ESTUDO DA VARIAÇÃO DA POROSIDADE AO LONGO DO CORDÃO EM SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS

Ezequiel Caires Pereira Pessoa Abril de 2007 Ezequiel Caires Pereira Pessoa

ESTUDO DA POROSIDADE AO LONGO DO CORDÃO EM SOLDAS SUBAQUÁTICAS MOLHADAS

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação Orientador: Prof. Alexandre Queiroz Bracarense, PhD. Co-Orientador: Prof. Stephen Liu, PhD.

Belo Horizonte Escola de Engenharia da UFMG 2007

RESUMO

Em todo o mundo existem construções projetadas e executadas para atender as mais diversas necessidades da produção humana. Uma parcela significativa dessas estruturas está imersa em ambientes aquáticos, utilizadas principalmente pelas indústrias de gás e petróleo. Também chamadas de plataformas "offshore", tais estruturas são projetadas para suportar aos mais diversos tipos de danos, mantendo-se seguras para os operadores e para o meio ambiente por longos períodos (25 - 100 anos). Para tanto, é de suma importância que a manutenção e reparo de tais plataformas atenda as exigências da engenharia estrutural.

Devido ao ambiente no qual se encontram, o processo de reparo e manutenção tornase difícil, exigindo procedimentos especiais que vem sendo desenvolvidos e aplicados pela indústria petrolífera ao longo dos anos. Mesmo com a evolução alcançada, as técnicas de reparo implementadas não têm atendido as exigências das normas que as regem.

A soldagem molhada com eletrodo revestido (SMER) é o processo de reparo e manutenção que tende a apresentar o melhor custo-benefício porque apresenta vantagens em relação aos outros métodos disponíveis. Mesmo sendo aplicado com sucesso em algumas situações, esse processo apresenta problemas que ainda precisam ser resolvidos. Devido à influência da água, esse tipo de solda apresenta propriedades mecânicas inferiores às soldas feitas ao ar. A porosidade, por exemplo, aumenta com o aumento da profundidade e é mais difícil para o soldador/mergulhador produzir as soldas devido às condições impostas pelo ambiente.

Na tentativa de minimizar os problemas, várias alterações no processo vêm sendo testados como, soluções químicas, que estudam a aplicação de elementos especiais no revestimento do eletrodo, métodos operacionais e uso de equipamentos especiais.

A redução da porosidade em SMER é de vital importância para a evolução do processo de modo que as soldas sejam melhor classificadas e, conseqüentemente, aplicadas em situações de maior responsabilidade e não só em emergências ou reparos simples como é feito na maioria das vezes hoje em dia.

Estudos realizados em soldas feitas ao ar com eletrodos revestidos mostraram que ocorrem variações na composição química do metal de solda ao longo do cordão. Essas alterações foram relacionadas à mudança na transferência metálica durante a soldagem.

Com o objetivo de detectar variações na porosidade ao longo do cordão e prováveis relações com variação na transferência metálica e na composição química do metal de solda

iii

testou-se diferentes tipos de eletrodos (E6013 e E7018 comerciais e um eletrodo tubular revestido rutílico experimental), polaridades e juntas em profundidades simuladas de 50 e 100m. Os resultados mostraram que a porosidade é fortemente dependente do tipo de revestimento do eletrodo, da polaridade da corrente (para os eletrodos rutílicos) e que a mesma reduz ao longo do cordão de solda. A análise química do metal de solda e dos sinais de corrente e tensão revelou que essas variações na porosidade estão fortemente relacionadas à oxidação do carbono (formação de CO) e à ocorrência do modo de transferência metálica por curto-circuito. Além disso, observou-se que o eletrodo E6013 produz soldas molhadas com menor porosidade em relação às soldas feitas com o eletrodo E7018. Este trabalho também discute, de modo introdutório, a influência dos fatores que podem causar maior formação de CO no início do cordão em relação ao final do mesmo e propõe um modelo que relaciona esses fatores ao surgimento e variações da porosidade nas soldas molhadas.

Palavras-chave: soldagem subaquática molhada, eletrodo revestido, porosidade, transferência metálica, aquecimento do eletrodo, polaridade da corrente e eletrodo tubular revestido.

ABSTRACT

There are many constructions projected and executed to satisfy the most diverse necessities of the human production around the world. A significant parcel of these structures is immersed in aquatic environments, mainly used for gas and oil industries. These structures are projected to be resistant against innumerous types of damages. Thus, they should be safe to protect the operators and the environment for long time (25 - 100 years). Hence, it is of great importance that the maintenance and repair of such structures get towards with the structural engineering requirements.

Considering the environment in which they are, the repair and maintenance process becomes difficult, demanding special procedures that have been developed and applied for the petroliferous industry in the last years. Although with the reached evolution, the implemented repair techniques have not complied with the codes requirements.

Underwater wet welding (UWW) with coated electrode is the preferred process because it offers advantages over the other available methods. Although underwater wet welding has been successfully applied in some situations, there are problems that have not been solved yet. Due to the water influence, this type of weld presents lower mechanical properties than dry welds. Porosity increases as water depth increases; it is difficult for the welder/diver to produce welds due to the conditions imposed from the environment. To minimize these problems, some processes have been tested as, chemical solutions, the application of special elements in the electrode covering, operational methods and use of special equipment.

It is extremely important, for the evolution of the process, to reduce the porosity in this type of weld. Without porosity, underwater wet welds can be better classified and, therefore, applied in structural repairs and not only in emergencies or simply situations as are used actually.

Previous study accomplished in surface conditions using stick electrodes shown that weld metal chemical composition changes along the weld bead. This variation was related to metal transfer mode alterations during welding.

With the objective of detect changes in porosity along weld bead and make correlations with variations in metal transfer mode and weld metal chemical composition, it was tested different stick electrodes (commercial E6013 and E7018 and a experimental rutile tubular covered electrode), polarities and joints in simulated 50 and 100m water depths. The results shown that weld metal porosity is strongly dependent of electrode covering type,

v

current polarity (for rutile electrodes type) and it reduces along weld bead. Weld metal chemical analysis and current and voltage signal investigation revealed that these porosity variations are strongly related with carbon oxidation (CO formation) and with short circuiting metal transfer mode occurrence. Also, it was observed that E6013 electrodes produce less porosity in UWW than E7018. This work also discusses, in an introductory way, the factors that can produces higher CO formation at the beginning of the weld bead and proposes a model that makes correlations with this factors and porosity formation and variations in UWW.

Keywords: Underwater wet welding, coated electrode, porosity, metal transfer, electrode heating, current polarity and tubular covered electrode.

Aos meus preciosos pais, Aurélio e Senhorinha, por me amarem independentemente das minhas conquistas e realizações.

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu criador, amigo e mantenedor porque "...sem Ele nada do que foi feito se fez...". Aos meus pais, Aurélio e Senhorinha e irmãos, James, Georg, Margarete, Dalton e Mackaol pela formação, educação e espiritualidade.

A minha namorada Nathália e sua família pela compreensão, cuidado e carinho.

Ao Professor Alexandre Queiroz Bracarense pela oportunidade, dedicação para ensinar e liberdade para pensar.

Ao professor Stephen Liu pela oportunidade e acompanhamento durante o desenvolvimento desse trabalho aqui no Brasil e também nos Estados Unidos.

A Faustino Péres Guerrero pelo companheirismo e confiança.

Ao Senhores Charles Smith e Michael Else pela confiança no desenvolvimento da parceria UFMG - Colorado School of Mines.

Aos colegas do LRSS, Eduardo José, Carlos Castro, Eduardo Zica, Alexandre Rizzuto, Ivanilza Felizardo, Guilherme Marconi, Guilherme Fortunato e Daisy.

Ao Diretor do Departamento de Engenharia Mecânica e à Coordenação do Curso de Pósgraduação da UFMG.

A Usiminas, especialmente, Sr. diretor Idalino, Eng. Marco Fantini e amiga Ione Melo pelo interesse e participação.

A DELP engenharia Ltda.

Aos Professores e colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.

A Gerson Melo, Sergio Viana, Nelson Miguel, Volney Rodrigues, João Machado, Carlos Correa, Antônio Godoy, Hilma Bettoni e respectivos familiares pela amizade.

A ESAB-Brasil pelo fornecimento de material e eletrodos em especial ao engenheiro Leonardo Augusto.

Aos Funcionários do CDTN, Roberto Francisco di Lorenzo e Geraldo Scoralick.

viii

Ao CNPq e a CAPES pelo suporte financeiro.

e a todos que colaboraram para que esse trabalho fosse feito.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XX
LISTA DE EQUAÇÕES	XXI
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO	
1.1 – Novidade desta Investigação 1.2 – Objetivo	23 23
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
 2.1 - PROCESSOS PARA SOLDAGEM SUBAQUÁTICA MOLHADA	25 26 28 31 33 36 48 57 60 61 70 72 73
2.7.5 - Eletrodos Tubulares Revestidos	
 3.1 – ESTUDO FEITO COM CORDÕES SOBRE CHAPA 3.1.1 – Material Utilizado 3.1.2 - Equipamento Utilizado. 3.1.3 – Procedimento Experimental 3.2 – ESTUDO FEITO COM CORDÕES EM CHANFRO 3.2.1 - Tipo de Corpo de Prova 3.2.2 – Tipo de Consumível 3.2.3 – Procedimento Experimental 	79 79 79
3.3 – Estudo das Variáveis e Características que Podem se Alterar Dur	rante a Soldagem
MOLHADA 3.3.1 – Análise da Temperatura do Eletrodo Durante a Soldagem	90 91

3.3.2 - Análise da Temperatura da Chapa Durante a Soldagem Molhada	
3.4 – Testes Feitos com Eletrodos Tubulares Revestidos	94
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1 – Testes com Cordão Sobre Chapa	96
4.1.1 - Inspeção Visual	
4.1.2 – Geometria do Cordão de Solda	
4.1.3 – Porosidade no Metal de Solda	
4.1.4 – Análise dos Sinais de Corrente e Tensão	
4.1.5 – Análise Química do Metal de Solda	116
4.2 – Soldagem em Chanfro	118
4.2.1 – Inspeção Visual	118
4.2.2 – Análise Radiográfica e Macrográfica	119
4.2.3 – Porosidade ao Longo da Solda	
4.2.4 – Ensaios Mecânicos	
4.2.5 – Análise dos Sinais de Corrente e Tensão	
4.2.6 – Análise Química do Metal de Solda	127
4.3 – Estudo das Variáveis e Características que Podem se Alterar Duran	ite a Soldagem
Molhada	128
4.3.1 - Variação da Temperatura do Eletrodo Durante a Soldagem	
4.3.2 – Alteração na Taxa de Fusão do Eletrodo	
4.3.3 – Alteração no Tamanho das Gotas Metálicas	
4.3.4 – Influência do Teor de Umidade do Revestimento na Soldagem Molhada	
4.3.5 – Realização de Soldas com o Eletrodo Pré-Aquecido	
4.3.6 - Variação da Temperatura da Chapa Durante a Soldagem	135
4.3.7 – Influência do Dispositivo de Soldagem por Gravidade	137
4.4 – Testes Feitos com Eletrodos Tubulares Revestidos	139
4.4.1 - Soldas Feitas com Eletrodos Tubulares Revestidos com Adição de Alumínio	
4.5 – MODELO DO COMPORTAMENTO DO ELETRODO DURANTE A SOLDAGEM MOLHADA	142
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Faixa tensão-corrente para diferentes profundidades (1 Bar = 10 m de coluna
d'água) (IBARRA et al, 1994)26
Figura 2.2 - Esquema mostrando o processo de soldagem com eletrodo revestido
(BRACARENSE, 1994)
Figura 2.3 - Desenho esquemático mostrando o mecanismo de transferência de hidrogênio
para o metal de solda para as duas polaridades em corrente contínua (MEDEIROS, 1997)
Figura 2.4 - Desenho esquemático mostrando o efeito da polaridade na geometria do cordão
de solda e no comprimento do arco baseado no modelo proposto por TSAI e
MASUBUCHI (1977)
Figura 2.5 - Variação do teor de oxigênio ao longo do cordão em soldas feitas ao ar para o
eletrodo E7018 (BRACARENSE, 1994)
Figura 2.6 - Variação do teor de oxigênio ao longo do comprimento de cordões de solda
depositados com eletrodos do tipo B (20% de Fe ₂ O ₃ no revestimento) e eletrodos do tipo
E (20% de Fe ₂ O ₃ + 10% de MgO no revestimento) POPE (1995)
Figura 2.7 - Variação do teor de oxigênio no metal de solda com a profundidade (IBARRA et
al, 1994)
Figura 2.8 - Diagrama de equilíbrio ferro-oxigênio (VAN VLACK, 1977)
Figura 2.9 - Efeito da profundidade sobre o teor de manganês e silício no metal de solda
(IBARRA et al, 1994)
(IBARRA et al, 1994)
 (IBARRA et al, 1994)

Figura 2.16 – Relação entre os teores de elemento de liga e oxigênio no metal de solda de aço
carbono (SATO E KUWANA, 1995)
Figura 2.17 - Solubilidade do hidrogênio no ferro em função da temperatura (GRONG, 1997)
Figura 2.18 – Efeito da pressão hidrostática sobre a porosidade (SUGA e HASUÍ, 1986)51
Figura 2.19 - Efeito da adição de Caco3 sobre a porosidade em juntas soldadas a profundidade
de 10 m, (SANCHEZ-OSIO et al, 1993)53
Figura 2.20 – Efeito da basicidade da escória na porosidade do metal de solda (ROWE, 1999)
Figura 2.21 – Porosidade como função da profundidade e da adição de ferrro-manganês ao
revestimento de eletrodos rutílicos (ROWE et al, 2002)55
Figura 2.22 - Porosidade como função da profundidade e da adição de titânio e boro ao revestimento (ROWE et al, 2002)
Figura 2.23 - Porosidade como função da profundidade e da adição de terras raras (REM) ao
revestimento (ROWE et al, 2002)
Figura 2.24 - Forças envolvidas na transferência do metal durante a soldagem por eletrodos
revestidos (BRANDI et al, 1991)
Figura 2.25 - Variação da corrente no tempo durante soldagem GMAW em aço carbono
mostrando a transição de globular para spray (~8s) com o aumento da corrente (ASM
HANDBOOK, 1993)
Figura 2.26 - Spectro de potência para transferência globular e spray durante soldagem
GMAW em aço carbono (ASM HANDBOOK, 1993)65
Figura 2.27 - Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por LARSON (1942) 67
Figura 2.28 - Macrografia da ponta do eletrodo e do cone formado pelo revestimento
mostrando o poro no interior da gota metálica (BRANDI et al,1991)68
Figura 2.29 - Seção transversal com os valores de porosidade média de gotas coletadas
durante a soldagem ao ar com corrente de (a) 90 A e (b) 140 A (PEREZ e LIU, 2006).69
Figura 2.30 - Modelo mostrando o surgimento de forças compressivas na gota causadas pelo
fluxo metálico, pressão de vapor metálico (Fj) e pelo efeito pinch (Fc) (BRANDI et
al,1991)70
Figura 2.31 - Variação do teor de hidrogênio no metal de solda para eletrodos básicos,
rutílicos e oxidantes (GOOCH, 1983)71
Figura 2.32 – Variação da energia de impacto Charpy V a 0º C e do teor de oxigênio no metal
de solda em função do teor de níquel (POPE et al, 1995a)74

Figura 2.33 – Seção transversal de um eletrodo tubular revestido (PESSOA, 2006)77
Figura 3.1 - Corpo de prova para solda sobre chapa, cotas em mm
Figura 3.2 – Fotografia da câmara para soldagem hiperbárica
Figura 3.3 – Dispositivo de soldagem por gravidade
Figura $3.4 - \hat{A}$ ngulos e componentes do dispositivo de soldagem por gravidade84
Figura 3.5 – Esquema do sistema de aquisição de dados
Figura 3.6 – Metodologia para retirada das amostras nos testes de deposição sobre chapa 86
Figura 3.7 – Desenho esquemático do corpo de prova utilizado para a produção das soldas nos
testes com soldas em chanfro
Figura 3.8 – Metodologia de retirada das amostras da chapa soldada
Figura 3.9 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de dobramento
Figura 3.10 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio charpy "sub size"
Figura 3.11 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração90
Figura 3.12 - Características do eletrodo que podem ser alteradas durante a soldagem e suas
respectivas influências sobre o processo91
Figura 3.13 – União por soldagem dos fios do termopar tipo K92
Figura 3.14 - Eletrodo revestido E6013 alterado para realização do pré-aquecimento e
mapeamento da temperatura durante a soldagem92
Figura 3.15 – Posição dos termopares na chapa, cotas em mm93
Figura 3.16 - Esquema mostrando a distância (d) entre a poça de fusão e o ponto de fixação do
termopar
Figura 3.17 - Mecanismo vibratório utilizado para encher os eletrodos tubulares com os fluxos
internos94
Figura 3.18 – Dispositivo de soldagem por gravidade (a) e vaso de pressão (b) utilizados no
CWJCR na CSM
Figura 4.1 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 50 m de profundidade em DCEP
(a) e DCEN (b), direção de soldagem da esquerda para a direita97
Figura 4.2 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 100 m de profundidade em DCEP
(a) e DCEN (B), direção de soldagem da esquerda para a direita97
Figura 4.3 - Cordões de solda feitos com eletrodo E7018 em aço A-36 a 50 m em DCEP (a) e
DCEN (B), direção de soldagem da esquerda para a direita97
Figura 4.4 - Cordões de solda feitos com eletrodo E7018 a 100 m em DCEP (a) e DCEN (B),
direção de soldagem da esquerda para a direita
Figura 4.5 – Metodologia para medição dos parâmetros geométricos do cordão de solda98

Figura 4.6 - Macrografías de cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 50 m em aço A-36
com polaridade DCEP (a) e DCEN (b)101
Figura 4.7 - Macrografias de cordões de solda feitos com eletrodo E7018 a 50 m com
polaridade DCEP (a) e DCEN (b)
Figura 4.8 - Porosidade do metal de solda em função do tipo de eletrodo, polaridade e
profundidade102
Figura 4.9 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 50 m em
DCEP103
Figura 4.10 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 50 m
em DCEN
Figura 4.11 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 100 m
em DCEP
Figura 4.12 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 100 m
em DCEN
Figura 4.13- Porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e
100m
Figura 4.14 - Porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo E7018 a 50 e
100m
Figura 4.15 - Sinais de tensão adquiridos durante a realização de soldas a 50 metros para os
eletrodos E6013 em DCEP (a), DCEN (b) e E7018 em DCEP (c) e DCEN (d)108
Figura 4.16 - Sinais de tensão adquiridos durante a realização de soldas a 100 metros para os
eletrodos E6013 em DCEP (a), DCEN (b) e E7018 em DCEP (c) e DCEN (d)109
Figura 4.17 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a
50m em DCEP
Figura 4.18 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a
50m em DCEN
Figura 4.19 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E7018 a
50m em DCEP
Figura 4.20 - Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E7018 a
50m em DCEN
Figura 4.21 - Variação da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para as soldas feitas com
o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade112
Figura 4.22 – Desvio padrão da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para soldas feitas
com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade113

Figura 4.23 - Número de curtos circuitos ao longo do cordão para as soldas feitas com o
eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade (* número de vezes em que a tensão foi
inferior a 10 volts no intervalo medido)113
Figura 4.24 - Variação da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para as soldas feitas com
o eletrodo E7018 a 50 e 100 m de profundidade115
Figura 4.25 - Desvio padrão da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para soldas feitas
com o eletrodo E7018 a 50 e 100 m de profundidade115
Figura 4.26 - Número de curtos circuitos ao longo do cordão para as soldas feitas com o
eletrodo E7018 a 50 e 100 m de profundidade (* número de vezes em que a tensão foi
inferior a 10 volts no intervalo medido)116
Figura 4.27 - Variação do teor de carbono no metal de solda ao longo do cordão em soldas
feitas com o eletrodo E6013 a 50m de profundidade117
Figura 4.28 - Variação do teor de carbono no metal de solda ao longo do cordão em soldas
feitas com o eletrodo E6013 a 100 m de profundidade118
Figura 4.29 - Cordão de solda feito com eletrodo E6013 a 50 m de profundidade em DCEP
em A-36, direção de soldagem da esquerda para a direita
Figura 4.30 – Radiografia de solda feita a 50 metros em aço A-36 com eletrodo E6013 119
Figura 4.31 – Radiografia de solda feita a 100 metros em aço A-36 com eletrodo E6013120
Figura 4.32 - Macrografias de soldas feitos com eletrodo E6013 a (a) 50 e a (b) 100 m em aço
A-36
Figura 4.33 - Variação da porosidade ao longo de soldas feitas a 50 e a 100 m de
profundidade121
Figura 4.34 - Resultados para carga máxima no ensaio de dobramento lateral em soldas feitas
a 50 e 100 metros
Figura 4.35 - Tensão de ruptura em MPa no ensaio de tração em soldas feitas a 50 e 100
metros
Figura 4.36 - Energia absorvida no ensaio Charpy em soldas feitas a 50 e 100 metros de
profundidade123
Figura 4.37 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a
50m em DCEP
Figura 4.38 - Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a
100m em DCEP
Figura 4.39 - Variação da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para as soldas feitas com
o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade126

Figura 4.40 - Desvio padrão da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para soldas feitas
com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade127
Figura 4.41 - Número de curtos circuitos ao longo do cordão para as soldas feitas com o
eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade (* número de vezes em que a tensão foi
inferior a 10 volts no intervalo medido)127
Figura 4.42 – Teor de carbono ao início e final das soldas feitas em chanfro a 50 e 100 metros
de profundidade
Figura 4.43 - Variação da temperatura dos eletrodos E6013 e E7018 durante a soldagem
subaquática molhada
Figura 4.44 - Parte final de eletrodos E6013 utilizados em soldas feitas a 50 m de
profundidade onde se pode observar a presença de bolhas entre o revestimento e o verniz
Figura 4.45 - Variação da temperatura de eletrodos E6013 em soldas molhadas realizadas
com e sem pré-aquecimento
Figura 4.46 - Variação da porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo
E6013 pré-aquecido a 50 m de profundidade134
Figura 4.47 - Variação do teor de carbono ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo
E6013 pré-aquecido a 50 m de profundidade134
Figura 4.48 - Ciclos térmicos em pontos localizados à 3,0 mm da superfície da chapa para
solda feita com 180 Ampéres de corrente
Figura 4.49 - Ciclos térmicos em pontos localizados à 5,0 mm da superfície da chapa para
solda feita com 180 Ampéres de corrente136
Figura 4.50 - Dispositivo de soldagem por gravidade e eletrodo revestido mostrando a flexão
do eletrodo
Figura 4.51 - Oscilograma de corrente e tesão de uma solda feita com eletrodo E6013 com
175 mm de comprimento a 50 m de profundidade em DCEP139
Figura 4.52 - Variação da porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo
tubular revestido E6013 com e sem adição de alumínio ao fluxo interno a 50 m de
profundidade141
Figura 4.53 - Variação do teor de carbono ao longo do cordão em soldas feitas com o eletrodo
tubular revestido E6013 com e sem adição de alumínio ao fluxo interno a 50 m de
profundidade141

- Figura 4.55 Relação entre a quantidade de carbono oxidado e o volume da bolha de CO formada no interior de gotas metálicas de aço com 0,05% de carbono (PEREZ, 2007) 146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos modos de transferência Metálica de acordo com o IIW (IIV	W,
1977)	63
Tabela 3.1 - Composição química do aço e da alma dos eletrodos utilizados nos testes co	om
cordão sobre chapa	79
Tabela 3.2 – Formulação típica de eletrodos comerciais E6013 e E7018	80
Tabela 3.3 - Valores de corrente aplicados para os testes a 50 e 100 metros em ampères	86
Tabela 3.5 – Composição química dos dois eletrodos tubulares revestidos testados	95
Tabela 4.1 - Parâmetros geométricos dos cordões de solda feitos a 50 e 100m	99
Tabela 4.2 - Variação dos parâmetros de soldagem para os eletrodos E6013 e E7018 e	em
valores médios1	00
Tabela 4.3 – Valores de S para os testes realizados a 50 e 100 metros	06
Tabela 4.5 – Tempo de resfriamento para as soldas molhadas1	37

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ΔT _{8/5} P ₂	Tempo o Pressão	decorrido para a temperatura reduzir de 800 para 500 atmosférica	°C
Ph	Pressão hidrostática		
Ph	Aument	o da pressão devido à curvatura do poro.	
S	Estabilio	lade do arco	
Imax	Valor m	áximo de corrente	Α
Imin	Valor m	ínimo de corrente	А
I _{rms}	Raiz qua	adrada da média aritmética dos quadrados da corrente instantânea	А
	de solda	gem.	
U _{rms}	Raiz qua	adrada da média aritmética dos quadrados da tensão instantânea	Α
	do arco.	-	
$\overline{I_1}$	Corrente	e média de reignição do arco.	А
$\overline{\overline{U_1}}$	Tensão	média de reignição do arco.	V
$\overline{U_1}$	Tensão	média de reignição do arco.	V
CTT 1			
GIA	W	Gas lungsten Arc Welding	
SMA	W	Shielded Metal Arc Welding	
DCE	N	Direct Current Electrode Negative	
DCE	P	Direct Current Electrode Positive	
KEM		lerras raras	
C.E.		Carbono equivalente	
		Zona termicamente afetada	
MEV		Microscopio Eletronico de Varredura	
m		metros	
S	D	Segundos Saldagam Malhada agm Elatrada Devegtida	
SIVIE.	ĸ	Dispositivo do Soldozom por Crovidado	
DSC	Л	American Society for Testing Meterials	
ASII	VI	Eletrada tubular revertida com 100% de fluve interna composte por pé de	
Б		Eletrodo tubular revestido com 100% do fluxo interno composto por po de	
Г		Eletrada tubular revestida com da fluva interna composta por 90% da pá de	
Λ1		Eletrodo tubular revestido com do nuxo interno composto por 50% de po de	ر د
AI		Eletrodo tubular revestido com do fluvo interno composto por 80% de pó de	2
Δ2		ferro e 20% de nó de alumínio	
112		Eletrodo tubular revestido com do fluvo interno composto por 50% de pó de	2
Δ5		ferro e 50% de nó de alumínio	<i>.</i>
SM		Soldagem molhada	
0111		Soluagen monada	

LISTA DE EQUAÇÕES

$P_g > P_a + P_h + P_b$	Equação 2.1 48
$P_b = \frac{2y}{r}$	Equação 2.2 48
$V_{ld} = V_{am} = \frac{E}{\rho_{H2O} \cdot g};$	Equação 2.357
$\rho_{am} = \frac{P_{ar}}{V_{am}};$	Equação 2.4 57
$V\upsilon = \frac{\rho_{amperf} - \rho_{am}}{\rho_{amperf}} \times 100$	Equação 2.5 58
$S = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$	Equação 2.6 61

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A soldagem molhada com eletrodo revestido tem sua principal aplicação em reparos de estruturas, utilizadas principalmente na indústria naval, de exploração de gás e petróleo e, mais recentemente, em alguns componentes de usinas hidrelétricas. Este tipo de soldagem pode ser considerada uma técnica econômica e confiável para reparos e reforço estrutural subaquático devido ao baixo custo, simplicidade do equipamento, facilidade de aplicação e mobilidade. Para tanto, procedimentos especiais de soldagem e eletrodos especialmente projetados precisam ser aplicados. Pesquisas têm sido feitas com o objetivo de resolver os problemas inerentes da soldagem molhada: porosidade excessiva, propriedades mecânicas inferiores às das soldas ao ar e grande quantidade de hidrogênio no metal de solda. Com isso eletrodos com formulações especiais têm surgido, além de máquinas e equipamentos especiais. Devido a essa evolução, a soldagem molhada tem sido aplicada com sucesso no reparo de plataformas no Golfo do México e no Mar do Norte.

Técnicas como a utilização do passe de revenimento e a aplicação de teores corretos de níquel ao revestimento dos eletrodos basicamente atacam os problemas de fissuração por hidrogênio e redução das propriedades mecânicas, respectivamente. Porém, a porosidade do metal de solda continua sendo um fator redutor da qualidade do material depositado, com eletrodo revestido, em ambiente aquático a grandes profundidades. Ultimamente tem se investido na utilização de elementos especiais ao revestimento dos eletrodos com o objetivo de reduzir a porosidade do metal de soldas subaquáticas. Cada fabricante de eletrodo ou empresa de manutenção formula seu próprio revestimento de eletrodo e guarda cuidadosamente sua fórmula específica, de maneira que não se encontra na literatura uma formulação de um fluxo para o revestimento dos eletrodos comerciais, como o E6013, devido ao fato de, apesar de todos os estudos desenvolvidos, as novas formulações não apresentarem grandes vantagens em relação ao nível de porosidade, propriedades mecânicas e operacionalidade.

Tem-se, dessa maneira, um campo aberto para a investigação de fenômenos que podem ser controlados e inseridos no processo de soldagem, objetivando a redução da porosidade das soldas subaquáticas molhadas.

1.1 – Novidade desta Investigação

Resultados obtidos durante testes em cordão sobre chapa, desenvolvidos durante o mestrado defendido por este autor em junho de 2003, indicaram que a porosidade em soldas molhadas não é uniformemente distribuída ao longo do cordão. Além disso, os eletrodos rutílicos produziram menor porosidade no metal de solda que os eletrodos básicos utilizados no trabalho e a porosidade dos eletrodos rutílicos foi muito dependente da polaridade da corrente aplicada. A porosidade produzida por eletrodos rutílicos foi maior em polaridade direta (DCEN) e diminuiu ao longo do cordão de solda para os dois tipos de eletrodos utilizados.

A motivação desse trabalho, que e uma continuação natural do trabalho desenvolvido no mestrado, foi avaliar e explicar as causas da não uniformidade de distribuição de porosidade ao longo do cordão de solda e também entender porque essa foi maior em polaridade direta.

A mudança da polaridade produz alterações na direção de movimento dos elétrons no arco e, conseqüentemente, na distribuição do calor entre o eletrodo e o metal de base. Entre as alterações sofridas pelo eletrodo revestido durante a soldagem está o aumento da temperatura que pode causar mudanças na transferência metálica, na taxa de fusão do eletrodo e na composição química do revestimento.

O resultado esperado para essa investigação foi, basicamente, relacionar cada um desses parâmetros com a formação da porosidade em soldas molhadas de modo que seja possível alterar o processo de formulação de eletrodos e evitar o surgimento de poros ou, pelo menos, tornar a porosidade constante ao longo do cordão de solda.

1.2 – Objetivo

Este trabalho tem como objetivo entender o surgimento e o comportamento da porosidade no metal de solda ao longo do cordão de soldas subaquáticas molhadas. O ponto de partida foi investigar se alterações no modo de transferência metálica, que levam à variações na composição química de soldas feitas ao ar, têm algum tipo de influência na porosidade de soldas molhadas. Para isso, estudou-se a influência de parâmetros como profundidade simulada de soldagem, tipo de revestimento e temperatura do eletrodo, polaridade da corrente e adição de elementos com energia de formação de seus óxidos inferior

ao carbono em diferentes níveis e correlacionou-se com análise do sinais de corrente e tensão e composição química do metal de solda.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Processos para Soldagem Subaquática Molhada

A soldagem subaquática pode ser subdividida em duas categorias: a soldagem hiperbárica e a soldagem molhada (TEICHMANN, 2000; MAZZAFERRO, 1998; ANDRADE, 1995).

Soldagem hiperbárica é um método no qual a região a ser soldada é envolvida por uma câmara hiperbárica. A câmara, cujo fundo é aberto, acopla-se inicialmente à peça a ser soldada e a água é expulsa através da injeção de um gás especial. Esse método de soldagem subaquática permite obter juntas soldadas com propriedades mecânicas comparáveis às soldas realizadas na pressão atmosférica, desde que os parâmetros de soldagem sejam ajustados à pressão no local do reparo. Como a câmara é aberta na sua parte inferior, a pressão interna é igual à externa, ou seja, igual à pressão da coluna d'água no local da soldagem.

Soldagem molhada (SM) é um método no qual a junta a ser soldada está em contato direto com a água.

Processos como soldagem por fricção e a arco elétrico com arames tubulares (FCAW) têm sido aplicados em SM, mas ainda dependem de solução para alguns problemas que surgem na adaptação dos equipamentos ao ambiente aquático. Alguns aspectos como a dificuldade com geometrias mais complexas, rigidez e tamanho do equipamento (no caso da soldagem por fricção) e dificuldades em promover a impermeabilização do tubo condutor do arame (no caso da soldagem com arames tubulares) apresentam limitações para esses processos (ROWE e LIU, 2001; TEICHMANN, 2000).

Devido a essas dificuldades e necessidades de desenvolvimento dos outros métodos, o principal processo aplicado na soldagem subaquática molhada ainda é o com eletrodos revestidos (SMAW) (GRUBBS, 1996). As vantagens que justificam a preferência por esse processo são a simplicidade do equipamento (fonte de energia, cabos, porta-eletrodo e eletrodos impermeabilizados), baixo custo, mobilidade, fácil uso e rapidez de reparo que permitem sua aplicação em locais de clima instável (é o processo mais independente do clima) (WERNICKE e POHL, 1998).

Com o aumento da profundidade ou pressão, fontes de energia mais potentes são requeridas para a abertura e manutenção do arco elétrico e, também, a faixa tensão-corrente na qual se pode produzir soldas molhadas aceitáveis (com estabilidade do arco que permita a

realização de uma solda que possa ser classificada segunda uma norma internacional, como por exemplo AWS D3.6M (1999)) diminui, como mostrado na Figura 2.1.



Figura 2.1- Faixa tensão-corrente para diferentes profundidades (1 Bar = 10 m de coluna d'água) (IBARRA et al, 1994)

2.1.1 – O Processo de Soldagem com Eletrodos Revestidos

O processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW) é simples e versátil e está mostrado esquematicamente na Figura 2.2. O arco elétrico, aberto entre a ponta do eletrodo revestido e o metal de base, produz calor suficiente para promover a fusão do consumível e de parte da junta a ser soldada. As partes metálica e não metálica do eletrodo são transferidos no estado líquido na forma de gotas para o metal de base onde formam a poça de fusão. As interações que determinarão a composição química final do metal de solda ocorrem durante a formação e transferência das gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão e também durante o resfriamento e solidificação da mesma. O processo é controlado por meio da seleção

dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem e ângulo do eletrodo), da composição química do revestimento, da alma e do metal de base e da temperatura da peça antes, durante e após a soldagem.



Figura 2.2 - Esquema mostrando o processo de soldagem com eletrodo revestido (BRACARENSE, 1994)

2.2 - Efeito da Polaridade na Soldagem Molhada

O eletrodo pode ser ligado ao pólo negativo ou ao pólo positivo da fonte de soldagem. Muitos autores (IBARRA et al, 1994), (SUGA, 1990), (SUGA e HASUI, 1986), (WATSON et al, 1994), (POPE et al, 1995), (SILVA e HAZLETT, 1971) afirmaram que, de modo qualitativo, a polaridade direta (DCEN) (eletrodo negativo) produz melhores resultados que a polaridade inversa (DCEP) (eletrodo positivo).

MEDEIROS (1997) estudou a influência da polaridade sobre a quantidade de hidrogênio aprisionado no metal de soldas subaquáticas feitas com eletrodos com fluxo apresentando diferentes proporções de $Fe_2O_3 - CaCO_3 - SiO_2$. A profundidade de soldagem foi de 0,27 m em água doce e relatou-se que as soldas feitas em DCEN apresentam menores teores de hidrogênio difusível do que soldas feitas em DCEP. Além disso, foi demonstrado que a transferência de hidrogênio da escória e da bolha de gás que envolve o arco para o metal de solda ocorre na poça de fusão para polaridade inversa (DCEP) e na gota, durante seu crescimento na ponta do eletrodo, em polaridade direta (DCEN), como mostrado no modelo da Figura 2.3.



a – alma; b- revestimento; c – ponta líquida do eletrodo; d – escória fundida; e – arco; f – metal de base
Figura 2.3 – Desenho esquemático mostrando o mecanismo de transferência de hidrogênio para o metal de solda para as duas polaridades em corrente contínua (MEDEIROS, 1997)

GRUBBS et al (1996) afirmaram, baseados no depoimento de soldadores, que, em algumas situações ou posições geográficas, a polaridade inversa produz melhores resultados do que a polaridade direta. Por exemplo, em soldas realizadas no mar do Norte, a polaridade inversa (DCEP) produziu soldas com menor quantidade de poros. Outro autor (GOOCH, 1983) afirmou não ter observado diferenças quanto à polaridade. Em geral a maioria dos autores fazem observações quanto à influência da porosidade sobre o processo sem citar avaliações quantitativas que justifiquem essas afirmações.

TSAI e MASUBUCHI (1977), referindo-se à soldagem subaquática molhada, afirmaram que DCEP produz melhores soldas apesar de promover maior desgaste do alicate e dos outros contatos elétricos do circuito. Além disso, esses autores explicaram que a geometria do cordão de solda e o comprimento do cone formado pelo revestimento do eletrodo durante a soldagem estão relacionados à polaridade da corrente aplicada, como mostrado no esquema da Figura 2.4. Nesse esquema é possível observar que em polaridade direta (DCEN) o catodo será o eletrodo e o anodo o metal de base. Nessa condição, os elétrons irão bombardear o metal de base e o calor produzido pelo arco estará direcionado para a poça de fusão. O resultado será um cordão de solda mais estreito e com maior penetração e um cone formado pelo revestimento do eletrodo menor em comparação com as soldas feitas com eletrodo positivo. Quando a corrente aplicada é inversa (DCEP), o calor será direcionado para a ponta do eletrodo provocando assim uma maior taxa de fusão da alma, maior comprimento do cone formado pelo revestimento e um cordão de solda mais largo e com menor penetração em relação às soldas feitas com eletrodo negativo. Esses mesmos autores citaram que, em geral e referindo-se ao calor gerado no arco elétrico, 80% é direcionado para o anodo, 15% é removido do arco por meio dos gases gerados pelo fluxo do revestimento e 5% é direcionado para o catodo.

Em mecanismos de soldagem por gravidade a ponta do eletrodo sempre toca a peça de trabalho o que faz com que se espere um comprimento de arco menor para soldas feitas com eletrodo negativo em relação às soldas feitas com eletrodo positivo. O maior comprimento de arco reduz a possibilidade de ocorrência de curto-circuito e aumenta a possibilidade de aprisionamento de hidrogênio nas gotas durante sua formação e transferência dentro do arco elétrico (POPE, 1995). Da mesma forma, um arco mais comprido faz com que o tempo de exposição do metal líquido à atmosfera do arco seja maior, para o caso de mesma freqüência na transferência das gotas metálicas.

29

A divergência quanto a melhor polaridade a ser utilizada pode estar relacionada a fatores como a composição química do revestimento dos eletrodos e temperatura das águas dos mares. Além disso, vários autores usaram eletrodos revestidos de composição química diferentes e nem sempre conhecidas de modo que é difícil concluir qual é a polaridade mais indicada. Uma vez que a polaridade influencia diretamente o comprimento de arco, a taxa de fusão do eletrodo e a quantidade de hidrogênio difusível no metal de base, espera-se que o nível de porosidade das soldas molhadas seja afetado pela polaridade da corrente aplicada.

Corrente alternada (AC) nunca deve ser utilizada na soldagem molhada; isso pode ser fatal para o soldador devido ao alto risco de choque elétrico (GRUBBS et al, 1996).



Figura 2.4 – Desenho esquemático mostrando o efeito da polaridade na geometria do cordão de solda e no comprimento do arco baseado no modelo proposto por TSAI e MASUBUCHI (1977)

2.3 – Efeito da Presença da Água na Soldagem Subaquática Molhada

A soldagem molhada pode ser realizada em diferentes ambientes aquáticos constituídos basicamente por água salgada (navios ou estruturas offshore) água doce com ou sem poluição (represas, coletores etc) e água desmineralizada (trocadores de calor em estações elétricas, componentes internos do vaso de pressão do reator em usinas nucleares etc). A constituição química afeta os parâmetros de soldagem, sendo indicado o uso de corrente de soldagem 10 a 15% superior para água salgada em relação à água doce (KRALJ et al, 2003). A presença de sais de sódio e magnésio na água salgada faz com que a condutividade elétrica seja maior e, conseqüentemente, ocorram perdas de corrente durante a soldagem. KRALJ et al (2003) estudaram a influência do tipo de água em SM e relataram que a presença da água salgada resultou em menor penetração e pior aparência superficial em relação às soldas feitas em água doce. De maneira geral, as pesquisas realizadas em tanques de simulação de profundidades são feitas em água doce devido à facilidade de manuseio, maior preservação dos contatos elétricos e à pequena diferença nos resultados obtidos quando se solda em água salgada. Também, é complicado simular a composição química das águas dos mares uma vez que elas podem variar com o local e a profundidade (temperatura). Em suma, as diferenças observadas não justificam a utilização da água salgada nos experimentos.

A água, quando comparada com outros óxidos e ingredientes presentes no revestimento do eletrodo, é termodinamicamente instável e se decompõe facilmente em contato com o arco elétrico produzindo hidrogênio e oxigênio (MEDEIROS, 1997). Esses átomos ou gases em conjunto com os gases provenientes da decomposição do fluxo (revestimento do eletrodo), formam bolhas que protegem o arco. As bolhas crescem até atingir o volume crítico, depois do qual o equilíbrio de forças é quebrado. Quando a força de flutuação domina, as bolhas movem-se para a superfície onde entram em colapso. Depois que a bolha torna-se instável uma nova bolha forma-se dando continuidade ao ciclo.

POPE et al (1995b) propuseram que a presença da bolha faz com que o resfriamento das soldas molhadas aconteça em dois regimes: resfriamento lento em altas temperaturas (enquanto o metal de solda está protegido pela bolha de gás) e resfriamento rápido em baixas temperaturas (após a flutuação da bolha). O tempo em que acontece o resfriamento lento é muito curto, uma vez que, ao atingir o volume crítico, a bolha se destaca e se move em direção à superfície levando a maior parte do calor e expondo imediatamente o metal semi-resfriado à água. A dinâmica das bolhas e a exposição do metal de solda à água são responsáveis pelas altas taxas de resfriamento observadas na soldagem molhada (TSAI e MASUBUCHI, 1977).

31

Para medição de taxa de resfriamento utiliza-se a notação ΔT_{8-5} que indica o tempo decorrido para que a temperatura caia de 800 °C para 500 °C. Nessa faixa de temperatura ocorre transformação de fase da austenita dos aços transformáveis que influencia diretamente na microestrutura do aço e, portanto é um indicativo da fase a ser formada pois, dependendo desse tempo, pode se formar ferrita ou martensita (basicamente) e carbonetos. Na soldagem ao ar com eletrodo revestido, o valor de ΔT_{8-5} varia tipicamente de 8 a 16 segundos, enquanto que em soldagem molhada esse valor é de 1 a 6 segundos (GRUBBS et al, 1996).

Devido basicamente à presença dos átomos de oxigênio e hidrogênio, resultantes da dissociação da água, e da alta taxa de resfriamento os principais problemas associados com a soldagem molhada são (LIU et al, 1994):

No metal de solda:

Perda de elementos de liga e formação de inclusões,

Porosidade,

Trincamento por hidrogênio,

Trincamento por solidificação.

No metal de base:

Trincamento na zona termicamente afetada (ZTA).

A perda de elementos de liga e a formação de inclusões estão diretamente relacionadas a presença de oxigênio na poça de fusão. O trincamento por hidrogênio no metal de solda e na ZTA está relacionado à presença de hidrogênio juntamente com a alta taxa de resfriamento. A formação de porosidade depende basicamente da presença de hidrogênio e oxigênio no arco elétrico, além da taxa de resfriamento. Uma discussão mais profunda de cada um dos problemas se torna muito importante, uma vez que a porosidade esta diretamente ligada aos três fatores prejudiciais (presenças de oxigênio e hidrogênio no arco elétrico e na poça de fusão e alta taxa de resfriamento do metal de solda).

2.4 – Perda de Elementos de Liga

Durante a soldagem ao ar ocorrem modificações na composição química do metal de solda ao longo do cordão. BRACARENSE (1994) estudou a composição química do metal de solda no início, no meio e no final do cordão usando três tipos de eletrodos revestidos: E6013, E7018 e E12018. Foram feitas soldas aplicando-se valores de corrente de 100 e 150 ampéres em cada um dos eletrodos. Foi constatado que ocorrem mudanças significativas na microestrutura e nas propriedades mecânicas devido às variações nos teores de oxigênio, manganês e silício. Foi observado que a variação é maior para valores mais altos de corrente (150 A) e que, nessa condição, os teores de manganês e silício ao longo do cordão de solda aumentaram respectivamente 7,1 e 10,7 % para o eletrodo E6013 e 6,3 e 14,5 % para o eletrodo E7018. Por outro lado, o teor de oxigênio medido ao longo do cordão, mostrado no gráfico da Figura 2.5, reduziu de 420 para 380 ppm em soldas feitas com 150 A e eletrodo E7018 e de 375 para 350 ppm para soldas feitas com o mesmo eletrodo e corrente de 100 A.

A ocorrência desse fenômeno foi relacionada ao aquecimento do eletrodo, que ocorre principalmente por efeito Joule (FELIZARDO, 2003), que faz com que o tamanho das gotas de metal líquido seja maior no final do eletrodo. A melhor preservação do manganês e do silício no final do cordão foi atribuída ao decréscimo do potencial de CO_2 e O_2 na atmosfera do arco, devido à decomposição do carbonato de cálcio, e também a um aumento na tensão superficial do metal líquido (BRACARENSE, 1994).

Os efeitos do aquecimento do eletrodo nas soldas ao ar são vários e completamente diferentes no arame (alma) e no revestimento. Segundo BRACARENSE (1994) e FELIZARDO (2003), o aquecimento no arame altera as propriedades físicas e elétricas do aço (aumento da resistividade elétrica e redução da condutividade elétrica), mas não altera sua composição química. Por outro lado, o revestimento tende a perder umidade quando o calor é aplicado e, dependendo da temperatura, alguns elementos podem se decompor perdendo assim parte de suas funções no arco elétrico e na poça de fusão. A decomposição (quebra da molécula ou alteração molecular) de elementos importantes pode levar à menor geração de íons condutores de corrente no arco, o que provoca um "enfraquecimento" do eletrodo (ISHIZAKI, 1962 apud BRACARENSE, 1994). Nos consumíveis celulósicos, foi observado que a partir de uma temperatura próxima de 130°C os elementos do revestimento começaram a se decompor (STERN, 1948 apud BRACARENSE, 1994). Eletrodos contendo CaCO₃ e desoxidantes como Fe-Mn apresentaram início de decomposição de elementos quando o revestimento atingiu temperaturas da ordem de 300°C, sendo que a decomposição ocorre rapidamente na faixa de 450 a 750°C (CHEN e KANG, 1989).

33



Figura 2.5 – Variação do teor de oxigênio ao longo do cordão em soldas feitas ao ar para o eletrodo E7018 (BRACARENSE, 1994)

POPE (1995) mediu o teor de oxigênio ao longo do cordão de soldas feitas sobre chapa à profundidade de 0,5 m com eletrodos oxidantes, denominados tipo B (20% de Fe_2O_3 no revestimento) e eletrodos do tipo E (20% de $Fe_2O_3 + 10\%$ de MgO no revestimento). O resultado está mostrado na Figura 2.6. Observa-se que os valores mais altos de oxigênio, para ambos os eletrodos, foi alcançado, exatamente, no início do cordão de solda e que esse teor diminuiu gradualmente ao longo do cordão, voltando a se elevar exatamente na região da cratera. A variação do teor de oxigênio no início e na cratera foi relacionada com os regimes transientes na abertura e na extinção do arco onde a formação das bolhas não foi corretamente estabelecida e a energia do arco é gasta basicamente para formar a poça de fusão. Assim, a falta de um processo estável de geração de bolhas fez com que o resfriamento do metal de solda no início e no final do cordão fosse mais rápido o que provocou o aprisionamento da escória de silicato e, conseqüentemente, provocou o aumento do teor de oxigênio. As maiores concentrações de oxigênio no início e no final foram relacionadas ao aprisionamento de silicato da escória, relacionado ao suposto maior resfriamento dos extremos da solda (devido

à instabilidade da dinâmica das bolhas). Nenhum comentário foi tecido quanto ao fato de a concentração de oxigênio ser menor no final de ambas as soldas em relação ao início. Nem em relação à clara diminuição mais acentuada do oxigênio para a solda feita com o eletrodo E em relação ao eletrodo B. Além disso, TSAI e MASUBUKI (1997) relataram uma taxa de 13 bolhas por segundo em média para as condições de soldagem subaquática. Com essa taxa os regimes supostamente transientes no início e no final são realmente muito curtos e, baseados nessa informação, não justificariam tamanha variação no teor de oxigênio ao longo do cordão de solda.

Uma vez que a variação dos teores de Mn e Si ao longo do cordão de soldas feitas ao ar relatada por BRACARENSE (1994) foi também observada por POPE (1995) em soldas feitas a 0.5 m de profundidade é provável que essa variação no teor de oxigênio afete os mecanismos de formação da porosidade ao longo de soldas molhadas.

Elementos como manganês e carbono afetam diretamente a temperabilidade do metal de solda enquanto que a variação do teor de oxigênio altera a tenacidade do mesmo. Normalmente o aumento do teor de oxigênio promove uma redução da tenacidade (IBARRA et al, 1994). Manganês é estabilizador da austenita e de carbonetos. Silício é estabilizador de ferrita e, juntamente com o manganês e carbono, aumenta a resistência do aço promovendo deformação na estrutura cristalina do mesmo. O fato das soldas molhadas apresentarem propriedades mecânicas inferiores às soldas ao ar é relacionado ao processo de oxidação desses elementos que resulta em produção de gases ou inclusões de óxidos (CHRISTENSEN, 1983).



Figura 2.6 – Variação do teor de oxigênio ao longo do comprimento de cordões de solda depositados com eletrodos do tipo B (20% de Fe_2O_3 no revestimento) e eletrodos do tipo E (20% de $Fe_2O_3 + 10\%$ de MgO no revestimento) POPE (1995)

2.4.1- Presença do Oxigênio no Arco e no Metal de Soldas Molhadas

O efeito da profundidade no oxigênio presente no metal de solda obtido com eletrodos rutílicos está ilustrado na Figura 2.7 (IBARRA et al, 1994). Durante a soldagem, a água se decompõe produzindo hidrogênio e oxigênio. O teor de oxigênio no metal de solda aumenta rapidamente com o aumento da profundidade. A 12 metros ele alcança o nível máximo de 0,19 %, então começa a decair até 0,15 % a 80 m. A partir desse ponto, o nível de oxigênio permanece constante com o aumento da profundidade, indicando que ocorre uma saturação do oxigênio no aço liquido.


Figura 2.7 – Variação do teor de oxigênio no metal de solda com a profundidade (IBARRA et al, 1994)

O comportamento do oxigênio na poça de fusão das soldas molhadas segue, de modo aproximado, o padrão observado em medições de solubilidade de oxigênio no ferro líquido em ambiente seco à uma atmosfera de pressão. Ao se observar o diagrama de equilíbrio ferrooxigênio, desenvolvido para a pressão de uma atmosfera, (Figura 2.8), constata-se que o ferro líquido dissolve a 1600°C, aproximadamente até 0,22% em peso de oxigênio. A esta temperatura, se o teor de oxigênio em peso estiver entre 0,22% e 22,5%, então tem-se dois líquidos imiscíveis (ferro líquido (L1) e óxido de ferro líquido (L2)), sendo o óxido de ferro líquido menos denso que o ferro líquido. Se a temperatura for pouco maior que 1529°C e o teor em peso de oxigênio estiver entre 0,17% a 22,6%, o ferro líquido e o óxido de ferro líquido coexistirão. Pode-se constatar, também, que solubilidade do oxigênio no ferro delta a 1529°C é baixa (menor que 0,001% em peso) e que o óxido de ferro se solidifica a 1370°C, quando forma a wustita (FeO).(POPE, 1995) (FILHO et al, 2005). Assim, considerando-se as prováveis variações decorrentes do processo de soldagem e da pressão da água, pode-se relacionar a estabilidade do teor de oxigênio do metal das soldas molhadas, apartir de 50m de profundidade, à saturação do oxigênio no ferro líquido da poça de fusão.



Figura 2.8 - Diagrama de equilíbrio ferro-oxigênio (VAN VLACK, 1977)

O oxigênio monoatômico originado na decomposição da água pelo arco elétrico e transferido para o metal de solda durante a soldagem subaquática molhada reage com elementos de liga desoxidantes, tais como o Mn, o Si e o C, formando escória, poros ou inclusões não metálicas. Se o teor de oxigênio presente no metal de solda for grande, quando comparado com o teor de C, Mn e Si, o próprio ferro será oxidado, formando FeO. A perda de manganês é significativa como pode ser visto na Figura 2.9 onde nota-se uma queda percentual de 0.40 % em peso com o aumento da profundidade para 30 metros para soldas

feitas com eletrodos rutílicos. Essa grande perda de manganês está relacionada com o aumento significativo do oxigênio no metal de solda citado anteriormente.



Figura 2.9 – Efeito da profundidade sobre o teor de manganês e silício no metal de solda (IBARRA et al, 1994)

Como a composição química do metal das soldas molhadas feitas com eletrodos rutílicos varia com a profundidade, a microestrutura desse metal de solda, e conseqüentemente as propriedades mecânicas, também é afetada pela profundidade de soldagem. A variação da microestrutura está diretamente relacionada com a alteração nos teores de oxigênio, carbono e outros elementos de liga. Em baixas profundidades tem-se basicamente ferrita pró-eutetóide e, com o aumento da profundidade, reduz-se a quantidade de ferrita pró-eutetóide e tem-se um aumento dos teores de ferrita com segunda fase alinhada, ferrita de placas laterais e inclusões de óxidos, Figura 2.10 (IBARRA et al, 1994); Em profundidades superiores a 50m, a microestrutura do metal de solda não apresenta mudanças significativas com a pressão da água devido ao fato de acontecer a saturação do oxigênio no aço líquido à esta profundidade.



Figura 2.10 - Variação da quantidade dos constituintes microestruturais do metal de solda em função da profundidade de soldagem na água (IBARRA et al, 1994).

POPE (1995) adicionou quantidade crescentes de hematita (Fe₂O₃) ao revestimento de eletrodos utilizados em soldagem molhada com o objetivo de simular um aumento da pressão parcial de oxigênio, verificou-se que o teor de oxigênio no metal de solda aumentou até atingir o patamar de 0,21% em peso, como indicado na Figura 2.11 (POPE, 1995). Esse valor foi definido principalmente pela temperatura da poça de fusão, pelo limite de solubilidade do oxigênio no ferro líquido e pela reação monotética, já citada e indicada na Figura 2.7. Portanto, para qualquer teor de oxigênio acima desse limite de solubilidade, o FeO líquido se forma como uma fase imiscível com o ferro líquido (POPE, 1995).

A seqüência dos elementos que serão oxidados pode ser determinada pela análise do diagrama das energias livres de formação de seus respectivos óxidos. A Figura 2.12 mostra um diagrama de energia livre de formação de alguns óxidos importantes para a metalurgia do aço. É possível observar que, para uma temperatura da ordem de 1900°C, como reportado para a temperatura da poça de fusão, e provavelmente maior para a gota metálica em formação na ponta do eletrodo, os elementos a serem oxidados primeiramente serão, pela ordem, cálcio, alumínio, carbono, titânio, silício, manganês e cromo. Assim, com o aumento da concentração do oxigênio na poça de fusão e na gota metálica esses elementos serão



oxidados anteriormente ao próprio ferro enquanto houver oxigênio disponível na matriz de ferro líquido.

Figura 2.11 - Variação do teor de oxigênio no metal de solda em função do teor de hematita no revestimento do eletrodo (POPE, 1995).



Figura 2.12 - Variação da energia livre de formação de óxidos em função da temperatura (GASKELL, 1981)

SATO E KUWANA (1995) soldaram ao ar, em atmosfera controlada, ferro comercialmente puro (metal de base) com um arame com proteção gasosa (GMAW) de composição química semelhante à do metal-base. O objetivo foi fazer uma avaliação da influência das condições de soldagem e da pressão parcial dos gases contidos nessa atmosfera, constituída basicamente de misturas de argônio com oxigênio, na composição química do metal de solda. Os resultados obtidos para o teor de oxigênio no metal de solda estão mostrados na Figura 2.13. Pode se constatar que o teor de oxigênio no metal de solda cresceu

com a pressão parcial de oxigênio na atmosfera controlada, até atingir o valor de 0,26% em massa e permaneceu constante a partir desse valor. O patamar de 0,26% em massa de oxigênio coincide com o limite de solubilidade do oxigênio no ferro a (1910K) 1637°C (a temperatura da poça de fusão medida nos experimentos), mostrado na Figura 2.8.



Figura 2.13 - Influência da pressão parcial do oxigênio no teor de oxigênio no metal de solda (SATO E KUWANA, 1995)

A influência dos teores de Si e Mn no metal de adição e da pressão parcial de O_2 do gás de proteção no teor de oxigênio do metal de solda obtido na soldagem com proteção gasosa encontra-se apresentada nas Figuras 2.14 e 2.15 (KUWANA e SATO, 1995). Nota-se

43

que o teor de oxigênio no metal de solda aumentou com o aumento da pressão parcial do O_2 e reduziu com o aumento dos teores de Si e Mn devido á oxidação dos mesmos.



Figura 2.14 – Teor de oxigênio do metal de solda de ligas de Fe-Si em função da pressão parcial de O₂ (SATO E KUWANA, 1995)



Figura 2.15 - Teor de oxigênio do metal de solda de ligas de Fe-Mn em função da pressão parcial de O₂ (SATO E KUWANA, 1995)

Esses mesmos autores testaram, nas mesmas condições, arames contendo diferentes teores de alumínio, titânio, níquel, cromo e uma liga de silício e manganês. Os resultados estão mostrados no gráfico da Figura 2.16. Nota–se que, exceção feita ao Ni e Cr, todos os elementos apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, reduziram o teor de oxigênio e, conseqüentemente, tiveram seus teores reduzidos com o aumento da pressão parcial de oxigênio na atmosfera controlada. A presença dos elementos de liga reduz o teor de oxigênio no metal de solda por meio das reações de oxidação que ocorrem durante a formação das gotas e na poça de fusão. A efetividade de cada elemento na redução do teor de oxigênio

segue a ordem das energias de formação dos seus respectivos óxidos mostradas na Figura 2.12. Cromo e Níquel praticamente não reagem com o oxigênio ao passar pelo arco elétrico. Os resultados sugeriram que o processo de desoxidação ocorre na seguinte ordem: Al>Ti>Si-Mn>Si>Mn. O ferro somente será oxidado se a quantidade de oxigênio presente no metal de solda for suficiente para primeiramente reagir com todos os elementos de liga com menores energias de formação presentes no sistema.



Figura 2.16 – Relação entre os teores de elemento de liga e oxigênio no metal de solda de aço carbono (SATO E KUWANA, 1995)

Uma importante observação feita por esses autores foi que mesmo com altos teores de oxigênio na atmosfera controlada "nenhuma porosidade foi observada em nenhum metal de solda", indicando que a oxidação do ferro e de elementos de liga, exceto carbono, não produz porosidade em soldas feitas nessas condições. Essa observação é aceitável uma vez que, nas temperaturas normais existentes no interior das gotas metálicas e na poça de fusão, o resultado das reações de oxidação de todos esses elementos, com exceção do carbono, produzirão óxidos no estado líquido e não no estado gasoso.

2.5 - Porosidade nas Soldas Molhadas

A porosidade no metal de solda é um dos maiores problemas encontrados na soldagem subaquática molhada (SANCHEZ-OSIO et al, 1993). LIU et al (1994) afirmaram que a influência da porosidade no metal de solda é semelhante à que acontece em aços sinterizados onde a porosidade acaba provocando a redução dos limites de escoamento e de ruptura, de ductilidade e de tenacidade. Os mesmos autores afirmaram que os principais fatores que afetam a porosidade no metal de solda são: profundidade (pressão); tipo de revestimento do eletrodo e estabilidade do arco.

A porosidade é resultado do aprisionamento mecânico, supersaturação de gases dissolvidos, ou gases produzidos por reações químicas. A natureza e quantidade de poros no metal de solda dependem de processos relacionados ao tempo que são: nucleação, crescimento, transporte e coalescência (colapso) dos poros (TREVISAN et al, 1990).

A condição física necessária para nucleação dos poros é que a soma da pressão parcial P_g dos gases solúveis deve exceder a soma dos seguintes fatores:

$$P_{g} > P_{a} + P_{h} + P_{h}$$
 Equação 2.1

onde P_a é a pressão atmosférica, P_h é a pressão hidrostática e P_b é o aumento da pressão devido à curvatura do poro, obtida através da seguinte equação:

$$P_b = \frac{2y}{r}$$
 Equação 2.2

onde y é a tensão superficial entre o metal fundido e o gás no poro e r é o raio do poro.

No caso da soldagem subaquática, P_h é o termo controlador porque está diretamente ligado à profundidade (GRUBBS et al, 1996). Quando a profundidade aumenta, P_h também aumenta, o que faz com que, para que ocorra a nucleação do poro, P_g tenha que ser maior. Se o raio crítico for excedido, o poro irá nuclear de forma homogênea e crescer espontaneamente sem limites de dimensões, dependendo da disponibilidade de elementos gasosos. Como na soldagem molhada esses elementos estão disponíveis em grande quantidade, o tamanho do poro dependerá principalmente do tempo em que o metal de solda permanece no estado líquido que, por sua vez, é determinado pelas variáveis de soldagem, especialmente pelo aporte térmico. Devido ao rápido resfriamento que ocorre nas soldas subaquáticas molhadas, o metal de solda permanece líquido por um tempo pequeno. Logo, os poros formados na maioria são pequenos, com diâmetro pouco superior ao raio crítico (ANDRADE, 1995 apud IBARRA et al, 1998).

O aumento da porosidade com a profundidade aparentemente é contrário ao modelo aceito atualmente para a nucleação de um poro no metal de solda durante a solidificação. Com o aumento da pressão fica mais difícil de nuclear o poro. Logo, com o aumento da profundidade, a porosidade das soldas molhadas deveria diminuir e não aumentar. Nesse caso, o aumento da porosidade com a profundidade pode estar relacionado ao aumento dos teores de oxigênio e hidrogênio na atmosfera do arco elétrico. Para que a porosidade aumente com o aumento da pressão é necessário que a quantidade de oxigênio e hidrogênio no arco elétrico aumente de maneira mais intensa do que o aumento da pressão. Essa parece ser a condição que ocorre na soldagem molhada com eletrodos revestidos.

O modelo atual para explicar o surgimento de porosidade em soldas baseia-se na diferença de solubilidade do hidrogênio no ferro liquido em comparação com o ferro no estado sólido (SANTOS et al, 1992). O ferro no estado líquido, na temperatura de fusão e à uma atmosfera de pressão, absorve aproximadamente 24,5 ml de hidrogênio para cada 100 gramas de ferro fundido e absorve aproximadamente 7 ml de hidrogênio para cada 100 gramas de ferro no estado sólido (fase δ), como mostrado na Figura 2.17 (GRONG, 1997).



Figura 2.17 - Solubilidade do hidrogênio no ferro em função da temperatura (GRONG, 1997)

A formação de poros em soldas é similar ao que ocorre em fundidos. CAMBELL (2001) explica que, devido ao seu alto coeficiente de difusão (10 vezes maior que qualquer outro elemento dissolvido no ferro líquido), a concentração do hidrogênio na frente de solidificação de um fundido tem uma contribuição muito pequena para a nucleação do poro (devido à baixa pressão parcial). Por outro lado, a combinação de oxigênio e carbono, que leva a formação de CO no metal líquido, produz uma pressão parcial 100 vezes maior que a presença do oxigênio isoladamente no aço durante a solidificação. Essa alta pressão parcial faz com que a formação de CO seja de grande contribuição para a nucleação do poro e de baixa contribuição para o crescimento do mesmo, devido a baixa mobilidade do mesmo no aço. De uma maneira geral, em fundidos, a melhor conjectura para formação de poro durante a solidificação do ferro é a combinação da presença de CO com altos teores de hidrogênio. Nesse caso, o CO seria responsável pela nucleação do poro na frente de solidificação e o hidrogênio seria responsável pelo crescimento do mesmo.

SUGA e HASUÍ (1986) afirmaram que o principal gás existente nos poros de depósitos feitos com eletrodos ilmeníticos (D4301), rutílicos (D4313) e oxidantes (D4327) em soldagem molhada é H₂ (97%). Outros gases encontrados foram CO, CO₂ e CH₄. ANDO e ASAHINA (1983) apud ROWE (1999) reportaram que, para soldas feitas com três diferentes tipos de eletrodos - óxido de ferro/pó de ferro, altos teores de óxido de titânio e eletrodos ilmeníticos - em três diferentes profundidades, o teor de hidrogênio nos poros foi superior a 99%.

No trabalho desenvolvido por SUGA e HASUÍ (1986) foi reportado que a porosidade começa a aproximadamente a 5 metros de profundidade e aumenta com o aumento da pressão ou profundidade como mostrado na Figura 2.18.



Figura 2.18 – Efeito da pressão hidrostática sobre a porosidade (SUGA e HASUÍ, 1986).

A ausência de porosidade em soldas feitas em profundidades inferiores a 5 m (0.5 kgf/cm²) pode estar relacionada a baixa pressão parcial de hidrogênio e do baixo o teor de oxigênio no metal de solda em baixas profundidades, como pode ser visto na Figura 2.7. O teor de oxigênio não é suficiente para promover a oxidação do carbono no metal de solda e, conseqüentemente, facilitar a nucleação dos poros enquanto que o baixo teor de hidrogênio não é suficiente para promover o crescimento dos mesmos.

Nesse mesmo trabalho, os autores identificaram dois tipos básicos de poro: os do tipo A que apresentam morfologia aproximadamente esférica e são causados pelo hidrogênio concentrado na frente de solidificação, ocorrendo na faixa de pressão entre 0,5 e 2 kgf/cm² (pressão manométrica). E os do tipo B que têm um formato mais alongado e foram observados nas juntas soldadas entre 2 e 6 kgf/cm², causados por bolhas presentes no metal de solda, aprisionadas pela progressão da frente de solidificação.

A mudança na forma dos poros, ou seja, mudança do mecanismo de formação em função da pressão hidrostática é causada pela concentração de hidrogênio no metal liquido que aumenta consideravelmente com o aumento da pressão.

A porosidade também é influenciada pela composição química do eletrodo. SANCHEZ-OSIO et al (1993) observaram que, para um revestimento rutílico com adição de aproximadamente 12% de CaCO₃, houve uma redução na porosidade do metal de soldas feitas a 10 m de profundidade, como apresentado na Figura 2.19. Carbonatos decompõem-se para formar CO₂ e CO no arco elétrico reduzindo assim a pressão parcial de hidrogênio e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade do mesmo absorvida na poça de fusão (ROWE, 1999).



Figura 2.19 - Efeito da adição de Caco₃ sobre a porosidade em juntas soldadas a profundidade de 10 m, (SANCHEZ-OSIO et al, 1993).

Juntamente com o teor de carbonato, foi também demonstrado que a basicidade da escória pode influenciar no teor de hidrogênio no metal de solda. A solubilidade do vapor d'água na escória depende da basicidade da mesma. Em escórias com basicidade neutra, a solubilidade do vapor d'água não é favorecida. MEDEIROS (1997) demonstrou que a absorção de hidrogênio no metal de soldas subaquáticas é fortemente dependente da solubilidade do vapor d'água na escória. Hematita se decompõe para formar FeO na escória que, por sua vez, aumenta a basicidade da mesma. Uma vez que a porosidade das soldas molhadas é causada pela presença de hidrogênio e a absorção do mesmo no metal de solda

escória, como demonstrado por ROWE (1999) no gráfico da Figura 2.20, onde REM é uma sigla adotada para terras raras.



Figura 2.20 – Efeito da basicidade da escória na porosidade do metal de solda (ROWE, 1999)

A redução da porosidade através do uso de elementos oxidantes é um indicativo da porosidade causada por reação entre oxigênio e carbono que gera CO em altas temperaturas (PEREZ e LIU, 2005). LIU et al (1994) prepuseram que o CO tem uma importante participação na formação da porosidade de soldas molhadas e que a correta desoxidação da poça de fusão promove não somente a redução da porosidade provocada por CO, mas também da provável presença de vapor d'água. GRUBBS et al (1996) reportaram que, para eletrodos rutílicos com adição de pó de ferro, a composição dos gases encontrada foi de 45% H, 43% CO, 8% CO₂ e 4% outros.A divergência nos resultados reportados para a composição do gás dos poros indica que existem condições onde ocorre maior formação de CO (a maioria das medições foi feita em soldas realizadas em lâmina d'água). Além disso, LIU et al (1994) prepuseram que é difícil detectar a presença de vapor d'água nos poros porque ocorre a reação de oxidação do ferro na parede dos mesmos com o vapor d'água presente no interior dos mesmos.

ROWE (1999) adicionou manganês, titânio, boro e terras raras ao revestimento de eletrodos rutílicos. Em soldas realizadas em profundidades de até 91 m foi observado que o aumento da quantidade de ferro-manganês reduziu a porosidade do metal de solda como pode ser visto na Figura 2.21. Por outro lado, o aumento da quantidade de titânio e boro no revestimento provocou aumento na porosidade, Figura 2.22. O mesmo comportamento foi observado para os eletrodos com adição de terras raras (Cério e Lantanídeos) ao revestimento, Figura 2.23.

A aparente contradição de resultados entre as adições de Fe-Mn, Ti-B e terras raras foi relacionada a basicidade da escória, cuja influência sobre a porosidade está mostrada na Figura 2.20. A adição de elementos oxidantes muda a basicidade da escória em alguns casos e a porosidade é reduzida não somente pela remoção do oxigênio, mas também pela redução do hidrogênio. Numa escala de valores, a basicidade da escória, que afeta diretamente o teor de hidrogênio aprisionado, foi mais efetiva na redução da porosidade do que a presença de elementos desoxidantes, inibidores da formação de CO, como Ti, B e terras raras.



Figura 2.21 – Porosidade como função da profundidade e da adição de ferrro-manganês ao revestimento de eletrodos rutílicos (ROWE et al, 2002)



Figura 2.22 - Porosidade como função da profundidade e da adição de titânio e boro ao revestimento (ROWE et al, 2002)



Figura 2.23 - Porosidade como função da profundidade e da adição de terras raras (REM) ao revestimento (ROWE et al, 2002)

2.5.1 - Métodos de Medição da Porosidade

2.5.1.1-Método Estatístico Puntual (MAZZAFERRO, 1998)

Nesse método utiliza-se uma malha com pontos igualmente espaçados, colocada sobre a imagem da seção transversal do cordão de solda, gerada através de um projetor de perfis, para dimensionar e quantificar os poros.

A porosidade é resultado da proporção entre a área total dos poros e a área do cordão de solda.

2.5.1.2– Gravimetria (MORAIS e FERRARESI, 2001)

No método destrutivo gravimétrico o grau de porosidade é estimado pela medida da densidade do cordão de solda. A variável dependente associada à porosidade do cordão é o percentual de volume de vazios do cordão, determinado pela variação da densidade.

Na realização do ensaio destrutivo por gravimetria, seguem-se os seguintes passos:

1. Uma amostra representativa de cordão de solda (zona fundida) é separada do corpo de prova soldado, pela remoção cuidadosa do metal de base;

2. A amostra, composta somente da zona fundida do cordão de solda é pesada, primeiro ao ar [Par] e em seguida em água destilada [Pag];

3. Calcula-se o Empuxo [E], que é responsável pela diferença entre os pesos da amostra ao ar [Par] e em água [Pag], dado por E = Par - Pag;

4. Com o valor de E, calcula-se o volume de líquido deslocado pela amostra [Vld], que equivale ao próprio volume da amostra [Vam], dado por:

$$V_{ld} = V_{am} = \frac{E}{\rho_{H2O} \cdot g};$$
 Equação 2.3

onde ρ_{H2O} é a densidade da água, igual a 1 kg/dm³, e g é a aceleração da gravidade (9,81m/s²).

5. Com o volume da amostra [Vam] e o peso da amostra ao ar [Par], determina-se a densidade real da amostra [ρ am], em [kg/m³]:

6. Para determinação do volume de vazios da amostra, adota-se um valor de densidade de referência, equivalente à gravidade específica de uma amostra considerada perfeita [pamperf] ou sem poros e que possui 50% de diluição. Esse valor é obtido com determinação, pelo mesmo método, de valores de densidade do metal de base e do arame eletrodo.

7. Finalmente, com os valores das densidades de referência [pamperf] e real [pam] da amostra, determina-se o percentual de volume de vazios, dado por:

$$V\upsilon = \frac{\rho_{amperf} - \rho_{am}}{\rho_{amperf}} \times 100$$
 Equação 2.5

Pelo método gravimétrico, citado acima, estima-se o volume de vazios através da medida de densidade da amostra, não determinando a localização, distribuição e tamanhos desses vazios.

SAPERSTEIN (1964) apud MORAIS e FERRARESI (2001) cita que a acuracidade desse método, medida em laboratório, é de aproximadamente 0,3%.

2.5.1.3- Macrográfico (análise de imagens) (SANCHES-OSIO et al, 1993)

Esse método faz uso de ferramentas computacionais capazes de quantificar, medir e localizar os vazios na área estudada. Para o ensaio destrutivo de medição da porosidade no metal de solda, seguem-se os seguintes passos:

1. Fotografa-se a seção transversal da amostra de solda polida em duas condições:

Com ataque: permite a visualização da seção transversal do cordão de solda;

Sem ataque: permite a visualização da área da seção transversal dos poros.

2. As imagens são tratadas (binarização) e um software especial quantifica, mede e localiza os poros no metal de solda.

A acuracidade do método depende da preparação da amostra, resolução da imagem, calibração do software e habilidade do operador do software na identificação das bordas dos poros.

Esse método permite a medição da porosidade localizada bem como a quantificação e determinação da posição dos poros.

2.5.1.4 - Método Radiográfico

Para ensaio não destrutivo de medição da porosidade no metal de solda seguem-se os mesmos passos adotados no ensaio destrutivo, sendo que, ao invés de seccionar o cordão para obtenção de imagens da seção transversal do mesmo, faz-se radiografias do cordão de solda. Essas imagens são tratadas e, através do uso de um software, os poros são medidos, contados e localizados.

Esse método permite a medição da porosidade no volume do cordão, apresentando problemas quando os poros estão em um mesmo plano paralelo à direção de incidência dos raios X (LORENZO et al, 2005).

A norma que define a porosidade do metal de solda é a ANSI/AWS D3.6M (1999) que classifica as soldas por tipos ou classes. Normalmente as soldas subaquáticas molhadas são classificadas como classe B, que podem ser aplicadas em situações menos críticas (baixa responsabilidade) onde menor ductilidade e porosidade são toleradas. Aplicações típicas incluem "luvas escravo" em estruturas offshore (METALS HANDBOOK, 1986).

O item 8.10.1 da norma ANSI/AWS D3.6M:1999 estabelece como critério de aceitação para testes com radiografias em soldas subaquáticas molhadas de classe B:

- Poros com diâmetro superior a 5 mm não são permitidos;
- Poros de diâmetro entre 5 e 1,6 mm são restritos a um número máximo de 7 dentro de um comprimento de 25,4 mm do cordão de solda, por 25,4 mm de espessura da chapa;
- Para poros com diâmetro inferior a 1,6 mm, não existe restrição.

O item 8.10.2 da mesma norma estabelece como critério de aceitação para testes com macrografias, para soldas da classe B:

- ➤ A área dos poros não pode superar a 5,0 % da área de solda;
- A maior dimensão das descontinuidades não pode superar 2,0 mm.

2.6 - Estabilidade do Arco em Soldagem Subaquática

Na soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos, um fator importantíssimo para estabelecer a técnica adequada da realização da solda é empiricamente definido como "facilidade ou dificuldade no manuseio", no decorrer da operação de soldagem. Na soldagem subaquática molhada, em função da baixa visibilidade, a sensibilidade ao tato e audição assumem grande importância para que o soldador/mergulhador saiba se o cordão está sendo depositado como desejado (MAZZAFERRO, 1998).

Nessas condições, fácil abertura de arco e deposição suave são características que dependem das duas variáveis controladas pelo soldador/mergulhador: a força de mergulho aplicada ao eletrodo e a velocidade de soldagem. Por essa razão, é importante a definição de critérios objetivos, os quais permitam caracterizar e classificar um eletrodo quanto ao nível de estabilidade do arco elétrico que o mesmo proporciona.

Quando a soldagem é feita por dispositivos mecanizados, a estabilidade pode ser avaliada, por exemplo, por meio da análise dos oscilogramas de tensão e corrente, que expressam os valores desses parâmetros de soldagem em função do tempo, e permitem analisar o comportamento dos mesmos.

É bem conhecido que a variação da tensão durante a soldagem depende do comprimento do arco. A tensão diminui com a redução do comprimento do arco e vice-versa. Durante a soldagem, pequenas gotas são liberadas continuamente da ponta do eletrodo e são transferidas para a poça de fusão. Como as gotas crescem ligadas à ponta do eletrodo, o comprimento do arco e, conseqüentemente, a tensão diminuem.

Quando ocorre um curto-circuito, a tensão assume um valor mínimo e a corrente um valor máximo. A avaliação dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem (tensão e corrente) permite definir e controlar os modos de transferência metálica e a estabilidade do arco. Esses fatores estão diretamente relacionados com a qualidade do metal depositado. Quanto mais estável um arco, mais facilmente e uniformemente se dá a transferência metálica do eletrodo para a peça.

Em soldas molhadas, foi relatado que a estabilidade depende do diâmetro do eletrodo, sendo que os eletrodos com menor diâmetro são mais estáveis que os de maior diâmetro. Isso ocorre devido à menor densidade de corrente para os eletrodos com menor diâmetro que promove uma melhor "rigidez" (diferença entre as taxas de fusão da alma e do revestimento do eletrodo) do arco elétrico (LIU et al, 1994a).

O arco elétrico instável torna-se um problema com o aumento da profundidade (WATSON et al, 1994) uma vez que o aumento da pressão hidrostática provoca constrição do arco elétrico deixando-o mais instável. Esse fenômeno é relacionado à mobilidade dos portadores de carga no plasma. Uma tensão mais alta é requerida para manter a condutividade elétrica do arco, resultando em grandes flutuações de corrente e tensão que produzem extinções do arco durante a soldagem e o aprisionamento de poros e escória no metal de solda.

Vários critérios para caracterização da estabilidade em corrente contínua têm sido propostos. Esses critérios estabelecem índices de aferição da estabilidade baseados na avaliação dos valores instantâneos dos parâmetros de soldagem, (MAZZAFERRO, 1998):

 $I_{rms} \rightarrow Raiz$ quadrada da média aritmética dos quadrados da corrente instantânea de soldagem.

 $U_{rms} \rightarrow Raiz$ quadrada da média aritmética dos quadrados da tensão instantânea do arco.

 $\overline{I_1} \rightarrow$ Corrente média de reignição do arco.

 $\overline{U_1} \rightarrow$ Tensão média de reignição do arco.

Um critério simples foi definido por MADATOV (1962) apud TSAI e MASUBUCHI (1977) e GUERRERO (2002). A estabilidade do arco pode ser definida como o valor máximo da corrente dividido pelo seu valor mínimo, como segue:

$$S = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}}$$
Equação 2.6

Onde S é a estabilidade do arco, I_{max} é o máximo e I_{min} é o mínimo valor da corrente. Os valores de S devem ser o mais próximo possível de 1,0 para boa estabilidade de arco; Por outro lado S>> 1,0 indica arco instável.

Além desses indicadores, a estabilidade é caracterizada através da transferência do metal de adição.

2.6.1- Transferência Metálica

Durante a soldagem com eletrodo consumível, a ponta deste se funde sob a ação do arco e se transfere para a poça de fusão. Esta transferência é de suma importância, pois a maneira como esta ocorre influencia várias características do processo de soldagem tais como:

- 1. Estabilidade do arco;
- 2. Quantidade de respingos;

- 3. Regularidade e qualidade do cordão de solda;
- 4. Eficiência da proteção de gases (processo GMAW);
- 5. Velocidade de soldagem.

As forças que podem agir na gota promovendo a transferência metálica são: Força devido a ação da gravidade, força devido a tensão superficial, força de compressão (efeito pinch), força através de arraste do plasma, força de arraste do gás de proteção, força devido a evaporação metálica, forças devido a reações químicas e forças externas, como mostrado no esquema da Figura 2.24 (BRANDI et al, 1991).



Figura 2.24 - Forças envolvidas na transferência do metal durante a soldagem por eletrodos revestidos (BRANDI et al, 1991)

O instituto internacional de soldagem (IIW) classificou os modos de transferência metálica em três grupos: transferência por "vôo livre", por contato e guiado pela escória. Essa classificação relacionada com alguns processos pode ser vista na Tabela 2.1.

Designação do modo de transferência metálica.		Exemplo de processo de
		soldagem.
Transferência	Transferência por gotas	MIG/MAG com densidade
Globular		de corrente baixa
	Transferência por repulsão	MAG com 100%CO ₂
		MIG com Ar e MAG com
	Transferência por projeção	Ar e até 15% CO ₂ ou 5% de
Transferância		O_2
nor	Transferência por	MIG/MAG com densidade
pulverização	pulverização axial.	de corrente maior
purvenzação	Transferência por	MIG/MAG com densidade
	pulverização rotacional	de corrente elevada, MIG
		plasma
Transferência por explosão		Eletrodo revestido, MAG
		com CO
Transferência por Transferênci	ncia por curto-circuito	MAG com arco curto
	a por contato ininterrupto	Soldagem com adição de
Tansferenei	a por contato ininterrupto	metal (TIG)
Transferência guiada pela parede Outros modos		Soldagem com arco
		submerso
		Eletrodo revestido, eletrodo
	o do modo de tra Transferência Globular Transferência por pulverização Transferê Transferê Transferênci	o do modo de transferência metálica.Transferência GlobularTransferência por gotas Transferência por repulsãoTransferência por pulverização axial.Transferência por projeção pulverização axial.Transferência por pulverização axial.Transferência por pulverização axial.Transferência por pulverização rotacionalTransferência por pulverização rotacionalTransferência por curto-circuitoTransferência por curto-circuitoTransferência por contato ininterruptoTransferência guiada pela paredeOutros modos

Tabela 2.1 - Classificação dos modos de transferência Metálica de acordo com o IIW (IIW, 1977)

Os modos de transferência mais comumente observados na soldagem por eletrodo revestido são globular/explosão, curto-circuito e protegido pela escória (BRANDI et al, 1991) (PISTORIOS e LIU, 1997) (GUERRERO, 2002).

tubular.

Diferentes técnicas têm sido usadas para determinar o modo de transferência metálica no metal de solda. As variações dos valores de corrente e tensão podem ser gravadas por meio de um sistema de aquisição de dados que, depois de processados através de técnicas como a transformada rápida de Fourier, desvio padrão da tensão ou corrente no tempo e taxas de picos (ASM HANDBOOK, 1993) podem ser relacionados ao tamanho das gotas na transferência metálica. A Figura 2.25 mostra a variação dos valores de corrente no tempo durante a transição entre o modo de transferência globular para o modo spray em soldas em aço carbono feitas com o processo GMAW. Observa-se a grande diferença na amplitude da variação da corrente no modo globular em relação ao modo spray. Por meio da transformada rápida de Fourier, mostrada na Figura 2.26, pode-se verificar as freqüências dominantes nas quais cada modo de transferência ocorre. Nesse caso, pode-se notar que, para a transferência do tipo spray, ocorrem menores variações na amplitude e maior concentração de eventos em altas freqüências.



Figura 2.25 - Variação da corrente no tempo durante soldagem GMAW em aço carbono mostrando a transição de globular para spray (~ 8s) com o aumento da corrente (ASM HANDBOOK, 1993).



Figura 2.26 - Espectro de potência para transferência globular e spray durante soldagem GMAW em aço carbono (ASM HANDBOOK, 1993)

Por meio de soldas feitas em um tubo de cobre resfriado pela passagem de água em seu interior, é possível coletar as gotas do metal de solda e mensurá-las por meio de análise de imagens e de dados. Os sinais de tensão filtrados podem ser adquiridos e as variações nos mesmos (ΔV), podem ser computadas. Através da correlação entre (ΔV) e o tamanho das gotas é possível determinar o modo de transferência metálica (PISTORIUS e LIU, 1997).

Sistemas de vídeo de alta freqüência podem ser usados para observar a formação, crescimento e destacamento das gotas na soldagem molhada, porém a visibilidade torna-se um grande problema na soldagem subaquática. O som produzido pelo arco elétrico pode ser gravado e analisado para se obter as freqüências da transferência metálica.

Durante a soldagem ao ar, o modo de transferência metálica muda do início para o final do eletrodo (BRACARENSE, 1994) (PISTORIUS e LIU, 1997). Para eletrodos básicos a transferência predominantemente se dá por curto-circuito, o que também ocorre para os

rutílicos em baixos valores de corrente. Em valores normais de corrente, os eletrodos rutílicos exibem transferência por pequenas gotas, o mesmo ocorrendo com os eletrodos básicos em altos valores de corrente.

BRANDI et al (1991) testaram eletrodos revestidos E6011, E6013 e E7018 com diâmetros de alma de 4 e 5mm, variando a polaridade e os valores de corrente em soldas ao ar na posição plana e fora da posição. O arco elétrico foi estabelecido entre o eletrodo e um disco de cobre giratório que transferia as gotas para um reservatório com água. As principais conclusões do estudo foram:

- Transferência por explosão foi o mecanismo predominantemente observado nos três tipos de eletrodos testados.

- Apenas gotas grandes (diâmetro médio >1mm) apresentaram porosidade interna. As gotas produzidas pelo eletrodo E6013 apresentaram maior porosidade, seguidas pelas gotas do eletrodo E7018 e E6011, na ordem.

 O modo de transferência do tipo protegido pela escória foi mais significante nas soldas feitas com o eletrodo E7018.

- A polaridade da corrente foi a variável que mais afetou o tamanho das gotas transferidas no arco elétrico.

- O eletrodo E6013 produziu o arco mais estável e com menor número de respingos devido ao tamanho das gotas relativamente menor em relação aos outros eletrodos testados.

- Detectou-se a ocorrência de porosidade nas pontas de todos os três tipos de eletrodos testados, sendo mais freqüentemente observada nas pontas dos eletrodos E6013 e E7018.

 Quando a explosão da gota ocorre antes do curto-circuito, o resultado são gotas menores em comparação ao tamanho das gotas que surgem quando a explosão ocorre depois do curto-circuito.

- O eletrodo E6011 produziu menores gotas, seguido pelo eletrodo E6013 e E7018 na ordem.

- O eletrodo E6013 apresentou a menor quantidade de respingos em relação aos outros dois independentemente das condições de soldagem.

- A mudança de polaridade de DCEP para DCEN nos eletrodos E6011 e E6013 causou uma diminuição no diâmetro médio das gotas e um aumento no número de respingos.

- A mudança de polaridade de DCEP para DCEN no eletrodo E7018 causou um aumento no diâmetro médio das gotas e um aumento no número de respingos.

- A porosidade no metal de solda começa a se formar na gota durante seu crescimento na ponta do eletrodo.

66

As observações feitas por BRANDI et al (1991) confirmaram a teoria criada por LARSON (1942) que propôs o modelo da expansão de uma bolha de gás no interior da gota durante o seu crescimento e transferência no arco elétrico. A princípio, este mecanismo seria essencial para soldagem na posição sobre cabeça. O modelo foi concebido com o objetivo de explicar observações feitas em trabalhos anteriores nos quais a soldagem fora da posição só ocorria com alma de eletrodos de aços efervescentes. Seguindo a seqüência de eventos mostrada na Figura 2.27, o modelo previu que, no início do crescimento da gota metálica na ponta do eletrodo, uma bolha de gás é gerada no interior da gota por meio de reações químicas e começa a se expandir (a) e (b). Na seqüência, a pressão interna gerada pela bolha de gás promove a explosão da gota antes da ocorrência do curto-circuito(c) e (d) ou, em outra situação, a explosão acontece apenas após a ocorrência do curto-circuito (e) e (f).



Figura 2.27 - Mecanismo de transferência do metal de solda proposto por LARSON (1942)

Hoje se sabe que a presença da bolha de gás no interior da gota metálica não é essencial para que a mesma seja transferida através do arco na posição sobre cabeça. A força de arraste do plasma é responsável por vencer a força de gravidade e fazer com que a gota

suba em direção a peça. Entretanto, pesquisadores como BRANDI et al (1991) e PEREZ e LIU (2006) encontraram fortes evidências de que geração da bolha de gás no interior de gotas prevista LARSON (1942) acontece em soldas feitas com eletrodos revestidos tanto ao ar como em ambiente aquático. A Figura 2.28 mostra a fotografia de uma gota presa na ponta de um eletrodo revestido em soldas feitas em disco de cobre giratório (BRANDI et al,1991) e a Figura 2.29 mostra a seção transversal de gotas coletadas através da fusão de eletrodos revestidos do tipo E7018 utilizando soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (TIG). Em ambas, nota-se o grande volume de gás em relação ao tamanho das gotas. A maior corrente (140 Ampéres) no arco TIG usada por PEREZ e LIU (2006) produziu gotas menores e estas, por sua vez, apresentaram menor porosidade interna, concordando com as observações feitas por BRANDI et al (1991). A Figura 2.30 mostra o modelo criado por BRANDI et al (1991) que propôs que a explosão da gota durante o curto-circuito é provocada por forças compressivas geradas pela ação conjunta do fluxo de metal líquido no interior da gota, da pressão de vapor metálico (Fj) e do efeito pinch (Fc).



Figura 2.28 – Macrografía da ponta do eletrodo e do cone formado pelo revestimento mostrando o poro no interior da gota metálica (BRANDI et al,1991)

A presença de poros na ponta dos eletrodos e nas gotas após a solidificação é um forte indício de que os gases formadores de porosidade nas soldas molhadas podem ser transferidos no interior das gotas durante sua formação e transferência. Para que seja possível reduzir a

porosidade das soldas molhadas é essencial estudar e entender o mecanismo de formação de porosidade no interior das gotas metálicas.



(a) (b) Figura 2.29 – Seção transversal com os valores de porosidade média de gotas coletadas durante a soldagem ao ar com corrente de (a) 90 A e (b) 140 A (PEREZ e LIU, 2006)



Figura 2.30 – Modelo mostrando o surgimento de forças compressivas na gota causadas pelo fluxo metálico, pressão de vapor metálico (Fj) e pelo efeito pinch (Fc) (BRANDI et al,1991).

2.7 - Consumíveis para Soldagem Subaquática

Pesquisadores avaliaram, em soldagem subaquática molhada, diversos tipos comerciais de eletrodos revestidos desenvolvidos para soldagem ao ar.

WEST et al (1990) testaram eletrodos ferríticos E7014 e E6013, e eletrodos de aço inoxidável austenítico E309-16 e E310-16. Entre os eletrodos ferríticos testados, o E7014 (eletrodo rutílico com pó de ferro) apresentou a melhor soldabilidade. Os depósitos de aço inoxidável apresentaram trincas a quente no passe de raiz.

GOOCH (1983) testou diversos tipos comerciais de eletrodos revestidos. Eletrodos rutílicos e rutílicos-ácidos exibiram melhor estabilidade de arco e aparência do cordão de solda. Eletrodos oxidantes (óxido de ferro) produziram soldas com menor quantidade de hidrogênio difusível e a menor ocorrência de trincamento por hidrogênio. Eletrodos a base de

níquel também apresentaram baixa ocorrência de trincas. Eletrodos de aço inoxidável austenítico, por outro lado, produziram depósitos martensíticos de dureza elevada com trincamento por hidrogênio, ou depósitos austeníticos com trincas de solidificação.

O principal problema de eletrodos básicos é a instabilidade do arco elétrico. Eletrodos com revestimento rutílico, básico ou celulósico apresentaram trincamento por hidrogênio no metal de solda e na ZTA, mesmo os feitos especificamente para soldagem subaquática.

SILVA e HAZLETT (1971) testaram eletrodos E6013, E7024 e E6027 utilizando um dispositivo de soldagem por gravidade a 0,9 m de profundidade e concluíram que os eletrodos com pó de ferro (E7024) foram mais fáceis de usar, produziram arco mais estável, apresentaram maior taxa de deposição que os eletrodos comerciais E6013 e E6027.

Em soldagem subaquática, o metal de solda obtido com eletrodos rutílicos apresenta maior tenacidade e resistência à tração em comparação com os eletrodos oxidantes comerciais. As propriedades mecânicas inferiores do metal de solda desses eletrodos estão relacionadas ao baixo teor de Mn, C, e Si, resultante do caráter oxidante do revestimento. A composição química típica de soldas depositadas por eletrodos oxidantes é de aproximadamente 0,05% de C em peso, e menos do que 0,01% em peso de Si e Mn. Um eletrodo rutílico, por outro lado, deposita soldas com teores típicos de 0,1% de C, 0,1% de Si e 0,4% de Mn em peso. Eletrodos rutílicos produziram metal de solda com elevado teor de hidrogênio difusível (~90ml/100g), enquanto eletrodos oxidantes apresentaram teores bem mais baixos (~15ml/100g) como pode ser visto na Figura 2.31.



Figura 2.31 - Variação do teor de hidrogênio no metal de solda para eletrodos básicos, rutílicos e oxidantes (GOOCH, 1983)

De uma maneira geral, as pesquisas que promovem alterações e adaptações no revestimento de eletrodos rutílicos para soldagem subaquática tem como objetivo principal reduzir a quantidade de hidrogênio difusível aprisionado no metal de solda.

Os pesquisadores que desenvolvem eletrodos oxidantes fazem adição controlada de elementos de liga termodinamicamente mais estáveis que seus óxidos com o objetivo de melhorar a resistência mecânica à tração e da tenacidade do metal de solda (FILHO et al, 2005).

2.7.1 - Eletrodos com Revestimento do Tipo Rutílico

Grande parte dos esforços para desenvolvimento de melhores consumíveis para a soldagem subaquática molhada tem sido dedicada aos eletrodos com revestimento à base de rutilo (TiO₂).

SANCHEZ-OSIO et al (1993) investigaram a adição de titânio, boro e carbonato de cálcio em eletrodos em revestimentos a base de rutilo (TiO₂).

A adição de Titânio e Boro ao revestimento de eletrodos rutílicos, utilizados para realização de cordões sobre chapa, produziu uma microestrutura contendo até 60% de ferrita acicular. Esse constituinte microestrutural é mais desejado no metal de solda, devido ao fato de promover melhora das propriedades mecânicas do mesmo em relação a uma microestrutura formada por ferrita primária grosseira, que é predominante em soldas molhadas com eletrodos rutílicos.

A adição de carbonato de cálcio em valores de 9 a 12% reduziu a porosidade de 2 para 1% em soldas feitas à 9 m de profundidade.

ROWE et al, (2001) e (2002) adicionaram manganês (Mn), titânio (Ti), boro (B) e terras raras ao revestimento de eletrodos rutílicos testados em profundidades de até 91 m. A adição apenas de manganês não produziu o aumento esperado no teor desse elemento no metal de solda. Quando o manganês foi adicionado juntamente com titânio foi possível controlar o teor de Mn no metal de solda. Adições em níveis apropriados de Ti-B produziram uma microestrutura contendo 60-90% de ferrita acicular em profundidade de até 90 metros. A quantificação microestrutural foi feita em amostras removidas do topo dos últimos cordões de soldas feitas em chanfro. Análises feitas na região reaquecida na seção transversal mostraram que a adição de Ti e B promoveu um maior refinamento dos grãos refundidos. O Ti e o B, por serem excelentes desoxidantes, diminuem significativamente o teor de oxigênio no metal de solda, preservando o manganês e o silício, que são elementos importantes para a formação de uma microestrutura tenaz e resistente. Tendo o Ti um caráter mais oxidante que o B, evita que esse último seja totalmente oxidado. O B, por possuir pequeno raio atômico, tem um poder
endurecedor muito inferior ao seu efeito sobre a temperabilidade. Esse elemento segrega nos contornos dos grãos austeníticos, reduzindo significativamente a energia livre nesses locais. Essa redução da energia livre retarda a nucleação de ferrita pró-eutetóide, favorecendo a nucleação de ferrita acicular e poligonal (FILHO et al, 2005).

A porosidade do metal de solda foi reduzida com a adição ao revestimento de altos teores de ferro-manganês e baixos teores de titânio, boro e terras raras.

MAZZAFERRO (1998) avaliou a adição de rutilo, alumínio e carbonato de cálcio a um revestimento de base rutílica em profundidades de 5, 12,5 e 20 m. Como resultado, observou-se que o aumento do teor de rutilo para 40 % provocou uma redução na porosidade média nas três profundidades testadas. A adição de 16 % de CaCO₃ reduziu a porosidade para as soldas feitas a 20 metros e aumentou a porosidade das soldas feitas a 12,5 metros. A adição de alumínio provocou um aumento da porosidade em todas as profundidades testadas.

A adição de níquel ao revestimento do tipo rutílico promove um aumento na tenacidade, sendo que os melhores resultados foram encontrados para teores de níquel de aproximadamente 3% (GUERRERO, 2002).

As técnicas empregadas para a redução do hidrogênio difusível são baseadas na deposição de passe de revenimento e realização de tratamento térmico pós-soldagem (WERNICKE e POHL, 1998), (ROWE e LIU, 2001), (IBARRA et al, 1991), (SZELAGOWSKI et al, 1992). Na realidade essas técnicas são de difícil execução e dependem muito da habilidade do soldador e das condições de soldagem no momento do reparo.

Normalmente a adição de elementos desoxidantes como Ti e Mn reduz a porosidade, pois remove oxigênio do sistema e evita a formação de CO. Por outro lado, ocorre a formação de inclusões de óxidos desses elementos e, devido às altas taxas de resfriamento que ocorrem no metal de soldas molhadas, não há tempo suficiente para que os óxidos deixem o metal de solda e se juntem a escória. Assim, ao se reduzir a porosidade com elementos oxidantes aumenta-se a quantidade de inclusões no metal de solda dos eletrodos rutílicos o que faz com que seja muito difícil alcançar valores aceitáveis de alongamento no teste de tração e qualifícar o material nos testes de dobramento.

2.7.2 - Eletrodos com Revestimento do Tipo Oxidante

Eletrodos de óxido de ferro e a base de níquel têm sido estudados e desenvolvidos devido ao baixo nível de hidrogênio difusível que apresentam no metal de solda, tornando se assim uma alternativa aos eletrodos rutílicos, (POPE et al, 1995a) (ROWE e LIU, 2001).

Por outro lado, as propriedades mecânicas são bem inferiores quando comparadas com as do metal de solda produzido pelos eletrodos rutílicos. Devido ao caráter oxidante do revestimento, a microestrutura do metal de solda é predominantemente constituída de ferrita pró-eutetóide e poligonal, de característica pouco tenaz (FILHO et al, 2005b). Na tentativa de melhorar as propriedades mecânicas desse tipo de eletrodo a adição de níquel ao revestimento tem sido amplamente estudada. O níquel (Ni) promove um aumento na resistência mecânica e tenacidade do cordão de solda (POPE et al, 1995a). A estabilidade termodinâmica do Ni permite que sua transferência se dê através do arco elétrico sem a formação de NiO. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que os valores máximos de tenacidade e de resistência à tração ocorreram para teores próximos a 2% de Ni no metal de solda, Figura 2.32. Por outro lado, a dureza variou de maneira uniforme e linear com o teor de Ni. A queda na tenacidade e resistência a tração observada para teores de Ni acima de 2,5% foi atribuído ao trincamento por solidificação. Análise feita em MEV (microscópio eletrônico de varredura) constatou grande quantidade de trincas intergranulares (de solidificação).



Figura 2.32 – Variação da energia de impacto Charpy V a 0° C e do teor de oxigênio no metal de solda em função do teor de níquel (POPE et al, 1995a)

Os valores de tenacidade encontrados foram equivalentes aos de metais de solda depositados por eletrodos rutílicos.

MEDEIROS (1997) testou vinte tipos de eletrodos oxidantes com quantidades de Fe_2O_3 crescentes no revestimento (variando de 0 a 70% em peso). Paralelamente a isso, a fração molar de CaO/SiO₂ nos fluxos variou de 0,05 a 0,35, independente das adições de Fe_2O_3 . Soldas tipo cordão sobre a chapa foram efetuadas em profundidade de 0,27m. Nessa investigação, a interface metal/escória foi identificada como responsável pelo controle da quantidade de hidrogênio no metal de solda. Difração de raios-X realizada em diferentes escórias mostrou que os menores valores de hidrogênio difusível estavam associados com a presença de faialita (2FeO.SiO₂).

Em comparação aos eletrodos rutílicos, os eletrodos oxidantes apresentam valores superiores de alongamento e estricção, mas uma baixa tenacidade e mais alta porosidade, provavelmente devido à formação de CO no metal de solda líquido.

2.7.3 - Eletrodos Tubulares Revestidos

Eletrodos tubulares revestidos diferem basicamente dos eletrodos revestidos normais apenas por ter uma cavidade interna como mostrado na Figura 2.33. Nesse espaço interno é possível adicionar elementos de menor energia livre de formação de óxidos que o carbono em temperatura próximo a 1900 ⁰C, que é a temperatura normalmente reportada para a poça de fusão de eletrodos revestidos (GRONG, 1997). A adição de elementos como Alumínio (Al) e Cálcio (Ca) pode teoricamente evitar a formação de CO nas gotas metálicas e no arco elétrico das soldas molhadas, uma vez que esses dois elementos tem menor energia de formação, como pode ser visualizado no gráfico que mostra as diferentes energias de formação de diferentes óxidos em função da temperatura mostrado na Figura 2.12.

A adição de Al ao revestimento de eletrodos revestidos aplicados em soldagem molhada foi estudada por MAZZAFERRO (1998), os resultados mostraram que a porosidade do metal de solda aumentou em todas as profundidades testadas. Uma vez que o alumínio é um poderoso desoxidante (SATO e KUWANA, 1995) e a formação de CO na gota metálica e na frente de solidificação favorece a nucleação de poros (CAMPBELL, 2001) (LARSON, 1942), esperava-se que a adição de alumínio reduzisse a porosidade. Uma explicação para o aumento da porosidade com a adição de alumínio feita por MAZZAFERRO é que o alumínio pode reagir com outros elementos presentes no revestimento segundo as seguintes reações:

$$3/2\text{TiO}_2 + 2\text{Al} === 3/2\text{Ti} + \text{Al2O}_3,$$
 (I)

$$3/2SiO_2 + 2Al === 3/2Si + Al2O_3,$$
 (II)

$$Fe_2O_3 + 2AI == 2Fe + AI_2O_3, \tag{III}$$

$$3FeO + 2A1 == 3Fe + Al_2O_3, \qquad (IV)$$

$$2Al + 3/2O_2 == Al_2O_3,$$
 (V)

Nota-se que se essas reações acontecerem antes que o alumínio alcance a atmosfera do arco não haverá desoxidação na gota metálica nem na poça de fusão. Alem disso, as reações entre o Al e outros elementos como Ti, Si, e Fe irá favorecer a oxidação do Carbono, uma vez que esse tem menor energia de ativação a altas temperaturas em comparação com esses outros elementos. Assim a reação que deve ocorrer no arco elétrico, no interior das gotas metálicas e na poça de fusão é a V. Dessa maneira, a formação de CO será impedida e a porosidade causada por esse gás evitada. A aplicação de eletrodos tubulares revestidos permite evitar a ocorrência das reações I a IV.



Figura 2.33 – Seção transversal de um eletrodo tubular revestido (PESSOA, 2006)

De maneira geral, o desenvolvimento de eletrodos revestidos para soldagem subaquática molhada é focado na variação de formulações do revestimento e na melhoria da técnica de soldagem aplicada. Observa-se a necessidade de avaliação da influência da transferência metálica na porosidade das soldas molhadas. Existe também a necessidade de se avaliar a influência da adição de alumínio, de modo separado do revestimento externo, com o objetivo de se entender como se comporta a porosidade de soldas molhadas com a ocorrência de reações de oxidação que produzem inclusões não metálicas (oxidação do alumínio) e que produzem gases (oxidação do carbono).

CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS

Estudos anteriores feitos por BRACARENSE (1994) e POPE (1995) mostraram que o teor de oxigênio ao longo do cordão de solda, tanto feitas ao ar quanto dentro d'água, é variável. Deduz-se que esta alteração afete diretamente a porosidade supostamente causada pelo surgimento de CO no metal de solda. A mudança na polaridade da corrente promove uma mudança no mecanismo de transferência de hidrogênio no metal de soldas molhadas (MEDEIROS, 1997). Também se espera que essa alteração influencie a porosidade de soldas molhadas uma vez que o H₂ é o gás mais presente nos poros de soldas molhadas.

Com o objetivo de entender e correlacionar as prováveis variações de porosidade em função das variáveis descritas anteriormente, a metodologia adotada nesse trabalho foi desenvolvida em 4 etapas básicas, a saber:

 1 – Estudos feitos com cordão sobre chapa usando diferentes eletrodos, profundidades e polaridades com o objetivo de identificar variações de porosidade e correlacionar essas variações à parâmetros mensuráveis.

2 – Estudos feitos com soldas em chanfro em V em diferentes profundidades com o objetivo de comprovar se as relações observadas nas soldas feitas sobre chapa se repetiam em uma situação mais real do processo de soldagem molhada.

3 – Análise das variáveis que podem ser alteradas durante a realização de um cordão de solda com eletrodo revestido, utilizando-se de mecanismos de soldagem por gravidade, com o objetivo de avaliar qualitativamente a influência de cada fator nos parâmetros que afetam a porosidade.

4 – Desenvolvimento de um eletrodo tubular revestido com o objetivo de se adicionar um elemento com menor energia de formação de óxido do que o CO para que fosse possível entender a influência da formação de CO no metal líquido durante sua transferência ou solidificação na porosidade ao longo do cordão de soldas molhadas. – O desenvolvimento do eletrodo tubular revestido foi realizado na Colorado School of Mines (CSM) nos E. U. A. em um programa de estágio de doutorando no exterior financiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo LRSS (Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG) e pelo CWJCR (Center for Welding, Joining and Coating Research da CSM).

3.1 – Estudo Feito com Cordões Sobre Chapa

3.1.1 – Material Utilizado

3.1.1.1 - Tipo de Corpo de Prova

Utilizou-se o aço ASTM A-36 (tipo de aço normalmente aplicados em plataformas marítimas) com limite de escoamento de 250 MPa e limite máximo de resistência de 400-550 MPa.

A composição química do aço ASTM A-36 e também dos principais elementos do aço da alma dos eletrodos utilizados nesse trabalho está mostrada na Tabela 3.1. O valor de carbono equivalente calculado para o aço A-36 foi de 0,27.

Tabela 3.1 – Composição química do aço e da alma dos eletrodos utilizados nos testes com cordão sobre chapa

	Elemento (%)												
Aço	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Nb	Al	Ti
A-36	0,14	0,22	0,76	0,014	0,009	0,0	0,01	0,0	0,003	0,008	0,002	0,03	0,008
Alma	0,05	0,07	0,33										

Os corpos de prova para deposição sobre chapa tinham 12,7mm de espessura, 100,0 mm de largura e 250,0 mm de comprimento, Figura 3.1.



Figura 3.1 - Corpo de prova para solda sobre chapa, cotas em mm.

3.1.1.2 – Tipo de Consumível

Foram utilizados eletrodos revestidos comerciais E6013 e E7018 fornecidos pela ESAB, com alma de 5,0 mm de diâmetro. O E7018 tinha 350 mm de comprimento e o E6013 250mm de comprimento. Os eletrodos foram protegidos com verniz vinífico Tubolit VVE 815 para evitar a decomposição do revestimento durante a soldagem molhada.

A Tabela 3.2 apresenta a formulação típica usada na produção dos revestimentos dos eletrodos utilizados nos testes sobre chapa.

	Tipo de eletrodo				
Composto (%)	E6013	E7018			
Argila	-	-			
Carbonato de cálcio	2.7	36.4			
Celulose	12.0	-			
Feldspato	14.3	-			
Ferro-Manganês	5.6	4.6			
Ferro-Silício	33.0	1.8			
Fluorita	-	-			
Mica	7.7	-			
Pó de ferro	-	27.4			
Dióxido de titânio	10.3	3.6			
Silicato de potássio	18.6	16.6			
Silicato de sódio	-	-			
Titanato de Potássio	12.3	-			
Zircônio	13.8	2.7			
Óxido de magnésio	-	6.9			
Sílica	-	-			
Alumina	2.7	-			

Tabela 3.2 – Formulação típica de eletrodos comerciais E6013 e E7018

Fonte: WELDING ENGINEER (1998).

3.1.1.3 - Tipo de Água

A água utilizada nos experimentos foi do tipo doce utilizada para consumo humano e foi constantemente (após 4 ou 5 soldagens) substituída por água nova.

3.1.2 - Equipamento Utilizado

3.1.2.1 – Câmara para Soldagem Hiperbárica

Para simulação das operações de soldagem molhada nas profundidades de 50 e 100 m foi utilizada uma câmera hiperbárica localizada no LRSS que permite operar com pressões de trabalho de até 20 atm.



A Figura 3.2 mostra uma fotografia da câmara utilizada.

Figura 3.2 – Fotografia da câmara para soldagem hiperbárica

Para produção de soldas utilizando a câmara hiperbárica, realiza-se a seguinte seqüência de operações:

- 1. Posicionamento do eletrodo e a chapa no mecanismo de soldagem por gravidade;
- 2. Posicionamento do mecanismo de abertura do arco elétrico;
- 3. Fechamento da tampa do vaso enroscando os parafusos;
- 4. Enchimento do tanque com água por meio do acionamento de uma bomba;
- 5. Pressurização da câmara com ar comprimido na pressão desejada;
- 6. Seleção dos parâmetros de soldagem na máquina de solda;
- 7. Preparação do software para gravação dos sinais de tensão e corrente;
- Ligação da fonte de soldagem para abertura do arco, realização da solda e aquisição dos dados;
- 9. Ao final da solda desconecta-se os cabos e desliga-se a máquina de solda;
- 10. Despressuriza-se a câmara retirando-se o ar comprimido;

11. Esvazia-se o vaso utilizando-se a bomba para enviar a água de volta ao reservatório;

82

- 12. Reposiciona-se o mecanismo de soldagem retirando-se a parte restante do eletrodo;
- 13. Remove-se a placa de aço com o cordão de solda para limpeza e análises.

3.1.2.2 – Dispositivo de Soldagem por Gravidade com Eletrodos Revestidos

As soldas foram realizadas através de um dispositivo mecanizado para soldagem com eletrodos revestidos (Pat. Req. Nº PJ 001331) (Figura 3.3). Esse dispositivo tem as seguintes características:

- Permite o uso de eletrodos com diâmetro de 2,5 a 6,0 mm e comprimento de 450 mm.
- Velocidade de soldagem variável em função da taxa de fusão do eletrodo e da abertura dos ângulos α e β mostrados na Figura 3.4.
- Velocidade de descida do eletrodo variável em função da taxa de fusão do eletrodo e dos ângulos α e β mostrados na Figura 3.4.
- Permite a regulagem do ângulo de ataque do eletrodo (θ) .
- Pelo fato de ser um mecanismo que utiliza a gravidade como fonte de energia, esse dispositivo apresenta boa repetibilidade. Uma vez mantidos fixos os ângulos α, β e θ, juntamente com a taxa de fusão, é possível fazer cordões de solda com grande semelhança, quantas vezes for necessário.
- O diâmetro do eletrodo não pode ser muito pequeno, pois, devido ao peso do carro, pode acorrer flambagem do arame provocando alteração no ângulo de ataque (θ) e ruptura da proteção e do próprio revestimento.
- Para cada configuração dos ângulos α e β existem valores ótimos de taxa de fusão que permitem o equilíbrio entre as velocidades de soldagem e de mergulho do eletrodo de modo que se tenha um comprimento de arco praticamente constante.



Figura 3.3 – Dispositivo de soldagem por gravidade



Figura 3.4 – Ângulos e componentes do dispositivo de soldagem por gravidade

3.1.2.3 – Fonte de Soldagem

Foi utilizada uma fonte de soldagem eletrônica – LINCOLN ELECTRIC, modelo POWER WAVE 450. Esta fonte tem como tensão de circuito aberto de 75V e faixa de corrente para eletrodos revestidos 30 - 450A.

3.1.2.4 – Sistema de Aquisição de Dados

Foi utilizada uma placa de aquisição de dados de 16 canais da marca Iotech, modelo DaqBoard/2000 devidamente calibrada. A monitoração foi realizada com uma taxa de aquisição de 250 leituras por segundo. A Figura 3.5 apresenta o desenho esquemático do sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho.



Figura 3.5 – Esquema do sistema de aquisição de dados

Para a monitoração da corrente de soldagem e da tensão do arco foi utilizado um condicionador de sinais. Este equipamento foi projetado para minimizar ruídos e dividir por 10 o sinal da corrente e da tensão, medidos, respectivamente, por um sensor Hall com capacidade de 500 A e sinal de saída 5 V, fundo de escala, e pela diferença de potencial dos pólos positivo e negativo da máquina de solda.

3.1.3 – Procedimento Experimental

Os valores de corrente e o ângulo de soldagem foram selecionados em testes preliminares. Esses foram realizados com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros de soldagem tendo como base a estabilidade do arco, porosidade e aparência do cordão de solda. As soldas foram feitas em profundidades simuladas de 50 e 100 metros utilizando os valores de corrente mostrados na com ângulo de soldagem (θ) de 60° e o ângulo α de 70°.

50 m	etros	100 metros		
E6013	E6013 E7018		E7018	
260	280	280	280	

Tabela 3.3 - Valores de corrente aplicados para os testes a 50 e 100 metros (ampéres)

Para cada condição (tipo de eletrodo e profundidade) foram feitos seis cordões sobre chapa com polaridade inversa (DCEP) e três com polaridade direta (DCEN).

Todos os cordões foram seccionados em três pontos diferentes, a 20 mm do início, no meio e a 40 mm do final, como mostrado na Figura 3.6. As amostras produzidas foram utilizadas para obtenção de imagens para produção de macrografias, medição da porosidade e para a realização de análise química do reforço.



Figura 3.6 – Metodologia para retirada das amostras nos testes de deposição sobre chapa

3.1.3.1 – Análise da Estabilidade do Arco e da Transferência Metálica

A estabilidade do arco para cada tipo de eletrodo foi determinada por meio da análise dos oscilogramas de corrente e tensão e calculada por meio da Equação 2.9. Também foram feitas medições do valor da tensão, desvio padrão da tensão e da quantidade de curtoscircuitos em intervalos de 10 segundos no início, meio e final da solda (a partir dos dois primeiros segundos e anterior aos últimos dois segundos).

86

3.1.3.2 – Análise da Geometria do Cordão de Solda

Para medição da largura, reforço, e penetração na seção transversal das soldas foi utilizado um programa de análise de imagens devidamente calibrado.

3.1.3.3 – Análise da Porosidade do metal de solda

Para medição de porosidade foi utilizado o método macrográfico e um programa chamado Quanticov. As amostras foram fotografadas em dois estágios:

- Polidas em lixa de granulação número 600 para obtenção de imagens para contagem, localização e medição da área dos poros.
- Atacadas com nital 2% para obtenção de imagens para medição da área da seção transversal do cordão de solda.

A porosidade calculada foi o resultado da proporção entre a área dos poros e a área da seção transversal do cordão. Para cada condição testada (tipo de eletrodo, polaridade e profundidade), no mínimo, três macrografias diferentes foram realizadas.

3.1.3.4 – Análise Química

A medição de carbono foi feita em três amostras retiradas do início, meio e final das soldas como mostrado esquematicamente na Figura 3.6. As amostras foram amassadas com marreta para permitir que os gases no interior dos poros escapassem. Utilizou-se um equipamento LECO CS-400.

3.2 - Estudo Feito com Cordões em Chanfro

Os equipamentos utilizados nessa etapa foram os mesmos utilizados para a realização dos ensaios com cordões sobre chapa. A água utilizada nos testes, o procedimento adotado para a realização das soldas e aquisição de sinais também foram idênticos. As diferenças em relação ao material e aos métodos aplicados foram a utilização apenas do eletrodo E6013 com corrente em polaridade inversa (devido à menor porosidade encontrada com essa porosidade no estudo feito com cordões sobre chapa), metodologia para a remoção das amostras e realização de ensaios mecânicos. O principal objetivo nessa etapa foi verificar se o comportamento da porosidade ao longo do cordão, observado nos testes feitos apenas com cordão sobre chapa, se repetia nas soldas em chanfro. Além disso, com os ensaios mecânicos, foi possível correlacionar propriedades mecânicas com a porosidade ao longo da solda em chanfro.

3.2.1- Tipo de Corpo de Prova

Foi utilizado o mesmo aço ASTM A-36 utilizado nos testes com cordão sobre chapa. Os corpos de prova para deposição em chanfro V a 45° tinham 12,7mm de espessura, 160,0mm de largura, 250,0mm de comprimento e abertura de raiz de 6,0mm com cobre-junta, mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Desenho esquemático do corpo de prova utilizado para a produção das soldas nos testes com soldas em chanfro

3.2.2 – Tipo de Consumível

Os consumíveis utilizados foram os do tipo E6013 idênticos ao utilizado nos testes com cordão sobre chapa.

3.2.3 – Procedimento Experimental

Utilizou-se polaridade inversa (DCEP), com velocidade de soldagem variando entre 4,0 e 5,0mm/s dependendo do valor de corrente e profundidade.

Foram realizados, em média, 10 passes para preenchimento do chanfro, todos começando e terminando nos mesmos locais. Foram feitas três chapas para cada profundidade. Após a realização das soldas, as chapas foram radiografadas e cortadas para a preparação dos corpos de prova na ordem mostrada na Figura 3.8.



Figura 3.8 – Metodologia de retirada das amostras da chapa soldada

Todos os corpos de prova para os ensaios mecânicos foram produzidos seguindo as orientações da norma ASME de 1998 com as dimensões em milímetros mostradas nas Figuras 3.9 a 3.11.

Os ensaios de dobramento foram feitos com cutelo de 85,7mm e os ensaios charpy foram feitos a 0° C.



Figura 3.9 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de dobramento



Figura 3.10 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio charpy "sub size"



Figura 3.11 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração

A porosidade foi calculada na seção transversal dos corpos de prova de dobramento nas chapas feitas a 50 e 100 m de profundidade utilizado-se o método macrográfico.

3.2.3.1 – Análise Química

Foi feita utilizando se o método de difração de raios x na seção transversal de amostras removidas do início e do final das soldas em chanfro.

3.3 – Estudo das Variáveis e Características que Podem se Alterar Durante a Soldagem Molhada

Durante a soldagem ao ar com eletrodos revestidos, importantes características tanto do eletrodo quanto do metal de base podem ser alteradas. Essa parte do trabalho tem por objetivo analisar a influência das alterações nessas características sobre a porosidade ao longo do cordão de solda. As principais propriedades que podem alterar durante a soldagem são a temperatura do eletrodo, o comprimento do eletrodo, a temperatura do metal de base e a geometria do eletrodo devido à influência do dispositivo de soldagem por gravidade (flexão). Cada uma dessas características altera de modo direto ou indireto propriedades do processo que podem afetar significativamente a porosidade final do metal de solda. O diagrama mostrado na Figura 3.12 mostra como cada uma das propriedades citadas altera de modo direto ou indireto variáveis que podem afetar a porosidade das soldas molhadas.



Figura 3.12 – Características do eletrodo que podem ser alteradas durante a soldagem e suas respectivas influências sobre o processo

3.3.1– Análise da Temperatura do Eletrodo Durante a Soldagem

Utilizou-se termopares soldados por descarga capacitada na alma dos eletrodos E6013 e E7018 a 40 mm do final dos mesmos. Foram utilizados termopares do tipo K (cromel/alumel) de 0,2 mm de diâmetro, com faixa de operação de -100 a 1370 °C. A união dos fios do termopar foi feita utilizando o processo de soldagem com chama oxi-acetilênica.

A Figura 3.13 exemplifica a união dos fios do termopar tipo K.



Figura 3.13 – União por soldagem dos fios do termopar tipo K.

As soldas foram feitas à 0,5 m de profundidade utilizando-se os mesmos parâmetros de soldagem aplicados nas soldas sobre chapa e em chanfro e a taxa de aquisição dos dados foi de 10 Hz.

3.3.1.1 – Procedimento para Produzir um Pré-Aquecimento no Eletrodo

Uma vez que a temperatura do eletrodo é o fator que altera o maior número de variáveis do processo, decidiu-se testar a influência desse parâmetro sobre a porosidade das soldas molhadas. Aplicou-se um curto-circuito no eletrodo antes da soldagem, utilizando uma fonte transformadora auxiliar e um pino de cobre soldado na ponta do eletrodo. A corrente selecionada na fonte auxiliar foi de 300 ampéres por 20 segundos. Após esse tempo, a fonte auxiliar foi desligada e a fonte principal ligada para abertura instantânea do arco. As soldas com eletrodo pré-aquecido foram realizadas a 50 metros de profundidade. O mapeamento da temperatura da alma do eletrodo e os parâmetros de soldagem aplicados foram iguais aos utilizados nos testes feitos com cordões sobre chapa. A fotografia da Figura 3.14 mostra um eletrodo E6013 preparado para o procedimento de pré-aquecimento.



Figura 3.14 – Eletrodo revestido E6013 alterado para realização do pré-aquecimento e mapeamento da temperatura durante a soldagem

3.3.2 - Análise da Temperatura da Chapa Durante a Soldagem Molhada

Foram feitos experimentos para medição dos ciclos térmicos em chapas similares às utilizadas para a realização dos testes com cordões sobre chapa. As chapas foram perfuradas em três pontos diferentes onde foram fixados termopares como mostrado na Figura 3.15. A distância (d) entre os termopares e a superfície da chapa foi de 3,0 e 5,0 mm, como mostrado na Figura 3.16.



Figura 3.15 – Posição dos termopares na chapa, cotas em mm.



Figura 3.16 - Esquema mostrando a distância (d) entre a poça de fusão e o ponto de fixação do termopar

Foram feitos cordões sobre chapa utilizando eletrodo E-6013 à profundidade de 0,5 metro com corrente de soldagem de 180 A. Os cordões foram feitos exatamente sobre os termopares utilizando o sistema de soldagem por gravidade descrito no item 3.1.2.2.

Foram utilizados termopares do tipo K e a taxa de aquisição dos dados foi de 10 Hz.

3.4 - Testes Feitos com Eletrodos Tubulares Revestidos

Os eletrodos tubulares revestidos foram feitos utilizando fluxo E6013 fornecido pela ESAB – Brasil para extrusão do revestimento externo e duas composições químicas diferentes no fluxo interno. O enchimento da cavidade com o fluxo interno foi feito por vibração do eletrodo na posição vertical após a extrusão do revestimento externo, utilizando o mecanismo mostrado na Figura 3.17. A taxa de compactação obtida com esse método foi da ordem de 70% em peso e problemas de homogeneização foram observados e minimizados com a alimentação de fluxo em pequenas quantidades.



Figura 3.17 - Mecanismo vibratório utilizado para encher os eletrodos tubulares com os fluxos internos

O eletrodo (F), com fluxo interno composto por 100% de pó de ferro, foi utilizado como parâmetro de comparação uma vez que tende a ter comportamento similar às soldas feitas com eletrodos convencionais (de alma sólida). O segundo fluxo (A5) produzido foi uma

Eletrodo	Composição	do fluxo interno (%)	Fator de adição Q* (%)
	Pó de ferro	Pó de alumínio	
F	100	0	0
A5	50	50	4,8

Tabela 3.4 - Composição química dos dois eletrodos tubulares revestidos testados

*O fator de adição Q indica o teor do elemento adicionado dividido pelo teor total de ferro da alma e do fluxo interno.

Os tubos utilizados tinham diâmetro externo de 4,0mm e espessura de parede de 1,0 mm. As soldas foram feitas a 50 m de profundidade utilizando um mecanismo de soldagem por gravidade e um vaso de pressão com capacidade para até 30 atm, mostrados na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Dispositivo de soldagem por gravidade (a) e vaso de pressão (b) utilizados no CWJCR na CSM

Três cordões sobre chapa, para cada condição, foram feitos utilizando uma fonte de soldagem HOBART de corrente constante com tensão em aberto de 100 volts. A corrente utilizada foi de 180 A em polaridade inversa. O ângulo de soldagem (θ) foi de 55° e o ângulo da haste (α) do dispositivo de soldagem foi ajustando em 90°. Os procedimentos para aquisição dos dados, retirada das amostras, medição de porosidade e análise química do metal de solda foram idênticos aos utilizados nos testes com cordão sobre chapa nas soldas feitas com eletrodos convencionais (não tubulares) E6013.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1- Testes com Cordão Sobre Chapa

4.1.1 - Inspeção Visual

Essa primeira análise das soldas teve como objetivo fornecer um indicativo de alterações morfológicas no cordão de solda que poderiam ser relacionadas com as variáveis alteradas nos testes (tipo de eletrodo, polaridade e profundidade). Também foram avaliadas as presenças de mordeduras, respingos e trincas superficiais.

O eletrodo E6013 mostrou-se mais sensível às alterações de polaridade da corrente e de profundidade de soldagem do que o eletrodo E7018. Foi claramente observado, como pode ser visualizado nas fotos das Figuras 4.1 a 4.4, que em polaridade inversa (DCEP) o E6013 produziu cordões de solda com melhor molhabilidade e menor número irregularidades superficiais e mordeduras do que em polaridade direta (DCEN). Também se observou, para as soldas feitas em DCEP, que com o aumento da profundidade os cordões de solda ficaram mais largos e com maior número de irregularidades superficiais.

O eletrodo E7018 não produziu cordões de solda com diferenças significativas quanto à mudança de polaridade. Independentemente da polaridade utilizada, as soldas produzidas com esse eletrodo apresentaram superfície muito irregular, caracterizada por uma morfologia indicativa de grande quantidade de poros internos e falta de molhabilidade (reforço exagerado em relação à largura). As soldas produzidas com o eletrodo E7018 tanto em DCEP quanto em DCEN apresentaram aparência superfícial semelhante às soldas feitas com o eletrodo E6013 em DCEN. Observou-se também que, para o E7018, o arco extinguiu-se mais facilmente durante a soldagem em DCEP do que em DCEN. Esse comportamento indica que o direcionamento do calor para o eletrodo em DCEP (o eletrodo é o anodo) produz um cone de revestimento muito grande que acaba produzindo um aumento do comprimento do arco e extinção do mesmo.

^{*} Os resultados apresentados nessa seção foram divulgados na forma de artigos publicados em revistas ou em congressos e estão listados em anexo.



Figura 4.1 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 50 m de profundidade em DCEP (a) e DCEN (b), direção de soldagem da esquerda para a direita.



Figura 4.2 - Cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 100 m de profundidade em DCEP (a) e DCEN (B), direção de soldagem da esquerda para a direita.



Figura 4.3 - Cordões de solda feitos com eletrodo E7018 em aço A-36 a 50 m em DCEP (a) e DCEN (B), direção de soldagem da esquerda para a direita.



Figura 4.4 - Cordões de solda feitos com eletrodo E7018 a 100 m em DCEP (a) e DCEN (B), direção de soldagem da esquerda para a direita.

4.1.2– Geometria do Cordão de Solda

A seção transversal do cordão de solda das amostras removidas seguindo o procedimento mostrado na Figura 3.6 foram polidas, atacadas com uma solução de nital a 2% e fotografadas. Os parâmetros medidos estão mostrados na Figura 4.5. Para cada cordão de solda foram analisadas três seções distintas, sendo o resultado apresentado a média dos valores obtidos. As Tabelas 4.1 e 4.2 mostram a variação desses parâmetros para cada tipo de eletrodo nas profundidades testadas.



Figura 4.5 – Metodologia para medição dos parâmetros geométricos do cordão de solda

	Polaridade	L (50m) + 0.1%	L (100m) + 0.1%	R(50m) + 0.1%	R(100m) + 0.1%	P (50m) + 1 5%	P (100m) + 1 5%
	Tolulluude	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
E-6013	(+)	12,2	13,2	3,0	3,6	2,9	3,4
	(-)	11,8	11,8	3,2	3,9	4,2	4,7
E-7018	(+)	13,0	14,1	4,2	4,3	3,6	3,4
	(-)	13,7	14,6	4,1	4,1	4,4	3,8

Tabela 4.1 - Parâmetros geométricos dos cordões de solda feitos a 50 e 100m.

Onde L é a largura, R o reforço e P a penetração do cordão de solda.

Em geral observou-se que o eletrodo E6013 produziu cordões de solda com parâmetros geométricos de acordo com o previsto no modelo idealizado por TSAI e MASUBUCHI (1977), mostrado na Figura 2.4. Ou seja, em DCEN esse eletrodo produziu cordões de solda com menor largura, maior reforço e penetração que em DCEP. Para as soldas feitas com o eletrodo E7018 apenas a penetração das soldas apresentou comportamento como previsto pelo modelo.

Comparando-se os eletrodos, nas soldas a 100m em DCEP, o E7018 apresenta maior penetração, enquanto que em DCEN esta é maior para o E6013. Para esse eletrodo, os valores de penetração foram 45 e 38 % em média maiores em DCEN do que em DCEP a 50 e 100m respectivamente, sendo essas proporções 21 % e 12 % para o E7018. A penetração foi sempre maior em DCEN, indicando que a posição do anodo e, conseqüentemente, a região de maior concentração de calor no arco, é efetiva na determinação da penetração dos cordões de solda feitos com o mesmo eletrodo e na mesma profundidade. Porém, o aumento da energia direcionada para o metal de base, quando esta é o anodo (DCEN), não é o único parâmetro que pode ser utilizado para se entender a penetração das soldas molhadas.

Segundo MALENE (1995), que testou adição de elementos exotérmicos ao fluxo de arames tubulares, o efeito Marangoni é mais influente na penetração de soldas feitas em altos valores de corrente do que excedentes de calor gerados por reações químicas. Ou seja, o fluxo de metal líquido na poça de fusão é mais importante que o fluxo de calor para o valor da penetração das soldas. O efeito Marangoni, que é determinado pelo fluxo de metal na poça de fusão, depende fortemente da concentração de oxigênio e enxofre no metal líquido (ALLEN, 1994). Variações na polaridade alteram a concentração de oxigênio na poça de fusão (MEDEIROS,1997) e esta, por sua vez, altera a concentração de oxigênio na mesma (FILHO, 2005). Assim, é provável que o fluxo de metal líquido na poça de fusão (efeito Marangoni) também esteja contribuindo para a maior penetração em soldas feitas em DCEN, uma vez que

nessa polaridade espera-se menor concentração de hidrogênio e, conseqüentemente maior concentração de oxigênio. O aumento no teor de oxigênio promove redução da tensão superficial (MILLS e KEENE, 1990) e esta variação promove um fluxo no metal de solda de modo a se ter maior penetração.

Com o aumento da profundidade de 50 para 100 m, a penetração aumentou para os cordões feitos com eletrodo E6013 indicando que o aumento da corrente com a profundidade (260 para 280 A), também feito para o E7018, e a maior constricção do arco influenciaram a penetração.

A correlação entre os parâmetros geométricos e os parâmetros de soldagem, mostrados na Tabela 4.2, permite entender melhor as variações observadas.

	Tensão - 50m	Tensão – 100m	Velocidade - 50 m	Velocidade - 100 m	
	(V)	(V)	\pm 0,5 (mm/s)	$\pm 0,5 \text{ (mm/s)}$	
E6013					
(+)	26,0	28,7	4,0	4,6	
(-)	23,5	27,2	3,6	4,2	
E7018					
(+)	34,1	34,5	4,5	5,2	
(-)	34,4	35,1	4,2	5,3	

Tabela 4.2 - Variação dos parâmetros de soldagem para os eletrodos E6013 e E7018 em valores médios

Para o eletrodo E6013, os valores médios de tensão para os cordões feitos em DCEN foram menores em relação aos produzidos em DCEP. Nota-se também que a velocidade de soldagem foi sempre menor em DCEN. Como a velocidade de soldagem é dependente da taxa de consumo, nota-se que essa é menor em DCEN porque, nesse caso, o calor é direcionado para a poça de fusão resultando em uma redução na taxa de consumo do eletrodo e, conseqüentemente, diminuição na velocidade de soldagem e comprimento do arco.

Valores de tensão menores implicam em comprimentos de arco menores e, conseqüentemente, mais concentrados devido à forma aproximadamente gaussiana do arco elétrico (GLICKSTEIN e FRIEDMAN, 1983) (GOLDAK et al, 1986). Isso explica a maior largura do cordão de solda em DCEP. Além disso, o aumento da tensão com a profundidade, provavelmente devido ao aumento da pressão interna do arco elétrico e ao aumento da instabilidade do arco (LIU et al, 1994), promoveu o aumento da largura do cordão com a profundidade.

As macrografias mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7 exemplificam as variações da geometria do cordão de solda para os dois consumíveis testados.



Figura 4.6 - Macrografias de cordões de solda feitos com eletrodo E6013 a 50 m em aço A-36 com polaridade DCEP (a) e DCEN (b)



Figura 4.7 - Macrografías de cordões de solda feitos com eletrodo E7018 a 50 m com polaridade DCEP (a) e DCEN (b)

4.1.3 – Porosidade no Metal de Solda

A medição da porosidade foi feita por meio de um sistema de aquisição e análise de imagens. Para cada cordão de solda foram analisadas três seções distintas, como descrito no item 3.1.3.3 da metodologia aplicada, sendo apresentado como resultado a média dos valores obtidos.

O sistema permite medir poros com área mínima de 0,1 mm² para o aumento utilizado para fotografar as imagens (12x). A incerteza da medição, fornecida pelo próprio programa, é proporcional ao fator de forma utilizado para medição da área do poro (quanto mais circular é o poro menor será a incerteza, nos casos de formas muito complexas a incerteza pode chegar a \pm 20% (desvio padrão da média)).

4.1.3.1 - Porosidade em função da profundidade, tipo de eletrodo e polaridade

O gráfico da Figura 4.8 mostra a variação da porosidade média nas soldas em função da profundidade. Os pontos representam os valores médios e as barras representam os valores máximos e mínimos dos valores encontrados (esse procedimento foi adotado em todos os gráficos que aparecem com barras de erros nesse trabalho). É possível observar que a 50 metros em DCEP, o eletrodo E6013 produziu cordões de solda com porosidade próxima de 1 % enquanto que a 100 metros a porosidade média foi em torno de 8%. Em DCEN a porosidade situou-se em torno de 8 e 15% para soldas feitas a 50 e 100 metros, respectivamente. O eletrodo E7018 produziu cordões com porosidade em torno de 12 e 21% a 50 e 100 metros, respectivamente em ambas as polaridades.



Figura 4.8 – Porosidade do metal de solda em função do tipo de eletrodo, polaridade e profundidade.

O aumento na porosidade com a profundidade está de acordo com os resultados e teoria apresentados por SUGA e HASUÍ (1986), LIU et al (1994) e TREVISAN at al (1990).

A grande diferença nos níveis de porosidade apresentada entre eletrodos e polaridades, no caso do E6013, indicou que a simples mudança de polaridade e, conseqüentemente, da concentração de calor no eletrodo ou na peça influencia fortemente a porosidade das soldas molhadas para o caso do eletrodo E6013.

4.1.3.2 – Porosidade ao Longo do Cordão de Solda

As amostras para medição da porosidade foram retiradas do início (a), do meio (b) e do final do cordão de solda (c), como mostrado na Figura 3.6. Essa metodologia permitiu avaliar a variação da porosidade ao longo do cordão de solda.

Os gráficos das Figuras 4.9 a 4.14 mostram os resultados médios para as medições feitas em, no mínimo três amostras por posição, para os dois eletrodos utilizados em função da profundidade e da polaridade.



Figura 4.9 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 50 m em



Figura 4.10 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 50 m

em DCEN



Figura 4.11 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 100 m em DCEP



Figura 4.12 - Variação da porosidade ao longo do cordão de solda para soldas feitas a 100 m em DCEN



Figura 4.13- Porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100m



Figura 4.14 - Porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo E7018 a 50 e 100m

Observou-se a tendência de redução da porosidade do início para o final das soldas sobre chapa, com exceção para as soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 m em DCEN e com o eletrodo E7018 a 100 m em DCEN.

Para o eletrodo E6013, a redução do início para o final do cordão de solda foi de 35 e 44% em DCEP para as soldas feitas a 50 e 100 m respectivamente. Essa grande redução da porosidade ao longo do cordão, como apresentada pelo eletrodo E6013 em DCEP deve estar relacionada à mudanças nos processos que controlam a geração de porosidade (transferência de gases, geração de gases por reações químicas ou variações na taxa de resfriamento do metal de solda). A análise dos sinais de corrente e tensão permite o entendimento do processo de transferência de gases para a poça de fusão durante a transferência metálica.

4.1.4 – Análise dos Sinais de Corrente e Tensão

A análise da estabilidade foi baseada no cálculo de S, usando a Equação 2.9, por meio da análise dos oscilogramas de corrente e para cada cordão de solda. Calculou-se um valor de S para cada segundo, durante 25 segundos de solda, e depois se calculou a média dos 25 valores obtidos. Os resultados encontram-se na Tabela 4.3.

50 m		100 m		
Polaridade	S	Polaridade	S	
(+)	1,62	(+)	1,61	
(-)	2,05	(-)	2,09	
(+)	2,28	(+)	3,26	
(-)	2,23	(-)	2,75	
	50 m Polaridade (+) (-) (+) (-)	50 m Polaridade S (+) 1,62 (-) 2,05 (+) 2,28 (-) 2,23	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	

Tabela 4.3 – Valores de S para os testes realizados a 50 e 100 metros

Em todas as profundidades, o eletrodo E6013 produz um arco mais estável em polaridade inversa (DCEP). Além disso, observa-se que mesmo em DCEN o eletrodo E6013 produziu um arco mais estável que o eletrodo E7018. Para esse eletrodo, em DCEN as soldas realizadas tanto a 50 quanto a 100 metros apresentaram um arco mais estável.

Em todos os casos, exceto para o eletrodo E6013 em DCEP, a estabilidade do arco diminuiu com o aumento da profundidade. Isso acontece devido a constricção do arco elétrico e efeitos da dinâmica das bolhas ao redor do arco que se tornam mais críticos com o aumento da pressão. Além disso, a quantidade de oxigênio e hidrogênio na atmosfera do arco tente a ser maior em maiores profundidades.

A análise dos oscilogramas de tensão, mostrados nas Figuras 4.15 e 4.16 mostram que, as soldas feitas com o eletrodo E6013 em DCEP tanto a 50 quanto a 100 m apresentaram transferência com poucos curtos-circuitos durante a soldagem. A mudança na polaridade da corrente promoveu uma transferência metálica com muitos curtos-circuitos em DCEN em

106

ambas as profundidades testadas. O eletrodo E7018 produziu uma transferência do tipo curtocircuito nas soldas feitas nas duas polaridades e profundidades testadas. Portanto existe um forte indicativo de relação entre a maior porosidade apresentada pelas soldas feitas com o eletrodo E6013 em DCEN, E7018 em DCEP e DCEN e a transferência do tipo curto-circuito. Nesse modo de transferência, as gotas metálicas ficam mais tempo presas à ponta do eletrodo até crescerem o suficiente para tocar a peça e assim serem transferidas. Segundo o modelo proposto por MEDEIROS (1997), em DCEP um maior tempo com a gota conectada ao anodo implicaria em maior quantidade de hidrogênio transferida para a mesma. Segundo os modelos propostos por LARSON (1942) e BRANDI et al (1991) a formação de CO no interior da gota metálica faz com que o volume da mesma cresça rapidamente de modo que se tenha o curtocircuito. Como o eletrodo E6013 em DCEN apresenta um arco elétrico menor juntamente com uma menor taxa de fusão do eletrodo, em comparação com as soldas feitas em DCEP, observa-se que pode estar ocorrendo a formação de CO no interior da gota. A formação de CO facilitaria a transferência do hidrogênio atômico para bolha interna devido ao maior tempo disponível. A partir do momento em que grandes quantidades de CO e H são transferidas para a poça de fusão, maior porosidade irá se formar devido ao rápido resfriamento presente na soldagem molhada. Portanto, a combinação dos mecanismos de transferência de hidrogênio para a gota quando esta é o anodo juntamente com a nucleação de bolhas internas devido à formação de CO poderiam explicar porque a porosidade é maior para as soldas feitas com o eletrodo E6013 em DCEN. Além disso, como o eletrodo E7018 apresentou transferência metálica com muitos curtos-circuitos em ambas as polaridades, observou-se que a porosidade é sempre alta e sem diferenças significativas em relação à polaridade.



Figura 4.15 – Sinais de tensão adquiridos durante a realização de soldas a 50 metros para os eletrodos E6013 em DCEP (a), DCEN (b) e E7018 em DCEP (c) e DCEN (d).


(d)

Figura 4.16 - Sinais de tensão adquiridos durante a realização de soldas a 100 metros para os eletrodos E6013 em DCEP (a), DCEN (b) e E7018 em DCEP (c) e DCEN (d).

4.1.4.1- Análise dos Sinais de Corrente e Tensão ao Longo do Cordão de Solda

As Figuras 4.17 a 4.20 apresentam oscilogramas completos de soldas feitas a 50 metros com os dois eletrodos nas duas polaridades testadas.



Figura 4.17 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a 50m em DCEP



Figura 4.18 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a 50m em DCEN



Figura 4.19 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E7018 a 50m em DCEP



Figura 4.20 - Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E7018 a 50m em DCEN

Observou-se que ocorreram pequenas variações na quantidade de curtos-circuitos e no valor da tensão do início para o final dos cordões das soldas feitas em DCEP para os dois

eletrodos. A variação da porosidade ao longo do cordão de solda descrita no Item 4.1.3.2 deve ter relação com essas alteração que ocorreram durante o processo, uma vez que essas mudanças nos sinais indicam variações na transferência de gases para a poça de fusão.

Com o objetivo de quantificar essas alterações mediu-se três parâmetros ao longo dos cordões de solda feitos com o eletrodo E6013: A tensão do arco, indicativa do comprimento do mesmo; o desvio padrão da tensão do arco, indicativa da variação do tamanho das gotas no momento em que se destacaram da ponta do eletrodo e o número de curtos circuitos, indicativo do tempo em que as gotas ficam expostas às reações oxidantes e à transferência de hidrogênio para o seu interior. Os resultados para as soldas feitas com o eletrodo E6013 estão mostrados nos gráficos das Figuras 4.21 a 4.23.

As soldas feitas em DCEP apresentaram tendência de aumento na tensão de arco, redução no desvio padrão da tensão e redução do número de curtos circuitos ao longo do cordão.



Figura 4.21 - Variação da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para as soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade



Figura 4.22 – Desvio padrão da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade



Figura 4.23 – Número de curtos circuitos ao longo do cordão para as soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade (* número de vezes em que a tensão foi inferior a 10 volts no intervalo medido)

Os resultados para as soldas feitas com o eletrodo E7018 estão mostrados nas Figuras 4.24 a 4.26 . Observou-se que a tensão do arco elétrico aumentou do início para o final em todas as condições com exceção para as soldas feitas a 100m em DCEN. O desvio padrão do arco permaneceu praticamente constante para as soldas feitas em DCEP e diminuiu para as

soldas feitas em DCEN. O número de curtos-circuitos diminuiu significativamente do início para o final dos cordões de solda nas quatro condições testadas.

O aumento da tensão do arco ao longo do cordão é indicativo de maior comprimento do cone formado pelo revestimento do eletrodo. Segundo TSAI e MASUBUCHI (1977), um cone maior significa maior proteção para as gotas metálicas durante a transferência metálica uma vez que os gases no interior do cone seriam basicamente formados pela decomposição do fluxo e não pela quebra da molécula de água. Além disso, um comprimento de arco maior indica menor possibilidade de ocorrência de curto-circuito para o mesmo tamanho de gota metálica. A pequena tendência de redução do tamanho das gotas, observada na análise da variação do desvio padrão da tensão ao longo do cordão de solda, confirma uma redução na possibilidade de ocorrência de curto-circuito na parte final das soldas e o menor tamanho das mesmas é um indicativo de que menores quantidades de gases foram transportadas no interior das gotas com o aumento do tempo de soldagem.

A grande redução no número de curtos-circuitos, quase sempre combinando com a redução da porosidade ao longo do cordão, indica que a ocorrência desse modo de transferência é o fator mais significativo para o aumento da porosidade. Observou-se que sempre para DCEN o número de curtos é maior para ambos eletrodos e profundidades confirmando a relação entre ocorrência de curtos e maior porosidade. Quando à profundidade, em geral observou-se que com o aumento da mesma aumentou-se o número de curtos-circuitos para as mesmas polaridades. A grande diferença no número de curtos-circuitos entre as soldas feitas em DCEP e DCEN explica porque ocorreu uma grande diferença no nível de porosidade das soldas feitas com o eletrodo E6013 com as duas polaridades em ambas as profundidades. No caso do eletrodo E7018, embora existam diferenças no número de curtos-circuitos é tão grande que fez com que os níveis de porosidade, para soldas feitas em polaridades diferentes, fossem muito elevados e com mínima diferença entre eles.



Figura 4.24 - Variação da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para as soldas feitas com o eletrodo E7018 a 50 e 100 m de profundidade



Figura 4.25 – Desvio padrão da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para soldas feitas com o eletrodo E7018 a 50 e 100 m de profundidade

115



Figura 4.26 – Número de curtos circuitos ao longo do cordão para as soldas feitas com o eletrodo E7018 a 50 e 100 m de profundidade (* número de vezes em que a tensão foi inferior a 10 volts no intervalo medido)

4.1.5- Análise Química do Metal de Solda

Os resultados da medição do carbono no metal de solda estão mostrados nas Figuras 4.27 e 4.28. Ocorreu um aumento da concentração do carbono ao longo do cordão de solda da ordem de 7 e 1% para soldas feitas a 50 m em DCEP e DCEN, respectivamente. Para as soldas feitas a 100 m o aumento do carbono foi de aproximadamente de 5% para ambas as polaridades. Essa pequena variação é significativa uma vez que o teor de carbono no aço utilizado na alma do eletrodo é relativamente baixo (0,05%). Uma vez que o teor de carbono na gota é basicamente constituído pelo carbono no aço da alma a maior parte do carbono medido no teste é proveniente do metal de base. Nesse caso, quanto maior a penetração maior será a diluição e, conseqüentemente, mais próximo da composição química do metal de base será a composição do metal de solda. Isso explica o maior teor de carbono apresentado pelas soldas feitas em DCEN em relação às feitas em DCEP uma vez que as soldas feitas com polaridade direta apresentam maior penetração. Devido à maior ocorrência de curtos-circuitos em DCEN espera-se menor teor de carbono nas soldas feitas nessa polaridade em relação às feitas em DCEP.

A ocorrência de transferência por curto-circuito indica maior tempo com as gotas presas á ponta do eletrodo. Nessas condições, o oxigênio presente em abundância na atmosfera do arco elétrico e dissolvido no metal líquido irá reagir preferencialmente com o

carbono em altas temperaturas. A oxidação do carbono produz CO que, nas temperaturas de fusão do aço, é mais estável que o CO₂. O CO produzido pode escapar da gota ou da poça de fusão ou ser aprisionado durante a solidificação. As amostras utilizadas para medir o carbono foram amassadas com uma marreta antes da operação de medição de carbono de modo a permitir que os gases no interior dos poros escapassem. Assim, o aumento do teor de carbono ao longo do cordão é um forte indicativo da formação de CO durante a transferência por curto-circuito nas deposições sobre chapa. Como ocorrem mais curtos-circuitos no início da solda do que no final ocorre maior geração de CO no início que ao final do cordão.



Figura 4.27 – Variação do teor de carbono no metal de solda ao longo do cordão em soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50m de profundidade



Figura 4.28 – Variação do teor de carbono no metal de solda ao longo do cordão em soldas feitas com o eletrodo E6013 a 100 m de profundidade

4.2 – Soldagem em Chanfro

4.2.1 – Inspeção Visual

As principais observações feitas durante a análise visual das soldas feitas em chanfro foram: a quantidade de irregularidades superficiais e poros abertos diminuiu claramente do início para o final do cordão de solda e aumentou com a profundidade de soldagem; o número de respingos foi na maioria dos casos maior ao final do cordão de solda e, de maneira geral, o número de irregularidades superficiais é menor nas soldas feitas em chanfro que nas soldas feitas sobre chapa nas mesmas condições. A Figura 4.29 mostra a fotografia de uma solda feita a 50 metros de profundidade onde é possível visualizar algumas das observações anteriormente citadas. Estas alterações são indícios de que as mudanças nos parâmetros ocorridas nas soldas em chapa ocorrem também nas soldas em chanfro. A redução das irregularidades superficiais ao longo do cordão é um indicativo de redução de número de curtos circuitos na transferência metálica, enquanto que o aumento do número de respingos no final é indicativo de aumento do comprimento do arco elétrico. A melhoria na aparência superficial das soldas em chanfro em relação às soldas sobre chapa pode estar relacionada com mudanças na dinâmica das bolhas. Em chanfro as bolhas têm maior área de contato com as paredes do mesmo, em comparação com uma chapa plana. Essa maior área de contato faz com que o raio crítico, que determina o ponto em que as bolhas se desprendem da chapa, seja maior e, conseqüentemente, o tempo em que a gota fica protegendo o arco acaba aumentando. Um tempo maior implica em maior proteção e menor taxa de resfriamento tanto para o metal de solda quanto para a escória. Essa pequena diferença na proteção faz com que as soldas em chanfro tenham menor número de irregularidades e melhor molhabilidade que as soldas em chapa.



Figura 4.29 – Cordão de solda feito com eletrodo E6013 a 50 m de profundidade em DCEP em A-36, direção de soldagem da esquerda para a direita.

4.2.2 – Análise Radiográfica e Macrográfica

A análise visual (qualitativa) das radiografías mostrou que ocorreu uma redução tanto na quantidade quanto no tamanho dos poros ao longo do cordão das soldas feitas tanto a 50 quanto a 100 m de profundidade. Observou-se também que o tamanho dos poros é maior nas soldas feitas a 100 m. Devido ao fato de quantidade de poros nesse tipo de solda ser elevada, a superposição de poros impede a análise quantitativa da porosidade pelo método radiográfico.

As Figuras 4.30 e 4.31 mostram soldas feitas a 50 e 100 m de profundidade onde pôde- se observar a ausência de trincas detectáveis pelo método radiográfico.



Figura 4.30 – Radiografia de solda feita a 50 metros em aço A-36 com eletrodo E6013



Figura 4.31 – Radiografia de solda feita a 100 metros em aço A-36 com eletrodo E6013

As macrografias mostradas na Figura 4.32 exemplificam o aumento da porosidade com o aumento da profundidade. A grande porosidade observada é devida ao fato das amostras terem sido removidas da parte inicial das soldas.



Figura 4.32 - Macrografías de soldas feitos com eletrodo E6013 a (a) 50 e a (b) 100 m em aço A-36

4.2.3–Porosidade ao Longo da Solda

A medição da porosidade foi feita nas seções transversais dos corpos de prova para ensaio de dobramento lateral. Foram removidos 4 corpos de prova de cada solda sendo 1 do início, duas da parte central e uma da parte final, como descrito na Figura 3.8. Dessa maneira os resultados do início e do final são os valores médios de três medições e os resultados do meio do cordão são a média de 6 medições.

O gráfico da Figura 4.33 mostra a variação da porosidade média nas soldas em função da profundidade e ao longo da solda. Nota-se que a porosidade média no final das soldas é próxima de 1,5 e 2,0% para soldas feitas a 50 e 100 m respectivamente. Esse nível de porosidade nas amostras do final das soldas feitas tanto a 50 e 100 m atendeu à exigência da

norma AWS D3.6M (1999) quanto à porosidade para soldas com classificação B - porosidade inferior a 5% na seção transversal da solda.

Observou-se que, a 50 metros, a porosidade reduziu 40% do início para o meio e 66% do início para o final das soldas. Nas soldas feitas a 100 m de profundidade a redução foi de 63 e 73% do início para o meio e do início para o final, respectivamente. Essa grande variação da porosidade ao longo das soldas não só confirma a tendência observada no estudo feito com cordões sobre chapa, para o eletrodo E6013, mas também mostra que houve uma amplificação na variação dos parâmetros que influenciam a porosidade das soldas molhadas.



profundidade

4.2.4–Ensaios Mecânicos

Nenhum dos corpos de prova de dobramento lateral foi aprovado no teste. Todos abriram trinca antes de dobrar 180° evidenciando a fragilidade da junta soldada nessas condições, principalmente devido à alta taxa de resfriamento que promove o surgimento de martensita, alta porosidade e baixa tenacidade devido às inclusões de óxidos.

Foram coletados os valores de carga máxima até a abertura da trinca. Esses resultados estão mostrados no gráfico da Figura 4.34. É possível visualizar que os valores de carga máxima suportada durante o teste de dobramento lateral apresentaram tendência de aumento do início para o final da solda. Observa-se também que os valores de carga máxima suportada

122



Figura 4.34 – Resultados para carga máxima no ensaio de dobramento lateral em soldas feitas a 50 e 100 metros

Os resultados dos ensaios de tração confirmaram a tendência observada nos testes de dobramento, ou seja, os corpos de prova retirados do final da solda apresentaram maior tensão de ruptura em comparação com os do início da solda. Também observou-se que e as soldas feitas em menor profundidade apresentaram maior resistência, como mostrado no gráfico da na Figura 4.35. Os valores encontrados estão próximos dos relatados por outros pesquisadores para soldas a 50 metros (oscilam entre 400 e 500MPa) e um pouco abaixo das soldas realizadas a 100 metros (em torno de 400Mpa) segundo ROWE e LIU (2001). Observou-se também que nenhum corpo de prova produziu resultados dentro da faixa especificada pelo fabricante (LR 480-550MPa) (catálogo ESAB, 2006).



Figura 4.35 – Tensão de ruptura em MPa no ensaio de tração em soldas feitas a 50 e 100 metros

Os resultados dos ensaios Charpy mostraram a mesma tendência observada nos ensaios de dobramento lateral e de tração. A energia absorvida aumentou do início para o final da solda e diminuiu com o aumento da profundidade. Os valores médios dos três resultados para cada posição na solda estão mostrados no gráfico da Figura 4.36.



Figura 4.36 – Energia absorvida no ensaio Charpy em soldas feitas a 50 e 100 metros de profundidade

As propriedades mecânicas das soldas subaquáticas molhadas diminuíram com o aumento da profundidade. O aumento da porosidade com a profundidade foi em média de 40% enquanto que a redução das propriedades mecânicas medidas nos ensaios de dobramento lateral, tração e Charpy foi em média de 23, 11 e 25% respectivamente. As atividades do oxigênio e hidrogênio na poça de fusão aumentam proporcionalmente à pressão total. A presença desses elementos na poca de fusão causa a redução de elementos de liga com afinidade para reagir com o oxigênio provocando a redução na temperabilidade do metal de solda e promovendo o surgimento de uma microestrutura grosseira com grãos de ferrita primária. Esse tipo de microestrutura reduz a resistência mecânica (tensão limite de escoamento e de resistência) e os valores de tenacidade comparando-se com uma microestrutura refinada de ferrita acicular. Grandes quantidades de hidrogênio na poça de fusão e na atmosfera do arco juntamente com a formação de CO no metal líquido promovem o aumento da porosidade do metal de solda que provocaram uma redução da seção útil dos corpos de prova utilizados nos ensaios realizados, implicando em redução na tenacidade e resistência. O mesmo mecanismo que explica a redução das propriedades com o aumento da profundidade pode ser aplicado para se entender o incremento dos valores das mesmas ao longo da solda. A redução da porosidade ao longo das soldas indica uma redução das reações de oxidação do carbono e formação de CO e, concomitantemente, dos elementos de liga com formação de inclusões não metálicas. Além disso, os resultados indicam uma redução dos teores de hidrogênio no metal de solda ao longo do cordão.

4.2.5 – Análise dos Sinais de Corrente e Tensão

A análise dos oscilogramas de corrente e tensão, mostrados nas Figuras 4.37 e 4.38 mostraram que as alterações no modo de transferência, desvio padrão e valor da tensão do arco observadas nos testes com cordões sobre chapa não só aconteceram mas foram amplificadas nos testes em chanfro.



Figura 4.37 – Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a 50m em DCEP



Figura 4.38 - Oscilograma da corrente e da tensão de uma solda feita com o eletrodo E6013 a 100m em DCEP

Observou-se que a faixa de ocorrência de curtos circuitos no início da solda aumentou de pouco mais de 5 segundos nas soldas em chapa para pouco mais de 10 segundos nas soldas em chanfro. O valor da tensão teve um aumento mais acentuado em relação às deposições sobre chapa nas soldas feitas em DCEP para os dois eletrodos. A variação da porosidade ao longo do cordão de solda descrita no Item 4.1.3.2 tem relação com essas alterações que ocorreram durante o processo. Com o objetivo de quantificar essas alterações mediu-se a

tensão do arco elétrico, o desvio padrão da tensão do arco e o número de curtos circuitos ao longo do cordão em três oscilogramas diferentes para cada profundidade. Os resultados estão mostrados nos gráficos das Figuras 4.39 a 4.41. Observou-se que as soldas apresentaram aumento na tensão de arco, redução no desvio padrão da tensão e redução do número de curtos circuitos ao longo do cordão sempre com maior intensidade quando comparado com as soldas feitas sobre chapa.

Variações mais intensas nesses três parâmetros medidos explicam a redução na porosidade ao longo da solda da ordem de 60%. Nas soldas em chanfro, a maior proteção das gotas devido ao aumento do arco, a redução do tamanho das gotas e a grande redução do número de curtos circuitos indicam a menor produção de CO no final das soldas em relação ao início.



Figura 4.39 - Variação da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para as soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade



Figura 4.40 – Desvio padrão da tensão do arco elétrico ao longo do cordão para soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade



Figura 4.41 – Número de curtos circuitos ao longo do cordão para as soldas feitas com o eletrodo E6013 a 50 e 100 m de profundidade (* número de vezes em que a tensão foi inferior a 10 volts no intervalo medido)

4.2.6– Análise Química do Metal de Solda

Os resultados da medição do carbono no metal de solda estão mostrados na Figura 4.42. Ocorreu um aumento da concentração do carbono ao longo do cordão de solda da ordem

de 28 e 8% para soldas feitas a 50 e 100 m, respectivamente. Como discutido no item 4.1.5, o CO produzido na oxidação do carbono em altas temperaturas pode escapar da gota ou da poça de fusão ou ser aprisionado durante a solidificação. Essa variação obtida nos testes em chanfro reafirmou a tendência observada nos testes em cordão sobre chapa de uma relação entre porosidade, modo de transferência por curto-circuito e formação de CO no metal de solda líquido.



Figura 4.42 – Teor de carbono ao início e final das soldas feitas em chanfro a 50 e 100 metros de profundidade

4.3– Estudo das Variáveis e Características que Podem se Alterar Durante a Soldagem Molhada

4.3.1 - Variação da Temperatura do Eletrodo Durante a Soldagem

O gráfico da Figura 4.43 mostra a variação da temperatura dos eletrodos E6013 e E7018 durante a soldagem molhada. Nota-se que a variação, do início para o final da solda, para ambos os eletrodos foi de aproximadamente 50°C. Esse aumento fez com que a temperatura média do eletrodo alcançasse a temperatura de 70°C, para soldas feitas em água à temperatura de 20° C. A temperatura máxima é atingida aproximadamente quando a metade do eletrodo é consumida (~25s). É sabido que o elemento componente do fluxo de eletrodos

E6013 com menor temperatura de decomposição é a celulose (~130° C). Já o elemento com menor temperatura de decomposição presente no fluxo do eletrodo E7018 começa a se decompor a uma temperatura próxima de 300° C (STERN, 1948 apud BRACARENSE, 1994) (CHEN e KANG, 1989). Ou seja, a temperatura máxima atingida pelos eletrodos E6013 e E7018 não é suficientemente elevada para promover a decomposição dos elementos do fluxo e, conseqüentemente, promover alguma alteração significativa durante a soldagem devido a queima desses elementos ao longo do cordão de solda.



Figura 4.43 – Variação da temperatura dos eletrodos E6013 e E7018 durante a soldagem subaquática molhada

Segundo BRACARENSE (1994), além da decomposição de elementos do revestimento, o aquecimento do eletrodo promove alterações na taxa de fusão, no tamanho das gotas metálicas e no teor de água do mesmo.

4.3.2- Alteração na Taxa de Fusão do Eletrodo

Nos estudos realizados por BRACARENSE (1994) com eletrodos E7018 aplicando 145 ampéres de corrente em soldas ao ar, a taxa de fusão instantânea aumentou de 4,5 para 9,0 mm/s. A taxa de fusão é fortemente dependente da temperatura do eletrodo (FELIZARDO, 2003) que, nesse caso, variou de 20 para 800° C. A aplicação de um cálculo proporcional simples indica que, para uma variação de 50° C, a taxa de fusão instantânea do eletrodo aumenta apenas 0,3 mm/s. Além disso, o mecanismo de soldagem por gravidade alimenta o eletrodo proporcionalmente ao consumo do mesmo fazendo com que os efeitos do pequeno aumento na taxa de fusão, devido ao aumento na temperatura, sejam insignificantes para a porosidade do metal solda ao longo do cordão.

4.3.3– Alteração no Tamanho das Gotas Metálicas

Nos mesmos testes realizados por BRACARENSE (1994) a maior variação no tamanho médio das gotas do início para o final da solda foi de aproximadamente 35%. O diâmetro médio das gotas aumentou de 1,45 para 2,05 mm para uma variação de temperatura da ordem de 550° C. Novamente, aplicando um cálculo proporcional simples e considerando que a gota permanece sólida, como pode ocorrer nas solda ao ar, para uma variação de temperatura de 50° C, o diâmetro médio das gotas aumentaria apenas 0.03mm. Essa pequena variação tende a ser insignificante para a variação da porosidade ao longo do cordão de solda. Além disso, o desvio padrão da tensão calculado nos estudos com soldas sobre chapa (Item 4.1.4.1) e em chanfro (Item 4.2.5) mostraram uma tendência de diminuição no tamanho médio das gotas ao longo do cordão. Essa tendência de diminuição vai contra a tendência natural de aumento do tamanho da gota com o aumento da temperatura da alma do eletrodo. Entretanto, devido à ocorrência de transferência metálica do tipo curto-circuito, a medida do desvio padrão da tensão do arco apresentou resultados mais elevados. A realização de coleta de gotas em soldas em profundidades pode ser feita para se entender melhor as alterações na transferência metálica nessas condições.

4.3.4 – Influência do Teor de Umidade do Revestimento na Soldagem Molhada

Foi feito um teste simples com o objetivo de avaliar a influência da umidade no revestimento do eletrodo sobre o comportamento do arco nas soldas molhadas.

Eletrodos E6013 com diâmetro de alma de 4,0 mm de espessura foram colocados em um ambiente com alta umidade do ar por um período de 24 horas. Eletrodos provenientes da mesma embalagem foram colocados em estufa à temperatura de 65° C pelo mesmo período de tempo. Ao final retirou-se o revestimento dos dois tipos de eletrodo e pesou-se em balança com precisão de 4,0 casas decimais. O teor de água em peso dos eletrodos expostos ao ambiente úmido foi de 5%.

Os eletrodos foram envernizados e foram feitos cordões sobre chapa utilizando-se os mesmos parâmetros de soldagem. A análise dos sinais de tensão indicou um aumento na tensão de arco para as soldas feitas com eletrodos com 5% de umidade de 3,0 V em média em relação às soldas feitas com os eletrodos secos.

Esse resultado é um indício de que a presença de água no arco elétrico proveniente do revestimento produz efeitos no arco elétrico distintos da presença da água que envolve o mesmo. Quando a molécula de água atinge o arco, a mesma é aquecida até a evaporação e depois quebrada liberando assim hidrogênio e oxigênio. Dessa maneira, mais energia é consumida no arco quando existe água. Como a fonte de soldagem produz corrente constante, a única maneira de se produzir mais energia é aumentando o potencial do arco que é dado pela tensão do mesmo.

Fotografías da parte restante de eletrodos do tipo E6013 usados nesses e também nos outros testes realizados anteriormente revelaram, em alguns casos, o surgimento de bolhas entre a superfície do revestimento e o verniz. A Figura 4.44 mostra as partes finais de alguns eletrodos com essas bolhas. A ocorrência dessas bolhas é um indicativo de que o aumento da temperatura da ordem de 50° C, juntamente com o calor produzido na região adjacente ao arco elétrico, promovem a evaporação da água ou expansão do vapor d'água contido no revestimento do eletrodo. Como existe um filme de verniz que impede a saída do vapor d'água aquecido ou produzido, esse tende a se acumular na parte final do eletrodo. O provável acúmulo de água ou vapor d'água no final do eletrodo pode ser um dos fatores que promovem o aumento da tensão do arco ao final da solda observado nos estudos com solda sobre chapa e em chanfro.



Figura 4.44 – Parte final de eletrodos E6013 utilizados em soldas feitas a 50 m de profundidade onde se pode observar a presença de bolhas entre o revestimento e o verniz

4.3.5 – Realização de Soldas com o Eletrodo Pré-Aquecido

Para se entender a influência do período de aquecimento do eletrodo durante a soldagem sobre a porosidade ao longo do cordão de solda fez-se o pré-aquecimento de eletrodos utilizando-se uma fonte de soldagem auxiliar. O gráfico da Figura 4.45 mostra o mapeamento da temperatura durante a realização de soldas feitas com o eletrodo inicialmente à temperatura igual a ambiente e com o eletrodo pré-aquecido. O eletrodo foi aquecido a uma temperatura de 140° C e, após a troca das fontes de soldagem, a abertura do arco ocorreu a 120° C. A temperatura final do eletrodo foi a mesma em ambos os casos, situando-se em torno de 70° C.



Figura 4.45 – Variação da temperatura de eletrodos E6013 em soldas molhadas realizadas com e sem pré-aquecimento

Os oscilogramas de corrente e tensão mostraram o mesmo comportamento para as soldas feitas sem pré-aquecimento. Ocorre um aumento da tensão durante a soldagem com um período de ocorrência de curtos circuitos no início da solda.

A medição da porosidade, cujo resultado está apresentado na Figura 4.46, mostrou que a mesma reduz ao longo do cordão, enquanto que o teor de carbono no metal de solda aumenta, como mostrado no gráfico da Figura 4.47. Embora se espere que esse período transiente produza variações no processo, principalmente na estabilidade do arco elétrico, esses resultados indicaram que o aquecimento do eletrodo durante a soldagem não é o fator principal para a ocorrência da variação da porosidade ao longo do cordão de solda.



Figura 4.46 – Variação da porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo E6013 pré-aquecido a 50 m de profundidade



Figura 4.47 - Variação do teor de carbono ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo E6013 pré-aquecido a 50 m de profundidade

4.3.6 - Variação da Temperatura da Chapa Durante a Soldagem

MURZIN e RUSSO (1994) estudaram a adição de elementos exotérmicos ao revestimento de eletrodos revestidos aplicados em soldagem subaquática molhada. Foi reportado que um aumento no aporte térmico da ordem de 9,0 % resultou em uma redução na taxa de resfriamento da ZTA (zona termicamente afetada) de 23 a 25° C. Na soldagem molhada, uma taxa de resfriamento menor implica em mais tempo disponível para o crescimento dos poros e também para que os mesmos escapem do metal de solda líquido. Na soldagem ao ar, ocorre um pré-aquecimento da chapa durante a soldagem. O calor gerado pelo arco no início do processo é transferido por condução através da chapa fazendo com que a temperatura da mesma, na parte final da soldagem, seja maior do que no início. Assim, para o mesmo aporte térmico, no final da solda a taxa de resfriamento será menor, devido ao efeito do pré-aquecimento e ao fato de que, nas soldas ao ar, a transferência por condução ser significativa para o processo. É importante considerar que o pré-aquecimento da chapa ao ar funciona como a reação exotérmica utilizada pelos pesquisadores russos (MURZIN e RUSSO, 1994) nas soldas molhadas. Dessa maneira, apesar da maior diferença de temperatura entre o ambiente e a poça de fusão, a taxa de resfriamento foi menor.

As Figuras 4.48 e 4.49 mostram os ciclos térmicos de soldas feitas em lâmina d'água, aplicando-se uma corrente de 180 A e distância da superfície da chapa para os termopares de 3 e 5 mm, com o objetivo de observar se ocorre o pré-aquecimento da chapa. Observou-se que, para o tamanho de chapa utilizado nos testes realizados nesse trabalho, não ocorreu o pré-aquecimento da chapa. A transferência de calor através da água é muito intensa fazendo com que a temperatura da chapa, no momento em que a poça de fusão foi formada, fosse a mesma no final e no início do processo. Logo, a variação da porosidade ao longo do cordão de soldas subaquáticas não está relacionada à temperatura da chapa utilizada nos testes realizados.



Figura 4.48 - Ciclos térmicos em pontos localizados à 3,0 mm da superfície da chapa para solda feita com 180 Ampéres de corrente



Figura 4.49 - Ciclos térmicos em pontos localizados à 5,0 mm da superfície da chapa para solda feita com 180 Ampéres de corrente

Calculou-se o tempo de resfriamento ($\Delta t_{800-500}$) para cada um dos ciclos térmicos e os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.4.

d = 3mm		d = 5mm	
	$\Delta t_{800-500}$ (s)		$\Delta t_{800-500}$ (s)
Termopar 1	3,1	Termopar 1	3,2
Termopar 2	2,9	Termopar 2	4,6
Termopar 3	2,7	Termopar 3	3,8
média	2,9		3,9

Tabela 4.4 – Tempo de resfriamento para as soldas molhadas

A diferença de aproximadamente 1,0 segundo entre os valores médios dos resultados obtidos deve-se, muito provavelmente, ao fato de que no experimento de d = 5,0 mm o aporte térmico foi menor na região onde os termopares estavam afixados. Essa região também está mais no centro da peça, o que faz com que o resfriamento seja mais lento. Na soldagem molhada sem reação exotérmica a taxa de resfriamento será maior sempre que a diferença de temperatura entre a água e a solda for maior e para as regiões mais próximas à água.

4.3.7 – Influência do Dispositivo de Soldagem por Gravidade

Os dispositivos de soldagem por gravidade (DSG) utilizados em todos os testes realizados nesse trabalho são constituídos por um carro que desliza em uma haste. Quando o eletrodo é consumido, o carro se move de modo a manter o eletrodo sempre em contato com a peça de trabalho. Devido a essa configuração e à necessidade de pressão entre a ponta do eletrodo e o sistema de abertura de arco, o eletrodo sempre sofre flexão ao início da solda. A Figura 4.50 mostra uma fotografia de um eletrodo acoplado ao DSG utilizado na CSM onde pode-se observar o comportamento do eletrodo no momento anterior à soldagem. A flexão do eletrodo provoca diminuição do ângulo de soldagem (entre o eletrodo e a chapa). A diminuição desse ângulo tende a promover o aumento da tensão do arco e da velocidade de soldagem no início da solda, pois, enquanto o eletrodo é consumido, reduz-se o índice de esbeltêz do mesmo e a flexão diminui progressivamente durante a soldagem. A variação da velocidade de soldagem ao início da solda resulta em instabilidade no processo que, devido aos resultados obtidos nos estudos com cordões sobre chapa e em chanfro, pode ser mais significativo do que a tendência de aumento da tensão de arco com a redução do ângulo de soldagem.



Figura 4.50 – Dispositivo de soldagem por gravidade e eletrodo revestido mostrando a flexão do eletrodo

Realizou-se soldas com eletrodos E6013 cortados ao meio a 50 metros de profundidade com os mesmos parâmetros utilizados nos testes com cordões sobre chapa. A redução do comprimento dos eletrodos pela metade impediu a flexão dos mesmos ao início da solda. A análise dos oscilogramas de corrente e tensão, mostrados na Figura 4.51, mostrou que, mesmo sem a flexão inicial do eletrodo, a tensão de arco e o número de curtos-circuitos aumentaram durante a soldagem da mesma maneira que ocorre com os eletrodos de comprimento normal.



Figura 4.51 – Oscilograma de corrente e tesão de uma solda feita com eletrodo E6013 com 175 mm de comprimento a 50 m de profundidade em DCEP

Estes testes simples não podem ser utilizados para se afirmar que a flexão do eletrodo não contribui para o surgimento dos fenômenos observados no início do cordão de soldas molhadas, mas mostraram que esse não é o fator mais influente para a ocorrência de muitos curtos-circuitos ao início da soldagem.

4.4 – Testes Feitos com Eletrodos Tubulares Revestidos

4.4.1 - Soldas Feitas com Eletrodos Tubulares Revestidos com Adição de Alumínio

Nos estudos realizados com eletrodos sólidos observou-se que a maior quantidade de poros no início do cordão de solda em relação ao final está fortemente relacionada a variações na formação de CO. Devido à ocorrência de curtos-circuitos na transferência metálica, têm-se mais tempo para a reação entre o oxigênio e o carbono. A adição de um elemento com menor energia de formação do seu óxido que o CO pode ser evitar a variação da porosidade ao longo do cordão de solda uma vez que a contribuição de CO como gás formador de poros ficaria constante.

Produziu-se eletrodos tubulares revestidos e adicionou-se alumínio na parte interna dos mesmos de modo separado do revestimento externo. Dessa maneira, garantiu-se que o alumínio atingisse o arco elétrico na forma metálica. A presença desse elemento fez com que,

mesmo na ocorrência de curtos-circuitos, o oxigênio reagisse primeiramente formando Al₂O₃ (alumina) ao invés de CO. Como a alumina fica em estado sólido à temperatura de solidificação do aço haverá formação de inclusão e não de poros. Assim, espera-se que a porosidade ao longo do cordão seja constante e igual à porosidade medida no final do cordão de solda obtido com eletrodos sólidos e sem a adição de Al. O gráfico da Figura 4.52 mostra a variação da porosidade para soldas feitas com eletrodos tubulares com e sem adição de alumínio ao fluxo interno. Para o eletrodo com fluxo interno composto por apenas pó de ferro, a porosidade apresentou uma leve tendência de redução do início para o final do cordão de solda (a variação foi desprezível em comparação com a dispersão), apresentando um comportamento semelhante ao observado nas soldas feitas com eletrodo convencional (alma sólida). A maior porosidade observada em relação ao eletrodo convencional pode ser causada por problemas de enchimento do tubo interno que foi feito por vibração. Além disso, os vazios entre as partículas de ferro no interior do tubo acabam introduzindo mais oxigênio no arco elétrico no momento da solda. O eletrodo tubular com adição de alumínio apresentou porosidade praticamente constante tanto no início quanto no final do cordão. O valor médio, próximo de 1,1%, foi 0,1% inferior ao valor médio da porosidade no início do cordão de solda obtido com o eletrodo E6013 convencional nas mesmas condições. O valor médio esperado foi o obtido ao final do cordão de solda com o eletrodo convencional. Essa diferença pode ser atribuída aos problemas em se preencher corretamente a cavidade interna do tubo com o fluxo contendo alumínio. Devido à diferença de densidade e como o processo de enchimento utilizado foi por vibração, é provável que os grãos de alumínio metálico não ficaram uniformemente distribuídos no fluxo interno.

O gráfico da Figura 4.53 mostra a variação do teor de carbono no metal de solda para os dois tipos de eletrodo tubular testados. O eletrodo com fluxo interno composto somente por pó de ferro apresentou variação similar à observada em eletrodos convencionais. O carbono aumentou cerca de 6% do início para o final mostrando mais uma vez uma relação entre a redução da porosidade ao longo do cordão de solda e o aumento do teor de carbono no metal de solda.

O eletrodo com adição de alumínio apresentou comportamento contrário. Observou-se que o Al metálico foi eficiente em preservar o carbono no ambiente do arco e na poça de fusão. Os teores de carbono medidos foram sempre superiores aos obtidos com os eletrodos sólidos e tubulares com fluxo interno composto somente por pó de ferro. A significativa redução do início para o final do cordão pode ser atribuída a problemas na produção dos eletrodos e indica a necessidade de realização de quantidade maior de testes de modo a se ajustar o teor do alumínio na formulação. Os resultados obtidos mostram que um estudo mais criterioso pode levar à obtenção de uma formulação que permita obter porosidade uniforme ao longo do cordão de solda e com valor inferior ao obtido ao final do cordão feito com eletrodos E6013 convencionais.



Figura 4.52 – Variação da porosidade ao longo do cordão de soldas feitas com o eletrodo tubular revestido E6013 com e sem adição de alumínio ao fluxo interno a 50 m de profundidade



Figura 4.53 - Variação do teor de carbono ao longo do cordão em soldas feitas com o eletrodo tubular revestido E6013 com e sem adição de alumínio ao fluxo interno a 50 m de

4.5 – Modelo do Comportamento do Eletrodo Durante a Soldagem Molhada

A porosidade final no metal de soldas molhadas depende basicamente do resultado da subtração entre a quantidade de gases transportados ou gerados na poça de fusão no estado líquido e a quantidade de gases que escapam durante o processo de solidificação.

As fotografías da Figura 4.54 mostram gotas presas à ponta de eletrodos durante sua formação em soldas feitas com eletrodo tubular revestido com adição de alumínio ao ar (A) e a 50 m (B) e em soldas feitas com eletrodo E6013 convencional a 50 m de profundidade (C). Observa-se a ausência de poro na gota coletada ao final da solda feita ao ar e a ocorrência de grandes bolhas nas gotas das soldas feitas a 50m. O fato de a gota produzida na soldagem ao ar não apresentar a bolha interna é um indicativo de que, em situação de melhor proteção do arco, não ocorre a geração ou aprisionamento de gases durante a transferência metálica. O vazio no interior de gotas formadas em soldas a 50 m mostra que os gases podem ser transferidos no interior das gotas, originados por meio de reações químicas envolvendo o oxigênio e o carbono, ou por difusão do hidrogênio, dependendo apenas da disponibilidade desses elementos e do tempo. Quando ocorre curto-circuito, se o arco for muito longo, a gota pode explodir e liberar os gases internos antes que seja transferida para a poça de fusão. A quantidade de gases gerados por reação e a quantidade de gases que escapam da poça de fusão também dependem basicamente do tempo e da direção de solidificação da poça de fusão. Uma taxa de resfriamento menor implica em mais tempo disponível para a nucleação e o crescimento dos poros e também para que esses escapem do metal líquido.



(A)



(B)


Figura 4.54 – Seção longitudinal de gotas presas à ponta de eletrodos usados em soldas feitas ao ar (A), e a 50 m (B) com eletrodo tubular revestido e a 50 m (C) com eletrodo convencional.

A variação da porosidade ao longo do cordão de solda está relacionada a um conjunto de fatores que fazem com que, ao início da solda, sejam transferidos mais gases ou elementos formadores de gases para o interior da poça de fusão e se tenha menos tempo disponível para que os mesmos escapem. Os resultados obtidos mostraram que a transferência por curtoscircuitos fornece um tempo maior para o acúmulo de gases no interior das gotas. Além disso, a instabilidade do arco no início devido à variações na temperatura do eletrodo, na dinâmica das bolhas que envolvem o arco e na velocidade de soldagem (devido ao dispositivo de soldagem por gravidade) fazem com que a formação da escória seja prejudicada. Dessa maneira, reduz se a possibilidade de os gases escaparem no início do cordão de solda.

PEREZ (2007) propôs que a maior parte dos gases formadores de poros nas soldas molhadas é proveniente da reação química formadora de CO no interior das gotas metálicas. Aplicando-se a equação de estado dos gases perfeitos (PV=nRT) e usando a quantidade de carbono disponível na alma dos eletrodos revestidos convencionais (0,05%) foi mostrado que a oxidação de 20% do carbono disponível em gotas metálicas com 0,5 a 5,0mm de diâmetro é suficiente para produzir uma bolha de CO no interior das gotas metálicas com o volume mais de duas vezes maior que o volume de metal. O gráfico da Figura 4.55 mostra a relação entre a quantidade de carbono disponível nas gotas de aço com 0,05% de C que oxida e o volume da bolha de CO que é formada. Uma vez que todas as condições para a formação de CO nas gotas metálicas em soldas molhadas são atendidas é plenamente justificável que a transferência do tipo curto-circuito irá transferir uma quantidade maior de CO para a poça de fusão.





A Figura 4.56 mostra que a quantidade de gases transportada no interior das gotas depende do tempo de formação e transferência no arco. A menor temperatura do eletrodo juntamente com a instabilidade inicial do arco, maior velocidade de soldagem devido à flexão do eletrodo, menor comprimento de arco e maior quantidade de água no revestimento

promovem a ocorrência de curto-circuito que acaba favorecendo a formação e transporte de gases no interior da gota no início do cordão de solda.



Figura 4.56 – Efeito das alterações no eletrodo revestido durante a soldagem molhada sobre o comprimento do arco e modo de transferência metálica de eletrodos revestidos

A Figura 4.57 mostra o modelo proposto para explicar como os mesmos fatores que causam a ocorrência de curto-circuito no início da solda acabam produzindo uma proteção menos eficiente na parte superior do cordão de solda durante sua solidificação. A exposição mais rápida da escória à água, durante a solidificação da poça de fusão, faz com que os gases transportados nas gotas ou gerados na poça de fusão fiquem aprisionados em maior quantidade em relação ao que ocorre no final da solda. A maior estabilidade do processo juntamente com o maior comprimento de arco no final da solda leva à maior proteção e formação da escória, o que permite maior quantidade de gases escaparem durante a solidificação.



Figura 4.57 – Efeito do comprimento de arco, velocidade de soldagem e tamanho da bolha de gás sobre a formação de porosidade ao longo do cordão de soldas molhadas

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

O estudo da variação da porosidade ao longo do cordão de soldas molhadas e sua relação com as alterações que acontecem nos eletrodos revestidos durante a soldagem resultou nas seguintes conclusões:

- A porosidade do metal de solda apresentou tendência de redução ao longo do cordão e de aumento com a profundidade, nas deposições sobre chapa, utilizando-se os eletrodos E6013 e E7018, e em chanfro utilizando-se eletrodos E6013.
- Ocorreu tendência de aumento do teor de carbono no metal de solda em todas as condições nas quais houve redução de porosidade ao longo do cordão.
- As propriedades mecânicas do metal das soldas produzidas tanto a 50 quanto a 100 m de profundidade com eletrodo E6013 tenderam a ser melhores ao final, confirmando a variação da porosidade e da composição química do metal de solda ao longo do cordão.
- 4. A análise dos sinais de corrente e tensão no tempo revelou que tende a ocorrer redução no número de curtos-circuitos e no desvio padrão da tensão de arco e aumento no valor médio da tensão de arco ao longo do cordão das soldas molhadas.
- Em todas as condições testadas, o eletrodo E6013 produziu cordões de solda com menor porosidade e melhor aparência com a corrente de soldagem em polaridade inversa.
- O eletrodo E7018 não apresentou variações significativas em relação à porosidade quando se variou a polaridade da corrente de soldagem.
- O aquecimento do eletrodo revestido durante a soldagem molhada, que resulta em uma elevação da temperatura da ordem de 50°C, não se revelou preponderante para a variação da porosidade ao longo do cordão de solda.
- A medição dos ciclos térmicos revelou que não ocorreu pré-aquecimento da parte final da chapa durante a soldagem molhada.
- A aplicação de um elemento com menor energia de formação de seu óxido do que o carbono (alumínio metálico) em eletrodos tubulares revestidos pode a tornar a porosidade constante ao longo do cordão de soldas molhadas.
- 10. O grande número de curtos-circuitos e a instabilidade no início da soldagem foram os principais fatores que contribuíram para que a porosidade tendesse a ser maior na parte inicial do cordão das soldas molhadas.

CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver o processo de produção do eletrodo tubular revestido e definir um teor correto de alumínio que permita reduzir a porosidade ao longo do cordão em níveis inferiores ao encontrado ao final das soldas feitas com o eletrodo convencional E6013 em polaridade inversa.
- Avaliar a porosidade de soldas feitas com eletrodos e em chapas com teor de carbono próximo a 0,005%.
- Avaliar a influência da adição de grafite no interior de eletrodos tubulares revestidos sobre a porosidade de soldas molhadas.
- Desenvolver um sistema robótico que permita controlar a tensão do arco elétrico ao longo do cordão de soldas molhadas.
- Avaliar a porosidade do metal de soldas feitas fora da posição.
- Avaliar o comportamento da porosidade ao longo do cordão de soldas molhadas feitas com eletrodos oxidantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. W. Exothermically-Assisted Shielded Metal Arc Welding. Golden, Colorado, EUA: Colorado School of Mines, 163f, Dissertação, 1994,.

AMERICAN WELDING SOCIETY. Specification for Underwater Welding. ANSI/AWS D3.6M:1999.

ANDO, S., ASAHANI, T. A Study on the Metallurgical Properties of Steel Welds with Underwater Gravity Welding. Underwater Welding: Proceedings of the International Conference held at Trondheim, Norway. International Institute of Welding, 1983 apud ROWE M. D., Effect of Ferro-Alloy additions and Increasing Depth on the Quality of Underwater Wet Steel Welds. Golden, Colorado, EUA: Colorado School of Mines, Dissertação, 1999.

ANDRADE, L. P. C. da SILVA. **Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação, 124f, 1995.

BRACARENSE, A. Q. Shielded Metal Arc Welding Electrode Heating Control by Flux Ingredients Substitution. Golden, Colorado, EUA: Colorado School of Mines, Tese, 1994.

BRANDI, S., TANIGUCHI, C. e LIU, S. 1991. Analysis of Metal Transfer in Shielded Metal Arc Welding. Welding Journal 70(10): 261s-270s.

CAMPBELL, JOHN (2001). **Castings**. Elsevier. Online version available at: http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=711&VerticalID=0

CHEN, J. H. e KANG, L. Investigation of the Kinetic Process of Metal-Oxigen Reaction During Shielded Metal Arc Welding, Welding Journal 68(6): 245s – 251s, 1989. apud

CHRISTENSEN, N., The metallurgy of underwater welding. Underwater Welding IIW Conference. Trondeheim. pp. 45-57. Pergamon Press, Abril, Inglaterra, (1983).

FELIZARDO, I. **Estudo Numérico e Experimental do Aquecimento de Eletrodos Revestidos Durante a Soldagem.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais Tese (2003).

FILHO, J. da C. P., MEDEIROS, R. C. de, MELLO, R. S. T. e, e PARANHOS R. P. da R., **Reações Metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada**. Soldagem e Inspeção v. 8, n. 3, p. 94-102, 2003.

FILHO, J. DA C. P., MEDEIROS, R. C. de, MELLO, R. S. T. de, e PARANHOS R. P. DA R., **Histórico Recente da Soldagem Subaquática Molhada**. Soldagem e Inspeção v. 8, n. 3, p. 94-102, (2003b).

GASKELL, D. R., Introduction to Metallurgical Thermodynamics. New York, McGraw-Hill, 1981.

GLICKSTEIN, S.S. e FRIEDMAN, E. 1983. Temperature resistance in gas tungsten arc weldments. Weld. Rev. 5: 72-76.

GOLDAK, J., BIBBY, M., MOORE, J., HOUSE, R., PATEL, B. Computer Modeling of Heat Flow in Welds. Metall. Trans. B. Vol. 17B, no. 3, pp. 587-600. Sept. 1986

GOOCH, T. G. Properties of Underwater Welds. Part 1. Procedures Trials. Metal Construction, pp.164-167, vol.8, March, England, 1983.

GRUBBS, C. E., BERTELMANN, A. E., IBARRA, S., LIU, S., MARSHALL, D. J., OLSON, D. L. Welding Handbook Material and Applications. Part 1. Eighth Edition, Vol. 3. American Welding Society. Miami: 446-500, 1996.

IBARRA, S., GRUPPS, C. E., LIU, S. **State-of-the-Art and Practice of Underwater Wet Welding of Steel.** Proceedings: Internationaal Workshop on Underwater Welding of Marine Structures. New Orleans, Lousiana.pp 49-67, 1994.

IBARRA, S., REED, R. L., SMITH, J. K., PACHNIUK, I., GRUPPS, C. Underwater Wet Welding Repair of an Offshore Platform in the North Sea. Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference. Edinburgh, UK, 11-16 august, 339-346, 1991.

IBARRA, S.; GRUBBS, C., E.; OLSON, D., L. **Metallurgical aspects of underwater welding.** Journal of Metals. Vol. 40, no. 12, pp. 8-10. Dec. 1988 apud ANDRADE, L. P. C. da SILVA. **Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Tubular.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação, 124f, 1995.

IIW. Classification des Divers Modes de Transfert du Metalo en Soudage a L'Arc. IIW DOC XII-535-77, American Council, AWS, Miami, FL. 1977.

ISHIZAKI, K., OISHI, A. KUMAGAI, R. A Method of Evaluating Metal Transfer Characteristics of Welding Electrodes. Physics of the Welding Arc – A symposium, Institute of Welding, London Oct.29 – Nov.2 148-154, Welding Institute, Cambridge, U.K. 1962 apud BRACARENSE, A. Q. Shielded Metal Arc Welding Electrode Heating Control by Flux Ingredients Substitution. Golden, Colorado, EUA: Colorado School of Mines, Tese, 1994.

KRALJ, S., KOZUH, Z., GARASIC, I., DORN, L., **Influence of the water Environment on the Parameters in Underwater wet Welding.** Specialist Articles, Welding and Cutting 55, n° 2, 2003.

LARSON L J. Metal transfer in the metallic arc.Welding Journal 1942 - 21. 2 107-s~112-s

LIU, S., OLSON, D. L., IBARRA, S., Electrode Formulation to Reduce Weld Metal Hydrogen and Porosity. proceedings: 13th Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference. Copenhagen, Denmark. OMAE, pp 291-298, 1994b.

LIU, S., POPE, A. M., and DAEMEN, R. Welding Consumables and Weldability. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, Lousiana, USA, pp.321-350, 1994a.

LORENZO, R. F. D., BRACARENSE, A. Q., PESSOA, E. C. P., 2005. **Discontinuities** evaluation on submerged wet welds. 18th International Congress of Mechanical Engineering: 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG.

MALENE, H. S., Response of exothermic Additions to the Flux-Cored Arc Welding Consumable Electrode. Phd Thesis - Colorado School of Mines, 181f, March 09, 1995, Golden – CO - USA.

MAZZAFERRO, J. A. E., Estudo da Estabilidade do Arco Elétrico na Soldagem Subaquática com Eletrodos Revestidos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, Tese, 1998.

MEDEIROS, R. C. DE., Effect of Oxidizing Electrodes and Polarity on Hydrogen Mitigation in Underwater Wet Welding. Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Tese 164f, 1997.

METALS HANDBOOK. Welding, Brasing, and Soldering. Vol. 6, ASM International. pp. 1010-1015, 1993.

K. C. MILLS, B. J. KEENE, R. F. Brooks, A. Shirali, **Marangoni effects in welding.** Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Volume 356, Issue 1739, 15 Apr 1998, Pages 911 - 925, DOI 10.1098/rsta.1998.0196, URL http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1998.0196

MORAIS, F. C., FERRARESI, V. A. Influência de Parâmetros no Grau de Porosidade em Soldagem Mig de Alumínio. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 02 a 04 de abril de 2001, Curitiba, Paraná, Brasil, 2001.

MURZIN, V., V., e RUSSO, V., L., 1994, Manual Underwater Welding Structures of Steel With Higher Strength. Welding International Vol. 8. No 1.

PEREZ-GUERRERO, F. The Mechanism of Porosity Formation in Underwater Steel Welds Using SMAW Process. Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Tese, 160f, 2007.

PEREZ-GUERRERO, F. e LIU, S., 2005, Maintenance And Repair Welding In The Open Sea. Welding Journal – Vol. 84, No. 11.

PEREZ-GUERRERO, F. Effect of nickel additions on rutile electrodes for underwater welding. Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Dissertação, 84f, 2002.

PEREZ-GUERRERO, F. e LIU, S., 2006, **The Mechanism of Porosity Formation In Underwater Wet Welds.** Abstracts of Papers – 2006 FABTECH International & AWS Welding Show. Atlanta, Georgia, pp 215 – 218.

PESSOA, E. C. P. Estudo Comparativo do Desempenho de Eletrodos Comerciais E6013, E7018 e E7024 em Ambiente Molhado. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil, 2003 (A).

PESSOA, E. C. P. Desenvolvimento de eletrodo tubular revestido com o propósito de testar o efeito da presença de elementos exotérmicos na temperatura do eletrodo, na transferência metálica e na porosidade de soldas subaquáticas molhadas. Relatório de

atividades realizada durante o programa de estágio de doutorando no exterior - CAPES. Julho de 2006 – Golden CO – USA. 31f.

PISTORIUS, P. G. H., LIU, S. Changes in Metal Transfer Behaviour during Shielded Metal Arc welding. Welding Journal, Welding Research supplement, (8), 305s – 315s, 1997.

POPE, A. M. Oxygen and Hydrogen Control in Shielded Metal Underwater Wet Welding. Golden, Colorado, EUA, Colorado School of Mines, Tese, 156f, 1995.

POPE, A.M., LIU, S., TEIXEIRA, J.C.G., dos SANTOS, V.R., PAES, M.T.P. Use of Nickel to Improve the Mechanical Properties of High Oxygen Underwater Wet Welds. OMAE – Materials Engineering, Volume III, pp. 102-117, American Society of Mechanical Engineering (ASME), August, USA, 1995a.

POPE, A.M., MEDEIROS, R. C. de, LIU, S. Solidification of Underwater wet Welds. OMAE, Materials Engineering, pp 517-521, 1995b.

Welding engineer, REID, H., F., It Still Isn't Mud! bulletin N° 1201A.Teledyne McKay, York, Pensylvania, 1998.

ROWE M. D. Effect of Ferro-Alloy Additions and Increasing Depth on the Quality of Underwater Wet Steel Welds, Metallurgical and Materials Engineering Department, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, EUA, Dissertação, 128f, 1999.

ROWE M. D., LIU S. e REYNOLDS T. J. The Effect of Ferro-Alloy additions and Depth on the Quality of Underwater Wet Welds. Welding Journal, August 2002, pp. 156-S-166-S, 2002.

ROWE, M. D., LIU, S. **Recent Development in Underwater Wet Welding.** Science and Tecnology of Welding and Joining, Vol. 6, No. 6. pp 387-396, 2001.

SANCHEZ-OSIO, A., LIU, S., OLSON D. L., IBARRA, S., Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications. Preceedings OMAE; Vol.III-A, pp. 119-128, 1993.

SANTOS, V. R., POPE, A. M., TEIXEIRA, J. C. G. Avaliação do Emprego de Eletrodos Oxidantes na Soldagem Submarina Molhada. Congresso Latino Americano de Soldagem. Rio de Janeiro, 4 a 10 de abril de 1992.

SAPERSTEIN, Z. P. & PRESCOTT, G. R. & MONROE, E. W., **Porosity in aluminum** welds. The Welding Journal Research Supplement. October, 1964. apud MORAIS, F. C., FERRARESI, V. A. **Influência de Parâmetros no Grau de Porosidade em Soldagem Mig** de Alumínio. 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. 02 a 04 de abril de 2001, Curitiba, Paraná, Brasil, 2001.

SATO, Y. e KUWANA, T., **Oxygen Absorption in Iron and Steel Weld Metal.** ISIJ International, Vol. 35, No. 10, Tokyo, June, Japan, 1995.

SILVA, E. A.; HAZLETT, T. H.; Shielded Metal Arc Welding Underwater With Iron-Powdered Electrodes, Welding Journal, 50 (6), June, 406-415, 1971. STERN, I. L. **Overheating of Electrodes,** The Welding Journal 27(7), 522-526, 1948 apud BRACARENSE, A. Q. Shielded Metal Arc Welding Electrode Heating Control by Flux Ingredients Substitution. Golden, Colorado, EUA: Colorado School of Mines, Tese, 1994.

SUGA, Y. The Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties of Underwater Wet Welds in Gravity Arc Welding. Transactions of the japan Welding Society, Vol. 21, N° 2, October, 144-149, 1990.

SUGA, Y., HASUI, A. On formation of porosity in underwater weld metal. Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 17, N^o. 1,1986.

SZELAGOWSKI, P., IBARRA, S., OHLINGER, A., e DOS SANTOS, J. F. The Application of in situ Post Weld Heat Treatment to Wet Welds. Proc. Conf. 'OMAE 92'. American Society of Mechanical Engineers, 142-151, 1992.

TEICHMANN, E. W. **Contribuição ao Desenvolvimento da Soldagem Molhada com Arames Tubulares.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação, 120f, 2000.

TREVISAN, R. E., SCHWEMMER, D.D., e OLSON, D.L. The fundamentals of weld metal pore formation. Welding: Theory and Practice, Chapter 3, p. 79, 1990.

TSAI, C. L. MASUBUCHI, K. Interpretive Report on Underwater Weldng. Welding Research Council Bulletin, 224, February, 37pg, 1977.

WATSON, P.D., TSAI, C.L., WOOD, B. Fitness for service Design Application for Underwater Wet Welds. International Workshop on Underwater Welding of Marine Structures, Lousiana, USA, pp.201-236, 1994.

WERNICKE, R., POHL, R. Underwater Wet Repair-Welding and Strength Testing on **Pipe-Patch Joints.** 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE – 1998.

WEST, T. G., MITCHELL, G. e LINDBERG, E. Wet Welding Electrode Evaluation for Ship repair, Welding Journal, (690), pp.15-24, 1990.

WOOD, B.J. e BRUCE, W.A., Underwater Wet Repair Welding at Depth Approaching 600ft. Proceedings of the International Conference on Underwater Welding. pp. 243. New Orleans, Louisiana. March. USA, (1992) apud FILHO, J. da C. P., MEDEIROS, R. C. de, MELLO, R. S. T. e, e PARANHOS R. P. da R., Reações Metalúrgicas na Soldagem Subaquática Molhada. Soldagem e Inspeção v. 8, n. 3, p. 94-102, 2003.

VAN VLACK, L.H., Oxide Inclusions in Steel. Int. Metals Reviews, pp. 78-86, September, USA, (1977).

ARTIGOS PUBLICADOS, APRESENTADOS OU SUBMETIDOS DURANTE O **DOUTORAMENTO:**

- 1. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Estudo Comparativo do Desempenho de Eletrodos Revestidos E6013, E7024 e E7018 em Soldagem Subaquática em Água Doce do Aço A-36 à Profundidades de 50 e 100 Metros, II COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18 a 21 de maio, Uberlândia, MG, 2003.
- 2. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Study of Porosity Location in Under Fresh Water Wet Welds, OMAE 2003, June 8-13, Cancun, Mexico, 2003a.
- 3. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Cordão de Soldas Subaquáticas Molhadas, XXX CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem. De 13 à 15 de Setembro de 2004, Rio de Janeiro - RJ
- 4. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Study of "Re-Melt" Temper Bead and Polarity Effects on Porosity in The Under Freshwater Wet Welds, Proceedings of OMAE 04, 23RD International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 20-25, Vancouver, Canada, 2004a.
- 5. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., MALUF, E. M. Variação da Porosidade ao Longo de Soldas Subaquáticas Molhadas Multipasses e sua Influência Sobre as Propriedades Mecânicas, III COBEF -Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 12 a 15 de abril, Joinville, SC, 2005.
- 6. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., MALUF, E. M. Covered Electrodes Temperature Variation During Wet Welding and its Influence on Weld Metal Porosity, Proceedings of OMAE0524th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece, 12-17 June, 2005a.
- 7. PESSOA, E. C. P. Desenvolvimento de Eletrodo Tubular Revestido com o Propósito de Testar o Efeito da Presença de Elementos Exotérmicos na Temperatura do Eletrodo, na Transferência Metálica e na Porosidade de Soldas Subaquáticas Molhadas, Relatório de atividades realizadas durante o programa de estágio de doutorando no exterior - CAPES. Julho de 2006 - Golden CO - USA. 31f.
- 8. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., ZICA, E. M.. Variação da Porosidade ao Longo de Soldas Subaquáticas Molhadas Multipasses e sua Influência Sobre As Propriedades Mecânicas, Soldagem & Inspeção, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 23-33, 2006.
- 9. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Exothermic Additions in a Tubular Covered Electrode and Oxidizing Reactions Influence on Underwater Wet Welding, Proceedings of OMAE07. 26th International Conference

156

on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 10-15, 2007, San Diego, California USA.

- PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P., ZICA, E. M. Porosity Variation Along Multipass Underwater Wet Welds and its Influence on Mechanical Properties, Journal of Materials Processing Technology – Elsevier -EUA, v. 179, p. 239-243, 2006.
- 11. LIU, Stephen ; PEREZ, Faustino ; BRACARENSE, Alexandre Queiroz ; PESSOA, Ezequiel Caires Pereira . Evaluation of Commercial SMAW Electrodes in Fresh Water, AWS Annual Convention, 2003, Detroit, Michigan, USA. AWS, 2003.
- LORENZO, R. F. D., BRACARENSE, A. Q., PESSOA, E. C. P., 2005. Discontinuities Evaluation on Submerged Wet Welds, 18th International Congress of Mechanical Engineering: 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG.
- 13. BRACARENSE, A. Q., PESSOA, E. C. P., GONZÁLEZ, L. P., Desarrollo de Electrodos Tubulares Revestidos para la Soldadura Subacuática Mojada, XXXII CONSOLDA - CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 2006, Belo Horizonte. XXXII CONSOLDA. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2006. v. 1. p. 1.
- 14. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Out-Of-Position Wet Welding With AWS-E6013 Electrode Grade at Three Water Depths, 2006 FABTECH & AWS Welding Show, 2006.
- 15. BRACARENSE, Alexandre Queiroz ; PESSOA, Ezequiel Caires Pereira . Fusão Inteligente. CIÊNCIA HOJE, São Paulo, v. 34, p. 48 49, 01 mar. 2004.
- 16. PESSOA, E. C. P., BRACARENSE, A. Q., LIU, S., GUERRERO, F. P. Estudo da Variação da Porosidade ao Longo do Cordão de Soldas Subaquáticas Molhadas, xxx Congresso Nacional de Soldagem, 2004, Rio de Janeiro. CONSOLDA 2004. São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem, 2004. v. 1. p. 1.