas obtidos para os três materiais com $V_a=10$ m/min e $U=34$ V (última linha da tabela 9).

Na época acreditou-se que o motivo mais provável deste bom desempenho do bico de cobre em relação aos outros se devesse ao fato de que este bico era original, enquanto que os demais foram usinados por encomenda. Isto implica que o diâmetro do furo destes bicos não eram exatamente iguais, conforme constatado mais tarde. Concluiu-se então que para soldagens subaquáticas, pequenas variações no diâmetro interno dos bicos afetam bem mais a estabilidade do processo do que na soldagem a seco. Quanto ao bico de grafite, à medida que os ensaios foram sendo realizados, desgastou-se tão rapidamente que após o término do último teste o aumento de diâmetro era perceptível a olho nu, [5,6].

Como em soldagens subaquáticas molhadas com o processo FCAW, nem sempre tem-se boa repetibilidade entre testes nas mesmas condições, decidiu-se repetir todos os ensaios de verificação da influência do material do bico. Mais uma vez obtiveram-se resultados não esperados (ver tabela 10). Isto implica que, ou o material do bico não exerce influência significativa sobre a estabilidade do arco, ou o tempo de aquisição de 6 segundos é muito pequeno e as amostras (resultados de pequenos trechos de cordão) não representam bem o comportamento do arco para cada material pesquisado.

Foi também nestes ensaios com o bico de grafite que, pela primeira vez, obteve-se uma linha reta no oscilograma da velocidade de avanço, ver figura 26. Isto implica que ou não houve nenhum trancamento do arame no bico durante o processo, sendo tal fato devido ao desgaste sofrido pelo bico (maior folga), ou os trancamentos ocorridos foram do tipo fraco (microtrancamentos). Pela 1ª hipótese, ausência de trancamentos, as extinções ($I=0$) detectadas no oscilograma de corrente deveriam-se à falha na transferência de corrente do bico para o eletrodo, em decorrência do aumento excessivo do diâmetro interno do bico (aumento da folga). Pela 2ª hipótese, os microtrancamentos ocorreram nos pontos onde $I=0$ e, por serem do tipo fraco, não afetaram a velocidade de avanço do arame.

VARIÁVEIS	MATERIAL		
	Grafite	Bronze Grafitado	Cobre
V_a (m/min) / U (V)			
6 / 30	3°	2°	1°
8 / 32	2°	3°	1°
10 / 34	1°	3°	2°

Tabela 09 - 1° estudo do material do bico.

VARIÁVEIS	MATERIAL		
	Grafite	Bronze Grafitado	Cobre
V_a (m/min) / U (V)			
6 / 30	3°	2°	1°
8 / 32	1°	2°	3°
10 / 34	3°	1°	2°

Tabela 10 - 2° estudo do material do bico.

Um importante fato a ser considerado é que sendo tão crítico este problema de trancamento do eletrodo no bico, deve-se assegurar também que o arame não esteja oxidado para não ter mais este agravante.

6.4 - Efeito da Mudança do Diâmetro do Eletrodo

Na verificação da influência do diâmetro do eletrodo sobre a estabilidade do arco, os resultados obtidos utilizando-se eletrodo de 1,6 mm foram melhores que com 1,2 e 1,0 mm. Tanto que, em vários testes, os oscilogramas da velocidade de avanço do arame para eletrodo de 1,6 mm não acusaram nenhum trancamento. Isto se deve ao fato de que arames de 1,0 mm são muito finos, aquecendo e dilatando muito dentro do bico, o que favorece trancamentos. Proporcionalmente, nos arames de 1,6 mm, por serem mais grossos, isto ocorre com menor intensidade.

Conforme citado no procedimento do item 5.4.2 (d), apesar das variáveis de soldagem mudarem com o diâmetro do eletrodo, procurou-se realizar testes com os mesmos dados de soldagem para arames de diâmetro 1,0 e 1,2 mm. Para provar que os arames de maiores diâmetros apresentam melhores resultados, sob o ponto de vista da estabilidade do arco, escolheu-se as variáveis mais adequadas para o eletrodo de 1,0 mm. Mesmo assim o arame de 1,2 mm teve um desempenho melhor, que pode ser constatado comparando-se os oscilogramas das figuras 29 e 30, que representam os eletrodos de 1,2 e 1,0 mm, respectivamente. Como era difícil soldar com o arame de 1,6 mm nestas mesmas condições, este teste não foi realizado. Entretanto, comparando-se separadamente os eletrodos de 1,2 e 1,6 mm, este último apresentou melhores resultados. Os cordões da figura 23 foram executadas com o arame de 1,6 mm, onde se percebe um bom acabamento superficial, decorrente de uma boa estabilidade do arco.

6.5 - Verificação da Influência da Indutância da Fonte

Para os testes de indutância, além dos dados de soldagem descritos em 5.4.2 (e), ajustou-se o valor do potenciômetro de acendimento suave do cabeçote em 5 (valor médio da escala), enquanto variou-se a indutância da fonte em 10, 50 e 90% da sua faixa de operação (o que corresponde a uma indutância baixa, média e alta, respectivamente).

Percebeu-se uma tendência de melhor abertura de arco para baixas indutâncias. Entretanto, deve-se ressaltar que estes testes apresentaram pequenas diferenças entre os resultados obtidos

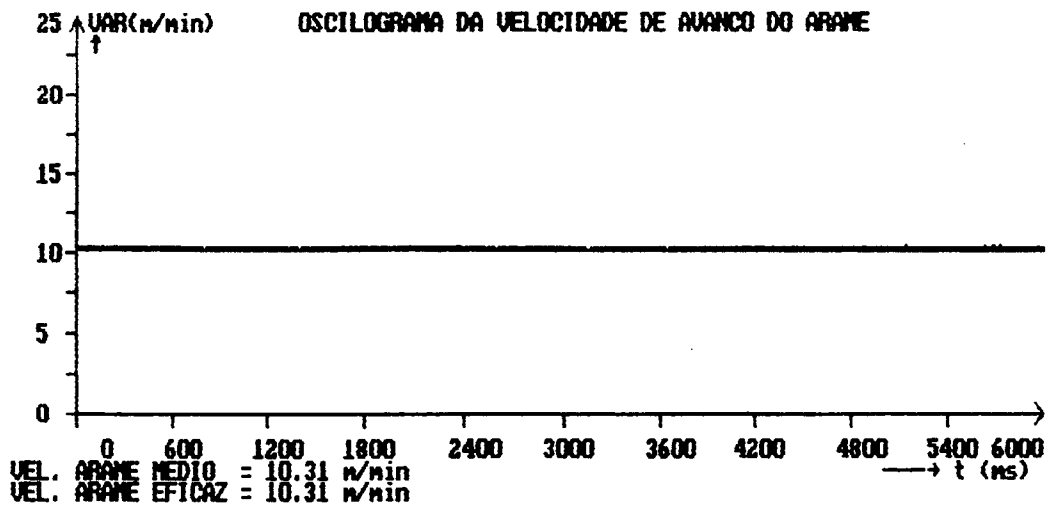
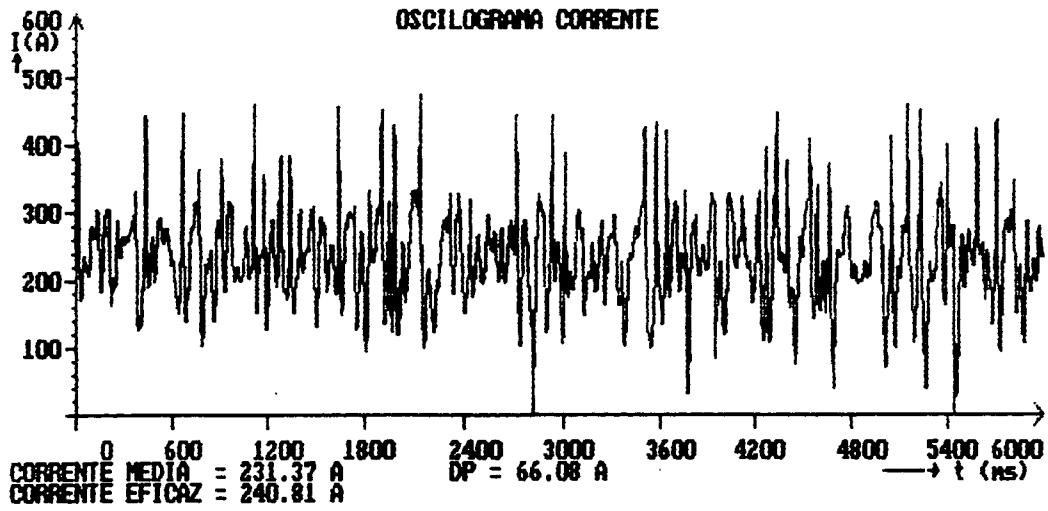


Figura 29 - Oscilogramas de soldagem molhada com arame de 1,2 mm.

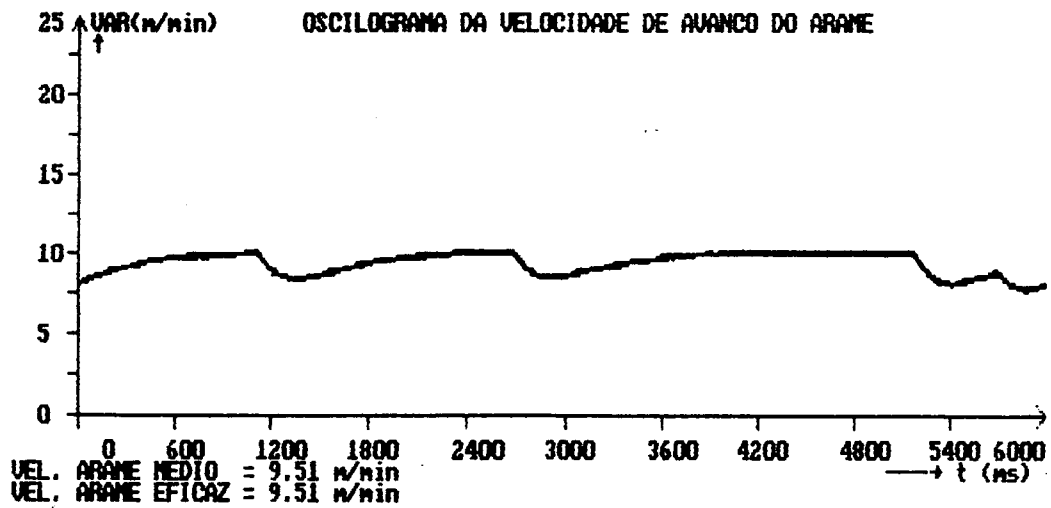
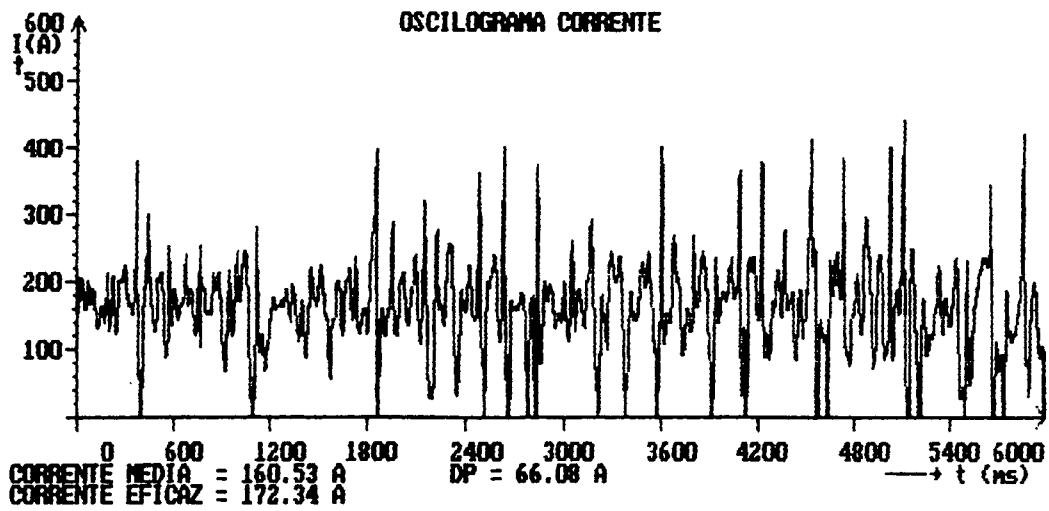


Figura 30 - Oscilogramas de soldagem molhada com arame de 1,0 mm.

com os vários ajustes da indutância. Como a repetibilidade não é muito boa, é necessário a continuidade destes ensaios para chegar a conclusões mais definitivas.

6.6 - Efeito da Aceleração do Arame na Abertura do Arco

Os dados de variáveis e parâmetros utilizados neste estudo estão descritos no procedimento do item 5.4.2 (f), segundo o qual a variação da taxa de crescimento da velocidade de avanço do arame (aceleração) é ajustada num potenciômetro situado no painel do alimentador.

Após a realização de vários testes com diversos ajustes deste potenciômetro, verificou-se que quanto mais baixo é o seu valor (maior aceleração), melhor é a abertura e a estabilidade do arco. Isto pode ser facilmente verificado comparando-se os oscilogramas da figura 31 com os da figura 32, que mostram que ao aumentar-se o valor do potenciômetro de 1 para 9 (isto é, diminuindo a aceleração), diminuiu a estabilidade do processo, pois caiu a corrente média de 253 para 248 A, a tensão subiu de 27,4 para 28,0 V e ocorreram duas quedas da velocidade do arame na figura 32. As figuras 33 e 34 ilustram o comportamento durante a abertura do arco para os mesmos ensaios, e confirmam esta tendência. O efeito do ajuste do potenciômetro sobre a velocidade de avanço é significativo. Comparando-se as figuras 33 e 34, percebe-se na primeira, após a abertura do arco (em 1600 ms), um rápido aumento da V_a , enquanto que na segunda o aumento (após a abertura em 1.200 ms), é bastante lento. Comparando-se os oscilogramas de corrente e tensão destas figuras, nota-se na figura 33 uma fácil e estável abertura do arco, diferentemente do que ocorre na figura 34.

Ao contrário do ocorrido no estudo da indutância, os resultados destes testes tiveram ótima repetibilidade, indicando que a variação da aceleração da alimentação do arame tem grande influência na estabilidade do processo, principalmente quando da sua abertura para iniciar a soldagem. Frente a este fato, torna-se muito importante a adaptação/construção de cabeçotes específicos para a soldagem subaquática molhada que possuam um conjunto moto-redutor com uma resposta dinâmica melhor possível (isto é, grande aceleração).

6.7 - Levantamento da Faixa de Trabalho de Variáveis e Parâmetros

Em estudos preliminares tentou-se por diversas vezes, realizar um completo levantamento da faixa de trabalho de variáveis/parâmetros para este processo. Mas, os fortes trancamentos seguidos do acúmulo do arame no conduíte (“efeito mola”), além de interromper o processo, danificavam o equipamento. Isto ocorria para valores extremos de velocidade de avanço do arame

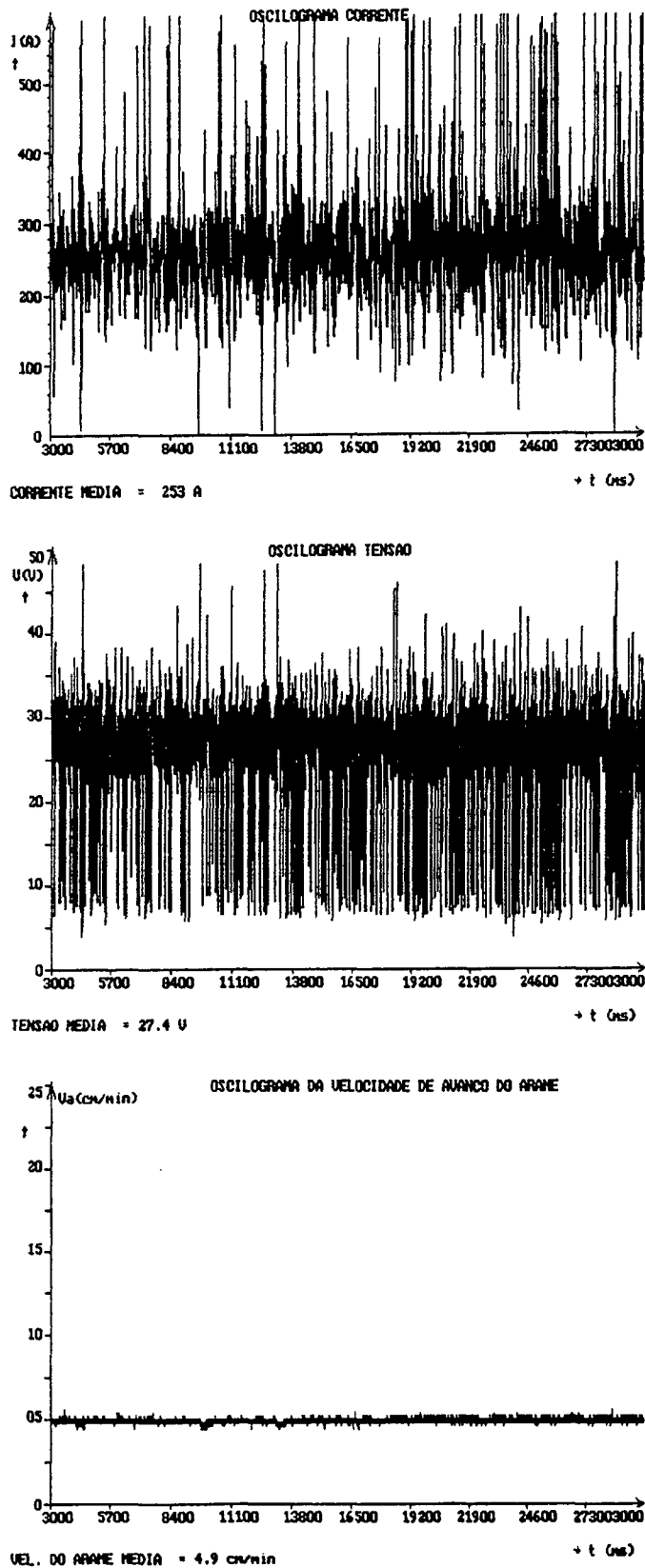


Figura 31 - Baixo valor do potenciômetro (alta aceleração do arame nas reaberturas do arco).

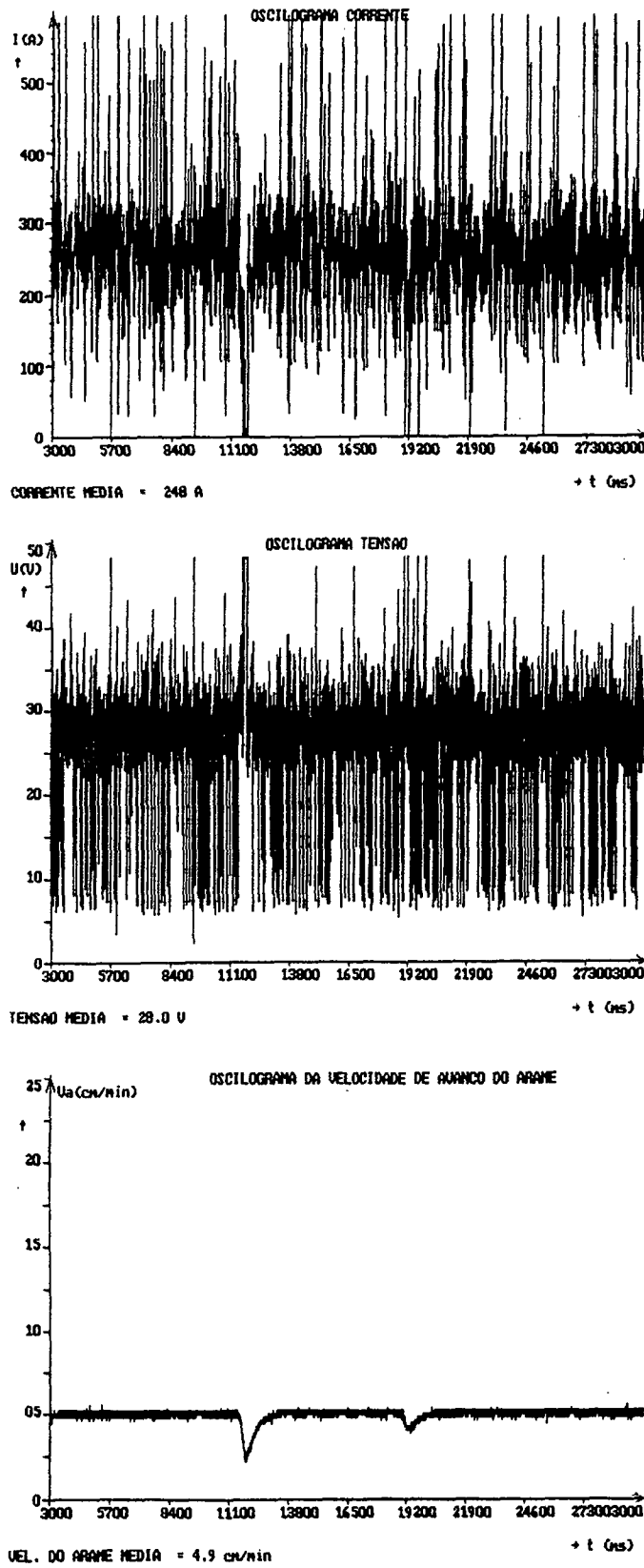


Figura 32 - Alto valor do potenciômetro (baixa aceleração do arame nas reaberturas do arco).

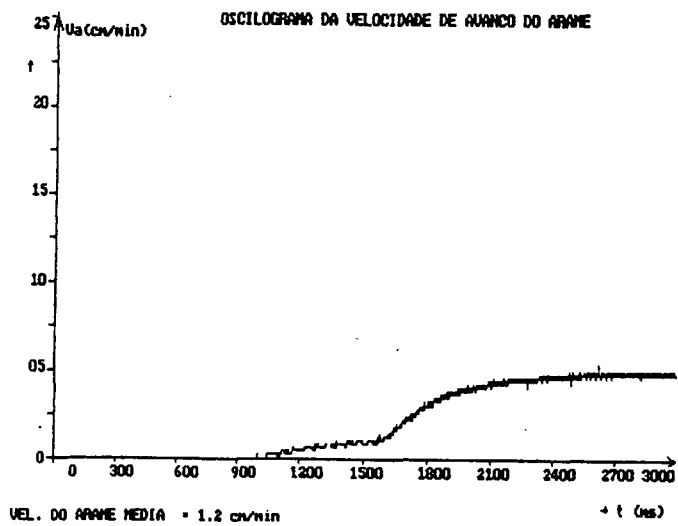
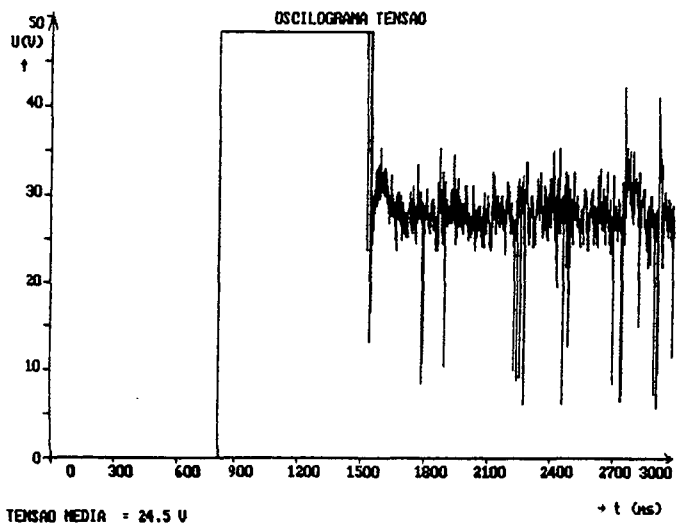
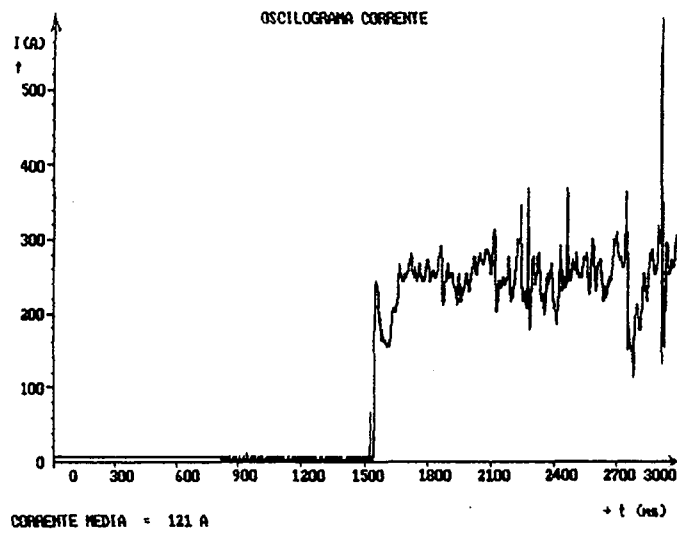


Figura 33 - Baixo valor do potenciômetro (alta aceleração do arame na abertura do arco).

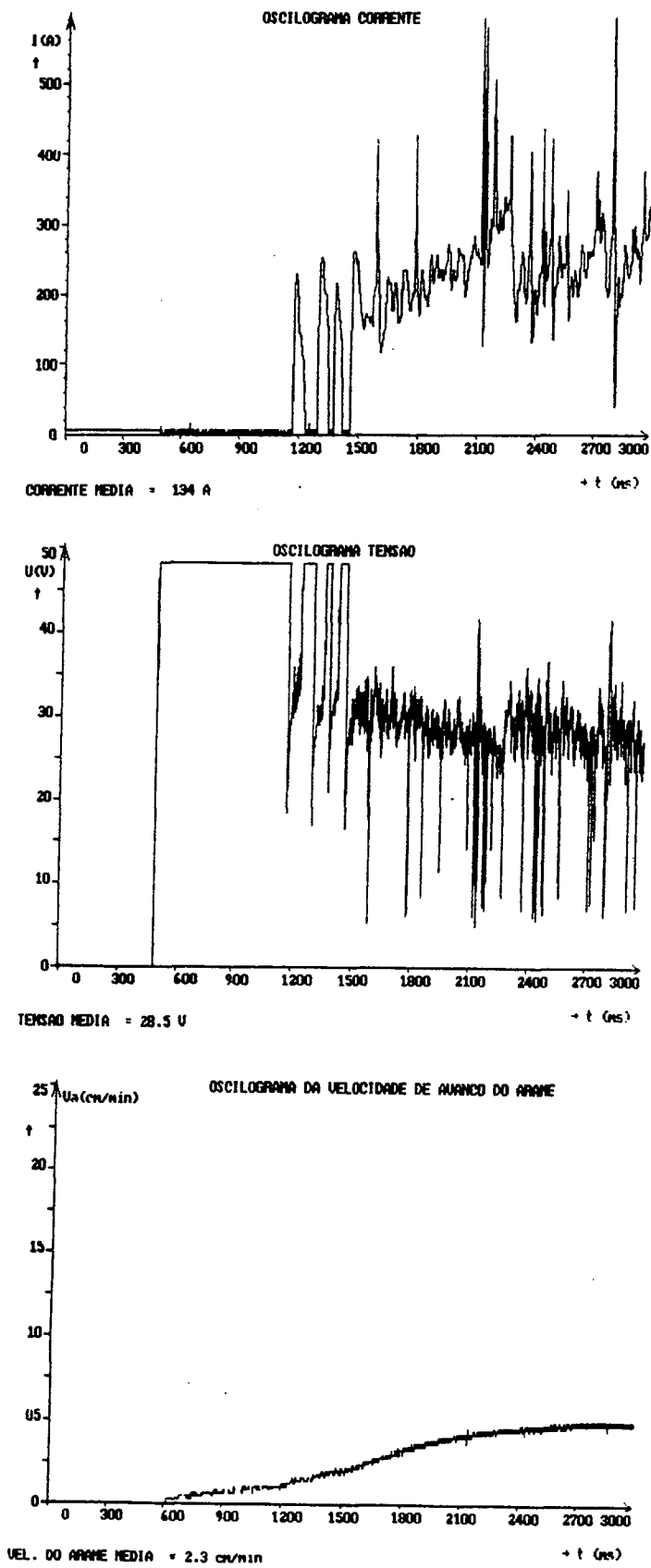


Figura 34 - Alto valor do potenciômetro (baixa aceleração do arame na abertura do arco).

e da tensão, sendo muito raro para os valores médios. O 1º e o 3º cordões da figura 19 ilustram as consequências do efeito mola, descrito a seguir.

O *efeito mola* é caracterizado por sucessivos trancamentos e reaberturas do arco. A princípio a soldagem está sendo realizada sem maiores problemas, quando ocorre o primeiro trancamento (microfusão) do eletrodo no bico de contato. Como o motor continua alimentando o arame, este acumula-se (efeito mola) dentro do conduíte que o conduz através do cabo da pistola. Isto ocorre até que a pressão do eletrodo sobre o bico seja suficiente para romper o trancamento. Neste momento, o arame avança com altíssima velocidade em direção a peça, chocando-se violentamente com a mesma e reabrindo o arco. Isto é facilmente verificado pois, nas reaberturas, o eletrodo chega a deslocar o corpo de prova de sua posição. Após a reabertura, o arame continua sendo alimentado em alta velocidade, pois o mesmo estava acumulado dentro do conduíte, provocando um curto-circuito muito longo. Como consequência, a corrente sobe rapidamente e permanece num alto valor enquanto durar o curto-circuito. Isto favorece o surgimento de novos faiscamentos seguidos de trancamentos. A partir deste ponto o processo se repete: acumula o eletrodo, este se desprende do bico, choca na peça, ocorre curto-circuito longo, a corrente sobe, ocorre faiscamento, tranca e acumula outra vez. Este ciclo pode terminar de duas formas: o processo volta à normalidade (torna-se estável), o que não é muito comum, ou é interrompido por completo (caracterizando um trancamento com interrupção do processo).

Para que pudesse ser feito um levantamento de variáveis/parâmetros abrangendo uma faixa maior, para dessa forma ser mais significativa, foram realizadas adaptações no conduíte para torná-lo mais resistente aos trancamentos e evitar novos danos ao cabo da pistola. Porém, teve-se o cuidado, especialmente para eletrodos de pequeno diâmetro, de não tentar soldar com valores de variáveis muito altos ou muito baixos para evitar fortes trancamentos que danificassem o equipamento. Isto porque arames finos são pouco rígidos, dobrando-se e acumulando-se no conduíte mais facilmente que os grossos.

Os valores obtidos no levantamento final da faixa de trabalho estão representados nas figuras 35, 36 e 37, para os diâmetros de eletrodo 1.0, 1.2 e 1.6 mm, respectivamente. Procurou-se variar a velocidade de avanço do arame (V_a) e a tensão de comando (U) sem variar muito a velocidade de soldagem (V_s) e a distância contato-peça (d_{cp}), conforme procedimento descrito em 5.4.2 (g). O critério para definir os limites de V_a e U foi o de trabalhar até quando a continuidade do processo e/ou a qualidade da solda fosse afetada. Portanto, as faixas de trabalho ficaram limitadas da seguinte forma: a) à esquerda (tensão mínima) - pela redução da estabilidade do arco, devido principalmente ao *efeito mola*, e pela geometria excessivamente convexa do cordão (baixa molhabilidade); b) à direita (tensão máxima) - pelos fortes trancamentos, pela

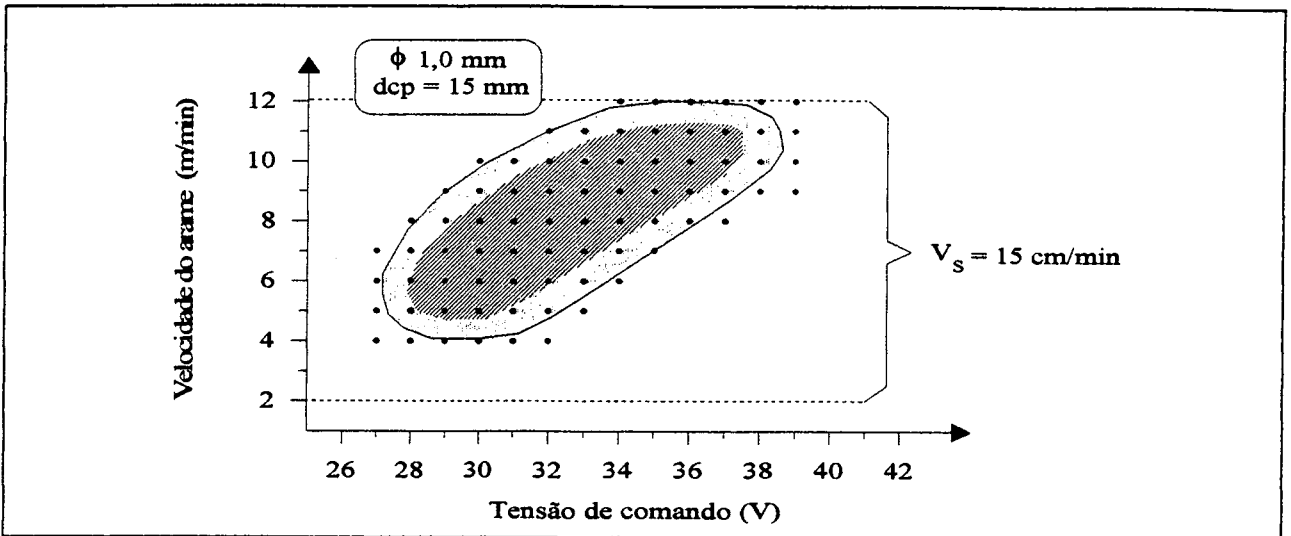


Figura 35 - Faixa de trabalho da velocidade do arame e tensão de comando (eletrodo ϕ 1,0 mm).

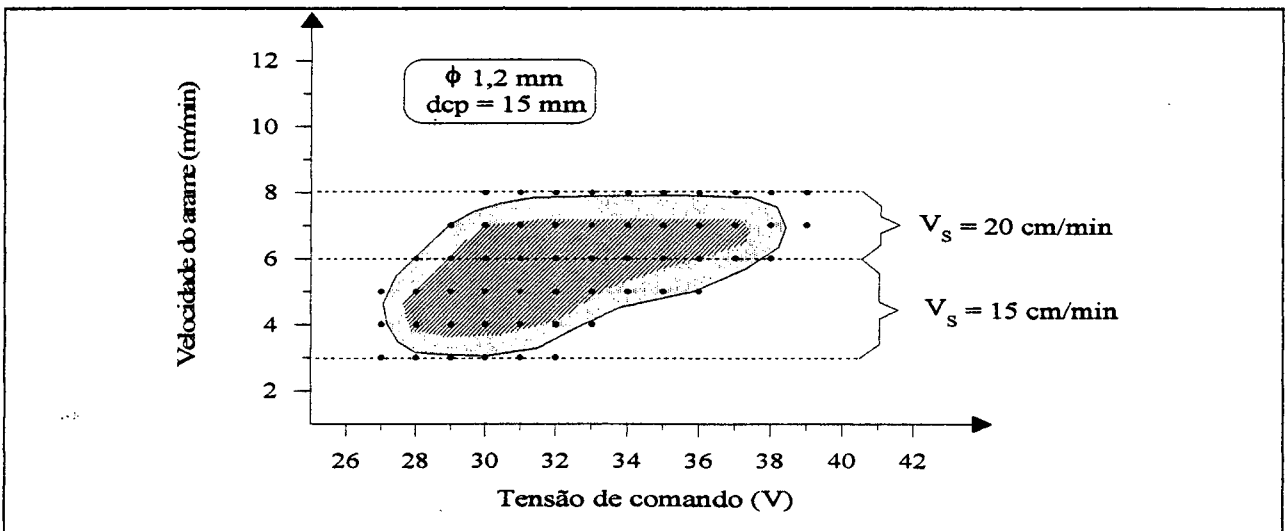


Figura 36 - Faixa de trabalho da velocidade do arame e tensão de comando (eletrodo ϕ 1,2 mm).

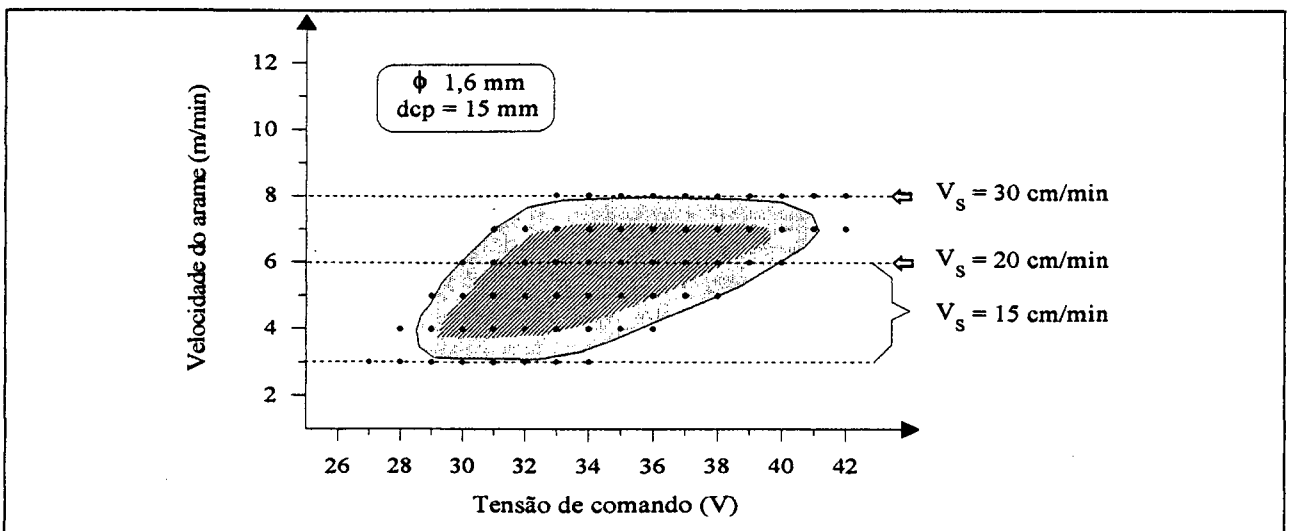


Figura 37 - Faixa de trabalho da velocidade do arame e tensão de comando (eletrodo ϕ 1,6 mm).

excessiva molhabilidade do cordão e, principalmente, devido a elevada porosidade; c) lado inferior (velocidade mínima do arame) - determinado pela baixa estabilidade do arco, ocorrência do *efeito mola* e, em alguns casos, pela fusão da gota metálica na extremidade do bico; d) lado superior (velocidade máxima do arame) - determinado principalmente pelo aspecto superficial ruim do cordão, decorrente do constante mergulho do eletrodo na poça de fusão, e pelo aumento de porosidade.

As figuras 35 a 37 são formadas basicamente por pontos e por duas áreas, uma maior e outra menor, interna à primeira. Os pontos representam as condições de soldagem que foram testadas; a área externa indica a faixa de trabalho recomendada; e a interna também representa uma área de trabalho, só que mais segura que a primeira.

Outro fato importante a ser considerado é que a faixa de trabalho assim definida é simplesmente aquela faixa para variáveis/parâmetros onde tem-se a continuidade do processo, ou seja, onde não deve ocorrer trancamentos com interrupção definitiva da soldagem. Adicionalmente é preciso otimizar estas variáveis/parâmetros para evitar/minimizar alguns defeitos de soldagem.

6.8 - Levantamento das Curvas de Produção de Material de Adição

O levantamento das curvas de produção de material de adição foi realizado para diferentes diâmetros de eletrodo e polaridade, seguindo o procedimento descrito no item 5.4.2 (h).

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 38 e 39. Na figura 38 observa-se um maior consumo, para a mesma corrente, nos arames de menor diâmetro. Este resultado é explicado pelo fato de que os eletrodos mais finos apresentam uma maior densidade de corrente do que arames grossos. Quanto ao efeito da polaridade sobre o consumo, verificou-se na soldagem molhada o mesmo comportamento conhecido da soldagem a seco com eletrodo consumível: a polaridade CC- é mais produtiva que a polaridade CC+ (ver figura 39).

6.9 - Ensaio de Macro e Microdureza

Nos ensaios de macrodureza com carga de 10 kg (HV_{10}) e microdureza com carga de 40g verificou-se a presença de estruturas altamente duras, especialmente na região próxima à linha de fusão. As soldas foram executadas conforme o procedimento do item 5.4.2 (i), e o material de base empregado foi o aço ABNT 1020 de 6,35 mm (1/4").

Os resultados de macrodureza obtidos são apresentados nas figuras 40 e 41, através de gráficos e desenhos esquemáticos do corpo de prova da figura 42 (CP1), para melhor localização dos pontos de medição.

Primeiramente foram realizadas as medições de dureza ao longo de uma reta horizontal na seção transversal do corpo de prova (figura 40). Obteve-se um alto valor de dureza, 348 HV₁₀, na ZAC de granulação grosseira. A seguir, as medições foram feitas na direção vertical do mesmo corpo de prova (figura 41) e chegou-se a um valor de dureza ainda maior, 472 HV₁₀, num ponto pouco abaixo da linha de fusão. Procurando uma explicação para tal fato, recorreu-se a um microscópio onde foi detectada a presença de uma trinca dentro da ZAC, margeando a linha de fusão. Como o maior valor de dureza encontrado foi próximo à trinca, fizeram-se outras quatro medições bem próximas à mesma, encontrando-se valores ainda maiores (figura 40), sendo que o maior deles chegou a 493 HV₁₀ [4].

Os ensaios de microdureza foram realizados com uma carga de 40 g. Os pontos de realização destes ensaios foram bem próximos à trinca, dentro dos grãos da ZAC de granulação grosseira. Nos dez pontos medidos, os valores obtidos variaram de 426 HV até 551 HV, sendo que a média ficou em 512 HV. Tal fato confirma, mais uma vez, a presença de estruturas altamente duras e, conseqüentemente, muito frágeis. O surgimento destas estruturas duras foi devido à alta velocidade de resfriamento causada pela presença da água.

6.10 - Análises Macro e Micrográficas

Foram realizadas análises metalográficas em corpos de prova de simples deposição sobre chapa, aço ABNT 1020 de 6,35 mm (1/4"), para se ter uma noção das dimensões e geometria dos cordões, nível de defeitos e microestruturas obtidas.

Pelas macrografias mostradas nas figuras 42, 43 e 44, tem-se uma boa idéia do aspecto do cordão de solda, além de dados geométricos de largura, reforço e penetração. As figuras 42 e 43 foram obtidas de cortes transversais do mesmo cordão, representando, respectivamente, a melhor e a pior condição da sua superfície. Na figura 41, além dos dados geométricos serem representados, são também quantificados. A figura 44 apresenta a seção transversal de um corpo de prova soldado de ambos os lados.

A diferença existente na superfície do mesmo cordão de solda, figuras 42 e 43, deve-se ao fato de que na soldagem molhada, o comprimento do arco é pequeno, mesmo se for aumentada a tensão. Isto faz com que qualquer instabilidade do arco provoque o mergulho do eletrodo na poça de fusão, causando com isto um longo curto-circuito. A corrente sobe instantaneamente até

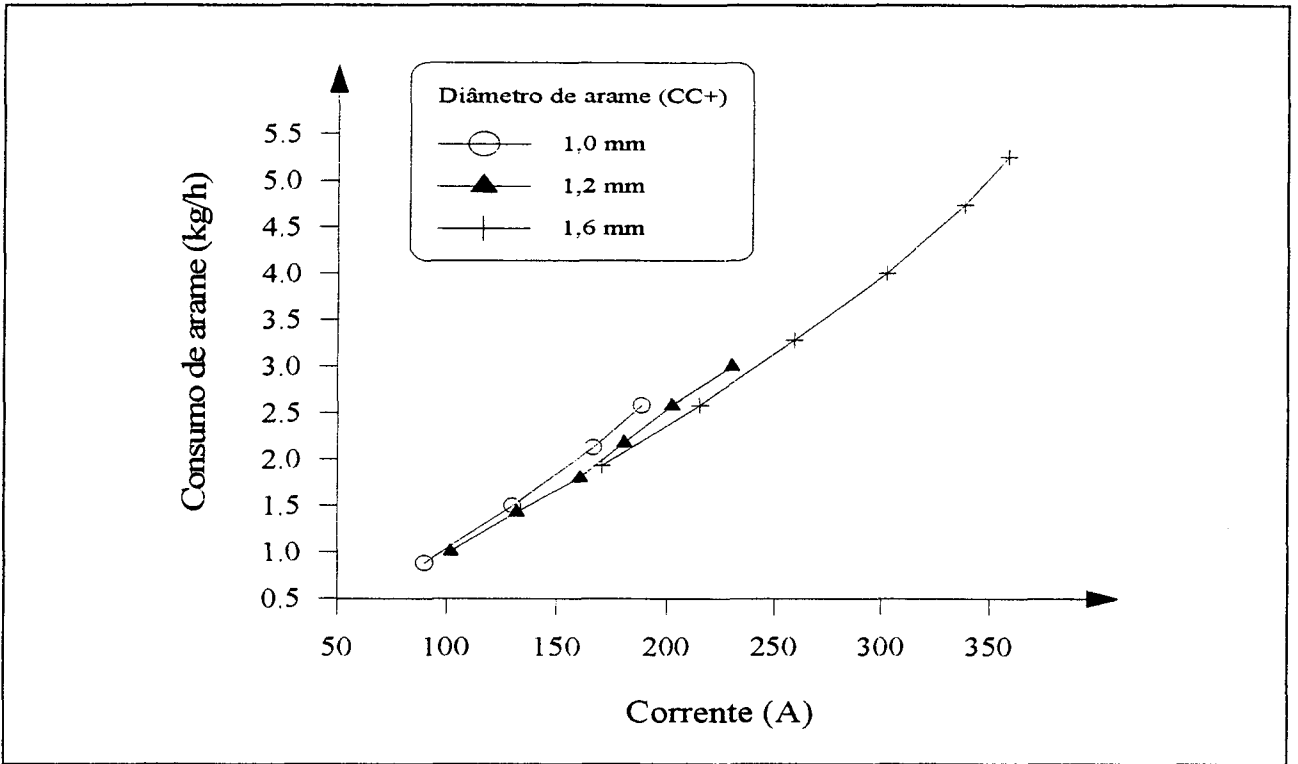


Figura 38 - Influência do diâmetro do arame e da corrente sobre o consumo de arame.

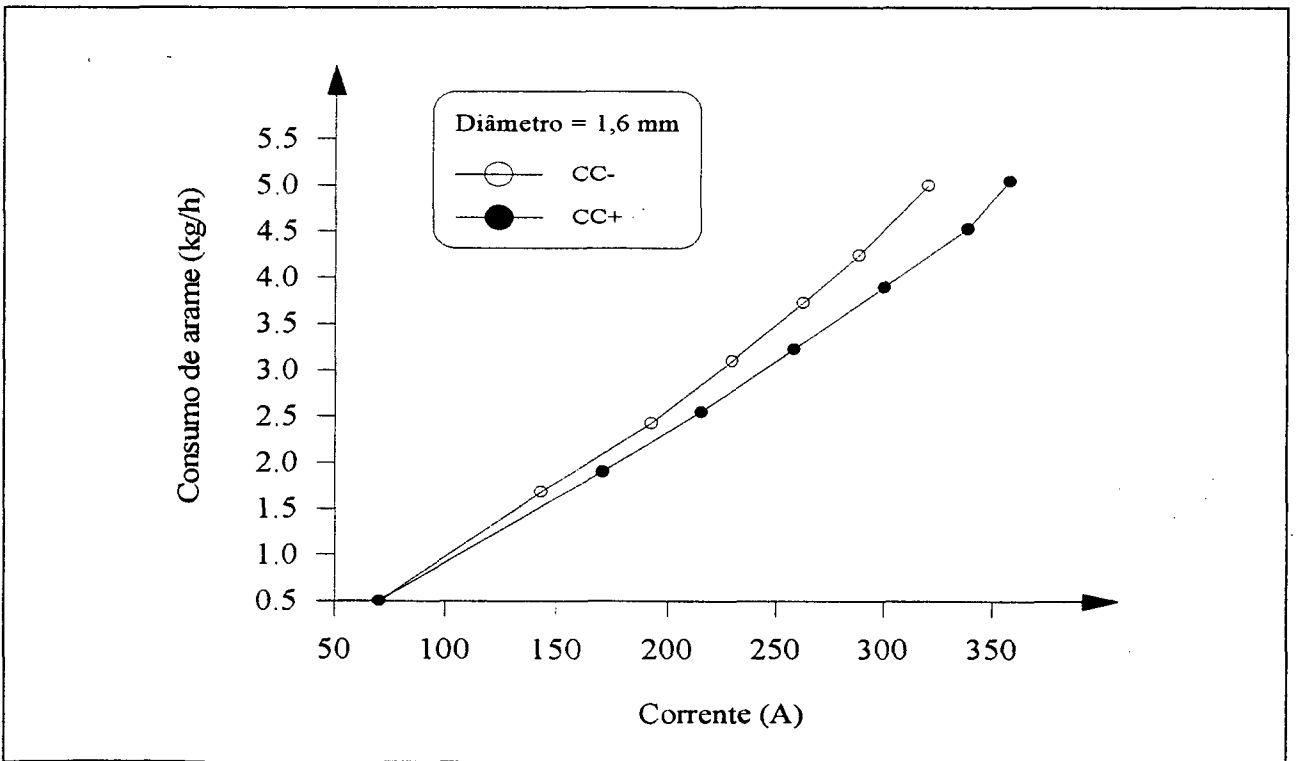


Figura 39 - Influência da corrente e polaridade sobre o consumo de arame.

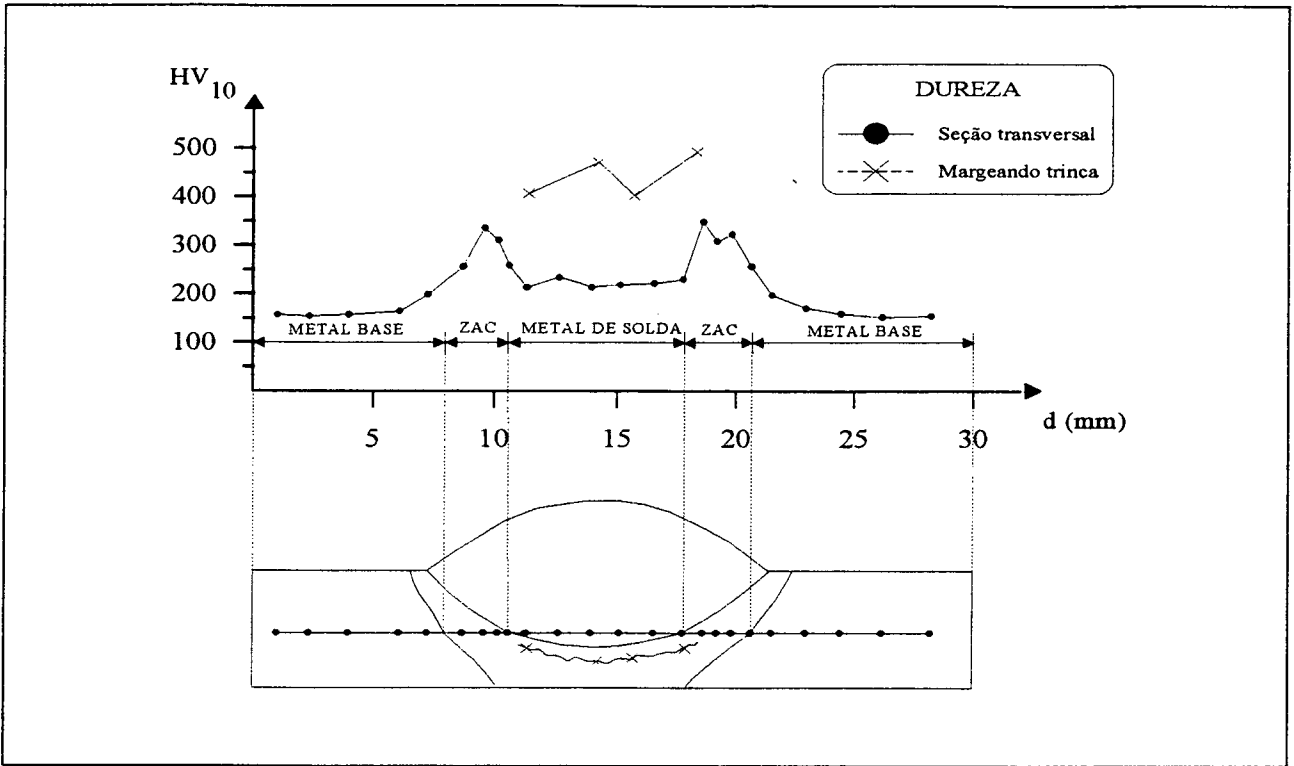


Figura 40 - Dureza na direção horizontal da seção transversal e margeando a trinca.

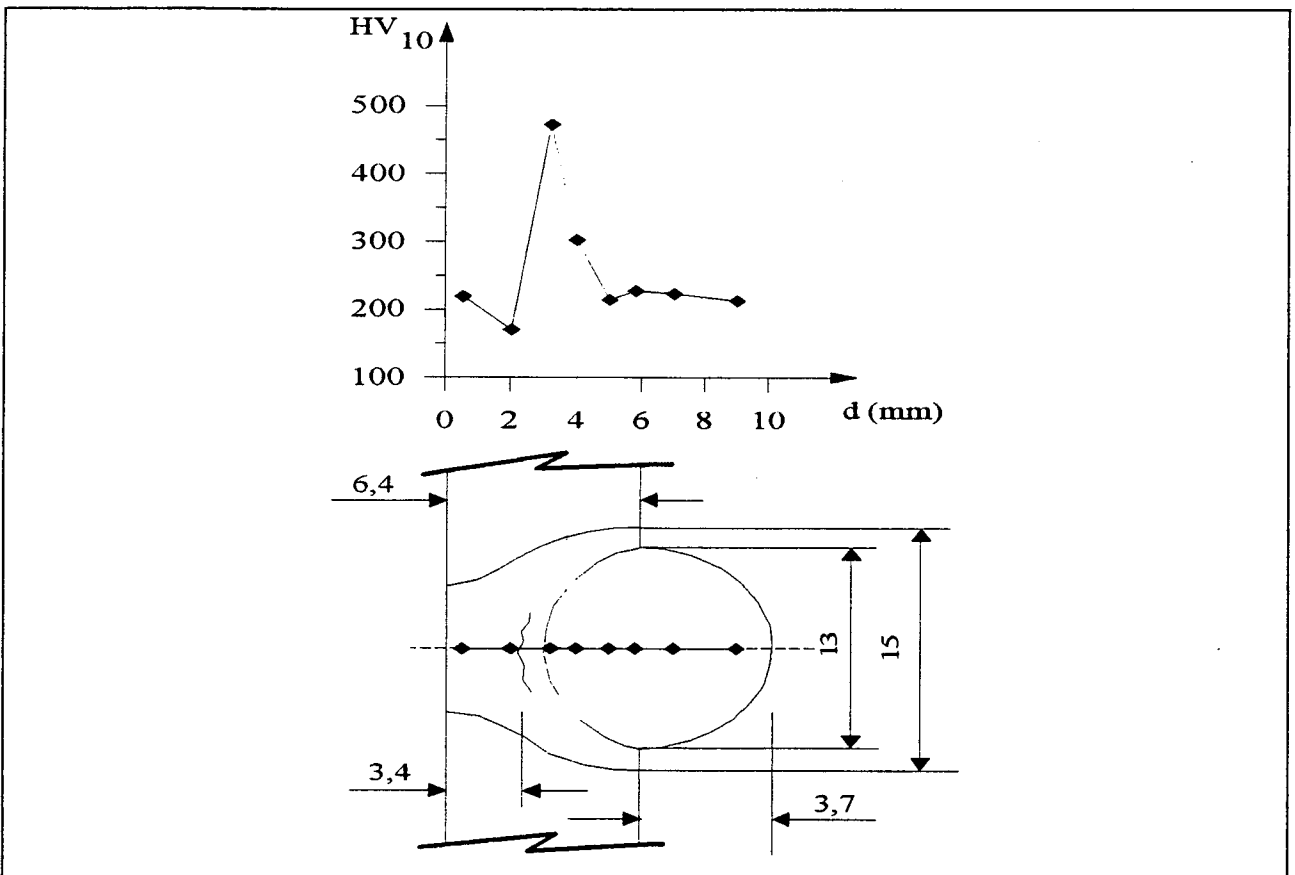


Figura 41 - Dureza ao longo da seção transversal (direção vertical) e dados geométricos da solda.

valores próximos da corrente de curto-circuito, e provoca escavações da base do cordão (parecidas com mordeduras), conforme figura 43. Por outro lado, como o eletrodo gera gases (devido à queima do fluxo interno), quando o mesmo mergulha na poça de fusão o gás gerado fica aprisionado. Com o aumento da pressão, este gás escapa subitamente pela superfície deixando uma cratera no cordão (ver figura 43), e o salpico produzido normalmente fica próximo à cratera [4]. A figura 23 apresenta uma vista superior de outros cordões, onde este fenômeno também ocorre. Percebe-se uma pequena cratera no cordão da esquerda e o salpico correspondente bem próximo à mesma.

Nas figuras 42, 43 e 44 também pode-se identificar claramente o metal de base, zona afetada pelo calor (ZAC) e zona fundida. Na figura 44 também é possível identificar qual foi o primeiro e segundo cordões, pois percebe-se o resultado das interações entre os cordões e as zonas afetadas pelo calor.

No corpo de prova CP1 também foi realizada análise micrográfica, nos pontos mostrados na figura 11. A figura 45 é uma micrografia do metal de base (ponto “a” da figura 11), que indica tratar-se de um aço baixo carbono, com uma microestrutura ferrítica/perlítica. Na figura 46 (ponto “b” da figura 11) percebe-se claramente a transição entre o metal de base, à direita, e a zona de grão refinado da ZAC, devido à recristalização, à esquerda. A figura 47 (ponto “c” da figura 11) mostra a região próxima da linha de fusão. À direita tem-se a ZAC de grãos grosseiros e, à esquerda, o metal de solda. Já a figura 48 (ponto “d” da figura 11) mostra a estrutura dendrítica do cordão de solda com grãos colunares [4].

Além das mordeduras (figura 43) e trincas a frio (figura 49), outro defeito encontrado foi porosidade. A figura 50 ilustra um poro localizado no primeiro cordão da figura 44.

É importante ressaltar, mais uma vez, que os valores das variáveis e parâmetros de processo utilizados nestes ensaios não foram os ideais. Isto favoreceu muito o surgimento de defeitos, especialmente mordeduras e trincas a frio, devido principalmente à alta velocidade de avanço do arame (o que também significa ter uma alta corrente) e alta velocidade de soldagem empregadas. Para condições mais favoráveis o nível de defeitos conseguido é menor. Também deve ser considerado que os consumíveis utilizados foram desenvolvidos para a soldagem a seco. Com a utilização de eletrodos tubulares especiais para a soldagem subaquática molhada, podem se obter resultados melhores [4].

Além dos CP's de simples deposição sobre chapa, foram realizadas análises metalográficas em seções de juntas preenchidas com múltiplos passes. Para tanto, duas chapas de aço ABNT 1020 de 12,7 mm (junta soldada nº 1) foram chanfradas, soldadas e depois cortadas nos sentidos longitudinal e transversal ao cordão. Esta foi a primeira junta do trabalho e serviu para se ter uma

idéia do nível de porosidades, além das dificuldades operacionais de preenchimento de uma junta real, [68, 69]. O resultado obtido foi uma junta com um alto nível de porosidades, conforme mostram as figuras 51 e 52.

6.11 - Análise da Susceptibilidade de Trincas a Frio

Todos os quatro fatores que determinam o surgimento de trincas a frio estão presentes na soldagem molhada, conforme a seguir:

a) Existência de microestruturas duras e frágeis - estas microestruturas são provenientes da têmpera sofrida, tanto pelo metal fundido, como pela zona afetada pelo calor. Na soldagem subaquática molhada a maior velocidade de resfriamento favorece a ocorrência dessa têmpera.

b) Hidrogênio difusível - para a soldagem a seco o hidrogênio é proveniente de várias fontes, sendo as mais importantes a umidade presente no ar e nos revestimentos/fluxos. No caso da soldagem subaquática molhada, conforme visto no capítulo 4, o arco é aberto dentro d' água, e nas altas temperaturas do arco ocorre a dissociação das moléculas da água em H_2 e O, e depois da molécula de H_2 em H atômico. Devido a sua alta solubilidade no metal fundido, grande parte deste hidrogênio é transferido para a poça fundida. Com o abaixamento da temperatura, durante o resfriamento, a solubilidade do H no metal diminui, e por causa disto ele tende a migrar para o ambiente e difundir para a zona afetada pelo calor (ZAC).

c) Tensões residuais - causadas pelas diferenças de contração durante o resfriamento da soldagem. Quanto maior o teor de hidrogênio presente, o nível de tensões necessário para ocorrer trincas a frio é menor.

d) Temperaturas baixas - quando a temperatura cai abaixo de $100\text{ }^\circ\text{C}$, diminui sensivelmente a solubilidade do hidrogênio no metal. Ao mesmo tempo o H tende a retornar à sua forma molecular, impondo altíssimas tensões ao reticulado cristalino. Como a peça soldada está em contato direto com a água, rapidamente atingirá as baixas temperaturas necessárias para a ocorrência de trincas a frio.

Após uma rápida análise, pode-se afirmar que a trinca que surgiu no corpo de prova CP1 da figura 49 (metal base aço ABNT 1020 de 6,35 mm) é uma trinca a frio, pois todos estes 4

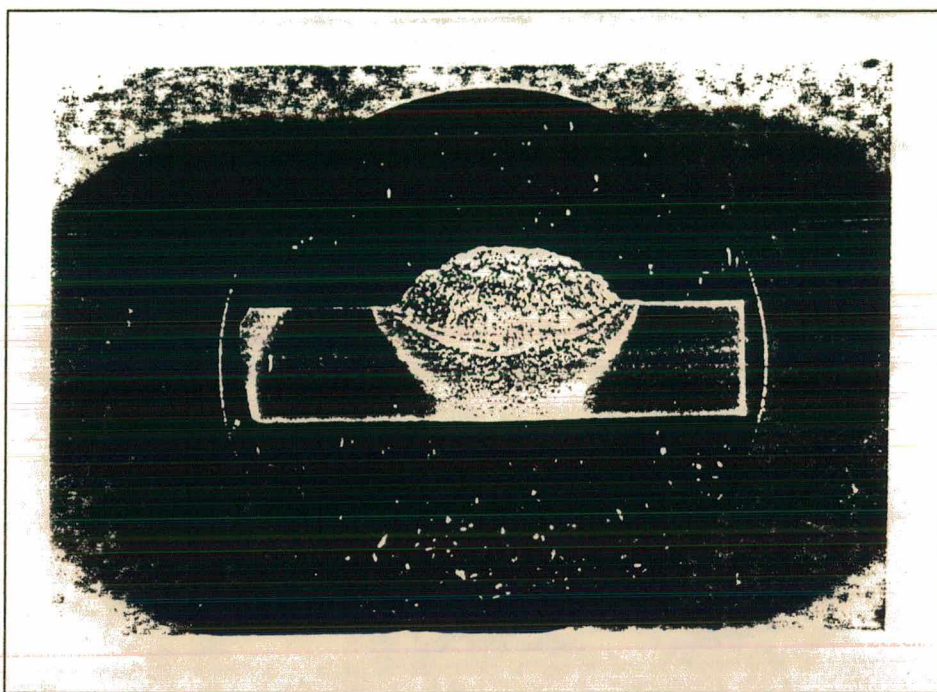


Figura 42 - Macrografia do CP1, de simples deposição sobre chapa. Seção de melhor aspecto visual (aumento 4X, ataque nital 2%).

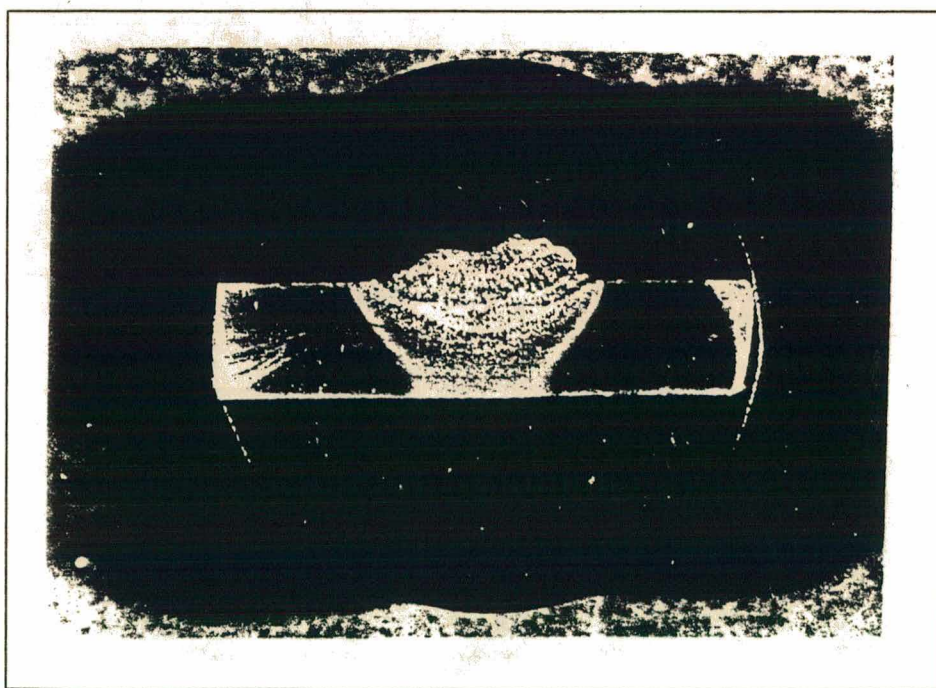


Figura 43 - Macrografia do mesmo cordão da figura 42 (CP1). Seção de pior aspecto visual (aumento 4X, ataque nital 2%).

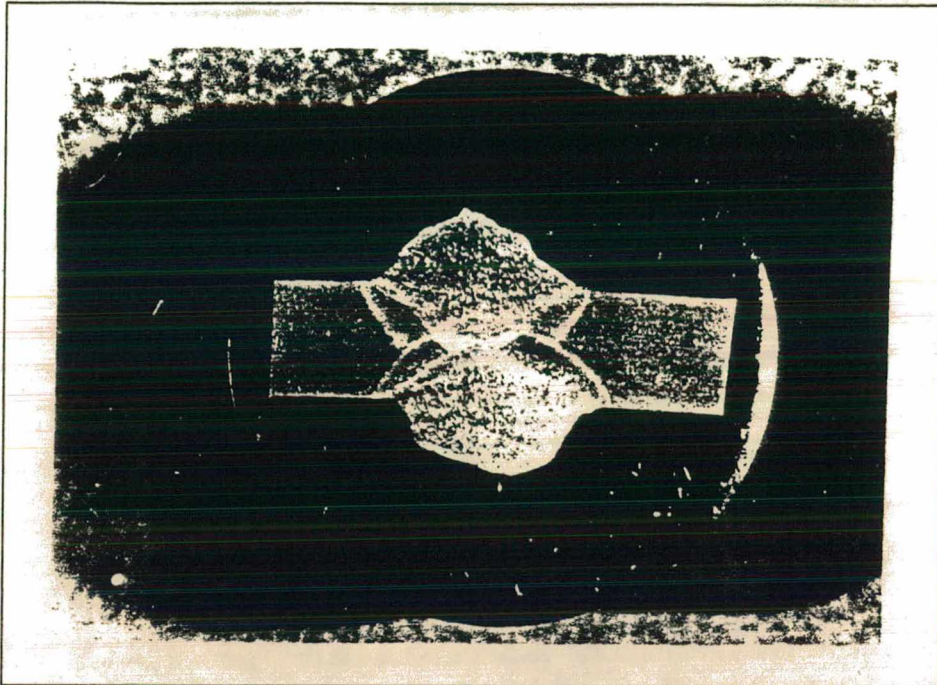


Figura 44 - Macrografia do CP2 soldado de ambos os lados em ensaio de simples deposição sobre chapa (aumento 4X, ataque nital 2%).

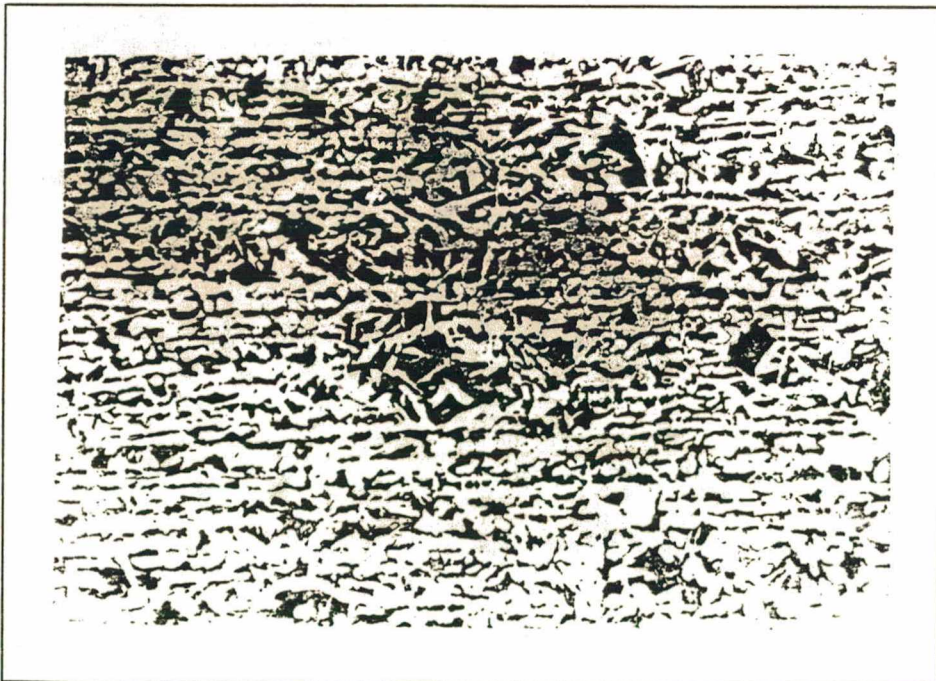


Figura 45 - Metal de base. Microestrutura correspondente ao ponto "a" da figura 11 (aumento 200X, ataque nital 2%).

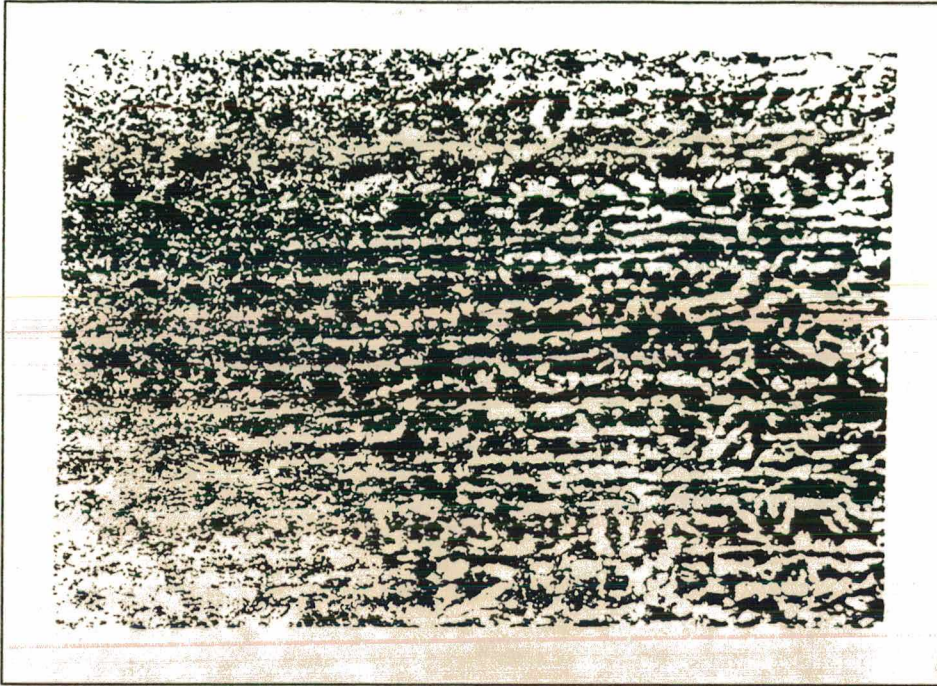


Figura 46 - Transição entre metal de base (direita) e ZAC de granulação fina (esquerda). Microestrutura do ponto "b" da figura 11 (aumento 200X, ataque nital 2%).

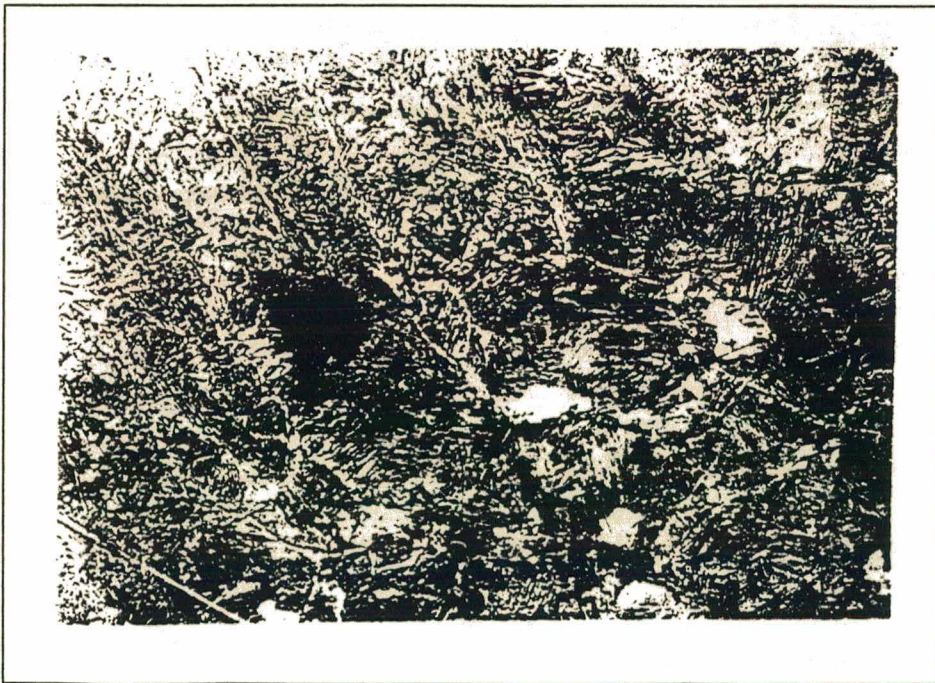


Figura 47 - Transição entre ZAC de granulação grosseira (direita) e cordão de solda (esquerda). Microestrutura do ponto "c" da figura 11 (aumento de 200X, ataque nital 2%).

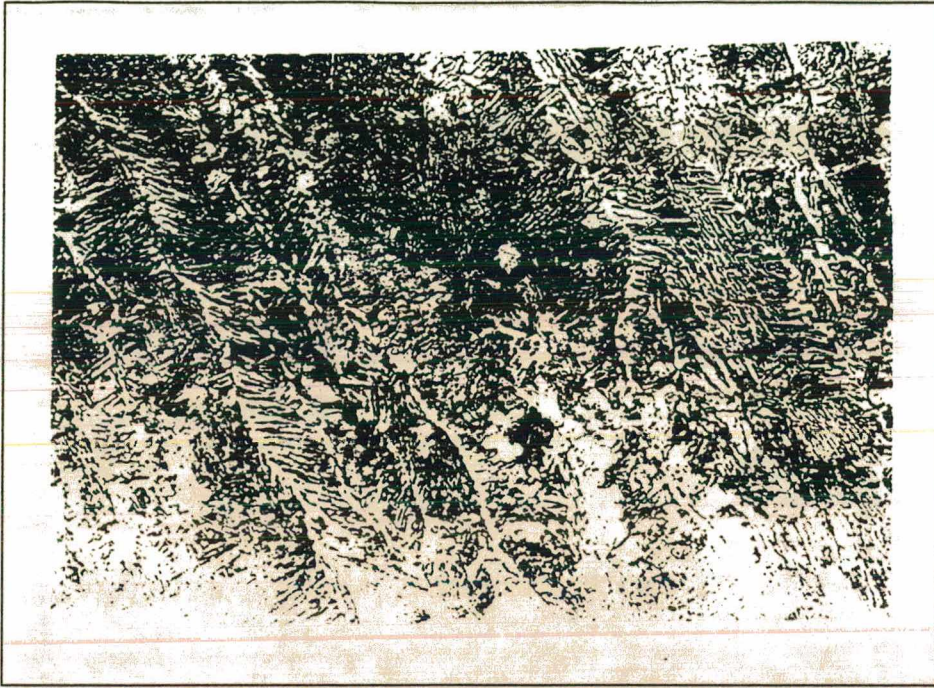


Figura 48 - Cordão de solda. Microestrutura correspondente ao ponto "d" da figura 11 (aumento 200X, ataque nital 2%).

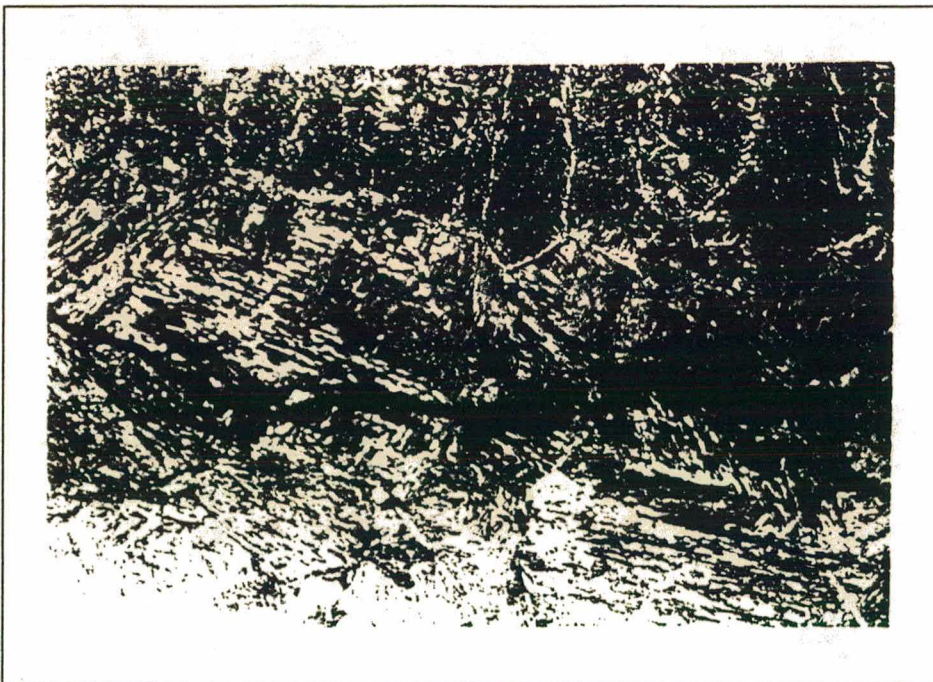


Figura 49 - Trinca a frio na ZAC de granulação grosseira e, pouco acima, linha de fusão (aumento 200X, ataque nital 2%).

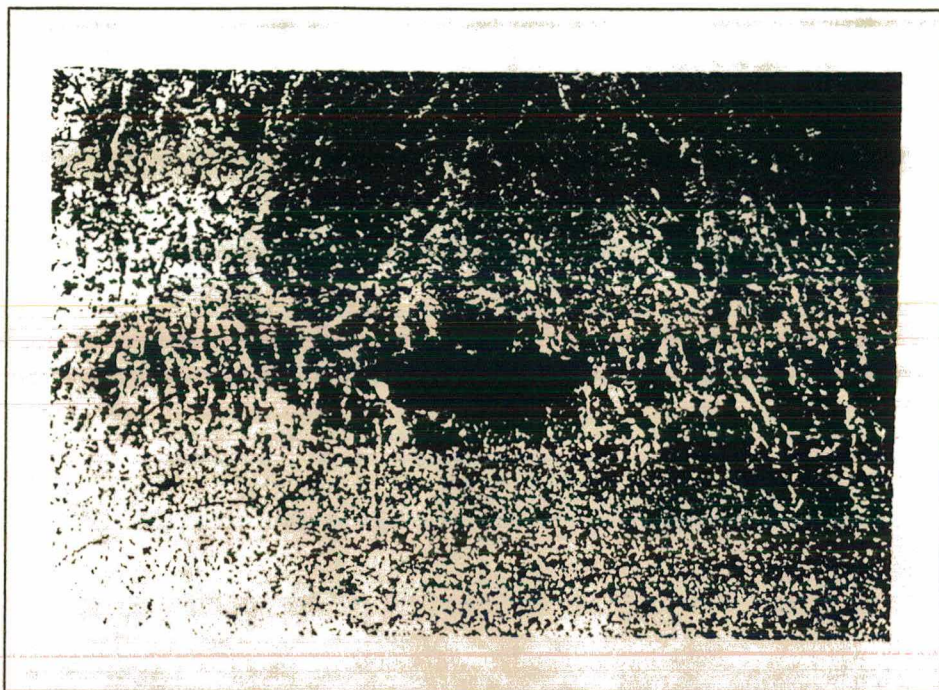


Figura 50 - Porosidade no interior do primeiro cordão de solda da figura 44 (aumento 50X, ataque nital 2%).

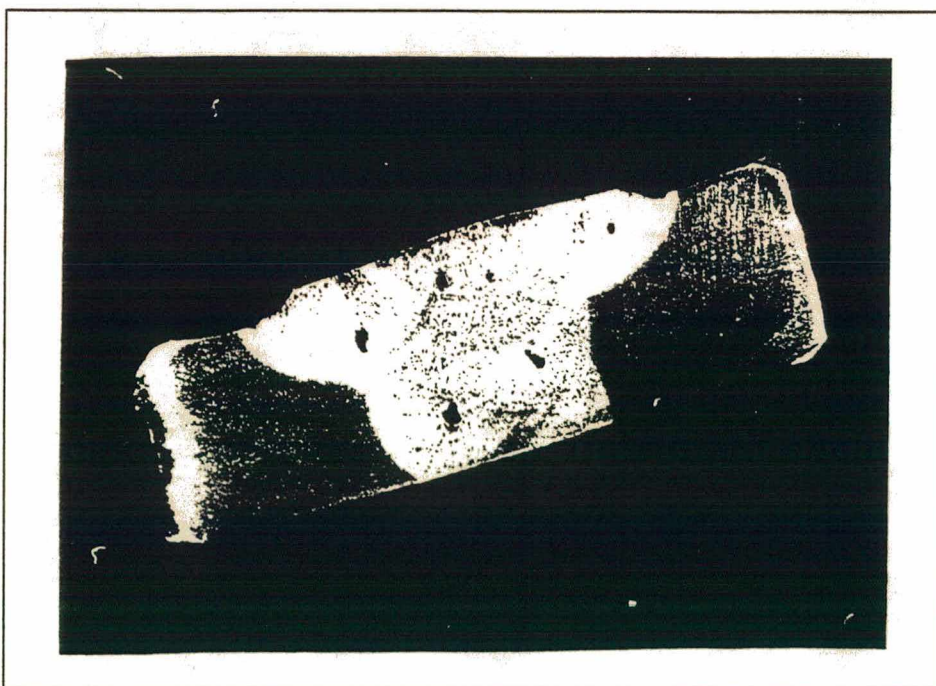


Figura 51 - Macrografia da 1ª junta soldada. Corte transversal (aumento 2X, ataque nital 10%).

requisitos para o seu surgimento são amplamente satisfeitos. Também é importante ressaltar que a geometria e localização desta trinca coincide com as apresentadas na bibliografia pesquisada, onde são denominadas de “cold cracking” e “underbead cracking”. Apesar de todas estas evidências, decidiu-se fazer uma análise química do metal de base e calcular o carbono equivalente C_{eq} , pois não se esperava uma dureza tão alta, já que se tratava de um aço tipo 1020 de baixo teor de carbono. Os resultados obtidos encontram-se a seguir:

⇒ *Análise química do metal de base, aço ABNT 1020 (% em peso)*

C= 0,23	S= 0,021	P= 0,011	Mn= 0,84
Si= 0,03	Cr= 0,01	Ni= 0,01	Mo < 0,01

⇒ *Carbono equivalente calculado pela fórmula do IIW*

$$C_{eq_{IIW}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

$$C_{eq_{IIW}} = 0,375$$

O resultado obtido, $C_{eq_{IIW}} = 0,375$, em condições de soldagem a seco é tido como bom, pois está abaixo do valor crítico de 0,4. Porém, ao se submeter esse material com $C_{eq} = 0,375$ a um ciclo térmico bastante severo como o da solda molhada, obtém-se estruturas duras, provavelmente martensíticas, com dureza máxima de até 493 HV₁₀ (item 6.9). Estas estruturas, por sua vez, associadas a um alto hidrogênio difusível (H_D), causam trincas a frio. Portanto, além do cálculo do C_{eq} , é importante realizar o teste de H_D. A realização deste teste é explicada pelo fato de que, apesar do nível de hidrogênio na atmosfera do arco ser sempre elevado, o hidrogênio efetivamente absorvido e difundido varia muito.

6.12 - Influência de Variáveis/Parâmetros sobre o Surgimento de Defeitos

Conforme citado no capítulo 4, o problema de porosidades na soldagem subaquática molhada é devido a ação conjunta de diversos fatores. Dentre eles os mais importantes são: a) intensa formação de gases provenientes da queima do fluxo do eletrodo e da dissociação da água, b) rápido resfriamento da poça de fusão, impedindo a saída total destes gases do interior da mesma, e c) variáveis de soldagem não ideais. Como os dois primeiros fatores são inerentes à

soldagem subaquática molhada, são difíceis de serem eliminados, decidiu-se, portanto, pesquisar mais o terceiro fator, com o intuito de minimizar o seu efeito.

A metodologia de trabalho adotada está descrita no item 5.4.2 (I), assim como a terminologia utilizada na classificação dos poros nos tamanhos p , m , G e GG .

As figuras 53 e 54 são fotografias reduzidas (escala 1:1,5) de duas das diversas radiografias feitas para este estudo, que permitem ter uma idéia melhor do tamanho dos poros anteriormente descritos. O 1° cordão da figura 53 não possui poros. O cordão do meio possui os seguintes poros: $3m$ e $10p$. Já o último cordão tem $14G$, $5m$ e $30p$. Os poros super grandes podem ser observados no último cordão da figura 54 que possui $15GG$, $5G$ e $26m$. É importante ressaltar que dificilmente os poros de tamanho m (médio) e, principalmente, os de tamanho p (pequeno), poderão ser vistos nestas fotografias. Entretanto, os mesmos são facilmente observados ao colocar as radiografias originais sobre um negatoscópio.

As figuras 53 e 54 também ilustram alguns resultados finais deste estudo. Por exemplo, a influência da velocidade de avanço do arame V_a , da tensão U e da polaridade. Os dados de soldagem e a quantidade e tipo de poros obtidos para cada cordão encontram-se nas tabelas 11 e 12, [68, 69 e 70].

Comparando-se o 3° cordão da figura 53 com o 2° cordão da figura 54, percebe-se que foram utilizadas exatamente as mesmas variáveis e parâmetros para ambos, à exceção da polaridade (ver tabelas 11 e 12). Como o cordão da figura 53 apresentou melhor resultado ($14G$, $5m$ e $30p$ contra $2GG$, $26G$ e $28m$), pode-se concluir que o uso da polaridade CC- é mais adequado sob o ponto de vista de evitar porosidade. Cabe salientar que todos estes ensaios foram realizados duas vezes e houve boa repetibilidade dos resultados. Outro importante fato a ser destacado é que a polaridade CC- é empregada pela PETROBRÁS nas soldagens molhadas com eletrodo revestido. Neste caso, o porta-eletrodo sendo o catodo sofre menos corrosão.

Outro resultado obtido é que o aumento da velocidade de avanço do arame e da tensão aumentam significativamente a quantidade e o tamanho dos poros. Tal fato pode ser facilmente constatado analisando-se os dados das figuras 53 e 54.

O eletrodo de diâmetro 1,2 teve um resultado muito melhor que o de diâmetro 1,0 mm. Acredita-se que isto ocorreu porque a estabilidade do arco para eletrodos de pequeno diâmetro é pior e porque a estabilidade do arco também influi nos poros (quanto menos estável é o arco, maior é a quantidade de poros). Segundo este raciocínio, o fato de que o resultado final conseguido com o eletrodo de 1,2 mm ter sido ligeiramente melhor que com 1,6 mm, foi inesperado. Entretanto, é importante lembrar que esta diferença foi bastante pequena, o que não

justificaria a utilização do eletrodo de 1,2 mm, já que o eletrodo mais recomendado sob o ponto de vista operacional é o de 1,6 mm.

A metodologia adotada mostrou-se eficiente e muito importante para um levantamento prévio de defeitos para as diferentes condições de soldagem.

Posição Cordão	Poros n° / tipo	Va (m/min)	U (V)	Ø (mm)	Polaridade	Vs (cm/min)	dcp (mm)
1°	-----	3	30	1,6	CC-	15	15
2°	3m, 10p	5	33	1,6	CC-	15	15
3°	14G,5m,30p	7	36	1,6	CC-	25	20

Tabela 11 - Dados de soldagem e quantificação dos poros obtidos nos cordões da figura 53.

Posição Cordão	Poros n° / tipo	Va (m/min)	U (V)	Ø (mm)	Polaridade	Vs (cm/min)	dcp (mm)
1°	16G, 10m	6	35	1,6	CC+	20	15
2°	2GG,26G,28m	7	36	1,6	CC+	25	20
3°	15GG,5G,26m	8	37	1,6	CC+	25	20

Tabela 12 - Dados de soldagem e quantificação dos poros obtidos nos cordões da figura 54.

6.13 - Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios mecânicos em corpos de prova retirados de juntas soldadas em condições próximas da real, com o objetivo de avaliar a qualidade final das soldas. Outros objetivos como, por exemplo, poder avaliar melhor os problemas operacionais de preenchimento de uma junta real, também foram alcançados.

Para que se tivesse uma idéia geral da quantidade de poros decidiu-se, primeiramente, preencher uma junta-teste de aço ABNT 1020 de 12,7 mm, seguindo o procedimento de 5.4.2 (m). O resultado obtido foi uma junta com um nível de porosidades bem elevado (ver radiografia na figura 55). Decidiu-se então abaixar um pouco o valor da tensão para 35 V, apesar de U=37 V ter sido considerada adequada para conseguir uma boa estabilidade do arco.

Foram necessários em torno de 23 passes, distribuídos em 9 camadas, para o total preenchimento de cada uma das duas juntas definitivas (metal de base aço API 5LX70 de 25,4

mm). Isto porque, antes de cada passe, era necessário esmerilhar cerca de 40% do passe anterior, para a completa retirada da escória e uma melhor uniformização do reforço, pois a superfície do cordão ficava muito irregular devido a explosões de bolhas gasosas retidas na poça de fusão, como discutido anteriormente.

Outro fato importante que foi observado é que as tensões durante a solidificação são muito mais intensas na soldagem molhada do que em ambiente seco. Por isso o preenchimento destas juntas exigiu uma maior quantidade e tamanho dos “cachorros”. Decidiu-se, portanto, fazer uma análise química do metal de base e calcular o carbono equivalente, para ter pelo menos uma idéia da provável microestrutura final da ZAC. Caso o valor calculado pela fórmula do IIW fosse $C_{eq} \geq 0,4$, corria-se o risco de ter microestrutura frágil na ZAC que, juntamente com essas altas tensões e o hidrogênio difusível, poderia causar trincas a frio. Os resultados obtidos foram:

⇒ *Análise química do metal de base, aço API 5LX70 (% em peso)*

C= 0,12	S= 0,005	P= 0,019	Mn= 1,06
Si= 0,28	Cr= 0,15	Ni= 0,02	Mo < 0,1

⇒ *Ceq calculado pela fórmula do IIW*

$$C_{eq_{IIW}} = 0,348$$

O resultado obtido para o $C_{eq_{IIW}}$ foi inferior ao valor de 0,35, considerado seguro, o que diminuiu a probabilidade de se ter microestrutura frágil [68].

Os testes mecânicos realizados foram de dobramento (lateral e de raiz), tração e Charpy. Os resultados obtidos foram:

6.13.1 - Ensaio de Dobramento Lateral

⇒ Ruptura com ângulo de 30° (1 CP)

6.13.2 - Ensaio de Dobramento de Raiz

⇒ Ruptura com ângulo de 30° (4 CP's)

Estes resultados são considerados ruins. Portanto, as condições de soldagem devem ser melhoradas para que se obtenha soldas tipo B (conforme a especificação para soldagem subaquática da AWS [9]), segundo a qual os CP's não podem se romper durante o dobramento. Como este rompimento foi causado devido ao alto nível de porosidade, pode-se, por exemplo, reduzir a tensão para minimizar este problema.

6.13.3 - Ensaio de tração

⇒ Ruptura no metal de solda (4 CP's)

$$\sigma_{r1} = 538 \text{ MPa}; \quad \sigma_{r2} = 527 \text{ MPa}; \quad \sigma_{r3} = 557 \text{ MPa}; \quad \text{e} \quad \sigma_{r4} = 553 \text{ MPa}$$

6.13.4 - Ensaio de Resistência ao Impacto

⇒ Charpy a 0 °C (8 CP's)

$$62,5 \text{ J}; \quad 45,5 \text{ J}; \quad 36,8 \text{ J}; \quad 34,4 \text{ J}; \quad 48,1 \text{ J}; \quad 44,3 \text{ J}; \quad 45,5 \text{ J} \quad \text{e} \quad 34,4 \text{ J}.$$

A figura 56 mostra a aparência das fraturas dos quatro primeiros CP's do ensaio Charpy. Nessa figura da esquerda para a direita, percebe-se um aumento da área correspondente à fratura frágil (área brilhante). Com isto a resistência ao impacto correspondente caiu, do 1° para o 4° CP, de 62,5 para 34,4 J, conforme os dados acima.

Estes resultados são considerados muito bons para a condição subaquática molhada. Uma explicação para estes valores é o grande efeito de refino de grão devido aos sucessivos passes. Outro fato que contribuiu para o refinamento de grão foi o esmerilhamento de parte do reforço, que gerou uma maior superposição de isothermas.

6.14 - Corrente Pulsada

Sabe-se que a transferência metálica obtida com corrente pulsada é empregada principalmente para a melhoria da estabilidade do arco em correntes relativamente baixas. Esta metodologia permite também a soldagem de chapas finas com maior facilidade que a transferência por curto-circuito. Entretanto, este não foi o objetivo do estudo da corrente pulsada na condição

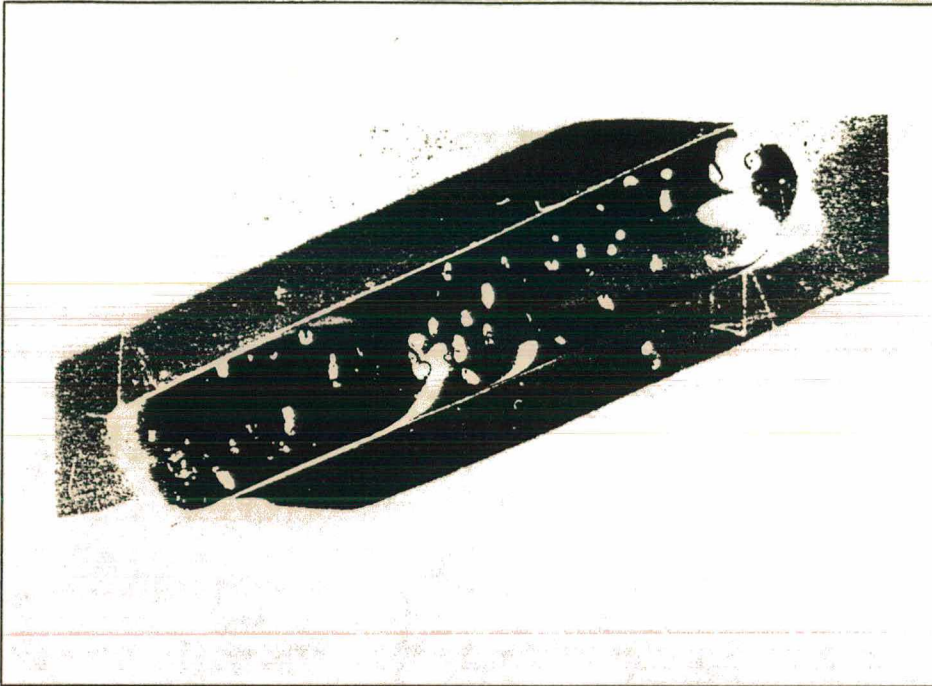


Figura 52 - Macrografia da 1ª junta soldada. Corte longitudinal (aumento 2X, superfície polida, sem ataque).

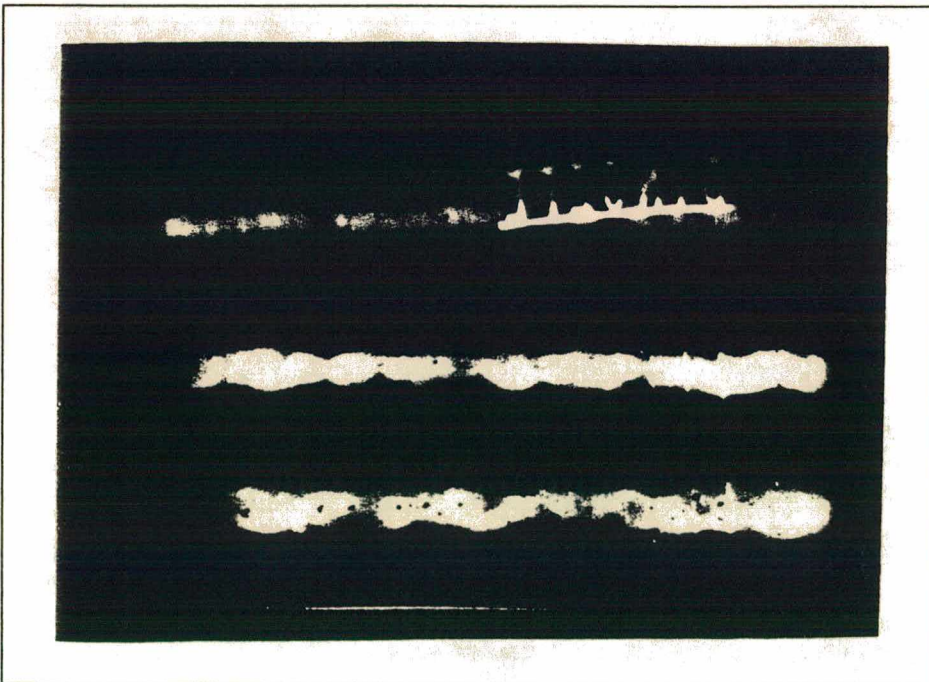


Figura 53 - Ensaio radiográfico em soldas de simples deposição em chapa (Escala 1:1,5 - ver dados na tabela 11).

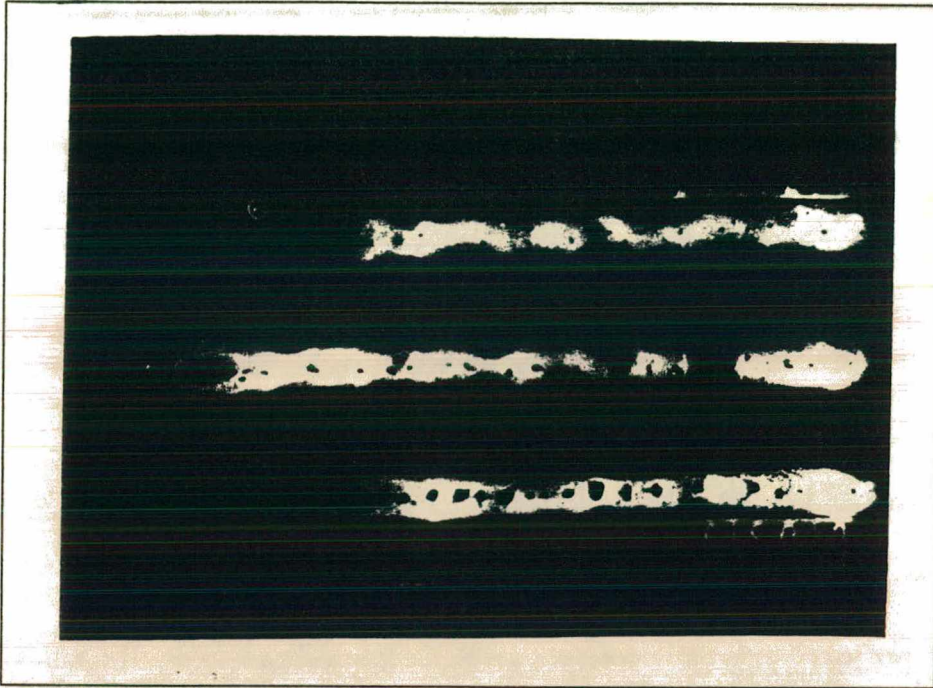


Figura 54 - Ensaio radiográfico em soldas de simples deposição em chapa (Escala 1:1,5 - ver dados na tabela 12).

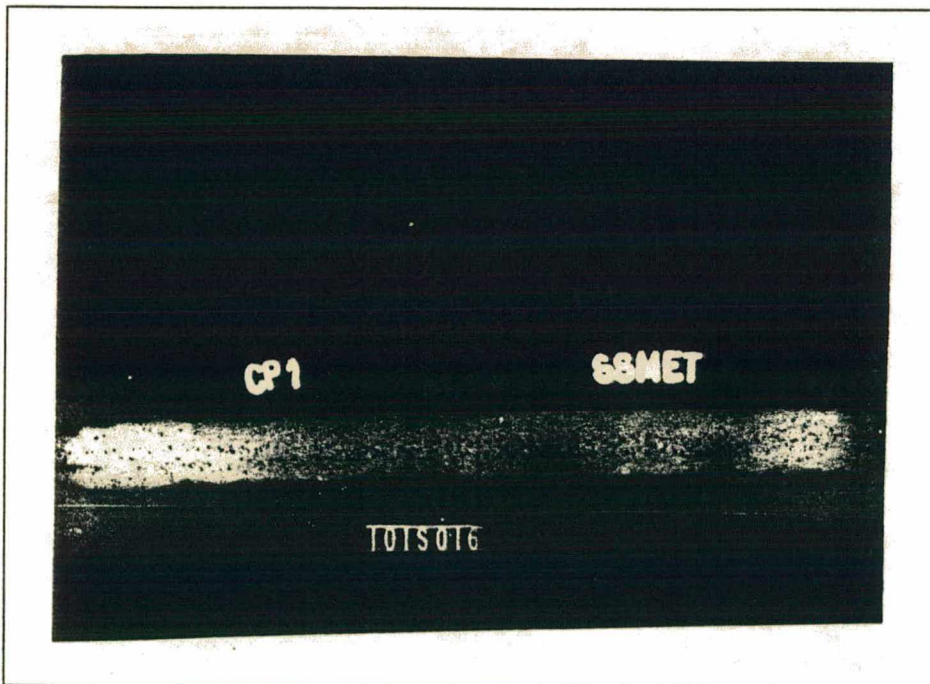


Figura 55 - Radiografia da junta soldada n° 1 (1/2").

subaquática molhada, pois não se pretende soldar chapas finas. O que se buscava era controlar a transferência metálica numa condição de grande instabilidade do arco, mesmo sabendo, de antemão, que não se controlaria a transferência metálica de forma idêntica ao que se obtém na soldagem a seco e com arame maciço, [71].

Dos quatro diferentes modos de modulação da corrente e/ou tensão descritos no item 5.4.2 (n), dois foram empregados. Tentou-se inicialmente soldar com o primeiro modo, que é imposição de corrente na base e no pulso. Entretanto, para que o processo tivesse continuidade, era necessário que se ajustasse perfeitamente as variáveis de base e pulso de modo que a corrente média resultante determinasse uma velocidade de fusão do eletrodo compatível com a velocidade de avanço do mesmo. Se este ajuste não é muito fácil num ambiente seco, mostrou-se ainda mais problemático na condição molhada. Depois de alguns testes obteve-se apenas pequenos cordões, pois o processo era interrompido, [71].

Devido à dificuldade inicial de se ajustar tais variáveis, decidiu-se então utilizar o modo misto com imposição de corrente na base e tensão na fase de pulso. Isto porque, caso as variáveis de base não estivessem adequadamente ajustadas para manter o equilíbrio entre a fusão e a alimentação do eletrodo, ocorreria um auto-ajustamento do processo na fase de pulso, que era comandada pela tensão. Desta forma o processo teria continuidade. Justamente com este objetivo é que, para a escolha das variáveis de base e pulso, decidiu-se primeiramente estabelecer um grande tempo de pulso e um pequeno tempo de base. Na fase de pulso (comando de tensão), utilizaram-se exatamente as mesmas variáveis que eram empregadas quando se soldava na forma convencional (isto é, a fonte comandando a tensão o tempo todo): $V_a = 5$ m/min; tensão $U = 35$ V e velocidade de soldagem $V_s = 20$ cm/min (ver figura 57). Como a corrente média (I_m) obtida com estas variáveis foi de 262 A (ver figura 57), decidiu-se, para a fase de base, estabelecer uma corrente imposta (I_b) menor (180 A) e aumentar gradativamente o tempo de base (t_b), enquanto o arco ainda continuava estável. Esta metodologia para levantamento de variáveis no modo misto mostrou-se bastante eficiente.

Quanto aos resultados obtidos, a melhor condição foi com: $V_a = 5$ m/min; tensão de pulso $U_p = 35$ V; tempo de pulso $t_p = 2$ ms; corrente de base $I_b = 180$ A e tempo de base $t_b = 4$ ms. Os oscilogramas correspondentes a esta condição são apresentados nas figuras 58 e 59. Nota-se nos mesmos que a corrente pulsada realmente assegura uma corrente de base mínima de 180 A, exceto nos pontos de microtrancamentos do eletrodo, quando o arco é extinto durante alguns milissegundos. Tal fato também ocorre na mesma intensidade na soldagem subaquática convencional. Como na fase de pulso comanda-se a tensão, ficando a corrente livre, ocorrem picos de elevados valores de corrente (figura 59) que não são totalmente registrados devido à

saturação do sistema de medição em 500 A. Da mesma forma dos microtrancamentos, estes picos também ocorrem na soldagem convencional (ver figura 57) e, como explicado anteriormente, causam as microfusões entre o eletrodo e o bico que podem interromper o processo. Estes grandes e demorados picos de corrente normalmente são seguidos de trancamentos e extinção temporária do arco, conforme pode ser verificado na figura 59, por volta de 2.100 ms.

Como estes problemas de aspecto operacional também ocorrem na soldagem convencional (com comando da tensão), a soldagem subaquática molhada com corrente pulsada parece ser uma boa alternativa, já que pelo menos na fase de base tem-se uma transferência de corrente mais regular.

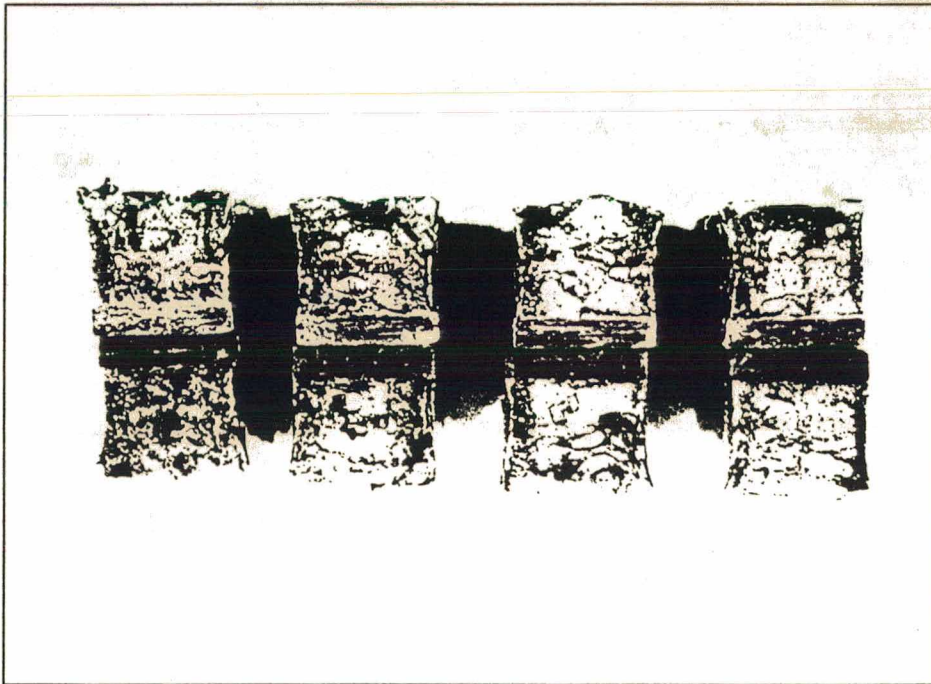


Figura 56 - CP's após ensaios Charpy, com características crescentes de fratura frágil da esquerda para a direita.

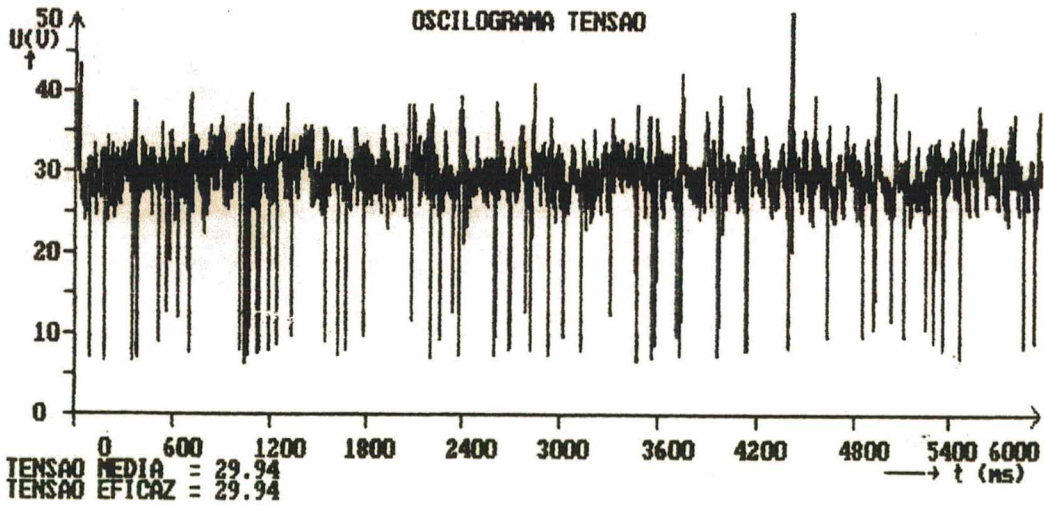
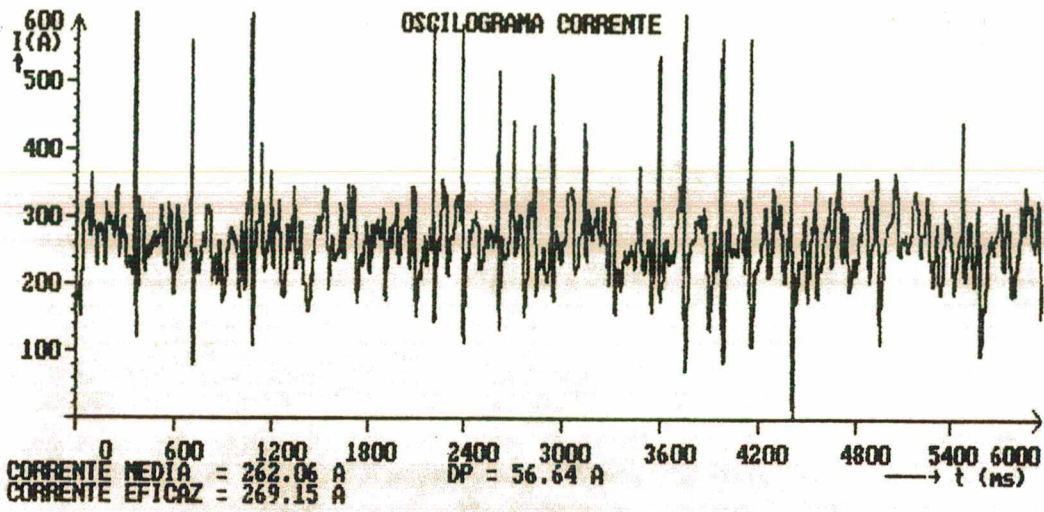


Figura 57 - Oscilogramas de soldagem com modulação convencional (comando de tensão).

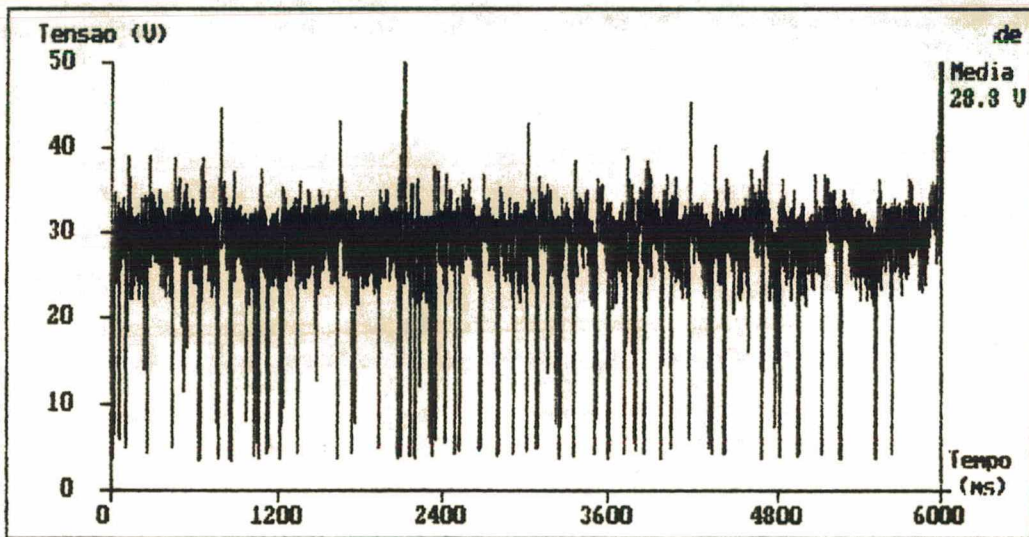
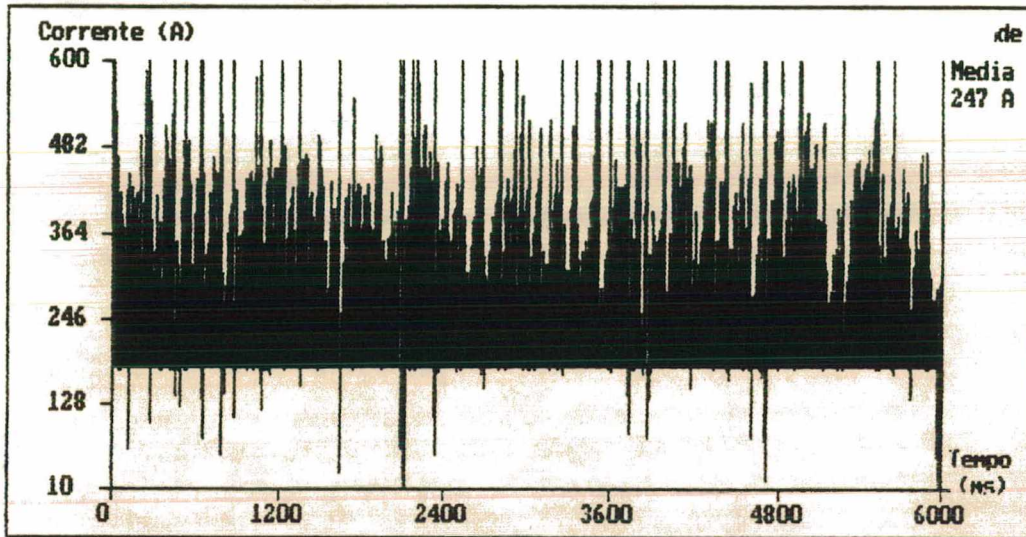


Figura 58 - Oscilogramas na soldagem com corrente pulsada no modo misto (corrente na base e tensão no pulso).

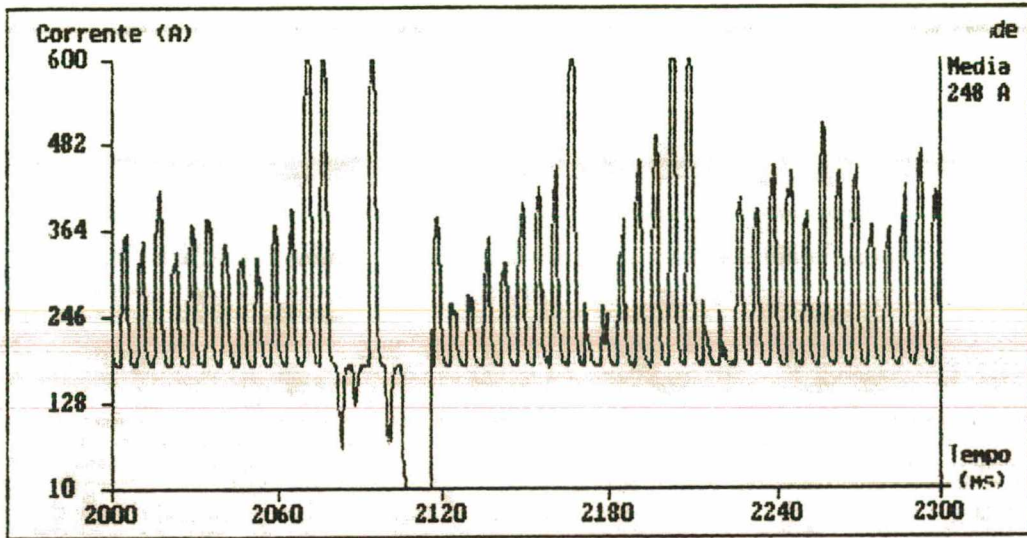


Figura 59 - Oscilograma de corrente da figura 58, expandido de 2 a 2,3 s.

VII

CONCLUSÕES

Acredita-se ao final deste trabalho, apesar da abordagem superficial de alguns assuntos, ter conseguido contribuir um pouco para o avanço da tecnologia da soldagem no país, pois este foi o primeiro estudo sistemático e amplo da soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular realizado no Brasil. Após pesquisar 14 diferentes tópicos do assunto, chegou-se às seguintes conclusões:

⇒ A presença da água reduz consideravelmente a estabilidade do arco na soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular.

⇒ A baixa estabilidade do arco deve-se, principalmente, a uma problemática transferência de corrente do bico de contato para o arame-eletrodo, durante a qual, devido à presença da água, ocorrem faiscamentos que causam microfusões do arame no bico.

⇒ Nas condições pesquisadas, sempre ocorrem microfusões do arame no bico de contato, causando trancamentos. Se o trancamento for forte, provoca a interrupção definitiva do processo; se for médio, a interrupção é parcial e a solda apresenta uma falha no local do trancamento; se for do tipo fraco (microtrancamento), o processo ocorre sem qualquer problema aparente para a solda, que apresenta um bom aspecto visual.

⇒ Mediante a seleção criteriosa e correta das variáveis e parâmetros, podem ser obtidas soldas sem interrupção do processo, com boa molhabilidade, penetração e escória de fácil remoção, além de um bom aspecto visual do cordão.

⇒ Nos estudos de desenvolvimento de procedimentos de soldagem, é importante fazer a aquisição da velocidade de avanço do arame, além da corrente e da tensão, para diferenciar os diversos fenômenos que afetam a estabilidade do arco.

⇒ O efeito do vapor d'água na região de contato elétrico é semelhante ao efeito da água, pois também provoca microfusões e reduz a estabilidade do processo.

⇒ Percebe-se uma pequena melhora da estabilidade do arco com a injeção de gás entre o bico de contato e o eletrodo, feita com o intuito de expulsar a água da região de contato elétrico.

⇒ O modo de transferência metálica na soldagem subaquática molhada foi sempre por curto-circuito.

⇒ Percebe-se que, para os três materiais do bico de contato pesquisados, não se obteve uma boa repetibilidade dos resultados da influência do material sobre a estabilidade do arco. Isto implica que, caso o material realmente exerça alguma influência, esta não é significativa, ou seja, não é um fator controlador do processo.

⇒ Os arames de maior diâmetro apresentam maior estabilidade de arco, pois arames muito finos aquecem e dilatam mais dentro do bico, favorecendo assim os trancamentos. Proporcionalmente, nos arames de 1,6 mm, por serem mais grossos, isto ocorre com menor intensidade.

⇒ Quanto melhor a resposta dinâmica do conjunto moto-redutor (maior aceleração do arame), melhor é a estabilidade do processo.

⇒ Devido à maior densidade de corrente, os arames de menor diâmetro apresentam, para a mesma corrente, uma maior produção de material depositado.

⇒ A corrente contínua com o eletrodo negativo (CC-) apresenta uma maior produção de material depositado do que com o eletrodo positivo (CC+).

⇒ A soldagem subaquática molhada com eletrodo tubular mostrou-se muito propensa a apresentar defeitos de porosidades e trincas a frio. Um maior controle sobre os parâmetros de soldagem e o desenvolvimento de eletrodos adequados são muito importantes para reduzir e/ou eliminar tais defeitos.

⇒ A polaridade CC+ apresenta um maior nível de porosidades que a polaridade CC-.

⇒ O aumento simultâneo da velocidade de avanço do arame (V_a) e da tensão (U), resulta num aumento significativo da quantidade e tamanho dos poros.

⇒ A porosidade prejudica consideravelmente os resultados obtidos nos ensaios de dobramento (os CP's rompem com menor ângulo).

⇒ No preenchimento de uma junta, o esmerilhamento parcial do reforço dos passes causa um aumento do efeito de refino de grão, melhorando com isto a tenacidade.

⇒ É muito difícil ajustar adequadamente as variáveis para realizar soldas com corrente pulsada no modo de imposição de corrente na base e no pulso. Portanto, o modo misto, com imposição de corrente na base e tensão no pulso, é mais indicado para a condição estudada, pois ocorre um auto-ajustamento do processo na fase de pulso, caso as variáveis de base não sejam as ideais.

VIII

PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS

Devido ao caráter amplo, porém exploratório deste estudo, propõe-se alguns campos de trabalho onde a pesquisa da soldagem molhada com eletrodo tubular pode ser intensificada:

⇒ Pesquisar, com a utilização de um cabeçote enclausurado que evite vazamento de gás, a utilização do CO₂ e de outros gases e misturas, para a expulsão da água da região de contato elétrico. Outro assunto importante a ser estudado com este cabeçote é se há vantagens em misturar o CO₂ com gases que contenham cloro e flúor (Freon-12, por exemplo), para reduzir o percentual de hidrogênio difusível. Um estudo semelhante foi realizado com arame sólido e apresentou bons resultados [72].

⇒ Estudar mais detalhadamente e diferenciar os diversos fenômenos que envolvem a transferência de corrente e a transferência metálica na soldagem molhada com eletrodo tubular. Para tanto, é importante que durante a soldagem se faça ao mesmo tempo: a filmagem do arco com uma câmera de alta velocidade e a aquisição em alta frequência da corrente, tensão e velocidade de avanço do arame (com o programa TUBINTER). Desta forma será possível “enxergar” com a filmadora os fenômenos em estudo, identificá-los nos oscilogramas e verificar, através da análise visual do cordão, como os mesmos afetam a qualidade final da solda.

⇒ Estabelecer um procedimento computadorizado para analisar a estabilidade do arco na soldagem molhada com eletrodo tubular. Este novo “software” deve fornecer de forma automatizada o número de interrupções (trancamentos) e o número de curtos-circuitos com e sem transferência metálica, baseando-se nos oscilogramas de corrente, velocidade de avanço e tensão adquiridos pelo TUBINTER. Para tanto, é importante que o mesmo estabeleça, por exemplo, a diferença entre um trancamento e uma interrupção por falha de transferência elétrica do bico para o eletrodo.

⇒ Pesquisar, com a utilização deste novo “software”, a influência da polaridade sobre a estabilidade do arco. Caso a polaridade CC- não seja problemática sob o ponto de vista da estabilidade, deve-se adotá-la em definitivo. Isto porque, além de gerar menos poros, é mais produtiva que a polaridade CC+.

⇒ Pesquisar separadamente o efeito da tensão (U) sobre a geração de poros, diferentemente do estudo até aqui realizado que, para racionalizar a quantidade de radiografias, pesquisou o efeito combinado da tensão e da velocidade de avanço. Acredita-se que a tensão tenha uma influência maior que a velocidade de avanço do eletrodo.

⇒ Utilizando este valor otimizado de tensão que reduz o nível de porosidades, preencher novas juntas e realizar ensaios de dobramento, visando uma qualificação dos procedimentos de soldagem segundo a norma AWS D-3.6.

⇒ Desenvolver eletrodos tubulares específicos para a soldagem subaquática molhada. É recomendável que estes eletrodos possuam elementos estabilizadores de arco (metais terras-raras, por exemplo), além de elementos de liga para melhorar as propriedades mecânicas da solda.

⇒ Desenvolver novas concepções de pistola de soldagem com o intuito de eliminar (ou pelo menos diminuir) as microfusões entre o bico de contato e o arame-eletrodo. A figura 60 é um exemplo de como poderia ser uma destas pistolas. As molas têm por objetivo eliminar a folga gerada pelo desgaste do bico de grafite.

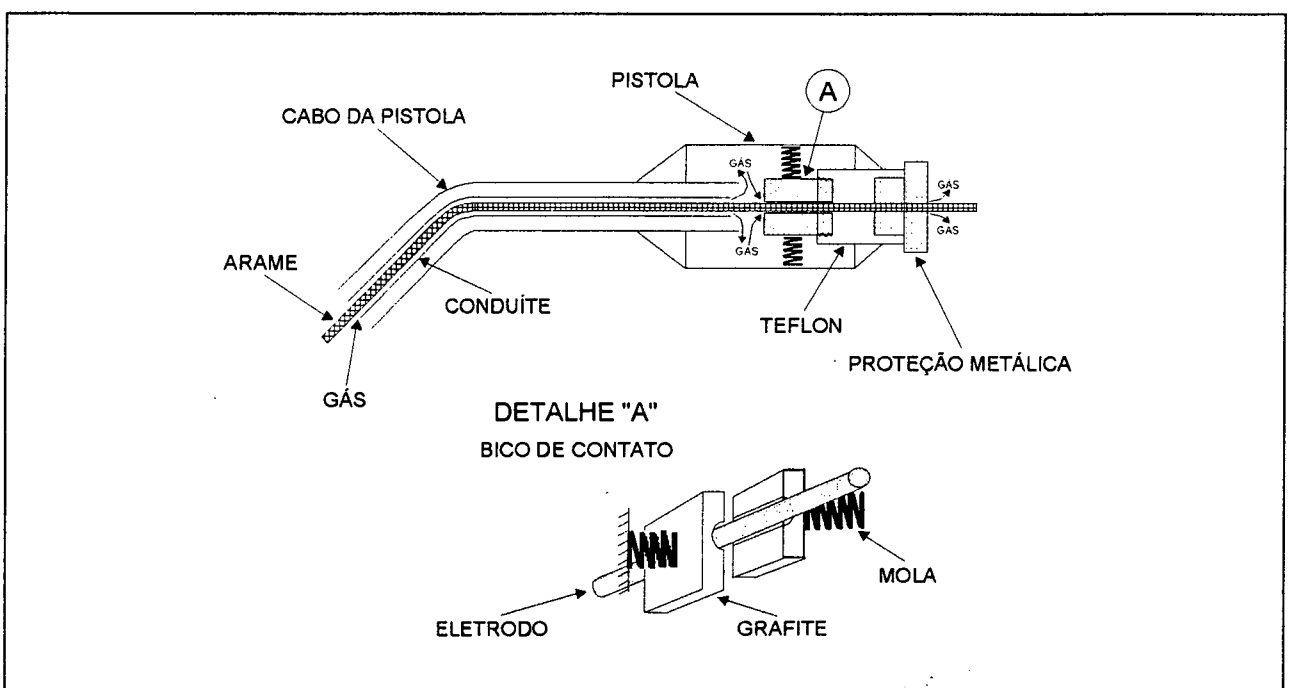


Figura 60 - Pistola com bico de contato auto-ajustável de grafite, específica para a SSMET.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - LABSOLDA/UFSC - "Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular". Proposta do projeto de pesquisa desenvolvido para o CENPES/PETROBRÁS, Março, 1994.
- [2] - Dos SANTOS, V. R. - "Soldagem Submarina na PETROBRÁS". Soldagem & Inspeção, Vol. 1 (1), pp. 23-28, 1995.
- [3] - POPE, A. M. e CUNHA, P. C. R. - "Perspectivas da Tecnologia de Soldagem na Construção Offshore para Águas Profundas". Suplemento de Pesquisa, Soldagem & Materiais. Vol. 1 (4), pp. 41- 43, 1989.
- [4] - ANDRADE, L. P.; DUTRA, J. C.; TEIXEIRA, J. C. e Dos SANTOS, V. R. - "Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular". XX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, pp. 483 - 498, Contagem - MG, 1994.
- [5] - ANDRADE, L. P.; DUTRA, J. C.; Dos SANTOS, V. R. e TEIXEIRA, J. C. - "Alternativas para Melhorar a Estabilidade do Arco na Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular". XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, pp. 493-508, Águas de São Pedro - SP, 1993.
- [6] - ANDRADE, L. P.; DUTRA, J. C.; Dos SANTOS, V. R. e TEIXEIRA, J. C. - "Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular". XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Vol. III, pp. 1667-1670, Brasília - DF, 1993.
- [7] - MASUBUCHI, K. - "Recent Topics in Underwater Welding". International Conference on Evaluation of Materials Performance in Severe Environments (EVALMAT), pp. 771-785, Kobe, Japan, 1989.
- [8] - NIXON, J. and BILLINGHAM, J. - "A Survey of Underwater Welding Techniques". Endeavour, New Series, Vol. 11 (3), pp. 143-148, 1987.
- [9] - "Specification for Underwater Welding". ANSI/AWS D3.6-83, American Welding Society, 1983.
- [10] - GIBSON, D. E.; LIDDLE, D. and RICHARDSON, I. M. - "Research in Subsea Welding Technology at the National Hyperbaric Centre". 1993 OMAE - Offshore Mechanics and Arctic Engineering Division, Vol. III-A, pp. 183-187, ASME, 1993.
- [11] - "Hyperbaric Center Simulates Underwater Welding Conditions". Welding Journal, Vol. 57 (7), pp. 42 - 44, 1978.

- [12] - PORTO, E. S. e SANTOS, V. R. - "Simulador de Soldagem Hiperbárica para Pressão Máxima Equivalente a 500 m de Lâmina D'água". *Soldagem & Materiais*, Vol. 1 (3), pp. 30-35, 1989.
- [13] - SADOWSKI, E. P. - "Underwater Wet Welding Mild Steel With Nickel Base and Stainless Steel Electrodes". *Welding Journal*, Vol. 59 (7), pp. 30-38, 1980.
- [14] - OGDEN, D. and JOOS, T. - "Specification Stirrs Underwater Electrode Development". *Welding Journal*, Vol. 69 (8), pp. 59-61, 1990.
- [15] - TEIXEIRA, J. C. G.; PIZA, M. T. e Dos SANTOS, V. R. - "Avaliação de Eletrodos Rutílicos e Oxidantes para o Emprego em Soldagem Molhada". 15.^a MR MIC, 15 p., CENPES, Nov., 1993.
- [16] - COCHRANE, D. J. and SWETNAM, D. - "Wet Welding: A Viable Technique?". *Metal Construction*, Vol. 10, pp. 680-685, November, 1986.
- [17] - GRETSKII, Yu. Ya.; KONONENKO, V. Ya. and MAXIMOV, S. Yu. - "Wet Mechanized Underwater Welding With a Self-Shielding Flux-Cored Wire". *International Technology Services*, 5 p., 1991.
- [18] - "Soldagem - Terminologia". Norma PETROBRÁS, N-1438b, 38 p., abril, 1990.
- [19] - "Soldagem Submarina - Procedimento". Norma PETROBRÁS, N-2036b, 11 p., agosto, 1989.
- [20] - "Welding Handbook". AWS, Vol. 2 - Welding Process, Eighth Edition, 1991.
- [21] - COTTON, H. C. - "Soldadura Bajo el Agua y en la Zona de Salpicaduras". *Rev. Soldadura*, Vol. 14 (1), pp. 18-35, Jan/Mar, 1984.
- [22] - QUITES, A. M. e DUTRA, J. C. - "Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico". Editora EDEME, 248 p., Florianópolis, 1979.
- [23] - NIXON, J. H. and RICHARDSON, I. M. - "Open Arc Pulsed Current GMAW - Application to Hyperbaric Welding Operations". *ASM International Welding Congress*, Toronto, October, 1985.
- [24] - MEDEIROS, R. C.; QUINTINO, L. e SANTOS, J. F. O. - "Estudo da Aptidão dos Arames Tubulares à Soldagem MIG com Transferência Controlada". *Soldagem & Materiais*, Vol. 1 (4), pp. 44 - 49, Out/Dez, 1989.
- [25] - Dos SANTOS, J. F.; SZELAGOWSKI, P. and SCHAFSTALL, H. G. - "Hyperbaric Flux Cored Arc Welding in the Depth Range Between 600 msw and 1100 msw: Process Behaviour and Weld Metal Properties". *Proceedings of International Conference on Underwater Welding*, pp. 120-134, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [26] - Dos SANTOS, J. F. and SZELAGOWSKI, P. - "Properties of Joints Metal-Arc Active Gas Welded With Flux-Cored Wire Electrodes in a Hyperbaric Atmosphere". *Schweissen und Schneiden*, Vol. 42 (12), pp. E220-E202 and 637-641, 1990.

- [27] - Dos SANTOS, J. F.; SZELAGOWSKI, P. and SCHAFSTALL, H. G. - "Soldadura Hiperbarica con Procedimiento FCAW". Rev. Soldadura, Vol. 22 (1), pp. 21-28, 1992.
- [28] - POKHODNYA, I. K.; GORPENYUK, V. N.; KONONENKO, V. Ya.; PONOMAREV, V. E. and MAKSIMOV, S. Yu. - "Special Features of Arcing and Metal Transfer in Underwater Welding With a Self-Shielding Flux-Cored Wire". Paton Welding Journal, vol. 2 (9), pp. 639-642, 1990.
- [29] - POKHODNYA, I. K.; GORPENYUK, V. N.; KONONENKO, V. Ya.; PONOMAREV, V. E. and MAKSIMOV, S. Yu. - "Some Peculiarities of Arc Burning and Metal Transfer in Wet Underwater Self-Shielding Flux-Cored Wire Welding". IIW Conference - Welding Under Extreme Conditions, III. 6, pp. 151-160, 1989.
- [30] - JUNYUE, L.; HUAN, L.; YONG, H. and CUNHAI, P. - "Study on the Characteristics of Underwater Plasma Arc". IIW Document, Doc. 212-860-94, 7 p., 1994.
- [31] - FUKUSHIMA, S.; FUKUSHIMA, T. and KINUGAWA, J. - "Preliminary Experiment on Improvement of Underwater Wet Plasma Welds Using Filler Metals". Transactions of National Research Institute for Metals, Vol. 24 (4), pp. 207-217, 1982.
- [32] - HENON, B. K. and HAYES M. D. - "Orbital GTA Welding Handles Pressure of Undersea Application". Welding Journal, Vol. 72 (11), pp. 51-55, 1993.
- [33] - MADEIRA, M. A. C. e CUNHA, J. L. R. - "Reparo de um Duto Submarino Através de Soldagem Molhada". XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, pp. 403-412, Águas de São Pedro - SP, 1993.
- [34] - HOLDSWORTH, R. D.; CAIM, G. M. and JOHNSON, A. W. - "Evaluation of Power Suppliers for Wet Welding Applications". 1989 AWS Symposium, pp. 82-83, Washington, U.S.A., April, 1989.
- [35] - Dos SANTOS, J. F.; SZELAGOWSKI, P.; SCHAFSTALL, H. G. and DOBERNOWSKY, A. - "Preliminary Investigations on the Effect of Short Circuit Variables on Metal Transfer Above 60 bar abs". 22nd Offshore Technology Conference, OTC 6212, pp. 127-134, Houston, Texas, 1990.
- [36] - "Inspeção Submarina - Visual - Procedimento". Norma PETROBRÁS, N-1815, rev. F, 10 p., setembro, 1993.
- [37] - "Inspeção Submarina - Partícula Magnética - Procedimento". Norma PETROBRÁS, N-1792d, 19 p., janeiro, 1992.
- [38] - "Rules for Submarine Pipeline Systems". Det Norske Veritas, 88 p., 1981.
- [39] - CHEDISTER, W. C. - "Underwater Magnetic Particle Inspection of Welds". Welding Journal, Vol. 63 (5), pp. 24-26, 1984.

- [40] - KRNIC, N. and ANZULOVIC, B. - "Evaluation of Some Important Factors Influencing Underwater Magnetic Particle Testing". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 86-97, New Orleans, U.S.A., March 1991.
- [41] - APPELATE, D. E. and ROKHLIN, S. I. - "Automated Underwater Welding With On-Line Ultrasonic Inspection and Control". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 70-85, New Orleans, U.S.A., March 1991.
- [42] - "Underwater Dock Repair Demands Extensive Hyperbaric Welding". Welding Journal, Vol. 63 (8), pp. 54, 1984.
- [43] - GRUBBS, C. E.; REYNOLDS, T. J. and WARD, T. A. - "Underwater Welded Repair/Reinforcement of Corrosion Damaged Tanker Loading Dock". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 01-04, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [44] - PARKER, R.; GRIGGEL, A. P.; LINDBERG, E. and MITCHELL, E. - "The Increasing Usefulness of Underwater Welding for Structural Repairs to Naval Vessels". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 169, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [45] - O'SULLIVAN, J. E. - "Wet Underwater Weld Repair of Susquehanna Unit 1 Steam Dryer". Welding Journal, Vol. 67 (6), pp. 19-23, 1988.
- [46] - O'SULLIVAN, J. E. - "Wet Underwater Weld Repairs of Susquehanna Reactor Internals". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 29-39, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [47] - MAHAN, G. D. - "Wet Underwater Weld Repair of Feedwater Sparger Pipe". Welding Journal, Vol. 69 (1), pp. 26-30, 1990.
- [48] - DELAUNE, P. T. - "Hyperbaric Underwater Welding - The State of the Art, Part 1". Welding Journal, Vol. 58 (8), pp. 17-25, 1979.
- [49] - "Atividades e Operações Insalubres". CLT - Consolidação das Leis do Trabalho, Portaria Nº 3214, NR-15, 85 p., 08-06-78.
- [50] - "Code of Practice for the Safe Use of Electricity Under Water". AODC - Association of Offshore Diving Contractors, London, 105 p., 1985.
- [51] - SZELAGOWSKI, P. - "13th International Welding Fair - Present Situation and Development Trends (Underwater Welding and Cutting)". Schweissen & Schneiden, Vol. 45 (12), pp. E236-E237, 1993.
- [52] - GOOCH, T. G. - "Properties of Underwater Welds, Part 1, Procedural Trials". Metal Construction, Vol. 15 (3), pp. 164-167, March, 1983.

- [53] - CHRISTENSEN, N. - "The Metallurgy of Underwater Welding". Underwater Welding IIW Conference, pp. 71-94, Trondheim, Norway, 1983.
- [54] - IBARRA, S.; OLSON, D. L. and LIU, S. - "Effect of Water Depth on Underwater Weld Metal Porosity Formation". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 54 - 69, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [55] - IBARRA, S.; GRUBBS, C. E. and OLSON, D. L. - "Metallurgical Aspects of Underwater Welding". Journal of Metals, Vol. 40 (12), pp. 8-10, 1988.
- [56] - COE, F. R. - "Welding Steels Without Hydrogen Cracking". The Welding Institute, Abington, 1973.
- [57] - HAFERKAMP, H.; BACH, F. W. and HAMKENS, J. H. - "Underwater Wet Welding of Structural Steels for the Off-Shore Sector Using Self-Shielded Flux-Cored Electrodes". Schweissen und Schneiden, Vol. 42 (5), pp. E71-E73 and 220-223, 1990.
- [58] - IBARRA, S.; OLSON, D. L. and GRUBBS, C. E. - "Underwater Wet Welding of Higher Strength Offshore Steels". 21st Offshore Technology Conference, OTC 5889, pp. 67-76, Houston, Texas, 1989.
- [59] - MASUBUCHI, K.; NI, R.; KAJI, H.; TAKASHIMA, S. and SUITA, Y. - "TMCP Steels for Construction and Repair of Marine Structures". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 158-168, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [60] - LIU, S.; IBARRA, S. and OLSON, D. L. - "Electrode Formulation for Underwater Welding". Proceedings of International Conference on Underwater Welding, pp. 98-119, New Orleans, U.S.A., March, 1991.
- [61] - IGNATUSHENKO, A. A.; DENISENKO, A. V. and DJACHENKO, Yu. V. - "Mechanized Underwater Welding Using Austenitic Consumables". Welding International, nº 4, pp. 306-310, 1988.
- [62] - ASNIS, A. E.; SAVICH, I. M. and GRISHANOV, A. A. - "Structural Strength of Underwater Welded Joints". Avtomaticheskaya Svarka, Vol. 43 (10), pp. 70, 1990.
- [63] - DUTRA, J. C. - "Procedimento Computadorizado de Determinação, Seleção e Controle de Variáveis na Soldagem MIG/MAG". Tese de Doutorado, 179 p., UFSC, agosto, 1989.
- [64] - "ESAB Welding Handbook: filler materials for manual and automatic welding". ESAB, Fifth edition, Sweden.
- [65] - "Specification for Low Alloy Steel Covered Arc Welding Electrodes". ANSI/AWS A5.5-81, American Welding Society, 1981.
- [66] - "Qualificação de Soldagem". Código ASME Seção IX, Norma QW-462, Ed. 1980, Trad. IBP.

-
- [67] - "Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials". ASTM E23-72, American Society for Testing of Materials, 1972, Reapproved 1978.
- [68] - ANDRADE, L. P.; DUTRA, J. C.; PIZA, M.; TEIXEIRA, J. C. e Dos SANTOS, V. R. - "Ensaio Mecânico de Juntas Soldadas e Estudo da Relação Variáveis x Defeitos na Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular". XXI Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, pp. 389 - 398, Caxias do Sul - RS, 1995.
- [69] - LABSOLDA/UFSC - "Boletim de Medição nº 4". Projeto Solda Molhada, BM 4, Outubro 1994.
- [70] - LABSOLDA/UFSC - "Boletim de Medição nº 5". Projeto Solda Molhada, BM 5, Dezembro 1994.
- [71] - LABSOLDA/UFSC - "Boletim de Medição nº 6". Projeto Solda Molhada, BM 6, Dezembro 1994.
- [72] - CHANDIRAMANI, D. - "Hydrogen Reduced in Wet Underwater GMA Welds". Welding Journal, Vol. 73 (3), pp. 45 - 49, 1994.