

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA  
E DOS MATERIAIS

**SOLDAGEM SUBAQUÁTICA COM MIG/MAG**

Por

**DANIEL SOARES DE ALMEIDA**

Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia  
Metalúrgica da Escola de Engenharia da UFRGS,  
dentro do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Metalúrgica e dos  
Materiais - PPGEMM

PORTO ALEGRE

1992

**SOLDAGEM SUBAQUÁTICA**

**COM MIG/MAG**

**DISSERTAÇÃO**

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos  
para a obtenção do Título de

**Mestre em Engenharia**

**Área de Concentração: Metalurgia de Transformação**

Por

**DANIEL SOARES DE ALMEIDA**

Engenheiro Metalúrgico

1992

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração Metalurgia de Transformação, aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador:

Prof. Dr. IVAN GUERRA MACHADO

DEMEC/PPGEMM - UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. JOSÉ FRANCISCO KISS

DEMET/UFRGS

Prof. Dr. TELMO ROBERTO STROHAECKER

DEMET/UFRGS

Eng. WALTER ROCHA DOS SANTOS, MSc.

CENPS-PETROBRÁS

Coordenador do PPGEMM:

Prof. Dr. CARLOS SAMPAIO

## RESUMO

Na produção de soldas subaquáticas são empregadas várias técnicas que podem ser classificadas em dois grandes grupos: Técnicas de soldagem em câmaras secas e Técnicas molhadas.

Ambos os grupos apresentam inconvenientes: os primeiros são capazes de produzir soldas de alta qualidade, no entanto, estas soldas são de custo muito elevado. As técnicas de soldagem molhada são de custos mais reduzidos e mais versáteis. Porém, a qualidade é muito baixa e seu emprego, normalmente, se restringe à reparos.

Uma solução para estes problemas é o processo MIG/MAG com cavidade local seca. Com este processo pode-se produzir soldas de qualidade superior com baixos custos.

O objetivo deste trabalho foi projetar e construir um dispositivo (bocal) que permitisse a criação de uma região seca em torno do arco e poça de fusão.

Com este dispositivo passou-se à investigar os parâmetros de soldagem que permitissem a obtenção de cordões de solda na água. Análises do aspecto, geometria e dureza destes cordões foram realizadas e comparadas com outros feitos na superfície.

Juntas de topo na posição plana com chanfro em "V" simples de 60° foram realizadas à uma profundidade de 300mm em chapas de aço BS4360 e arame AWS ER70S-6.

## ABSTRACT

To make underwater welds, many kinds of techniques have been proposed and used, which may be classified in two large groups: Dry Chamber Techniques and Wet Techniques.

Both groups show inconveniences: Dry Chamber Techniques are able to produce high quality welds, but they are costly. Wet Welding Techniques are less expensive and more versatile; however, the welds are rather poor and their uses are generally limited to repairs.

So, perhaps wet underwater GMAW with local cavity is a solution for this problem. With this process, it is possible to produce welds with high quality and low cost.

Therefore, the main aim of this work was to develop a nozzle, that allows the formation of a stable and durable dry cavity around the arc and molten weld pool.

Also, it was investigated the welding parameters, in a way to have sound underwater bead-on-plate and flat position groove welds. Analysis of geometry, hardness and mechanical properties of those welds were made, and compared with another made on land.

Flat position welds were made at a depth of 300mm on BS 4360 steel plates, single-V, 60° angle, with filler wire AWS ER70S-6.

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças à orientação e ao apoio do Prof. Dr. Ivan Guerra Machado, aos financiamentos do CNPq e PETROBRÁS e às doações da White Martins.

Foi de grande importância a colaboração do Sr. Luis Henrique Machado Zaniratti, da Srta. Denise Rabeba Rolim, dos Engenheiros Arnaldo Rubén Gonzalez e José Antônio Mazzaferro e dos demais colegas do Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas.

Devo mencionar, especialmente, o companheirismo e carinho de Valéria, minha esposa, que a todo momento esteve ao meu lado.

À todos, meus sinceros agradecimentos.

## ÍNDICE:

1	.Introdução.....	1
2	.Histórico.....	3
3	.Métodos de Soldagem Subaquática.....	5
3.1	.Limitações do Sistema de Mergulho.....	8
4	.Influência do Meio Ambiente nas Soldas Realizadas na água.....	13
4.1	.Efeito do Aumento da Pressão Hidrostática nas Reações da Poça de Fusão.....	13
4.1.1	.O Hidrogênio no Metal de Solda em Condições Hiperbáricas.....	15
4.1.2	.Fontes de Oxigênio e Carbono.....	17
4.1.3	.Reações do Oxigênio e Carbono.....	20
4.1.4	.Perdas de Silício e Manganês.....	23
4.2	.O Hidrogênio e Suas Consequências nas Soldas Molhadas...	25
4.2.1	.Trinca Induzida pelo Hidrogênio.....	25
4.2.2	.A Trinca Induzida pelo Hidrogênio nas Soldas Subaquáticas.....	33
4.2.3	.Técnicas para Redução da Tendência à Trincas Induzidas pelo Hidrogênio.....	36
4.3	.Problemas Metalúrgicos Associados às Soldas Molhadas....	38
4.3.1	.Microestrutura das Soldas Subaquáticas.....	38

4.3.2.	Microdureza das Soldas Subaquáticas.....	40
4.3.3.	Fratura por clivagem nas Soldas Molhadas.....	40
4.3.4.	Defeitos nas Soldas Subaquáticas.....	41
5	.Método de Soldagem Subaquática com Cavidade Local Seca..	42
5.1	.O Processo MIG/MAG.....	42
5.1.1.	A Solda MIG/MAG em Condições Hiperbáricas.....	43
5.1.2.	Características do Processo MIG/MAG.....	44
5.1.3.	Modos de Transferência do Metal do Eletrodo para a Peça.	44
5.1.4.	Equipamento de Soldagem MIG/MAG.....	47
5.1.5.	Gases de Proteção.....	48
5.2	.Princípio de Formação da Cavidade Local Seca.....	49
5.3	.Pesquisas Realizadas e Parâmetros Utilizados.....	56
6	.Procedimento Experimental.....	61
6.1	.Objetivos.....	61
6.2	.Equipamentos.....	62
6.2.1.	Equipamento de soldagem subaquática.....	62
6.2.2.	O bocal de soldagem subaquática.....	63
6.3	.Execução.....	66
6.3.1.	Otimização dos parâmetros de controle da cavidade.....	66
6.3.2.	Experimentos para otimização do bocal.....	67
6.3.3.	Otimização dos parâmetros de soldagem.....	78
6.3.4.	Realização das juntas soldadas.....	93
6.3.5.	Avaliação das juntas soldadas.....	101



7	.Conclusões.....	111
8	.Sugestões para futuros trabalhos.....	113
9	.Apêndice.....	114
9.1	.Revisão da Norma AWS-D3-6.89.....	114
9.1.1.	Execução e Técnica.....	116
9.1.2.	Exame Visual.....	116
9.1.3.	Procedimento de Qualificação.....	117
9.1.4.	Testes Mecânicos para as Soldas.....	118
10	.Bibliografia.....	120

## LISTA DE FIGURAS

- Fig.1 :Variação dos teores de C e O com a profundidade em soldas hiperbáricas com eletrodos revestidos de aço ao carbono/36/.
- Fig.2 :Variação do conteúdo de gás no metal de solda com a profundidade/36/.
- Fig.3 :Comparação entre o conteúdo de hidrogênio medido e calculado em atmosfera seca e úmida para os eletrodos E7016 e E8018 em condições hiperbáricas/32/.
- Fig.4 :Temperatura de equilíbrio para o C e Si/38/.
- Fig.5 :Efeito da pressão no produto  $m = [\%C].[\%O]$ /38/.
- Fig.6 :Efeito da pressão sobre os elementos de liga em soldas hiperbáricas com eletrodos revestidos/36/.
- Fig.7 :Correlação entre os conteúdos de Mn e Si no metal se solda/38/.
- Fig.8 :Influência da pressão parcial sobre a solubilidade do hidrogênio no ferro a 1600°C.
- Fig.9 :Solubilidade [%H] e difusividade (D) do hidrogênio no ferro com a temperatura/40/.
- Fig.10:Solubilidade do hidrogênio em várias ligas binárias de ferro a 1592°C/41/.
- Fig.11:Propagação do hidrogênio em relação ao movimento do arco/40/.
- Fig.12:Morfologia das trincas induzidas pelo hidrogênio/40/.
- Fig.13:Tempo de resfriamento entre 800 e 500 °C para soldas com eletrodos revestidos ao ar e na água/32/.
- Fig.14:Tempo de resfriamento de soldas molhadas sobre convecção livre (a) e reduzida (b)/32/.
- Fig.15:Diagrama CCT para aço carbono (C=0.17%) com curvas de

resfriamento para diversas condições de soldagem/34/.

Fig.16:Bocal MIG-MAG para soldagem subaquática.

Fig.17:Bocal MIG-MAG duplo para soldagem subaquática.

Fig.18:Bocal MIG-MAG para soldagem subaquática com as dimensões características/46/.

Fig.19:Características do fluxo de água através do bocal/46/.

Fig.20:Características do fluxo de água ,compensando o decréscimo de pressão com um fluxo de gás./46/

Fig.21:Condições críticas de formação da cavidade/46/.

Fig.22:Efeito do fluxo de gás sobre o conteúdo de hidrogênio em soldas subaquáticas MIG-MAG com cavidade local seca em pressões de 1 e 6 bar/25/.

Fig.23:Fluxograma do equipamento de soldagem subaquática.

Fig.24:Desenho do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática.

Fig.25:Fotografia do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática.

Fig.26:Fotografia do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática desmontado.

Fig.27:Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para diversos bocais.

Fig.28:Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para o bocal 2 com diversas alturas da borda.

Fig.29:Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para o bocal 2 com diversas distâncias bocal/chapa.

Fig.30:Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para o bocal 1 com diversas distâncias bocal/chapa.

Fig.31:Influência da velocidade da água no diferencial de pressão para diversas aberturas do bocal 1.

Fig.32:Influência da vazão de água no diferencial de pressão para diversas aberturas do bocal 1.

Fig.33:Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversos bocais.

Fig.34:Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas aberturas do bocal 4.

Fig.35:Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas distâncias bocal 1/ chapa.

Fig.36:Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas distâncias bocal 4/ chapa.

Fig.37:Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas distâncias bocal 3/chapa.

Fig.38:Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas alturas do chanfro.

Fig.39:Microdureza do M.S. para "bead-on-plate" na água e ao ar.

Fig.40:Microdureza da ZAC para "bead-on-plate" na água e ao ar.

Fig.41:Influência da velocidade de soldagem na dureza-Energia de soldagem: 1,5 kJ/mm.

Fig.42:Influência da velocidade de soldagem na dureza-Energia de soldagem: 1,7 kJ/mm.

Fig.43 a 54:Aspecto dos cordões de solda.

Fig.55 a 66:Macrografias dos cordões de solda.

Fig.67:Influência da energia de soldagem na largura do cordão de solda.

Fig.68:Influência da energia de soldagem no reforço do cordão de solda.

Fig.69:Influência da energia de soldagem na penetração do cordão de solda.

Fig.70:Influência da energia de soldagem na área transversal do cordão de solda.

Fig.71:Macrografia da secção transversal da junta 1.

Fig.72:Macrografia da secção longitudinal da junta 1.

Fig.73:Macrografia da secção transversal da junta 2.

Fig.74:Macrografia da secção longitudinal da junta 2.

Fig.75:Macrografia da secção transversal da junta 3.

Fig.76:Macrografia da secção transversal da junta 4.

Fig.77:Macrografia da secção transversal da junta 5.

Fig.78:Aspecto geral da junta 6.

Fig.79:Aspecto do cordão de solda da junta 6.

Fig.80:Macrografia da secção transversal da junta 6.

Fig.81:Macrografia da secção longitudinal da junta 6.

Fig.82:Aspecto geral da junta 7.

Fig.83:Aspecto do cordão de solda da junta 7.

Fig.84:Macrografia da secção transversal da junta 7.

Fig.85:Aspecto geral da junta 8.

Fig.86:Aspecto do cordão de solda da junta 8.

Fig.87:Macrografia da secção transversal da junta 8.

Fig.88:Micrografia da junta 6 - Região do último passe.

Fig.89:Micrografia da junta 7 - Região do último passe.

Fig.90:Micrografia da junta 8 - Região do último passe.

Fig.91:Valores de microdureza da junta 8 (soldada ao ar em três passes, gás de proteção: Ar + 25% CO<sub>2</sub>).

Fig.92:Valores de microdureza da junta 6 (soldada na água em

três passes, gás de proteção: Ar + 25% CO<sub>2</sub>).

Fig.93:Valores de microdureza da junta 7 (soldada na água em três passes, gás de proteção: Ar + 8% CO<sub>2</sub>).

Fig.94:Valores de microdureza para o último passe das três juntas anteriores.

Fig.95:Corpo de prova de tração - junta 6.

Fig.96:C.P. de dobramento - Face e Raiz - junta 6.

Fig.97:C.P. de dobramento - Face e Raiz - junta 7.

Fig.98:C.P. de dobramento - Face e Raiz - junta 8.

## LISTA DE TABELAS

- Tab.I: Limitações dos vários sistemas de mergulho.
- Tab.II: Razão de trinca e dureza do metal de solda de soldas realizadas na superfície e na água.
- Tab.III: Parâmetros de soldagem e de formação da cavidade.
- Tab.IV: Composição química (%) e propriedades mecânicas.
- Tab.V-a: Soldas ao ar - Aço BS4360.
- Tab.V-b: Soldas na água - Aço BS4360.
- Tab.V-c: Soldas na água - Aço A36.
- Tab.VI: Parâmetros utilizados na soldagem de juntas.
- Tab.VII: Metalografia quantitativa das juntas soldadas.

## SOLDAGEM SUBAQUÁTICA COM MIG/MAG

### 1. INTRODUÇÃO:

Várias das atividades atualmente desenvolvidas pelo homem requerem o emprego de soldagem subaquática. Entre elas destacam-se: reparos em navios; construção de pontes; portos e principalmente na exploração de petróleo nas bacias continentais, onde é necessário o emprego da soldagem submarina na montagem e reparo de oleodutos, gasodutos, plataformas de prospecção, etc..

Para atender à estas necessidades, existem varias técnicas, as quais podem ser divididas em dois grandes grupos: soldagem em câmaras secas e soldagem diretamente em contato com a água.

Ambos os grupos apresentam sérios inconvenientes: o primeiro requer construção de equipamentos sofisticados, com custos operacionais elevados; já a soldagem diretamente em contato com a água ou "molhada" tem custos reduzidos, mas resulta geralmente em soldas de baixa qualidade.

Para contornar estes problemas, está sendo desenvolvido, em vários países, o processo MIG/MAG com proteção adicional de uma cortina de água em alta velocidade que, com a ajuda dos gases de proteção cria uma região seca ao redor do arco. Com este processo é possível obter uma solda subaquática de qualidade estrutural, com alta produtividade e baixos custos.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver este equipamento, otimizá-lo e, produzir em laboratório, soldas subaquáticas de alta qualidade.



Nesse sentido, foi realizada uma revisão bibliográfica da soldagem subaquática, com descrição e comentários dos métodos de soldagem sob a água e a influência do meio líquido sobre os processos de soldagem e sobre a junta soldada. Atenção especial foi dada às soldas realizadas em plena água e principalmente ao processo com cavidade local seca.

Para melhor compreensão do tema, os assuntos foram divididos em capítulos, nos quais descreveram-se os principais métodos de soldagem subaquática; o efeito da água na composição química das soldas; o efeito do rápido resfriamento das soldas devido ao meio e o efeito da pressão da água sobre o arco elétrico e reações na poça de fusão.

Finalmente, foi apresentada uma revisão da norma AWS.D3.6.89 que trata das especificações para soldas subaquáticas.

## **2. HISTÓRICO:**

Nos últimos vinte anos, com o início da exploração petrolífera nas bacias continentais, inicialmente no Golfo do México e após a crise do petróleo de 1973, no Mar do Norte, grande ênfase foi dada ao desenvolvimento de estruturas metálicas para a exploração e transporte por tubulações de hidrocarbonetos. A construção destas estruturas é feita em terra e posteriormente transportadas e instaladas no local onde se dará a exploração do petróleo /1/.

Estas estruturas, com o passar do tempo, estão sujeitas a danos por falhas no projeto ou construção, fadiga, impacto por colisão de navios e corrosão /2,3/.

Paralelamente com o programa de construção destas instalações, foi necessário o desenvolvimento de técnicas para reparo e modificações destas estruturas /4/, sendo a soldagem subaquática a mais empregada.

Apesar do grande desenvolvimento das técnicas de soldagem subaquática nas últimas duas décadas, este procedimento não é recente. A primeira aplicação que se tem notícia, foi em um barco de guerra britânico danificado durante a Primeira Guerra Mundial. Nos cinquenta anos seguintes, ficou restrita a pequenos reparos de baixa qualidade e pouca responsabilidade estrutural /1/.

O aumento do desempenho só veio a ocorrer com o início da exploração petrolífera nos oceanos, onde qualidade e produtividade, aliados à profundidades de operação cada vez maiores, tornou necessário o desenvolvimento de pesquisas, as quais originaram diversos métodos que vieram possibilitar a

realização destes trabalhos.

Um dos métodos que vem apresentando grandes possibilidades, tanto nos aspectos técnicos como econômicos, é a soldagem MIG/MAG com cavidade local seca /5/.

Atualmente, a solda subaquática é empregada na exploração petrolífera /6,7/ (montagem ou reparos de oleodutos, gasodutos, plataformas de prospecção, instalação de olhais e anodos de sacrifício) e na construção de pontes, portos, reparos de navios /8,9/, docas, vasos de pressão de reatores nucleares /10/ etc..

### **3.MÉTODOS DE SOLDAGEM SUBAQUÁTICA:**

Um dos principais objetivos da soldagem subaquática, é a obtenção de juntas soldadas com qualidade e custos compatíveis àquelas obtidas na superfície.

Para tanto, busca-se a proteção da região da soldagem dos efeitos da água, os quais são: a pressão hidrostática, influenciando a estabilidade do arco e as reações da poça de fusão e o meio aquoso, aumentando a taxa de resfriamento.

Sendo assim, para evitar os problemas correlacionados com o meio, foram desenvolvidos métodos que podem ser classificados em três grupos, de acordo com a proteção fornecida para a região da solda /11/:

#### **A)Técnica de Câmara Seca:**

##### **1)Habitat de soldagem seco à uma atmosfera:**

A solda é feita em um vaso de pressão, no qual a mesma é reduzida aproximadamente à uma atmosfera, independentemente da profundidade de trabalho.

##### **2)Habitat de soldagem seco hiperbárico:**

A soldagem é realizada na pressão ambiente numa câmara grande, da qual a água é retirada.

##### **3)Mini-habitat de soldagem seco hiperbárico:**

A soldagem é realizada numa simples e pequena câmara aberta, que acomoda apenas a cabeça e ombros do soldador-mergulhador.

## B) Técnica de Pequena Área Seca:

Utiliza um recipiente pequeno, transparente, cheio de gás à pressão ambiente, onde é realizada a solda. Na utilização deste dispositivo, o mergulhador-soldador fica na água.

## C) Técnica Molhada:

A soldagem é realizada na água, sem barreira física entre a mesma e a região da solda. Neste caso os gases gerados pelo arco são a única proteção da solda /2,11,13,14,15/.

Com a realização da solda em câmara à uma atmosfera, obtém-se uma boa qualidade, comparável às realizadas na superfície /16/, apesar da alta umidade ambiente da câmara. Como a pressão é mantida próxima à atmosférica, não ocorrem problemas de instabilidade do arco. No entanto, os custos de fabricação e operação destas câmaras, aliado à dificuldade de adaptá-las à região onde será realizada a solda, fazem com que este procedimento seja, muitas vezes, técnica ou economicamente inviável.

Já o habitat de soldagem seco hiperbárico não protege dos efeitos da pressão. No entanto, os custos de operação e construção são menores que o anterior /17/.

O mini-habitat e a técnica da pequena área seca têm custos de construção e operação bem menores, são mais versáteis quanto ao seu posicionamento e podem ser usados em qualquer estrutura. Entretanto, apresentam como limitação, a alta umidade relativa em

seu interior a qual afeta a qualidade da solda.

Na soldagem molhada, o arco é aberto diretamente na água, os custos de realização são muito mais baixos e é versátil quanto ao local a ser soldado. Entretanto, devido ao contato direto da água, a qualidade da solda não é alta, o que faz com que este processo seja aplicado apenas para pequenos reparos, ou em soldas de pouca responsabilidade estrutural.

Uma outra classificação das soldas subaquáticas pode ser feita de acordo com o equipamento de solda utilizado.

Para câmara seca, qualquer processo pode ser empregado. No entanto, os mais comuns são: eletrodo revestido; TIG /18,19/; MIG/MAG; arco submerso e plasma /5/.

Nas soldas molhadas, o processo mais utilizado é a arco com eletrodos revestidos (sendo o revestimento dos eletrodos a prova de água).

A solda a arco com eletrodo revestido realizada diretamente na água tem várias vantagens, as quais tornam o processo atrativo, ou seja: simplicidade do equipamento e de execução; baixo custo operacional; rapidez e possibilidade de ser realizada em todas as posições. No entanto, apresenta várias limitações, as quais são: pouca visibilidade da região do arco devido às bolhas geradas; altas taxas de resfriamento ocasionando têmpera; risco de trinca induzida pelo hidrogênio; processo descontínuo; aprisionamento de escória e gases devido à rápida solidificação, resultando em baixas propriedades mecânicas.

Recentemente, um novo método começou a ser desenvolvido no Japão por engenheiros da Mitsubishi Heavy Industries e posteriormente por outros grupos nos EUA e Europa.

Trata-se da utilização do processo MIG/MAG (soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo consumível) com proteção adicional de uma cortina de água em alta velocidade. Esta cortina gera, em torno do arco, uma região de baixa pressão que, com a ajuda dos gases de proteção, cria uma pequena área seca.

As soldas realizadas com este equipamento são de melhor qualidade que as produzidas na soldagem molhada, já que a água não fica em contato direto com o arco e seus custos são reduzidos em comparação com a utilização de câmaras, além de não ter as limitações deste último método. Aliada a estas vantagens, tem-se a alta produtividade inerente ao processo. Outra grande vantagem do mesmo é a possibilidade de mecanização e/ou automação do equipamento /20,21,22,23,24,25,26,27,28/.

### 3.1.Limitações do Sistema de Mergulho /30/:

A tecnologia de soldagem sob a água é diretamente dependente do sistema de mergulho. Infelizmente, as operações de soldagem subaquáticas requerem alto grau de manuseio do soldador-mergulhador, tornando muito complexa a automação e/ou controle remoto destas atividades. Sendo assim, as limitações fisiológicas impostas ao mergulhador correlacionadas ao acréscimo da profundidade, tais como narcose do nitrogênio e problemas neurológicos causados pela pressão, também são limitantes do processo de soldagem. Além disso, o principal custo associado às operações de reparo e fabricação são gerados pelos caros equipamentos de suporte e mergulho.

Portanto, é interessante fazer uma análise dos diversos

sistemas de mergulho, suas limitações e vantagens.

Estes sistemas podem ser classificados em:

A) Sistemas com interface direta entre homem e meio ambiente:

- 1) Mergulho convencional;
- 2) Mergulho por saturação;
- 3) Câmaras à pressão ambiente;
- 4) Câmaras à pressão constante.

B) Sistemas com interface remota entre homem e local de trabalho:

- 5) Veículos submersíveis;
- 6) Veículos submersíveis operados por controle remoto.

Um sumário das limitações dos vários sistemas é mostrado na Tab. I /30/.

#### 1) Mergulho Convencional:

O homem está exposto à pressão ambiente da água, mas por períodos relativamente curtos devido ao risco de saturação por gases inertes no seu organismo. À profundidades maiores que 30m, é necessário descompressão após alguns minutos de mergulho. Quando é utilizado ar comprimido como suporte de vida, a profundidade máxima de mergulho é de 60m. Utilizando-se misturas de hélio e oxigênio (heliox), o mergulho pode se dar até à 120m. Quanto maior a profundidade de mergulho, menor o tempo nesta profundidade e maior o tempo de descompressão.

Os equipamentos de suporte no mergulho convencional são mais simples.



TABELA I

LIMITAÇÕES DOS VÁRIOS SISTEMAS DE MERGULHO /30/					
Sistema de Megulho	Abilidade de Manipulação	Profundidade de Trabalho	Flexibilidade	Equipamento de Suporte	Risco de Vida
Convencional	3	1	5	3	1
Por Saturação	4	3	6	4	2
Câmara à Pressão Ambiente	5	2	2	5	3
Câmara à Pressão Constante	6	4	1	6	5
Veículos Submersíveis	2	5	4	1	4
Ídem Operados por Controle Remoto	1	6	3	2	6

Obs.: 1 refere-se à pior situação.

6 refere-se à melhor situação.

## 2) Mergulho por Saturação:

Os mergulhadores ficam durante várias horas em câmaras cuja pressão é aumentada gradativamente com uma mistura de oxigênio e gás inerte, até aquela aproximada à do local onde vão trabalhar, para que seus organismos fiquem saturados. Após este período, os mergulhadores são transferidos, através de sinos de mergulho, para o local de trabalho. Este sistema permite que o mergulhador viva e trabalhe à pressão constante por longo período de tempo, necessitando de descompressão apenas no final do trabalho. Desta maneira, a percentagem de tempo gasta com descompressão é reduzida em relação ao tempo de trabalho efetivo. Assim, as tarefas são realizadas mais rapidamente e com menor número de

mergulhadores. No entanto, a complexidade e custo dos equipamentos de suporte são muito maiores do que no mergulho convencional.

Com este sistema pode-se atingir, em mergulhos comerciais, profundidades de até 300m.

### 3) Câmaras à pressão ambiente (Câmaras Hiperbáricas):

Devido ao fato de a pressão no interior da câmara ser a mesma do ambiente externo, é necessário o uso de técnicas similares ao mergulho por saturação. As profundidades de trabalho e os requisitos para os equipamentos de suporte também são os mesmos.

### 4) Câmaras à pressão constante:

A pressão no seu interior é mantida próxima à atmosférica, independentemente da profundidade de trabalho, eliminando-se os problemas da pressão sobre o organismo humano. Com este equipamento, consegue-se trabalhar até profundidades de 900 a 1200m.

As desvantagens deste sistema são sua limitada aplicação e alto custo de construção.

### 5) Veículos submersíveis:

O veículo transporta operadores à pressão constante. Dispõe de manipuladores controlados remotamente pelos operadores para realização de trabalhos em profundidades de até 6000m. Suas limitações não estão relacionadas com profundidade, mas sim com a capacidade de manipulação de seus equipamentos e requerem

grande número de acessórios de suporte.

6) Veículos submersíveis operados por controle remoto:

Esses equipamentos são operados através da superfície pelo apoio de câmaras de TV e sistemas de sonar. Por não ter necessidade de levar, em seu interior, sistemas de suporte de vida, não há limitação de tempo de mergulho. No entanto, requerem uma plataforma de controle na superfície e cabos de força.

Para se ter uma idéia da capacidade de manipulação dos sistemas de mergulho, foram realizados testes, tendo como padrão o trabalho do homem na superfície com índice 1.

Mergulho por saturação	- 0.6
Mergulho convencional	- 0.5
Veículo submersível	- 0.05 a 0.25
Veículo com controle remoto	- 0.01 a 0.05 /30/

Estes dados mostram que a capacidade de manuseio dos veículos submersíveis é muito baixa, limitando sua aplicação nos trabalhos de soldagem.

Normalmente, estes veículos são utilizados no trabalho de inspeção visual ou por raio X, raios gama, etc. das estruturas submarinas.

#### 4. INFLUÊNCIA DO MEIO AMBIENTE NAS SOLDAS REALIZADAS NA ÁGUA

O efeito da pressão é comum a todos os processos de soldagem a arco, causando instabilidade no arco e dificultando sua abertura /31/. O aumento da pressão causa redução de volume dos gases de proteção, necessitando-se maiores vazões para obter-se boa proteção da poça de fusão e, além disto, influencia as reações químicas que ocorrem na mesma /32/.

As soldas realizadas diretamente na água sofrem um resfriamento muito mais rápido /33/ do que as realizadas na superfície, devido: ao maior coeficiente de transmissão de calor da água em relação ao ar; à turbulência causada pelas bolhas geradas pelo gás de proteção e à vaporização da água nas proximidades do arco.

O rápido resfriamento aumenta a tendência à têmpera, reduzindo a ductilidade e aumentando a dureza da junta soldada /34,35/.

Devido às altas temperaturas na região do arco, uma parte do vapor de água dissocia-se e o hidrogênio e oxigênio liberados incorporam-se ao metal fundido /35/. Durante a solidificação, o hidrogênio fica retido /33/ e, dependendo do estado de tensões da junta e microestrutura do metal, pode gerar trincas.

4.1. Efeito do aumento da pressão hidrostática nas reações da poça de fusão:

Com excessão dos métodos de soldagem com proteção de gases inertes (MIG e TIG), todos os processos de soldagem são

caracterizados por uma grande interação do metal líquido com o meio. Sendo assim, a composição do metal de solda é um balanço das reações. Certos elementos são perdidos no estágio quente e parte é rejeitada durante o resfriamento e solidificação /32/.

Por sua vez, um aumento na pressão favorece reações que consomem compostos gasosos e suprimem reações que os produzem (Figs. 1 e 2).

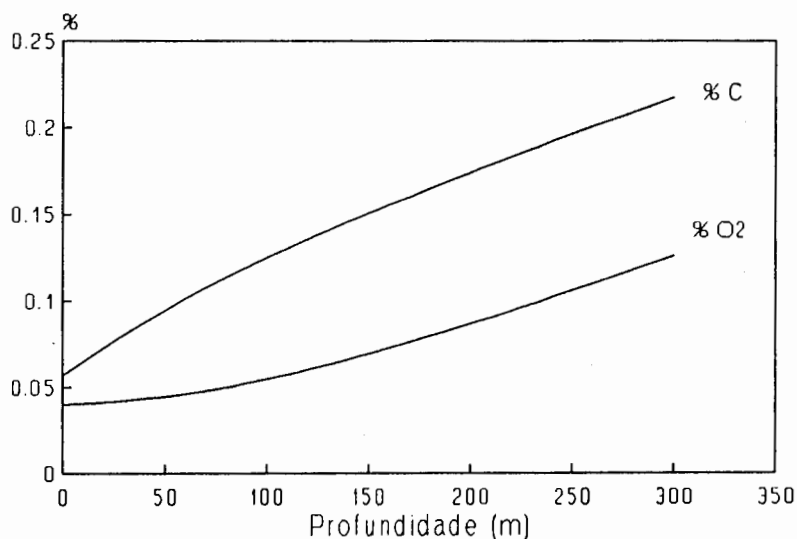


Figura 1: Variação dos teores de C e O com a profundidade em soldas hiperbáricas com eletrodos revestidos em aço ao carbono /36/.

Importantes reações deste tipo no metal de solda, são a diluição do hidrogênio proveniente de gases contendo umidade e a reduzida evolução do monóxido de carbono. Em ambos os casos, os níveis de impurezas aumentam com o aumento da pressão. O aumento no conteúdo de oxigênio no metal de solda irá resultar em grandes perdas de manganês e silício durante o resfriamento /36/.

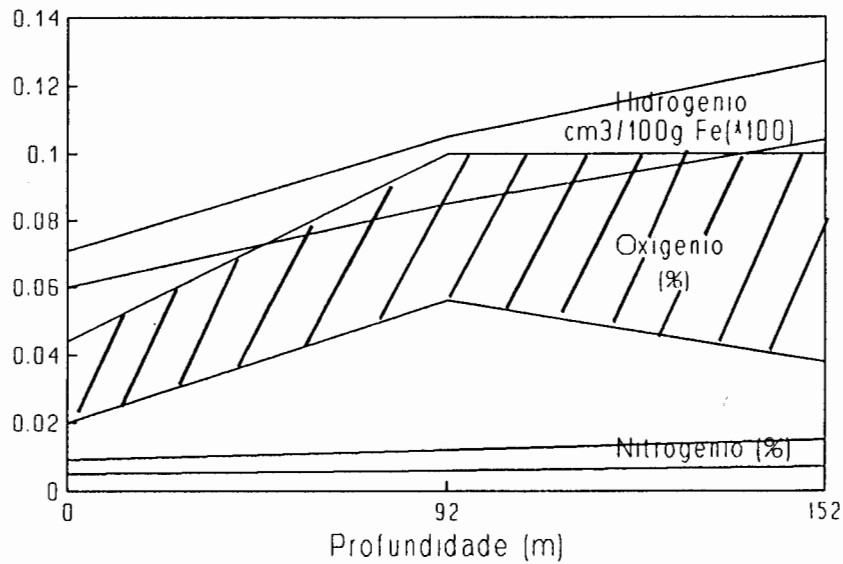


Figura 2:Variação do conteúdo de gás no metal de solda com a profundidade /36/.

4.1.1.0 hidrogênio no metal de solda em condições hiperbáricas:

Os conteúdos de hidrogênio ( $H_{FM}$ ) observados em soldas hiperbáricas são menores do que os esperados, quando se utiliza a lei de Sievert. Assumindo que a composição atmosférica do arco independe da pressão, tem-se:

$$[H]_{P \text{ bar}} = [H]_{1 \text{ bar}} P^{(1/2)} \quad (1)$$

Onde:

$[H]_{P \text{ bar}}$  = hidrogênio dissolvido no metal na pressão de trabalho;

$[H]_{1 \text{ bar}}$  = hidrogênio dissolvido no metal à pressão atmosférica

P = pressão de trabalho

Uma possível explicação para este desvio, seria um aumento da constricção da coluna do arco com o acréscimo da pressão /37,36/. Ao contrário, a superfície da poça de fusão não se altera muito com o aumento da pressão e, assim, uma área anular da poça fica exposta à atmosfera da câmara (que no caso de experimentos de laboratório pode ter umidade relativa muito baixa e preenchida por hélio). Esta situação é equivalente a uma diluição da atmosfera do arco e pode ser descrita por um fator de diluição.

$$1/f = (D_{poça}/D_{arco})^2 \quad (2)$$

f : fator de diluição

$D_{poça}$  e  $D_{arco}$  : diâmetro da poça de fusão e do arco respectivamente.

Portanto, utilizando-se o fator de diluição, pode-se escrever que:

$$[H]_{calculado} = [H]_{1\text{ bar}} (P \cdot f)^{(1/2)} \quad (3)$$

Na Fig.3 são apresentados os conteúdos de hidrogênio no metal de solda, medido para dois tipos de eletrodos revestidos (E7016 e E8018) em uma atmosfera seca de hélio e os conteúdos calculados pela fórmula.

Esta mesma fórmula pode ser corrigida para uma atmosfera úmida e a Fig.3 também apresenta estes resultados para dois níveis de umidade relativa /32,36/.

Já para o processo MIG com cavidade local seca e argônio como gás de proteção, o conteúdo de hidrogênio dissolvido é da ordem de 3 ppm.

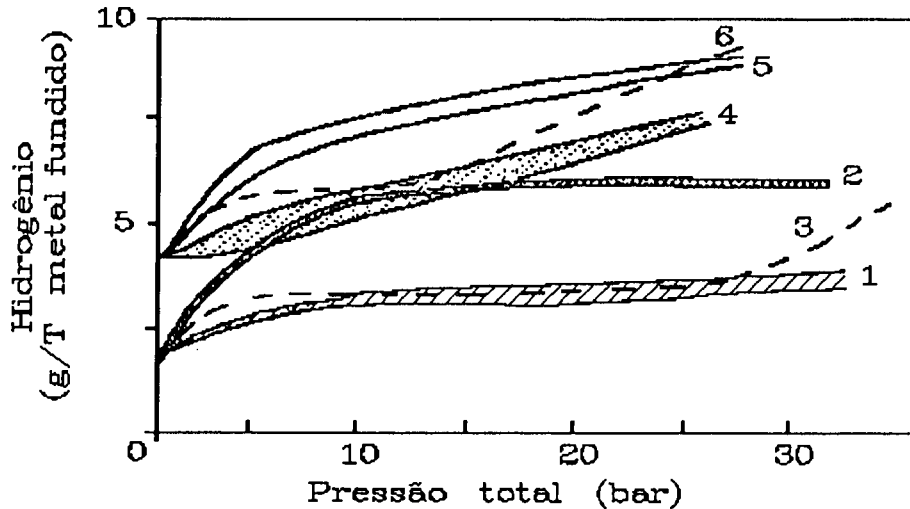


Figura 3: Comparação entre o conteúdo de hidrogênio medido e calculado em atmosfera seca e úmida em condições hiperbáricas /32/.

- 1-E8018 calculado para atmosfera seca
- 2-E8018 calculado atm. úmida(0.1% de H<sub>2</sub>O)
- 3-E8018 medido
- 4-E7016 calculado atm. seca
- 5-E7016 calculado atm. úmida(0.3% de H<sub>2</sub>O)
- 6-E7016 medido

A seguinte expressão é válida para esse processo, levando-se em consideração a pressão parcial de hidrogênio e vapor de água e considerando o desvio da lei de Sievert pelo fato de ocorrerem perdas de hidrogênio durante a solidificação até o final do resfriamento /37/:

$$H_{\text{metal}} = 32\text{ppm} \cdot (P_w)^{1/2} \quad (4)$$

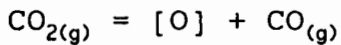
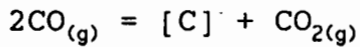
$$P_w = P_{\text{H}_2} + P_{\text{H}_2\text{O}}$$

#### 4.1.2. Fontes de oxigênio e carbono:

Durante a soldagem com eletrodos revestidos, gases são gerados pela decomposição dos componentes presentes no revestimento do eletrodo. No caso de eletrodos com revestimentos básicos, a decomposição do calcário resulta em uma atmosfera



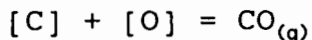
constituída predominantemente por monóxido de carbono (aproximadamente 77% em volume) e dióxido de carbono (19%), contendo ainda pequenas quantidades de  $H_2$  e  $H_2O$ . Estes gases são dissolvidos e ionizados na coluna do arco, sendo que nas condições existentes na soldagem com eletrodo revestido, as seguintes reações prevalecem /38/:



As altas concentrações de CO e  $CO_2$  na atmosfera gerada por eletrodos com revestimento básico e, também, no processo MAG, causam uma grande absorção de carbono e oxigênio no metal de solda em temperaturas elevadas (Fig.1).

Durante o subsequente estágio de resfriamento da poça de fusão, uma supersaturação com respeito às várias reações de desoxidação são inicialmente observadas. Criam-se, assim, condições para nucleação dos produtos de reação.

O carbono é um desoxidante muito mais forte que o silício e o manganês em temperaturas superiores à  $1700^\circ C$ . Sendo assim, é razoável assumir que este elemento irá controlar o nível de oxigênio durante o estágio inicial de resfriamento, de acordo com a reação:



A fervura do CO na poça de fusão foi detectada experimentalmente durante a soldagem com eletrodos revestidos, implicando com isso, que a nucleação heterogênea do CO é cineticamente possível nas circunstâncias previamente descritas. Prováveis sítios de nucleação do CO seriam bolhas de gás presentes na camada de escória cobrindo o metal, criadas pela

vigorosa ação de mistura do jato de plasma do arco.

A capacidade desoxidante do silício aumenta com o decréscimo da temperatura do metal (Fig.4) enquanto que a oxidação do carbono é gradualmente retardada durante o resfriamento da poça de fusão. Quando é atingida a temperatura crítica indicada na Fig.4, a reação do carbono é bloqueada e silício e manganês passam a controlar as reações de desoxidação.

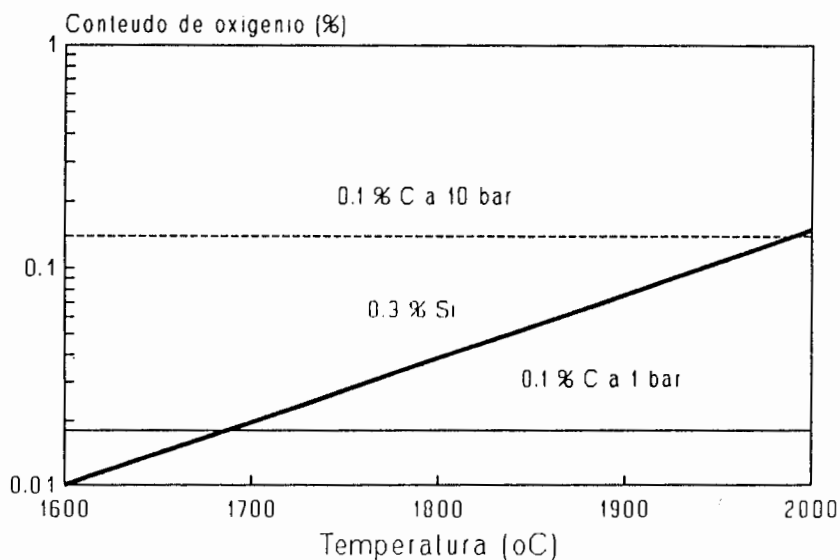


Figura 4: Temperatura de equilíbrio para o C e Si /38/.

Uma pequena, mas significativa fração de inclusões de silicato de manganês, precipitadas na parte quente da poça de fusão, sob o calor do arco, são carregados por correntes de convecção para a interface entre a macroescória e o metal, onde são absorvidos. A fração restante, formada nas partes mais frias e menos turbulentas da poça de fusão, são presas durante a solidificação do metal na forma de finas e dispersas partículas de óxidos (microescória). Isto resulta num alto e não previsível conteúdo de oxigênio no metal de solda /38/.

#### 4.1.3. Reações do oxigênio e carbono:

Tanto na soldagem como na fabricação do aço, o conteúdo de carbono tende a ser baixo quando o conteúdo de oxigênio é alto e vice-versa.

O produto  $m = [\%C] \cdot [\%O]$  é normalmente aceito como uma expressão adequada para a interação entre o carbono e oxigênio durante os estágios de refino do aço em contato com monóxido de carbono à uma pressão parcial  $P_{CO}$ .

$$m = [\%C] \cdot [\%O] = K_3 N_{CO} P_{total} \quad (5)$$

Onde:

$K_3$  é a constante de equilíbrio para a reação  $[C] + [O] = CO_{(g)}$

$K_3 = 0.0020\%$  a  $1600^\circ C$

$K_3 = 0.0026\%$  a  $2000^\circ C$

$N_{CO}$  = fração molar de CO no produto da reação

(sendo igual à pressão parcial de CO à 1bar)

$P_{total}$  = pressão ambiente total

O conteúdo de carbono do metal de solda obtido com eletrodos revestidos, está na faixa de 0.05 a 0.12%, um valor típico seria 0.08%. O conteúdo de oxigênio para eletrodos de revestimento básico está entre 260 a 440 ppm, valor típico 350 ppm ou 0.035% em peso.

Durante o estágio inicial de resfriamento na poça de fusão, o conteúdo de oxigênio em equilíbrio com o carbono é mais alto que os valores analisados. Essa situação ocorre, principalmente, em soldas hiperbáricas, onde significativa quantidade de oxigênio é removida do banho na forma de inclusões de óxidos, após as

reações de oxidação do carbono.

A concentração de oxigênio dissolvido, a partir do momento em que a queda de temperatura propicia o controle do nível do mesmo pelo silício e manganês, pode ser estimada pela medição da concentração destes elementos no depósito de solda com o acréscimo da pressão, relativo à 1 bar (designado por  $\Delta [\%O]$ ,  $\Delta [\%Si]$  e  $\Delta [\%Mn]$ ).

Se uma parte do oxigênio reagiu com o silício e o manganês à 1 bar, numa primeira aproximação, tomando-se os valores analisados de oxigênio no metal de solda, o seguinte balanço é obtido:

$$[\%O]_{eq.} = [\%O]_{anal.} + 32/28 \Delta [\%Si] + 16/55 \Delta [\%Mn] \quad (6)$$

Onde  $[\%O]_{eq.}$  é a concentração de oxigênio em equilíbrio com o carbono na pressão dada e  $[\%O]_{anal.}$  é o conteúdo de oxigênio analisado no metal de solda.

Para esta correlação não foram consideradas as perdas de manganês por evaporação, nem as possíveis reações de oxigênio com o ferro líquido.

Na Fig.5 verifica-se que a linha tracejada não passa pela origem, indicando que é a representação de uma reação fora de equilíbrio. Mas, quando é feita a correção pela equação acima, removendo o efeito da reação do oxigênio com o silício e manganês, a reta passa pela origem, indicando uma reação no equilíbrio.

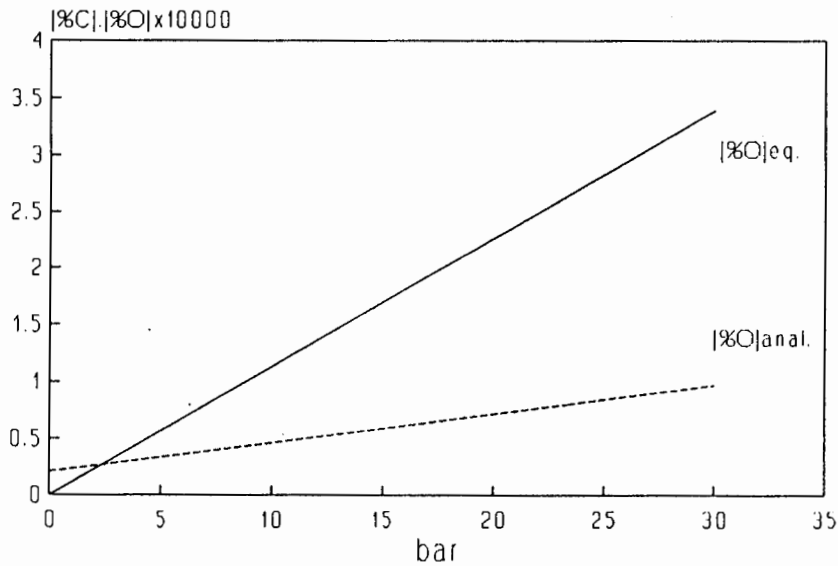


Figura 5: Efeito da pressão no produto :  $m = [\%C] \cdot [\%O]$

Linha cheia : cálculos baseados no [%O]eq.

Linha tracejada : cálculos baseados no [%O]anal /38/.

A medição da inclinação da curva (linha cheia da Fig.5), indica que o produto  $K_3 N_{CO}$  está em torno de  $1.14 \times 10^{-3}$ .

Grong et al consideraram um valor de  $K_3 = 2,3 \times 10^{-3}$  para a faixa de temperatura da reação e obtiveram:

$$N_{CO} = 0.5$$

Estes cálculos sugerem, que a pressão parcial do CO nos produtos da reação são significativamente mais baixos que a pressão ambiente, tanto em condições de soldagem atmosférica, como hiperbárica.

Uma explicação poderia ser uma infiltração do hélio, presente na câmara, nas bolhas nucleantes na interface metal/escória, reduzindo a capacidade desoxidante do carbono /38/.

#### 4.1.4. Perdas de silício e manganês:

A supressão da oxidação do carbono na poça de fusão em elevadas pressões, leva à intensificação das perdas por oxidação do silício e manganês (Figs.6 e 7).

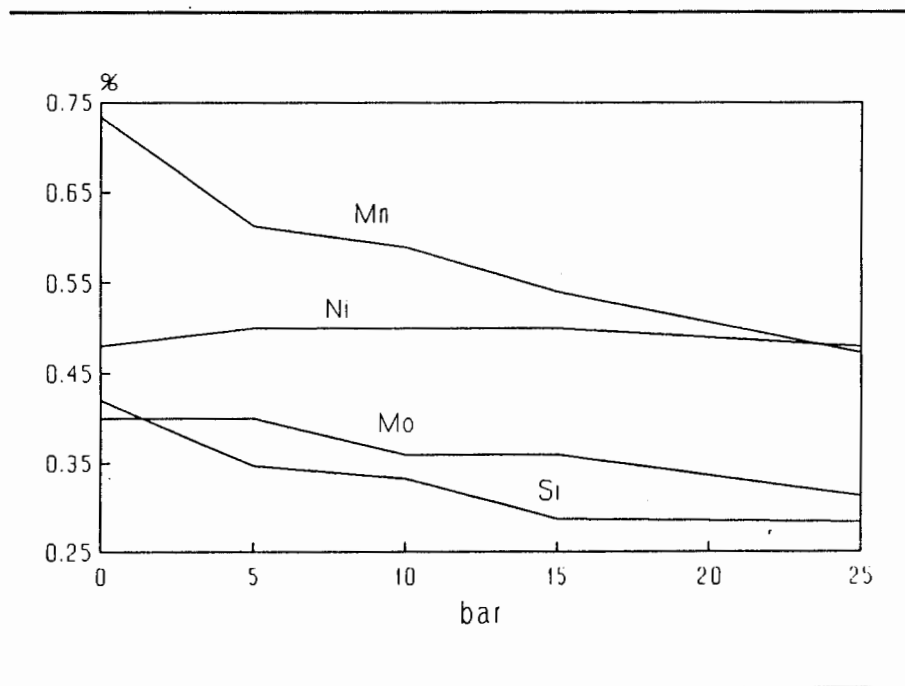
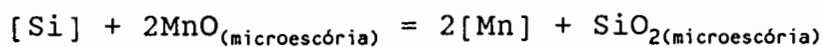


Figura 6: Efeito da pressão sobre os elementos de liga em soldas hiperbáricas com eletrodos revestidos /36/.

O conteúdo final no metal de solda de desoxidantes poderia ser controlado pela reação:



Assumindo que a razão das atividades  $(a_{\text{MnO}})^2 / (a_{\text{SiO}_2})$  na escória precipitada permaneça constante e independente da pressão, pode-se escrever que:

$$[\% \text{Mn}] = k[\% \text{Si}]^{1/2} \quad (7)$$

Na Fig.7 o conteúdo de manganês é plotado versus a raiz quadrada do conteúdo de silício, resultando numa reta passando pela origem, confirmando que as concentrações de silício e manganês são controladas pela reação acima.

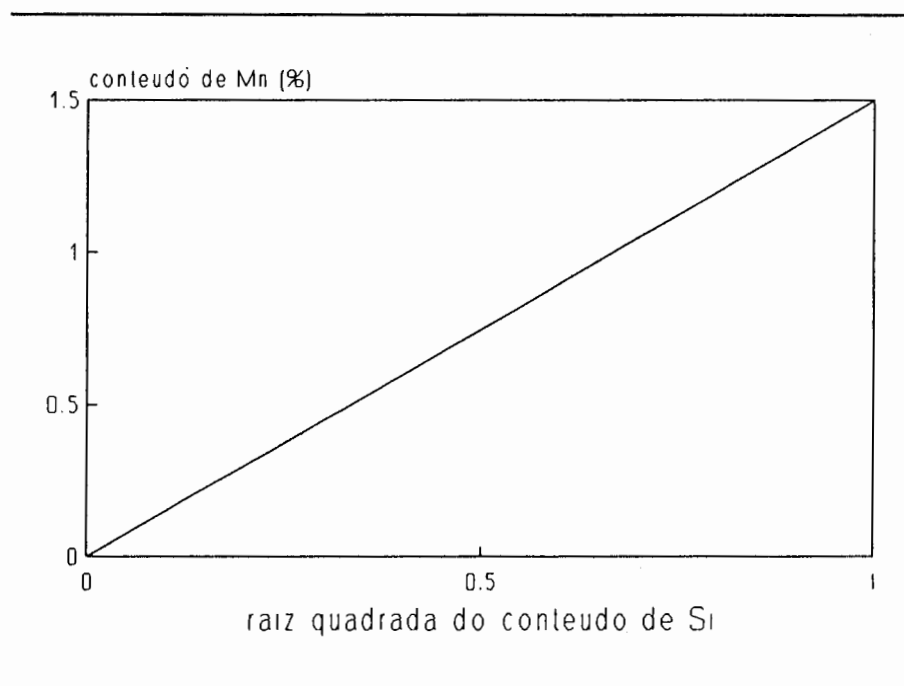


Figura 7:Correlação entre os conteúdos de Mn e Si no metal de solda /38/.

A Fig.6, além de indicar as contínuas perdas nas concentrações de manganês e silício, mostra que o conteúdo de níquel não é afetado pela pressão.

Ao contrário das concentrações de carbono e oxigênio discutidas anteriormente, as perdas de manganês e silício podem ser compensadas por ajuste na composição dos eletrodos.

A redução do manganês e silício é consequência dos altos teores de oxigênio observados. Uma fração das perdas de manganês

pode ser devida ao aumento da evaporação pelas altas temperaturas do arco. O silício, ao contrário, só é removido por oxidação/27/.

#### 4.2.0 hidrogênio e suas consequências nas soldas molhadas:

As soldas molhadas de aço são muito mais susceptíveis à trincas induzidas pelo hidrogênio, do que as realizadas na superfície. Sendo assim, torna-se interessante analisar os fatores que influenciam esse tipo de trinca.

#### 4.2.1. Trinca induzida pelo hidrogênio:

Esse é um dos mais sérios problemas de trinca na soldagem dos aços /39/.

Para soldas molhadas, a principal fonte de hidrogênio é a água do meio. Além do hidrogênio proveniente do meio, outras fontes são: elementos estranhos e umidade do chanfro da solda; umidade residual no revestimento dos eletrodos, etc..

Para que ocorra trinca, não basta a presença de hidrogênio no metal. É necessária a conjunção de três fatores, os quais são:

- Presença de hidrogênio;
- Altas tensões residuais;
- Microestruturas susceptíveis /40/.

#### A - A influência do hidrogênio:

Comparando com outros elementos intersticiais, o hidrogênio difunde-se muito mais rapidamente no ferro c.c.c..

A 20° C, os átomos de hidrogênio têm uma difusividade  $10^{12}$  vezes maior que os átomos de carbono e nitrogênio. Isto sugere



que, o mesmo comporta-se no ferro mais como próton que como átomo /41/.

A solubilidade do hidrogênio, ou de qualquer gás no aço líquido é função do equilíbrio; da pressão parcial; da temperatura e da composição do metal fundido.

O teor dos gases em equilíbrio com o aço líquido diminui rapidamente com a diminuição da pressão parcial, como mostrado na Fig.8 para o hidrogênio.

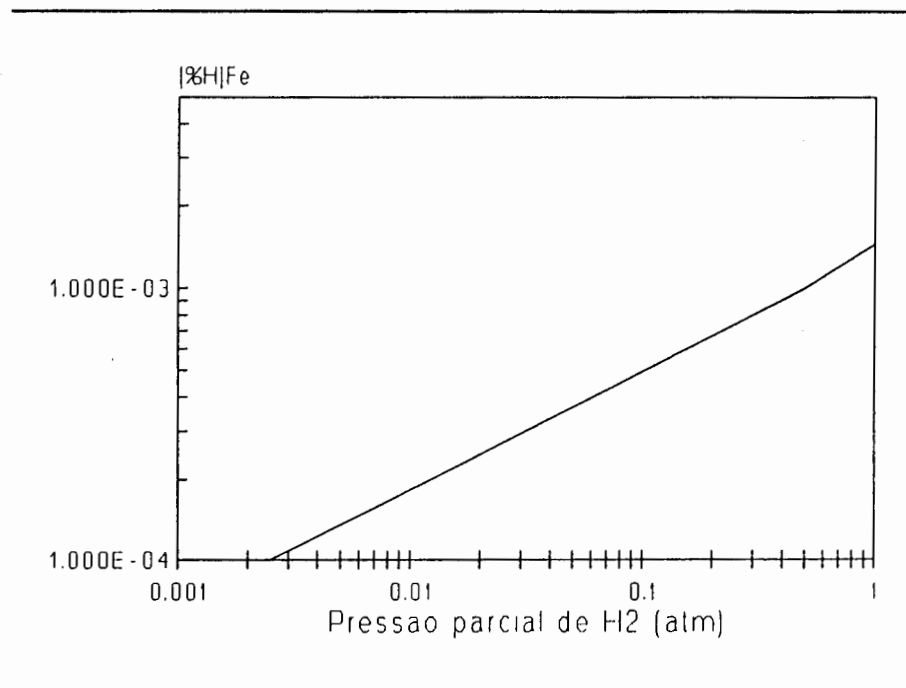


Figura 8: Influência da pressão parcial sobre a solubilidade do H no ferro a 1600 °C.

A solubilidade do hidrogênio é relativamente alta no aço líquido, variando com a temperatura. Ela diminui bruscamente quando o metal passa do estado líquido ao sólido e é sensivelmente modificada a cada mudança de fase do metal sólido (Fig.9).

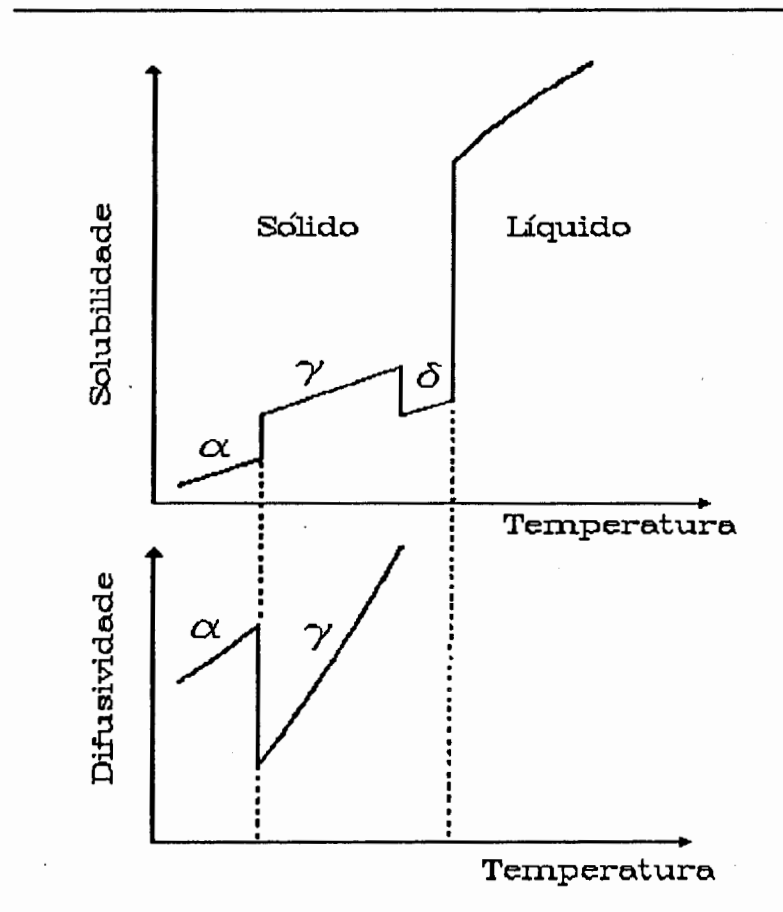


Figura 9: Solubilidade e difusividade do H no ferro com a temperatura /40/.

Outro fator que influencia a solubilidade do hidrogênio, é o nível dos elementos de liga no ferro, como é mostrado na Fig.10.

Uma consequência da variação da solubilidade do hidrogênio no metal com a temperatura, é a evolução do mesmo da zona do metal fundido para a zona afetada pelo calor (ZAC), durante a soldagem.

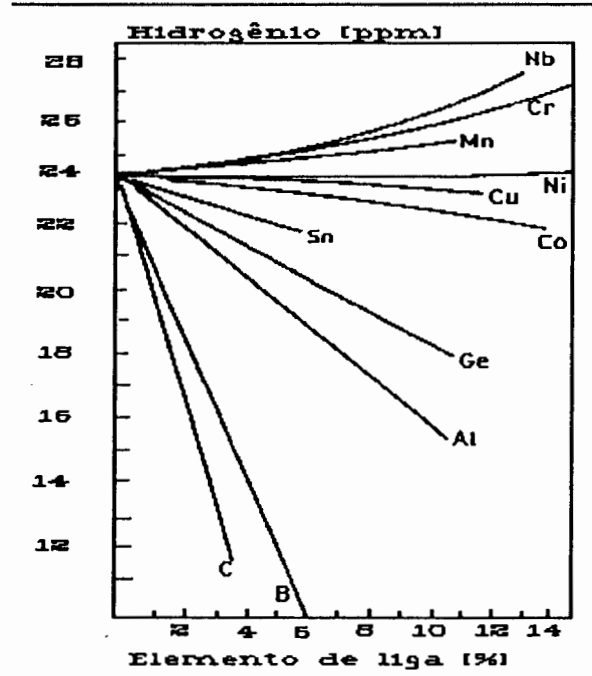


Figura 10: Solubilidade do H em várias ligas binárias de ferro a 1592°C /41/.

Sob a influência do ciclo térmico da soldagem, um certo volume do metal base é austenitizado no início do aquecimento. Esta transformação depende das condições de soldagem, isto é, uma combinação dos efeitos da energia de soldagem; espessura da chapa e temperatura inicial (pré-aquecimento).

Na Fig.11 são apresentadas as diversas regiões que aparecem durante a soldagem, as quais são:

Região 1: ZAC, constituída de austenita ainda não transformada;

Região 2: Ao lado da isoterma  $T_B$  (correspondente à temperatura de transformação na ZAC), região onde a transformação está completa ou em progresso;

Região 3: Zona de solda (metal fundido);

Região 4: Metal solidificado com estrutura austenítica;  
 Região 5: Metal de solda transformado ou em transformação;  
 Observar que  $T_f$  (temperatura de transformação no metal de solda) e  $T_B$  não coincidem necessariamente.

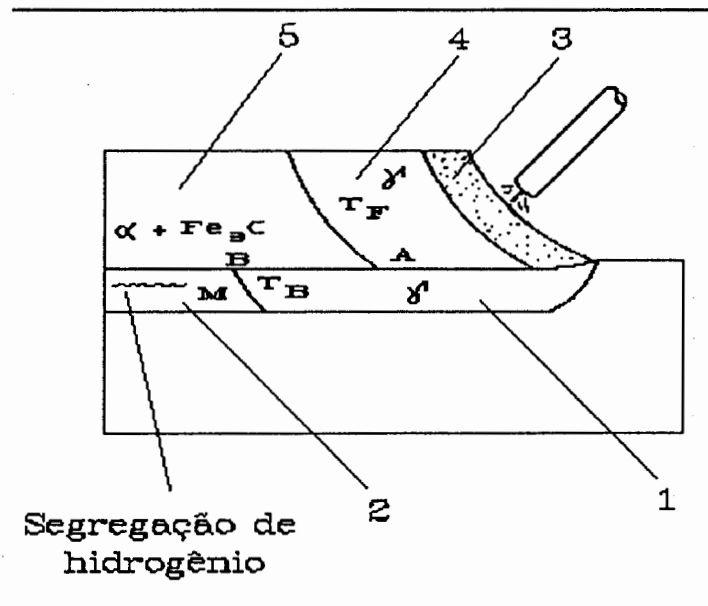


Figura 11: Propagação do hidrogênio em relação ao movimento do arco /40/.

O hidrogênio da região do arco dissolve-se no metal, onde permanece em supersaturação, primeiro devido ao resfriamento durante a fase líquida e, depois, pela descontinuidade em solubilidade durante a solidificação (Fig.9). Devido ao rápido resfriamento, parte do hidrogênio fica retido no metal de solda.

Como consequência das variações de solubilidade e das transformações estruturais no metal de solda e ZAC, o hidrogênio geralmente migra do metal de solda para o metal base.

Na frente da isoterma  $T_f$  (Fig.11), o metal de solda está no estado austenítico, carregado com hidrogênio e dispendo de pouco tempo para difundir para o metal base, também austenítico.

Com a intervenção da transformação perlítica ou bainítica no metal de solda, o hidrogênio começa rapidamente a ficar menos solúvel e ao mesmo tempo mais fácil para difundir para o metal base (Fig.9). Entretanto, a austenita tem um coeficiente de difusão relativamente baixo e o hidrogênio não difunde muito além da junção da solda, ficando retido nesta região.

A partir do ponto B, a ZAC sofre uma transformação martensítica, sendo esta uma microestrutura muito frágil que pode dar origem à trinca /40,41/.

#### B - A influência das tensões:

As tensões podem ser divididas em três categorias : diretas, indiretas e externas.

B.1 - As tensões diretas aparecem na vizinhança da junta, devido à uma distribuição não uniforme da temperatura aliada aos efeitos de mudança de volume, associada às mudanças de fase. Estas tensões são inevitáveis;

B.2 - Tensões indiretas ou de restrição: resultam do processo de soldagem, assim como das restrições impostas à junta. Elas podem ser controladas na fase de projeto da junta;

B.3 - Tensões externas: aparecem devido às várias circunstâncias de fabricação, durante ou após a execução da junta, tais como: peso das partes soldadas; reações elásticas; contração de outros cordões de solda em processo de resfriamento; restrições impostas pelos grampos, etc. /40/.

A trinca é iniciada quando a tensão máxima local vier a exceder a tensão coesiva de interfaces com as ligações já enfraquecidas pela ação do hidrogênio. Existe um efeito

sinérgico da concentração de hidrogênio e nível de tensões alcançado.

A concentração de hidrogênio no metal é maior exatamente na região de maior triaxialidade de tensões (a frente de um defeito ou entalhe). Em outras palavras, justamente na região em que o campo de tensões atinge seu valor máximo, haverá maior concentração de hidrogênio.

#### C - Influência da microestrutura:

Em geral, as trincas induzidas pelo hidrogênio iniciam-se na região de crescimento de grão da ZAC.

Estruturas de baixa tenacidade, como por exemplo martensita, bainita ou estrutura Widmanstätten favorecem o aparecimento de trincas.

Inclusões de escória e partículas grosseiras de carbonetos nos contornos de grão, criam campos de tensões triaxiais favoráveis à concentração de hidrogênio /42/.

#### D - Morfologia das trincas induzidas pelo hidrogênio:

As trincas induzidas pelo hidrogênio podem ser classificadas, a nível macroscópico, em termos de onde aparecem, sua orientação em relação ao cordão de solda e sua posição (Fig.12).

Dois tipos de trincas podem ser designados: na zona afetada pelo calor (A), onde ocorrem preferencialmente, e no metal de solda (F). Algumas são longitudinais em relação ao cordão de

solda (AL ou FL) e outras transversais (AT ou FT). As trincas longitudinais na ZAC propagam paralelamente à junção da solda (AL1) sem necessariamente ir até a superfície da solda ou podem estar localizadas numa descontinuidade (criação de um campo de tensões triaxiais) na secção transversal no metal base (AL2) ou na raiz da solda (AL3) /40/.

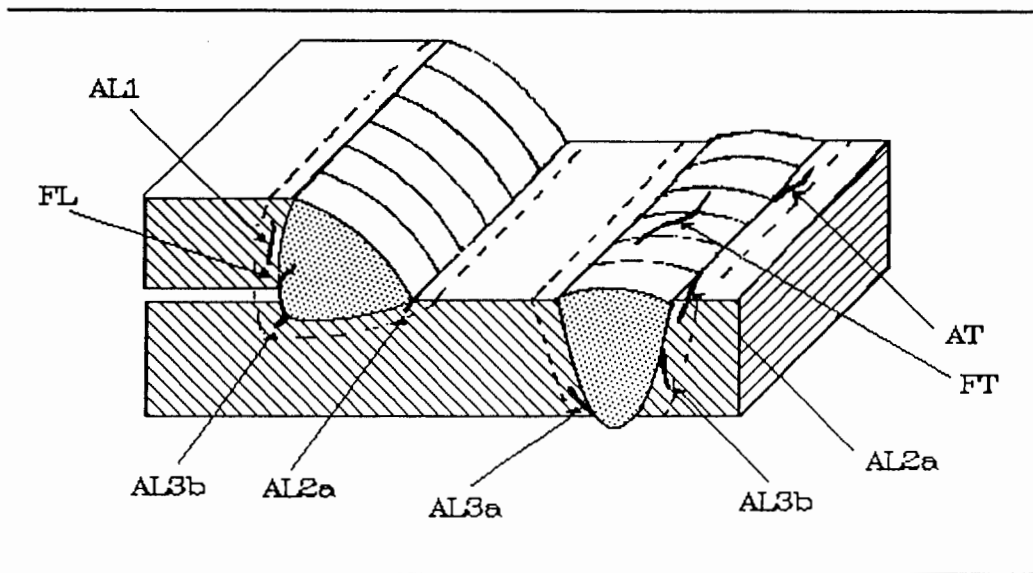


Figura 12: Morfologia das trincas induzidas pelo hidrogênio /40/.

Quanto ao aspecto microscópico, estas trincas apresentam fratura inter ou intragranular.

4.2.2.A trinca induzida pelo hidrogênio nas soldas subaquáticas:

Quando o arco elétrico é aberto em plena água, a grande quantidade de energia liberada, faz com que a água, na região do arco vaporize formando bolhas relativamente estáveis.

As bolhas geradas causam alguns efeitos na soldagem, os quais são:

-As bolhas atuam como proteção entre a água e a região onde está ocorrendo a transferência do metal do eletrodo para a poça de fusão;

-Quando o processo MIG/MAG é utilizado, o gás de proteção colide com as bolhas, resultando em perdas de eficiência de proteção;

-Os gases nas bolhas são fonte de porosidade nas soldas;

-O hidrogênio atômico existente nas bolhas pode difundir-se na poça de fusão.

A maior porção dos gases das bolhas resulta da dissociação da água (oxigênio e hidrogênio). O oxigênio reage rapidamente com os elementos consumíveis do revestimento do eletrodo e metal base produzindo CO e CO<sub>2</sub>.

Uma composição média das bolhas geradas pela soldagem com eletrodos revestidos, é /39/:

H<sub>2</sub> = 62 a 82%

CO = 11 a 24%

CO<sub>2</sub> = 4 a 6%

A saída das bolhas da superfície do metal base arrasta uma grande quantidade de calor, causando um efeito de rápido resfriamento na soldagem subaquática.

O tamanho das bolhas é diretamente influenciado pelo fornecimento de energia. Alta energia de soldagem, em geral, gera bolhas de grandes diâmetros e baixa frequência de desprendimento. Portanto, a razão de resfriamento é reduzida /39/.

O resfriamento brusco das soldas molhadas, é função do



maior coeficiente de transmissão de calor da água e principalmente devido à geração de bolhas e movimento vigoroso da água devido às forças de convecção na região do arco /43/, resultando num tempo de resfriamento 1.5 a 2.5 vezes menor que ao ar (para soldas molhadas com eletrodos revestidos).

Devido à essas altas taxas de resfriamento é necessário, a grosso modo, duas vezes mais energia que as soldas realizadas na superfície para se obter o mesmo tempo de resfriamento (Fig.13).

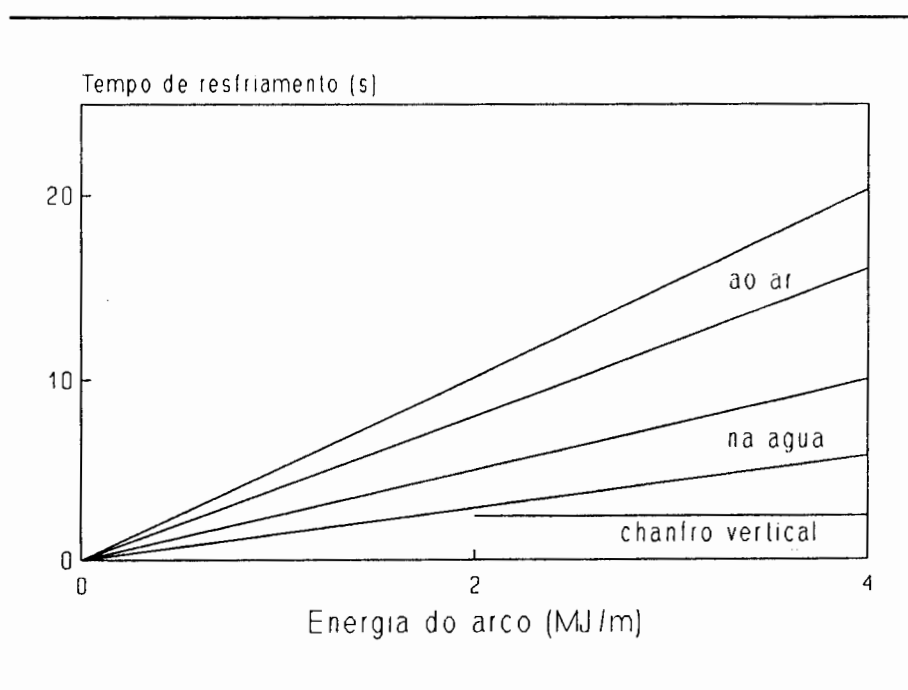


Figura 13: Tempo de resfriamento entre 800 e 500°C para soldas ao ar e na água /32/.

O aumento da energia de soldagem normalmente é obtido com o aumento da corrente, e em consequência há um aumento na penetração da solda.

Evitando-se a convecção livre por meios mecânicos (Fig.14),

há uma redução do choque térmico /32/.

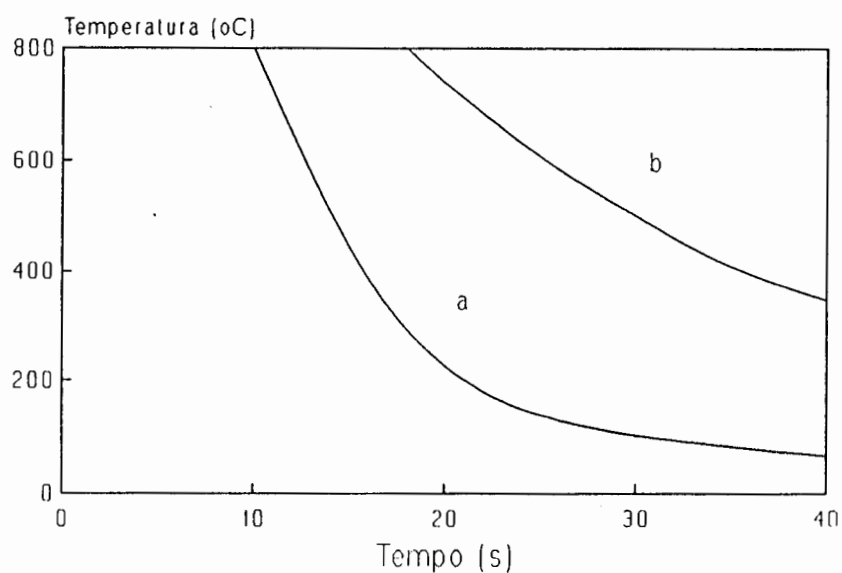


Figura 14: Tempo de resfriamento de soldas molhadas sobre convecção livre (a) e reduzidas (b) /32/.

A combinação do incremento da absorção de hidrogênio com o resfriamento rápido, resulta numa zona afetada pelo calor de baixa tenacidade.

Na Tab. II, verifica-se estas influências para soldas realizadas com diversos eletrodos e metal base.

TABELA II

RAZÃO DE TRINCA E DUREZA DO METAL DE SOLDA DE SOLDAS REALIZADAS NA SUPERFÍCIE E NA ÁGUA /32/							
AÇO	ELETRODO	RAZÃO DE TRINCA (%)		DUREZA (Hv)		DUREZA SOLDA (Hv)	
		AR	ÁGUA	AR	ÁGUA	AR	ÁGUA
% C = 0.20 CE = 0.29	E7014	0	0	235	420	215	240
	E7018	0	0	220	400	220	210
	E6024	0	0	220	410	175	200
% C = 0.19 CE = 0.33	E8018	2	30	200	380	160	210
% C = 0.16 CE = 0.45	E8018	21	26	245	430	200	230
HY 80	E11018	95	100	470	470	400	400
	E7018	18	100	440	460	290	350
	E310-16	1	80	400	425	200	190

Obs.: Razão de trinca refere-se à relação entre o comprimento linear da trinca e o comprimento do cordão de solda.

#### 4.2.3. Técnicas para redução da tendência à trincas induzidas pelo hidrogênio:

Nas soldas molhadas, as medidas para impedir este tipo de trinca são no sentido de evitar suas causas:

-Para soldas com eletrodos revestidos, utilizar revestimentos à prova de água, pré-aquecidos e proteger a região da solda da água através de dispositivos adequados.

-Evitar microestruturas frágeis através de pré-aquecimento, aumento da energia de soldagem, técnica de multipasses ou escolha do metal de adição de menor carbono equivalente. Vários pesquisadores sugerem que o carbono equivalente máximo tolerável na soldagem com eletrodos revestidos em soldas molhadas é de 0.3%. Soldas subaquáticas em aços de C.E. maior que 0.4% não obtiveram sucesso /13,32,39/.

-Utilizar metal de adição austenítico com Cr e Ni. A austenita dissolve maior quantidade de hidrogênio, evitando que o mesmo difunda-se para a ZAC /44/.

-Reduzir a taxa de resfriamento, através da seleção correta dos parâmetros de soldagem, ou promover região seca perto do arco.

A Fig.15 mostra os resultados teóricos calculados por Tsai e Masubuchi /39/ para um ponto a 1mm da zona de fusão.

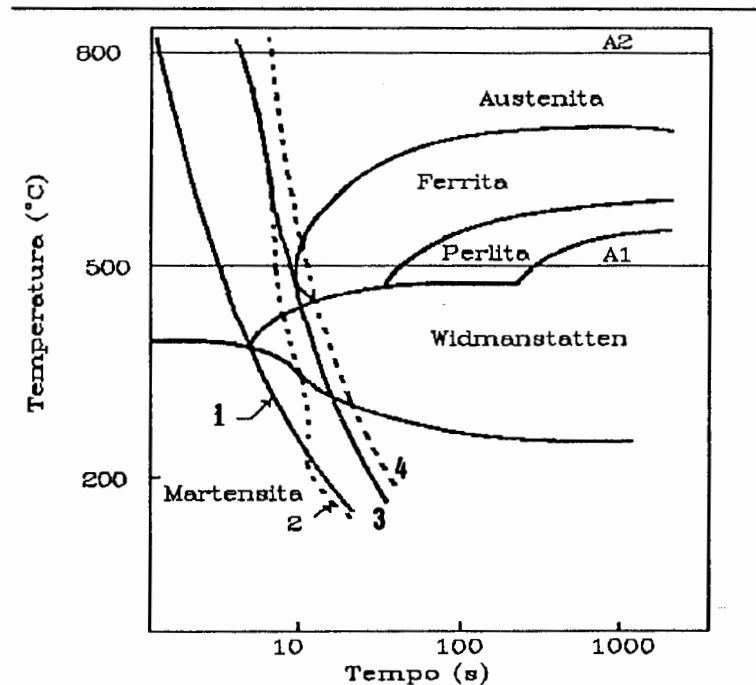


Figura 15: Diagrama CCT para aço carbono (C = 0.17%) com curvas de resfriamento para diversas condições de soldagem.

- 1-Diretamente na água
- 2-Cavidade local seca
- 3-Na água com fluxo
- 4-Ao ar /34/.

As soldas realizadas na água têm taxas de resfriamento muito grandes e a estrutura resultante é martensítica. A proteção da solda subaquática com fluxo, no processo a arco submerso, é muito boa. Sendo que na faixa de 800 a 500 ° C a taxa de resfriamento é muito semelhante à obtida com cavidade local seca.

No entanto, neste último método de proteção, a taxa de resfriamento aumenta com o deslocamento da solda e exposição do cordão ao jato de água.

#### 4.3. Problemas metalúrgicos associados às soldas molhadas:

De acordo com Brink e Boltje /45/, há uma redução de 20% nas propriedades de tensão e 50% na ductilidade das soldas realizadas diretamente na água.

##### 4.3.1. Microestrutura das soldas subaquáticas:

A microestrutura das juntas soldadas é função da relação entre a composição química do metal base e consumível com o ciclo térmico. As propriedades mecânicas das juntas como, por exemplo, dureza, tenacidade, ductilidade, resistência ao impacto, etc., estão diretamente relacionadas com a microestrutura.

Para os aços, são três as zonas da junta:

A - Zona do metal de solda:

É a região onde ocorre a fusão e, devido à contaminação do meio, contém impurezas. Com o rápido aporte de calor e a combinação da corrente do arco com o fluxo magnético, é promovida considerável turbulência. Ocorrem grandes gradientes de temperatura.

Durante a solidificação, a macroestrutura cresce normal às isotermais com sentido de crescimento oposto ao fluxo de calor. O crescimento é epitaxial, ou seja, os grãos crescem adotando a mesma orientação cristalográfica do metal base.

B - Zona afetada pelo calor:

O ciclo térmico provocado pela soldagem altera, severamente, a microestrutura e as propriedades do metal nas regiões vizinhas ao cordão de solda. Esse volume de metal é chamado de zona afetada pelo calor (ZAC).

A ZAC pode ser subdividida em várias subzonas. Cada subzona refere-se a diferentes tipos de microestrutura e propriedades mecânicas.

Dependendo do metal base, do ciclo térmico, movimento do arco, etc., estas microestruturas variam. Para um aço ao carbono, a ZAC pode ser dividida, a partir da poça de fusão, em:

- Zona de crescimento de grão;
- Zona de refino de grão;
- Zona parcialmente transformada;
- Zona de carbonetos esferoidizados /41/.

A soldagem molhada afeta de 25 a 50% da zona equivalente à soldagem na superfície. Entretanto, o tamanho da ZAC pode não ser o mais importante. A estrutura dos grãos nessa zona é a responsável pela deterioração de suas propriedades /13/.

C - Metal base não afetado termicamente:

É a região subsequente à zona afetada pelo calor, onde a elevação de temperatura não foi suficiente para que ocorressem mudanças de estrutura.

#### 4.3.2. Microdureza das soldas subaquáticas:

Valores de microdureza estão diretamente relacionados com a microestrutura cristalina e podem ser utilizados parcialmente para indicar as propriedades das juntas soldadas /39/.

Devido à influência de vários fatores pouco conhecidos nas soldas subaquáticas, a predição teórica da dureza da ZAC e do metal de solda é muito difícil de ser feita. Mas as correlações são válidas se forem conhecidas as taxas de resfriamento para vários pontos da junta soldada.

A ZAC tende a ter maiores valores de dureza que o metal de solda e altas energias de soldagem resultam em menores taxas de resfriamento.

#### 4.3.3. Fratura por clivagem (frágil) nas soldas molhadas:

Três fatores básicos contribuem para que a fratura ocorra por clivagem: estado de tensões; temperatura baixa e taxa de deformação elevada, ou taxa de carregamento rápida. Para que ocorra essa fratura, não há necessidade de que todos os três fatores se manifestem ao mesmo tempo. Os principais responsáveis pela maioria das falhas por clivagem que ocorrem em juntas soldadas, sob a água, são: a presença de uma microestrutura desfavorável aliado a um estado de tensões devido ao ciclo térmico.

#### 4.3.4. Defeitos nas soldas subaquáticas:

Os defeitos encontrados nas soldas subaquáticas são, usualmente, os mesmos das soldas realizadas na superfície e, como exemplo, pode-se citar: falta de fusão; falta de penetração; inclusão de escórias; mordeduras; porosidades; rechupe; trincas de cratera; trincas de solidificação; etc.. Todos estes defeitos são agravados nas soldas molhadas.

Pela dificuldade de serem solucionados e pela grande frequência nas soldas molhadas, dois destes defeitos merecem atenção especial: inclusão de escória e, principalmente, porosidades.

##### -Inclusão de escórias:

Como já foi dito, as reações de desoxidação da poça de fusão de soldas realizadas em pressões superiores à atmosférica, são controladas pelo silício e manganês. Como as taxas de resfriamento nas soldas molhadas são muito elevadas, não haverá tempo para que os óxidos formados nestas reações e aqueles oriundos do revestimento dos eletrodos subam à superfície da poça de fusão. Portanto, os mesmos ficam retidos no metal de solda na forma de inclusões.

##### -Porosidades:

Os gases gerados pela vaporização e posterior dissociação da água e pela queima do revestimento dos eletrodos, são incorporados ao metal fundido. Com a rápida solidificação da poça de fusão, boa parte desses gases ficam retidos no metal de solda.



## 5.MÉTODO DE SOLDAGEM SUBAQUÁTICA COM CAVIDADE LOCAL SECA:

Devido aos problemas já descritos, relativos aos custos e operacionalidade da utilização de câmaras secas na soldagem subaquática e à baixa qualidade das soldas obtidas diretamente na água, está sendo desenvolvido um novo método. O mesmo utiliza o processo MIG/MAG, com proteção adicional na tocha de soldagem de um dispositivo que permite a formação de um jato de água em alta velocidade, no formato de cone em torno da região do arco e poça de fusão.

Este jato gera uma região de baixa pressão em seu interior, compensada com vazões relativamente elevadas de gás de proteção /46/. Com isto, cria-se uma área seca na região do arco e poça de fusão, tornando possível a redução do hidrogênio dissolvido na solda e controle da taxa de resfriamento. Como consequência, há uma redução da dureza das juntas soldadas /46,47/.

Este equipamento é indicado, em princípio, para realização de soldas à profundidades alcançadas com mergulho convencional (até 60m). Para maiores profundidades, torna-se necessária a utilização de mergulho por saturação, elevando os custos do mesmo e tornando, possivelmente, a utilização de outras técnicas de soldagem mais conveniente.

### 5.1.0 processo MIG/MAG:

Trata-se de um processo de soldagem a arco elétrico, onde a energia de soldagem é produzida por um arco entre o metal base e um arame (eletrodo) consumível alimentado continuamente. A

proteção da poça é obtida por um suprimento externo de gás, ou misturas gasosas.

A designação MIG, do inglês "Metal Inert Gas", refere-se à utilização de gases de proteção inertes (argônio e hélio). A sigla MAG "Metal Active Gas", quando é utilizada uma atmosfera protetora dita "ativa" ou oxidante ( $\text{CO}_2$ , misturas de argônio e/ou hélio com  $\text{CO}_2$  e/ou  $\text{O}_2$ ), susceptível de provocar reações químicas no arco, nas gotas de metal fundido e na poça de fusão. A finalidade da atmosfera oxidante é estabilizar o arco por oxidação do arame, na soldagem de metais ferrosos /33,48/.

Uma das características mais importantes desse processo, reside no emprego de arames de pequeno diâmetro, o que possibilita uma alta densidade de corrente, para uma energia de soldagem relativamente baixa /33,48/.

#### 5.1.1.A solda MIG/MAG em condições hiperbáricas:

Com o aumento da pressão, o diâmetro do eletrodo deve ser reduzido para aumentar a densidade de corrente e manter o arco estável /13,42/. Pelo fato da soldagem ser automática ou semi-automática, o fator de operação é grande, tornando este processo muito atrativo, quando se necessita realizar a solda rapidamente.

Quando o eletrodo é ligado ao polo positivo, como é usual, o mesmo é muito afetado pelo aumento da pressão e contrai-se gradualmente. A penetração, o salpico e a geração de fumos aumentam. Para profundidades maiores do que 30m, problemas com o arame e a grande quantidade de fumos, tornam impossível a soldagem nas condições usuais. Sendo assim, para profundidade maiores que esta, o uso de polaridade negativa torna o processo mais estável /13/.

### 5.1.2. Características do processo MIG/MAG:

#### Vantagens:

- Grande taxa de deposição;
- Formação de pouca ou nenhuma escória;
- Necessidade de pouco treinamento do operador;
- Modo de soldagem semi-automático e automático;
- Ampla intervalo de espessura soldável;
- Possibilidade de soldar em todas as posições, dependendo do modo de transferência;
- Soldas de excelente qualidade e baixo teor de hidrogênio;

#### Desvantagens:

- Equipamento mais complexo, caro e menos portátil;
- Perigo de fusão incompleta /48/.

### 5.1.3. Modos de transferência do metal do eletrodo para a peça:

Existem várias formas de transferência do metal do eletrodo para a peça. Os principais são: transferência por curto-circuito, globular, aerossol e por corrente pulsada.

Os tipos de transferência são função, principalmente, do gás de proteção, da corrente e tensão de soldagem.

#### A - Transferência por curto-circuito:

O ciclo de soldagem, nesse modo de transferência, começa com o arame avançando em direção à peça, mas como a energia de soldagem é baixa, suficiente apenas para manter o arco aberto sem ocorrer fusão do arame, o mesmo entra em contato com a mesma. Neste instante, há um curto-circuito, a corrente aumenta, o arco é extinto, a ponta do arame é fundida e retida no metal base. O arame fica novamente afastado e é reiniciado o ciclo.

A penetração da poça é pequena, podendo ocorrer fusão incompleta.

Esse tipo de transferência é utilizado para soldas fora de posição e em chapas finas.

#### B - Transferência globular:

O ciclo, nesse modo de transferência, inicia-se quando um glóbulo começa a se formar na ponta do arame. Esse glóbulo cresce até um diâmetro maior que o arame e, devido às forças envolvidas, é destacado do mesmo e lançado através do arco até a poça de fusão.

Esse modo ocorre para correntes e tensões relativamente baixas, mas superiores às utilizadas na transferência por curto-circuito.

A transferência globular pode ser obtida utilizando-se qualquer tipo de gás, mas para gases que não sejam  $\text{CO}_2$ , geralmente, só é obtida para uma pequena faixa de corrente e tensão.

Devido à grande quantidade de salpico e principalmente à dependência da gravidade, só é utilizada para soldagem em posição plana, ou horizontal.

#### C - Transferência por aerossol:

Ocorre na forma de gotículas de tamanho menor que o diâmetro do arame. A frequência de desprendimento é muito maior que na transferência globular.

Esse modo normalmente é associado à elevadas energias de soldagem e composição do gás de proteção com um máximo de 18% de CO<sub>2</sub> no argônio.

O arco é muito estável e a quantidade de salpico é reduzida, sendo indicado para soldagem de secções espessas.

#### D - Transferência por corrente pulsada:

Nesse modo, a máquina de solda está adaptada para fornecer dois níveis de corrente que se sucedem de acordo com uma frequência regulável.

O nível de base é baixo em magnitude. Em consequência, há pouca ou nenhuma transferência de metal, mas corrente suficiente para manter o arco havendo, portanto, transferência de um gota por pulso. Obtém-se também, um aumento da penetração e redução no salpico, podendo-se utilizar arames de maior diâmetro e soldar em todas as posições /48/.

#### 5.1.4. Equipamento de soldagem MIG/MAG:

O equipamento de soldagem consiste de uma fonte de energia, uma tocha, um suprimento de gás de proteção e um sistema de acionamento do arame.

A tocha contém um tubo de contato para transmitir a corrente de soldagem para o arame e um bocal para direcionar o gás protetor. O alimentador de arame é composto de um pequeno motor de corrente contínua e de uma roda motriz.

O escoamento do gás protetor é regulado pelo rotâmetro e manômetro. Estes possibilitam um fornecimento constante de gás para o bocal da tocha.

A maioria das aplicações da soldagem MIG/MAG requer energia com corrente contínua e eletrodo com polaridade positiva. Nessa situação, tem-se um arco e transferência mais estáveis, baixo salpico e cordão de solda de boas características. Corrente contínua e eletrodo com polaridade negativa não é usada frequentemente. A corrente alternada não é utilizada neste processo /48/.

Com relação às fontes de energia para soldagem subaquática, os principais problemas são:

- Necessidade de conduzir altas energias em cabos com grandes comprimentos;

- Influência da pressão na estabilidade do arco, na transferência das gotículas através do arco e na proteção gasosa;

- Maior segurança para o operador;

- Grande número de parâmetros a serem selecionados /49/.

#### 5.1.5. Gases de proteção:

A principal função dos gases é proteger o arco e a poça de fusão da atmosfera.

##### A - Argônio:

É um gás quimicamente inerte e mais pesado que o ar, por isso, consegue-se uma boa proteção do arco e poça de fusão utilizando-se vazões relativamente baixas.

Devido à sua maior ionização, promove um arco mais estável e transferência por aerossol para uma larga faixa de variação da corrente. Por outro lado, possui baixa condutividade térmica, produzindo um arco com uma região central quente e periférica fria.

##### B - Hélio:

É um gás quimicamente inerte e mais leve que o ar, fazendo com que sejam necessárias grandes vazões para obter-se uma proteção efetiva do arco e poça de fusão.

Por apresentar baixa ionização, obtém-se transferência globular para níveis de corrente elevados, como consequência há maior geração de salpicos e um cordão de solda de pior aparência.

Ao contrário do argônio, sua condutividade térmica é maior, possibilitando uma melhor dispersão de energia.

Misturas de argônio e hélio apresentam grande campo de aplicação, permitindo transferência por aerossol, penetração e velocidade de soldagem elevadas.

#### C - Adição de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> ao hélio e argônio:

A adição de pequenas quantidades desses gases ao hélio e argônio, na soldagem de metais ferrosos, aumenta a estabilidade do arco e minimiza o salpico.

#### D - Dióxido de carbono:

É utilizado, principalmente, na soldagem de aços ao carbono e de baixa liga.

Apesar de ser um gás muito ativo, seu uso apresenta uma série de vantagens, as quais são: boa penetração da junta, altas velocidades de soldagem e, principalmente, baixo custo.

O dióxido de carbono produz transferência por curto-circuito para baixos níveis de corrente e transferência globular para altos níveis.

Por ser um gás oxidante, o arame deve conter elementos desoxidantes (Mn e Si) para prevenir porosidade na solda.

As principais desvantagens desse gás são a produção de grande quantidade de salpico e a possível incorporação de carbono ao depósito de solda, o que reduz a ductilidade e tenacidade do mesmo.

#### 5.2.Princípio da formação da cavidade local seca:

Para a utilização, do método de soldagem subaquática com cavidade local seca é necessária uma modificação do bocal MIG/MAG que, ao contrário dos utilizados em soldas na superfície, os



quais possuem apenas uma saída para o gás de proteção, passam a ter outro tubo concêntrico para a saída de água bombeada em alta velocidade (Fig.16).

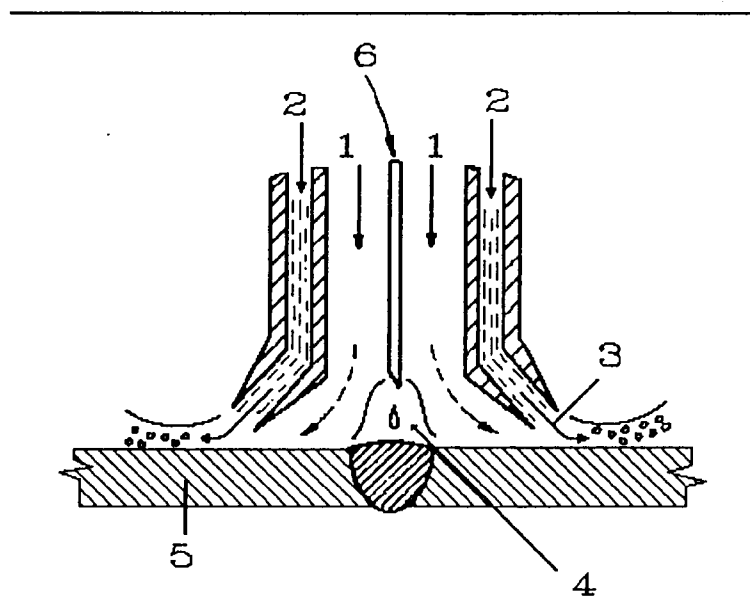


Figura 16: Bocal MIG-MAG para soldagem subaquática

- 1-gás de proteção
- 2-água
- 3-saída de água
- 4-arco elétrico
- 5-metal base
- 6-arame

Uma outra alternativa, cujo objetivo é o de reduzir o consumo de gás de proteção, e em consequência os custos operacionais, é a colocação de mais um tubo concêntrico para passagem de gás de formação da cavidade. O gás de formação da cavidade normalmente é ar comprimido (Fig.17).

Sendo o tocha da pistola de soldagem envolvido por este cone divergente de água, em alta velocidade, que arrasta a água e o gás de proteção, cria-se nesta região uma área seca envolvida por uma cortina de água.

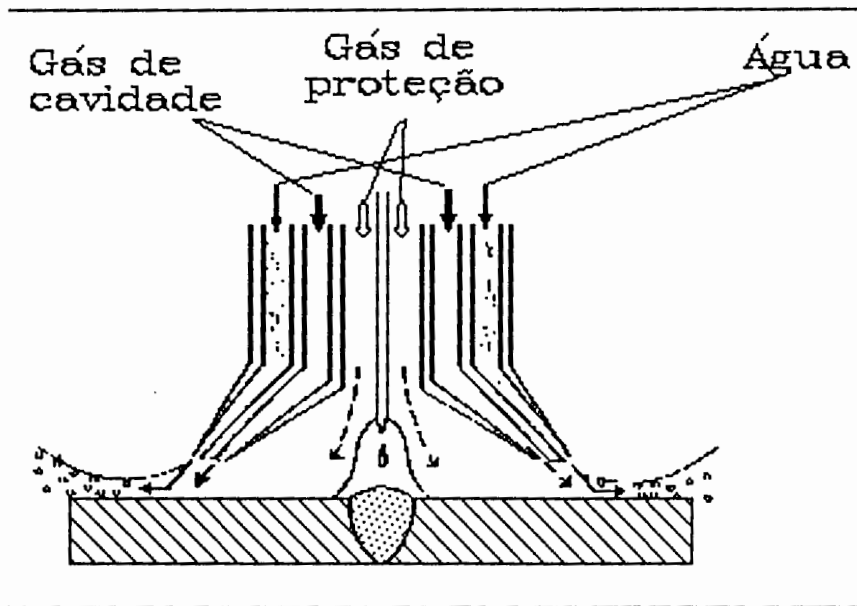


Figura 17: Bocal MIG-MAG duplo para soldagem subaquática.

Esta cortina de água, com alto momento, impede que a água do exterior penetre na região da solda. Obtém-se assim, uma cavidade estável e durável contra as perturbações externas e internas de avanço da solda /46/.

Para uma perfeita formação da cavidade, é necessário que se tenha um controle rigoroso dos seguintes itens:

- Promover um sistema de remoção da água capaz de formar uma cavidade estável, mesmo com uma larga faixa de irregularidades superficiais.

- Remover a água da zona de solda através do efeito da cortina de água.

- Criar uma atmosfera gasosa estável.

Para atender a estes requisitos, é necessário projetar um difusor que forneça um ângulo de escape ( $\theta_0$ ), espessura ( $w$ ) e raio da cortina de água ( $r$ ), velocidade do jato ( $V_0$ ), distância da peça ( $d$ ) e diâmetro do bocal ( $D$ ) adequados

(Fig.18).

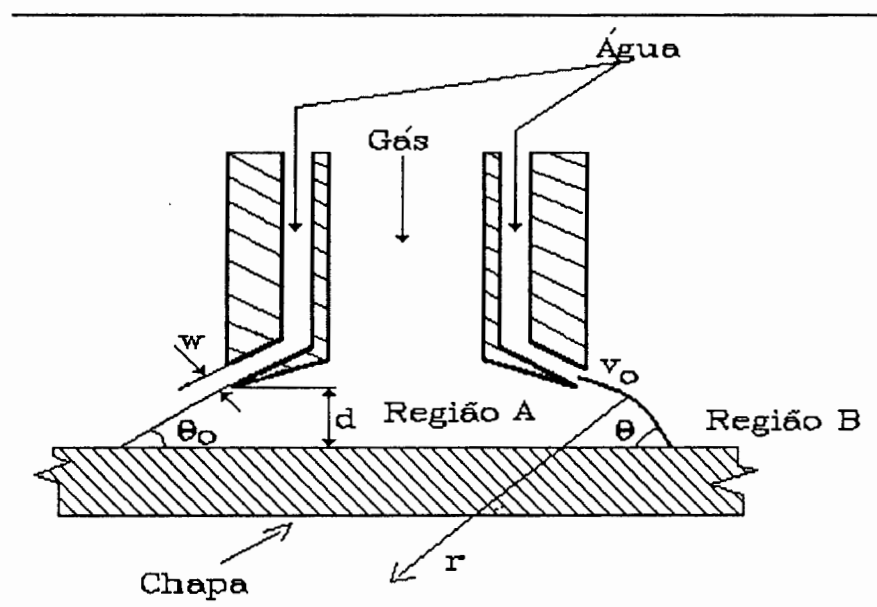


Figura 18: Bocal MIG-MAG para soldagem subaquática com as dimensões características /46/.

Nishiguchi et ali /46/ fizeram uma análise bidimensional para o jato de água e mecanismo de formação da cavidade.

Na Fig.18 é mostrado um modelo de fluxo e seus parâmetros. Quando o jato de água é submerso (supondo que ambas as regiões A e B estejam cheias de água), o curso da água sai da região A para a B devido à pressão diferencial, ocorrendo uma circulação de água na área A. O jato de água tem um ângulo inicial ( $\theta_0$ ), curvado em direção ao interior e menos curvado no momento do encontro com a chapa ( $\theta$ ). Considerando o raio do cone de água, as pressões internas e externas ao cone constantes e desprezando o atrito entre o jato e a peça, as características do fluxo são expressas por:

$$\Delta P = P_A - P_B = \rho \cdot w \cdot v_o^2/r \quad (8)$$

Onde:  $\Delta P$  : diferencial de pressão

$\rho$  : densidade da água

$w$  : espessura do jato de água

$v_o$  : velocidade do jato de água na saída do bocal

$r$  : raio do cone de água.

A Fig.19 é um exemplo das características do fluxo num modelo bidimensional onde ambas as regiões A e B estão cheias de água. Independentemente das condições de construção do bocal, a pressão diferencial  $\Delta P$  varia parabolicamente com a mudança de velocidade do jato, de acordo com a equação anterior. Aqui, é notado que a pressão diferencial  $\Delta P$  aumenta com o ângulo do bocal, e existe um pequeno intervalo de ângulos que apresenta um  $\Delta P$  negativo (Grupo I) e uma larga região que apresenta  $\Delta P$  positivo (Grupo II).

A diferença entre estes grupos está relacionada com o fato da água na região A ser ou não extraída. Assim, os jatos formados no Grupo I são preferíveis para a formação da cavidade (para a formação da cavidade neste método, a profundidade não influencia, já que a característica do jato está relacionada com  $\Delta P$ ).

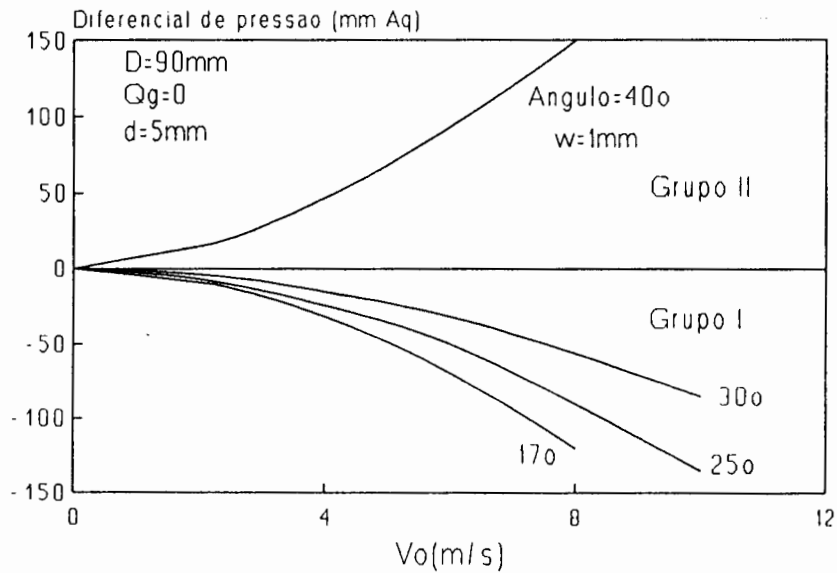


Figura 19: Características do fluxo de água através do bocal /46/.

Na Fig.20 são mostradas as características do fluxo compensando-se o decréscimo da pressão na região A com um suprimento de gás. Acima de um valor crítico de pressão diferencial ( $\Delta P_{\min.}$ ) ou fluxo de gás ( $Q_{g\min.}$ ), há formação de uma cavidade perfeita, sem água na superfície da base interna à cortina de água.

Na Fig.21, condições críticas de formação da cavidade são descritas para distâncias críticas entre o bocal e a chapa. A cavidade perfeita é formada para altos fluxos de gás em regiões acima de cada linha.

A formação da cavidade começa a ficar mais difícil à medida que se aumenta a distância chapa-bocal.

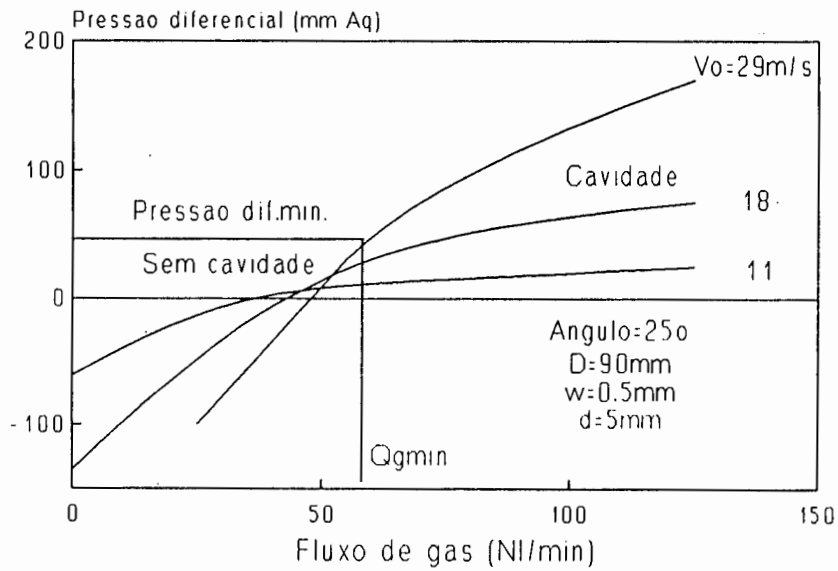


Figura 20:Características do fluxo de água, compensando o decréscimo de pressão com um fluxo de gás /46/.

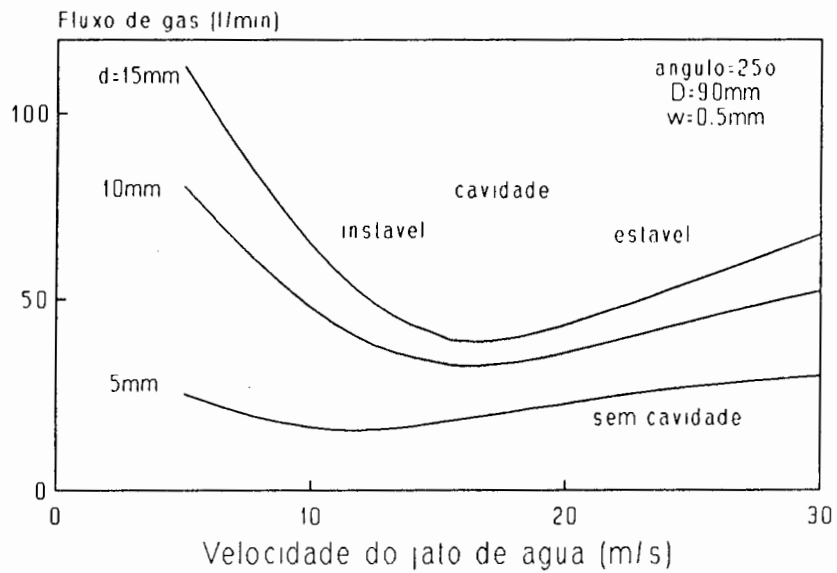


Figura 21:Condições críticas de formação da cavidade /46/.

Na posição vertical, a formação da cavidade é mais difícil que na posição plana, devido à diferença de pressão de água entre as partes superiores e inferiores do fluxo. Uma ligeira inclinação para cima na tocha é efetiva para evitar o escape de gás na porção superior. Esta posição é a mais difícil para obter-se uma cavidade perfeita. Ao contrário, as posições planas e sobre-cabeça são as mais fáceis /46/.

### 5.3. Pesquisas Realizadas e parâmetros utilizados:

As primeiras pesquisas realizadas com este método de soldagem subaquática foram desenvolvidas por um grupo de engenheiros da Mitsubishi Heavy Industries of Japan /50/. Posteriormente grupos dos EUA(MIT) /30,39/ e da Alemanha /26,27/ passaram também a pesquisar o processo MIG/MAG com cavidade local seca.

Com o intuito de se ter uma visão qualitativa dos principais parâmetros de soldagem e de formação da cavidade, estão listados na Tab.III alguns valores utilizados por vários autores em diversos trabalhos.

As pesquisas de laboratório mostraram, que é possível uma redução do teor de hidrogênio difusível no metal de solda à valores tão baixos quanto 2 a 4 ml/100g de metal de solda, dependendo das condições de formação da cavidade; fluxo de gás; utilização da técnica de multi-passes e parâmetros corretos de soldagem para soldas realizadas em chapas planas /26/. Por outro lado, com modificações no bocal, é possível realização de soldas

em juntas em cruz e tubos de diâmetros reduzidos /25/.

TABELA III

PARÂMETROS DE SOLDAGEM E DE FORMAÇÃO DA CAVIDADE				
Parâmetros	Shinada et ali /50/	Ohmae et ali /54/	Hoffmeister et ali /26/	Hoffmeister /25/
Aço	Baixo Carbono	B.C. e HT 50	StE36 e X 60	St35-2
Diâmetro do arame (mm)	1.2	1.2	1.2	1.0 e 1.2
Espessura da chapa (mm)	25.5	12	15 e 20	10
Dimensões da chapa (mm)	-	-	330 x 150	-
Ângulo do chanfro	60° em duplo V	-	60° em duplo V	junta em cruz
No. de passes	-	-	8 a 18	-
Veloc. de soldagem (cm/min)	25	6.3 a 25	21	22
Corrente (A)	280 a 330	120 a 330	210 a 280	-
Tensão (V)	27 a 32	22 a 32	23 a 32	19 a 30
Gás de Proteção	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	Ar + 25% CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + Ar + O <sub>2</sub>	Ar + 8% O <sub>2</sub>
Vazão de gás de proteção (l/min)	40	150	55 a 60	50 a 200 (1bar) 250 a 400 (6bar)
Vazão de gás da cavidade (l/min)	180	0	0	0
Vazão de água (l/min)	90	70	33	40
Espessura da cortina (mm)	-	-	0.5	-
Diâmetro do bocal (mm)	100	100	50	-
Ângulo do jato	-	-	25°	-



Com a seleção correta do diâmetro do bocal, é possível modificar a distribuição da temperatura durante a soldagem subaquática, de forma a obter-se uma taxa de resfriamento que favoreça a difusão do hidrogênio e a obtenção de uma dureza do metal base adequados /47/.

Para verificar o efeito da pressão nas soldas realizadas com o método da cavidade local, Hoffmeister et ali /25/ realizaram testes de laboratório simulando pressões de 1 a 6 bar com bocal modificado para soldagem de juntas em cruz. Esses autores verificaram que, para manter a mesma qualidade da solda nesta faixa de pressão, foi necessário que a 6 bar houvesse tanto aumento na vazão de gás de proteção (50 a 200 l/min a 1 bar para 250 a 400 l/min a 6bar), quanto na tensão de soldagem (de 19 a 25V a 1bar; para 26 a 33V a 6bar).

Na Fig.22 são apresentados os teores de hidrogênio contido com relação à vazão de gás para os dois níveis de pressão.

Com o objetivo de verificar a praticidade e eficiência deste método, Shinada et ali /50/ realizaram experiências em escala de produção, na soldagem de caixas de 4x8x3m de chapas de aço de baixo carbono com espessura de 12mm, colocadas à uma profundidade de 5 a 6m no mar.

Para a realização destes testes, foi necessário intenso treinamento dos mergulhadores-soldadores, modificação na pistola e equipamentos de soldagem, para torná-los a prova de água, mais leves e fáceis de manusear. Toda a atividade de mergulho e soldagem foi monitorada por TV. Os resultados obtidos mostraram boa qualidade das juntas soldadas.

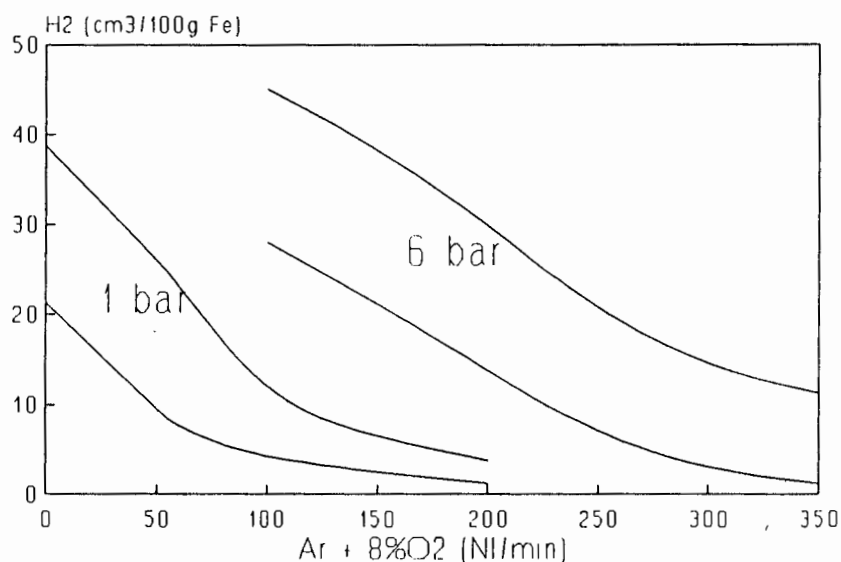


Figura 22: Efeito do fluxo de gás sobre o conteúdo de hidrogênio em soldas subaquáticas MIG/MAG com cavidade local seca em pressões de 1 e 6 bar /25/.

Foram desenvolvidos também, por esta equipe, equipamentos semi-automáticos com o objetivo de reduzir a influência do mergulhador-soldador e melhorar a precisão de soldagem.

Com estes equipamentos, foi possível a realização de soldas horizontais em tubos de aço de 760mm de diâmetro e espessura de 12mm.

Para obter-se uma solda de qualidade com este método é necessário examinar os seguintes itens:

- Estabilidade do arco assim como da poça de fusão em condições de altos fluxos de gás;
- Redução da umidade dentro da cavidade;
- Escolha apropriada do diâmetro do bocal para atender às condições de extração de calor;
- Evitar invasão de água na raiz da junta durante o primeiro

passa.

O método de cavidade local seca atende aos dois primeiros itens. Para atender ao terceiro, é necessária a escolha apropriada do bocal. Para atender ao último item é necessário o desenvolvimento de um método apropriado.

## **6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL:**

### **6.1. Objetivos:**

Através da utilização do processo de soldagem MIG/MAG com cavidade local seca, é possível a redução do hidrogênio dissolvido no metal de solda e controle da taxa de resfriamento. Em consequência, há uma redução da tendência às trincas induzidas pelo hidrogênio nas soldas subaquáticas.

Pelo fato da região do arco e metal fundido não ficarem em contato direto com a água, outros defeitos como porosidades e mordeduras também são reduzidos.

Outrossim, o sucesso de uma solda realizada com este processo depende, entre outros fatores, de:

- Geometria, velocidade e vazão do jato de água;
- Vazão do gás de proteção;
- Parâmetros de soldagem.

Estes fatores exercem profunda influência sobre a sanidade e propriedades mecânicas da junta soldada.

Desta forma, os principais objetivos desta investigação foram:

- Projeto e construção de um dispositivo (bocal) para proteger a poça de fusão/arco do contato direto com a água;
- Otimização dos parâmetros de controle da cortina, ou seja: geometria do jato de água, velocidade e vazão de água e gás;
- Otimização dos parâmetros de soldagem, quais sejam: velocidade, tensão e corrente de soldagem;
- Obtenção de juntas soldadas que atendam à norma específica de soldagem subaquática e comparação de suas propriedades com soldas realizadas nas mesmas condições fora da água.

## 6.2.Equipamentos:

### 6.2.1.Equipamento de soldagem subaquática:

Para a realização dos experimentos, foi utilizada uma fonte de soldagem transformador/retificador do tipo tensão constante, marca White Martins, modelo VI-600.

A tocha de soldagem foi montada em um Dispositivo Automático de Soldagem, que permite a variação da velocidade de soldagem entre 0 e 10,0 mm/s.

O conjunto tocha/dispositivo foi instalado sobre um tanque com capacidade para 1000 l de água doce. Este tanque, dispõe em um de seus lados de uma janela de vidro para observação (fig.23).

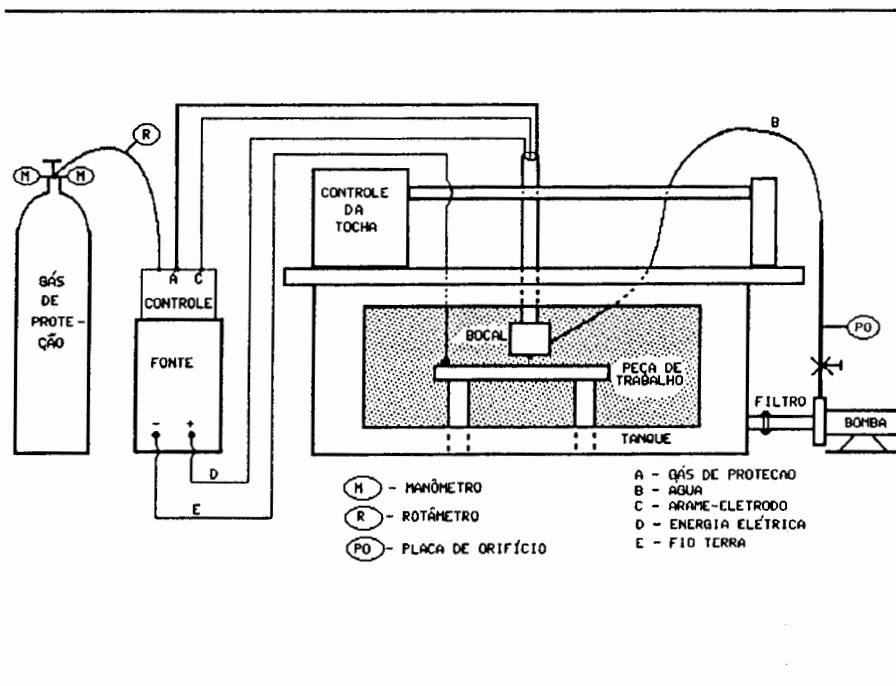


Figura 23:Diagrama do equipamento de soldagem.

Em substituição ao bocal MIG/MAG convencional, foi projetado e construído um bocal que permite a saída simultânea de um jato de água, gás de proteção e arame.

A água para formação do jato foi bombeada em circuito fechado por uma bomba centrífuga com as seguintes características:

Marca: RWH

Modelo: RT-20 - Potência do motor: 2 CV

Vazão: 14 m<sup>3</sup> /h a uma altura manométrica de 17,5 m.

Os seguintes medidores de fluxo foram instalados:

-Para gás:

Rotâmetro: MATEC - RS 500 - RI/BPS - 1137 - 1

Vazão máxima: 20 Nm<sup>3</sup>/h a 8 kgf/cm<sup>2</sup>

Vazão mínima: 2 Nm<sup>2</sup>/h.

-Para água:

Foi projetada e construída uma placa de orifício com diâmetro externo de 25mm e orifício com diâmetro de 18,4mm, permitindo leituras de vazão no intervalo de 10 a 110 l/min, através de uma coluna de mercúrio graduada.

#### 6.2.2.0 bocal de soldagem subaquática:

O bocal de soldagem foi usinado em bronze. É composto de sete partes rosqueáveis e tem um diâmetro externo de 60 mm (figs. 24 a 26)

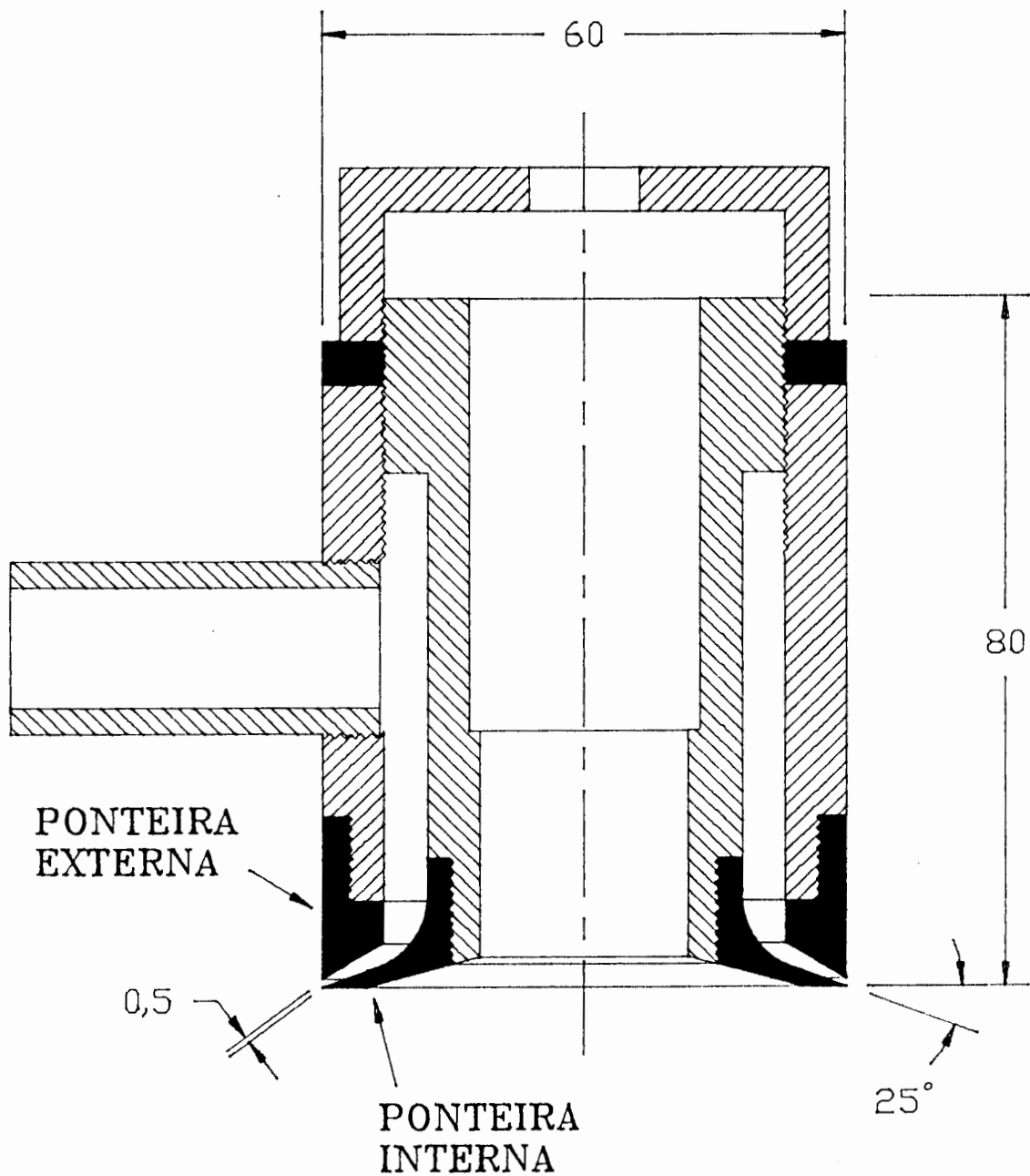


Figura 24: Desenho do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática.

Dimensões em milímetros.

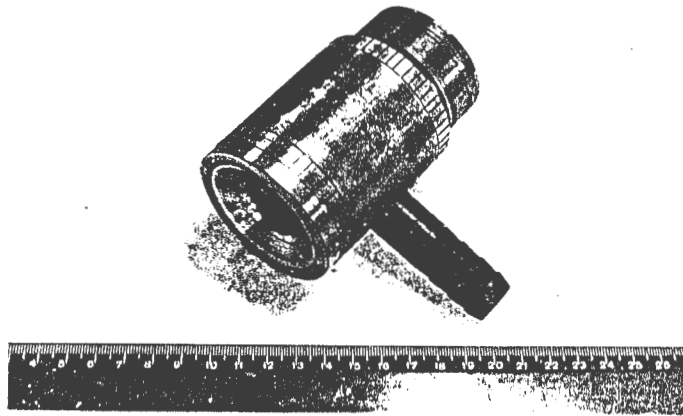


Figura 25:Fotografia do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática.

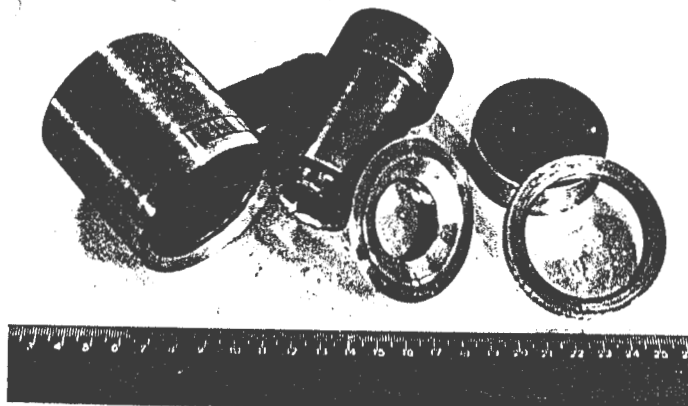


Figura 26:Fotografia do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática  
desmontado.



A escolha do bronze como material de construção foi devida à sua boa usinabilidade e resistências à corrosão, mecânica e térmica relativamente altas.

Pelo fato do conjunto ser rosqueável, é possível fazer ajustes na abertura de saída de água e, trocando-se as ponteiras da extremidade, modificar o ângulo de saída da água.

Este conjunto é encaixado no isolamento elétrico da tocha de soldagem, que por sua vez, é enroscado no difusor de gás.

### 6.3.Execução:

#### 6.3.1.Otimização dos parâmetros de controle da cavidade:

Para se conseguir, através deste processo, soldas que atendam às especificações de soldagem subaquática /11/, é imprescindível a obtenção de uma cavidade seca estável para proteger o arco e poça de fusão (Fig.18).

Com este objetivo, foram levadas em consideração, no projeto e utilização do bocal, as seguintes variáveis:

- Ângulo das ponteiras interna e externa do bocal ( $\theta_0$ );
- Distância do bocal à chapa a ser soldada (d);
- Abertura entre ponteiras interna e externa (w);
- Fluxo de água e gás na saída do bocal;
- Geometria do chanfro da chapa a ser soldada.

Como a abertura entre as duas ponteiras (w) é muito pequena (em torno de 0,5 mm), partículas em suspensão na água poderiam obstruir esta abertura, prejudicando a estabilidade da cavidade. Para evitar este inconveniente, foi necessária a instalação de um filtro adequado na tubulação de alimentação da bomba centrífuga.

### 6.3.2. Experimentos para otimização do bocal:

#### a. O fluxo de água:

Na primeira fase do estudo, verificou-se a influência da geometria do bocal e vazão/velocidade da água no diferencial de pressão ( $\Delta P = P_A - P_B$ ), onde  $P_A$  é a pressão interna à cortina formada pelo jato de água e  $P_B$  é a pressão do meio aquático (Fig.18). No item b, será visto que as melhores condições para a obtenção de uma cavidade seca estável são conseguidas para as menores pressões diferenciais ( $\Delta P < 0$ ) à uma dada vazão /velocidade de água.

Nesta fase inicial dos experimentos ainda não era de interesse o estudo da influência do fluxo de gás, portanto, a região A encontrava-se preenchida por água.

O manômetro, para medição da pressão na região interna à cortina, é constituído de uma placa de acrílico de 200 x 200mm. Essa placa possui um furo em seu centro onde é conectada uma mangueira que, por sua vez, liga-se a um tubo de vidro em "U" com uma escala em milímetros.

O fluido manométrico utilizado foi o percloro etileno de densidade 1,58 g/ml e imissível na água.

Com este dispositivo montado, passou-se a estudar o comportamento do diferencial de pressão ( $\Delta P$ ) de uma série de conjuntos de ponteiros externas e internas em função da vazão/velocidade da água, quais sejam:

Bocal 1 - ponteira externa -  $\theta_o = 25^\circ$

ponteira interna -  $\theta_o = 20^\circ$

Bocal 2 - ponteira externa -  $\theta_o = 25^\circ$

ponteira interna -  $\theta_o = 25^\circ$

Bocal 3 - ponteira externa -  $\theta_o = 30^\circ$   
 ponteira interna -  $\theta_o = 20^\circ$   
 Bocal 4 - ponteira externa -  $\theta_o = 30^\circ$   
 ponteira interna -  $\theta_o = 25^\circ$

Para os bocais 1, 3 e 4, que apresentam ponteiras interna e externa convergentes, aumentando-se a vazão/velocidade da água, verificou-se um decréscimo da pressão na região A. Com o bocal 2, que apresenta estas ponteiras paralelas, ocorreu o contrário, ou seja, houve um acréscimo da pressão na mesma região (Fig.27).

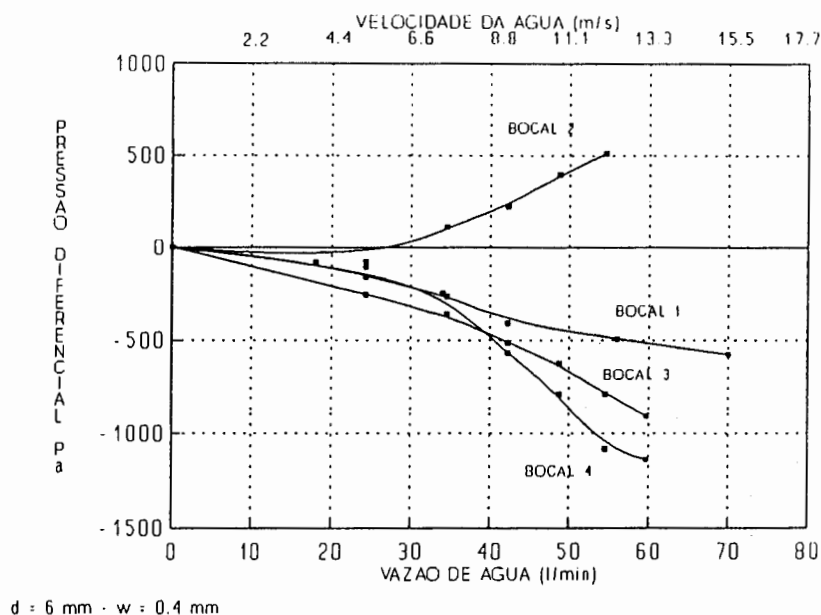


Figura 27: Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para diversos bocais.

Destes resultados, conclui-se que as ponteiras devem ser convergentes para que o  $\Delta P$  seja negativo.

Na Fig.28 são apresentados os resultados do estudo da influência da espessura da borda da ponteira interna (b) do bocal 2 sobre o  $\Delta P$  com a variação da velocidade/vazão de água. Verifica-se que, com pequenas alterações nesta dimensão, há como

resultado, modificações no comportamento hidrodinâmico do bocal.

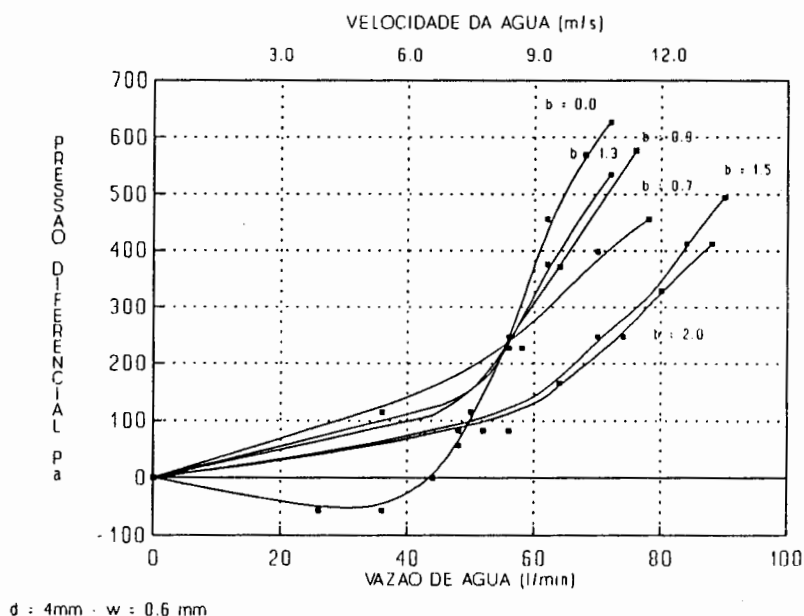


Figura 28: Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para o Bocal 2 com diversas alturas da borda.

Para este bocal, apenas quando a altura da borda foi nula, foram observadas pressões diferenciais negativas, mesmo assim, apenas para pequenas vazões de água. Apesar disto, pode-se concluir que, quanto mais aguda a borda da ponteira interna, melhor será o comportamento do bocal.

Uma variável de grande importância na realização de uma solda com o processo MIG/MAG, tanto na superfície quanto na água, é a distância entre bocal e a chapa a ser soldada (d).

Sendo assim, realizou-se uma série de experimentos variando a distância "d". A Fig.29 apresenta estes resultados para o bocal 2 com borda (b) de 0,65mm e a Fig.30 para o bocal 1.

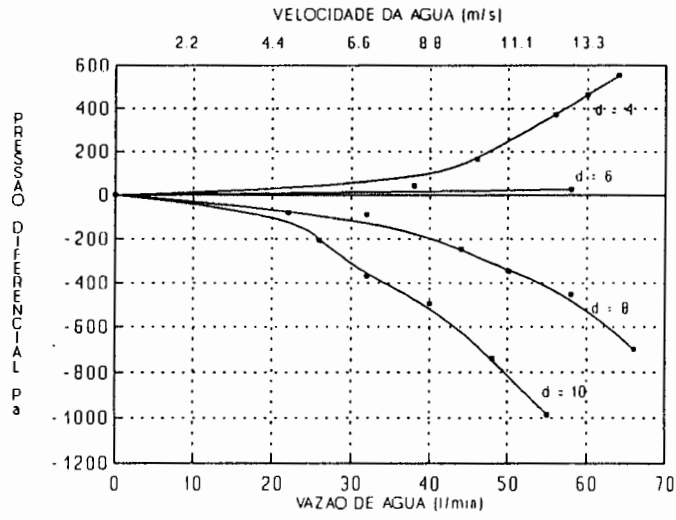


Figura 29: Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para o Bocal 2 com diversas distâncias bocal/chapa.

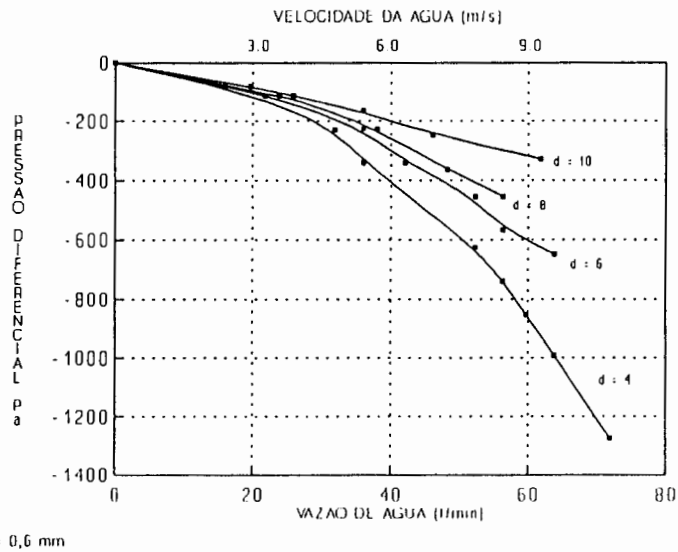


Figura 30: Influência da vazão/velocidade da água no diferencial de pressão para o Bocal 1 com diversas distâncias bocal/chapa.

Verificou-se que o bocal 2 apresenta um comportamento anômalo. Para distâncias ( $d$ ) menores que 6mm os valores de  $\Delta P$  são positivos. Afastando-se mais o bocal da chapa, os valores de  $\Delta P$  passam a ser negativos.

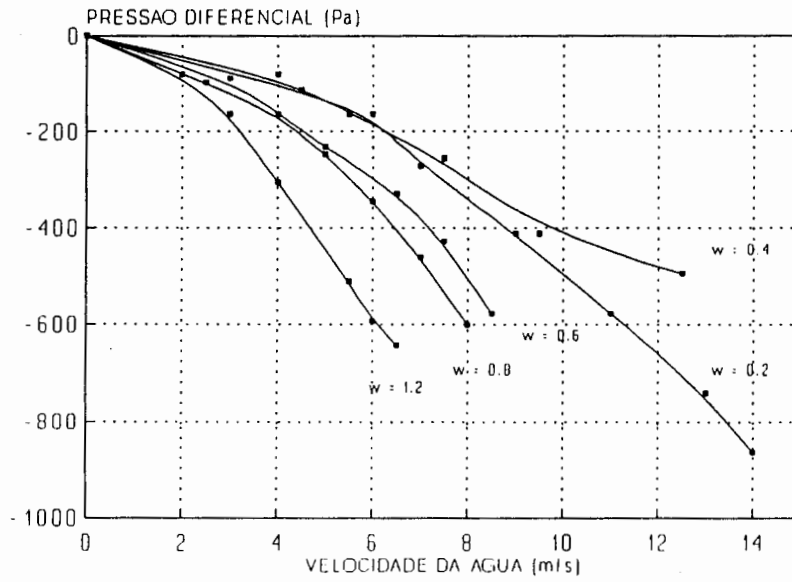
Este comportamento, como já foi visto, é atribuído ao paralelismo entre as faces das ponteiros. Sendo observado em maior ou menor grau, para todos os testes realizados com este bocal, independentemente da altura da borda ( $b$ ).

Para os demais bocais, à medida que a distância " $d$ " aumentava, eram necessárias maiores velocidades da água para se obter o mesmo  $\Delta P$  (Fig.30).

Outra variável de controle da cortina é a abertura entre as ponteiros ( $w$ ). A Fig.31 mostra a influência desta variável sobre o  $\Delta P$  com a variação da velocidade do jato de água. Observa-se que quanto maior a abertura entre as ponteiros, maior será a vazão de água para uma dada velocidade. Em consequência, o  $\Delta P$  será mais negativo para as maiores vazões de água à uma dada velocidade.

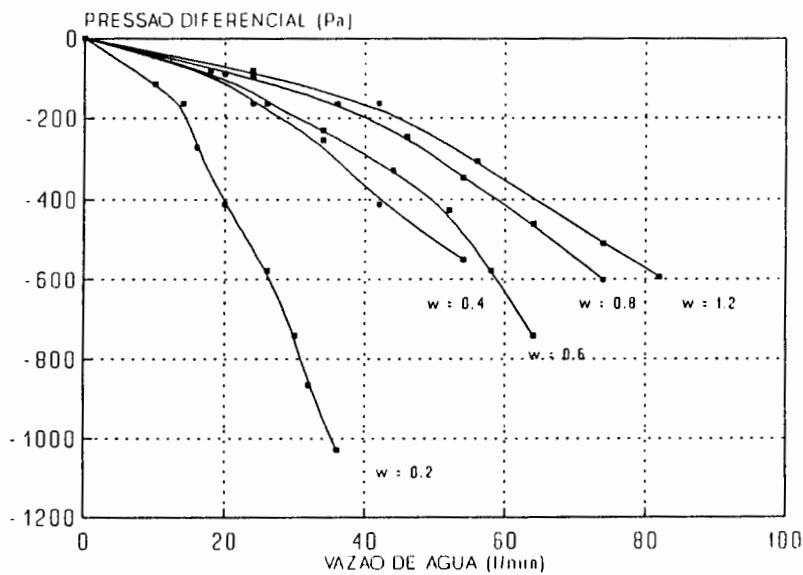
Isto indicaria que, as melhores condições para a formação da cavidade seriam conseguidas com as maiores aberturas entre as ponteiros. No entanto, observando a Fig.32, que apresenta os mesmo resultados da Fig.31, apenas convertendo velocidade em vazão de água, verifica-se que a maior queda de pressão para uma dada vazão é obtida com a menor abertura entre as ponteiros.

E, como será visto adiante, quanto maior a vazão de água, maior será a vazão de gás necessária para estabilizar a cavidade. Sendo assim, por questões econômicas, a escolha da abertura ( $w$ ) recairia sobre a mais fechada (0,2mm). Por outro lado, uma abertura muito pequena, traz algumas limitações, quais sejam:



$d : 6 \text{ mm}$

Figura 31: Influência da velocidade da água no diferencial de pressão para diversas aberturas ( $w$ -mm) do Bocal 1.



$d : 6 \text{ mm}$

Figura 32: Influência da vazão de água no diferencial de pressão para diversas aberturas ( $w$ -mm) do Bocal 1.

grandes perdas de carga no circuito de bombeamento e necessidade de filtragem muito eficiente.

Portanto, a escolha da abertura ( $w$ ), ficou na faixa intermediária,  $w = 0,4$  a  $0,5$ .

Outrossim, a equação sugerida por Nishiguchi et ali (equação 8) descreve com uma boa aproximação o comportamento do bocal, tendo como inconveniente a dificuldade prática de se determinar o raio ( $r$ ) da cortina.

#### b. Interação entre os fluxos de água e gás:

O fluxo de gás no processo MIG/MAG de soldagem subaquática tem duas funções básicas, quais sejam: evacuar a água do interior da cavidade e dar sustentação à cortina de água.

Para tanto, as vazões de gás devem ser significativamente maiores que as necessárias para a soldagem na superfície.

Na tentativa de se obter uma cavidade estável com as menores vazões de gás, realizou-se uma série de experimentos. Nestes ensaios utilizou-se um espelho para que se pudesse visualizar e gravar em "videotape" o comportamento da cavidade formada sobre uma placa de acrílico transparente.

Analisando os resultados destes testes, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

-Na Fig.33 são mostradas a influência da vazão de gás e da velocidade da água na estabilidade da cavidade para os diversos bocais. Verifica-se que para o bocal 3, que nos testes de vazão apenas de água apresentou os menores  $\Delta P$  (fig.27), foi possível



a formação de uma cavidade estável com as menores vazões de gás.

Com bocal 2, que nos experimentos com vazão apenas de água apresentava  $\Delta P$  positivo, não foi possível obtenção de uma cavidade estável.

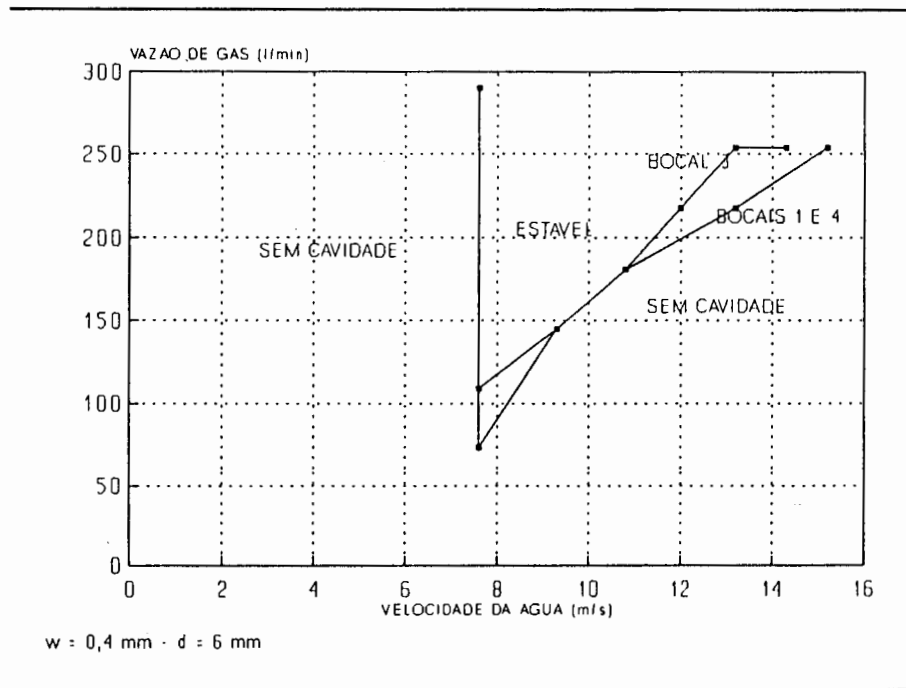


Figura 33: Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversos bocais.

-Aumentando a abertura (w) do bocal, houve necessidade de aumentar a vazão de gás para se conseguir uma cavidade seca estável (Fig.34).

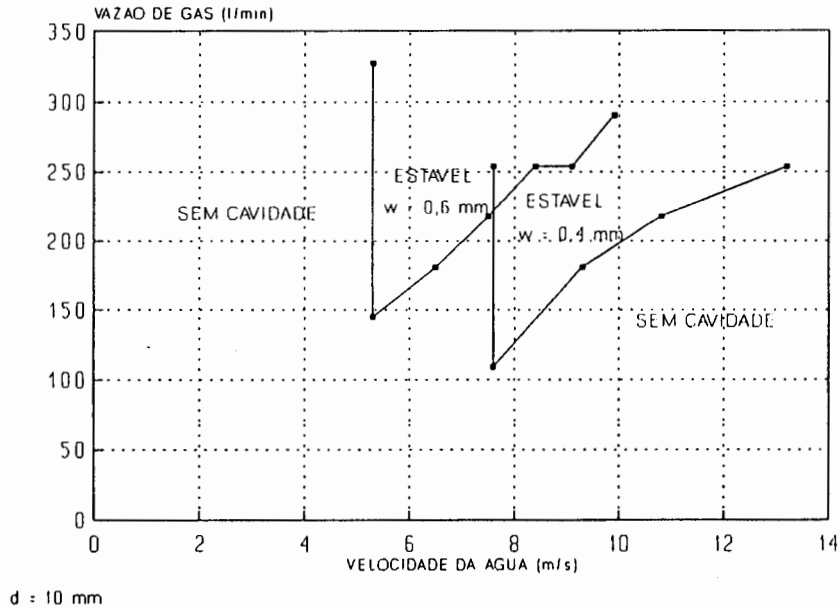


Figura 34: Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas aberturas (w-mm) do Bocal 4.

-À medida que se aumentava a velocidade da água eram necessárias maiores vazões de gás para a estabilização da cavidade (Figs. 33 a 36).

Estas duas últimas observações são explicadas pelo fato de que o jato da cortina de água arrasta o gás do interior da cavidade. Quando a velocidade (ou vazão) da água é muito grande, o gás que permanece no interior da cavidade torna-se insuficiente para dar sustentação à cortina.

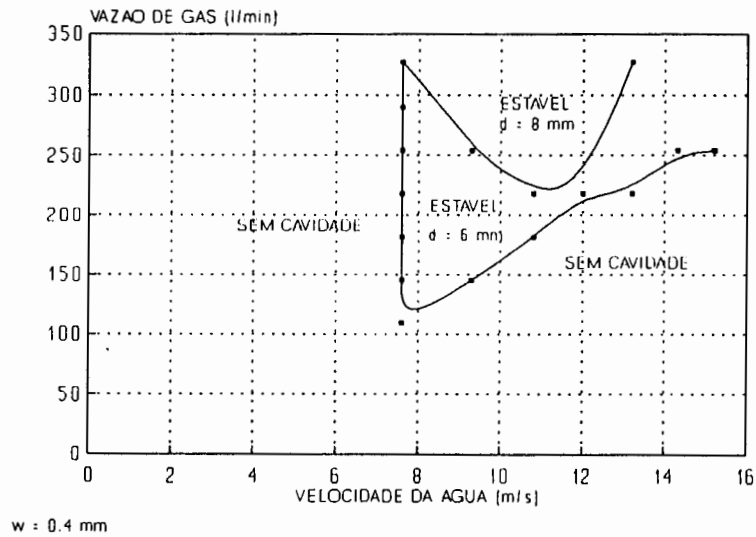


Figura 35: Influência da vazão de gás e velocidade da água na estabilidade da cavidade para diversas distâncias Bocal 1 / chapa (d-mm).

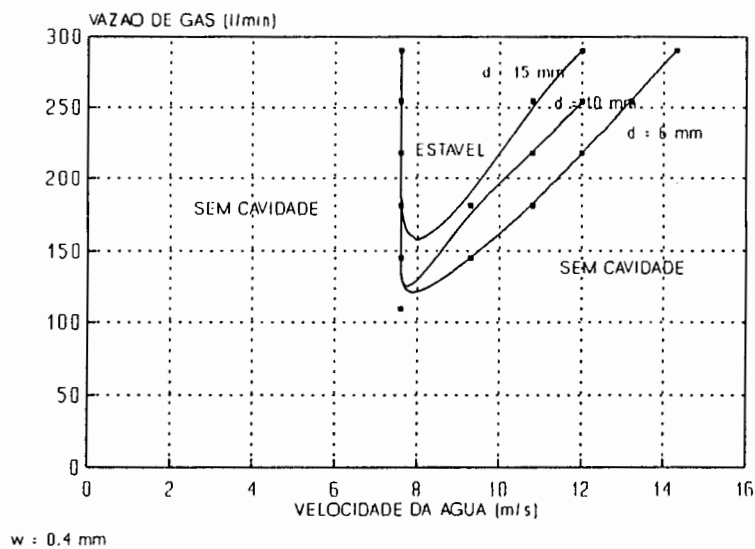


Figura 36: Influência da vazão de gás e velocidade de água na estabilidade da cavidade para diversas distância Bocal 4 / chapa (d-mm).

-Com o aumento da distância (d) entre o bocal e a chapa, houve necessidade de aumentar a vazão de gás para que a cavidade fosse estabilizada (Figs. 35 a 37).

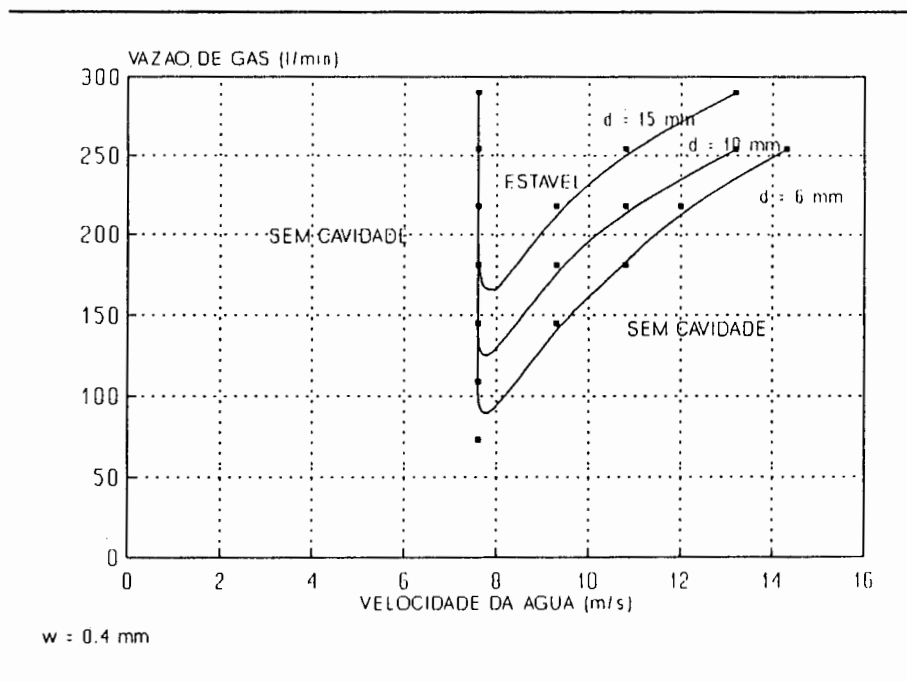


Figura 37: Influência da vazão de gás e velocidade de água na estabilidade da cavidade para diversas distâncias Bocal / chapa (d-mm).

Para verificar o comportamento da cavidade durante a soldagem de uma junta, fez-se em acrílico transparente (nas espessuras de 6mm e 12mm) chanfro em "V" de 60° e, através do espelho, verificou-se o comportamento da cavidade. Estes resultados são apresentados na Fig.38. Verifica-se que quanto mais profundo o chanfro da junta a ser soldada, maior será a vazão de gás necessária para estabilizar a cavidade.

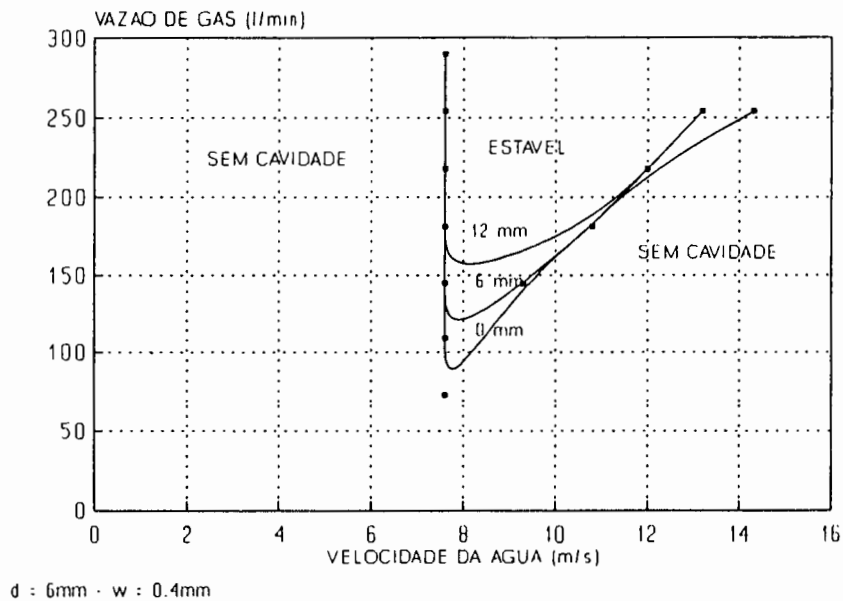


Figura 38: Influência da vazão de gás e velocidade de água na estabilidade da cavidade para diversas alturas do chanfro (mm).

### 6.3.3. Otimização dos parâmetros de soldagem:

Com o intuito de se verificar a influência dos parâmetros de soldagem sobre as propriedades do cordão, realizou-se uma série de soldas ("bead-on-plate") na água à uma profundidade de 300mm e na superfície, variando-se a corrente, tensão e velocidade de soldagem.

Na realização destas soldas utilizou-se chapas de 300x100mm dos aços BS4360 e A36 com 15mm e 12,5mm respectivamente e arame AWS ER70S-6 de 1,2mm de diâmetro (Tab.IV).

TABELA IV

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) E PROPRIEDADES MECÂNICAS				
		Aço: BS 4360	Aço: A36	Arame:ER70S-6
COMPO- SIÇÃO	C	0.095	0.25	0.07 a 0.15
	Si	0.438	0.15 a 0.40	0.80 a 1.15
	Mn	1.239	0.80 a 1.20	1.40 a 1.85
	P	0.028	0.040 máx.	0.025 máx
	S	0.011	0.050 máx.	0.035 máx
QUÍMI- CA (%)	Al	0.045	-	-
	Cu	0.229	-	-
	Cr	0.022	-	-
	Nb	0.031	-	-
	V	0.003	-	-
PRO- PRIE- DADES MECÂ- NICAS	LE(mín) (N/mm <sup>2</sup> )	355	248	-
	LR (N/mm <sup>2</sup> )	490 a 640	400 a 550	-
	A(mín) (%)	18	18	-
	CVN 0°C (J)	27	-	-

LE: Limite de Escoamento  
 LR: Limite de Resistência  
 A : Alongamento  
 CVN: Charpy "V"

O gás de proteção utilizado foi uma mistura comercial de Ar+25%CO<sub>2</sub> (C25) com uma vazão de 130 l/min nas soldas subaquáticas e 20 l/min nas soldas ao ar.

A distância tubo de contato/peça foi mantida constante e igual a 18mm para todas as soldas.

Destes cordões, as seguintes grandezas foram levantadas (tab.V):

TABELA V-a

SOLDAS AO AR ("BEAD-ON-PLATE") - AÇO BS4360										
CORPO DE PROVA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CORRENTE (A)	210	230	280	300	310	320	240	280	280	300
TENSÃO (V)	29	31	30	35	37	37	30	30	35	38
VELOCIDADE (mm/s)	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	5.27	5.27	6.54	6.54
ENERGIA (kJ/mm)	1.47	1.72	2.03	2.54	2.77	2.86	1.37	1.59	1.50	1.74
DUREZA MÉDIA M.S.	238	232	228	211	206	215	231	242	238	223
DESVIO PADRÃO M.S.	8.1	27.2	14.9	17.7	10.9	14.5	9.3	15.1	12.6	7.5
DUREZA MÉDIA ZAC	286	265	245	355	216	229	300	287	266	237
DESVIO PADRÃO ZAC	25.2	16.5	9.7	14.2	7.6	13.2	35.3	19.6	22.0	14.6
REFORÇO (mm)	3.3	3.3	4.1	3.7	3.7	3.8	3.1	3.7	3.1	3.0
LARGURA (mm)	14.4	16.2	16.8	20.5	21.2	21.6	14.2	13.9	14.5	16.1
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	33.4	37.0	48.3	51.9	52.9	56.0	22.4	36.6	31.3	32.7
PENETRAÇÃO (mm)	3.5	4.1	5.5	5.6	5.9	6.1	3.8	4.5	3.8	4.4

TABELA V-b

SOLDAS NA ÁGUA ("BEAD-ON-PLATE") - AÇO BS4360										
CORPO DE PROVA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CORRENTE (A)	215	230	280	300	300	320	240	300	280	300
TENSÃO (V)	29	31	30	35	37	37	30	30	35	38
VELOCIDADE (mm/s)	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	5.27	5.27	6.54	6.54
ENERGIA (kJ/mm)	1.51	1.72	2.03	2.54	2.68	2.86	1.37	1.71	1.50	1.74
DUREZA MÉDIA M.S.	310	308	295	289	306	304	311	328	351	338
DESVIO PADRÃO M.S.	21.5	28.5	40.5	57.1	21.8	24.9	32.9	27.5	43.0	37.1
DUREZA MÉDIA ZAC	425	438	408	414	424	430	422	442	419	428
DESVIO PADRÃO ZAC	20.3	25.5	22.1	28.2	16.4	18.7	20.9	15.7	35.0	15.6
REFORÇO (mm)	3.7	3.7	4.1	4.1	4.2	4.5	3.4	4.0	3.0	3.43
LARGURA (mm)	13.8	15.4	14.8	18.5	19.1	19.8	13.3	14.0	14.3	15.1
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	36.2	39.8	50.1	53.0	56.1	61.5	31.3	39.9	29.7	35.9
PENETRAÇÃO (mm)	3.4	4.1	4.3	3.9	4.0	5.5	3.6	5.2	4.1	4.5

TABELA V-c

SOLDAS NA ÁGUA ("BEAD-ON-PLATE") - AÇO A36							
CORPO DE PROVA	1	2	3	4	5	6	7
CORRENTE (A)	270	270	220	270	220	280	280
TENSÃO (V)	32	30	30	32	35	30	35
VELOCIDADE (mm/s)	8.3	5.2	4.0	5.2	4.0	4.0	4.0
ENERGIA (kJ/mm)	1.04	1.56	1.65	1.66	1.93	2.10	2.45
DUREZA MÉDIA M.S.	362	349	316	321	337	313	316
DESVIO PADRÃO M.S.	42.0	68.5	52.2	31.9	47.7	37.7	36.2
DUREZA MÉDIA ZAC	383	397	359	426	354	345	347
DESVIO PADRÃO ZAC	58.8	45.7	52.7	37.1	39.3	57.5	57.2
REFORÇO (mm)	2.4	3.4	4.2	3.3	2.6	6.1	3.1
LARGURA (mm)	10.1	12.5	12.9	13.7	15.4	11.9	17.8
PENETRAÇÃO (mm)	4.6	5.5	4.3	4.8	3.0	6.1	5.5

-Média e desvio padrão de 11 e 12 pontos no metal de solda e ZAC, respectivamente, da microdureza Vickers com carga de 300g e tempo de aplicação de 10s.

-Média de três medidas para cada cordão com os valores máximos e mínimos da penetração, reforço e largura.

a. Ensaio de microdureza dos cordões de solda:

Os valores de microdureza do metal de solda e ZAC das soldas subaquáticas foram de 100 a 150 unidades superiores aos das soldas na superfície. Conclui-se portanto, que as taxas de resfriamento das soldas realizadas na água são muito maiores.

Como estes valores são muito elevados, poderia ocorrer uma



redução da tenacidade da solda. E, sabendo-se que, com o aumento da energia de soldagem há uma redução na taxa de resfriamento (ou um aumento no tempo para que haja uma queda na temperatura de  $800^{\circ}\text{C}$  para  $500^{\circ}\text{C} - t_{8-5}$  ), realizou-se uma série de cordões tanto na superfície como na água. Nestes experimentos, variou-se a energia de soldagem e observou-se a influência na dureza da solda. Analisando-se estes resultados (Figs.39 e 40), conclui-se que há uma tendência à redução dos valores de dureza, notadamente para o metal de solda, tanto dos cordões feitos na água, como ao ar.

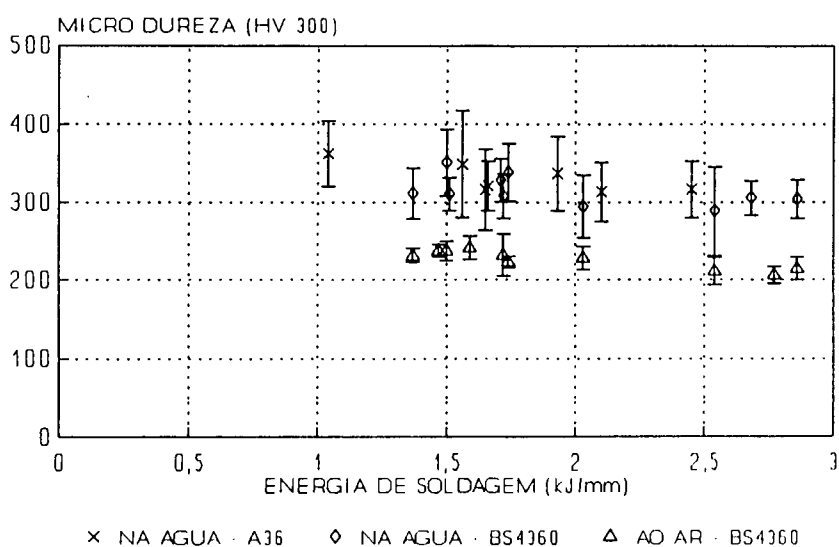


Figura 39:Microdureza do Metal de Solda para "bead-on-plate" na água e ao ar.

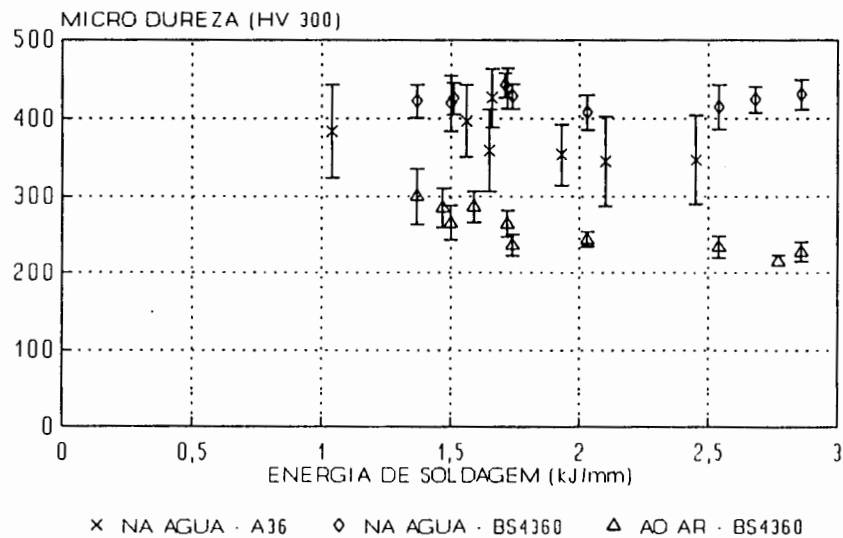


Figura 40:Microdureza da ZAC para "bead-on-plate" na água e ao ar.

Outra variável que poderia influenciar na microdureza das soldas subaquáticas é a velocidade de soldagem, já que com maiores velocidades o cordão de solda ficaria mais rapidamente exposto à água. Em consequência, valores mais elevados de dureza seriam obtidos.

Observando estes resultados para três velocidades e dois níveis de energia de soldagem (Figs.41 e 42), verifica-se que há um aumento da dureza com o aumento da velocidade para o metal de solda na água.

Esta tendência não foi observada na ZAC das soldas subaquáticas nem no metal de solda e ZAC das soldas na superfície.

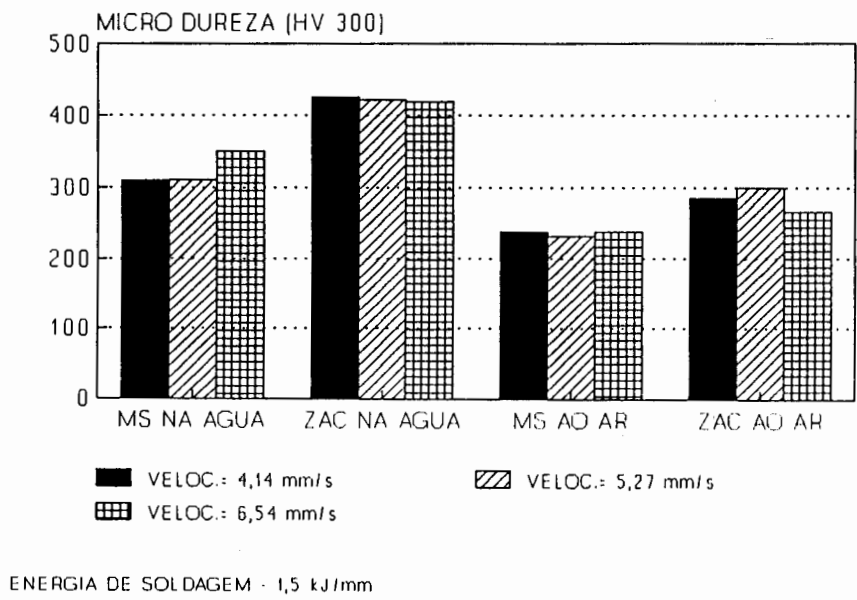


Figura 41: Influência da velocidade de soldagem sobre dureza.  
Energia de soldagem: 1,5 kJ/mm.

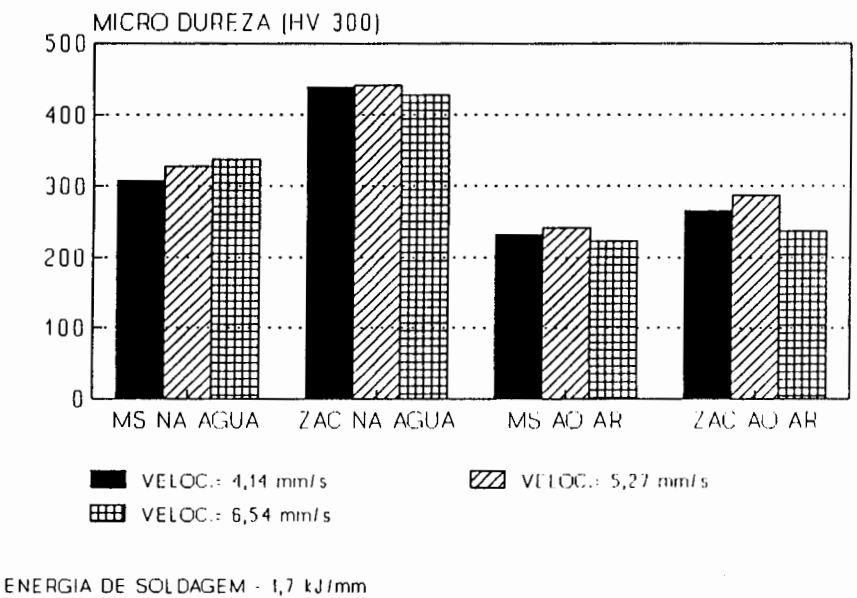


Figura 42: Influência da velocidade de soldagem sobre dureza.  
Energia de soldagem: 1,7 kJ/mm.

Sabendo que existe uma boa correlação entre dureza do aço e a quantidade de martensita presente na microestrutura, Matsunawa et ali /47/ apresentaram equações que, partindo do tempo de resfriamento de 800 a 500°C, prevêm a dureza do metal de solda para aços de baixo carbono, com uma acuracidade de aproximadamente 10%.

Com estas equações, pode-se fazer o contrário: partindo-se da microdureza, calcular o tempo de resfriamento ( $T_{8-5}$ ).

Em um ponto A, com 100% de martensita, tem-se:

$$HV_{(T_{8-5})} = 1958 [C] + 287 \quad (9)$$

$$\log T_{8-5} = 2,55 ([C] + [Mn] / 6,3 + [Si] / 3,6) - 0,92 \quad (10)$$

Em um ponto B, com 0% de martensita, tem-se:

$$HV_{(T_{8-5})} = 273 ([C] + [Mn] / 13 + [Si] / 9,7) + 133 \quad (11)$$

$$\log T_{8-5} = -0,37 ([C] - [Mn] / 1,1 - [Si] / 0,44) + 1,02 \quad (12)$$

Para a dureza em um tempo arbitrário:

$$HV = b / (\exp(\log T) + a) + 150 \quad (13)$$

Calculando para o aço BS4360, onde:

$$[C] = 0,095; [Mn] = 1,239; [Si] = 0,438;$$

Tem-se:

$$\exp(\log T_{8-5}) = ((260 / (HV - 150)) + 0,338) \quad (14)$$

Utilizando a equação 14 para calcular o  $T_{8-5}$  do metal de solda de alguns cordões, tem-se:

Energia (kj/mm)	Velocidade (mm/s)	Tempo de Resfriamento	
		na superfície $T_{8-5}$ (s)	na água $T_{8-5}$ (s)
1,5	4,1	15,7	4,7
2,9	4,1	29,4	5,1
1,5	6,5	15,7	3,1

Por estes resultados, verifica-se que o  $T_{8-5}$  das soldas realizadas na água, com este processo, é de três a cinco vezes menor do que as soldas realizadas na superfície.

Verifica-se também, que reduzindo-se a velocidade e/ou aumentando a energia de soldagem, há um aumento no  $T_{8-5}$ .

#### b.Aspecto e dimensões dos cordões de solda:

As Figs.43 a 54 mostram o aspecto de uma série de cordões. Verifica-se que não há maiores diferenças com relação ao aspecto entre as soldas realizadas na água e ao ar, para um mesmo conjunto de variáveis de soldagem.

As Figs.55 a 66 mostram as macrografias da secção transversal da mesma série de cordões de solda.

A medição das dimensões destas secções foi plotada em gráficos (Figs.67 a 70) e da análise destes resultados, conclui-se que não há variações significativas na largura, reforço e, em consequência, na área do reforço entre as soldas realizadas na água e ao ar. Já, para a penetração, constatou-se menores valores para os cordões realizados na água (Fig.69).

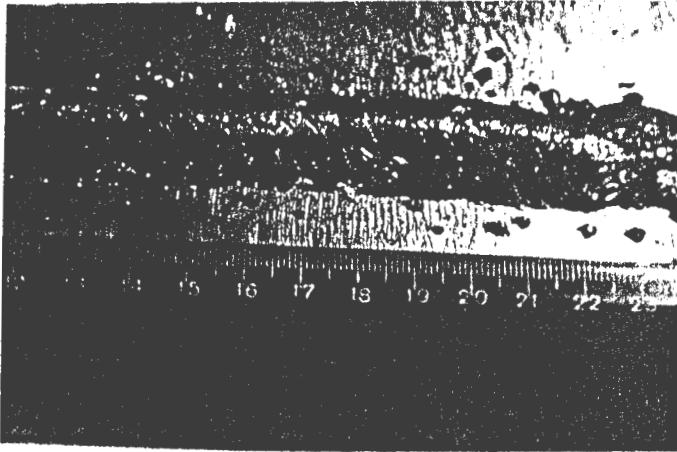


Figura 43:Aspecto do cordão  
C.P.5 - na água

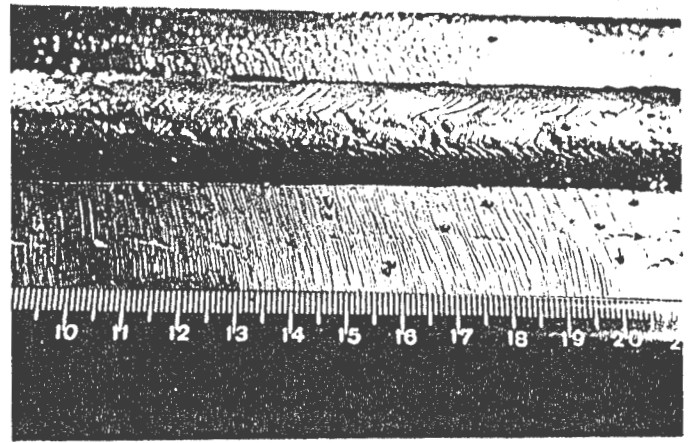


Figura 44:Aspecto do cordão  
C.P.5 - ao ar

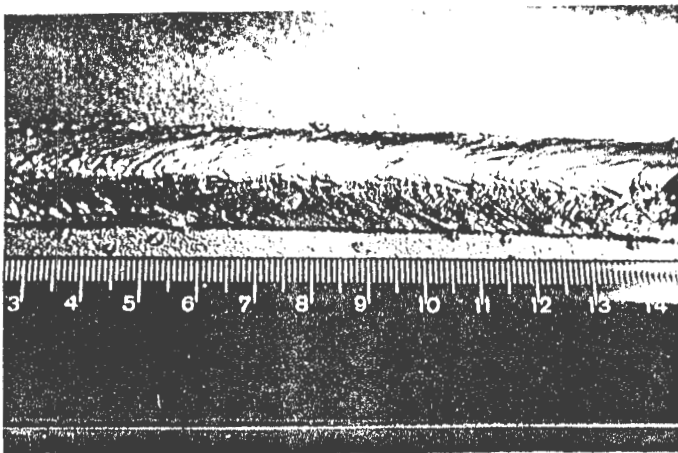


Figura 45:Aspecto do cordão  
C.P.6 - na água

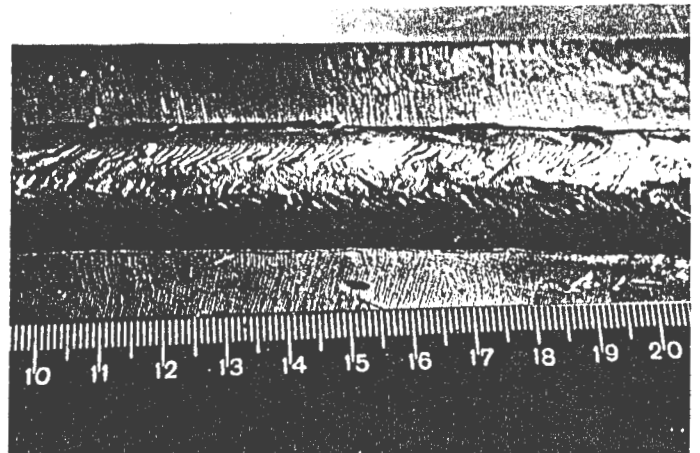


Figura 46:Aspecto do cordão  
C.P.6 - ao ar

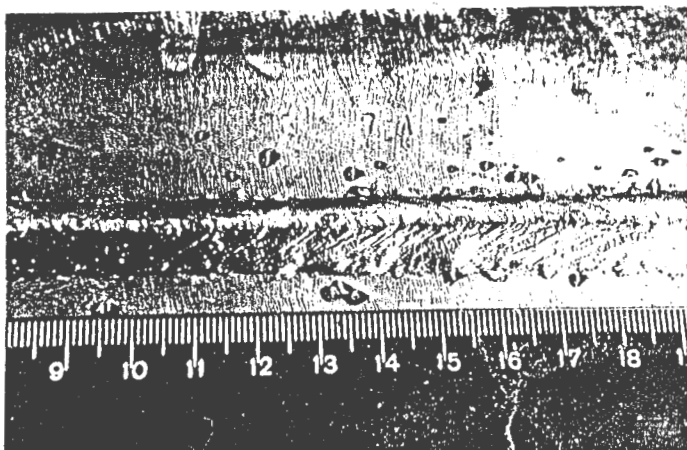


Figura 47:Aspecto do cordão  
C.P.7 - na água

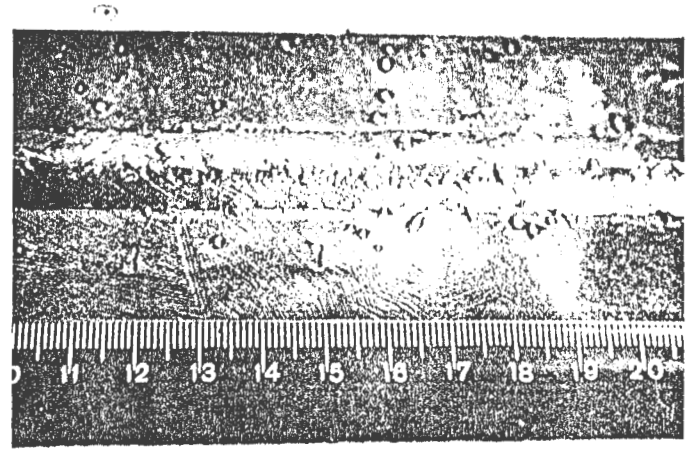


Figura 48:Aspecto do cordão  
C.P.7 - ao ar

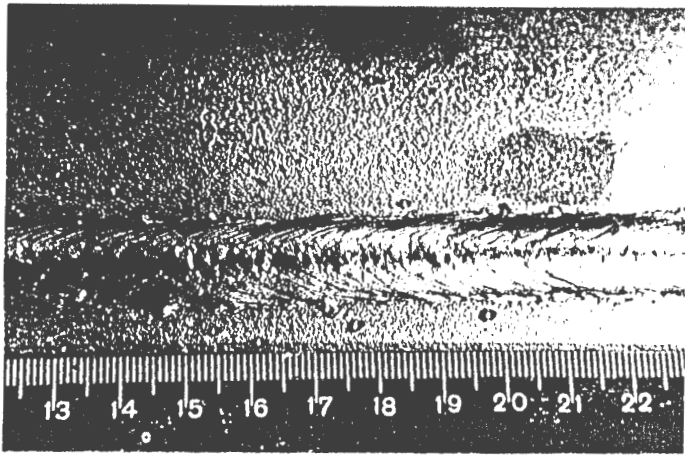


Figura 49:Aspecto do cordão  
C.P.8 - na água

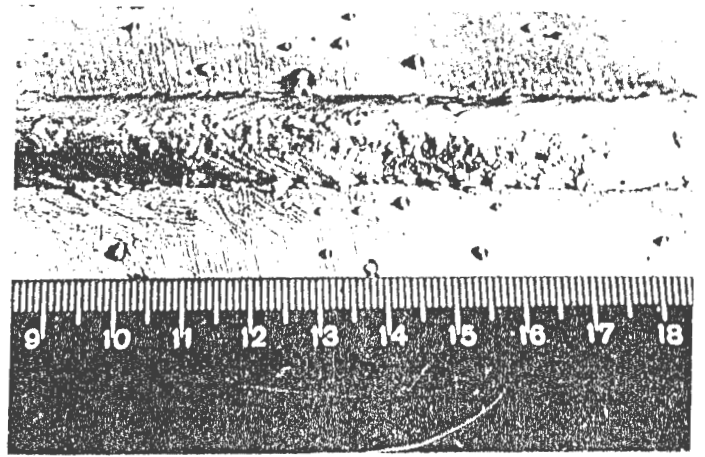


Figura 50:Aspecto do cordão  
C.P.8 - ao ar

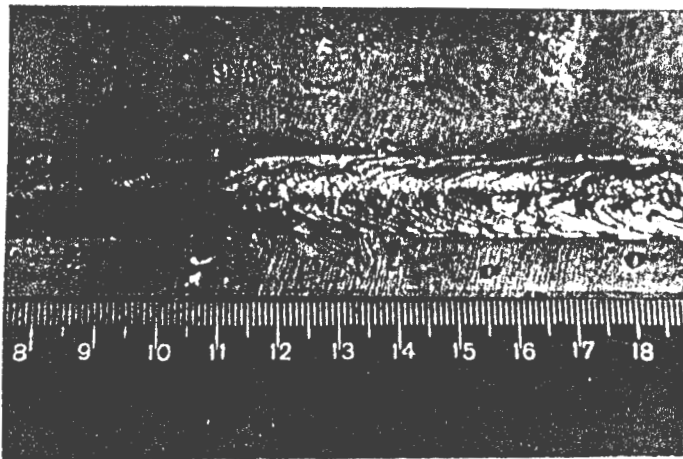


Figura 51:Aspecto do cordão  
C.P.9 - na água

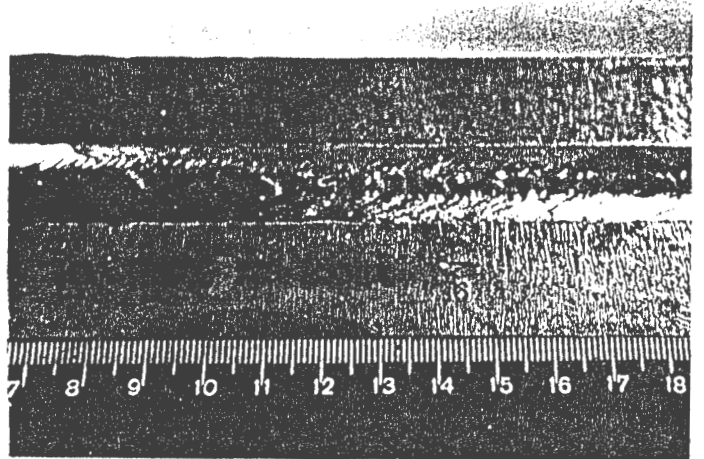


Figura 52:Aspecto do cordão  
C.P.9 - ao ar

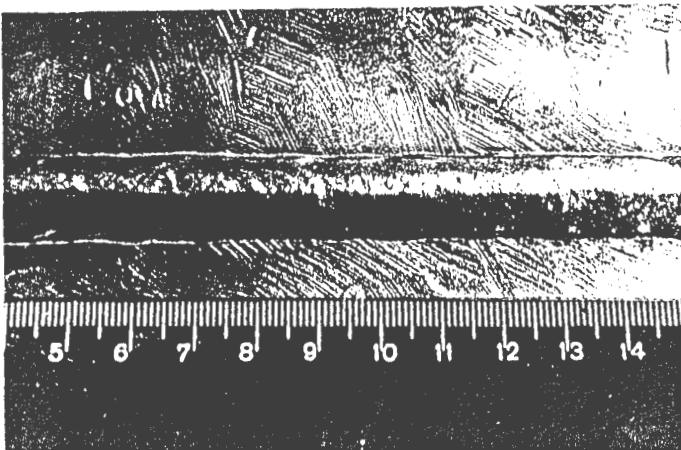


Figura 53:Aspecto do cordão  
C.P.10 - na água

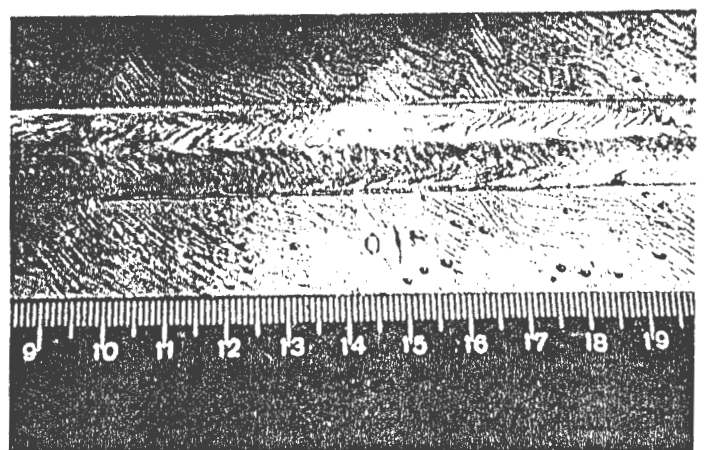


Figura 54:Aspecto do cordão  
C.P.10 - ao ar

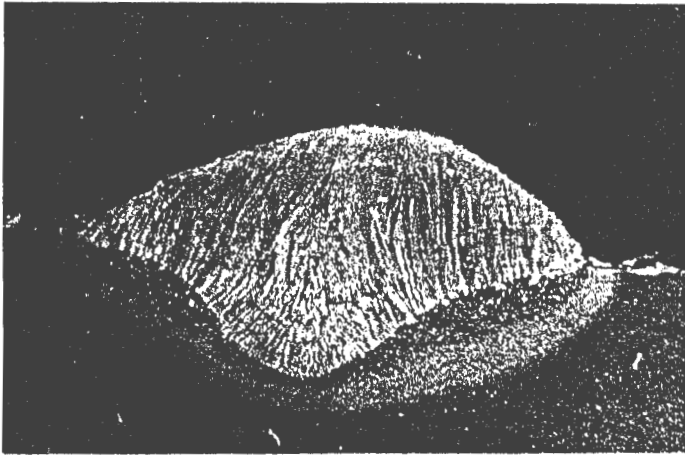


Figura 55:Macrografia do cordão  
C.P.5 - na água  
Aumento: 4 X

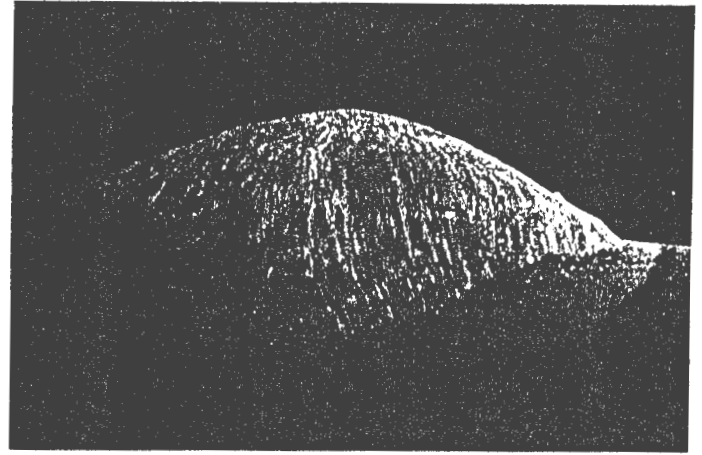


Figura 56:Macrografia do cordão  
C.P.5 - ao ar  
Aumento: 4 X

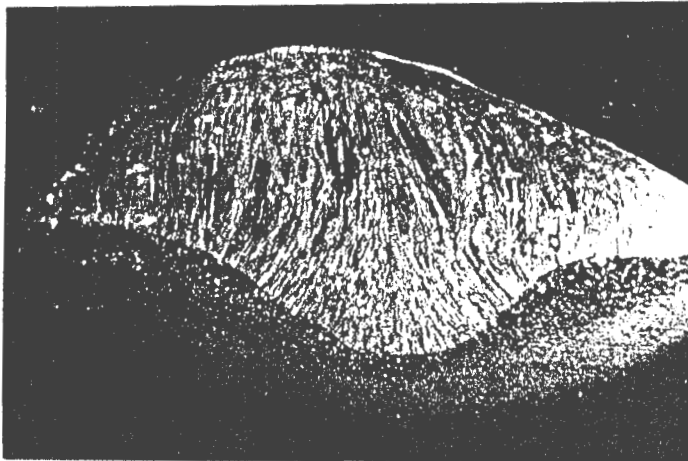


Figura 57:Macrografia do cordão  
C.P.6 - na água  
Aumento: 4 X

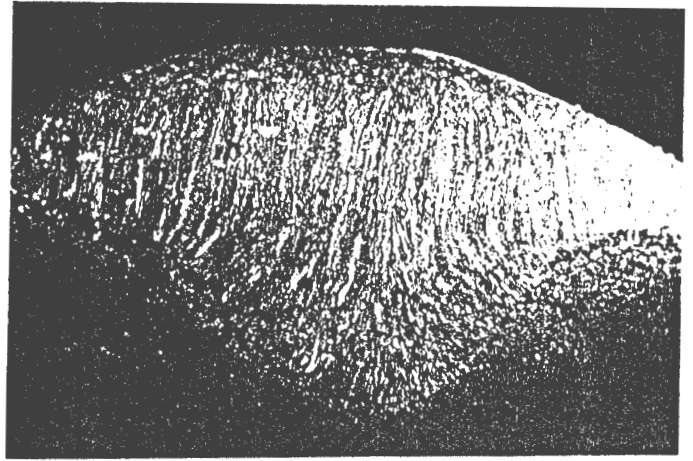


Figura 58:Macrografia do cordão  
C.P.6 - ao ar  
Aumento: 4 X

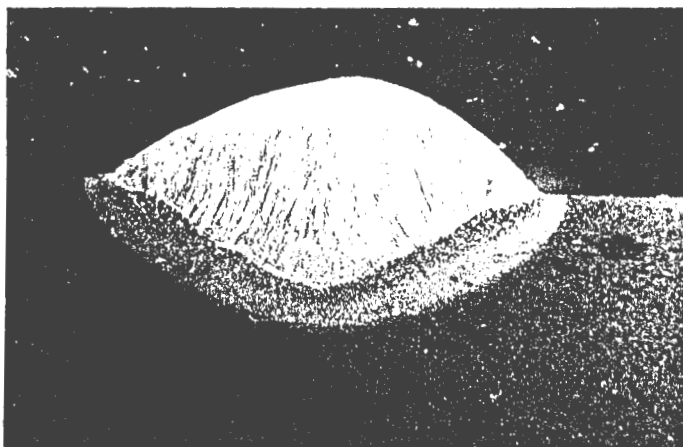


Figura 59:Macrografia do cordão  
C.P.7 - na água  
Aumento: 4 X

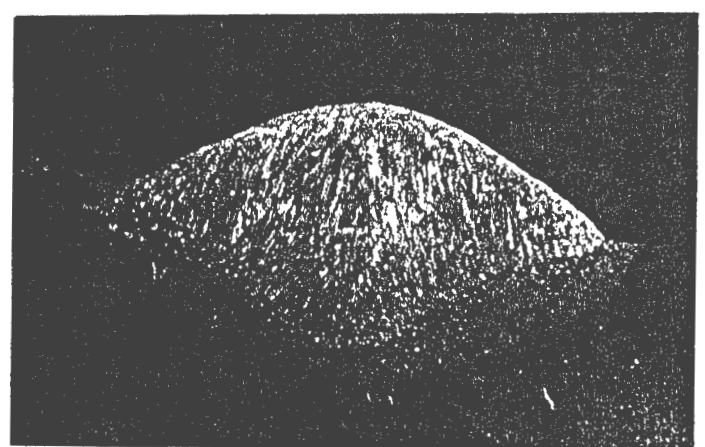


Figura 60:Macrografia do cordão  
C.P.7 - ao ar  
Aumento: 4 X



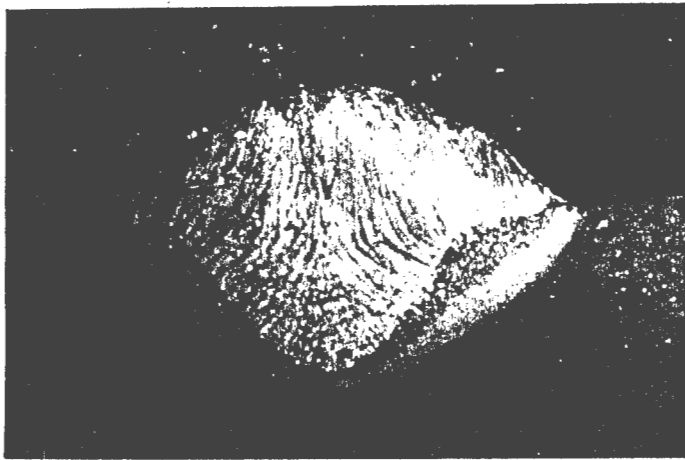


Figura 61:Macrografia do cordão  
C.P.8 - na água  
Aumento: 4 X

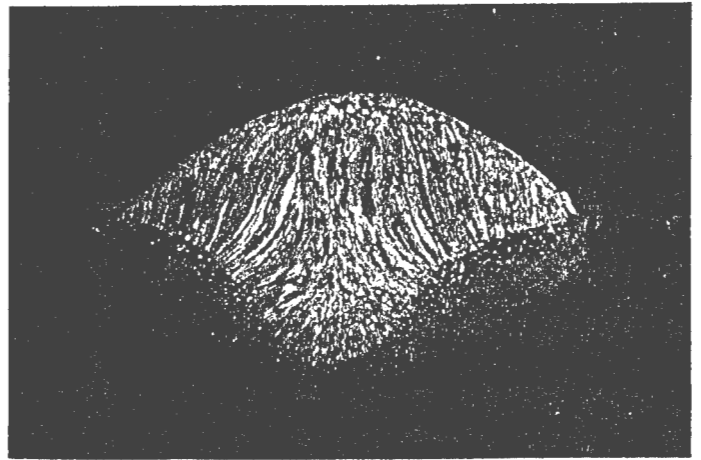


Figura 62:Macrografia do cordão  
C.P.8 - ao ar  
Aumento: 4 X



Figura 63:Macrografia do cordão  
C.P.9 - na água  
Aumento: 4 X

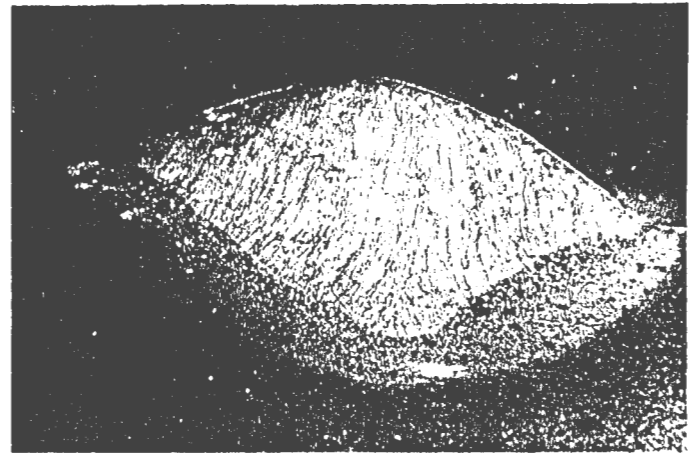


Figura 64:Macrografia do cordão  
C.P.9 - ao ar  
Aumento: 4 X



Figura 65:Macrografia do cordão  
C.P.10 - na água  
Aumento: 4 X

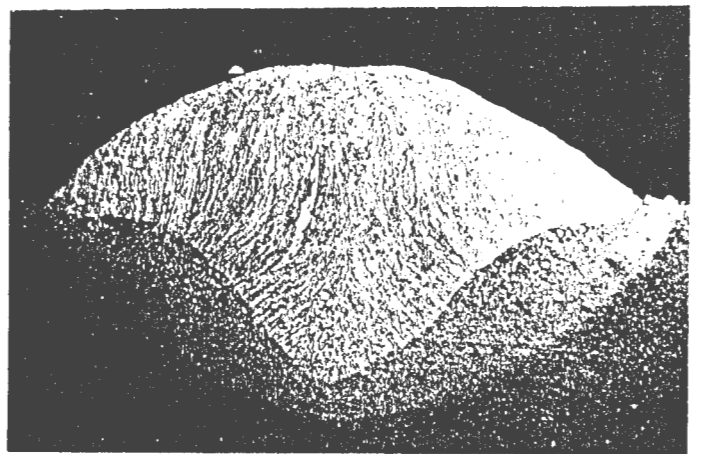


Figura 66:Macrografia do cordão  
C.P.10 - ao ar  
Aumento: 4 X

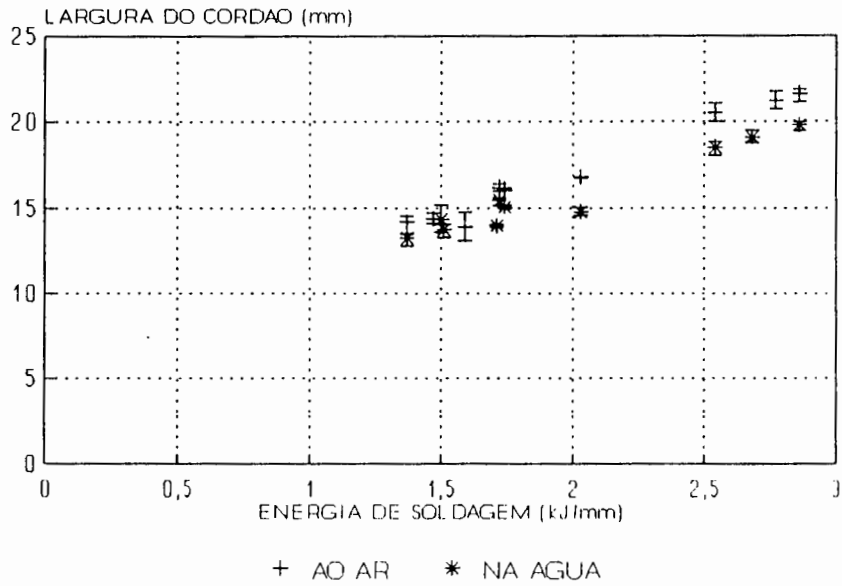


Figura 67: Influência da energia de soldagem na largura do cordão de solda.

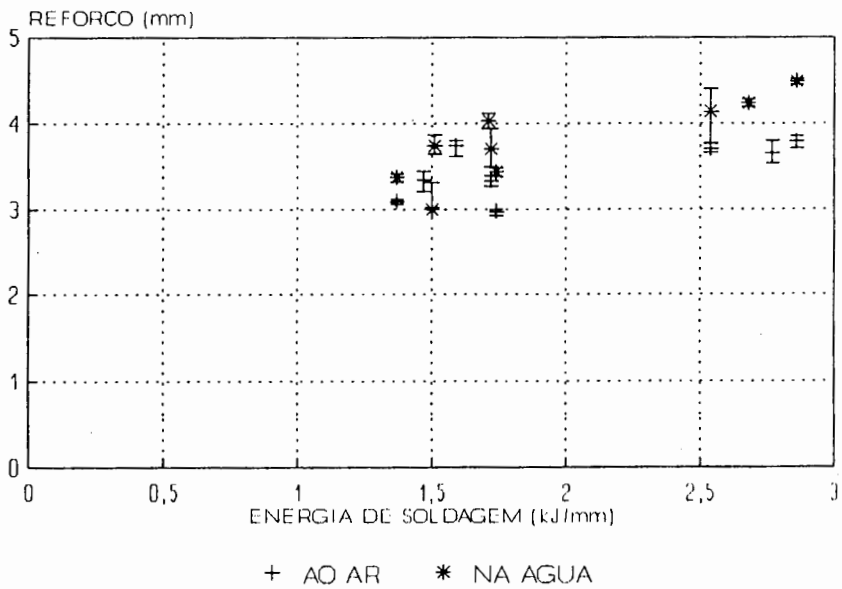


Figura 68: Influência da energia de soldagem no reforço do cordão de solda.

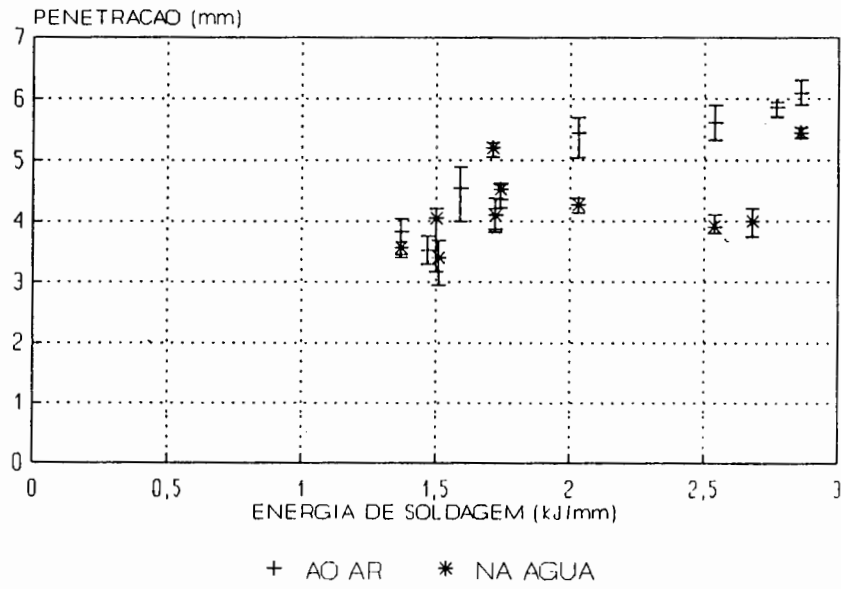


Figura 69: Influência da energia de soldagem na penetração do cordão de solda.

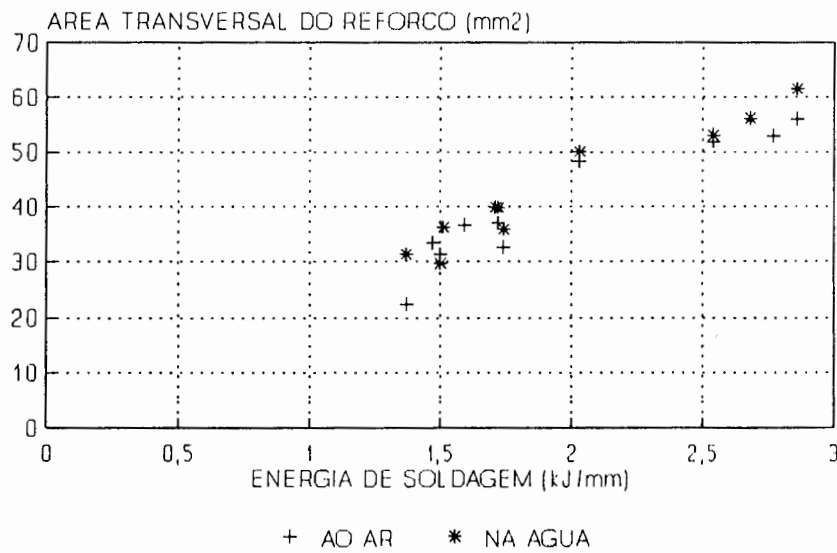


Figura 70: Influência da energia de soldagem na área transversal do cordão de solda.

### 6.3.4. Realização das juntas soldadas:

Com o intuito de selecionar as melhores condições para a soldagem das juntas, uma série de experimentos foi realizada variando-se os parâmetros de soldagem e geometria do chanfro (Tab.VI).

TABELA VI

PARÂMETROS UTILIZADOS NA SOLDAGEM DE JUNTAS								
PARÂMETROS	JUNTAS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
GÁS DE PROTEÇÃO	C25	C25	C25	C25	C25	C25	F34	C25
VAZÃO DE GÁS (l/min)	130	155	130	155	155	155	155	20
VAZÃO DE ÁGUA (l/min)	35	40	35	40	40	40	40	-
ABERTURA DO BOCAL (mm)	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	-
VELOCIDADE (mm/s)	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14	4.14
CORRENTE (A)	250	240	230	290	290	300	300	300
	a	a		a	a	a	a	a
	300	280	280	300	310	310	310	310
TENSÃO (V)	30	35	30			28	28	28
	a	a	37	28	28	35	35	35
	32	37				38	38	38
Nº DE PASSES	3	3	2	3	2	3	3	3
DIST. BOCAL/CHAPA (mm)			6	6	4	4	4	4
	6	6	8	6	4	4	4	4
				8		6	6	6
STICK-OUT (mm)	21	21	19	21	19			
	22	22	15	21	19	19	19	19
	22	22		21				
ENERGIA DE SOLDAGEM (kJ/mm)			1.67			2.06	2.06	2.06
	2.06	2.26	2.41	2.07	2.03	2.58	2.58	2.58
						2.80	2.80	2.80
CHANFRO EM "V" - 60°	raiz 1	raiz	nariz	raiz 1	raiz	nariz	nariz	nariz
	a 2 mm	1a 2 mm	3mm	a 2 mm	2,4mm	2mm	2mm	2mm
	sem	sem	sem	sem	beack-up	raiz	raiz	raiz
	nariz	nariz	raiz	nariz	up	2,4mm	2,4mm	2,4mm
						beack-up	beack-up	beack-up

Obs.: Bocal utilizado nas soldas subaquáticas: bocal 3

C25 - Ar + 25%CO<sup>2</sup>

F34 - Ar + 8% CO<sub>2</sub>

Utilizou-se para tanto, chapas de aço BS4360 grau 50D com dimensões de 300x250x15mm e chanfro em "V" de 60°.

Nas primeiras soldas, o principal defeito encontrado foi uma grande quantidade de porosidades ocasionadas pela entrada de água na região da poça de fusão. Como fica evidente pela observação das macrografias das secções transversais e longitudinais das juntas.

-Junta 1:

Nas Figs.71 e 72 são mostrados os cortes transversal e longitudinal desta junta, observa-se grande quantidade de poros no primeiro passe (Fig.72) causado pela entrada de água na raiz. As porosidades presentes no último passe foram geradas pela imperfeição na formação da cavidade. Pode-se observar ainda, falta de fusão entre passes (Fig.71).

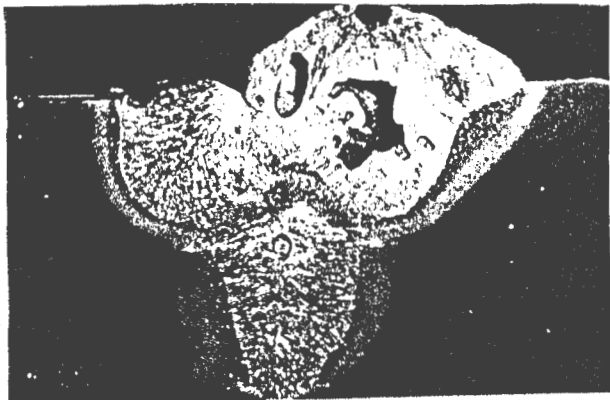


Figura 71: Macrografia da secção transversal da junta 1.  
Aumento: 2,5 X



Figura 72: Macrografia da secção longitudinal da junta 1  
Aumento: 3,0 X

-Junta 2:

Nesta junta, houve redução da quantidade de poros (Figs.73 e 74) devido à utilização de maiores vazões de gás. Mesmo assim, elas estão presentes, principalmente no passe de raiz (Fig.74).

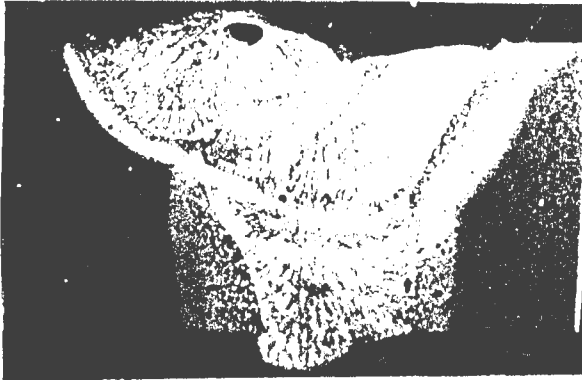


Figura 73:Macrografia da secção transversal da junta 2.  
Aumento: 2,5 X

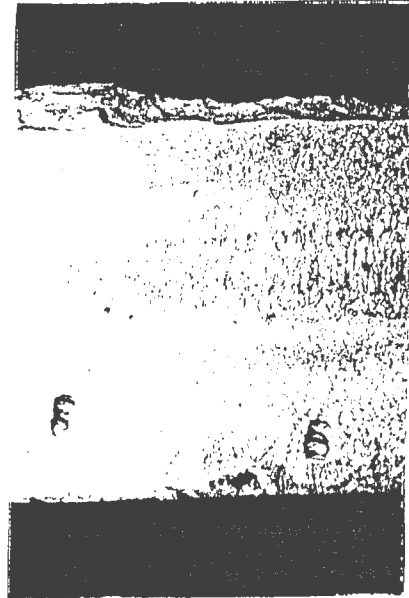


Figura 74:Macrografia da secção longitudinal da junta 2  
Aumento: 3,0 X

-Junta 3:

Para reduzir a entrada de água pela raiz, eliminou-se a abertura de raiz e utilizou-se nariz de 3mm nesta junta (Fig.75). Conseguiu-se, de fato, uma redução na quantidade de poros. No entanto, houve falta de fusão na raiz.

-Juntas 4 e 5:

Para evitar a entrada de água pela raiz, a única alternativa encontrada foi a colocação de "beack-up" que deve ser todo soldado à chapa. Nas Figs. 76 e 77, observa-se que este procedimento é efetivo e, em consequência, as porosidades no primeiro passe são reduzidas.



Figura 75: Macrografia da secção transversal da junta 3  
Aumento: 5 X

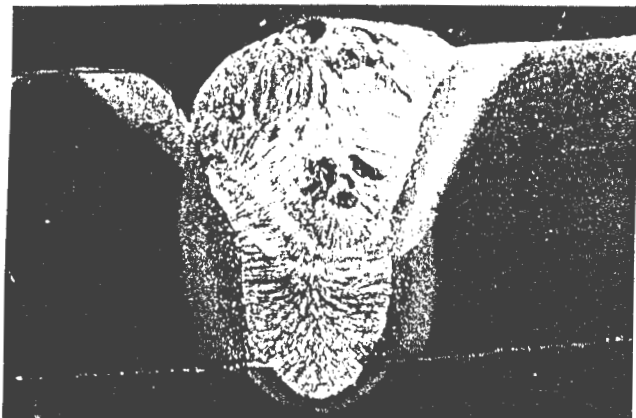


Figura 76: Macrografia da secção transversal da junta 4.  
Aumento: 2,5 X

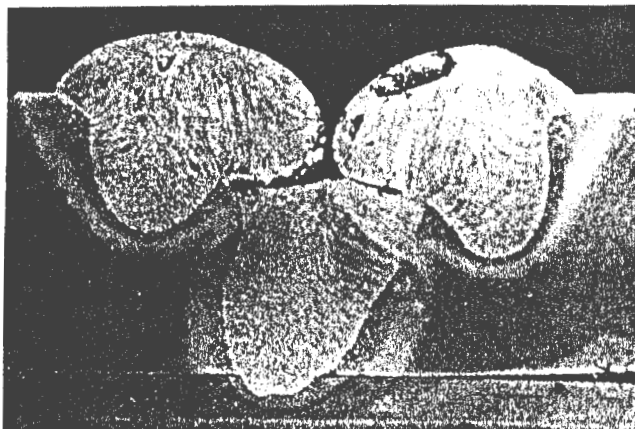


Figura 77: Macrografia da secção transversal da junta 5  
Aumento: 3,0 X

As porosidades e falta de fusão nos dois últimos passes da junta 5 (Fig.77) foram ocasionadas pelo desalinhamento do bocal/tocha em relação ao chanfro.

Já, na junta 4 (Fig.76), as porosidades do segundo passe foram devidas a um entupimento do bocal durante a realização da solda.

Solucionados os problemas de entrada de água pela raiz e de má formação da cavidade, foi possível realizar juntas soldadas com redução significativa das porosidades. Estas juntas foram realizadas em três camadas, sendo um passe por camada.

-Junta 6:

O gás de proteção utilizado foi o C25 (Ar + 25% CO<sub>2</sub>). A Fig.78 mostra o aspecto geral da junta. Observa-se a grande quantidade de poros no início e final da junta devido à entrada de água pelas bordas da chapa. A Fig.79 mostra o aspecto do cordão e, as Figs.80 e 81 as macrografias das secções transversal e longitudinal da junta.

-Junta 7:

Para verificar a influência do gás de proteção sobre as características da junta, utilizou-se nesta solda (Figs.82 a 84), a mistura comercial F34 (Ar + 8% CO<sub>2</sub>) mantendo os demais parâmetros o mais próximo possível aos da junta 6.

-Junta 8:

Para comparar as características de uma junta soldada na água com outra feita ao ar, foi realizada esta junta com os



mesmos parâmetros de soldagem das duas últimas, utilizando-se a mistura gasosa C25 com uma vazão de 20 l/min como gás de proteção (Figs.85 a 87)

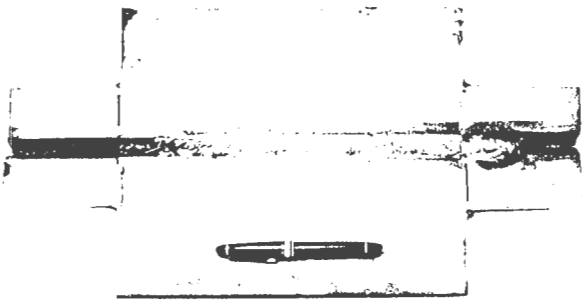


Figura 78:Aspecto geral da junta 6

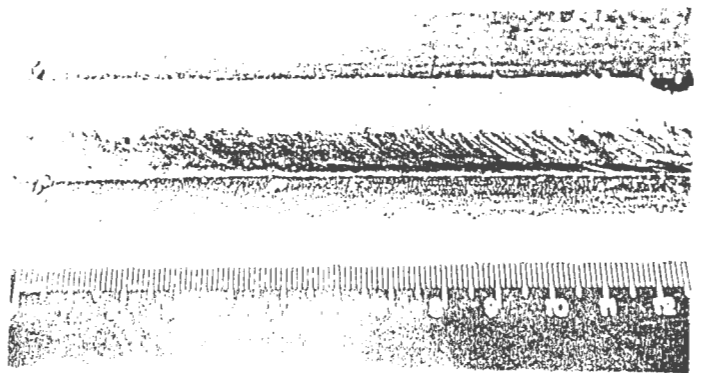


Figura 79:Aspecto do cordão de solda da junta 6

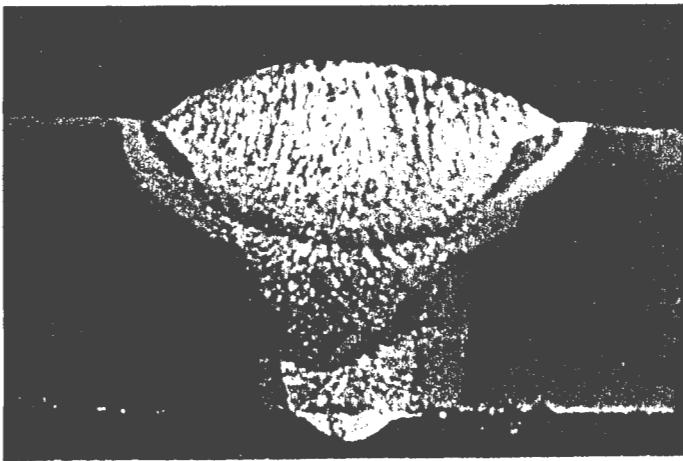


Figura 80:Macrografia da secção transversal da junta 6.  
Aumento: 2,5 X

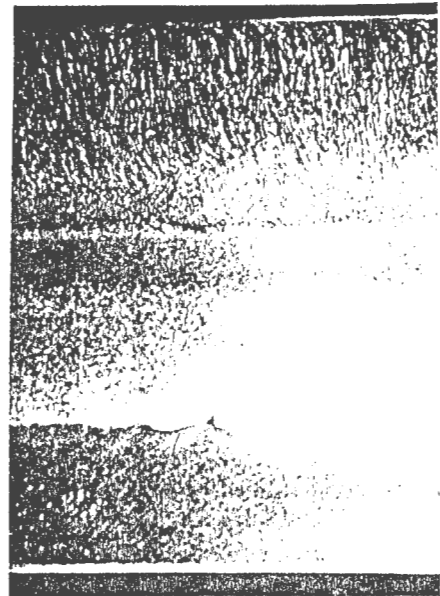


Figura 81:Macrografia da secção longitudinal da junta 6  
Aumento: 3,0 X

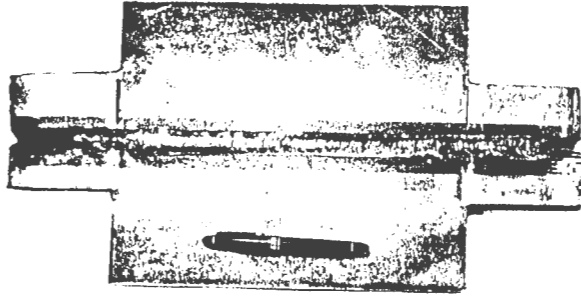


Figura 82:Aspecto geral da junta 7.

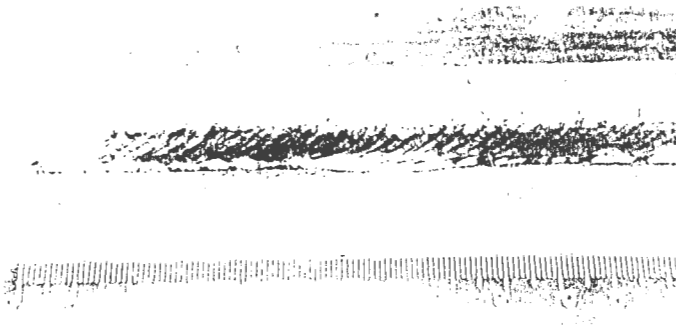


Figura 83:Aspecto do cordão de solda da junta 7.



Figura 84:Macrografia da secção transversal da junta 7.  
Aumento: 2,5 X

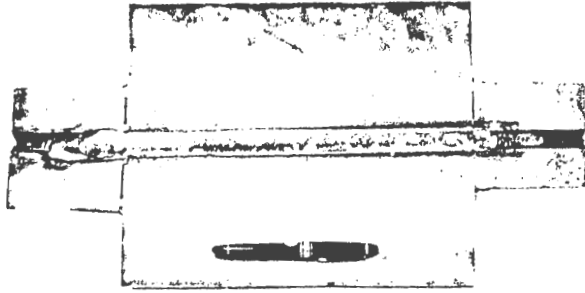


Figura 85:Aspecto geral da junta 8.

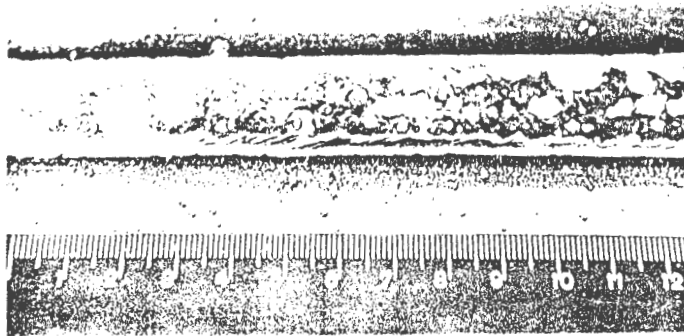


Figura 86:Aspecto do cordão de solda da junta 8.

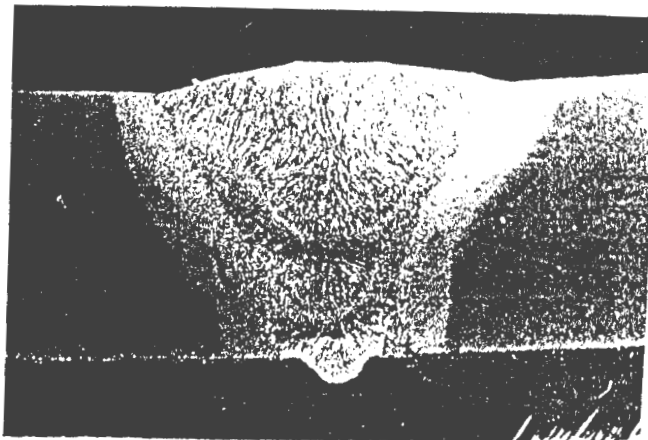


Figura 87:Macrografia da secção transversal da junta 8.  
Aumento: 2,5 X

### 6.3.5.Avaliação das juntas soldadas:

#### a.Análise Radiográfica:

A qualidade das juntas soldadas 6, 7 e 8 foi avaliada por testes de raio-X, usando uma fonte de 220 kV. Os seguintes defeitos foram encontrados:

##### -Junta 6:

-Dois ninhos de porosidades vermiculares (rabo de peixe) no passe de raiz, uma com comprimento total de 23mm e outra com 14mm, ambas com porosidades isoladas menores que 1,6mm;

-Porosidades globulares de grande dimensões (diâmetro de 7,4mm em média) no início e final da junta.

As porosidades vermiculares no passe de raiz foram causadas pela evaporação da água que, eventualmente, ficou retida entre o "beack-up" e chapa. Já, as porosidades globulares no início e final da junta foram geradas pela entrada de água pelas bordas da chapa.

##### -Junta 7:

-Pequenos ninhos de porosidades vermiculares na primeira metade da junta com porosidades isoladas menores que 1,6mm;

-Grande quantidade de porosidades vermiculares no início e globulares no final da junta.

##### -Junta 8:

Pequeno número de porosidades isoladas (12 no total) menores que 1,6mm em todo o comprimento da junta.

### b. Metalografia Quantitativa:

As metalografias quantitativas do metal de solda (contagem por pontos dos constituintes da microestrutura), foram realizadas com o auxílio de um microscópio ótico e de um contador eletrônico de fases. Foram contados um total de 400 pontos no último passe e entre o primeiro e segundo passes das juntas 6, 7 e 8.

Como mostram as Figs 88 a 90 e a Tab. VII, verificou-se quatro diferentes microestruturas: Ferrita de Contorno de Grão, Ferrita Acicular, Ferrita com MAC Alinhado e Martensita.

TABELA VII

METALOGRAFIA QUANTITATIVA DAS JUNTAS SOLDADAS						
JUNTA	6	6	7	7	8	8
MICROESTRUTURA	PASSE 3	PASSES 1 E 2	PASSE 3	PASSES 1 E 2	PASSE 3	PASSES 1 E 2
FERRITA DE CONTORNO DE GRÃO	9.5 %	28.0 %	7.4 %	27.8 %	29.9 %	29.5 %
FERRITA ACICULAR	0 %	0%	0 %	0 %	36.9 %	48.5 %
FERRITA COM MAC ALINHADO	0 %	0 %	0 %	0 %	33.2 %	22.0 %
MARTENSITA	90.5%	72.0%	92.6%	72.2%	0 %	0 %



Figura 88:Micrografia da junta 6 - Região do último passe.  
Aumento 500 X

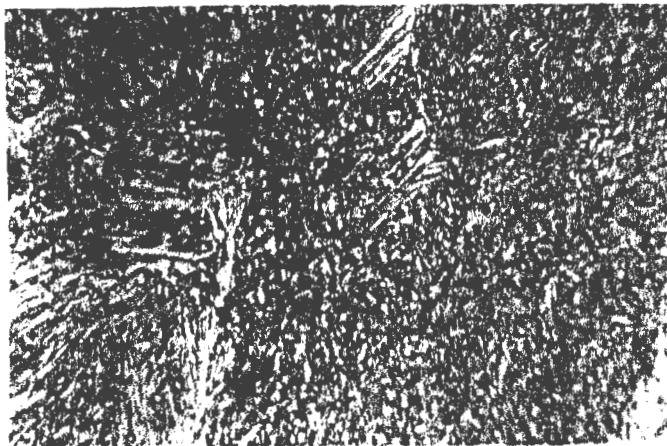


Figura 89:Micrografia da junta 7 - Região do último passe.  
Aumento 500 X

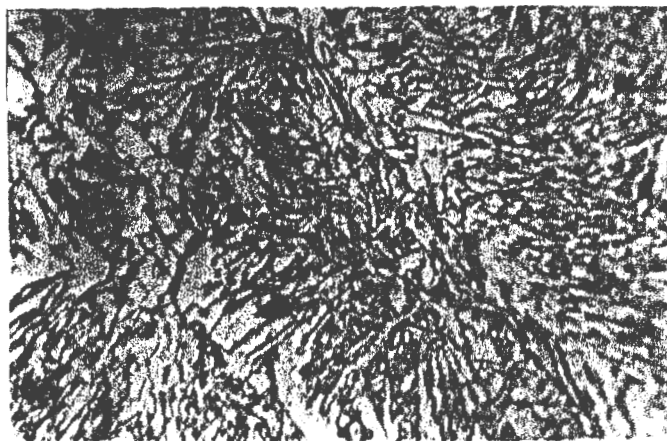


Figura 90:Micrografia da junta 8 - região do último passe.  
Aumento 500 X

Para as juntas 6 e 7, realizadas na água, na região do último passe, a microestrutura predominante foi martensita seguida de ferrita de contorno de grão.

Observa-se também, um pequeno aumento na quantidade de martensita na junta 7 em relação à junta 6, possivelmente devido à aceleração da taxa de resfriamento causada pela menor quantidade de CO<sub>2</sub> presente na mistura gasosa de proteção utilizada.

Na região dos dois primeiros passes, onde a microestrutura é reaustenitizada e temperada, observou-se maior quantidade de ferrita de contorno de grão do que no último passe.

Por sua vez, na junta 8, realizada ao ar, não se verificou a presença de martensita mas sim, uma combinação de ferrita acicular, de contorno de grão e com MAC alinhado.

#### c. Microdureza Vickers:

Nestas três juntas, fez-se medições de microdureza com carga de 300g e tempo de aplicação da carga de 10s nas regiões do primeiro, segundo e terceiro passes, iniciando no metal base até o metal de solda.

Estas medidas foram plotadas em gráficos e os resultados são apresentados nas Figs.91 a 93.

Para a junta 6 o maior valor de dureza observado foi de 429HV e para a junta 7 foi de 454HV, ambos na interface ZAC/metálico de solda na região do último passe (Figs.92 e 93).

Para a junta realizada ao ar (junta 8), os valores de microdureza são bem inferiores (valor máximo: 252HV) tanto na ZAC como no metal de solda (Fig.91).

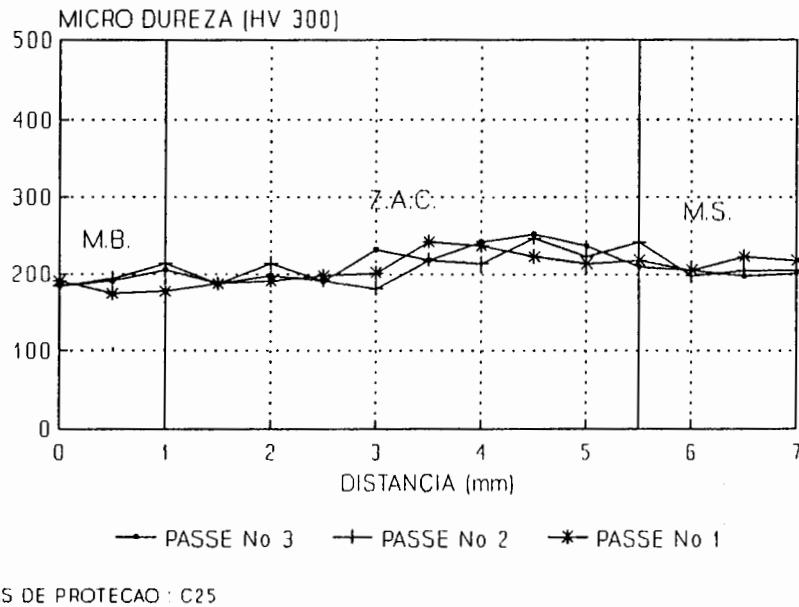


Figura 91:Valores de micro dureza da junta 8 (soldada ao ar em três passes, gás de proteção: Ar + 25% CO<sub>2</sub>).

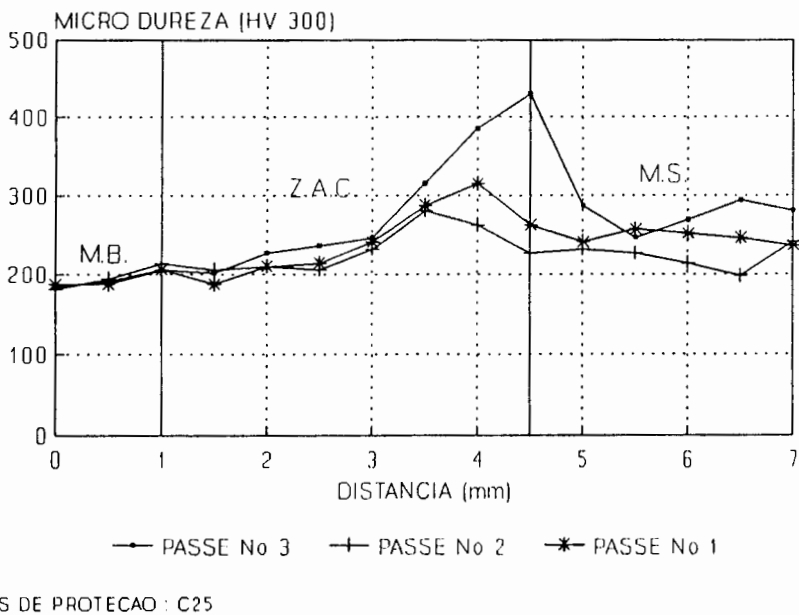


Figura 92:Valores de micro dureza da junta 6 (soldada na água em três passes, gás de proteção: Ar + 25% CO<sub>2</sub>).



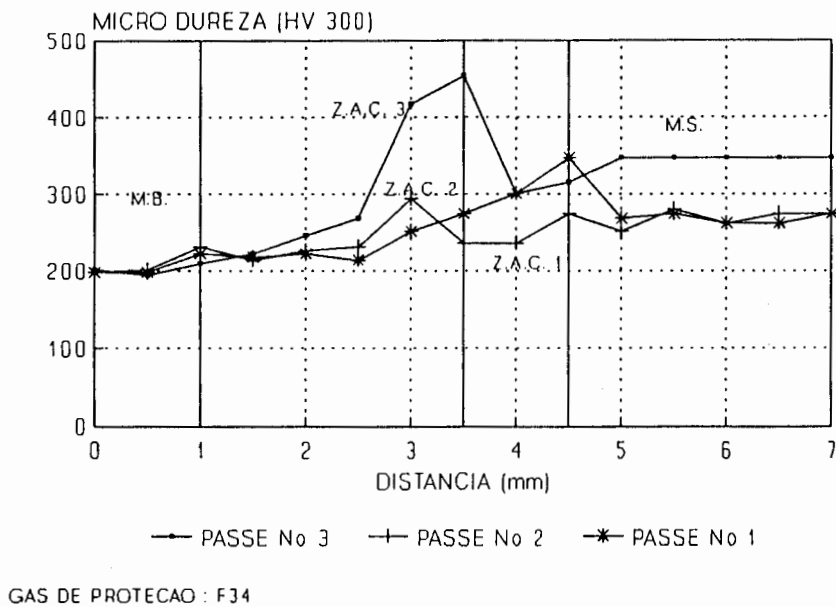


Figura 93:Valores de micro dureza da junta 7 (soldada na água em três passes, gás de proteção: Ar + 8% CO<sub>2</sub>).

Plotando-se os valores de microdureza do último passe das três juntas (Fig.94), pode-se observar o efeito do rápido resfriamento das soldas subaquáticas em relação à solda realizada na superfície.

Como foi dito no item anterior, possivelmente devido à aceleração da taxa de resfriamento causada pela menor quantidade de CO<sub>2</sub> presente na mistura gasosa de proteção, os valores de microdureza da junta 7 são sempre superiores aos da junta 6.

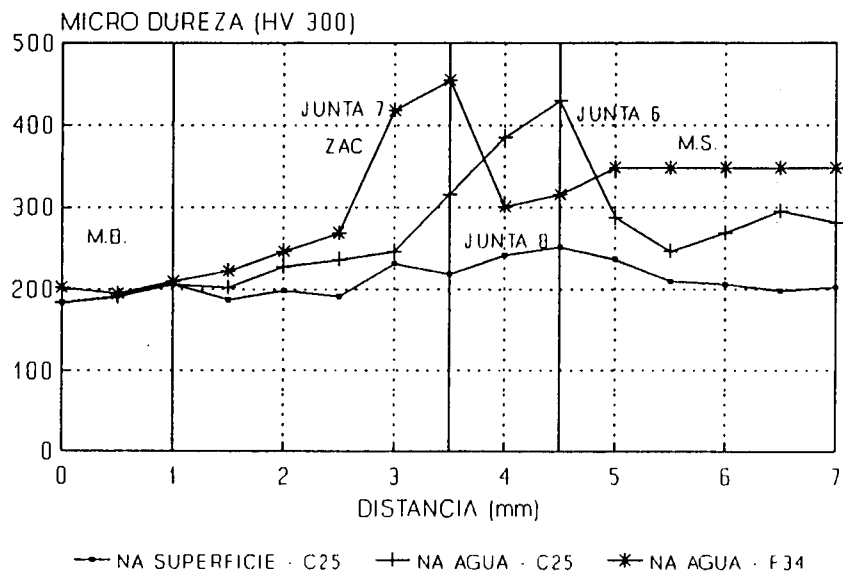


Figura 94:Valores de micro dureza para o ultimo passe das três juntas anteriores.

#### d.Ensaio Mecânicos:

Para a avaliação das propriedades mecânicas destas três juntas, foram realizados ensaios de tração, de dobramento e Charpy, obedecendo-se a Norma AWS D3.6-89 /11/.

##### -Ensaio de tração transversal:

O corpo de prova para este ensaio foi retirado da junta 6 (Fig.95). A fratura ocorreu no metal base fora da ZAC e os seguintes valores foram registrados:

Limite de Escoamento = 447 N/mm<sup>2</sup>

Limite de Ruptura = 611 N/mm<sup>2</sup>

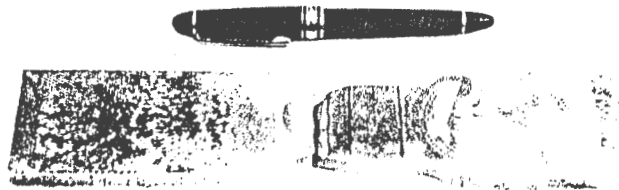


Figura 95:Corpo de prova de tração  
Junta 6



Figura 96:C.P. de dobramento  
Face e raiz - junta 6

Figura 97:C.P. de dobramento  
Face e raiz - junta 7

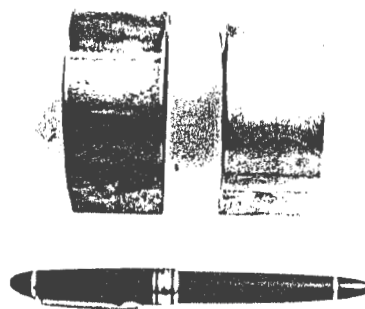


Figura 98:C.P. dobramento  
Face e raiz - junta 8

-Ensaio Charpy do metal de solda:

Foram retirados três corpos de prova da junta 7, os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e as fraturas observadas foram parcialmente por clivagem. Resultaram os seguintes valores:

CP1 = 46 J

CP2 = 45 J

CP3 = 47 J

Média = 46 J

-Ensaios de dobramento:

Ensaios de dobramento da face e raiz foram realizados para as juntas 6, 7 e 8 com o dispositivo de dobramento regulado para qualificar soldas Tipo A, ou seja, punção com diâmetro de 50mm e espaçamento entre os suportes de 73mm, de acordo com a Norma AWS D3.6-89 /11/.

Destes ensaios os seguintes comentários podem ser feitos:

Junta 6 (Fig.96)

-Dobramento de raiz: não foram observadas trincas com um ângulo de dobramento de 180°.

-Dobramento de face: o corpo de prova fraturou com um ângulo inferior a 180° devido à falta de fusão entre o último passe e a parede do chanfro.

Junta 7 (Fig.97):

-Dobramento de raiz: foram observadas trincas menores que 3mm (5 no total) com um ângulo de dobramento de 180°.

-Dobramento de face: não foram observadas trincas com um ângulo de dobramento de 180°

Junta 8 (Fig.98)

Não foram observadas trincas no dobramento de face nem no de raiz.

e. Classificação das juntas de acordo com a Norma AWS D3.6:

Pelas análises das metalografias, ensaios radiográficos e mecânicos, desconsiderando-se as extremidades das juntas, pode-se fazer a classificação das juntas 6 e 7 de acordo com a Norma AWS D3.6.

-Junta 6:

Devido à maior incidência de poros observados no exame de raio X e, à fratura no dobramento de face, esta junta pode ser classificada como do Tipo B.

-Junta 7:

Pela quantidade e tamanho dos poros observados no exame radiográfico e pelos resultados dos ensaios mecânicos, esta junta foi classificada como do Tipo A.

Deve-se observar no entanto, que os valores de dureza Vickers são superiores ao máximo recomendado pela Norma (325 HV), tanto na junta 6 como na 7.

## 7. CONCLUSÕES:

De acordo com as análises dos resultados obtidos nos experimentos, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

1- O processo MIG/MAG de soldagem subaquática com cavidade local seca é capaz de produzir soldas livres de trincas, porosidades e falta de fusão. Para tanto, é necessário que a cavidade seca seja mantida estável, que não haja entrada de água pela raiz e que os parâmetros de soldagem sejam corretamente selecionados.

2- Para se conseguir uma cavidade seca estável, com uma vazão mínima de gás, é imprescindível um correto dimensionamento e utilização do bocal MIG/MAG de soldagem subaquática.

3- Verificou-se que, mantendo os mesmos parâmetros de soldagem, as soldas realizadas na água com este processo apresentam menor penetração que aquelas produzidas na superfície.

4- O processo é capaz de produzir soldas com as mesmas propriedades mecânicas estáticas que das soldas realizadas na superfície. Mas, devido às elevadas taxas de resfriamento, o valor máximo de dureza recomendado pela Norma é ultrapassado.

5- Algumas medidas foram pesquisadas e mostraram serem efetivas para reduzir a dureza do metal de solda, quais sejam: o aumento da energia de soldagem; a redução da velocidade de soldagem e o efeito do passe seguinte sobre o anterior em juntas

de múltiplos passes.

6- Das duas misturas comerciais de gases utilizadas na soldagem de juntas, a mistura com maior percentagem de CO<sub>2</sub> gerou um metal de solda com valores de dureza inferiores. No entanto, nos ensaios de dobramento, a junta com menor percentual de CO<sub>2</sub> apresentou melhores resultados.

## **8.SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS:**

1-Desenvolver técnicas para reduzir a entrada de água pela raiz da junta a ser soldada.

2-Utilizar uma fonte pulsada em substituição à convencional na soldagem subaquática com cavidade local seca.

3-Realizar soldas subaquáticas em outras posições que não a plana.

4-Desenvolver bocais de maiores diâmetros com o objetivo de reduzir a dureza da junta.

5-Realizar soldas, com este processo, em situações reais (fora de laboratório).



## 9. APÊNDICE:

### 9.1 REVISÃO DA NORMA AWS D3-6.89:

O Subcomitê AWS D3b /11/ para soldagem e corte subaquático reuniu-se pela primeira vez em 1975. O grupo foi formado em resposta ao desenvolvimento das técnicas de soldagem subaquáticas que proporcionavam suficiente qualidade das soldas para uma variedade de usos em estruturas "offshore". No entanto, a grande variação na qualidade destas soldas, tornava necessário a existência de um código formal que pudesse classificar e selecionar estas técnicas garantindo a qualidade das soldas.

O produto deste trabalho foi apresentado em 1980 no comitê para soldagem em construções marinhas-AWS.D3 /15/. Em 1983, foi publicada uma revisão (AWS D.3-83) com novas recomendações, adições e supressões. A publicação mais recente, a AWS D.3-6-89, publicada em 1989, veio suprimir a anterior.

As soldas realizadas sob a água podem ser classificadas quanto ao método básico de soldagem, como foi descrito anteriormente e quanto ao tipo ou qualidade das soldas/2,11,15,51,52/.

O tipo de solda especifica valores das propriedades requeridas, definidos por testes mecânicos, aparência da superfície e testes não destrutivos. A dureza e resistência mecânica têm valores bem diferentes das soldas obtidas na superfície.

Existe uma série de quatro tipos de soldas definidas para estabelecer um nível de severidade e propriedades requeridas, que

são os seguintes:

-Tipo A: Soldas subaquáticas utilizáveis em projeto de tensões compatíveis aos obtidos ao ar. São normalmente realizadas em câmaras secas.

-Tipo B: Soldas subaquáticas para aplicações menos críticas, onde baixa ductilidade, grandes porosidades e outras descontinuidades podem ser toleradas.

-Tipo C: Soldas subaquáticas para satisfazer requisitos menores que os dos Tipos A, B e O, onde aplicações estruturais não são importantes. Como exemplo na instalação de olhais, anodos de sacrifício, etc.. No entanto, devem ser livres de trincas, e sua aplicação não deve comprometer a integridade da estrutura primária através de criação de sítios de iniciação de trincas.

-Tipo O: Soldas subaquáticas que atendem requisitos das Normas ou especificações convencionais de soldas obtidas na superfície. São normalmente utilizadas em câmaras secas e aplicadas em trabalhos específicos.

As especificações para soldagem subaquáticas são aplicáveis em novas construções, modificações e reparos de estruturas sob a água.

Como o metal normalmente utilizado na construção de estruturas submarinas é aço carbono ou de baixa liga, os procedimentos de soldagem são baseados no carbono equivalente e resistência do metal base.

Os principais processos de interesse desta norma são o MIG/MAG, TIG, solda com fluxo, plasma e eletrodo revestido.

### 9.1.1.Execução e Técnica:

O eletrodo deve ser protegido para que suas propriedades não sejam afetadas. Procedimentos para estocagem e transporte devem ser previstos.

Pontos de corrosão e outras descontinuidades devem ser reparadas na preparação do metal base. As superfícies a serem soldadas e as adjacentes devem ser limpas.

O único requerimento para soldagem subaquática é uma Confirmação da Solda, consistindo na realização de uma solda no sítio de trabalho com um material de carbono equivalente similar, com espessura de 12.7mm e comprimento de 150 a 300mm, realizada na posição mais difícil.

O objetivo desta Confirmação é verificar se o sistema de soldagem está operando corretamente.

### 9.1.2.Exame visual:

-Tipo A: Não devem apresentar trincas, porosidade superficial ou inclusões de escória. A fusão deve ser completa e todas as crateras devem ser eliminadas. A penetração deve ser completa;

-Tipo B: Não devem apresentar trincas, a fusão e penetração devem ser completas e todas as crateras eliminadas. As porosidades isoladas não devem exceder 1.6mm em diâmetro e no conjunto devem ter no máximo 9.5mm em 25mm linear de solda;

-Tipo C: Exigências iguais às do Tipo B, exceto pelo reforço que não pode ultrapassar 20% da espessura do metal base e não tem restrições quanto à porosidade;

-Tipo O: Devem estar de acordo com a Norma escolhida.

### 9.1.3.Procedimento de qualificação:

O procedimento e o soldador devem estar qualificados para atenderem às especificações. O procedimento de soldagem deve ser qualificado através de testes no local ou em condições simuladas. Sendo assim, variáveis essenciais e não essenciais são listadas pela norma.

Uma mudança numa variável essencial deve ser acompanhada do desenvolvimento de procedimento específico/15/.

Alguns exemplos de variáveis essenciais, que refletem nos requerimentos de soldagem subaquática são: mudança no transporte e armazenamento dos eletrodos, troca no método de soldagem de seco para molhado e vice-versa, troca de gases de proteção, mudanças em qualquer tipo de barreira que restringe a entrada de água na região da solda, etc..

Variáveis não essenciais são: uma mudança na técnica de mergulho, presença ou não de correntes de água, mudança de água doce para salgada, etc..

O procedimento de qualificação começa com o conhecimento da composição química e carbono equivalente do metal base que podem ser obtidos pelos valores máximos da especificação do metal, análises químicas usando métodos padrões e dados históricos.

O carbono equivalente da qualificação não pode ser menor que o da produção. O carbono equivalente é uma boa maneira de predizer a soldabilidade de aços sob a água. As fórmulas selecionadas pela norma são:

$$CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (15)$$

$$CE = C + Mn/6 + 0.05 , \quad (16)$$

quando apenas o carbono e o manganês são conhecidos.

Considerações de profundidade na qual as soldas serão realizadas são as seguintes: a máxima profundidade permitida para

a produção das soldas não deve ultrapassar mais de 10m ou 20% do procedimento de qualificação. Para um grande intervalo de profundidade, deve-se fazer procedimentos para a menor e maior profundidades.

A posição de realização das soldas subaquáticas é uma variável essencial. As posições para soldagem em produção determinam a posição requerida para o procedimento de qualificação.

#### 9.1.4. Ensaaios mecânicos para as soldas:

Dependendo da espessura da chapa e do tipo de solda, os seguintes testes podem ser necessários: tração, dobramento, dureza Vickers e impacto Charpy.

-Requisitos para os resultado dos testes :

Devido ao rápido resfriamento das soldas realizadas em plena água e o efeito da têmpera, a dureza medida não deve ultrapassar 325 HV10 /11,53/.

Os valores dos testes de tração longitudinal, para as soldas do tipo A são os seguintes:

Tensão de escoamento	Alongamento mínimo
(MPa)	(%)
< 349	19
350 a 610	14
> 615	12

Os valores mais baixo e mais alto de um total de cinco testes Charpy são descartados. A temperatura mínima de realização dos testes deve ser a mínima prevista no projeto /37/. Os valores do teste Charpy para soldas tipo A são os seguintes:

Resistência à tração do metal base (MPa)	Charpy V média / mínimo (J)
< 485	20 / 14
486 a 550	27 / 19
551 a 690	34 / 23

Para os tipos A, B e O, após o teste de dobramento, o metal não deve apresentar trincas ou outros defeitos maiores que 3mm.

O único requerimento para soldas tipo C é a macrografia. Para soldas tipo O, além dos requisitos anteriores deve satisfazer aos determinados pela Norma específica.

A Norma AWS D3.6-89 especifica ainda, testes de qualificação para o soldador-mergulhador em condições simuladas ou no próprio local de trabalho e procedimentos de exame visual (testes não destrutivos) para as soldas produzidas. Os testes não destrutivos mais utilizados são: exame visual, radiografia, ultra-som e partículas magnéticas.

## 10. BIBLIOGRAFIA:

- 1 -NIXON, J., BILLINGHAN, J.A **Survey of Underwater Welding Techniques**, Endeavour, 11, (3): 143-148, 1987.
- 2 -CORIATT, G. **Hyperbaric Welding in the Repair of Offshore Pipelines and Structures**. Underwater Welding of Offshore Platforms and Pipelines. AWS Welding Technology Series, 1981.
- 3 -THOMAS, W.J.F. **Welded Subsea Structural Repairs in the North Sea**, Metal Construction, 18, (2): 85-89, Fev, 1986.
- 4 -GROVES, D. **Keeping it Economically Preventive Maintenance**. Underwater Welding of Offshore Platforms and Pipelines, AWS Welding Technology Series, 1981.
- 5 -MASUBUCHI et ali. **Technologies and Practices of Underwater Welding**. Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW: 49-70, 1983.
- 6 -DAWSON, G.W. e JUDSON, P. **Procedual Guidelines for the Achievement of Tough Welded Joints in Structural Steels for Offshore Applications**. Sec. Inter. Conf. Offshore Weld Structures, paper 2, The Welding Institute, London, 1982.
- 7 -PORTO, E.S. **Aplicações da Soldagem Hiperbárica na PETROBRÁS**, B. Téc. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 24(4): 227-236, out/dez, 1981
- 8 -SWAN, L.K. **The Navy's Direction in Underwater NDE**, Welding Journal, 69, (8): 67-69, Ago, 1990.
- 9 -WEST, T.C. et ali. **Wet Welding Electrode Evaluation for Ship Repair**, Welding Journal, 69(8): 46-56, Ago, 1990.
- 10 -O'SULLIVAN, J.E. **Wet underwater Weld Repair of Susquehauna Unit 1, Steam Dyer**, Welding Journal, 67(6): 19-23, Jun, 1988.
- 11 -ANSI/AWS D3.6-89-**Specification for Wnderwater Welding**. 1989.

- 12-AMIOT, P. **Comtrôle et Comportement en Service des Soudures Exécutées sous l'eau.** Underwater Welding-I Intern. Conf. IIW.: 95-112, 1983
- 13-COTTON, H. C. **Welding Underwater and in the Splash Zone-a Review.** Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW : 2-48 -1983.
- 14-DELAUNE, P. T. **Offshore Structural Repair Using Specification for Underwater Welding-AWS D3.6.** Welding Journal, 66(2): 32-43, Fev, 1987.
- 15-SILVA, E. A. **AWS-D3b Recommended Practices.** Underwater Welding of Offshore Platforms and Pipelines, AWS Welding Technology Series, 1981
- 16-BRIGGS, E. M. E ADLER, R. E. **Submerged One Atmosphere Welding system.** Underwater Welding of Offshore Platformes and Pipelines. AWS Welding Tecnology Series-1981.
- 17-DELAUNE, P. T. **Hyperbaric Underwater Welding-The State of the Art.** Welding Journal, 58(9): 17-25, Ago e 28-35, Set, 1979.
- 18-ALLUM, C. J. **TIG's Underwater Role: Present and Future.** Welding and Metal Fabrication, 50(4): 124-132, Abr, 1982.
- 19-KNAGENHJELM, H. O. **Development of Hyperbaric TIG Welding to 500m Waterdepth.** Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW, 173-199, 1983.
- 20-CORIATT, G. e ROGGEN, R. **Development of a new Welding Gun for Underwater Welding.** Anual Offshore Technology Conference, 1545-1552. 1979.
- 21-HAMASAKI, M. e SAKAKIBARA, J. **Underwater MIG Welding-High Pressure Chamber Experiments.** Metal Constr., 8((3): 108-112 , Mar, 1976.
- 22-\_\_\_\_\_ **Underwater MIG Welding Using a Wire Brush Nozzle.** Metal Constr., 11(6): 288-289, Jun, 1979.



- 23-\_\_\_\_\_ **MIG Welding Underwater.** Welding Design and Fabrication, Jun, 1976.
- 24-HOFFMEISTER, H. et al. **Effect of Pressure and Process Parameters on Weld Joint Properties of StE36 and StE47 Dry FCA-MAG Welds.** Underwater Welding-I Inter. Conf. IIW, 239-241, 1983.
- 25-\_\_\_\_\_ **Repair Welding of Tubular Structures by an Underwater Low Hydrogen Wet Fillet Weld System.** Welding of Tubular Structures, II IIW Inter. Conf.: 145-150, Jul, 1984.
- 26-\_\_\_\_\_ **Process Variables and Properties of Underwater Wet Shielded Metal Arc Laboratory Welds.** Underwater Welding. I Inter. Conf. IIW : 115-120, 1983.
- 27-\_\_\_\_\_ **Process Variables and Properties of Wet Underwater Gas Metal Arc Laboratory and Sea Welds of Medium Strength Steels.** Underwater Welding , I Inter. Conf.: 121-128, 1983.
- 28-\_\_\_\_\_ **Weld Joint Properties of Medium Strength Steels After Underwater Wet MIG-Welding by the Water Curtain Process.** II Inter. Conf. Offshore Weld Structures, paper 17, The Welding Institute, London, 1982.
- 29-ANDO, S e ASAHINA, T. **A Study on the Metallurgical Properties of Steel Welds With Underwater Gravity Welding.** Underwater Welding-I Intern. Conf. IIW.: 255-260, 1983.
- 30-TSAI, C.L. et al. **Development of New , Improved Techniques for Underwater Welding,** Report no. MITSG 77-9 , 1977.
- 31-HAMASAKI, M. e SAKAKIBARA, J. **Underwater Dry TIG Welding Using Wire Brush Nozzle.** Underwater Welding, I Inter.

- Conf. IIW: 139-146-1983.
- 32-CHRISTENSEN,N.**The Metallurgy of Underwater Welding.I**  
Inter. Conf. Underwater Welding IIW.: 71-94 -1983
- 33-OGDEN,D. e JOOS,T.**Specification Stirrs Underwater Electrode Development**,Welding Journal,69(8): 59-61-Ago,1990.
- 34-MASUBUCHI et ali.**Underwater Factors Affecting Welding Metallurgy**.Underwater Welding of Offshore Platforms and Pipelines,AWS Welding Technology Series,1981.
- 35-SADOWSKI,E.P.**Underwater Wet Welding-Mild Steel With Nickel Base and Stainless Steel Electrodes**.Welding Journal,69(8): 30-38, Juy,1980.
- 36-CHRISTENSEN,N.**The Metallurgy of MMA Hyperbaric Welding**.SINTEF Report no STF34F83032, Mar, 1983.
- 37-BOSWARD,J.G. e JOHN,R.**Trends in Manual Metal Arc Electrodes for High Toughness**.Intern.Conf.Trends in Steel and Consumables for Welding.The Welding Institute,London,paper 14,1978.
- 38-GRONG,O.,OLSON D.L. e CHRISTENSEN,N.**Carbon Oxidation in Hyperbaric MMA Welding**.Metal Construction, 17(12), 810R - 814R, Dez, 1985.
- 39-TSAI,C.L. e MASUBUCHI,K.**Interpretive Report on Underwater Welding**, Welding Research Council Bulletin-224, Fev, 1977.
- 40-GRANJON,H.**Cold Cracking in the Welding of Steels**.Welding in the World,9, 382-394,1971.
- 41-EASTERLING,K.**Introduction to the Physical Metallurgy of Welding**.Butterworths Monographs in Materials-1983.
- 42-CHANDIRAMANI,D.**Some Aspects of Bead Deposition in Underwater Gas Metal Arc Welding**.Welding Journal, 61(5): 35-38,

- Mai, 1982.
- 43-YARA, H. et al., **The TRC Test for Strength Steel in Wet Underwater Welding**, Transactions of the Japan Welding Society, 19, (1): 75-80, Abr, 1988.
- 44-COCHRANE, D.J. e SWETNAM, D. **Wet Welding-a Viable Technique?** Met. Constr., 18(11): 680-685, Nov. 1986.
- 45-BRINK, S.H. e BOLTJE, G.W. **Cold Cracking Susceptibility of Welds Obtained by Wet Underwater Welding.** I Intern. Conf. underwater Welding. IIW, 271-276, 1983.
- 46-NISHIGUSHI, K. et al. **Development of Underwater Welding With Local Cavity Formation Method.** Inter. Sumposium of the Japan Welding Society, Osaka, 315-320. Ago. 1975.
- 47-MATSUNAWA, A., NISHIGUCHI, K. e OHAMOTO, I. **Prediction of Cooling Rate and Hardness of Base Metal in the Underwater Welding by Local Cavity Process.** Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW, 263-270, 1983.
- 48-ANSI/AWS C5.6-89-**Recommended Practices for Gas Metal Arc Welding**, 1989.
- 49-GERHARDT, A. e JUNG, W. **Power Sources for Hiperbaric Underwater Arc Welding.** Metal Construction, 17(7): 440-442, Jul, 1985.
- 50-SHINADA, K. et al. **Development of Underwater Welding Techniques**, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 109-118, Jun, 1979.
- 51-FORLI, O. **Non-destructive Testing Underwater.** Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW, 199-206, 1983.
- 52-GRUBBS, C.E., BLUEM, M.F. e DELAUNE, P.T. **An Overview of "Specifications for Underwater Welding"-AWS D3-6.** Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW, 221-226, 1983.

53-YANAKA,K.,NAMATAME,Y. e SATO,M.**Underwater Nondestructive Testing and Underwater Repair Welding Technology for Offshore Structures**,Nippon Steel Technical Report no.36, 33-38, Jan, 1988.

54-OHMAE,T. et ali.**Practical Application of Locally Drying Underwater Welding for Steel Pipes**.Underwater Welding, I Inter. Conf. IIW, 333-340, 1983.